

MVDC4S

Schlussbericht

Zuwendungsempfänger: AQ Inductive Components Germany GmbH Ahornallee 9 33016 Paderborn	Förderkennzeichen: 03SX536E
Vorhabenbezeichnung: Verbundprojekt: MVDC4S - Erforschung von DC- Mittelspannungs-Verteilnetzen zum umweltschonenden Betrieb von Schiffen	
Teilvorhaben: Erforschung von Mittelfrequenz-Mittelspannungs-Transformatoren für DC- Mittelspannungs-Verteilnetze zum Umweltschonenden Betrieb von Schiffen	
Laufzeit des Vorhabens: 01.01.2021 bis 31.09.2024	
Berichtszeitraum 01.01.2024 bis 31.09.2024	
Berichtsdatum 31.04.2025	
Vorgelegt beim Projektträger: Projektträger Jülich (PtJ) Meeresforschung, Geowissenschaften, Schiffs- und Meerestechnik (MGS) Maritime Technologien (MGS2)	
Forschungszentrum Jülich GmbH Postfach 61 02 47 – 10923 Berlin	
Ansprechpartner: Pablo Schmiemann, Marcus Hill	
Vorgelegt durch: Dr. Björn Riemer für AQ Inductive Components Germany GmbH Ahornallee 9, 33016 Paderborn Telefon: +49 5251 77736 22 E-mail: bjorn.riemer@aqgroup.com	Gefördert durch:  Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestags.	
Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.	

I Kurzdarstellung

1. Ziele des Vorhabens

1.1 Gesamtziel und Motivation

Die gesamte Verkehrsbranche - inklusive der Schifffahrtsbranche und dabei insbesondere auch die Kreuzfahrtschifffahrt – steht aufgrund des Klimawandels, der regulatorischen Vorgaben und der kritischen öffentlichen Berichterstattung vor der großen Herausforderung, den Schadstoff- und CO₂-Ausstoß zu reduzieren, lokal emissionsfrei zu fahren und insbesondere auch in Häfen den Ausstoß von Schadstoffen zu minimieren bzw. generell zu vermeiden. Beispielsweise wurde von der Internationalen Seeschifffahrts-Organisation der Vereinten Nationen (IMO) im April 2018 entschieden, dass der CO₂ Ausstoß der internationalen Schifffahrt bis zum Jahr 2050 halbiert werden soll (Bezugsjahr 2008). Für Kreuzfahrtschiffe gibt es weiterhin die Vorgabe der norwegischen Regierung, dass ab 2026 nur noch lokal emissionsfrei fahrende Schiffe in norwegische Fjorde einfahren dürfen.

Diese Ziele können unter anderem durch den vermehrten Einsatz von Batterien, höherer Effizienz der Antriebssysteme, Einsatz von Brennstoffzellen und auch durch Versorgung der Schiffe im Hafen mit Landstromversorgungssystemen erreicht werden. Niederspannungs-Gleichspannungs-Netze (LVDC) ermöglichen beispielsweise die einfache Integration von Batterien und Brennstoffzellen auf kleineren Schiffen (wie z.B. Fähren). Weiterhin kann bei konventionell angetriebenen Schiffen die Effizienz erhöht werden, da die Diesel- oder LNG-Generatoren in effizienteren Betriebspunkten betrieben werden können.

Um vergleichbare Vorteile bei Schiffen mit großen Leistungen wie z.B. Kreuzfahrtschiffen zu erzielen, zielte dieses Vorhaben darauf ab Mittelspannungs-Gleichspannungs-Netze (MVDC-Netze) zu erforschen.

Durch die Verwendung eines MVDC Verteilnetzes lassen sich auch größere Diesel- oder LNG-Verbrennungsmaschinen drehzahlvariabel betreiben, da die Generatoren über einen Gleichrichter an den DC-Bus angebunden sind. Dadurch lässt sich auch bei den größeren Aggregaten die Drehzahl entsprechend dem Bedarf an elektrischer Leistung anpassen und diese immer im verbrauchsoptimalen Betriebspunkt zu fahren und damit Treibstoff/CO₂ und NO_x zu reduzieren. Darüber hinaus müssen die LNG betriebenen Verbrennungsmotoren nicht für die temporären Lastspitzen ausgelegt werden, da die Lastspitzen von Energiespeichern zur Verfügung gestellt werden, die im MVDC-Netz einfacher integriert werden können. Dies wird zu einer Reduktion der Kosten und einer Steigerung des Wirkungsgrades der LNG betriebenen Verbrennungsmotoren führen.

Das MVDC- oder LVDC-Netz ermöglicht auch eine einfachere Landanbindung mit hoher Leistung an einen einfachen MVAC-Landanschluss. Eine innovative Lösung reduziert dabei die erforderliche Blindleistung an der Landanbindungsstelle sowie deren Belastung mit Harmonischen. Schließlich wird über das MVDC-Netz der Weg zu einem lokalen Zero Emission Betrieb gelegt.

Das Ziel des Gesamtvorhabens MVDC4S war es ein MVDC-Verteilssystem zu erforschen, dass im Vergleich zu einem bestehenden MVAC-Netz eine Einsparung beim Bauraum von etwa 30% und beim Materialaufwand von 10% realisiert. Bei Nennleistung sollte mit dem neuen Konzept eine Energieeinsparung von 3%, und im Teillastbereich eine Einsparung von 15% erreicht werden. Die Referenz hierfür stellte die AIDAnova dar.

1.2 Teilvorhaben: Erforschung von Mittelfrequenz-Mittelspannungs-Transformatoren für DC-Mittelspannungs-Verteilnetze zum Umweltschonenden Betrieb von Schiffen

Für das Erreichen der übergeordneten Vorhabenziele wurde für den Megawatt-Leistungsbereich ein bidirektionaler DC-DC-Wandler zur Einbindung von Niederspannungskomponenten (Batterien, Brennstoffzellen, usw.) in ein Mittelspannungsgleichspannungsnetz auf dem Schiff erforscht.

Für diesen DC-DC-Wandler wurde seitens AQ ein Mittelspannungs-Mittelfrequenztransformator entwickelt, der die galvanische Trennung und den sicheren Betrieb des DC-DC-Wandlers sicherstellt.

Innerhalb des DC-DC-Wandlers ist die Betriebsfrequenz, bei der die galvanische Trennung erfolgt und bei welcher der Transformator operiert, unabhängig von der Frequenz des äußeren Versorgungsnetzes. Durch Wahl einer hohen Frequenz konnten der Bauraum und Gewicht bzw. Materialeinsatz deutlich reduziert werden. Im Vergleich zu einem 50Hz/60Hz-Transformator wurde bereits gezeigt, dass bei einer Betriebsfrequenz von 1kHz eine Reduktion des Materialeinsatzes um den Faktor 10 sowie eine Reduktion des Bauraums um den Faktor 15-20 möglich ist.

Das Ziel im Projekt MVDC4S war es im Megawatt-Leistungsbereich durch eine Erhöhung der Betriebsfrequenz des DC-DC-Wandlers die Baugröße des Transformators weiter zu reduzieren. Dabei musste der Transformator die Isolationsanforderungen für die Mittelspannung erfüllen und gleichzeitig eine gute Abfuhr der Verlustwärme ermöglichen.

Konkret sollte eine Reduktion der Baugröße und der Gewichts-/ bzw. Materialeinsparung von etwa 25% realisiert werden, wobei die Referenz hierfür der am Forschungscampus Flexible Elektrische Netze eingesetzte Mittelfrequenztransformator (Leistung: 5MW, Spannung: 5kV, Frequenz 1kHz, Gewicht 700kg, Volumen 0,5m³) war.

Durch den Einsatz von neuartigen SiC-Halbleitern sollte u.a. der Wirkungsgrad des DC-DC-Wandlers erhöht werden. Für den Transformator ergibt sich durch die schnellschaltenden Halbleiter jedoch eine erhöhte Belastung des elektrischen Isolationssystems.

Daher war es ein weiteres Ziel des Projekts die gezielte Auslegung des elektrischen Isolationssystems für die höheren Betriebsfrequenzen und insbesondere die erhöhten Spannungsflanken. Konkret sollte das elektrische Isolationssystem des zu erforschenden Transformators geeignet sein Spannungsflanken von 20-30kV/ μ s dauerhaft standzuhalten. Im Vergleich zum Stand der Technik (IGBT 5-6kV/ μ s) ist dies eine Steigerung um den Faktor 5.

Durch die Widerstandsfähigkeit des realisierten elektrischen Isolationssystems gegenüber hohen Spannungsbelastungen entstand für den DC-DC-Wandler erst die Möglichkeit neuartige SiC-Halbleiter auch bei Mittelspannung einzusetzen und somit u.a. den Wirkungsgrad des DC-DC-Wandlers zu erhöhen und z.B. eine hohe Regeldynamik zu realisieren.

In Verbindung mit der Erforschung eines effizienten Kühlsystems sollte der Betrieb des Transformators bei hohen Frequenzen und Mittelspannung ermöglicht und damit Bauraum, Materialeinsatz und Kosten reduziert werden. Durch den Ansatz eines modularen Aufbaus für den DC-DC-Wandler und auch die Transformatoren wurde zum einen die Ausfallsicherheit erhöht, da je nach Grad der Modularität bei Wegfall eines Moduls nur ca. 15-20% der Versorgungsleistung entfallen. Zum anderen wird sich der Aufwand und die Kosten für den Fall eines Transformatorausfalls auf dem Schiff durch die kompakten Modulgrößen erheblich reduzieren.

2. Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

2.1 Verbundstruktur

Mit den Firmen Siemens AG, Siemens Energy GmbH, Semikron, Fraunhofer IISB, Meyer Werft und AQ Inductive Components Germany GmbH arbeiteten Projektpartner zusammen die durch Ihre Erfahrungen in den jeweiligen Fachdisziplinen die gesamte Kette von der Einzelkomponente bis zum Gesamtsystem – hier die Energieverteilung auf Kreuzfahrtschiffen – abbilden konnten und hiermit eine zielgerichtete Umsetzung der Ergebnisse ermöglichten. Die Projektstruktur und die Beträge der Konsortialpartner sind in Abbildung 2-1.

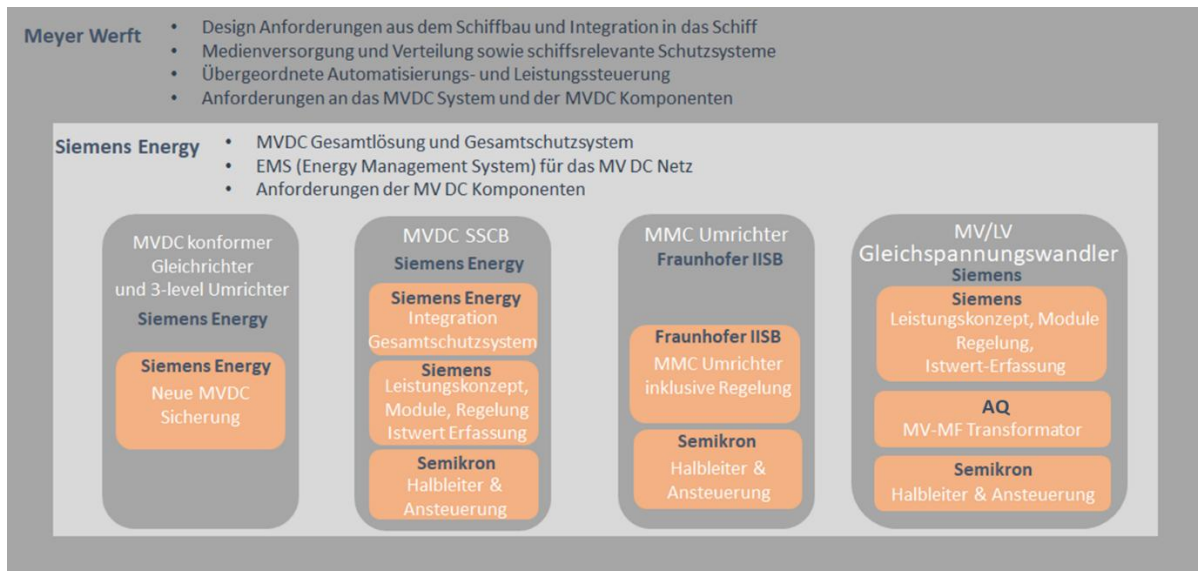


Abbildung 2-1: Projektstruktur und Beiträge der der Konsortialpartner.

