

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Abschlussbericht des Verbundprojekts „GaNext“

Verbundprojekt:


Leistungselektronik der nächsten Generation für CO₂-Einsparungen in
Verkehr und Industrie – GaNext -;

Teilvorhaben:

Magnetische Komponenten für die GaN-basierte Leistungselektronik der
nächsten Generation

--- -öffentlicher Teil ---

The logo for GaNext, with 'Ga' in blue and 'Next' in red, underlined.The logo for Σeureka, with a green Greek letter Sigma and 'eureka' in blue.The logo for Penta, with a stylized 'P' in a blue and green hexagon and 'enta' in blue.

Förderkennzeichen:	16EM0080
Laufzeit des Vorhabens:	01.05.2020 - 30.04.2023
Berichtszeitraum:	01.05.2020 - 30.04.2023
Erstellungsdatum:	31.10.2023
Berichtsersteller:	Dipl.-Ing. (FH) Herbert Jungwirth, Dr.-Ing. Michael Schmidhuber
Firma:	Firma Sumida Components & Modules GmbH 
Revision:	1.0

Mikroelektronik. Vertrauenswürdig und nachhaltig. Für Deutschland und Europa

**Rahmenprogramm der Bundesregierung für Forschung und Innovation
2021-2024**

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert und vom Projektträger VDI/VDE-IT betreut.

Die Mikroelektronik bildet den Schlüssel zu bahnbrechenden Innovationen in Bereichen wie Industrie 4.0, intelligenter Medizintechnik und autonomem Fahren. Um die Innovationsdynamik in der Elektronikbranche in diesen Bereichen zu stärken, unterstützt das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) deutsche Unternehmen und Forschungseinrichtungen im Rahmen des EUREKA-Clusters PENTA. Dies geschieht durch die Förderung von bi- und multinationalen Verbundprojekten entlang grenzüberschreitender Wertschöpfungsketten in den genannten Anwendungsfeldern sowie bei der Erforschung neuer Basistechnologien für die künftige Mikroelektroniksystemfertigung in Europa.

Der Bericht stellt die Ergebnisse aus dem Verbundprojekt vor. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Autoren

Zuwendungsempfänger

Firma Sumida Components & Modules GmbH

Die Autoren und die beteiligten Firmen bedanken sich für die finanzielle Unterstützung durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung und für die Betreuung durch den Projektträger VDI/VDE-IT.

Inhaltsverzeichnis

INHALTSVERZEICHNIS.....	5
1 AUFGABENSTELLUNG.....	8
1.1 MOTIVATION.....	8
1.2 GESAMTZIEL DES FORSCHUNGSVORHABENS	8
1.3 BEZUG ZUM BMBF – RAHMENPROGRAMM	12
2 VORAUSSETZUNG, UNTER DER DAS VORHABEN DURCHGEFÜHRT WURDE.....	14
2.1 VERBUNDSTRUKTUR.....	14
2.2 UNTERNEHMENSPROFIL SUMIDA COMPONENTS & MODULES GMBH, SOWIE VORARBEITEN.....	14
3 PLANUNG UND ABLAUF DES VORHABENS	16
3.1 ZEIT- UND MEILENSTEINPLANUNG	16
4 WISSENSCHAFTLICHER UND TECHNISCHER STAND ZU BEGINN UND ENDE DES VORHABENS.....	17
4.1 WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHER STAND BEI PROJEKTBEGINN.....	17
4.2 WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHER STAND BEI PROJEKTENDE.....	18
5 ZUSAMMENARBEIT MIT ANDEREN STELLEN AUßERHALB DES VERBUNDPROJEKTS	20
6 ERZIELTES ERGEBNIS.....	21
6.1 VORBEMERKUNG.....	21
6.2 AP 8.1 – CHARAKTERISIERUNG VON ABSORBER- UND LEISTUNGSFERRITMATERIALIEN ZUR ANWENDUNG BEI HOHEN ARBEITSFREQUENZEN	23
6.3 AP8.2 - ENTWICKLUNG UND ANWENDUNG NEUER SIMULATIONSMETHODEN FÜR INDUKTIVE KOMPONENTEN IN HOCHFREQUENZANWENDUNGEN.....	32
6.4 AP8.3 - AUSLEGUNG, AUFBAU UND TEST DER MAGNETISCHEN BAUTEILE FÜR DIE EINZELANWENDUNGEN.....	38
6.5 AP8.4 - INTEGRATION DER MAGNETISCHEN KOMPONENTEN UND AUSARBEITUNG VON KÜHLKONZEPTEN.....	41
6.6 AP8.5 - TEST UND VERIFIZIERUNG DER KOMPONENTEN AUF SYSTEMEBENE.....	43
7 NUTZEN FÜR DAS UNTERNEHMEN, INSBESONDERE VERWERTBARKEIT DES ERGEBNISSES	49
7.1 WIRTSCHAFTLICHE ERFOLGSAUSSICHTEN.....	49
7.2 ENERGETISCHE UND ÖKONOMISCHE BEWERTUNGEN.....	50
7.3 WISSENSCHAFTLICHE UND WIRTSCHAFTLICHE FORTFÜHRUNG.....	50
8 DARSTELLUNG DES WÄHREND DES VORHABENS BEKANNT GEWORDENEN FORTSCHRITTS AUF DIESEM GEBIET BEI ANDEREN STELLEN	51
9 VERÖFFENTLICHUNGEN, VORTRÄGE, REFERATE, ETC.....	51
10 LITERATURVERZEICHNIS	51

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: GaNext GaN IPM Entwicklung. CGD entwickelte den GaN Chip, Infineon entwickelte den Gate Driver, Advico und Fraunhofer IMS entwickelten den Si-Controller, die TU Dortmund führte das Design der der Leistungselektronik auf der Leiterplatte, Besi entwickelte die Umspritzung für das IPM und CSAC führte die Anwendungstests durch.	9
Abbildung 2: Sumida entwickelte die Magnetik zur Unterstützung die verschiedenen Anwendungspartner bei der Integration von GaN IPM zu unterstützen, Neways entwickelte den PV-Wechselrichter, Signify entwickelte ein Lampenvorschaltgerät für Gewächshäuser, MACCON entwickelte einen Demonstrator für einen Motorantrieb, TU/e entwickelte Hochfrequenz-Modulationsstrategien und Lyra entwickelte den Prototyp des On-Board-Ladegeräts	10
Abbildung 3: Typische Anwendungsbereiche magnetischer Werkstoffe von Sumida	12
Abbildung 4: Experimentell ermittelte Performance Faktoren für verschiedene Leistungsferrite ...	17
Abbildung 5: Exemplarischer Vergleich von gemessenem (rot) und simuliertem (schwarz) Wirkwiderstand zweier magnetischer Komponenten mit unterschiedlichen Hochfrequenzlitzen; links: 1000 Adern mit 0.05mm Einzeladerquerschnitt; rechts: 800 Adern mit 0.071mm Einzeladerquerschnitt; Messung mit Impedanzanalysator Agilent 4294A; Simulation mit FE	18
Abbildung 6: Projekt Gesamtstruktur und jeweiliger Beitrag der Partner	21
Abbildung 7: Bauteilzuordnung zu den jeweiligen Projektpartnern	22
Abbildung 8: Typische Hysteresekurve	24
Abbildung 9: Stromverlauf mit DC Vorspann	24
Abbildung 10: Displacement-Factor-Fi395	26
Abbildung 11: Displacement-Factor Fi337	26
Abbildung 12: Impedanzverlauf verschiedener Sumida Ferritmaterialien	29
Abbildung 13: Rohdaten vor und nach der Ümhüllung Fi 360 – Fi 320 – Fi 301	30
Abbildung 14: Impedanzverlauf unterschiedlicher Materialien	30
Abbildung 15: Übersicht der Rahmenkerne und Ringkern	31
Abbildung 16: Real- und Imaginärteil der komplexen Permeabilität in Abhängigkeit des Kernvolumens	31
Abbildung 17: : Impedanz Verlauf unterschiedlicher Kerngrößen	32
Abbildung 18: Induktivitätsverlauf Gut- und Schlecht-Bauteil	33
Abbildung 19: Kern und Wicklung für Simulationsmodell	34
Abbildung 20: Skin und Proximity Faktor	35
Abbildung 21: : Ringkerne mit unterschiedlichen effektiven magnetischen Querschnitten im experimentellen Aufbau zur Kernverlustmessung	36
Abbildung 23: Vergleich der simulierten (dunkelrot) und gemessenen (blau) Verluste für verschiedene Flussdichten und Frequenzen. Die Fehlerbalken zeigen eine Abweichung von 5 % von den gemessenen Werten an.	37
Abbildung 24: Full-Bridge Kurzschlussstest mit 9A Primärstrom @ 1 MHz	37

Abbildung 25: Common Mode Chokes.....	38
Abbildung 26: Impedanzverlauf Common Mode Chokes	38
Abbildung 27: Boost Induktivität für Neways	40
Abbildung 28: Speicherdrossel mit Wärmeleitpfaden	41
Abbildung 29: Signify 1kW LED Treiber	42
Abbildung 30: Neways 4 kW Solar Inverter.....	43
Abbildung 31: Vorder- und Rückseite Infineon Demoboard.....	44
Abbildung 32: Induktivitätstester mit Infineon Demoboard	45
Abbildung 33: Prüfaufbau mit Demoboard und Prüfling	45
Abbildung 34: Buck-Inductor - 8 A _{DC} + 10 A _{pp} @ 1 MHz	46
Abbildung 35: Temperaturverlauf der Induktivität, Transistoren und Umgebung.....	46
Abbildung 36: Temperaturverschiebung am RM8 Bauteil (Quelle Signify)	47
Abbildung 37: Feldsimulation Asymmetrische Wicklung.....	47
Abbildung 38: Symmetrische & Assymmetrische Wicklung Thermographie und Simulation	48

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Partner GaNext	14
Tabelle 2:Meilenstein-Planung.....	16
Tabelle 3: Übersicht der physikalischen Eigenschaften FI 337.....	19
Tabelle 4: Elektrische Parameter Buck-Drossel.....	33
Tabelle 5: Lastenheft Full-Bridge Trafo	39
Tabelle 6: Berechnung Full-Bridge-Trafo.....	39

1 Aufgabenstellung

1.1 Motivation

GaN-Transistoren sind Verbindungshalbleiter mit großer Bandlücke, die leistungselektronische Systeme revolutionieren. Sie bieten im Vergleich zu Siliziumbauelementen einen geringeren Bahnwiderstand, schnellere Schaltzeiten und geringere Durchlassverluste. GaN ermöglicht höhere Betriebsfrequenzen, was zu kleineren passiven Bauelementen und kompakteren leistungselektronischen Systemen führt. In GaNext arbeiteten 13 Partner zusammen und entwickelten ein GaN-basiertes intelligentes Leistungsmodul (IPM) zur Integration von Treiber-, Steuerungs- und Schutzschaltungen.

1.2 Gesamtziel des Forschungsvorhabens

Galliumnitrid (GaN) ist wohl das vielversprechendste Material, um Silizium in Leistungselektronikanwendungen im 650-V-Marktsegment zu ersetzen. Dieser Sektor hat einen geschätzten Umsatzwert von mehreren Milliarden und die Anwendungen reichen von Stromversorgungen, Blindleistungskompensation, AC/DC-Wandlern und kabellosem Laden bis hin zu Wechselrichtern in Elektrofahrzeugen. Stromversorgungssysteme auf Basis von GaN sind leichter, kompakter, deutlich effizienter und potenziell kostengünstiger als solche auf Basis von Silizium. Die hohe Schaltgeschwindigkeit und die niedrige Gate-Spannung moderner GaN-Bauelemente machen ihre Verwendung jedoch zu einer Herausforderung.

Das Ziel des Projekts "GaNext" war es, die Hindernisse für die Einführung von GaN zu beseitigen und die höhere Effizienz und Kompaktheit von GaN-basierten Systemen in einer Reihe von Stromversorgungssystemen zu realisieren. Der Kern des Projekts bestand in der Entwicklung eines intelligenten GaN-Leistungsmoduls, bei dem die Treiberschaltung, die Spannungsregelung und die Schutzschaltungen integriert oder co-verpackt sind mit dem Leistungsmodul.

Das neue vorgeschlagene integrierte Leistungsmodul behebt einige wesentliche Probleme bei aktuellen Schaltkreisen auf Basis von GaN (Galliumnitrid). Derzeit hat GaN bestimmte Vorteile, aber seine Schaltgeschwindigkeit muss verlangsamt werden, um Hochfrequenzoszillationen zu verhindern. Dies bedeutet, dass Benutzer nicht vollständig von den Möglichkeiten von GaN profitieren können. Durch die Integration einiger passiver Komponenten in das Modul hat GaNext diese Oszillationen reduziert und auch die elektromagnetische Interferenz verringert. Ein weiteres Problem ist, dass Verzerrungen der Gate-Spannung zu unzuverlässigem Schalten der Transistoren führen können. Mit dem maßgeschneiderten Design des GaNext Gate-Treibers und seiner engen Integration mit Hilfsschaltungen auf dem GaN-Integrierten Schaltkreis (IC) wurden diese Verzerrungen minimiert und die Zuverlässigkeit des Schaltens verbessert. Um das volle Potenzial von GaN freizusetzen, wurde ein Hochgeschwindigkeits-Steuer-IC mit fortschrittlichen Sicherheitsfunktionen hinzugefügt, und die Wärmeableitung wurde verbessert. Darüber hinaus wurden Strom- und Temperatursensoren direkt in den GaN-IC integriert. Dies ermöglicht eine signifikante Erweiterung des sicheren Betriebsbereichs des Systems. Zusätzlich wurde eine dedizierte Verpackung für das Leistungsmodul entwickelt, die den GaN-Leistungstransistor, die Regel- und die Ansteuerschaltung umfasst. Die Funktion des Moduls wurde erfolgreich demonstriert und bietet einen Wettbewerbsvorteil in Stromsystemen wie Ladegeräten für Elektrofahrzeuge (EV), Beleuchtung, Antrieben und Photovoltaik (PV)-Wechselrichtern, die alle optimierte magnetische Komponenten aufweisen. Durch die Behandlung dieser verschiedenen Aspekte ist GaNext IPM zu einer zentralen Komponente der nächsten Generation von GaN-Leistungssystemen geworden.

Technologische Errungenschaften

Das Projekt hatte zum Ziel, zwei Hauptprobleme im Zusammenhang mit der Einführung von GaN (Galliumnitrid) anzugehen und konkrete Ergebnisse zu erzielen. Die wichtigsten Errungenschaften umfassen:

Ziel 1: Beseitigung von Hindernissen für die Einführung von GaN

Das Projekt hat erfolgreich ein intelligentes GaN-Leistungsmodul im Verbund (siehe Abbildung 1) entwickelt, das GaN-Technologie in ein kompaktes und effizientes Leistungsmoduldesign integrierte. Diese Errungenschaft sollte Herausforderungen wie begrenztes Wissen, hohe Kosten und komplexe Integration im Zusammenhang mit der Einführung von GaN überwinden

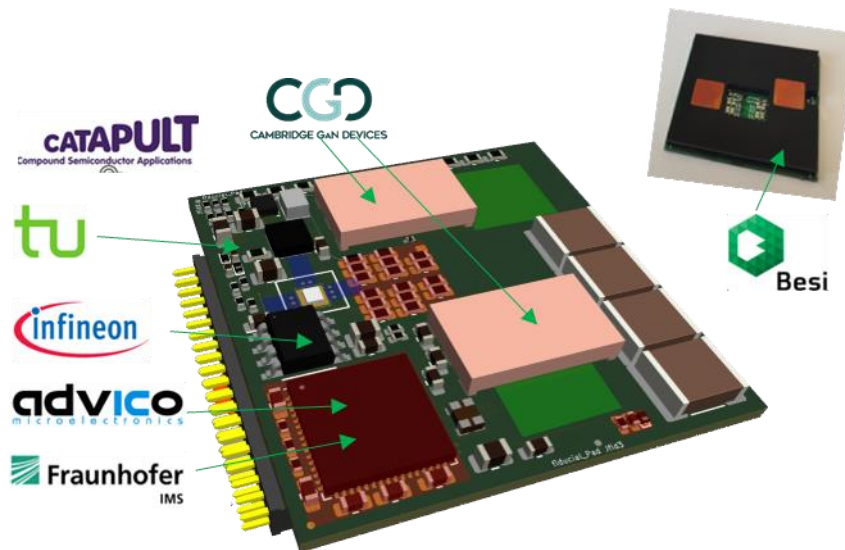


Abbildung 1: GaNext GaN IPM Entwicklung. CGD entwickelte den GaN Chip, Infineon entwickelte den Gate Driver, Advico und Fraunhofer IMS entwickelten den Si-Controller, die TU Dortmund führte das Design der der Leistungselektronik auf der Leiterplatte, Besi entwickelte die Umspritzung für das IPM und CSAC führte die Anwendungstests durch.

Ziel 2: Nachweis einer höheren Effizienz und Kompaktheit von GaN-basierten Systemen

Das Projekt hat erfolgreich die höhere Effizienz und Kompaktheit von GaN-basierten Systemen in einer Reihe von Leistungssystemen demonstriert (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Diese Errungenschaft validierte das potenzielle Nutzen von GaN-Technologie, einschließlich verbesserter Energieeffizienz und kleinerer Größe von Leistungselektronik.

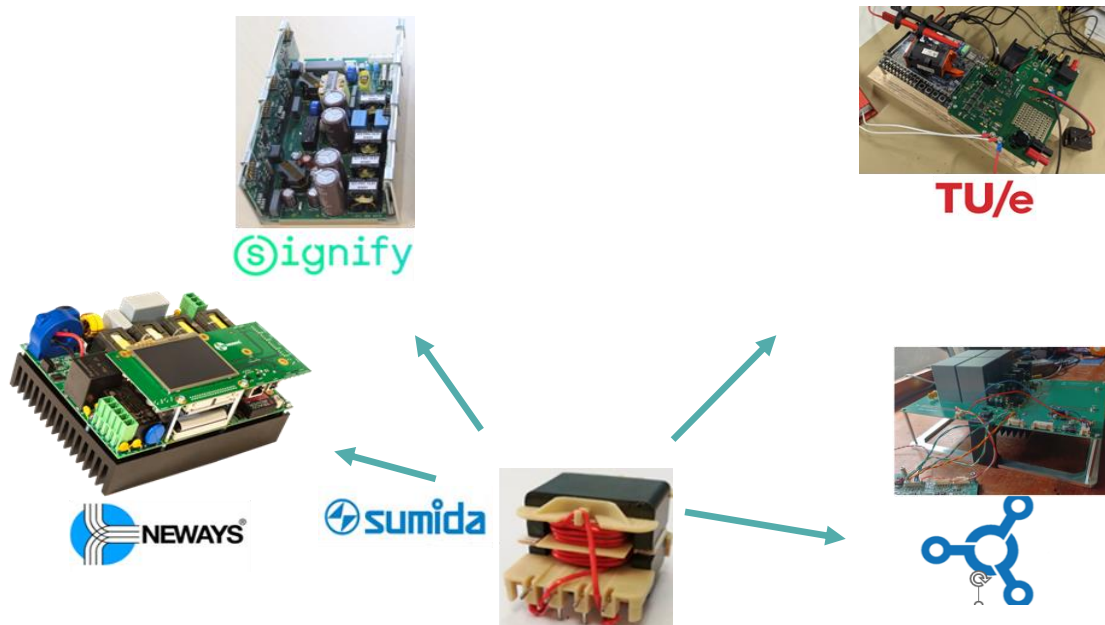


Abbildung 2: Sumida entwickelte die Magnetik zur Unterstützung der verschiedenen Anwendungspartner bei der Integration von GaN IPM zu unterstützen, Neways entwickelte den PV-Wechselrichter, Signify entwickelte ein Lampenvorschaltgerät für Gewächshäuser, MACCON entwickelte einen Demonstrator für einen Motorantrieb, TU/e entwickelte Hochfrequenz-Modulationsstrategien und Lyra entwickelte den Prototyp des On-Board-Ladegeräts

Das Projekt GaNext erzielte Durchbrüche in folgenden vier Hauptbereichen:

1. GaN-auf-Si-Leistungintegrierter Schaltkreis (IC) (650V, bis zu 70A) mit integrierten Sensorelementen und Antriebselementen.
2. Si- und GaN-Niederspannungslogik, Steuerung und Level-Shift-Silicon-on-Insulator (SOI)-Gate-Treiber-Schaltung.
3. Herstellung einer dedizierten Umspritzung für das Leistungsmodul, die den GaN-Leistungstristor sowie die Steuerungs- und Antriebsschaltung enthielt.
4. Nachweis des Wettbewerbsvorteils des Leistungsmoduls in Leistungssystemen wie EV-Ladegeräten, Beleuchtung, Antrieben und PV-Wechselrichtern, wobei optimierte magnetische Komponenten zum Einsatz kamen.

1.2.2 Magnetische Komponenten für die GaN-basierte Leistungselektronik der nächsten Generation

Zur Steigerung der elektrischen und thermischen Leistungsfähigkeit magnetischer Bauelemente haben wir im Projekt hochintegrierte Kernbausätze ausgewählt. Dabei erfordern die vielfältigen Schaltungstopologien der jeweiligen Anwendungsfälle jeweils spezifische Auslegungen. Um den Anforderungen unserer Projektpartner gerecht zu werden, waren Anpassungen an bestehenden etablierten Lösungen notwendig.

Am Ende des Projekts stehen nun magnetische Bauelemente zur Verfügung, die gezielt auf den erweiterten Frequenzbereich und die begrenzten Bauraumvorgaben in den jeweiligen Anwendungen zugeschnitten sind. Dies wurde durch den Einsatz sorgfältig ausgewählter Ferrite erreicht, die eine Minimierung der Verlustleistung im gewünschten Frequenz- und Temperaturbereich ermöglichen. Ebenso konnten Verluste durch innovative Wickelgeometrien reduziert werden, was wiederum die Leistungsintegrität verbessert und die Integration passiver Induktivitäten in den verwendeten Wandlern ermöglicht, um die Leistungsdichte zu steigern.

Eine weitere innovative Neuerung besteht in der Minimierung der Verlustleistung von Transformatoren und Speicherdrosseln im Frequenzbereich von 400 kHz bis ungefähr 2 MHz. Untersuchungen aller Projektpartner haben den Weg für diese Technologie in den angestrebten Anwendungen geebnet. Durch die Auswahl geeigneter Topologien bietet dieser Ansatz die Möglichkeit, die Baugröße weiter zu reduzieren und die Kühlung zu verbessern.

Um die spezifischen Materialverluste zu minimieren, hat Sumida Forschungen zur Charakterisierung von Ferritwerkstoffen durchgeführt. Im Rahmen der Auslegung und Optimierung wurden Ansätze zur Anpassung der Verlustleistung zwischen dem Kern und der Wicklung zur Optimierung der Wärmeableitung untersucht. Darüber hinaus wurden Untersuchungen zu Kernformen, Wickelaufbauten und der Integration von Einbettmaterialien in das Gehäuse durchgeführt.

1.2.2 Herausforderungen

Im Rahmen dieses Projekts wurden die Wandler-Topologien unter besonderer Berücksichtigung der optimalen Schaltfrequenzen entwickelt. Der Einsatz solcher Betriebsfrequenzen ist bei DC/DC-Wandlern mit niedrigen Spannungen gut etabliert. Allerdings wurde erst in den letzten Jahren, insbesondere bei höheren Betriebsspannungen und Leistungsbereichen im Kilowatt-Bereich, ein solcher Technologiesprung möglich, dank einer erheblichen Verbesserung der magnetischen Eigenschaften der Kernwerkstoffe sowie optimierter Wicklungsaufbauten und Leiterstrukturen.

Durch die Erhöhung der Schaltfrequenz konnten die passiven Bauelemente der Wandler erheblich verkleinert werden. Dadurch wurde ein erheblicher Teil des Gewichts und des Volumens eingespart, der bisher den passiven Bauelementen zugeschrieben wurde.

Die Verkleinerung der passiven Bauelemente führte außerdem zu einer Reduzierung des benötigten Materials wie Kupfer, Ferrit und Kunststoffen. Dies trägt zur Senkung der Produktionskosten der einzelnen Bauelemente und des Gesamtsystems bei, während gleichzeitig knappe Ressourcen geschont werden. Die Entwicklung dieser speziellen induktiven Bauelemente mit hoher Frequenztauglichkeit ist ein wesentlicher Bestandteil des Gesamtprojekts und markiert einen bedeutenden Innovationssprung hin zu kompakteren Leistungswandlern in der gesamten Mikroelektronik.

1.2.2 Problemstellung

Im Rahmen dieses Projekts wurden die neuartigen induktiven Komponenten in unterschiedlichen Wandlern als Demonstrator aufgebaut und in Funktion genommen. Diese Wandler weisen eine extrem hohe Leistungsdichte bei gleichzeitig sehr hohem Wirkungsgrad auf. Die Schaltfrequenz dieser Wandler wurde bewusst gewählt, um die Chipfläche zu minimieren und den Wirkungsgrad dennoch deutlich über 90% anzuheben. Dies führte zu einem enormen Entwicklungsschritt in der Leistungselektronik.

In modernen Leistungskonvertern mit Betriebsfrequenzen über einigen 100 kHz kommen fast ausschließlich Ferrite als Kernwerkstoffe zum Einsatz. Ein wichtiger Schritt wird sein, die Ummagnetisierungsverluste unter eventueller Berücksichtigung der DC-Vormagnetisierung der Werkstoffe (Abbildung 1) gerade bei höheren Betriebsinduktionen und höheren Betriebsfrequenzen gezielt zu erforschen. Die Werkstoffverluste steigen in den bekannten Frequenzbereichen nach Steinmetz mit der Frequenz exponentiell um das 1,5fache und mit der magnetischen Induktion B zusätzlich noch exponentiell um das 2,5fache. Der Zielbereich in Abbildung 3 zeigt, dass man sich hier im Grenzbereich bei der Betriebsinduktion bewegen muss.

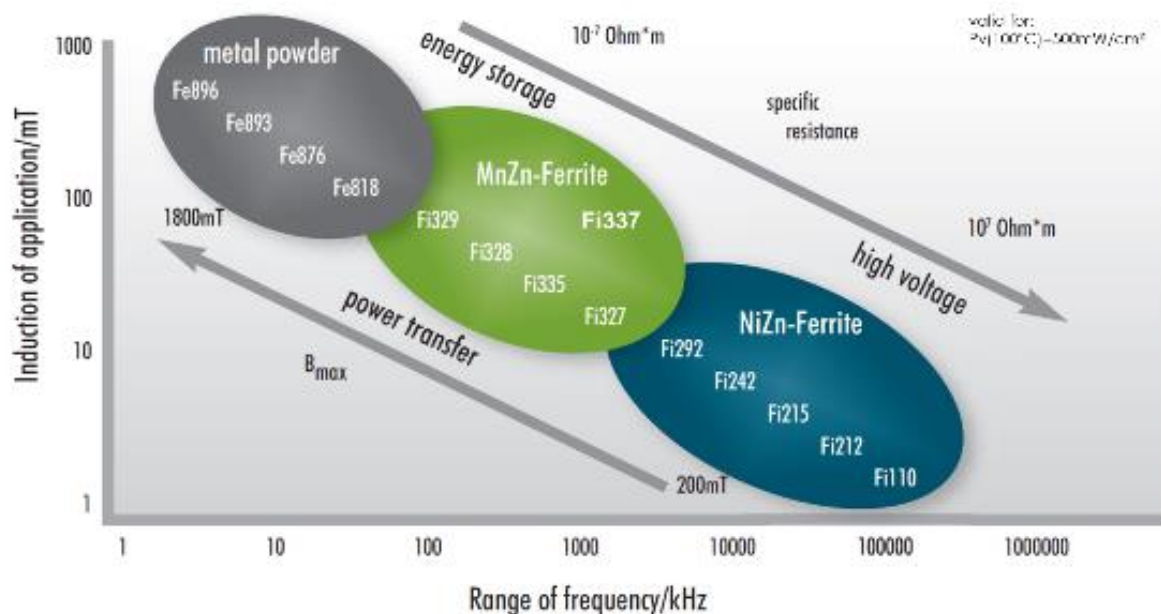


Abbildung 3: Typische Anwendungsbereiche magnetischer Werkstoffe von Sumida

1.3 Bezug zum BMBF – Rahmenprogramm

Eine globale wirtschaftliche Entwicklung, die allein auf dem zunehmenden Verbrauch von endlichen Rohstoffen wie Kohle, Öl und Gas basiert, ist nicht zukunftsfähig. Eine Lösung dieses Problems stützt sich auf einen konsequenten Einstieg in das Zeitalter der erneuerbaren Energien und eine deutliche Steigerung der Energieeffizienz. Ein solcher Umbau der Energieversorgung, zu der letztlich auch die Treibstoffversorgung gehört ist unumgänglich, denn nur so können den globalen Tendenzen der Bevölkerungsentwicklung, der zunehmenden Industrialisierung der Entwicklungs- und Schwellenländer sowie der damit verbundenen Ressourcenknappheit und Klimawandel begegnet werden. Deutschland ist eines der wichtigsten und innovativsten Industrieländer der Welt und als solches muss es Antworten auf die Anforderungen der Zukunft finden. Diese lauten: das globale Klima schützen und den Strukturwandel hin zu einer zukunftsfähigen, modernen Wirtschaft organisieren.

Dazu müssen die richtigen Technologien gefunden und entwickelt werden, international für Lösungen geworben werden, um schließlich Deutschland für die Leitmärkte von morgen stark zu machen.

Die beschriebenen Herausforderungen drehen sich um die Frage, wie wir unser Leben und unsere Volkswirtschaft so gestalten können, dass weniger fossile Rohstoffe verbraucht werden und der CO₂-Ausstoß drastisch sinkt. Die Klima- und Energiepolitik spielen dabei eine zentrale Rolle und die Bundesregierung hat sich im Energiekonzept eine Reihe von ambitionierten Zielen gesetzt. Um die Klima- und Energieziele zu erreichen, wird auf den Ausbau der erneuerbaren Energien, die Steigerung der Energieeffizienz sowie die Entwicklung von CO₂-armen Technologien gesetzt. Da Klimaschutz ein zentraler Wachstumstreiber des 21. Jahrhunderts ist, trägt diese Strategie maßgeblich dazu bei, den wirtschaftlichen Erfolg Deutschlands mittel- und langfristig zu sichern. Außerdem sendet die Energiewende wichtige Signale im internationalen Raum, was dazu beiträgt, den Innovationsstandort Deutschland weltweit sichtbar zu machen.

Die Steigerung der Effizienz und somit die Einsparung von Rohstoffen ist zentraler Punkt des Projekts GaNext. Spannungswandler mit einer sehr hohen volumen- und massebezogenen Leistungsdichte und gleichzeitig hohem elektrischen Umwandlungsgrad steigern die Effizienz mobiler und stationärer elektrischer Systeme.

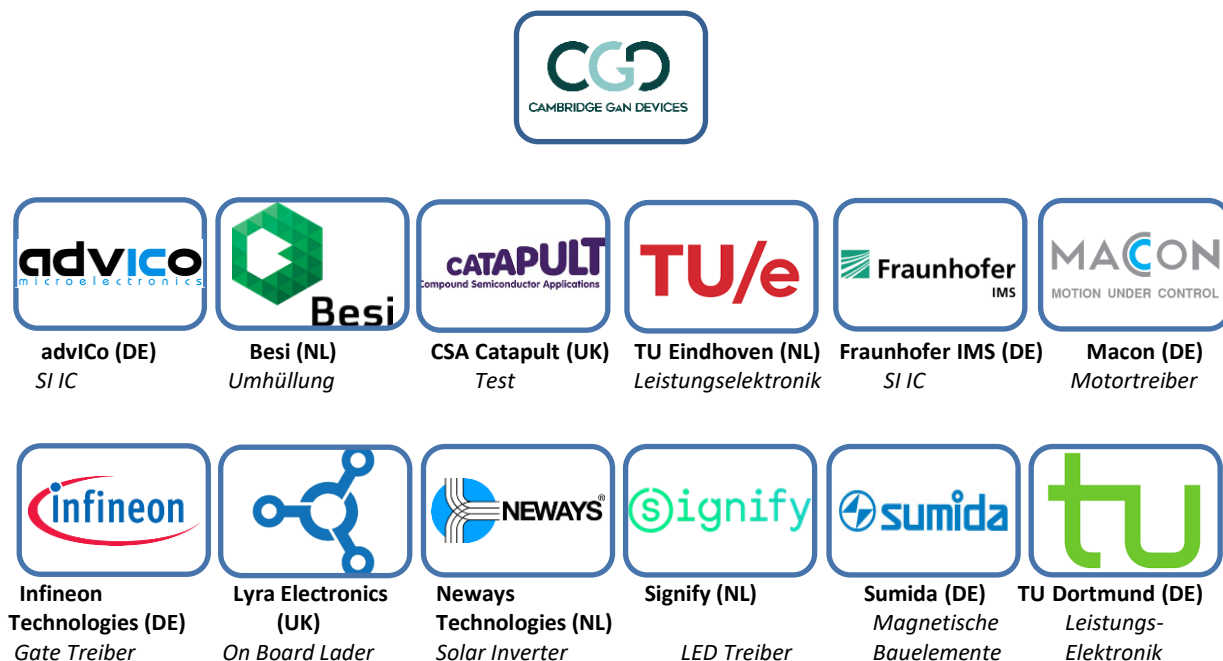
Im Nationalen Entwicklungsplan Mikroelektronik der Bundesregierung werden die Marktvorbereitung und die Markteinführung von batterieelektrisch betriebenen Straßenfahrzeugen als Ziel genannt. Das Projekt GaNext kann auch hierzu einen großen Beitrag leisten, da für die voranschreitende Elektrifizierung des Antriebsstrangs hochkompakte, leichte Gleichspannungswandler unabdingbar sind. In diesem Projekt gewonnene Ergebnisse können Entwicklungen auf diesem Gebiet stark vorantreiben.

2 Voraussetzung, unter der das Vorhaben durchgeführt wurde

2.1 Verbundstruktur

Im Konsortium arbeiteten sechs deutsche Unternehmen, vier Partner aus den Niederlanden und drei aus Großbritannien eng zusammen, um die gesamte Wertschöpfungskette für Leistungssteller in Europa abzudecken. Dies gewährleistet eine zügige Umsetzung der erzielten Ergebnisse. Die Partner konnten dabei aufgrund ihrer bisherigen Forschungsaktivitäten und Vorprojekte auf dem neuesten Stand der Technik aufbauen. Die Resultate dieses Projekts präsentieren eine Vielzahl innovativer Ansätze und weisen den Weg zu zukünftigen Serienprodukten im Bereich der Energietransformation für den Produktionsstandort Deutschland.

Tabelle 1: Partner GaNext



2.2 Unternehmensprofil Sumida Components & Modules GmbH, sowie Vorarbeiten

Die Sumida Components & Modules GmbH ist ein führender deutscher Hersteller von induktiven Bauelementen und Funktionsmodulen, der unter der Marke VOGT auf eine über 80-jährige Tradition und umfangreiche Erfahrung zurückblicken kann. Kernkompetenzen des Unternehmens umfassen die Entwicklung, Fertigung und den Vertrieb von induktiven Bauelementen und Modulen. Eine besondere Expertise besteht in der Entwicklung und Herstellung von Ferriten, Plastroferriten und Eisenpulverwerkstoffen, die bis in die Gründerzeit von VOGT zurückreicht. Zusätzlich zur induktiven Technologie ist die Verarbeitung von Spritzkunststoffen ein weiterer Schwerpunkt, der die Entwicklung einzigartiger Produkte ermöglicht. Mit einem umfangreichen Sortiment von mehr als 3.000 Produkten für verschiedene Bereiche der Elektrotechnik bietet die Sumida Components & Modules GmbH eine breite Palette kundenspezifischer Lösungen an.

Sumida Components & Modules GmbH zeichnet sich unter der Marke VOGT im Markt durch Innovation, technologische Spitzenposition und Qualitätsführerschaft aus. Die hauseigene

Entwicklung von magnetischen Werkstoffen, insbesondere im Bereich Ferrite und Eisenpulver, sowie das Design dieser Bauelemente bilden die Grundlage für die Einführung neuer Produkte. Sumida gehört zu den Marktführern in Bezug auf Antennendesigns und Fertigungsverfahren für Wegfahrsperren und Keyless-Entry-Systeme, dank fortschrittlicher Designs und Herstellungsprozesse.

In der aufstrebenden Branche der Elektromobilität bietet Sumida einen eigenen Rotorlagesensor auf Wirbelstrombasis an, der für zahlreiche neue Automobilplattformen geeignet ist. Darüber hinaus entwickelt das Unternehmen im Bereich der Leistungselektronik neue Bauteil-Designs, die Leistungen von mehreren Kilowatt und darüber hinaus bereitstellen können.

In der jüngsten Vergangenheit hat sich der Trend in der Leistungselektronik von standardisierten Bauelementen hin zu individuell angepassten induktiven Komponenten für spezifische Probleme und Anwendungen entwickelt. Dieser Trend findet auch in der Entwicklung innovativer Filter in der Leistungselektronik seinen Ausdruck, die optimal auf den verfügbaren Bauraum und das elektromagnetische Verträglichkeitsverhalten zugeschnitten sind.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens

3.1 Zeit- und Meilensteinplanung

Zur effizienten Überwachung des Projektfortschritts und zur frühzeitigen Erkennung möglicher Schwierigkeiten wurden Meilensteine definiert. Diese orientieren sich an den technischen Zielen entsprechend der untenstehenden Projekt-Roadmap.

Im Anschluss sind die für Sumida relevanten Meilenstein aufgelistet

Tabelle 2:Meilenstein-Planung

Nr.	Monat nach Projektstart	Ergebnisse
		<i>Kickoff</i>
M2	6	D8.1: Erste magnetische Bauteile zur Realisierung von Konverterdemonstratoren werden aufgebaut und den Projektpartnern zur Verfügung gestellt
M4	12	D8.2: Simulationsmodelle der neuentwickelten magnetischen Bauteile für die Alpha-Version der jeweiligen Leistungskonverter werden den Projektpartnern zur Verfügung gestellt
	21	D8.3: Prototypen der neuentwickelten magnetischen Bauteile für die Alpha-Versionen sind aufgebaut und getestet
M5	32	D8.6: Prototypen der optimierten magnetischen Bauteile für die Beta-Versionen der jeweiligen Konverter sind aufgebaut und getestet
M6	30	D8.4: Datenblätter und finale Muster der magnetischen Bauteile stehen zur Verfügung
	24/28	D8.5: Elektromagnetische Simulationsmodelle der finalen Muster der magnetischen Bauteile werden den Projektpartnern zur Verfügung gestellt
	34	D8.7: Thermische Simulationsmodelle und Ergebnisse der Verlustsimulationen von Magnetika und Wicklung stehen zur Verfügung

Die Planung der einzelnen Arbeitspakete wurde in einem detaillierten Meilensteinplan festgehalten. Dieser Plan wurde im Verlauf des Projekts aktualisiert. Es kam jedoch zu Verzögerungen bei Sumida im sechsten Meilenstein während des Projekts. Diese Verzögerung hatte jedoch keinen Einfluss auf die Arbeit der anderen Projektpartner und konnte innerhalb der regulären Projektlaufzeit behoben werden.