2.2 Unternehmensprofil AQ IC und Vorarbeiten

AQ Inductive Components Germany GmbH ist ein international führendes Unternehmen in der Entwicklung und Produktion von Lösungen, die den effizienten und zuverlässigen Betrieb elektrischer Systeme gewährleisten. Die vielseitige Produktpalette umfasst spezialisierte, kundenspezifische Leistungsmagnetbauteile und Filter, die vom Leistungsbereich einiger Kilowatt bis in den Megawattbereich reichen.

AQ-Komponenten finden Anwendung in energieeffizienten Antriebssystemen und elektronischen Motorsteuerungen, in Wind- und Photovoltaikanlagen, in der Bahntechnik, in Werkzeugmaschinen und Robotern sowie in Stromversorgungen für eine Vielzahl elektronischer Geräte.

Am Standort in Paderborn befindet sich die Forschungs- und Entwicklungsabteilung für kundenspezifische Magnetbauteile und Systeme. Die Fertigung der in Paderborn entwickelten Produkte erfolgt in Kecskemét, Ungarn. Dort wurden auch die im Rahmen dieses Forschungsprojekts entwickelten Forschungsmuster und Prototypen gefertigt und qualifiziert.

AQ ist seit vielen Jahren ein aktiver Partner im Forschungscampus Flexible Elektrische Netze. Im Bereich Mittelspannungs-Mittelfrequenztransformatoren ist AQ seit Jahren aktiv und hat im Rahmen von Forschungsprojekten erfolgreich Prototypen mehrphasiger MF-MV-Transformatoren in der Leistungsklasse bis 5 MW realisiert.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Zeitplanung des Vorhabens ist in Abbildung 3-1 abgebildet. Die Arbeitspakete mit Beteiligung von AQ sind farblich markiert.

			Projektjahr 1				Projektjahr 2				Projektjahr 3				Projektjahr 4		
			Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3
AP1 Systemanforderungen, Spezifikation	T1.1	Systemanforderungen Kreuzfahrtschiffe															
	T1.2	Untersuchung anderer Schiffstypen als potenzielle Anwendungsfälle															
	T1.3	Systemarchitektur für ein LV/MV DC Energieversorgungskonzept															
	T1.4	Anforderungen an die Systemkomponenten															
	T1.5	Ableitung von Fahrzyklen der Antriebsumrichter zur Optimierung des Systemdesigns															
	T1.6	Definition der erforderlichen Leistungsbereiche der Systemkomponenten															
	T1.7	Spezifikation des MF-Trafo															
	T1.8	Spezifikation der Leistungshalbleiter															
AP2 Bauelemente	T2.1	Erforschung von Halbleiterbauelementen und der Aufbau- und Verbindungstechnologie															
	T2.2	Erforschung von optimierten MV-MF Transformatoren															
	T2.3	Erforschung von optimierten Sensoren															
AP3 MVDC-Netz u. Komponenten	T3.1	Erforschung, Realisierung und Validierung des MV/LV Gleichspannungswandlers															
	T3.2	Erforschung, Realisierung und Validierung des Systemschutzes für MVDC Netze															
	T3.3	Erforschung, Realisierung und Validierung des übergeordneten Power Management Systems															
	T3.4	Erforschung, Realisierung und Validierung des modularen Multilevelumrichters															
AP4 MVDC-Netzdemostrator (Aufbau usw.)	T4.1	Spezifikation des MVDC-Netz Demonstrators															
	T4.2	Erstellen der „Test-Cases“ für den Demonstrator															
	T4.3	Aufbau eines prototypischen MV/LV Gleichspannungswandler															
	T4.4	Aufbau eines prototypischen Schutzsystems für den Demonstrator															
	T4.5	Aufbau des erforschten Multilevelumrichters für den Demonstrator															
	T4.6	Designanalyse, simulatorische und experimentelle Absicherung und Aufbau von prototypischen Halbleitermodulen inkl. der optimierten Gate-Unit für Demo															
	T4.7	Aufbau des erforschten MV-MF-Transformators für den Demonstrator															
	T4.8	Integration aller Komponenten zu einem Systemdemostrators															
	T4.9	Integration des übergeordneten Powermanagementsystems für des Gesamtsystems und aller Medien (Elektrisch, Waser, Wärme, etc.) in die Demo															
AP5 Evaluierung des MVDC-Systems	T5.1	Evaluierung der Halbleitermodule für den MV/LV DC/DC Wandler, den MV SSCB und für den MMC auf Basis des Betriebs des Demonstrators															
	T5.2	Evaluierung des MV/LV Gleichspannungswandlers															
	T5.3	Evaluierung des prototypischen Schutzsystems															
	T5.4	Evaluierung des Multilevelumrichters auf Basis des Demonstrator Betriebs															
	T5.5	Evaluierung des Gesamtsystems (Bauraum, Material, Funktionalität, Energieeffizienz)															

Abbildung 3-1: Zeitplanung.

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Das beantragte Vorhaben zielte auf die Erforschung eines MVMF-Transformators mit hohen Isolationsanforderungen für den Einsatz in einem DC-DC-Wandler innerhalb des MVDC-Versorgungsnetzes auf Schiffen ab. DC-Netze für Schiffsanwendungen sind bisher nur für den Niederspannungsbereich kommerziell verfügbar. Die Vorteile eines DC-Netzes z.B. durch Effizienzsteigerungen wurden bereits aufgezeigt (z.B. SISHIP BlueDrive PlusC von Siemens Energy). Die maximale Leistung ist jedoch durch die Niederspannung auf ca. 5MW begrenzt. Um auch größere Leistungen im Multi-Megawatt realisieren zu können ist ein Wechsel auf Mittelspannung notwendig. Der Einsatz von MVDC bis maximal 3kV ist Teil verschiedener Veröffentlichungen, zumeist für militärische Anwendungen. Eine wichtige Komponente im MVDC-Netz ist der galvanisch getrennte DC-DC-Wandler. Durch die Entwicklung neuer Halbleiter wurde auch die Entwicklung von Umrichtern und Wandlern im Mittelspannungsbereich weiter motiviert.

MV-DC-DC Wandler sind Bestandteil der Forschung in unterschiedlichen Anwendungen und Märkten. Hierzu zählen neben dem Versorgungsnetz von Schiffen, Offshore-Windenergieanlagen, Photovoltaik-Kollektornetze oder Antriebe und Hilfsbetriebe von Zügen.

Nach dem Stand der Technik werden zumeist Wandler-Module bis ca. 250kW-Leistung eingesetzt und eine höhere Leistung wird durch mehrere parallelen Module erreicht. Die Topologie der Wandler ist entweder eine 1- oder 3-phasige Dual-Active-Bridge oder ein Resonanzwandler. Je nach Topologie werden unterschiedliche Anforderungen an den Transformator gestellt.

Durch die heutige Entwicklung der schnellschaltenden Leistungshalbleiter wird auch die Entwicklung von MV-DC-DC-Wandlern weiter vorangetrieben und es entstehen neue Herausforderungen für den Transformator. Der MVMF-Transformator ist für den DC-DC-Wandler die Schlüsselkomponente. Hohe Belastungen entstehen insbesondere für das elektrische Isolationssystem von MV-MF-Transformatoren und Fragen der Zuverlässigkeit sind bisher nicht ausreichend erforscht.

Im Gegensatz zu Niederspannungs-Mittelfrequenztransformatoren, sind MVMF-Transformatoren heute kommerziell nicht erhältlich. Veröffentlichungen von Kenzelmann (ABB), Tripathi und Bhattacharya (NCSU), Wang (NCSU) stellen realisierte prototypische Aufbauten, bzw. Forschungsmuster von MV-MF-Transformatoren im kleinen Leistungsbereich bis 50kW und Spannungen bis 3kV vor. Weitere Untersuchungen wurden z.B. von Bahmani (Chalmers) durchgeführt, der ein Forschungsmuster eines 50kW-Transformator für eine Isolationsspannung von 6kV bei 5kHz vorgestellt hat. Heinemann (ABB) stellte einen 10kHz-350kVA-Transformator für eine Spannung bis 3kV vor. Gradinger (ABB) zeigte in seiner Arbeit ein Proof-of-Concept eines 240kVA, 10kHz-Transformators bei 50kV. Er konzentrierte sich dabei auf die Spannungsfestigkeit. Einflüsse von hohen Spannungsflanken auf die dauerhafte Belastung des Isolationssystems wurden nicht behandelt.

Realisierte Multimegawatt-MV-Wandler basieren heute noch auf klassischen Leistungshalbleitern mit moderater Spannungssteilheit. Es sind Veröffentlichungen von Zhao (ABB) zu nennen, der einen 1,2MVA Traktionswandler vorstellt für den Anschluss an ein 15kV-Bahnnetz. Die eingesetzten MV-MF-Transformatoren werden bei 2,2kHz betrieben und sind ölgekühlt. Soltau (EON-PGS) präsentiert in seiner Veröffentlichung einen MV-DC-DC-Wandler der Leistungsklasse 5MW bei 5kV.

Für die Zuverlässigkeit und Lebensdauer notwendige Fragestellungen insbesondere zum Aufbau des elektrischen Isolationssystems von kompakten MVMF-Transformatoren mit effizienter Kühlung waren nach dem Stand der Wissenschaft und Technik zu Vorhabenbeginn noch nicht beantwortet und Kernthema dieses Vorhabens.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Für die Durchführung des Teilvorhabens gab es eine enge Zusammenarbeit mit allen am Projekt beteiligten Kooperationspartnern.

Externe Partner waren an den Arbeitspaketen von AQ nicht beteiligt.

II Eingehende Darstellung

1. Erzieltes Ergebnis

1.1 Vorbemerkung

Das Gesamtvorhaben MVDC4S gliedert sich insgesamt in 5 übergeordnete Arbeitspakete (siehe Abbildung 3-1). In 3 dieser Arbeitspakete war AQ beteiligt, wobei die Schwerpunkte für das Erreichen der Projektziele in den folgenden Teilaufgaben lagen:

- T1.4 Anforderungen an die Systemkomponenten (Gleichspannungswandler, Antriebs-/Generatorstromrichter und Schutzgeräte)
- T1.7 Spezifikation des MF-Trafo hinsichtlich Isolation und Kühlung
- T2.2 Erforschung von optimierten MV-MF Transformatoren
- T4.7 Aufbau des erforschten MV-MF-Transformators für den Demonstrator

Im Folgenden werden die Inhalte detailliert beschrieben und die erzielten Ergebnisse dargestellt.

1.2 AP 1: Systemanforderungen, Systemarchitektur und Spezifikation des Systems und der Komponenten

1.2.1 Anforderungen an die Systemkomponenten (Gleichspannungswandler, Antriebs-/Generatorstromrichter und Schutzgeräte)

Die Komplexität des Energieversorgungssystems auf einem Kreuzfahrtschiff erfordert die Spezifikation der Anforderungen auf unterschiedlichen Ebenen. Der MV-MF-Transformator ist ein Bauteil, welches in die Systemkomponente DC-DC-Wandler integriert wird. Detaillierte Transformatorspezifikationen sind auf der oberen Systemspezifikation nicht zwingend in Betracht zu ziehen. Um dennoch zu vermeiden, dass durch Systemvorgaben ungünstige Anforderungen an den Transformator gestellt werden, wurde als Eingang für die übergeordnete Systemspezifikation ein Steckbrief des MVMF-Transformators nach Tabelle 1-1 mit den wesentlichen Anforderungen erstellt. Dieser Steckbrief diente als Grundlage für weitere Expertendiskussionen, in denen die wesentlichen Parameter des übergeordneten DC-DC-Wandlers festgelegt wurden. Zu diesen Parametern gehörten unter anderem die Spannungslevel auf der Mittelspannungs- und Niederspannungsseite sowie die Leistungsklassen.

Unter Berücksichtigung der abgesteckten Transformatorparameter wurde eine Parallel- und Serienschaltung von Dual-Active-Bridges als die vielversprechendste Topologie eines DC-DC-Wandlers identifiziert. Diese Topologie bietet eine hohe Effizienz und Flexibilität bei der Umsetzung der Systemanforderungen.