4 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn und Ende des Vorhabens

4.1 Wissenschaftlich-technischer Stand bei Projektbeginn

Magnetische Materialien

Durch die wachsende Verfügbarkeit von WBG-Halbleitern steigt die Nachfrage nach der Entwicklung magnetischer Bauteile für höhere Schaltfrequenzen und Leistungsdichten. Obwohl bereits erste

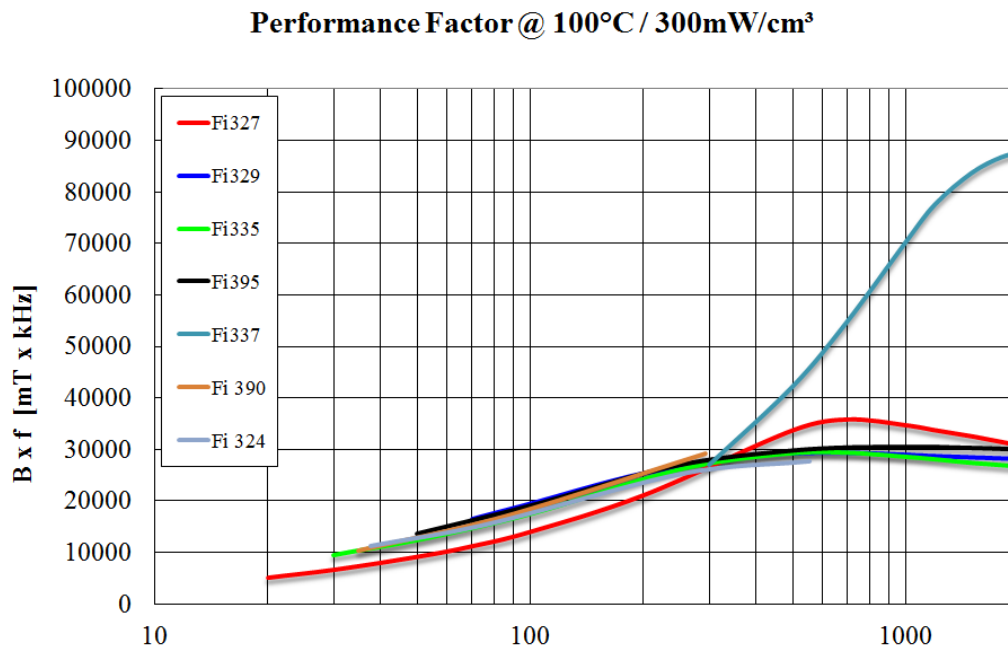


Abbildung 4: Experimentell ermittelte Performance Faktoren für verschiedene Leistungsferrite

marktreife Schaltungen mit SiC-Halbleitern realisiert wurden, sind Leistungselektroniksysteme auf GaN-Basis praktisch nicht vorhanden. Aktuell stehen wir bei Sumida im Automobilsektor vor der Herausforderung, Bauteilanfragen für Leistungsinduktivitäten bis 200 kHz zu bewältigen. In diesem Frequenzbereich kann in der Regel auf Standard Mangan-Zink-Ferrite zurückgegriffen werden, die einen verlustarmen Betrieb bei einigen Hundert Kilohertz ermöglichen. Allerdings wird die Verwendung dieser Materialien bei höheren Frequenzen aufgrund zunehmender Verluste nicht empfohlen.

"Neuartige Ferrite, speziell entwickelt für die Leistungsübertragung im Frequenzbereich von 500 kHz bis 2 MHz, sind nun verfügbar und eignen sich daher ideal für den Einsatz in GaN-Leistungselektroniksystemen. In Abbildung 4 sind experimentell ermittelte Leistungsindikatoren für verschiedene Leistungsferrite dargestellt. Dies ermöglichte in der Vergangenheit die Identifizierung von Leistungsferriten, die besonders gut für verlustarme Leistungsübertragung bei hohen Frequenzen geeignet sind. Allerdings gibt es bisher nur begrenzte Erfahrung mit der Integration dieser Materialien in Serienanwendungen oder seriennahen Demonstratoren, da herkömmliche Bewertungen von Ringkernen nur materialbedingte Verluste berücksichtigen. Bei komplexen Kernformen sind jedoch zusätzliche strukturbedingte Verlustmechanismen zu erwarten, deren Beitrag zu den Gesamtverlusten bisher nur wenig erforscht wurde."

Sowohl Kernverluste als auch Wicklungsverluste tragen in gleichem Maße zur Bauteilperformance bei. In GaN-Systemen führt die Erhöhung der Leistungsdichte einerseits zu einer Reduzierung des Wickelraums und damit zu einer erhöhten Verlustdichte. Andererseits sind bei steigender

Schaltfrequenz zusätzliche Verluste aufgrund des Skin- und Proximityeffekts zu erwarten. Die Auswahl des Drahtmaterials oder der Litzen sowie das Wickelschema spielen daher eine zentrale Rolle. Während Volldrahtwicklungen in der Regel genau durch Berechnungen beschrieben werden können, erfordert die Auswahl des optimalen Hochfrequenzlitzenmaterials oft empirische Ansätze, da der Aufbau realer Litzen von idealen Litzen abweicht. Daher liefern Berechnungs- und Simulationsmethoden in der Regel optimistische Ergebnisse.

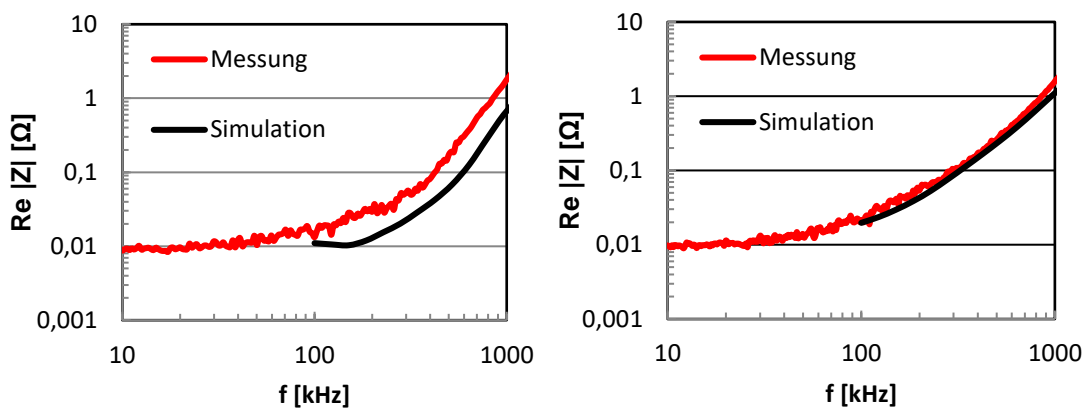


Abbildung 5: Exemplarischer Vergleich von gemessenem (rot) und simuliertem (schwarz) Wirkwiderstand zweier magnetischer Komponenten mit unterschiedlichen Hochfrequenzlitzen; links: 1000 Adern mit 0.05mm Einzeladerquerschnitt; rechts: 800 Adern mit 0.071mm Einzeladerquerschnitt; Messung mit Impedanzanalysator Agilent 4294A; Simulation mit FE

In Abbildung 5 wird ein beispielhafter Vergleich des Wirkwiderstands zweier magnetischer Komponenten dargestellt, bei denen unterschiedliche Hochfrequenzlitzen verwendet wurden. Beide Bauteile wurden mit einem Impedanz Analysator vermessen, und der Hochfrequenzwiderstand wurde anschließend mithilfe der Finite-Elemente-Software FEMM simuliert. Im rechten Bild zeigt sich eine ausreichend gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung, während im linken Bild eine deutliche Abweichung festzustellen ist. Daher lässt sich auf Simulationsebene keine allgemeingültige Aussage über die Wicklungsverluste treffen.

Generell lässt sich beobachten, dass Sumida als Hersteller kundenspezifischer magnetischer Komponenten und Module zunehmend in den Entwicklungsprozess von Systemen einbezogen wird. Dies geschieht aufgrund der Tatsache, dass induktive Bauteile trotz steigender Schaltfrequenzen immer noch einen signifikanten Teil des verfügbaren Bauraums beanspruchen und einen Einfluss auf das elektrische und thermische Verhalten des Gesamtsystems haben. Die Leistungsfähigkeit einer einzelnen Komponente reicht daher oft nicht aus, um die Funktionalität angemessen zu bewerten. Eine umfassende messtechnische Bewertung der Komponenten auf Systemebene erfolgt in der Regel erst spät im Entwicklungsprozess. Dies führt dazu, dass Bauteiloptimierungen oft in letzter Minute vor dem Hochlauf in die Serienproduktion durchgeführt werden müssen, was mit erheblichem Zeit- und Kostenaufwand verbunden ist. Daher gewinnen Simulationsmodelle und -methoden zur Bewertung magnetischer Komponenten zunehmend an Bedeutung.

4.2 Wissenschaftlich-technischer Stand bei Projektende

Eine Erhöhung der Leistungsdichte bei der passiven Komponente in den Demonstratoren konnte zum Ende des Projekts aufgezeigt werden. Bei getakteten Stromversorgungen folgen die physikalischen Eigenschaften der Verlustleistung in der Leistungsdrossel der allgemeinen Trafogleichung sowie der

erweiterten Steinmetzformel. Dabei folgen die Verluste im Ferrit in einfacher Form der sogenannten Steinmetz-Gleichung $P_v = k \cdot f^a \cdot B^b$. Diese Verluste setzen sich dabei hauptsächlich aus Wirbelstrom- und Hysterese Verluste zusammen. Die Faktoren a und b bewegen sich in Intervallen um 1 bis 2 bzw. um 2 bis 3. Zusammen mit den Konsortialpartnern wurde die Betriebsfrequenz, je nach Applikation, auf die den erhöhten Bereich der Betriebsfrequenz von etwa 450 kHz bis ca. 1.5 MHz festgelegt. Dabei zeigten sich signifikante Unterschiede in den Verlusteigenschaften der zur Verfügung stehenden Magnetmaterialien.

Um dieser thermisch dominanten Herausforderung zu begegnen, wurden Materialien erforscht, die sich trotz der reduzierten Baugröße und des damit verbundenen größeren Wärmewiderstands R_{th} nur moderat erwärmen. Zum einen wurde dies mit einem Ferritmaterial erreicht, das niedrigste Verluste bei gleichzeitig höchsten Frequenzen erlaubt. Zum anderen wurde der Wickelaufbau auf eine sehr homogene Feldverteilung optimiert.

Ferrite

Im Rahmen des Fi337-Projekts wurde ein Werkstoff speziell für den Einsatz in Wandlerstufen mit erhöhter Betriebsfrequenz erforscht und in entsprechenden Anwendungsfällen eingesetzt. Seine Eigenschaft, geringe Verluste bei sehr hohen Betriebsfrequenzen aufzuweisen, erwies sich als äußerst vorteilhaft für dieses Projekt.

Die Tabelle 3 zeigt eine Zusammenfassung der Ferriteigenschaften.

Tabelle 3: Übersicht der physikalischen Eigenschaften FI 337

Mn-Zn Ferrit	Beschreibung	μ_i [25°C]	B [mT]	B _{max} [mT]	P _v @ 25°C [mW/cm³]	P _v @ 100°C [mW/cm³]
Fi 337	Hochfrequenz-Leistungsmaterial geeignet für Leistungs- und Standardtransformatoren in einem Frequenzbereich von 0,5 bis 2,5 MHz	700	470 [250 A/m @ 25°C]	> 410 [250 A/m @ 100°C]	30 [1500kHz/25mT]	37 [1500kHz/25mT]

Spulenkörper

Der Spulenkörper erfüllt in herkömmlichen induktiven Systemen eine isolierende und fixierende Funktion. Er gewährleistet außerdem den erforderlichen Sicherheitsabstand zwischen Primär- und Sekundärseite. In diesem Projekt wurden speziell an die Anwendung angepasste Spulenkörper als Träger für die Wicklungsstrukturen verwendet. Dies betraf sowohl die Leistungsinduktivitäten als auch die EMV-Bauteile.

Wicklungsaufbau

Der Aufbau der Wicklung richtet sich normalerweise nach den zulässigen Verlusten und der gewählten Kernform. Ein runder Wickelkörper begünstigt die Gleich- und Wechselstromwiderstände, da er die kürzeste Weglänge in den Wicklungen ermöglicht. Ein Nachteil besteht jedoch in der thermischen Anbindung an das Gehäuse. In diesem Fall bietet sich eine flächige Ausführung an, die an einen planaren Kühlkörper angeschlossen ist. Trotzdem standen Effizienz, Leistungsdichte und damit die Baugröße im Vordergrund. Aufgrund der hohen Schaltfrequenz und der auftretenden transienten hohen Spannungen wurde das "Wickelfenster" nach Möglichkeit in mehrere Kammern aufgeteilt. Um die Skin- und Proximityverluste zu verringern, wurde die Wicklung basierend auf Simulationen und Berechnungen mit Hochfrequenzlitzten ausgeführt.

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen außerhalb des Verbundprojekts

Im Zuge des Verbundprojekts GaNext wurden im Sinne der wissenschaftlichen Weiterbildung sowie des Informationsaustauschs mehrere Workshops und Projekttreffen abgehalten.

6 Erzieltes Ergebnis

6.1 Vorbemerkung

In Arbeitspaket 8 stehen die magnetischen Bauteile der Leistungselektronik und Entstörfilter für die Hochfrequenzanwendungen der Projektpartner aus AP 9 im Mittelpunkt. Sumida hat sich darauf konzentriert, seine eigenen Ferritmaterialien, Charakterisierungs- und Messmethoden sowie Simulationsmodelle auf die im Projekt angestrebten Frequenzen auszurichten. In der ersten Phase des Projekts hat Sumida die Projektpartner hauptsächlich mit Bauteilen aus bewährten Technologien versorgt, um die Entwicklungs- und Messverfahren anhand bekannter Materialien zu optimieren. Gleichzeitig hat Sumida innovative Ferritmaterialien erforscht und bei Bedarf eingesetzt. In der zweiten Projektphase wurden mithilfe der verbesserten Entwicklungsprozesse Bauteile bereitgestellt, die speziell für den Betrieb bei hohen Arbeitsfrequenzen entwickelt und explizit an die jeweilige Einbausituation angepasst wurden. Die erforderlichen Testverfahren wurden in Zusammenarbeit mit den jeweiligen Projektpartnern entwickelt.

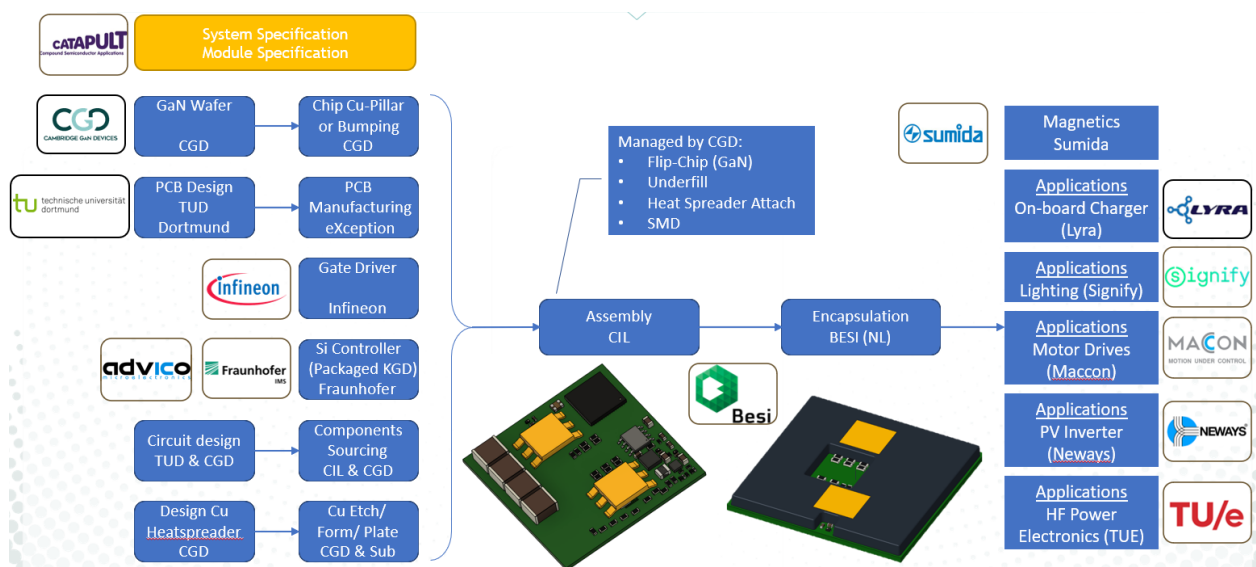


Abbildung 6: Projekt Gesamtstruktur und jeweiliger Beitrag der Partner

Im Projektzeitraum war Sumida an der Erforschung und Entwicklung von induktiven Komponenten für Neways, Signify, Lyra und die TU Eindhoven beteiligt. Die Forschung an den Bauteilen und einzelnen Komponenten wurde vertieft, und abschließende Muster wurden erstellt und an die jeweiligen Projektpartner geliefert.

Die nachfolgende Abbildung 7 gibt einen Überblick über die Projektpartner und die entwickelten finalen magnetische Komponenten.

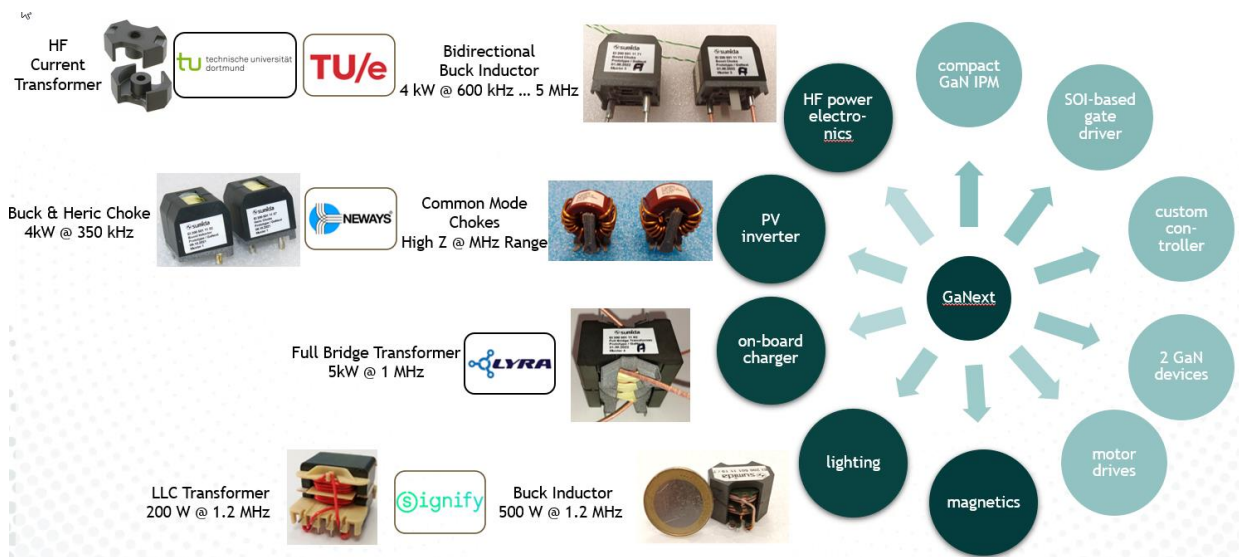


Abbildung 7: Bauteilzuordnung zu den jeweiligen Projektpartnern

Im Folgenden werden die durchgeführten Arbeiten in den jeweiligen Arbeitspaketen vorgestellt.

6.2 AP 8.1 – Charakterisierung von Absorber- und Leistungsferritmaterialien zur Anwendung bei hohen Arbeitsfrequenzen

Ziel von AP8.1 ist die Charakterisierung und Auswahl der magnetischen Materialien und Kernformen für die jeweiligen Leistungselektronikanwendungen.