Die angestrebte Systemleistung wurde auf 1 MW festgelegt. Aus Sicht der Leistungshalbleiter erwies sich eine Modularisierung mit 8 Stufen als vorteilhaft, wodurch sich eine Modulgröße von 125 kW ergab. Diese Modularisierung ermöglicht eine flexible und effiziente Anpassung der Leistung an die spezifischen Anforderungen des Systems. Auch wenn aus Sicht der Leistungselektronik eine Modularisierung mit 8 Stufen vorteilhaft erschien, war der sinnvolle Grad der Modularisierung für den Transformator noch aufzuzeigen (T1.7 Abschnitt: 1.2.2).

Steckbrief MVMF-Transformator für DC-DC-Wandler MVDC4S		
Elektrische Anforderungen		
Beschreibung	Anforderung	Kommentar
Betriebsart	1-ph DAB / Resonanz	
Bemessungsfrequenz	10kHz – 30kHz	
Übersetzungsverhältnis	1:1 2:1 5:1	Untersuchung Modularisierung in Task 1.7
Bemessungsleistung	400-500kVA	
Max. DC-Spannung	5000V 6000V	
Spannung U1	1000V 3000V 6000V	Untersuchung Modularisierung in Task 1.7
Spannung U2	700V	
Isolationsspannung	7,8kV	
Max. du/dt	15 – 30kV/µs	
Temperaturklasse	200	
Schirmwicklung	TBD Ja / Nein	
Wirkungsgrad	>98,5%	
Mechanische Anforderungen		
Abmessungen (L x B x H)	19"- Einbau	
Gewicht	Tbd	
Schock und Vibration	Tbd	
Kühlungsart	AF WD	Weiterführende Untersuchung in AP 2.
Kühlmedium	Wasser Luft	Bevorzugt Wasser
Schutzgrad	IP00	
Umweltbedingungen		
Umgebungstemperatur	40-50°C	Gibt es unterschiedliche Temperaturbereiche/ Lastprofile?
Verschmutzungsgrad	PD3	
Lebensdauer		
Dauer	TBD 25 Jahre	

Tabelle 1-1: Steckbrief MVMF-Transformator.

1.2.2 Spezifikation des MF-Trafo: Isolationskoordination, Kühlsystem, Pulsbelastbarkeit

Basierend auf den allgemeinen Systemanforderungen wurde in diesem Arbeitspaket die Spezifikation des Mittelfrequenz-Mittelspannungstransformators detaillierter festgelegt und Untersuchungen zum Modularisierungsgrad durchgeführt.

Die folgenden Auslegungsparameter wurden für die Untersuchung definiert:

- Bemessungsfrequenz: 20 ... 30 kHz
- Eingangsspannung: 750 ... 3000V
- Übersetzungsverhältnis: 1:1 ... 1:4
- Kühlmedium: Luft / Wasserkühlung

Die Bemessungsfrequenz hat Einfluss auf die Kernquerschnittsfläche bzw. Geometrie. Ein Zusammenhang zur Bemessungsleistung ist nach Gleichung 1-1 gegeben:

$$A_{Fe} \sim \frac{P}{f \cdot B \cdot N \cdot I_{eff}}$$

Gleichung 1-1: Kernfläche in Abhängigkeit der Leistung.

wobei P die Leistung, B die Flussdichte, N die Primärwindungszahl und I_{eff} den Strom angibt.

Die Eingangsspannung definiert die magnetische Auslastung des Kerns, für die Isolationskoordination ist jedoch die maximale DC-Bus Spannung des übergeordneten Systems relevant.

Das Übersetzungsverhältnis hat Einfluss auf die Windungszahlen. Die Streuinduktivität ist eine wichtige Größe für den Betrieb des Transformators in der Dual-Active-Bridge. Da die Streuinduktivität unter anderem quadratisch von der Windungszahl abhängt kann diese maßgeblich auch durch das Übersetzungsverhältnis beeinflusst werden.

Das Kühlmedium hat Einfluss auf die Bauweise des Transformators. Bei wassergekühlten Transformatoren ist in der Regel eine vergossene Ausführung aufgrund der besseren Wärmeleitfähigkeit des Vergusscharzes der trockenen Bauweise vorzuziehen.

Ausgehend von einer Bemessungsfrequenz $f = 20\text{kHz}$ und der fest definierten Ausgangsspannung von $U_2 = 700\text{V}$ wurden zur Bewertung der Modularität Transformatoren unterschiedlicher Leistung berechnet. Die Basis für die Transformatoren war die zuvor definierte Gesamtsystemleistung des DC-DC-Wandlers von 1MW.

Die Modularisierung wurde hinsichtlich Effizienz, Volumen und Gewicht gegenübergestellt. Tabelle 1-2 zeigt die wesentlichen Parameter von zwei Transformator-Designs für den minimalen und maximalen Modularisierungsgrad 1:8 und 1:2.

Für den Kern wurde jeweils ein nanokristallines Material gewählt, welches hinsichtlich der Verluste für die Betriebsfrequenz und den Leistungsbereich bewertet und als passend eingestuft wurde. Die Wicklung wird durch eine Aluminiumfolie realisiert, da sie aufgrund der geringeren Leitfähigkeit gegenüber Kupfer niedrigere Zusatzverluste erzeugt und zudem Gewichtsvorteile mit sich bringt. Abbildung 1-1 zeigt exemplarisch einen MF-Transformator.

Bezüglich des Bauraums ist bei einer vergossenen Komponente eine liegende Bauweise vorteilhaft. Der Vergleich der Berechnungen zeigt bei der Leistungserhöhung im Wesentlichen eine Vergrößerung der Längendimension. Diese steigt von 380 auf 540mm. Da der Schaltschrank des DC-DC Wandlers aber auf 19-Zoll Einschubsystemen basiert (Breite < 470mm) wird es schwierig die große Leistungsklasse im standardisierten Schrank zu platzieren.



Abbildung 1-1: MF-Transformator mit Schnittbandkern und Aluminiumwicklung.

Parameter	Wert	
Leistung [kW]	130	520
Übersetzung	1,07 : 1	4 : 1
Streuinduktivität [μ H]	6	20
Gewicht [kg]	11	23
Abmessungen [mm]	110	140
HxBXL	190	190
	380	540
Volumen [l]	7,9	14,3
Verluste [W]	740	1950

Tabelle 1-2: Bewertung Modularisierung - Vergleich Transformatorauslegung.

Mit Blick auf die Schaltfrequenz kann durch eine Erhöhung von 20kHz auf 30kHz bei gleichbleibender Windungszahl N und Kernflussdichte B , entsprechend Gleichung 1-1, der Kernquerschnitt um den Faktor 1,5 reduzieren werden. Da das Design bei 20kHz/130kW aber bereits einen kleinen Kernquerschnitt von nur 30 x 30mm aufweist bringt eine weitere Reduktion kaum Vorteile. Einerseits wird die Kühlfläche reduziert und andererseits werden die Zusatzverluste weiter ansteigen. Noch nachteiliger wirkt sich das bei der Auslegung für 520kW aus.

Hinsichtlich der Gesamtverluste und des Volumens bezogen auf Gesamtsystemleistung des DC-DC-Wandlers von 1MW hat eine größere Bauleistung des Transformators jedoch Vorteile. Die berechneten Gesamtverluste von 8x 130kW-Transformatoren betragen: 5920W. Für zwei Transformatoren der Bauleistung 530kW betragen die Verluste 3900W. Dies stellt eine Verlustreduktion von 34% gegenüber den 8 Transformatoren dar. Aus Effizienz-sicht sind größere Transformatoreinheiten daher zu bevorzugen.

Hinsichtlich der Isolationskoordination müssen die Transformatoren sowohl bei hohem und auch bei kleinem Modularitätsgrad die gleichen Spannungsabstände und Grenzwerte einhalten. Hierdurch hat eine größere Bauleistung Vorteile in der Kompaktheit.

Hinsichtlich der Kühlung ist wiederum eine kleinere Transformatorgröße im Vorteil. Bei einer großen Baugröße muss die Kühlung mehr Verluste pro Bauraum abführen.

In der Gesamtbewertung der Modularität wurde unter Berücksichtigung der Vorteile in der Leistungselektronik ein Modularitätsgrad von 8 festgelegt. Da jedoch im Arbeitspaket 2 grundlegende Untersuchungen zum Kühlsystem von MVMF-Transformatoren durchgeführt wurden, wurde dort auch die thermisch deutlich kritischere Baugröße von 520kW berücksichtigt.

Für die Leistungshalbleiter steht für den DC-DC-Wandler ein Kühlkreislauf mit entionisiertem Wasser zur Verfügung. Diese Art der Kühlung ist aus Systemsicht auch für den Transformator favorisiert. Eine Wasserkühlung hat im Vergleich zur Luftkühlung des Weiteren den Vorteil, dass der Einbauraum nicht zusätzlich durch die abgeführte Verlustleistung des Transformators erwärmt wird, sondern die Verluste über den Wasserkreislauf abgeführt werden.

Auf Basis der vorhergehenden Untersuchungen wurden die Spezifikation des MVMF-Transformators nach Tabelle 1-3 festgelegt.

Parameter	Wert
Leistung [kW]	130
Eingangsspannung [V]	750
Ausgangsspannung [V]	700
Übersetzung	1,07 : 1
Isolationsspannung [kV]	8,1
Schaltfrequenz [kHz]	20
Streuinduktivität [μ H]	11
Kühlmedium	entionisiertes Wasser

Tabelle 1-3: Spezifikation des MVMF-Transformators.

1.3 AP 2: Erforschung von optimierten MV-MF Transformatoren

1.3.1 Konzeptvergleich von MV-MF-Transformatoren

Basierend auf der in Tabelle 1-3 dargestellten Spezifikation wurden in einer Schaltungssimulation die Strom- / und Spannungsformen für definierte Arbeitspunkte des Transformators bestimmt (Abbildung 1-2).

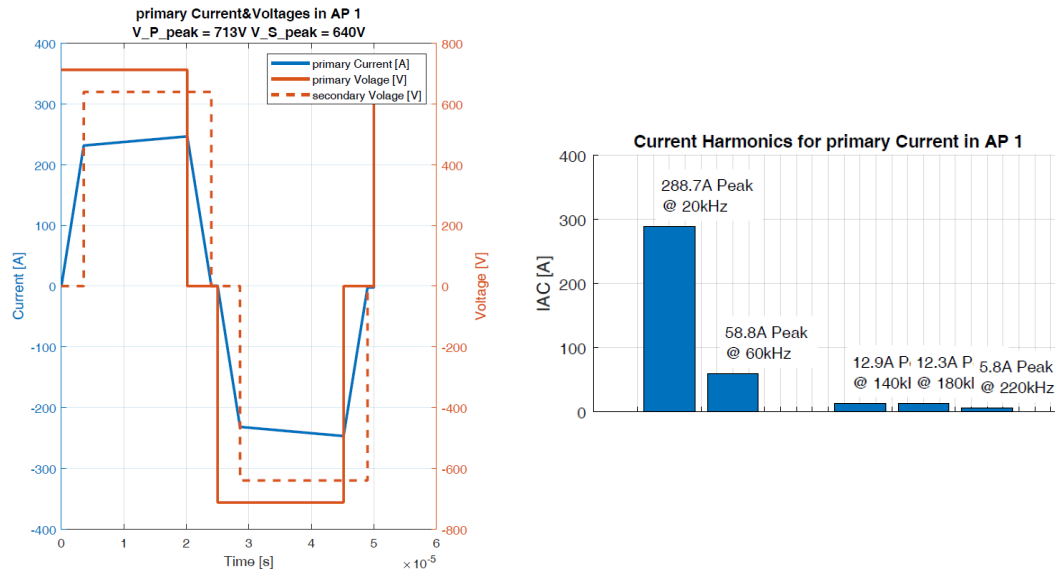


Abbildung 1-2: Strom-Spannungsform im Arbeitspunkt 1 der Dual-Active-Bridge.

Diese Eingangsdaten waren die Grundlage für die detaillierte Verlustbewertung der Transformatoren nach Tabelle 1-2. Mit diesen Daten wurden für jeden Frequenzbereich die Verluste bestimmt, welche wiederum für die Berechnung der Wärmeabfuhr notwendig war.

Für die detaillierte Berechnung wurden zweidimensionale Finite-Elemente-Modelle der Transformatoren aufgebaut und Transformatorparameter wie die Streuinduktivität und die Zusatzverluste innerhalb der Wicklungen berechnet. Abbildung 1-3 zeigt beispielhaft die Streufeld- und Stromverteilung bei einer Betriebsfrequenz von 20kHz. Diese Verlustwerte wurden für Effizienzbestimmungen des DC-DC-Wandlers zur Verfügung gestellt und bildeten auch die Grundlage für die thermische Auslegung und die Untersuchung von Kühlsystemen.