6.2.1 AP8.1.1 - Charakterisierung und Auswahl der magnetischen Materialien für die Leistungselektronik

Für Entwickler induktiver Bauelemente ist die Verlustleistung von Ferritmaterialien ein wichtiger Parameter. Sie steht in direktem Verhältnis zur Erwärmung des Bauteils unter Betriebsbedingungen. Je nach Topologie werden Ferritkerne oft mit einem überlagerten Gleichstrom, d.h. mit einer unsymmetrischen Anregung, betrieben. Bisher konnten die Verlustleistungen von Ferriten unter DC-Bias nicht aus den Datenbüchern der Hersteller direkt abgeleitet werden.

Um für den späteren Betriebsfall die Kernverluste prognostizieren zu können, wurden unter anderem unterschiedliche Berechnungsmodellen untersucht und auf ihre Einsetzbarkeit im Projekt bewertet:

Die nachfolgende Aufzählung zeigt die untersuchten Verlustmodelle in chronologischer Reihenfolge ihrer zeitlichen Entstehung:

- SE (Steinmetz Equation 1902)
- MSE (Modified Steinmetz Equation 1996)
- GSE (Generalized Steinmetz Equation 2001)
- iGSE (improved Generalized Steinmetz Equation 2002)
- NSE (Natural Steinmetz Extension 2004)
- WcSE (Waveform coefficient Steinmetz Equation 2008)
- EGSE (Expanded Generalized Steinmetz Equation 2009)
- i²GSE(improved improved Generalized Steinmetz Equation 2011)

Karl Steinmetz erkannte um 1902, dass die Fläche innerhalb der Hysterese-Kurve (Abbildung 8) den Kernverlusten (in mW / cm³) pro Zyklus entspricht und setzte diese Tatsache anschließend in folgenden Formalismus (1) um:

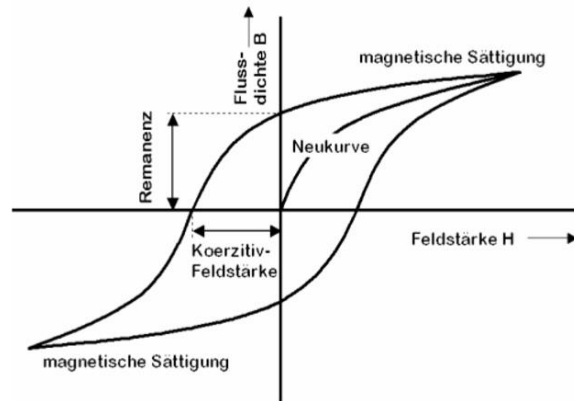


Abbildung 8: Typische Hysterese Kurve

$$P_{\text{core}} = k \cdot f^{\alpha} \cdot \hat{B}^{\beta}$$

Dabei ist P_{core} die mittlere Verlustleistung pro Volumeneinheit, \hat{B} der Spitzenwert der Induktion, k die Kernkonstante und f die Frequenz der sinusförmigen Erregerspannung. Die Koeffizienten α und β sind materialabhängig. Bei Ferriten beispielsweise liegt der Koeffizient α zwischen 1,1 und 1,9, der Koeffizient β im Bereich von 1,6 bis 3. Anhand der „einfachen“ Steinmetz-Formel lassen sich die Kernverluste von Induktivitäten berechnen, deren Kernbauformen auf Industriestandard basieren. Diese Standardkerne weisen die gleiche Geometrie auf, weshalb auch ihre Kernkonstanten identisch sind. Lediglich die entsprechenden Materialcharakteristika müssen in die Gleichung eingesetzt werden.

Dieses Berechnungsmodell wurde im Laufe der Jahre immer mehr verfeinert und an heutige Betriebsparameter angepasst. Die nachfolgende **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigt den typischen, nicht sinusförmigen Stromverlauf i_L mit DC-Offset in einer Induktivität. Dieser Stromverlauf tritt Projekt GaNext zum Beispiel im Solar-Wechselrichter des Projektpartner Neways, oder im Buck-Converter von Signify auf.

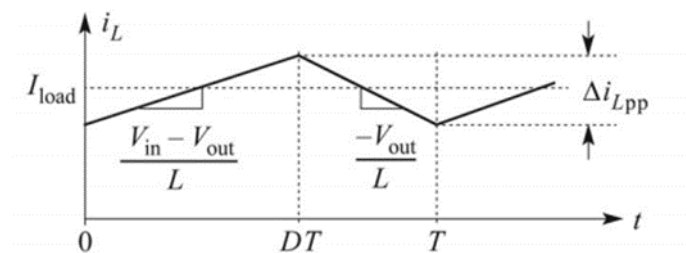


Abbildung 9: Stromverlauf mit DC Vorspann

Bei dieser Stromform zeigt die „einfache“ Steinmetz-Gleichung eine, bis um den Faktor 2 größere Abweichung vom tatsächlichen Verlustwert. Daher wird für derartige Kernerregungen das im Jahre 2011 vorgestellte i2GSE (improved improved Generalized Steinmetz Equation) Berechnungsmodell verwendet. Dabei ist der Koeffizient α unabhängig vom:

- DC-Offset
- der nicht sinusförmigen Erregung

➤ und der Kerntemperatur

Die Kernverluste im Betriebsfall lassen sich wie folgt analytisch berechnen:

$$P_{\text{core}} = V_e \cdot \frac{k'_i \cdot \Delta B^{\beta' - \alpha}}{T} \cdot \left(\left| \frac{V_{\text{in}} - V_{\text{out}}}{N \cdot A_e} \right|^\alpha \cdot D \cdot T + \left| \frac{-V_{\text{out}}}{N \cdot A_e} \right|^\alpha \cdot (1 - D) \cdot T \right)$$

P_{core}	Kernverluste	[W]
V_e	Kernvolumen	[cm ³]
A_e	Magn. Querschnitt	[cm ²]
N	Windungszahl	[1]
ΔB	Induktionsänderung	[T]
V_{in}	Eingangsspannung	[V]
V_{out}	Ausgangsspannung	[V]
D	Tastverhältnis	[1]
T	Periodendauer	[s]
k'_i	Steinmetz Konstante mit DC-Offset	[1]
β'	Steinmetz Koeffizient mit DC-Offset	[1]
α	Steinmetz Koeffizient	[1]

Für schnelle Abschätzungen der Verlustwerte wird in der Praxis häufig jedoch der sogenannte Displacement-Factor – DPF – verwendet. Dieser Faktor beschreibt die Verlustzunahme über der Vormagnetisierung B_{DC} in Abhängigkeit der auftretenden Flussdichte-Amplitude \hat{B} . Die Auswertung dieses Faktors erfolgt graphisch.

Generell ist zu erwarten, dass der DPF mit zunehmender Flussdichte abnimmt. Dies ist aufgrund der Tatsache zu erwarten, da sich \hat{B} der Sättigungsflussdichte B_{Sat} nähert, nähern sich die Gesamtverluste auch einem Grenzwert an. Wenn die Verluste maximal sind, ist keine weitere relative Zunahme möglich, das heißt $\text{DPF} = 1$ für $\hat{B} \rightarrow B_{\text{Sat}}$.

Die Untersuchungsergebnisse bestätigen diese Überlegung. In Abbildung 10 ist die Messung des Displacement-Factors bei vier verschiedenen Flussdichten - 50mT, 100mT, 150mT und 200mT – über der Vormagnetisierung B_{DC} dargestellt.

Der DPF nimmt mit abnehmender AC-Anregung und zunehmenden DC-Vorspann stark zu. Dies ist sehr gut in Abbildung 10 zu erkennen, z.B. bei $\hat{B} = 50 \text{ mT}$ und $B_{\text{DC}} = 250 \text{ mT}$ – hier sind die Verluste um 220% höher als ohne Vorspannung. Für Entwickler bedeutet dies, dass eine Erhöhung der Induktion in einer Anwendung mit DC-Bias den Temperaturanstieg vergleichsweise weniger stark beeinflusst als bei einer Anwendung ohne DC-Bias.

In physikalischen Messreihen wird die Verlusterhöhung = DPF in Abhängigkeit der Vorspannung B_{DC} und der Flussdichten Amplitude \hat{B} für die einzelnen Materialien ermittelt.

Die nachfolgende Abbildung 10 zeigt diesen Zusammenhang für des Sumida Ferrit Material Fi395.

Sumida stellt in erster Näherung eine Frequenz- und Temperaturunabhängigkeit des Displacement-Factors fest.

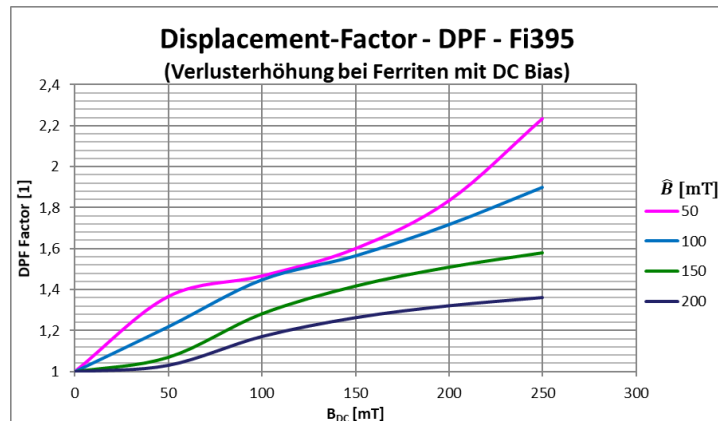


Abbildung 10: Displacement-Factor-Fi395

Ausgehend von bisherigen analytischen Kernverlustmodellen lag der Forschungsschwerpunkt in diesem Projekt auch auf den verlusttechnischen Unterschieden der einzelnen Werkstoffe selbst. Das Augenmerk in diesem Bericht liegt daher auf der Vergleichbarkeit und Auswahl für Ferrite. Die nachfolgende Abbildung 11 zeigt wie sich die Verluste beim Fi337 in Verbindung mit einem DC-Anteil erhöhen. Dabei erkennt man signifikant, dass das Material Fi337 deutlich stärker auf diesen Einfluss reagiert. Diese Eigenschaft gilt es bei der Materialauswahl für Leistungsinduktivitäten, z.B. für den Buck-Converter des Projektpartners Signify besonders zu beachten

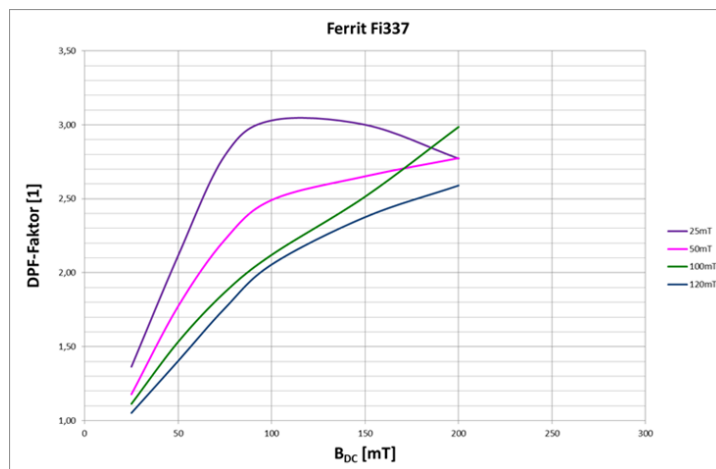


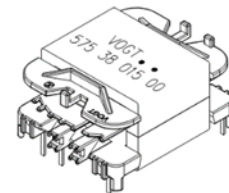
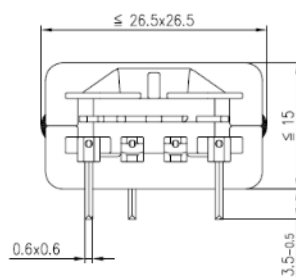
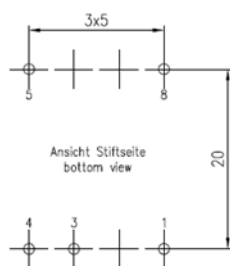
Abbildung 11: Displacement-Factor Fi337

6.2.2 AP8.1.2 - Untersuchung und Auswahl von Kernformen für HF-Leistungselektronikanwendungen

Die Grundlage für die folgenden Untersuchungen stellt ein EF 25/15/7 Bausatz, der in der Vergangenheit speziell für Beleuchtungsanwendungen entwickelt wurde.

Ausgangspunkt:

Grundfläche:	≤ 26,5 mm x 26,5mm (≈ 702 mm²)
Bauteilhöhe	≤ 15mm
Magnetisch wirksamer Querschnitt	108mm²
Raster	20mm x (3 x 5mm)
Spulenkörper 2kammrig	Spannungsfestigkeit



Ausgehend von diesem Bausatz wurden theoretische Betrachtungen hinsichtlich des Wickelaufbaues gestartet. Dabei galt es die Wickelverluste auf den vorhandenen Wickelquerschnitt zu normieren.

Berechnung der Windungszahlen in einem vorgegebenen Wickelquerschnitt

Für die gebräuchlichsten Kernformen sind die maximalen Windungszahlen für die einzelnen Spulenkörper in der nachfolgenden Gleichung angegeben:

$$N = \frac{A_N}{A_{\text{Draht}}} \cdot f_{Cu}$$

wobei

N	= Windungszahl
A _{Draht}	= Drahtquerschnitt [mm²]
A _N	= effektiver Wickelquerschnitt [mm²]
f _{Cu}	= Kupferfüllfaktor in Abhängigkeit vom Drahtdurchmesser oder Ausführung

Berechnung des Gleichstromwiderstandes einer Wicklung

Der Gleichstromwiderstand einer Wicklung lässt sich wie folgt berechnen:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A_{\text{Draht}}} \quad l = l_w \cdot N \quad A_{\text{Draht}} = \frac{A_N}{N} \cdot f_{Cu}$$

$$R = \rho \cdot \frac{l_w \cdot N}{\frac{A_N}{N} \cdot f_{Cu}}$$

$$R = \rho \cdot \frac{l_w \cdot N^2}{f_{Cu} \cdot A_N}$$

wobei

R = Widerstand der Wicklung [Ω]

l = Länge des Drahtes [m]

l_w = mittlere Windungslänge [m]

$\rho = \text{spezifischer Widerstand} \left[\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} \right]$

Einführung des Widerstandsfaktors A_R

Der Widerstandsfaktor A_R ist, in Analogie zum AL-Wert, der auf die Windungszahl $N=1$ bezogene Gleichstromwiderstand einer Wicklung.

$$A_R = \frac{R}{N^2} = \rho \cdot \frac{l_w}{f_{Cu} \cdot A_N}$$

Bemerkung: Bei einer herkömmlichen Auslegung eines induktiven Bauteils (ohne forcierter Kühlung) gehen die ohmschen Verluste etwa zu 50% in die Gesamtverluste ein.

Wie aus der Formel ersichtlich, ist der Füllfaktor eines induktiven Bauelementes entscheidend für seine Verluste und somit für seine Erwärmung. Ausgehend von dieser Erkenntnis wurden Wickelversuche an Spulenkörpern mit rundem und eckigem Mittelschenkel durchgeführt, die zu folgendem Ergebnis führten:

Füllfaktoren für:

- Runder Mittelschenkel $f_{Cu} = 0,57$
- Eckiger Mittelschenkel $f_{Cu} = 0,5$

Gegenüberstellung unterschiedlicher Bausätze

Bausatz	EF 25/15	PQ 26/15	ER 25/15/7	EQ 25/15
$A_e \text{ min [mm}^2\text{]}$	108	108	108	108
$l_w \text{ [mm]}$	58	49,7	47	49,7
f_{Cu}	0,5	0,57	0,57	0,57
Abmessung Wickelfenster [mm]	2 x 1,65 x 3,6	2 x 1,35 x 2,43	2 x 1,65 x 1,4	2 x 1,65 x 2,43
$A_N \text{ [mm}^2\text{]}$	11,88	6,56	4,5	8,02
A_R	1,74E-04	2,37E-04	3,26E-04	1,94E-04
Grundfläche [mm ²]	702	702	702	702
Verlusterhöhung gegenüber EF 25/15 [%]		18,06	43,82	5,67

Als Fazit zeigt sich, dass bei einer Grundfläche von kleiner 26,5mm x 26,5mm und einer Bauhöhe kleiner 15mm der EF Kern die geringsten Verluste aufweist, obwohl ein Bausatz mit rundem Mittelschenkel eine ca. 20% geringere Windungslänge l_w aufweist.

6.2.3 AP8.1.3 – Untersuchung von Absorbermaterialien zur Störunterdrückung

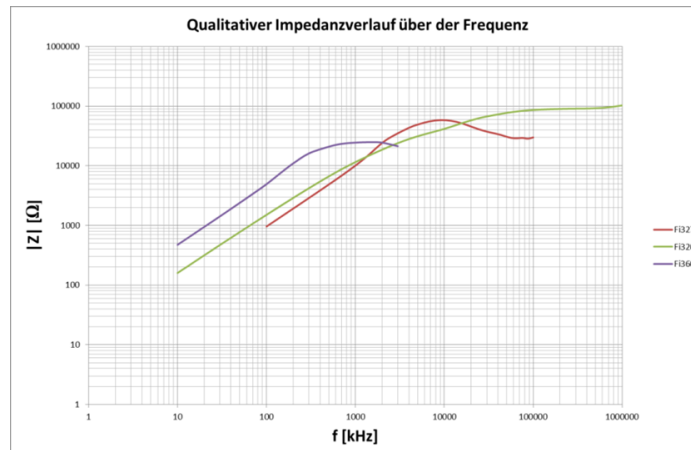


Abbildung 12: Impedanzverlauf verschiedener Sumida Ferritmaterialien

Die nachfolgende Formel ermöglicht den für das EMV-Verhalten wichtige Impedanz Verlauf abzuschätzen und die Bauelemente für die Anwendung zu optimieren.

$$|Z| = \frac{A_e}{l_e} \cdot N^2 \cdot \mu_0 \cdot \omega \cdot \sqrt{\mu'^2 + \mu''^2}$$

Unter Berücksichtigung des Ziels, eine maximale Dämpfung über einen breiten Frequenzbereich zu erreichen, führten wir während der Projektlaufzeit verschiedene Messungen durch, um unter anderem den Effekt der Kernbeschichtung auf das spätere Dämpfungsverhalten abschätzen zu können. Als beispielhafte Untersuchung wurde die Auswirkung der Kernbeschichtung auf verschiedene Dämpfungsmaterialien vor und nach der Anwendung betrachtet. Dabei lag der Fokus auf der Analyse des Einflusses dieser Umhüllung auf die magnetischen Eigenschaften der Magnetmaterialien. In Abbildung 13, die im Anschluss zu sehen ist, finden Sie einen Ausschnitt aus einem Messprotokoll

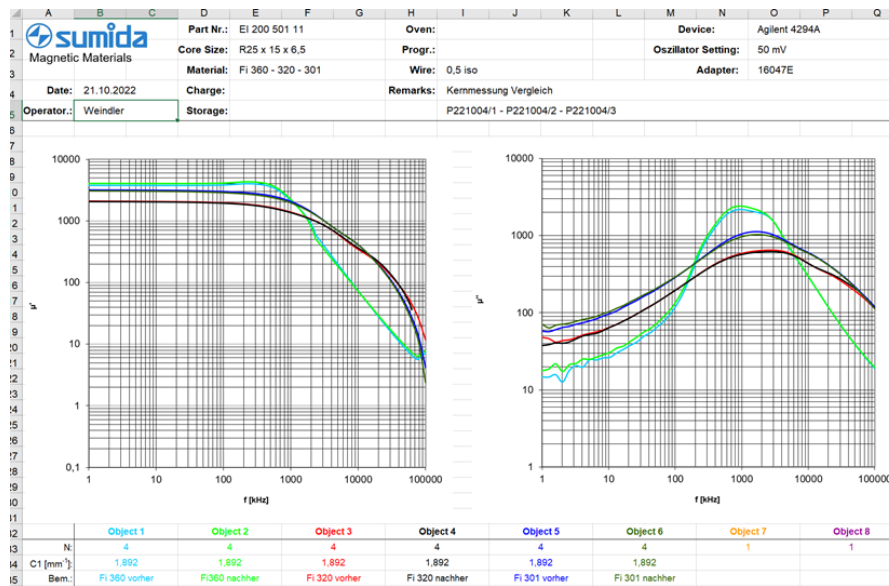


Abbildung 13: Rohdaten vor und nach der Umhüllung FI 360 – FI 320 – FI 301

In der vorausgegangenen Darstellung sind die Messergebnisse der Kernproben in Bezug auf den Real- und Imaginärteil (μ' und μ'') der komplexen Permeabilität veranschaulicht.