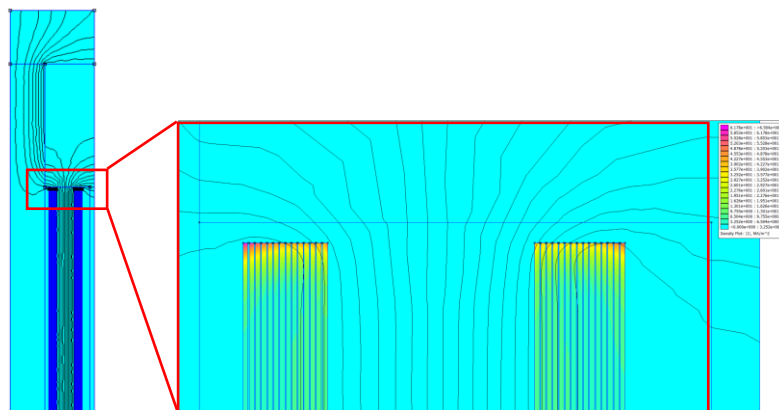


Abbildung 1-3: Streufeldverteilung und Stromverteilung bei 20kHz.

Abbildung 1-3 zeigt einen Schnitt des Transformators unter Berücksichtigung einer forcierten Luftkühlung. Die notwendige Luftstrecke von 60mm zwischen Wicklung und Kern ist deutlich ersichtlich. Diese Strecke kann durch einen Vollverguss reduziert werden. Jedoch wird

hierdurch die Kühlung stark reduziert, sodass eine indirekte Wasserkühlung integriert werden muss.

Die beiden zuvor mittels FEM berechneten Transformator designs wurden für eine Kühlung mit entionisiertem Wasser angepasst und die Entwicklung des Kühlkonzepts wurde gestartet. Abbildung 1-4 zeigt den Querschnitt des Mittelfrequenztransformators für die thermische Berechnung.

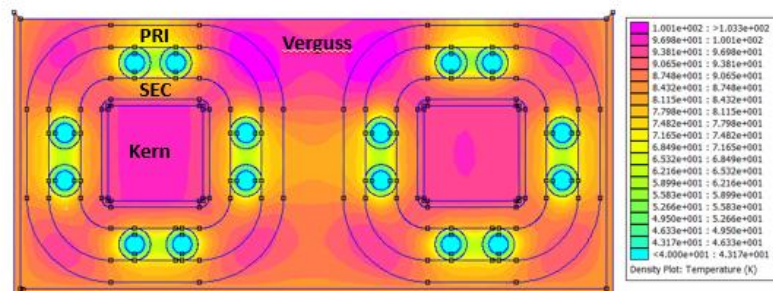


Abbildung 1-4: FEM-Simulation Transformator mit Wasserkühlung

In diesem ersten Ansatz wurde ein Kühlkonzept gewählt, bei dem die Entwärmung der Wicklungssysteme durch Kühlrohre im Streukanal realisiert wird. Für die Untersuchungen wurde ein thermisches Finite Elemente Model erstellt und Simulationen durchgeführt. Weitere Konzepte wurden in Abschnitt 1.3.2 untersucht.

Zur weiteren Untersuchung der Transformatorabmessungen wurden hinsichtlich der Einbausituation Aluminium- und Kupferfolien betrachtet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1-4 dargestellt.

Parameter	Wert	
	Aluminium	Kupfer
Wickelmaterial	Aluminium	Kupfer
Verlustleistung AP1 @ 150°C [W]	1270	1150
Transformatorabmessungen L x B x T [mm ³]	340x170x85	290x160x99
Gewicht Aktivteil [kg]	5,5	9

Tabelle 1-4: Vergleich Transformatorauslegung

Aufgrund der kürzeren Bauform hat die Kupfervariante Vorteile bei der Integration in das DC-DC-Wandler Modul und wird weiterverfolgt.

1.3.2 Untersuchung der Kühlkonzepte für MV-MF-Transformatoren

Die Kühlung des untersuchten Transformators ist ein integraler Bestandteil der Auslegung, weil im Vergleich zu konventionellen 50Hz Transformatoren die volumenbezogenen thermischen Verluste bezogen auf die zur Verfügung stehende Kühloberfläche größer sein können. Aus diesem Grund werden in dem nachfolgenden Kapitel verschiedene Konzepte für eine indirekte Flüssigkeitskühlung, sowie Optimierungspotentiale während des Herstellungsprozesses des Transformators untersucht.

Die indirekte Flüssigkeitskühlung bezeichnet einen Ansatz, bei dem das Kühlmedium in geeigneten Leitungen nahe der Temperaturquelle entlanggeführt wird, um dadurch einen Wärmeübertrag in das Kühlmedium und durch den Volumenstrom des Mediums eine Wärmeabfuhr zu erreichen. Im Gegensatz dazu gibt es die direkte Flüssigkeitskühlung, wie sie beispielsweise bei ölgekühlten Komponenten eingesetzt wird, wobei das Kühlmedium in direktem Kontakt zu den Komponenten steht.

1.3.2.1 Übersicht der untersuchten Kühlkonzepte

Die folgenden Teilaspekte des Kühlsystems wurden systematisch untersucht, um die Kühlleistung zu optimieren.

1. Die Geometrie bezeichnet die Form und Gestalt der Kühlkörper. Dabei wurden mit klassischen flächigen Kühlkörpern und mit Leitungskühlkörpern zwei grundsätzlich verschiedene Ansätze untersucht und miteinander verglichen.
2. Die Materialauswahl ist bei der Auslegung entscheidend, weil verschiedene Materialklassen einerseits deutlich unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten aufweisen. Andererseits lassen sich verschiedene Materialklassen aufgrund ihrer Steifigkeit (und Plastizität) unterschiedlich gut während der Fertigung nahe den Wärmequellen platzieren.
3. Die Installation des Kühlsystems ist die Detailauslegung von Leitungen und Anschlussstücken, um einen sicheren Betrieb bei verschiedenen Umgebungsbedingungen zu gewährleisten.
4. Die prozesseitige Optimierung des Kühlkonzepts befasst sich mit der Wärmeübertragung innerhalb des Transformators. Insbesondere die Wicklung wurde hier betrachtet, weil die Qualität der Wicklung bzgl. der Wärmeübertragung maßgeblich durch die Prozessführung beeinflusst werden kann. Die Eigenschaften anderer Transformatorbestandteile, wie beispielsweise von Kernen oder Abstandhaltern können durch den Prozess nicht beeinflusst werden und müssen als gegeben betrachtet werden.

1.3.2.2 Untersuchung von Kühlkonzepten – Geometrie

Der Untersuchungsgegenstand bei der Geometriebetrachtung lag in einem Vergleich der Kühlleistung von klassischen flächigen Kühlkörpern und leitungsgebundenen Kühlkörpern. Typische Beispiele von flächigen Kühlkörpern sind Modelle bei denen Kühlkanäle in massive Metallplatten eingebracht werden, wie beispielsweise als „heat sink“ bekannte Aluminiumplatten, in denen mäanderförmig ein Kanal durch die Plattenebene verläuft. Durch die Plattengeometrie kann eine große Kühloberfläche erzeugt werden, während das Aluminium als Plattenmaterial für einen ausgezeichneten Wärmestrom in Richtung des Kühlmediums sorgt. Nachteilig für die Anwendung dieser „heat sinks“ nahe an magnetischen Bauteilen ist, dass durch auftretende Streufelder Wirbelstromverluste in den massiven Aluminiumplatten erzeugt werden können. Diese Verluste reduzieren die Effizienz des Gesamtsystems und sie können bei unzureichender Kühlung zu einer lokalen Überhitzung des Kühlkörpers führen.

Alternativ dazu sind flächige Kühlkörper verfügbar bei denen die Flüssigkeitsströmung durch Leitbleche innerhalb der Struktur gelenkt wird. Vergleichbar mit den beschriebenen „heat sinks“ besitzen diese Kühlkörper ebenfalls eine große Kühlfläche. Im Gegensatz zu den „heat sinks“ ist durch eine dünne Wandstärke das Auftreten von zusätzlichen Wirbelstromverlusten deutlich reduziert. Nachteilig ist die Tatsache, dass die Flüssigkeitsführung im Inneren der Kühler aufgrund der hohen Flüssigkeitsmenge ungleichmäßig sein kann.

Im Gegensatz zu den beschriebenen flächigen Kühlkörpern wurden Leitungskühlkörper untersucht. Beispiele für diese Kühler sind Rohre bzw. Rohrpakete oder flexible Schläuche die nahe der Wärmequelle entlanggeführt werden. Bei dieser Kühlmethode ist die Flexibilität, dass die Kühler auch in nicht-ebener Form geführt werden können, vorteilhaft. Nachteilig ist die deutlich reduzierte Kühlfläche im Vergleich zu den zuvor beschriebenen flächigen Alternativen.

Aufgrund der zuvor beschriebenen Eigenschaften wurden zwei Kühlkörpergeometrien mittels thermischer FEM und nachfolgender Experimente am Beispiel der Geometrie des 520kW Transformators näher untersucht:

1. Flächiger Blechkühlkörper
2. Edelstahl Kühlrohre

Für die FEM sowie das Experiment wurde ein einschenkiger Nachbau des genannten Transformators herangezogen, bei dem die Wicklungsverluste durch eine äquivalente DC Bestromung eingepreßt wurden. Die Probekörper wurden für das Vergießen mit einer geeigneten Epoxidharzvergussmasse in einer Kiste montiert. Die eingesetzten Kühlkörper wurden außerhalb der Kiste hydraulisch parallel verschaltet. Abbildung 1-5 zeigt CAD-Modelle der untersuchten Probekörper. Links ist der Aufbau mit flächigen Kühlkörpern und rechts der Aufbau mit Rohrkühlkörpern dargestellt. In den jeweiligen Schnittansichten sind einige der zuvor beschriebenen Vor- und Nachteile der Kühlkörpertypen zu erkennen. Die flächigen Kühlkörper zeichnen sich durch eine große Kühlfläche, aber aufgrund ihrer Geometrie durch teilweise große Abstände zu den Wärmequellen aus. Die Rohrkühler besitzen eine deutlich kleinere Kühlfläche, sie können aber in unmittelbarer Nähe zu der Wärmequelle platziert werden.



Abbildung 1-5: Modell der untersuchten Kühlkörperkonzepte. Links: flächiger Blechkühlkörper, rechts: Edelstahl Kühlrohre

Der Versuchsaufbau für die Prüfung der hergestellten Probekörper besteht aus der genannten Belastung mit DC-Strom, als definierte Wärmequelle. Für die Wärmeabfuhr wurden zwei Tanks bereitgestellt. Kaltes Wasser wird von einem Tank durch den Probekörper in den zweiten Tank gepumpt. Dabei werden Druck und Volumenstrom aufgezeichnet und durch einen Bypass neben der Pumpe kann der Volumenstrom eingestellt werden. Beide Probekörper wurden mit mehreren Typ-K Temperaturfühlern instrumentiert. Die Fühler befinden sich an verschiedenen Punkten innerhalb der Wicklung sowie an den Rückläufen der einzelnen Kühler, um die Erwärmung des Kühlwassers zu ermitteln. Abbildung 1-6 zeigt den beschriebenen Aufbau.

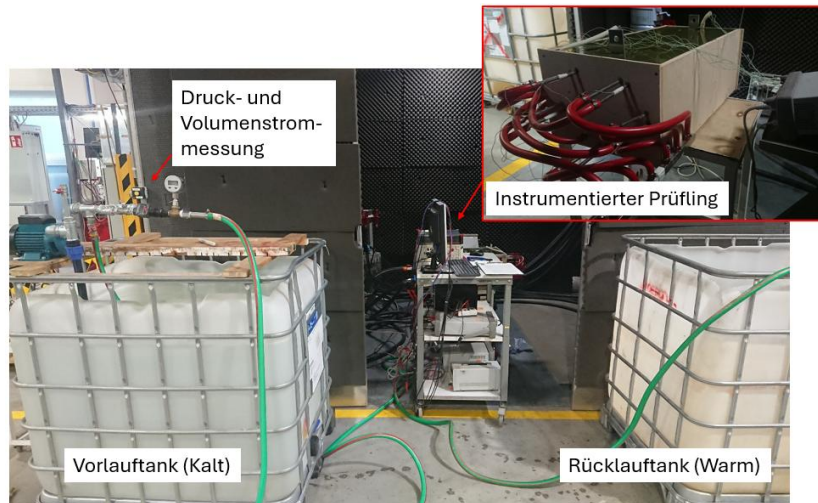


Abbildung 1-6: Prüfaufbau Kühlkörperuntersuchung.