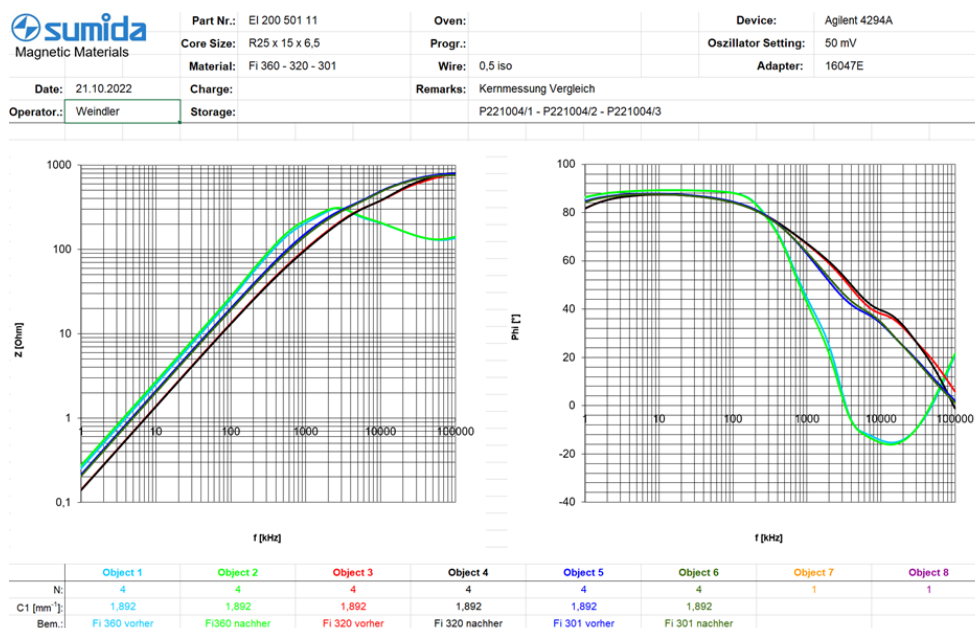
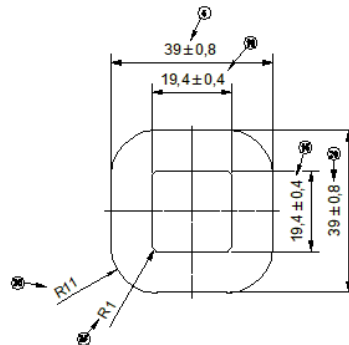


Abbildung 14: Impedanzverlauf unterschiedlicher Materialien

Die Einflüsse der Beschichtung auf den Impedanzverlauf und den Phasengang der ausgewählten Proben sind in Abbildung 14 dargestellt. In Zusammenfassung lässt sich festhalten, dass das verwendete Umhüllungsmaterial keinen signifikanten Einfluss auf die Leistung und Auslegung der EMV-Induktivitäten hat. Die geringen sichtbaren Abweichungen lassen sich auf die Toleranzen des verwendeten Messgerätes zurückführen. Für diese Untersuchung wurde ein Impedanz Analysator vom Typ 4294A der Firma Keysight eingesetzt.

Um den Einfluss der Kerngröße auf das Dämpfungsverhalten zu untersuchen, wurden Rahmenkerne mit konstantem Kernquerschnitt, jedoch variabler Kernlänge analysiert. Die Volumenänderung wurde durch die Auswahl der Kernlänge gesteuert. Zusätzlich wurde ein Ringkern mit erheblich kleinerem Volumen (Objekt 7) in die Untersuchungsreihe integriert.



	Object 1	Object 2	Object 3	Object 4	Object 5	Object 6	Object 7
N:	1	1	1	1	1	1	1
C1 [mm ²]:	0,221	0,443	0,678	0,904	1,085	1,550	2,109
Bem.:	RK39x39x49	RK39x39x24,5	RK39x39x16	RK39x39x12	RK39x39x10	RK39x39x7	R 8,5x4x4

Abbildung 15: Übersicht der Rahmenkerne und Ringkern

In den der nachfolgenden Abbildungen sind die Messergebnisse an den Kernproben - der Real- und Imaginärteil (μ' und μ'') der komplexen Permeabilität - dargestellt.

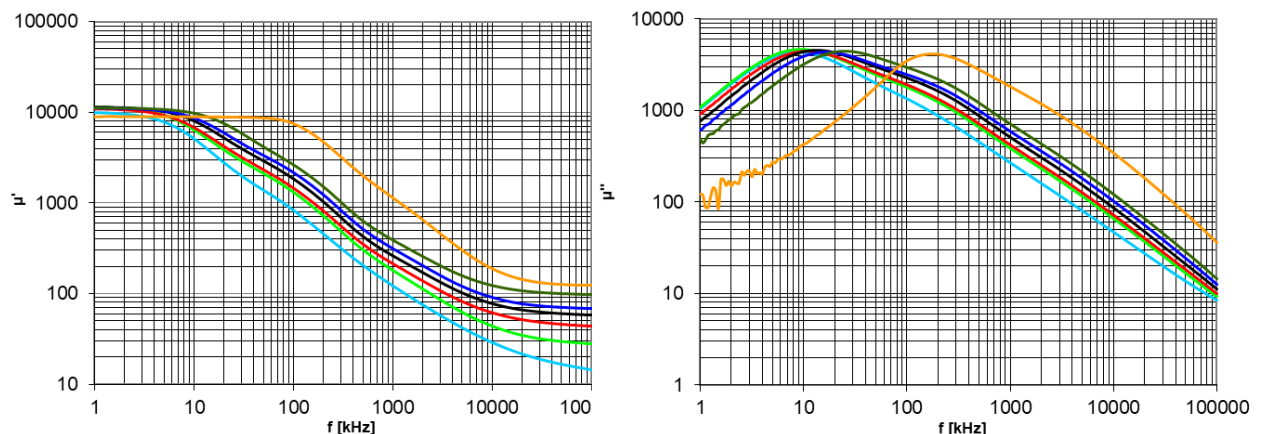


Abbildung 16: Real- und Imaginärteil der komplexen Permeabilität in Abhängigkeit des Kernvolumens

Der Einfluss des Kernvolumens auf den Impedanzverlauf einer Induktivität wird in Abbildung 17 deutlich veranschaulicht. Mit dieser Erkenntnis als Grundlage kann die Optimierung und Auslegung von EMV-Induktivitäten gezielt unter diesem Gesichtspunkt erfolgen.

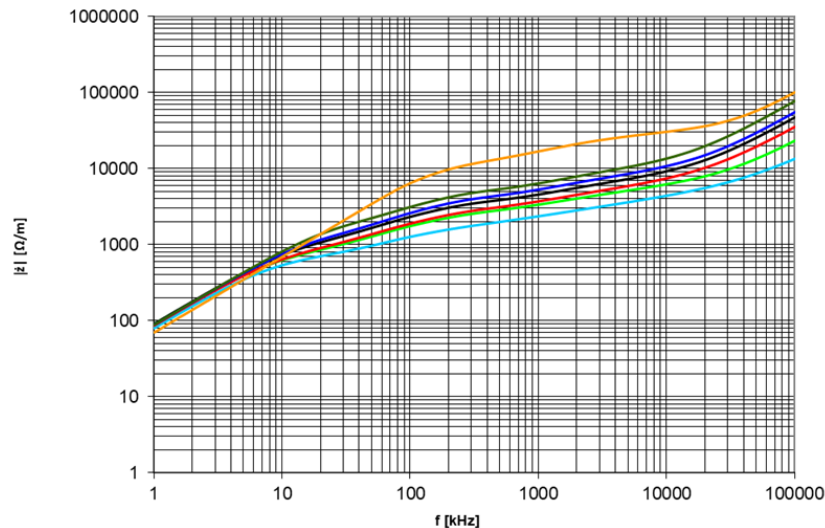


Abbildung 17: : Impedanz Verlauf unterschiedlicher Kerngrößen

6.3 AP8.2 - Entwicklung und Anwendung neuer Simulationsmethoden für induktive Komponenten in Hochfrequenzanwendungen

Ziel von AP8.2 ist die Entwicklung von Simulationsmodellen und –methoden zur anwendungsorientierten Entwicklung von magnetischen Leistungselektronikkomponenten

6.3.1 AP8.2.1 - Erstellen von RLC-Ersatzschaltbildern zur Topologiebewertung

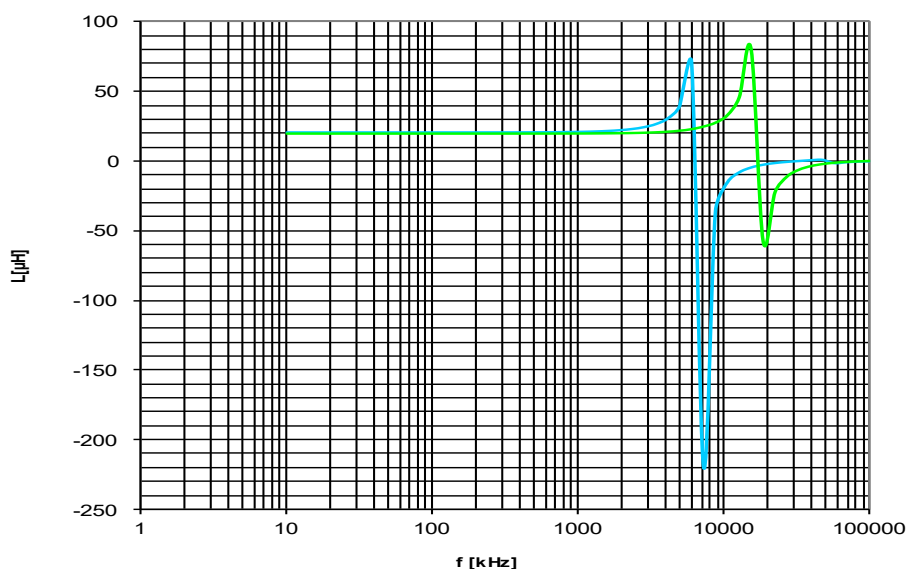
Signify hat festgestellt, dass bei der Verwendung einiger Buck-Drosseln ein leicht reduzierter Wirkungsgrad in ihrer Schaltung auftritt. Bei der Untersuchung der Drosselparameter wurde eine erhöhte Wickelkapazität (C_p) als die Ursache dieses Effekts identifiziert. Die Erhöhung der Wickelkapazität führte zu Stromoszillationen an den Transistoren, was wiederum zu erhöhten Schaltverlusten führte. In der nachstehenden Tabelle werden verschiedene elektrische Parameter der Drosseln in verschiedenen Bemusterungsstadien gegenübergestellt, wobei der erhöhte Messwert der Kapazität in Rot hervorgehoben ist.

Tabelle 4: Elektrische Parameter Buck-Drossel

Aufbau	L @1000kHz (μ H)	fres (kHz)	Cp (pF)	Rac500kHz (Ω)	Rac1000kHz (Ω)	Rac1250kHz (Ω)
3fach verteilter Luftspalt	20,50	5,92	36,90	0,13	0,36	0,55
Luftspalt konzentriert	21,20	6,37	30,10	0,13	0,34	0,52
Luftspalt über 3 Schenkel	20,70	17,00	4,50	0,11	0,25	0,34

Nach Auswertung des Induktivitätsverlaufs über der Frequenz (siehe Abbildung 18) ergab sich folgender Induktivitätsverlauf für ein Bauteil mit hoher Effizienz (grün) und ein Muster mit deutlich geringerer Effizienz (blau). Deutlich sichtbar ist die Verschiebung der Resonanzfrequenz von etwa 6 MHz auf 15 MHz.

Die Resonanzfrequenz ist ein entscheidendes Kriterium in einem frühen Entwicklungsstadium zur Beurteilung der Eignung eines Bauteils für Hochfrequenzanforderungen. Hierbei sollte die Resonanzfrequenz etwa um eine Dekade höher liegen als die maximal auftretende Schaltfrequenz.


Abbildung 18: Induktivitätsverlauf Gut- und Schlecht-Bauteil

6.3.2 AP8.2.2 - Charakterisierung von HF-Litzen und Aufbau leistungstarker Simulationsmodelle zur Berechnung von Wicklungsverlusten in magnetischen Komponenten

Ziel von AP8.2.2 ist die Entwicklung von Simulationsmodellen und Methoden zur anwendungsorientierten Entwicklung von magnetischen Leistungselektronikkomponenten. Die Ergebnisse zeigen sich in einer vereinfachten thermischen Simulation eines Bauteiles und einem optimierten Design, welches beispielhaft in Abbildung 19 dargestellt wird.

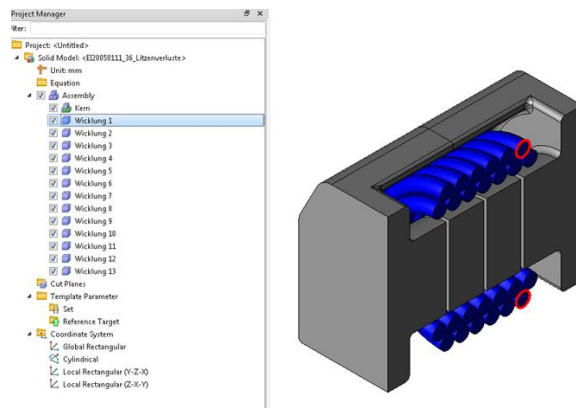


Abbildung 19: Kern und Wicklung für Simulationsmodell

In diesem Beispiel wurden lediglich der Kern und die Wicklungen simuliert. Jede Windung wurde dabei als Volldraht modelliert und die Verluste wurden als einzelne Wärmequellen angesetzt. Die Wärmeübergangskoeffizienten für die Kerne wurden aus dem Wärmewiderstand abgeleitet, während für die Wicklungen empirische Werte verwendet wurden. Zudem ist zu erkennen, dass bei diesem Modell die vollständige Ausnutzung des Wicklungsfensters gegeben ist. Für die Analyse der Wickelverluste wurde ein Litzendraht mit 600 Adern und einem Durchmesser von 0,16 mm angenommen. Die Berechnung der Skin- und Proximity-Verluste erfolgte gemäß folgenden Gleichungen:

$$P_{Skin,ideal} = I_{rms}^2 \cdot R_0 \cdot F_{L,ideal}$$

$$P_{Proxy,ideal} = \frac{l}{\kappa} \cdot H_{max,ext}^2 \cdot D_{L,ideal}$$

In Abbildung 20 ist der Skin-Faktor (Proximity-Faktor) $F_{L,ideal}$ ($D_{L,ideal}$) für einige Litzen mit ähnlichen Querschnitten dargestellt. Dieser Faktor beschreibt den Einfluss der Hochfrequenzeffekte auf den Wicklungswiderstand. Es zeigt sich, dass die Verluste durch den Skin-Effekt bei Litzendurchmessern unterhalb der Skin-Tiefe kaum reduziert werden können. Allerdings können die Proximity-Verluste durch die Wahl einer Litze mit einem geringeren Litzendurchmesser noch weiter reduziert werden. Dies ist insbesondere dann wichtig, wenn Ferritkerne mit Luftspalten verwendet werden.

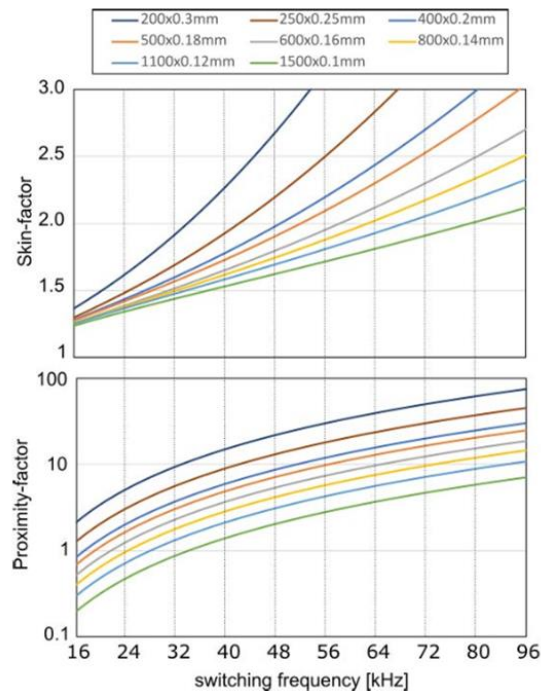


Abbildung 20: Skin und Proximity Faktor

Anhand solcher Simulationsmodelle lassen sich folglich Vorhersagen über die thermische Performance von induktiven Bauelementen treffen

6.3.3 AP8.2.3 - Vermessung und Implementierung der Kernverluste in die Simulationsmodelle

Zusammenfassend wurden in diesem Arbeitspaket umfangreiche Untersuchungen zu den Kernverlustmechanismen in großformatigen Ferritkernen (siehe Abbildung 21) durchgeführt. Die Resultate dieser Studie verdeutlichen, dass bei Kernen mit deutlich größeren Querschnitten als jenen, die üblicherweise in Datenblattmessungen verwendet werden, sowie bei Frequenzen über hundert Kilohertz, zusätzliche Verlustmechanismen erheblich ins Gewicht fallen. Zur präzisen Vorhersage dieser Verluste in solchen Kernen wurde ein Modell entwickelt, welches die Berechnung der dielektrischen Verluste ermöglicht, die bei kleineren Kernen oft vernachlässigt werden.

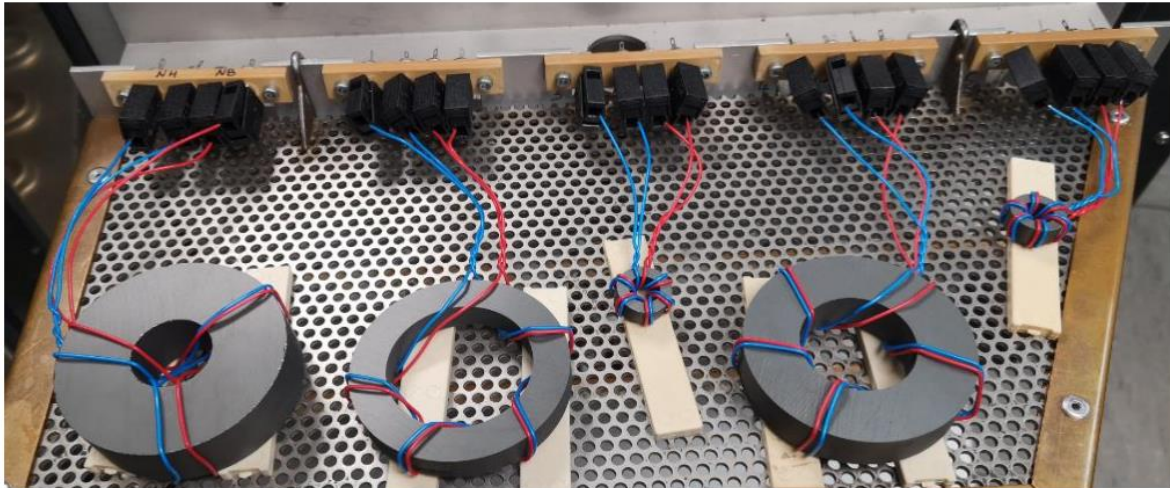


Abbildung 21: : Ringkerne mit unterschiedlichen effektiven magnetischen Querschnitten im experimentellen Aufbau zur Kernverlustmessung

Im Zuge einer umfassenden experimentellen Studie wurden verschiedene Teststrukturen mit vielfältigen Kern Geometrien über einen breiten Bereich von Frequenzen, Temperaturen und Flusssichten hinweg gründlich analysiert. In diesem Rahmen erfolgte die Differenzierung des dielektrischen Verlustes in zwei Bestandteile: den Teil der Wirbelstromverluste und den Teil des Polarisationsverlusts. Mithilfe dieser Modellanpassung konnten die berechneten Daten erfolgreich an die gemessenen Ergebnisse angepasst werden, was zur Bestimmung der entsprechenden Parameter führte. Erstaunlicherweise konnte eine bemerkenswert hohe Übereinstimmung zwischen den Messungen und dem Modell allein durch die Anwendung individueller Korrekturfaktoren für jedes Magnetmaterial erzielt werden.

In einer weiteren Messung von Kernen wurde die Polarisationsverlust experimentell bestimmt. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Polarisationsverluste in einem weiten Frequenz- und Temperaturbereich mit einem materialspezifischen, aber konstanten Parameter berechnet werden können. Außerdem wurde aufgezeigt, dass die Wirbelstromverluste temperaturabhängig sind und mithilfe der Arrhenius-Gleichung modelliert werden können. Dementsprechend ermöglichen die Forschungen während der Projektlaufzeit Ergebnisse die Berechnung der zusätzlichen dielektrischen Volumenverluste über einen weiten Frequenz- und Temperaturbereich mit nur zwei zusätzlichen Parametern.

Abschließend wurde das Modell anhand der Berechnung der Kernverluste mithilfe von Ergebnissen aus 3D-FEM-Simulationen verifiziert und mit kalorimetrischen Messungen verglichen. Die wesentlichen Parameter für die FEM-Simulation konnten aus den zuvor beschriebenen Experimenten abgeleitet werden. Die Simulationen weisen eine bemerkenswerte Übereinstimmung mit den kalorimetrischen Messungen auf und verdeutlichen, dass die Vorhersage der Kernverluste mit einer Genauigkeit von einigen Prozent möglich ist, wenn sämtliche Verlustmechanismen angemessen berücksichtigt werden (siehe Abbildung 22).

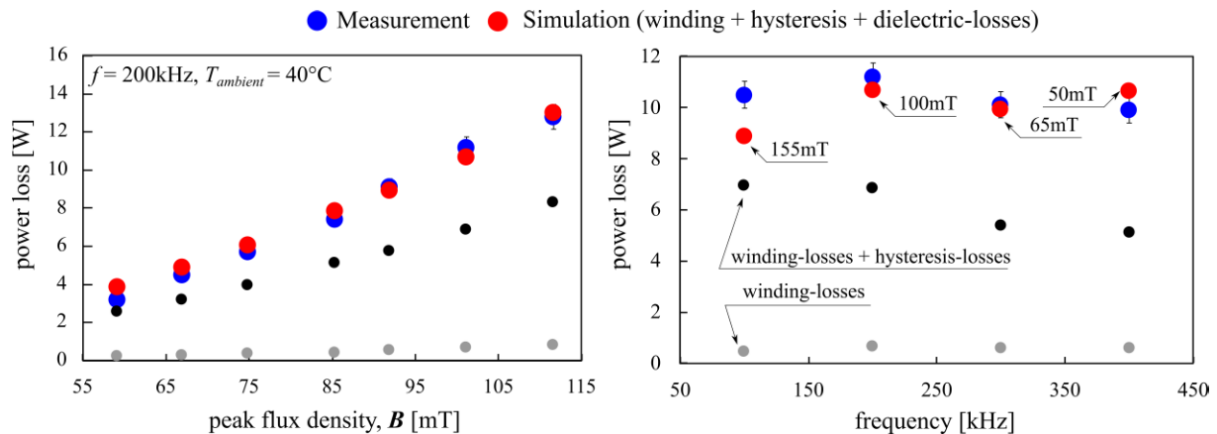


Abbildung 22: Vergleich der simulierten (dunkelrot) und gemessenen (blau) Verluste für verschiedene Flussdichten und Frequenzen. Die Fehlerbalken zeigen eine Abweichung von 5 % von den gemessenen Werten an.

6.3.4 AP8.2.4 - Durchführung und experimentelle Verifizierung von thermischen Simulationen

In diesem Arbeitspaket wurden die erforderlichen Eigenschaften auf Grundlage einer thermischen Simulation untersucht. Dabei wurde die Integration des Onboard-Ladewandlers in gängige und gegebenenfalls bereits vorhandene Kühlsysteme eines Fahrzeugs berücksichtigt. Um die maximale Erwärmung des Transformators zu ermitteln, führten wir Versuche bei Sumida durch. Hierbei wurde der Trafo auf der Sekundärseite kurzgeschlossen, und der maximale im Labor erreichbare Betriebsstrom wurde auf der Primärseite eingepreßt (siehe Abbildung 4). Diese Versuche und die thermoelektrischen Simulationen liefern Informationen über die abzuführende Verlustleistung, die bei der Auslegung des Gesamtkühlkonzepts berücksichtigt werden müssen.



Abbildung 23: Full-Bridge Kurzschlussstest mit 9A Primärstrom @ 1 MHz

Unter diesen Betriebsbedingungen erreichte der Full-Bridge-Transformator eine maximale Temperatur von 89°C . Diese Temperatur gewährleistet einen sicheren Betrieb im späteren Demonstrator. Sumida empfiehlt die Verwendung von sogenannten Kavitäten zur thermischen Anbindung der magnetischen Bauelemente, um den sicheren Betrieb und die erforderliche mechanische Stabilität sicherzustellen.

6.4 AP8.3 - Auslegung, Aufbau und Test der magnetischen Bauteile für die Einzelanwendungen

In diesem AP wurden die magnetischen Bauteile für die Alpha- und Beta-Muster ausgelegt, aufgebaut und auf Komponentenebene getestet. Beispielhaft sind zwei Common Mode Chokes abgebildet, die für den Solarinverter entwickelt wurden.



Abbildung 24: Common Mode Chokes

Das Projekt hatte den Impedanzverlauf in Rot als Zielvorgabe, wie in der folgenden Abbildung ersichtlich ist. Die Impedanzkurve der beiden Sumida-Drosseln wurde über den gesamten

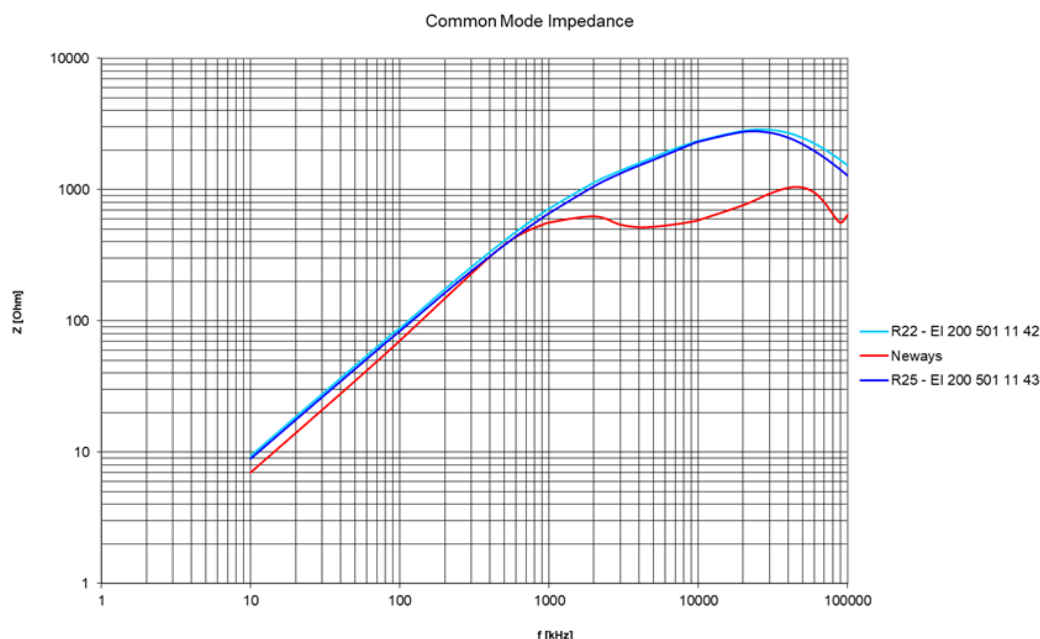


Abbildung 25: Impedanzverlauf Common Mode Chokes

Frequenzbereich hinweg nicht nur erfüllt, sondern auch im Hochkilohertz- und Megahertzbereich deutlich übertroffen.

6.4.1 AP8.3.1 – Ableitung der Spezifikationen für die magnetischen Komponenten

Im Verlauf des Projekts wurden intensive bilaterale Gespräche mit sämtlichen Projektpartnern geführt, um umfangreiche Lastenhefte zu erstellen. Diese Lastenhefte bilden die Grundlage für die Dimensionierung der induktiven Bauelemente. Die nachstehende Tabelle 5 präsentiert einen

designrelevanten Ausschnitt aus einem Lastenheft der Firma Lyra für den geplanten On-Board-Charger.

Tabelle 5: Lastenheft Full-Bridge Trafo

Preliminary transformer specification for GaN based onboard charger.			
1	Number of Windings	2	
2	Turns Ratio HV/LV	1	
3	Operating Frequency	1000 [kHz]	TBC
4	Voltage Waveform	Square	
5	Maximum Bus Voltage	500 [V]	TBC
6	Maximum current	13,5 [Arms]	Assuming 2 transformers/charger. Other combinations would also be feasible. average over one 50/60Hz cycle
7	Leakage inductance (HV)	2,8 [uH]	Approx, TBC
12	Cooling	65 [C]	Watercooled heatsink, TBC
13	Dielectric strength	2,5 [kV]	HV - LV, TBC
14		2,5 [kV]	HV - Core, TBC
15		2,5 [kV]	LV - Core, TBC
Parasitic capacitances should be minimised			

6.4.2 AP8.3.2 - Auslegung der magnetischen Komponenten für die Leistungselektronik

Im Projekt wurden die magnetischen Bauelemente von Sumida unter Berücksichtigung der von den Projektpartnern bereitgestellten Spezifikationen konzipiert. Zur Veranschaulichung finden Sie in Tabelle 6 ein Beispiel für die Berechnung, in diesem Fall den Full-Bridge-Transformator von Lyra.

Tabelle 6: Berechnung Full-Bridge-Trafo

min Eingangsspannung	500 V	Prim Wdg errechnet	46,83				
max Tastverhältnis	0,5	Wdg eingesetzt	47				
min Schaltfrequenz	1000000 Hz	AI-Wert	600 nH				
max Flußdichte	0,0085 T	Magnetisierungsstrom	0,189 A				
magn. wirk. Querschnitt	3,14 cm²	Spitzenstrom	13,689 A				
Stromdichte	5 A/mm²	RMS-Strom	9,680 A				
		Drahtquerschnitt	1,93596 mm²				
Ausgangsspannungen	Ausgangsströme	ü	Wdg berechnet	Wdg eingesetzt	Uaus errechnet	RMS-Strom	Drahtquerschnitt
1 500,00 V	13,50 A	1	47,0000	47	500,00 V	10,67 A	2,13454
2 0,01 V	0,01 A	50000	0,0009		0,00 V	0,01 A	0,00158
3 0,01 V	0,01 A	50000	0,0009		0,00 V	0,01 A	0,00158
4 0,01 V	0,01 A	50000	0,0009		0,00 V	0,01 A	0,00158
5 0,01 V	0,01 A	50000	0,0009		0,00 V	0,01 A	0,00158
6 0,01 V	0,01 A	50000	0,0009		0,00 V	0,01 A	0,00158
Paus max							
6750,0005							

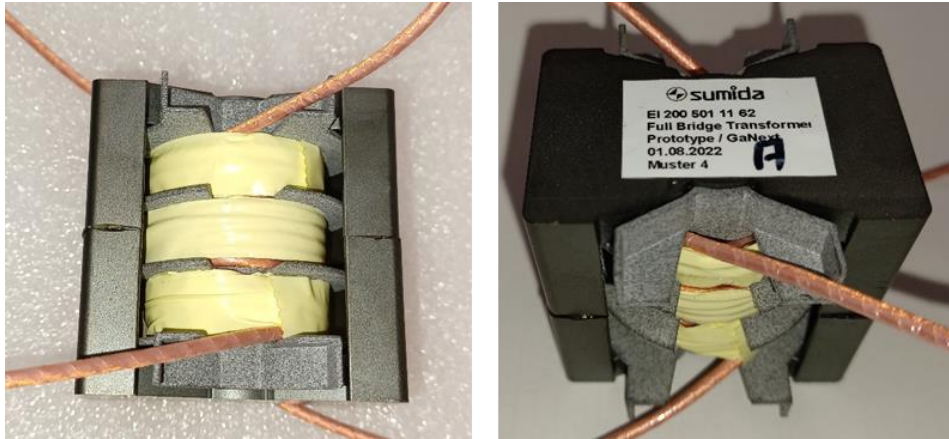
Mithilfe solcher grundlegenden Berechnungen lassen sich Schätzungen über die voraussichtliche Bauteilgröße unter Berücksichtigung des Anforderungsprofils treffen. Bei den darauffolgenden Prototypen wurde eine Safety-Litze mit 600 Einzeladern verwendet, wobei jede Ader einen Durchmesser von 0,05 mm aufwies, sowohl für die Primär- als auch für die Sekundärseite.

6.4.3 AP8.3.3 - Aufbau der magnetischen Komponenten für die Leistungselektronik

Zum Ende der Laufzeit wurden verschiedene Muster erstellt und den Projektpartnern zur Verfügung gestellt. Dabei wurden einige der benötigten Magnetkerne aus Vollmaterial präzisionsgeschliffen. Diese Labormuster wurden in Einzelfertigung mithilfe spezieller Maschinen (z. B. einer Ultra Sonic Kernfräsmaschine) von Hand gefertigt. Diese Muster dienen der technischen Validierung der

Projektanforderungen im Verbund und sollen den Fortschritt in der Technologie durch gewonnene wissenschaftliche Erkenntnisse verdeutlichen.

In Abbildung 6 unten ist ein Muster für den On-Board-Ladewandler von Lyra dargestellt. Wobei hier die Einbausituation sowie die Kühlungsstrategie noch nicht endgültig feststeht. Daher sind die elektrischen Anschlüsse als sogenannte Flying Leads ausgeführt. Der Kern PQ50/50 mit einem Spulenkörper, der drei Kammern enthält, wurde aus dem Ferrit-Material Fi337 hergestellt.



Die folgende Abbildung 26 zeigt eine Induktivität für den Solarinverter der Firma Neways. Deutlich ist hier der verteilte Luftspalt im Mittelschenkel zu erkennen.



Abbildung 26: Boost Induktivität für Neways

6.5 AP8.4 - Integration der magnetischen Komponenten und Ausarbeitung von Kühlkonzepten

Gemeinsam mit den Projektpartnern wurden in diesem Arbeitspaket die magnetischen Komponenten integriert und geeignete Kühlkonzepte entwickelt.

Exemplarisch ist in der nachfolgenden Abbildung das Kühlkonzept einer Speicherdrossel mit Wärmeleitpfaden (Pos. 7) dargestellt. Diese Muster wurden für TU/e hergestellt und als Muster zur Verfügung gestellt.

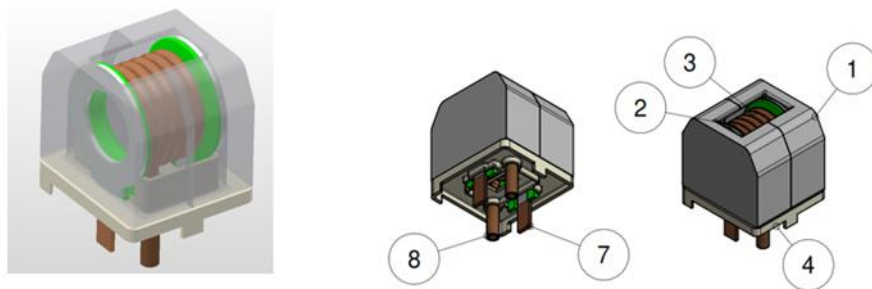


Abbildung 27: Speicherdrossel mit Wärmeleitpfaden

Anschließend die Stückliste für dieses Produkt:

Pos	Beschreibung
1	Ferrit Kern EPV 33
2	Spulenkörper
3	Wicklung
4	Grundplatte
7	Wärmeleitpfad (Aluminiumnitrid)
8	Adernendhülle

6.5.1 AP8.4.1 – Thermische Evaluierung der Leistungselektronikkomponenten

In enger Zusammenarbeit mit unseren Projektpartnern wurden die magnetischen Komponenten in beide Entwurfsphasen integriert, und es wurden adäquate Kühlkonzepte entwickelt. Hierbei führten wir thermische Messungen sowohl bei unseren Projektpartnern als auch bei Sumida durch, und die erzielten Ergebnisse wurden anschließend zusammengeführt. Auf Grundlage dieser Messergebnisse wurde jeweils die passende Entwärmungsstrategie für die Bauteile entwickelt.

6.5.2 AP8.4.2 - Untersuchung und Ausarbeiten von Kühlkonzepten

Die durchgeführten Messungen bei den Projektpartnern, nämlich bei Signify, der Technischen Universität Eindhoven und Neways, haben ergeben, dass keine erzwungene Kühlung der Leistungsinduktivitäten notwendig ist. Die Temperaturen der Bauteile bleiben auf einem moderaten Niveau und erfordern keine zusätzlichen Kühlmaßnahmen.

Allerdings ist Sumida der Ansicht, dass in Bezug auf den On-Board-Ladewandler eine aktive Kühlung unerlässlich ist. Bedauerlicherweise liegen bisher keine praktischen thermischen Daten von Lyra für diese spezielle Anwendung vor. Wie hier der Stand zum Projektende ist, entzieht sich unserer Kenntnis.

6.5.3 AP8.4.3 - Integration der magnetischen Komponenten in die Leistungselektronikanwendungen

Nachfolgend sind beispielhaft die finalen Demonstratoren von Signify (Abbildung 28) und Neways (Abbildung 29) abgebildet.



Abbildung 28: Signify 1kW LED Treiber

Im Rahmen dieses Projekts wurden beeindruckende technologische Fortschritte und Innovationen im Bereich der LED-Treibertechnologie erzielt. Eine der bemerkenswertesten Errungenschaften war die erhebliche Reduzierung der Gesamtgröße des Treibers um 30%, was nicht nur Platz einspart, sondern auch die Anwendungsmöglichkeiten erheblich erweitert.

Des Weiteren wurde eine innovative Eingangsverstärker-Topologie eingeführt, die die Verwendung von 600V GaN-Technologie bei einer Netzspannung von 400Vac ermöglichte. Dies führte zu einer deutlichen Steigerung der Effizienz und Leistungsfähigkeit des Treibers. Der Ausgangsverstärker, der mit 1-2 MHz schaltet und die fortschrittliche GaN-Technologie nutzt, ermöglicht eine präzisere und leistungsfähigere Leistungssteuerung.

Die Integration von Hochfrequenz-Magnetkomponenten mit Fi337 trug dazu bei, die Effizienz des Treibers zu steigern und Energieverluste zu minimieren. Eine weitere wichtige Innovation war die Implementierung einer hochentwickelten digitalen Steuerung, die eine präzisere Anpassung und Kontrolle der LED-Treiberfunktionen ermöglicht. Zusätzlich wurde durch die Anwendung innovativer Leiterplattentechniken zur Reduzierung von Störungen und elektromagnetischer Interferenz (EMI) eine störungsfreie Betriebsumgebung geschaffen. Schließlich trug der Einsatz von Halbflex-PCBs dazu bei, die Effizienz und Kapazitätsauslastung in der Produktion zu steigern, was zu einer insgesamt effektiveren Fertigung beiträgt. Diese technologischen Fortschritte versprechen eine vielversprechende Zukunft für die LED-Treibertechnologie, da sie Effizienz, Leistung und Anpassungsfähigkeit auf ein neues Niveau heben.