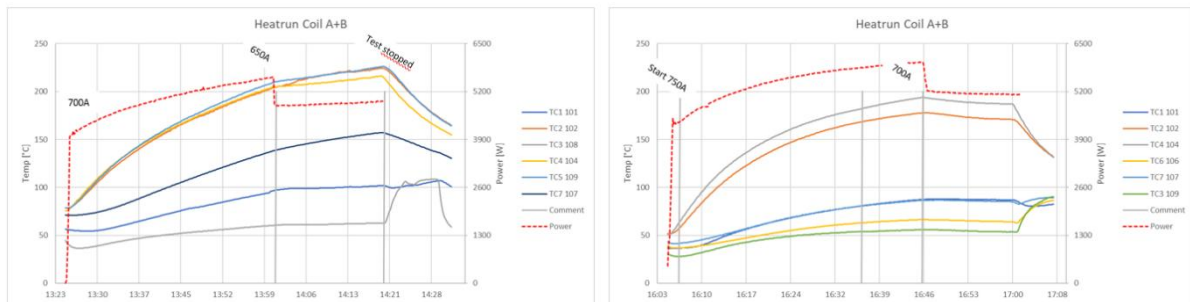
Für die thermische Auslegung wurden neben den Probekörpern FE-Modelle aufgebaut, um die Erwärmung im Inneren des Transformators abbilden zu können. Die Modelle bestehen aus 2D-Schnitten durch die Wicklungsmittle. Als thermische Last werden 5kW im Bereich der Wicklung eingepreist. Die Ergebnisse dieser Berechnung können Abbildung 1-7 entnommen werden. Es ist zu erkennen, dass die flächigen Kühlkörper trotz ihrer größeren Kühlfläche zu deutlich höheren Temperaturen innerhalb der Wicklung führen. (Coil A -> Sekundärseite; Coil B -> Primärseite).



Abbildung 1-7: Simulationsergebnisse der Wärmeläufe beider Kühlkörpertypen

Abbildung 1-8 zeigt die Ergebnisse des Wärmelaufs an beiden Probekörpern. Um eine Verlustleistung von 5kW in die Proben einzubringen, war ein DC-Strom von 700A notwendig. Im Verlauf des Temperaturschriebs der Probe mit flächigen Kühlkörpern ist zu erkennen, dass trotz Reduktion auf 650A kein stationärer Betriebspunkt erreicht werden konnte. Die maximal gemessenen Temperaturen stiegen kontinuierlich auf Werte $>225^{\circ}\text{C}$ an, sodass der Versuch abgebrochen werden musste. Demgegenüber zeigte der Probekörper mit der Rohrkühlung, ein stationäres Verhalten bei 700A, nachdem zuvor mit 750A bestromt wurde, um eine schnellere Erwärmung zu erreichen. Die Maximaltemperatur liegt hier bei $<200^{\circ}\text{C}$. Die mittleren Wicklungstemperaturen für den Probekörper mit flächiger Kühlung lagen für die Sekundär- und Primärseite bei 189°C und 184°C . Der rohrgekühlte Probekörper zeigte sekundär- und primärseitige mittlere Wicklungstemperaturen von 165°C und 117°C .

Ein Vergleich der Kühlleistung beider Kühlkonzepte zeigt, dass durch die Rohrkühlung ($30,76\text{W/K}$) eine 50% höhere Kühlleistung als durch die flächigen Kühlkörper ($20,46\text{W/K}$) bezogen auf den Hot-Spot erreicht werden kann. Zusätzlich ist hier anzumerken, dass der Probekörper mit flächigen Kühlern keine Temperaturbeharrung erreicht hat, sodass die Hot-Spot Temperatur in Beharrung höher liegen würde, wodurch die Kühlleistung auf einen Wert $<20\text{W/K}$ sinkt.



	Plattenkühler	Rohrkühler
Verlustleistung in W	4091	5076
Strom in A	648	700
Hotspot Temp. in $^{\circ}\text{C}$	225	186
Wassereinlasstemp. in $^{\circ}\text{C}$	25	21
Hotspot Temp. in K	200	165
Wärmeabfuhr in W/K	20,46	30,76

Abbildung 1-8: Wärmelauf beider Kühlkörpertypen. Links: flächige Kühlkörper, rechts: Rohrkühler

Neben diesen Ergebnissen ist es ersichtlich, dass die Simulation deutlich niedrigere Temperaturen für die Hot-Spots und mittleren Wicklungstemperaturen vorausgesagt hat. Dieses Verhalten kann auf die Prozessführung während des Wickelprozesses zurückgeführt werden, welcher die thermische Leitfähigkeit innerhalb des Wickels stark beeinflussen kann.

1.3.2.3 Untersuchung von Kühlkonzepten – Berücksichtigung der Materialauswahl

Metallische Kühlkörper haben im Vergleich zu Kunststoffen den Vorteil einer deutlich höheren thermischen Leitfähigkeit. Daneben können bei metallischen Kühlern die Wandstärken aufgrund der höheren mechanischen Kennwerte kleiner ausgeführt werden, um für die gleiche Druckklasse geeignet zu sein. Beide Faktoren zusammen bewirken, dass der thermische Übergangswiderstand der Kühlkörperwand ein bis zwei Größenordnungen kleiner sein kann als bei einem Kühlkörper aus Kunststoff.

Demgegenüber haben Kunststoffe durch ihren hohen spezifischen elektrischen Widerstand den Vorteil, dass sie in elektrischen Anwendungen näher an den aktiven Komponenten montiert werden können, ohne elektrisch isoliert werden zu müssen. Für diese Anwendung wurden beide Materialklassen an den geeigneten Positionen innerhalb des Transformators eingesetzt (Kapitel 1.3.5).

1.3.2.4 Untersuchung von Kühlkonzepten – Installation des Kühlsystems

Das Ziel der Untersuchungen zu der Installation des Kühlsystems war es, die Zuverlässigkeit der Verbindungsstellen in Abhängigkeit verschiedener Temperaturen zu bestimmen und den sicheren Betrieb über ein weites Temperaturspektrum sicherstellen zu können. Dazu wurden unterschiedliche Prüflinge aufgebaut. In einer ersten Versuchsreihe wurde die Dichtheit von verschiedenen Verbindungsstellen und unterschiedlichen Kühlschläuchen unter Temperatureinfluss analysiert. Dabei wurde ein Standardschlauch (weiß/halbtransparent) und ein verstärkter Schlauch (rot) verwendet. Der Standardschlauch hat gegenüber dem verstärkten Schlauch einen geringeren thermischen Widerstand und ermöglicht kompaktere Bauformen durch kleinere Biegeradien. Er ist gegenüber einem verstärkten Schlauch, ohne weitere Maßnahmen, jedoch nur für geringe Betriebsdrücke einsetzbar.

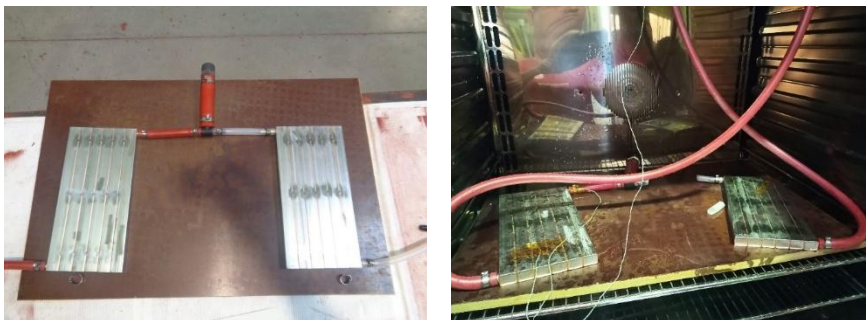


Abbildung 1-9: Aufbau des Prüflings (links) und Versuchsdurchführung im Ofen (rechts).

Die Prüflinge wurden in einem Wärmeofen platziert, Abbildung 1-9 und mit einem Durchfluss von 10l/min bei einem Druck von 2,8bar belastet. Die Temperatur des Ofens wurde von Raumtemperatur bis 180°C kontinuierlich erhöht, siehe Abbildung 1-10. Bis zu einer Temperatur von 180°C wurden keine Leckage einer Verbindungsstelle festgestellt, jedoch hat bei dieser Temperatur der Standardkühlschlauch durch den Betriebsdruck von 2,8bar bereits versagt.

Eine Verstärkung des Standardschlauchs kann durch die Einbettung in einem Epoxidharz erfolgen. Hierzu wurden weitere Probekörper aufgebaut Abbildung 1-11. Mit diesen Prüflingen konnte bei Untersuchungen im Wärmeofen gezeigt werden, dass ein Betrieb bis zu einem getesteten Betriebsdruck von 3,6bar möglich ist. Auch die Dichtheit der in Epoxidharz eingebetteten Verbindungsstellen wurde untersucht. Bis zu einem Druck von 3,6 bar und einer Temperatur von 180°C konnte keine Undichtigkeit festgestellt werden.

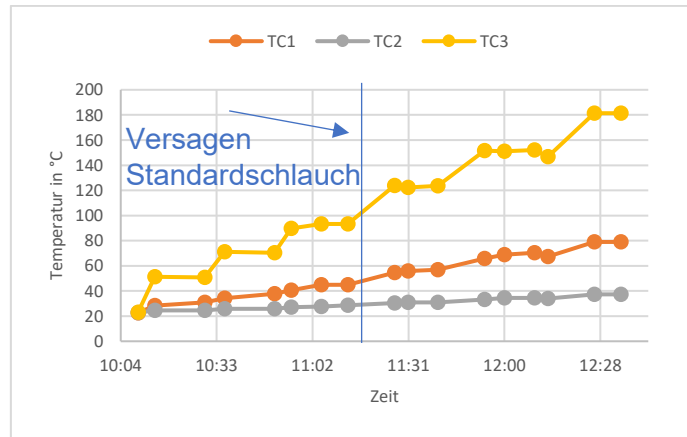


Abbildung 1-10: Test Kühlsystem – Temperaturverlauf.

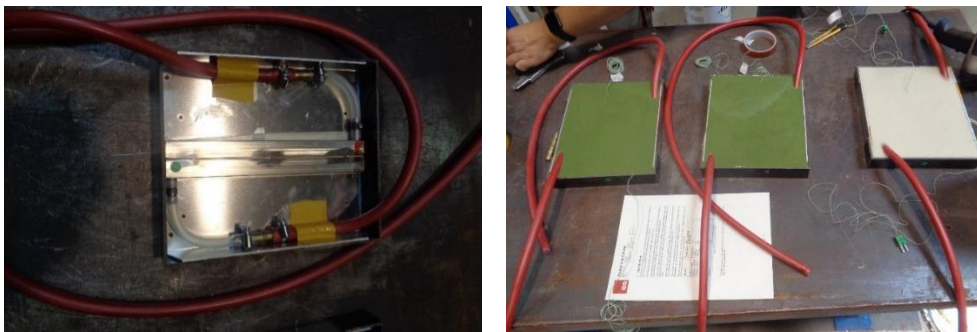


Abbildung 1-11: Prüflinge mit Epoxid-Verguss zur Untersuchung des Kühlsystems.

1.3.2.5 Untersuchung von Kühlkonzepten – Optimierter Wickelprozess

Die unterschiedlichen Ergebnisse zwischen Simulation und Experiment aus Kapitel 1.3.2.2 zeigten, dass die Annahmen für die thermischen Materialeigenschaften innerhalb der Wicklung nicht ausreichend gut bestimmt wurden. Es hat sich gezeigt, dass im Vergleich zwischen Experiment und Simulation bei gleicher thermischer Last und gleicher Kühlrandbedingung im Experiment eine deutlich höhere Temperatur eingestellt hat. Dieser Effekt, zusammen mit den vergleichbaren Randbedingungen, deutete darauf hin, dass die thermische Leitfähigkeit der Wicklung genauer betrachtet werden musste. Dieser Kennwert setzt sich aus den Materialkennwerten der verwendeten Materialien (Isolation und Leiter) und den thermischen Kontakten zwischen diesen Materialien zusammen. Es war naheliegend anzunehmen, dass der Wickelzug während des Wickelprozesses einen Einfluss auf ebendiesen thermischen Kontakt haben muss. Die Annahme war, dass ein hoher und gleichmäßiger Wickelzug zu weniger Luftpneinschlüssen und damit zu einem besseren thermischen Kontakt führen muss.

Zur Untersuchung dieser Annahme wurden drei Probekörper jeweils bestehend aus einem Aluminiumzylinder als Grundkörper für die Wicklung und darauf einer Bandwicklung hergestellt. Der Aluminiumzylinder hatte entlang seiner Achse eine Bohrung, durch die der Prüfaufbau mittels Kühlwassers gekühlt werden konnte. Die Geometrie des Grundkörpers wurde gewählt, um die Geometrieeffekte des Wicklungskörpers, wie er bei rechteckigen Kernen zu erwarten ist, zu minimieren. Untersucht wurden anschließend eine Probe mit einer Grundisolation und durchschnittlichem Wickelzug (Probe 1), eine Probe mit thermischen Interface Material (TIM) zur Verbesserung der thermischen Anbindung und durchschnittlichem Wickelzug (Probe 2) und eine Probe mit hohem Wickelzug (Probe 3) untersucht. Abbildung 1-12 zeigt einen dieser Probekörper neben dem bekannten Versuchsaufbau. Für die

Auswertung wurden alle Probekörper mit mehreren Typ K Temperaturfühlern auf dem Aluminiumzylinder und innerhalb der Wicklung instrumentiert.



Abbildung 1-12: Probekörper für die Untersuchung des Wickelzugs

	Sample 1 - 580W	Sample 2 - 580W	Sample 3 - 580W
TC1 °C	39,2	43,0	38,9
TC2 °C	43,7	43,0	43,5
TC3 °C	54,9	57,8	46,3
TC4 °C	110,2	101,6	81,4
TC5 °C	101,5	105,9	73,3
TC6 °C	29,0	28,8	30,9
TC7 °C	25,0	26,1	26,9
TC8 °C	22,0	21,6	23,2
TC9 °C	22,4	22,4	23,9
Ambient °C	24,3	24,3	24,5
Power W	579,1	588,1	605
Flow-rate l/min	10	10	10

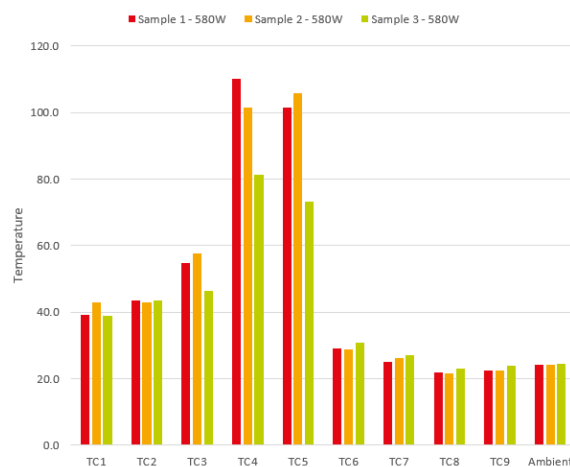


Abbildung 1-13: Untersuchungsergebnisse der Wickelzugversuche

Die Temperaturfühler TC1 – TC3 wurden direkt zwischen Aluminiumzylinder und Wicklung platziert. Die Fühler TC4 und TC5 befanden sich außen auf der Wicklung und die Fühler TC6-TC9 wurden auf freien Flächen des Aluminiumzylinder aufgeklebt. Abbildung 1-13 zeigt die gemessenen Temperaturen und thermischen Lasten der drei Probekörper. Es ist zu erkennen, dass die Wicklungstemperatur deutlich von dem Prozessparameter „Wicklungszug“ und leicht durch die Wahl geeigneter Interfacematerialien beeinflusst werden kann. Für Probe 1 kann eine Kühlleistung bezogen auf TC4 von 6,7W/K und für Probe 3 bezogen auf TC4 von 10,2W/K ermittelt werden. Die Kühlleistung konnten damit allein durch die Optimierung der Prozessparameter um 50% erhöht werden.

1.3.2.6 Untersuchung von Kühlkonzepten – Kunststoffleitungen

Den Ergebnissen der Kapitel 1.3.3 ff. kann entnommen werden, dass die Anforderungen an die Spannungsfestigkeit durch metallische Kühlkörper nicht erfüllt werden können. Zusammen mit den Überlegungen zur Materialauswahl aus Abschnitt 1.3.2.3 wurde das Kühlsystem zu Kunststoffkühlkörpern überführt. Auf Grundlage der vorhergehenden Untersuchungen wurden Kunststoffkühlschläuche in der Art eines Rohrkühlkörpers eingesetzt. Das heißt, dass ein Kunststoffschlauch möglichst nahe an den Wärmequellen entlanggeführt werden sollte. Um den Wärmeübergang zwischen Wicklung und Kühlmedium durch die Änderung des Materials nicht übermäßig zu verschlechtern, wurden die unverstärkten Standardschläuche aufgrund ihrer dünneren Wandstärke für die weitergehende Untersuchung im Rahmen eines Probekörpers eingesetzt. Dieser Probekörper berücksichtigt zudem, dass in Absprache mit den

Projektpartnern ein System aus acht parallelen Transformatoren bevorzugt wird. Dementsprechend wurde ein kleinerer Probekörper, der sich an dem 130kW Transformatordesign orientiert, konzipiert. Abbildung 1-14 zeigt diesen Probekörper, dessen Kühlung komplett mit Schläuchen realisiert wurde. Eine Optimierung des Wickelzuges wurde für diese Untersuchung nicht durchgeführt, um eine Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen aus der Geometriestudie zu erreichen (Kapitel 1.3.2.2).

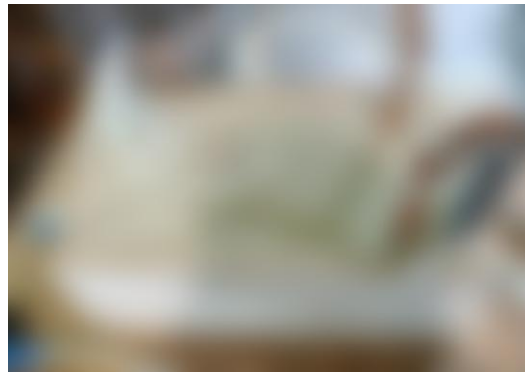


Abbildung 1-14: Probekörper mit Kunststoffschlauchkühlung

Ein Wärmelauf an diesem Probekörper mit eingepreisten Verlusten von 1,4kW zeigt, dass sich eine stationäre Hot-Spot Temperatur von 120°C einstellt (Abbildung 1-15). Die Kühlung dieses Kühlkonzeptes erreicht dementsprechend eine Leistung von 14,3W/K. Damit ist die Kühlung nur halb so leistungsstark wie eine vergleichbare Kühlung mit metallischen Rohren.

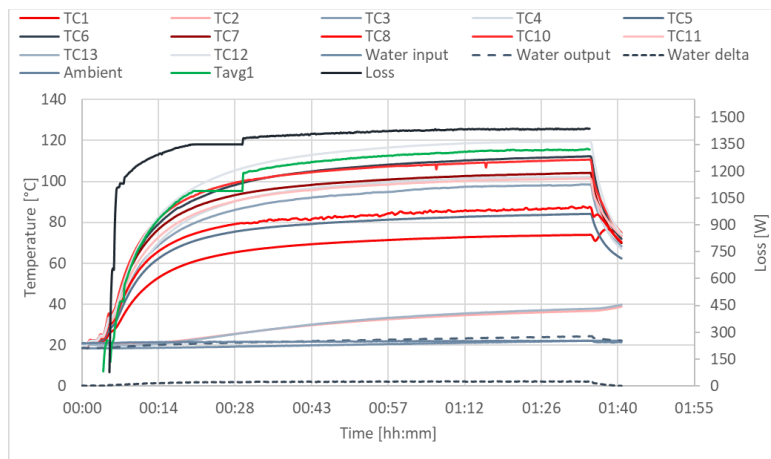


Abbildung 1-15: Wärmelauf des Schlauchkühlkonzeptes

1.3.3 Untersuchung des Isolationssystems für MV-MF-Transformatoren

Die Isolationsfestigkeit ist eine entscheidende Eigenschaft des Transformators. Sie entscheidet maßgeblich über die Einsatzbarkeit und Zuverlässigkeit. Aufgrund der Systemnennspannung von 6kV muss die Isolationsbarriere zwischen Primär- und Sekundärwicklung bei modularem Wandlerkonzept für jeden einzelnen Transformator auf diese Spannung ausgelegt und frei von Teilentladung sein. Der geforderte Wert für die Teilentladungsprüfung ergibt sich aus der Norm IEC 61800-5-1 zu

- Einsatzspannung = $1,875 \times U_{PD}$
- Aussetzspannung = $1,5 \times U_{PD}$

Für den MVMF-Transformator ergibt sich ein Zielwert U_{PD} zu 7,74kV, was aus der Systemnennspannung überlagert mit einer taktfrequenten AC-Spannung herrührt. Da die Norm bzw. die Prüfung auf einer 50Hz Messung basiert ist der entsprechende Prüfwert um den Faktor Wurzel (2) kleiner. Dieser Wert wird dann für 5 Sekunden gehalten, ehe die Spannung linear auf die Aussetzspannung von 8,2kV reduziert und für 15 Sekunden gehalten wird. Während dieser Zeit muss die gemessene Ladung kleiner dem definierten Wert von $Q=10pC$ sein.

Um die dielektrische Festigkeit zu überprüfen, wurden vor dem Bau des ersten Forschungsmusters Prüfkörper aufgebaut, an denen die Teilentladung untersucht wurde. Die folgende Abbildung zeigt schematisch den Aufbau der Körper/Isolation

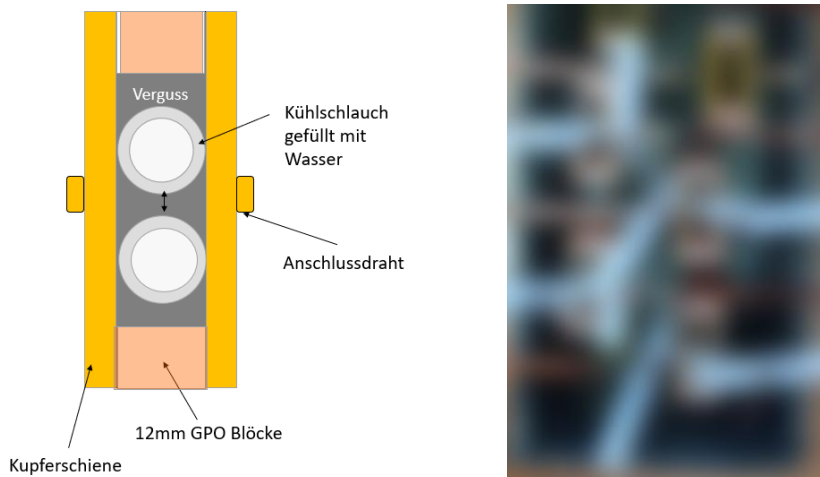


Abbildung 1-16: Versuchskörper Teilentladung

Die in Abbildung 1-16 dargestellten Kupferschienen stellen die Potentialdifferenz Primär zu Sekundärwicklung dar. An diese ist ein Anschlussdraht gelötet, der zur Kontaktierung bei der Prüfung dient. Das Resultat des ersten Mustersatzes zeigte eine um 36% zu niedrige Teilentladungsspannung im Vergleich zum Zielwert. Zur weiteren Untersuchung der Messwerte wurden Schliffbilder der Proben erstellt, welche in Abbildung 1-17 zu sehen sind.



Abbildung 1-17: Schliffbilder Mustersatz 1 Versuchskörper Teilentladung.

Aus den Darstellungen wird schnell ersichtlich, weshalb die Messwerte nicht mit der Theorie übereinstimmen. Der Vollverguss weist deutliche Luftpinschlüsse auf. In den Lunkern entsteht aufgrund der deutlich kleineren dielektrischen Konstante der Luft im Vergleich zum Verguss ($\epsilon_{\text{Luft}}=1,0059$ vs. $\epsilon_{\text{verguss}}=4,9$) eine Feldüberhöhung. Als Ursache wurden die Prozessparameter ausgemacht. Ein Vorheizen der Komponente und des Vergusses reduzieren zum Beispiel die Viskosität, weshalb das Material deutlich leichter in kritische Bereiche fließen kann. Ein neuer Mustersatz wurde entsprechend aufgebaut und untersucht.