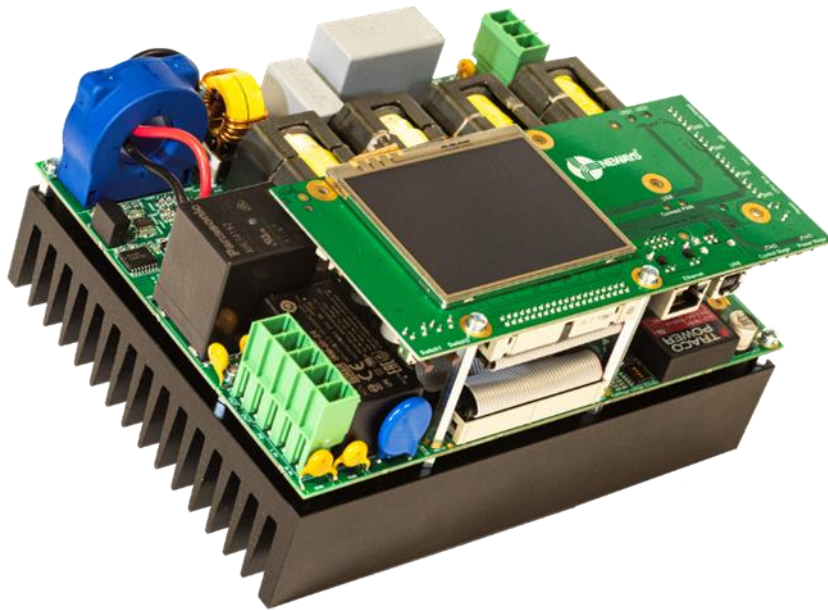


Abbildung 29: Neways 4 kW Solar Inverter

Herausragende Errungenschaften in diesem Kontext beinhalten die erfolgreiche Entwicklung und Umsetzung eines eigenständigen IPM GaN-Inverters sowie die erfolgreiche Konzeption und den gelungenen Prototypenbau. Die erzielte Effizienz von über 98% unterstreicht die bemerkenswerte Leistungsfähigkeit dieser Technologien. Des Weiteren konnte eine eindrucksvolle Leistungsdichte von 312W/l mit dem IPM-Inverter erzielt werden, was auf eine herausragende Integration von GaN hinweist. Infolgedessen wurden wertvolle praktische Erfahrungen und profundes Fachwissen im Hinblick auf die Anwendung von GaN in industriellen Anwendungen gewonnen.

6.6 AP8.5 - Test und Verifizierung der Komponenten auf Systemebene

In diesem Arbeitspaket ist das Ziel, die magnetischen Komponenten in einer realen Anwendung zu testen und die Ergebnisse der Simulationen aus AP8.2 durch praktische Experimente zu verifizieren. Hierfür wurden sogenannte Prüfaufbauten implementiert. Infineon hat freundlicherweise Demoboards (siehe Abbildung 30) zur Verfügung gestellt, die es Sumida ermöglichen, induktive Bauteile in einem Laborumfeld unter realen Bedingungen zu testen. Auf diese Weise kann das elektrische und thermische Verhalten extrapoliert und auf die endgültige Anwendung übertragen werden.



Abbildung 30: Vorder- und Rückseite Infineon Demoboard

Mit diesem Halbbrücken-Demoboard lassen sich folgende Prüfscenarien bzw. Schaltungen realisieren:

- Buck-Converter
- Boost-Converter
- LLC Converter
- Half Bridge Converter
- Evaluierung des Verlusts von Kernmaterialien mit einem rechteckigen/sinusförmigen Spannungsprofil
- Identifizierung der Sättigungsgrenze
- Induktive Erwärmung/Leistungsübertragung

Dabei sind folgende Prüfparameter mit dem Infineon 600 V Half-Bridge Demoboard (EVAL_1EDF_G1B_HB_GAN) möglich:

- Betriebsspannung: 450 V_{max}
- Schaltfrequenz: bis zu 3 MHz
- Max Transistor AC Strom 35 A_{peak}
- Max Transistor DC Strom 12 A_{rms}

Zum Projektende wurde mit der Konstruktion und dem Aufbau von Induktivitätstestvorrichtungen begonnen. Das 3D-Modell der geplanten Prüfaufbauten ist in Abbildung 31 dargestellt.



Abbildung 31: Induktivitätstester mit Infineon Demoboard

6.6.1 AP8.5.1 - Funktionstest der magnetischen Komponenten auf Systemebene

Zum Ende des Projektes wurde die bidirektionale Buck-Induktivität der TU/e mithilfe des Infineon Demoboards thermisch vermessen. Die nachfolgende Abbildung zeigt den ersten vorläufigen Messaufbau mit Lüfterkühlung für die Leistungshalbleiter.

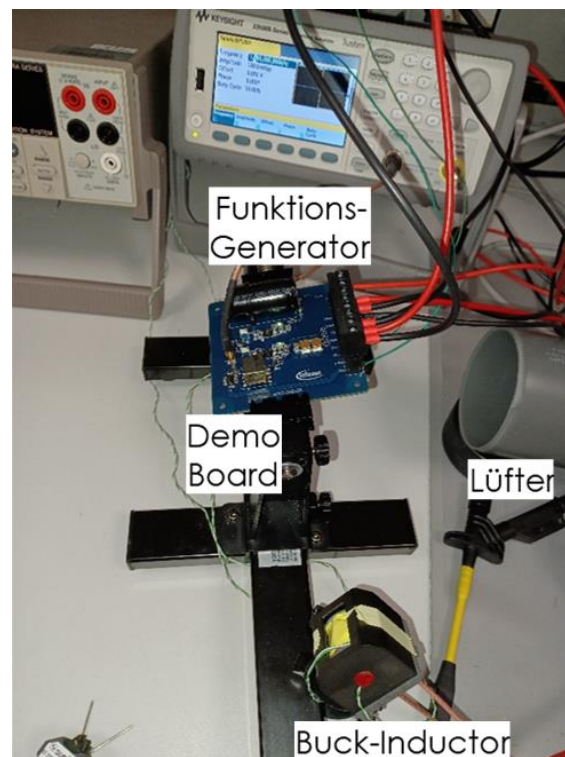


Abbildung 32: Prüfaufbau mit Demoboard und Prüfling

Bei der Durchführung der Messungen wurde ein konstanter Stromripple von 10 A Spitze-Spitze bei einer Taktfrequenz von 1 MHz eingestellt. Der Gleichstrom (DC-Strom) wurde schrittweise von 2 A auf 8 A erhöht. Die dabei auftretende Strom- und Spannungsverläufe sind in der nachfolgenden Grafik dargestellt.



Abbildung 33: Buck-Inductor - 8 A_{DC} + 10 A_{pp} @ 1 MHz

In der nachfolgenden Abbildung ist der zeitliche Verlauf der Temperaturerhöhung dargestellt. Deutlich erkennbar sind die sehr hohen Temperaturen an den Transistoren T1 und T2. Aus diesem Grund musste die Messreihe bei einem DC-Strom von 8 A abgebrochen werden.

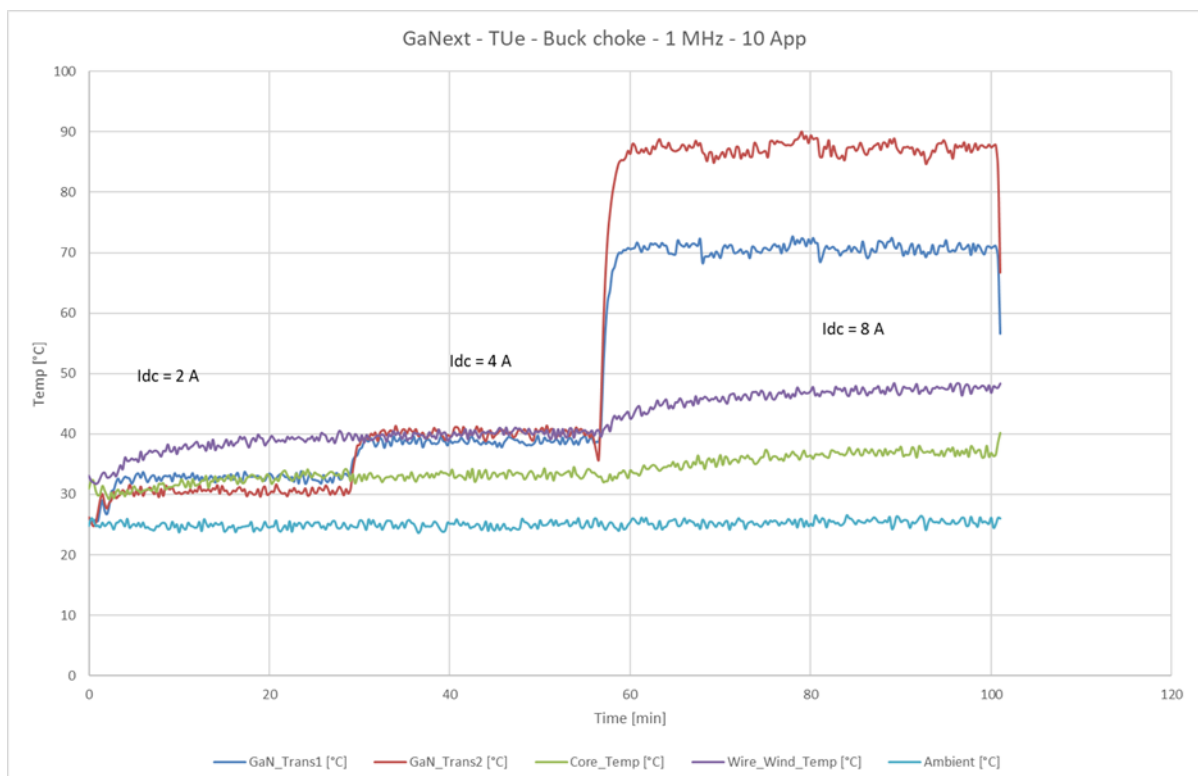


Abbildung 34: Temperaturverlauf der Induktivität, Transistoren und Umgebung

6.6.2 AP8.5.2 - Verifizierung der Simulationsergebnisse der magnetischen Komponenten

Während des Projekts stellte Signify fest, dass es zu einer erheblichen Temperaturverschiebung bei einigen Induktivitäten kam. Diese Veränderung wird in Abbildung 35, dem Thermobild, deutlich visualisiert. Insbesondere fiel auf, dass ein Außenschenkel des RM8-Kerns sich bereits nach wenigen Minuten Betriebszeit erheblich stärker erwärmte als der übrige Teil dieses Bauteils.

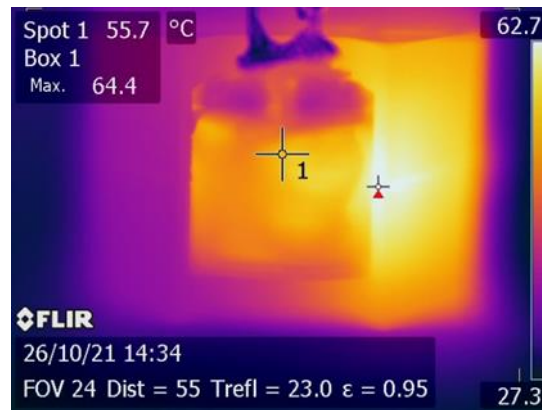


Abbildung 35: Temperaturverschiebung am RM8 Bauteil (Quelle Signify)

Die Ursache dieser Verschiebung wurde in der unsymmetrischen Aufteilung der Windungen im Wickelraum vermutet und dann auch gefunden.

Anhand von Simulationen wurde dieser Effekt der Asymmetrie an den unterschiedlichen Luftspaltvarianten untersucht (siehe Abbildung 36). Deutlich ist hier eine Verschiebung der Flussdichte an den Kernen mit Luftspalt im nur Mittelschenkel erkennbar. Hier kommt es zu Verschiebungen des Maximums der Flussdichte an einem Außenschenkel.

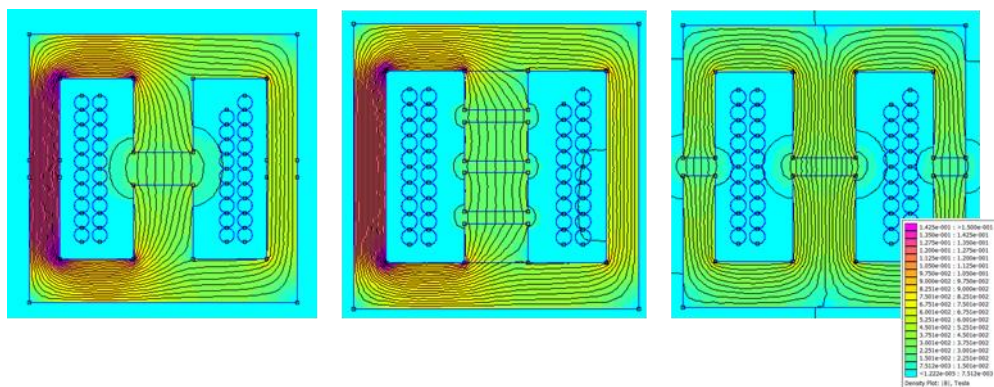


Abbildung 36: Feldsimulation Asymmetrische Wicklung

In Abbildung 15 unten ist ein Vergleich zwischen Bauteilen mit symmetrischer und asymmetrischer Wicklung dargestellt. Die Thermographie-Aufnahmen wurden bei einer Betriebsfrequenz von 700 kHz und einem Spitze-Spitze-Strom von 4 A aufgenommen. Die Versuchsdauer betrug jeweils 5 Minuten.

Deutlich erkennbar ist die homogene Erwärmung und der Feldverlauf des Kerns auf der linken Bildhälfte.

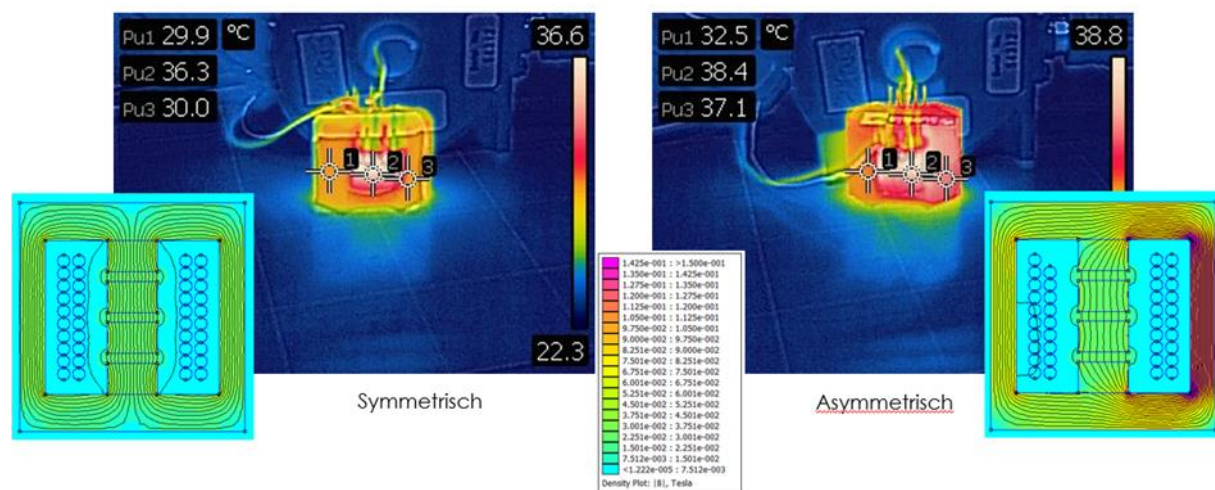


Abbildung 37: Symmetrische & Asymmetrische Wicklung Thermographie und Simulation

7 Nutzen für das Unternehmen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses

7.1 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Im nächsten Schritt gilt es, die neu gewonnenen Erkenntnisse und Laborprozesse weiterzuentwickeln und in eine stabile Serienfertigung zu überführen.

- Ein Hauptaugenmerk liegt darauf, in der gesamten Fertigungskette höchstmögliche Produktivität zu erreichen. Im internationalen Wettbewerb ist es entscheidend, dass die fertigen Produkte "kleiner, leichter, besser, billiger und schneller" sind. In der Elektronikindustrie sind die Kosten ein bekanntlich essenzieller Wettbewerbsfaktor. Daher wird es in den nächsten zwei bis drei Jahren entscheidend sein, sowohl bei der Auswahl der Rohstoffe als auch bei der Umsetzung weitgehend automatisierter Fertigungsprozesse erfolgreich zu sein.
- Die Elektronikindustrie erhält derzeit einen erheblichen Schub durch die Energiewende und neue Klimaziele, und sie wird sogar erst durch die Elektronik ermöglicht. Gleichzeitig gewinnen die Materialeinsparung und Energieeffizienz noch stärker an Bedeutung als heute. Der Trend geht in Richtung immer kleinerer, leichter und kompakterer Produkte. Die Elektrifizierung von Antrieben und Aktuatoren bietet gegenüber traditionellen mechanischen und hydraulischen Systemen in vielerlei Hinsicht Vorteile, insbesondere in Bezug auf Energie- und Ressourceneffizienz. In mobilen Anwendungen spielt auch die Gewichts- und Volumeneinsparung eine entscheidende Rolle. Die steigende Nachfrage nach elektrischer Energie in Bordnetzen wird die Nachfrage nach leichten und effizienten Hochleistungs-Spannungswandlern weiter steigern. Diese finden nicht nur in mobilen Systemen Anwendung, sondern auch in stationären Systemen, in denen eine besonders hohe Leistungsdichte erforderlich ist. Beispiele für Anwendungen sind Bordnetzrichter in Luftfahrzeugen, dezentrale DC/DC-Wandler, Wandler für Brennstoffzellen, PV-Wandler und Notstromversorgungen. Weitere denkbare Anwendungen sind Notebook-Netzteile und LED-Beleuchtungstechnik. Der Wettbewerb wird auch in Zukunft durch die Entwicklung neuer Werkstoffe und deren Kombinationen gewonnen. Aufgrund dieser Faktoren sind die Rahmenbedingungen und Chancen als sehr vielversprechend einzuschätzen.
- Sumida plant im Rahmen einer mehrstufigen Umsetzung, Hochfrequenz- und Hochleistungsinduktivitäten sowie -module auf Grundlage der neuen Erkenntnisse auf den Markt zu bringen. Die Bedarfslage in den Bereichen Automobil, Industrie und Unterhaltungselektronik wird voraussichtlich steigen, wobei die Betriebsfrequenzen in Richtung mehrerer Hundert Kilohertz und darüber hinaus gehen. In diesen Anwendungsbereichen bieten die modernen Ferrite klare Vorteile in Bezug auf Verluste im Vergleich zu herkömmlichen Leistungsferriten. Dennoch müssen sie kontinuierlich verbessert und den zukünftigen Anforderungen angepasst werden.

Zusammenfassend lässt sich konstatieren, dass bereits ein breites Spektrum von Anwendungsmöglichkeiten existiert und erhebliches Potential für zukünftige Entwicklungen absehbar ist. Die sich bietenden Chancen sind vielfältig und weisen auf eine vielversprechende Zukunft hin.