Die Ergebnisse sind in Abbildung 1-18 und Tabelle 1-5 dargestellt.

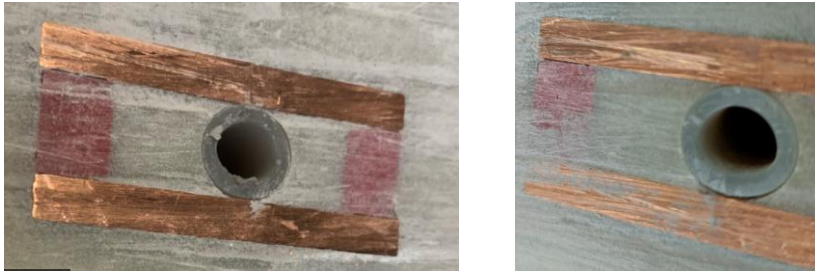


Abbildung 1-18: Schliffbilder Mustersatz 2 Versuchskörper Teilentladung

	Stressspannung [kV]	Ladung [pC]	Aussetzspannung [kV]	Ladung [pC]
Ziel	10,7		8,6	10
Ergebnis #1	10,7	3	8,6	1,0
#2	10,7	4	8,6	0,6
#3	10,7	6	8,6	0,6
#4	10,6	25	8,0	0,9

Tabelle 1-5: Messergebnis Mustersatz 2 Teilentladung

Aus den Schliffbildern geht ein lunkerfreier Verguss hervor, was sich auch in den Messwerten widerspiegelt.

1.3.4 Untersuchung der mittelfrequenten Spannungsbelastung auf das Wicklungssystem

Für die Untersuchung der mittelfrequenten Spannungsbelastung auf das Isoliersystem wurden zwei Transformatoren mit einer Leistung von 520kW entsprechen Tabelle 1-2 aufgebaut. Für diese Transformatoren wurde ein Rohrkühlsystem nach Abschnitt 1.3.2.2 eingesetzt. Das Rohrkühlsystem wurde aufgrund der besten Kühlerperformance ausgewählt.

Für die Untersuchung der Spannungsbelastung wurden die Transformatoren am Mittelfrequenzprüfstand betrieben. Der Prüfaufbau ist in Abbildung 1-19 dargestellt.

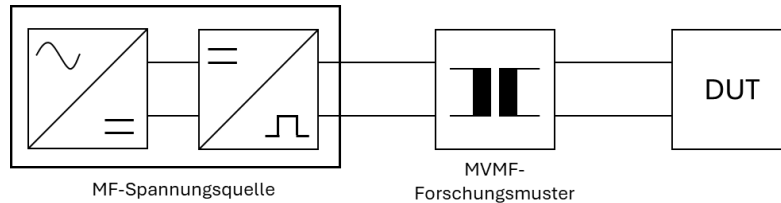


Abbildung 1-19: Prüfaufbau MF-Prüfstand.

Der Ausgang der MF-Spannungsquelle ist rechteckförmig und kann eine variable Spannung bis 800V bei 20kHz ausgeben. Das erste 520kW Forschungsmuster wurde als Hochsetztransformator an die Quelle angeschlossen. Das zweite 520kW Forschungsmuster (DUT) wurde niederspannungsseitig an den Mittelspannungsausgang des Hochsetztransformators angeschlossen. Hierdurch konnte das DUT mit einer hohen Spannung bei 20kHz belastet werden.

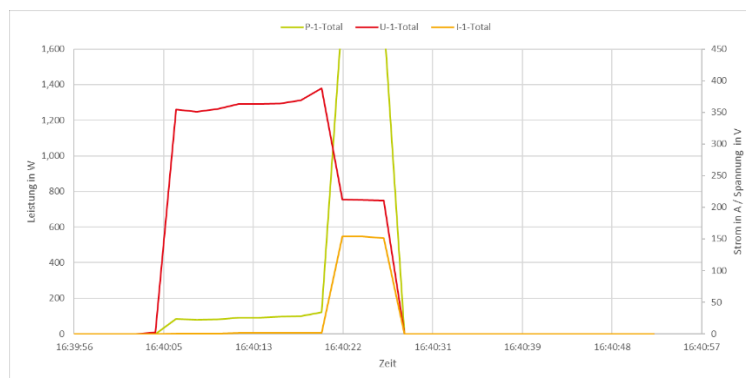


Abbildung 1-20: Leistungsdaten bei Ausfall des DUT.

Nach kurzer Betriebszeit ist es zum Ausfall des DUT gekommen. Die Ursache war ein elektrischer Durchschlag zwischen der MV-Wicklung und einem metallischen Kühlrohr. Die erwartete Spannung zwischen Kühlrohr und MV-Wicklung war zu diesem Zeitpunkt ca. 6,4kVrms. Abbildung 1-20 zeigt den zeitlichen Verlauf der Ausgangsspannung und Leistung der MF-Quelle zum Zeitpunkt des Fehlers.

Während des durchgeführten Prüflaufs wurde die Spannungsform nicht aufgezeichnet. Für eine Fehleranalyse wurde daher zunächst für verschiedene Frequenzen und Tastgrade die Spannungsform hinter dem Hochsetztransformator aufgezeichnet.

In Abbildung 1-21 ist die Spannung für einen Betriebspunkt dargestellt. Das Überschwingen der Spannung zum Beginn jeder Halbperiode ist deutlich ersichtlich. Der Spitzenwert der Spannung übersteigt den Effektivwert um den Faktor 2. Diese Tatsache in Verbindung mit den hochfrequenten harmonischen Spannungsanteilen waren die Ursache für den Frühausfall des Forschungsmusters.



Abbildung 1-21: Spannung am Ausgang des 520kW-Forschungsmusters.

Die weiteren Untersuchungen wurden mit dem ersten 520kW-Forschungsmuster als Hochsetztransformator und verschiedenen Prüflingen durchgeführt. Dabei wurde die Abschlussisolation zwischen MV-Wicklung und Kühlrohr mittels einer Elektrodenanordnung und auch der Epoxid Verguss untersucht, siehe Abbildung 1-22. Der Prüfaufbau war entsprechend Abbildung 1-20.

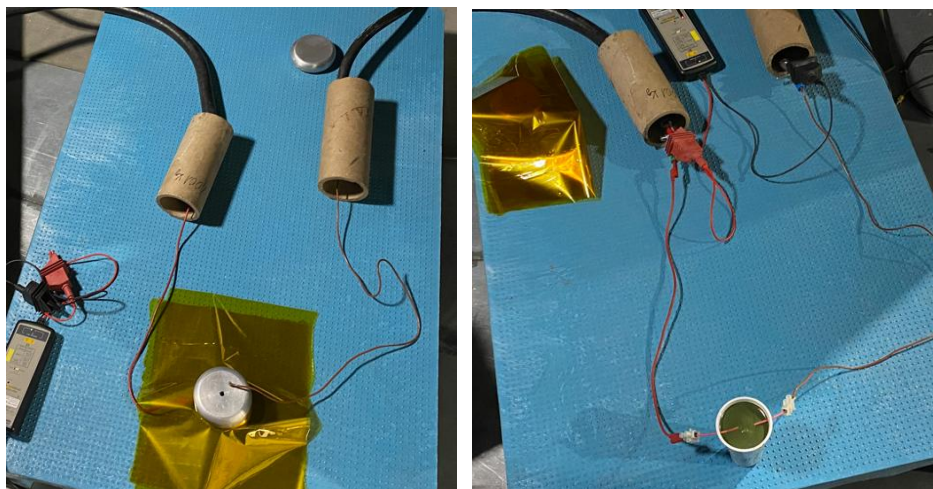


Abbildung 1-22: Prüfaufbau der Ersatzanordnung.

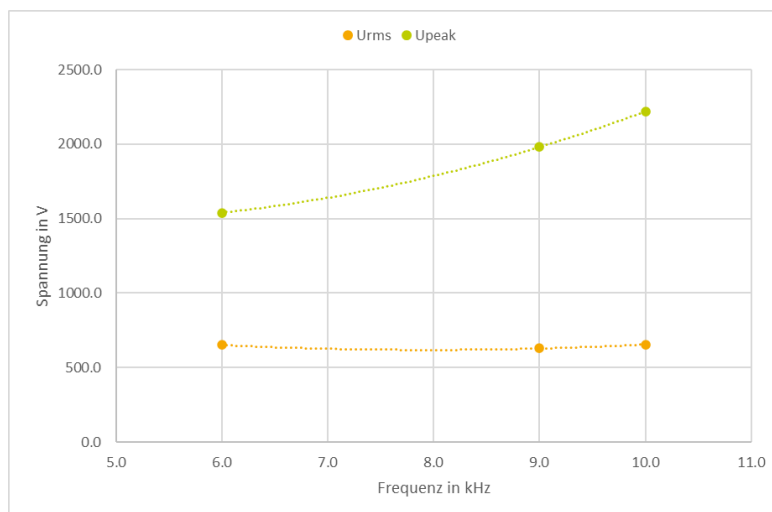


Abbildung 1-23: Spitzenspannung in Abhängigkeit der Frequenz.

In Abbildung 1-23 ist die Spitzenspannung an den Versuchsmustern in Abhängigkeit der Frequenz aufgetragen. Es wird ersichtlich, wie der Spitzenwert der Ausgangsspannung mit Steigerung der Frequenz im Vergleich zum Effektivwert ansteigt. Dieses Verhalten ist in den folgenden Ergebnissen zu berücksichtigen.

Verschiedene Muster der Abschlussisolation wurden mit dem zuvor genannten Prüfaufbau bei verschiedenen Frequenzen und gleicher Eingangsspannung geprüft. Bei gleicher Eingangsspannung wurde bei 3 untersuchten Frequenzen ein vergleichbarer Effektivwert der elektrischen Feldstärke berechnet werden. Bei den Frequenzen 1.8kHz und 6kHz wurden keine Degradation der Abschlussisolation über Dauer der Prüfungen festgestellt. Während der Versuche mit 9kHz trat ein Versagen der Isolation schon nach kurzer Zeit auf. In Tabelle 1-6 sind die Ergebnisse dargestellt. Der Spitzenwert der elektrischen Feldstärke ist bei 9kHz bei 59,2kV/mm bestimmt. Die spezifizierte dielektrische Festigkeit liegt für die Abschlussisolation bei Werten >120kV/mm. Durch den reproduzierbaren Durchschlag im Bereich der Feldstärke bereits bei ca. 60kV/mm ist der Einfluss der Frequenz deutlich ersichtlich.

Frequenz in Hz	Spannung Sollwert in V	Upeak in V	Urms in V	Elektrische Feldstärke Peak in kV/mm	Elektrische Feldstärke Rms in kV/mm
1.8	650	3711	2590.6	49,5	34.5
6.0	650	3000	2388.1	40,0	31.8
9.0	650	4444	2387.4	59,2	31.8

Tabelle 1-6: Ergebnisse der Untersuchung Abschlussisolation.

Eine vergleichbare Prüfung wurde im Weiteren mit den vergossenen Versuchsmustern durchgeführt. Es wurden Muster mit definierten Abständen von 1mm und 2mm zwischen zwei Kupferschienen hergestellt. Wie in Abbildung 1-22 dargestellt wurden diese Muster hinter den Hochsetztransformator angeschlossen und mit einer Spannung bei verschiedenen Frequenzen geprüft. Der Effektivwert der Spannung am Probekörper war 1480V. Die Muster mit 2mm Elektrodenabstand wurden zuverlässig bis 10kHz betrieben. Die effektive Feldstärke Betrag dabei 0.7kV/mm. Die Probekörper mit 1mm Elektrodenabstand sind bereits nach wenigen Minuten Betrieb bei einer Frequenz von 10kHz ausgefallen. Die elektrische Feldstärke im Verguss lag hier bei 1,4kV/mm.

Basierend auf den Untersuchungen in diesem Abschnitt wurde eine Rohrkühlung für die Mittelspannungswicklung des MVMF-Transformators nicht weiterverfolgt. Der notwendige Abstand der Rohrkühlung zur Mittelspannungswicklung wäre so groß zu wählen, dass der thermische Widerstand die Vorteile einer Rohrkühlung zunichtemacht. Es wurde daher im weiteren Verlauf ein Konzept wie in Abschnitt 1.3.2.6 weiterverfolgt.