7.2 Energetische und ökonomische Bewertungen

Bei der energetischen und ökologischen Bewertung liegt naturgemäß der Schwerpunkt auf den endgültigen Produkten, insbesondere auf den Wandlern mit Leistungen von etwa 400 W bis 4 kW und einem Frequenzbereich von etwa 400 kHz bis etwa 1,5 MHz. In Bezug auf diese Produkte und die Auswirkungen auf die gesamte Anwendung sind belastbarere Bewertungen von den Projektpartnern zu erwarten, insbesondere von Signify, Neways, der Technischen Universität Eindhoven (TU/e) und Lyra.

Im Verlauf der Entwicklung von Boost- und Heric-Induktivitäten wurde jeweils ein Design mit sogenanntem verteiltem Luftspalt konzipiert. Im Laufe des Projekts wurden auch spezielle Anforderungen in Bezug auf das EMV-Verhalten identifiziert und adressiert. Dies eröffnet zukünftig neue Anwendungsfelder im gesamten Elektronikbereich.

7.3 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Fortführung

Die Sumida Components & Modules GmbH kann aus den Erkenntnissen, die sie bei der Umsetzung der spezifischen Teilziele gewonnen hat, erhebliches Potenzial schöpfen. Diese gewonnenen Erfahrungen bieten vielversprechende Perspektiven für zukünftige Entwicklungen und Innovationen.

- Optimaler Einsatz der Ferritwerkstoffen und Verteilung des Luftspaltes
- Einsatz von verschiedenen Leiterstrukturen
- Optimierung der Bewicklung
- EMV künftiger Wandler

In den verschiedenen Fachbereichen wurden bedeutende neue Erkenntnisse gewonnen, die das bereits bestehende Fachwissen erweitern. Diese Erkenntnisse tragen dazu bei, die Weiterentwicklung von induktiven Bauelementen und Modulen hinsichtlich Qualität und Geschwindigkeit der Serienreife erheblich zu verbessern. Die wissenschaftlichen Ergebnisse aus dem GaNext-Projekt stärken Sumida in der Zuversicht, dass das Unternehmen mit einem zeitlichen Vorsprung im technischen Wettbewerb bestehen kann. In den folgenden Bereichen konnte der Stand der Technik signifikant verbessert werden:

- Insbesondere bei der Auswahl geeigneter Ferrite wurden neue Ansätze entwickelt, die nicht nur die Zielvorgaben von GaNext vollständig erfüllen, sondern auch Erkenntnisse und Methoden aufzeigen, um die Produkte weiter zu optimieren. Bei Induktivitäten mit verteiltem Luftspalt konnten die Verluste in den Wicklungen im Allgemeinen überproportional reduziert werden. Sumida hat erfolgreich Erkenntnisse gewonnen, die den Einsatz neuer oder geeigneter Ferrite und Kern-Geometrien ermöglichen. Wir sehen in diesem Bereich weiteren Forschungsbedarf und großes Potential für weitere Verbesserungen.
- Dank der gewonnenen Erkenntnisse sehen wir uns bestens gerüstet für den mittlerweile starken Trend zu GaN-Transistoren und Modulen in der gesamten Leistungselektronik. Mit diesen Technologien gewinnt die Verwendung von Ferritwerkstoffen nicht nur technisch, sondern auch wirtschaftlich weiter an Bedeutung. Ohne optimierte und angepasste Ferritwerkstoffe wird der Einsatz von Wide Band Gap Halbleitern in Stromversorgungen nur begrenzt möglich sein. Dies stellt sicher, dass wir wirtschaftlich konkurrenzfähig bleiben.

8 Darstellung des während des Vorhabens bekannt gewordenen Fortschritts auf diesem Gebiet bei anderen Stellen

Die Fortschritte in der Bauteileentwicklung, die im eigenen Haus erzielt wurden, wurden ausführlich dargestellt. Es wurde offensichtlich, dass die spezifischen Verlust-Komponenten bei sehr hohen Betriebsfrequenzen für vergleichbare Ferritmaterialien sowohl in Europa als auch in Asien derzeit nur unzureichend in den Handbüchern veröffentlicht sind. Für zukünftige Entwicklungen ist es entscheidend, diesen Effekt der magnetischen Materialien weiter zu erforschen und das Fachwissen in diesem Bereich zu vertiefen.

9 Veröffentlichungen, Vorträge, Referate, etc.

Hier gab es folgende gemeinsame Veröffentlichungen der Projektpartnern Signify und Sumida.

Title: "Frequency and Temperature Dependence of the Electrical Resistivity of High Frequency MnZn Ferrites"

Conference: PCIM Europe 2022 - International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy, and Energy Management

Date: May 10, 2022, to May 12, 2022

Location: Nürnberg, Germany

10 Literaturverzeichnis

Keine Verweise

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

-

-- Zusammenfassung --


Abschlussbericht des Verbundprojekts „GaNext“

Leistungselektronik der nächsten Generation für CO₂-Einsparungen in
Verkehr und Industrie – GaNext -;

Teilvorhaben:

Magnetische Komponenten für die GaN-basierte Leistungselektronik der
nächsten Generation

GaNext

Förderkennzeichen:	16EMO080
Laufzeit des Vorhabens:	01.05.2020 - 30.04.2023
Berichtszeitraum:	01.05.2020 - 30.04.2023
Erstellungsdatum:	30.10.2023
Berichtsersteller:	Herbert Jungwirth, Dr.-Ing. Michael Schmidhuber
Firma:	Firma Sumida Components & Modules GmbH 

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wurde im Rahmenprogramm „Mikroelektronik. Vertrauenswürdig und nachhaltig. Für Deutschland und Europa.“ der Bundesregierung für Forschung und Innovation 2021-2024 gefördert und vom Projektträger VDI/VDE-IT betreut.

Der Bericht stellt die Ergebnisse aus dem Verbundprojekt vor. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Autoren

Zuwendungsempfänger

Firma Sumida Components & Modules GmbH

Herbert Jungwirth

Dr. Michael Schmidhuber

Die Autoren und die beteiligten Firmen bedanken sich für die finanzielle Unterstützung durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung und für die Betreuung durch den Projektträger VDI/VDE-IT.

Zusammenfassung

GaN-Transistoren, Halbleiter mit großer Bandlücke, sind wegweisend für leistungselektronische Systeme. Im Vergleich zu Siliziumbauelementen überzeugen sie durch geringeren Durchlasswiderstand, schnellere Schaltzeiten und reduzierte Verluste. Dank GaN sind höhere Betriebsfrequenzen möglich, was zu kleineren passiven Bauelementen und kompakteren leistungselektronischen Systemen führt. Im Projekt GaNext haben 13 Partner kooperiert, um ein GaN-basiertes intelligentes Leistungsmodul (IPM) zu entwickeln, das Treiber-, Steuerungs- und Schutzschaltungen integriert.

Das Hauptziel des Projekts GaNext bestand darin, die Hürden für die Implementierung von GaN zu beseitigen und die gesteigerte Effizienz und Kompaktheit von GaN-basierten Systemen in verschiedenen Stromversorgungssystemen zu realisieren. Der Kern des Projekts konzentrierte sich auf die Entwicklung eines intelligenten GaN-Leistungsmoduls, bei dem Treiberschaltungen, Spannungsregelung und Schutzschaltungen entweder integriert oder gemeinsam mit dem Leistungsmodul verpackt wurden.

Die Funktionalität des Moduls wurde erfolgreich demonstriert und bietet einen Wettbewerbsvorteil in Systemen wie Ladegeräten für Elektrofahrzeuge (EV), Beleuchtung, Antrieben und Photovoltaik (PV)-Wechselrichtern, die alle optimierte magnetische Komponenten aufweisen. Durch die Bewältigung dieser verschiedenen Probleme hat sich das GaNext IPM zu einer zentralen Komponente der nächsten Generation von GaN-Leistungssystemen entwickelt.

Das Projekt hat erfolgreich ein intelligentes GaN-Leistungsmodul im Verbund hervorgebracht (siehe Abbildung 1), dass die GaN-Technologie in ein kompaktes und effizientes Leistungsmoduldesign integriert. Diese Errungenschaft sollte bestehende Herausforderungen wie begrenztes Fachwissen, hohe Kosten und komplexe Integration in Verbindung mit der Einführung von GaN überwinden.

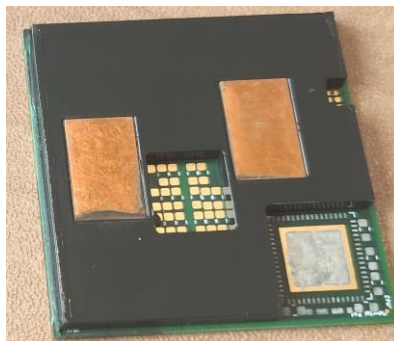


Abbildung 1: GaNext Modul – Abmessungen 35 x 35 x 4 mm

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts mit dem Titel "Leistungselektronik der nächsten Generation zur Reduzierung von CO₂-Emissionen im Verkehr und in der Industrie" hat Sumida einen entscheidenden Beitrag durch die Entwicklung und Herstellung magnetischer Komponenten geleistet. Diese Komponenten spielen eine entscheidende Rolle in der Realisierung innovativer Lösungen zur Reduzierung des CO₂-Ausstoßes und zur Verbesserung der Energieeffizienz im Verkehr und in industriellen Anwendungen. Sumidas Expertise und Forschungsleistungen auf dem Gebiet der magnetischen Komponenten haben dazu beigetragen, die Ziele und den Erfolg dieses wegweisenden Projekts zu unterstützen.

Um die elektrische und thermische Leistungsfähigkeit magnetischer Bauelemente erheblich zu steigern, haben wir in unserem Projekt gezielt hochintegrierte Kernbausätze ausgewählt. Hierbei war es unerlässlich, die unterschiedlichen Schaltungstopologien, die in den jeweiligen Anwendungsfällen vorkommen, individuell bei der Bauteilauslegung zu berücksichtigen. Wir haben diese Anpassungen vorgenommen, um den spezifischen Anforderungen und Erwartungen unserer Projektpartner in vollem Umfang gerecht zu werden.

Um die spezifischen Materialverluste zu minimieren, hat Sumida umfangreiche Forschungsarbeiten zur Charakterisierung von Ferritwerkstoffen durchgeführt. Im Zuge der Auslegung und Optimierung wurden verschiedene Ansätze erforscht, um die Verlustleistung zwischen dem Kern und der Wicklung anzupassen und somit die Wärmeableitung optimal zu gestalten. Zusätzlich wurden gründliche Untersuchungen zu Kernformen, Wickelaufbauten und der Integration in das Gehäuse durchgeführt.

Eine weitere bahnbrechende Innovation besteht in der drastischen Reduktion der Verlustleistung bei Transformatoren und Speicherdrosseln im Frequenzbereich von 400 kHz bis etwa 2 MHz. Hierbei haben wir neue Simulationstools und Verfahren entwickelt und erfolgreich eingesetzt. Die gemeinsamen Untersuchungen aller Projektpartner haben den Weg für den Einsatz dieser fortschrittlichen Technologie in den angestrebten Anwendungen geebnet. Durch die sorgfältige Auswahl geeigneter Schaltungstopologien ermöglicht dieser Ansatz eine weitere Reduzierung der Baugröße und eine signifikante Verbesserung der Kühlungeffizienz.

Am Projektende stehen nun maßgeschneiderte magnetische Bauelemente zur Verfügung, die gezielt auf den erweiterten Frequenzbereich und die begrenzten Bauraumvorgaben in den jeweiligen Anwendungen ausgerichtet sind. Dieses Ziel wurde durch den Einsatz sorgfältig ausgewählter Ferrite erreicht, die eine Minimierung der Verlustleistung im gewünschten Frequenz- und Temperaturbereich ermöglichen. Darüber hinaus konnten Verluste mithilfe innovativer Designs reduziert werden, was wiederum die Leistungsintegrität steigert und die Integration passiver Induktivitäten in den verwendeten Wandlern ermöglicht, um die Leistungsdichte zu erhöhen.

In Abbildung 2 sind die hochentwickelten magnetischen Bauelemente von Sumida abgebildet, die im Verlauf umfangreicher Forschungsarbeiten hervorgegangen sind. Jedes dieser Bauteile ist spezifisch einem konkreten Anwendungsszenario, beziehungsweise einem unserer Projektpartner zugeordnet. Diese Zuweisung der Bauelemente verdeutlicht die maßgeschneiderte Ausrichtung und die praxisnahe Anwendbarkeit der Ergebnisse unserer Forschungsarbeit.

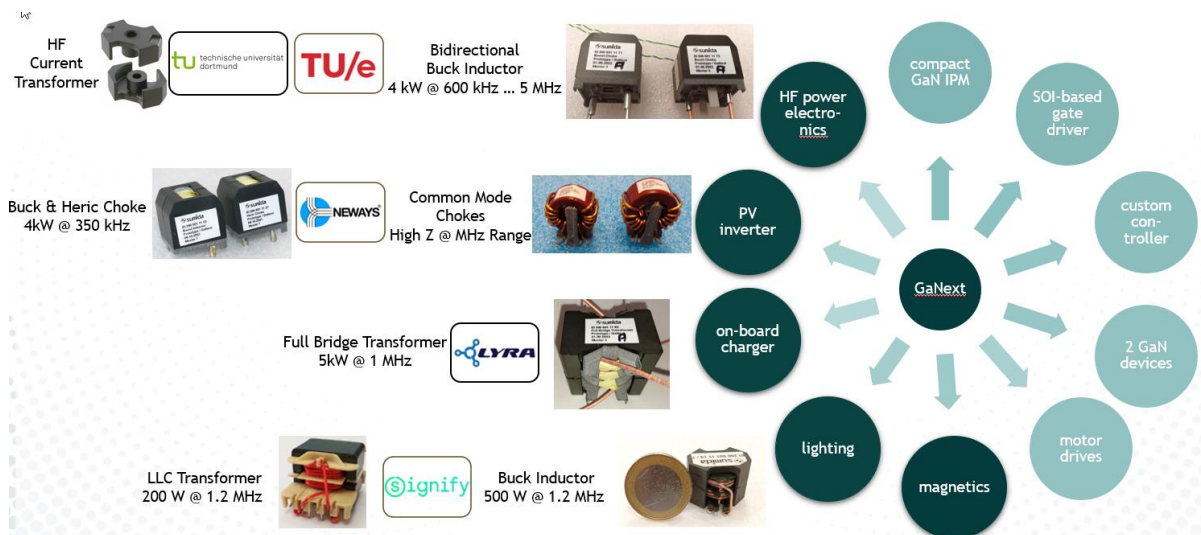


Abbildung 2: Zuordnung der Bauteile zu den jeweiligen Projektpartnern

Fazit

Die Steigerung der Effizienz und somit die Einsparung von Rohstoffen ist ein zentraler Punkt des Projekts GaNext. Spannungswandler mit einer sehr hohen volumen- und massebezogenen Leistungsdichte und gleichzeitig hohem elektrischen Wirkungsgrad steigern die Effizienz der jeweiligen elektrischen Systeme.

Das GaNext-Projekt kann hierbei einen erheblichen Beitrag leisten, da hochkompakte und leichte magnetische Bauelemente eine unverzichtbare Voraussetzung für zwingend notwendige Anforderungen sind. Die in diesem Projekt erzielten Ergebnisse haben das Potenzial, bedeutende Fortschritte auf dem Gebiet der innovativen magnetischen Bauelemente zu bewirken und die Entwicklungen in diesem Bereich maßgeblich voranzutreiben.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN geplant	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Leistungselektronik der nächsten Generation für CO2-Einsparungen in Verkehr und Industrie – GaNext - Teilvorhaben: Magnetische Komponenten für die GaN-basierte Leistungselektronik der nächsten Generation	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Dr. Michael Schmidhuber Herbert Jungwirth	5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.04.2023
	6. Veröffentlichungsdatum 31.10.2023
	7. Form der Publikation online
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) SUMIDA Components & Modules GmbH Dr. Hans-Vogt-Platz 1 94130 Obernzell	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 16EMO080
	11. Seitenzahl 47
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 10115 Berlin	13. Literaturangaben
	14. Tabellen 6
	15. Abbildungen 35
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) VDI/VDE-IT, TIB Hannover	
18. Kurzfassung Im Rahmen dieses Forschungsprojekts mit dem Titel "Leistungselektronik der nächsten Generation zur Reduzierung von CO2-Emissionen im Verkehr und in der Industrie" hat Sumida einen entscheidenden Beitrag durch die Entwicklung und Herstellung magnetischer Komponenten geleistet. Diese Komponenten spielen eine entscheidende Rolle in der Realisierung innovativer Lösungen zur Reduzierung des CO2-Ausstoßes und zur Verbesserung der Energieeffizienz im Verkehr und in industriellen Anwendungen. Sumidas Expertise und Forschungsleistungen auf dem Gebiet der magnetischen Komponenten haben dazu beigetragen, die Ziele und den Erfolg dieses wegweisenden Projekts zu unterstützen. Am Projektende stehen nun maßgeschneiderte magnetische Bauelemente zur Verfügung, die gezielt auf den erweiterten Frequenzbereich und die begrenzten Bauraumvorgaben in den jeweiligen Anwendungen ausgerichtet sind. Das ursprünglich anvisierte Anwendungsszenario bedient dabei die folgenden Applikationen: Automotive On-Bord-Charger, Photovoltaik-Leistungsinverter, Beleuchtungstechnik und Hochfrequenz DC-DC Steller. Die gesteckten Ziele wurden durch den Einsatz sorgfältig ausgewählter Ferrite erreicht, die eine Minimierung der Verlustleistung im gewünschten Frequenz- und Temperaturbereich ermöglichen. Darüber hinaus konnten Verluste mithilfe innovativer Designs reduziert werden, was wiederum die Leistungsintegrität steigert und die Integration passiver Induktivitäten in den verwendeten Wandlern ermöglicht. Die in diesem Projekt erzielten Ergebnisse haben das Potenzial, bedeutende Fortschritte auf dem Gebiet der innovativen magnetischen Bauelemente zu bewirken und die Entwicklungen in diesem Bereich maßgeblich voranzutreiben.	
19. Schlagwörter GaN Power Modul, IPM Modul, Inductive Components	
20. Verlag TIB Hannover Welfengarten 1B 30167 Hannover	21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Report		
3. title GaNext "Next Generation GaN Power Module Project"			
4. author(s) (family name, first name(s)) Dr. Michael Schmidhuber Herbert Jungwirth		5. end of project 30 th April 2023	
		6. publication date 31 st October 2023	
		7. form of publication online	
8. performing organization(s) (name, address) SUMIDA Components & Modules GmbH Dr. Hans-Vogt-Platz 1 94130 Obernzell		9. originator's report no.	
		10. reference no. 16EMO080	
		11. no. of pages 476	
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 10115 Berlin		13. no. of references	
		14. no. of tables 6	
		15. no. of figures 35	
16. supplementary notes			
17. presented at (title, place, date) VDI/VDE-IT, TIB Hannover			
18. abstract In the context of this research project titled "Next Generation GaN Power Module Project" Sumida has made a significant contribution through the development and manufacture of magnetic components. These components play a crucial role in realizing innovative solutions to reduce CO2 emissions and improve energy efficiency in transportation and industrial applications. Sumida's expertise and research achievements in the field of magnetic components have contributed to supporting the goals and success of this groundbreaking project. At the project's conclusion, custom-designed magnetic components are now available, specifically tailored to the extended frequency range and limited space requirements in respective applications. The originally envisioned application scenario serves the following applications: Automotive On-Board Charger, Photovoltaic Power Inverter, Lighting Technology, and High-Frequency DC-DC Converter. The set goals were achieved by carefully selected ferrites, minimizing power losses in the desired frequency and temperature range. Furthermore, losses were reduced through innovative designs, enhancing power integrity, and enabling the integration of passive inductances in the used converters to increase power density. The results achieved in this project have the potential to bring about significant advances in the field of innovative magnetic components and to push developments in this area significantly.			
19. keywords GaN Power Modul, IPM Modul, Inductive Components			
20. publisher TIB Hannover Welfengarten 1B 30167 Hannover		21. price	