1.3.5 Auslegung und Aufbau des MV-MF-Transformators für den DC-DC-Wandler

In diesem Abschnitt wurde basierend auf den vorhergehenden Untersuchungen das Forschungsmuster des MV-MF-Transformators für den DC-DC-Wandler ausgelegt und aufgebaut.

Um den Einfluss eines DC-Offsets aus der Ansteuerung der DC-DC Brücke zu untersuchen, wurde an einem Kern das Leerlaufverhalten des Transformators aufgenommen. Ein DC-Offset kann aus Fehlzeiten in der Ansteuerung der Halbbrücken erfolgen und den Transformator damit in Sättigung treiben, wenn der Magnetisierungsstrom entsprechend niedriger ist. Für die Untersuchung wurde der nanochristalline C-Kern an den Schnittstellen mit Luftspalten versehen. Über eine temporäre Wicklung wurden Spannungen unterschiedlicher Amplitude und Frequenz angelegt. Abbildung 1-24 zeigt den Prüfaufbau.



Abbildung 1-24: Messaufbau Leerlaufcharakteristik

Abbildung 1-25 stellt die betrachteten Eingangsparameter dar, die in Ihrer Kombination je unterschiedliche Flussdichten zur Folge haben. Schematisch ist ein gemessenes Signal bei $f=20\text{kHz}$ und $U=700\text{V}$ aufgeführt.



Eingangsvariablen	
Luftspalt [mm]	0/ 0,13/ 0,25/ 0,5/ 1/ 2
Frequenz [kHz]	5 / 10/ 20
Spannung [V]	500/ 600/ 700

Abbildung 1-25: Arbeitspunkte Leerlaufcharakteristik

Die Ergebnisse der Untersuchung sind in Abbildung 1-25 aufgeführt.

Flussdichten kleiner $B=0,2\text{T}$ im Bereich bis 1mm Luftspaltdicke haben einen Magnetisierungsstrom von $I_{\mu}=5\text{A}$. Der Magnetisierungsstrom kann für den 20kHz-Bereich in Abhängigkeit des Luftspalts je nach Notwendigkeit zwischen 4A – 7A eingestellt werden.

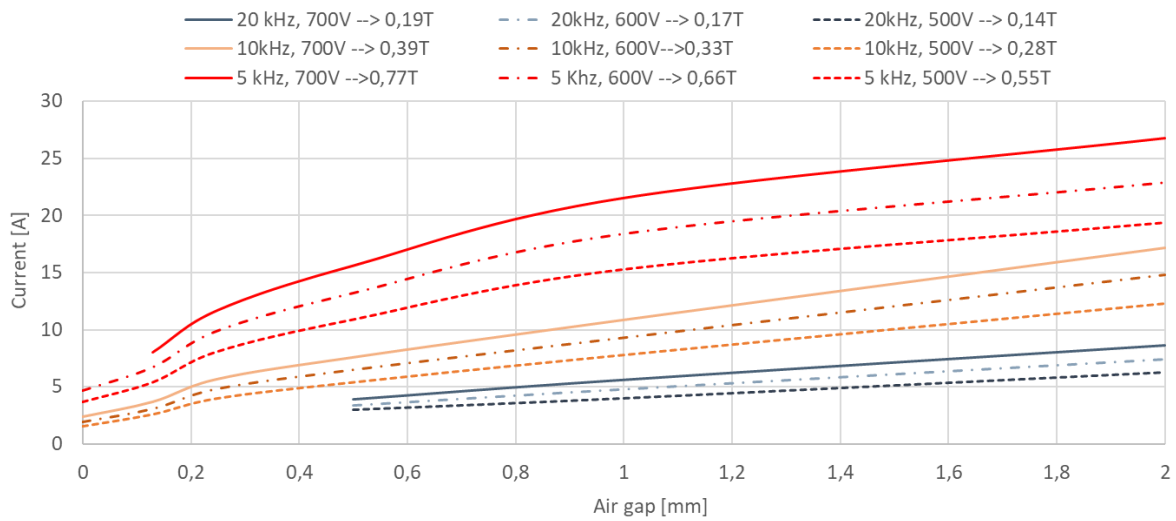


Abbildung 1-26: Messergebnis Leerlaufcharakteristik

Im Anschluss an die Untersuchung der Leerlaufcharakterisierung wurde das erste Forschungsmuster aufgebaut. Abbildung 1-27 zeigt Wicklungen und Kern des MF-Transformators. Das fertiggestellte vergossene Forschungsmuster ist in Abbildung 1-28 abgebildet.

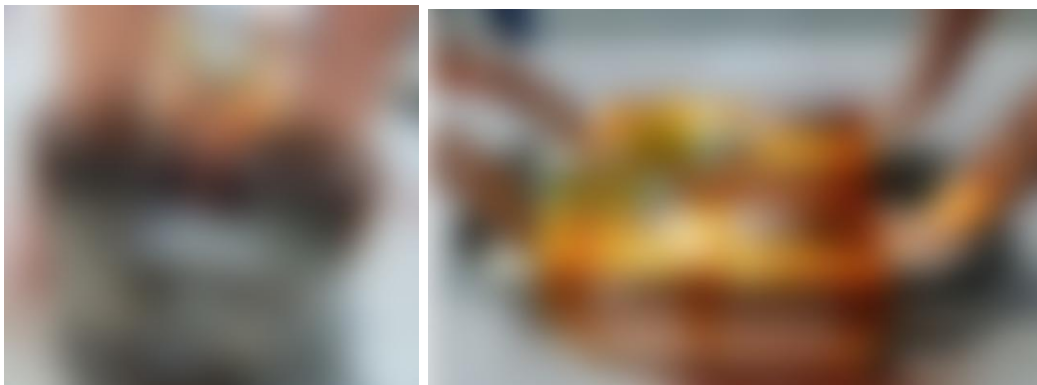


Abbildung 1-27: Kern und Wicklung MF-Transformator.



Abbildung 1-28: Erstes MVMF-Forschungsmuster.

Die Grundlegenden elektrischen Eigenschaften wurden in der Serienprüfung ermittelt. Tabelle 1-7 stellt die gemessenen Daten den Zielwerten gegenüber. Alle Zielwerte werden vom Forschungsmuster eingehalten.

	Zielwert	Messwert	Abweichung
Übersetzung	1,07 ± 0,5%	1,0727	+0,3%
Widerstand @ 20°C Sek [mΩ]	2,84 ±5%	2,91	+2,4%
Widerstand @ 20°C Pri [mΩ]	5,11 ±5%	4,79	-6,3%
Streuinduktivität [μH]	11 ± 15%	12	+9,1 %

Tabelle 1-7: Serienprüfergebnisse des ersten Forschungsmusters.

Zur Überprüfung der Schlauchverbindungen wurde der Transformator vor dem Vergießen mit 1,5bar geprüft. Der fertig gestellte Transformator wurde dann mit einem Druck von 2,5bar geprüft und im Anschluss die hydraulische Kennlinie des Kühlsystems aufgenommen, siehe Abbildung 1-29.

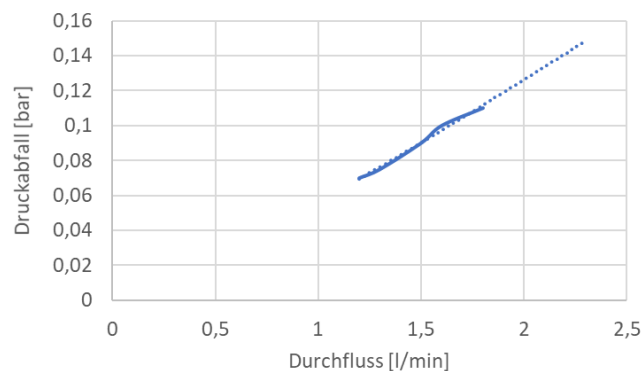


Abbildung 1-29: Messergebnis Druckabfall Transformator

Für den anvisierten Wasserdurchsatz von $Q= 2l/min$ ergibt sich ein Druckabfall von $p= 0,13bar$ über dem System. Dieser Wert ist in guter Übereinstimmung mit dem analytisch berechneten Wert aus den Voruntersuchungen ($p=0,15bar$).

Im Anschluss an die Druckprüfung wurde der Wärmelauf des Transformators gestartet. Für diese Prüfung wurde der Transformator sekundärseitig kurzgeschlossen und primärseitig erregt. Abbildung 1-30 zeigt den Prüfaufbau.

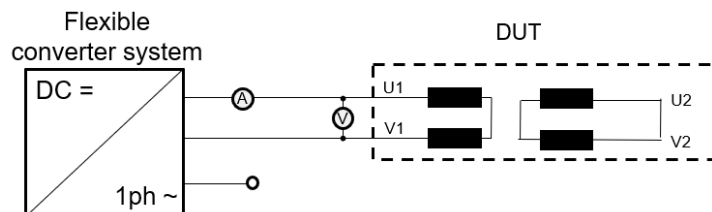


Abbildung 1-30: Anschlussschema Kurzschlussprüfung Transformator

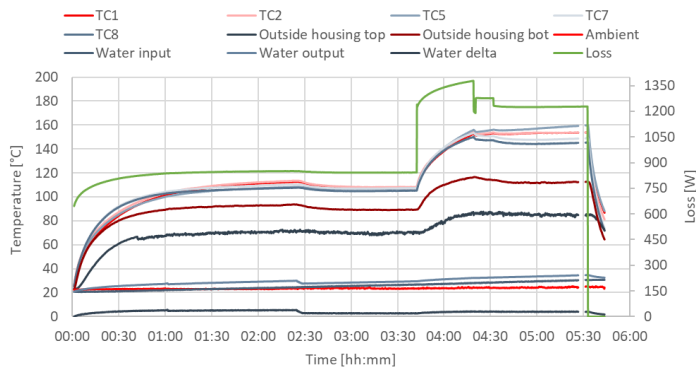
Die Betriebspunkte des Wärmelaufs sind in Tabelle 1-8 angegeben.

Betriebspunkt	Dauer [min]	Frequenz [Hz]	Strom [Arms]	Wasserdurchsatz [l/min]
AP 1	146	1000	250	2
AP 2	70	1000	250	4
AP 3	115	1000	285	4

Tabelle 1-8: Arbeitspunkte Wärmelauf erstes Forschungsmuster.

Zur Aufnahme der Wicklungstemperatur wurde der Transformator mit mehreren Typ-K Fühlern ausgestattet. Neben den aufgeführten Sensoren in der Wicklung des Transformators wurde die Einlass -und Auslasstemperatur des Wassers aufgenommen, um über die Differenz die aufgenommene Verlustleistung zu bestimmen. Über die primärseitig angeschlossene Leistungsmessung konnte so die Effizienz der Kühlung bestimmt werden.

Die Ergebnisse des Wärmelaufes sind in Abbildung 1-31 dargestellt.



Arbeitspunkt	1	2	3
Einlass [°C]	24,6	26,3	29,4
Delta T Wasser [K]	5,4	2,8	4,1
Pv Wasser [W]	750,4	775,6	1148
P Einspeisung [W]	850	842	1226
T Hotspot_sec [°C]	113	107,7	155
dT [K]	88,4	81,4	125,6
abgeführte Wärme [%]	88,3%	92,1%	93,6%

Abbildung 1-31: Messergebnis Wärmelauf Transformator

Die Auswertung zeigt eine gute Effizienz der Wasserkühlung. Eine Verdopplung des Durchflusses (OP1 auf OP2, 2l/min auf 4l/min) reduziert die Temperatur in der Wicklung jedoch nur um 5K, was keine Notwendigkeit eines höheren Durchsatzes begründet. Die zum Ende des Wärmelaufes eingespeiste Verlustleistung ist gleich der rechnerisch ermittelten Verlustleistung für den Betrieb bei $f=20\text{kHz}$. Es ergibt sich in der Wicklung eine Temperaturerhöhung an der wärmsten Stelle (Sekundärwicklung) von $dT_{hotspot}=126\text{K}$. Bei einer maximalen Zulauftemperatur von 45°C resultiert das in einer Temperatur von $T_{hotspot_max}=171^\circ\text{C}$.

Das Ergebnis wurde zusätzlich durch eine Warmwiderstandsmessung nach Abschalten der Leistung validiert. Dafür wurden in Zeitabständen von 1min zehn Messpunkte aufgenommen und über diese die Temperatur zum Abschaltzeitpunkt extrapoliert (s. Abbildung 1-32).

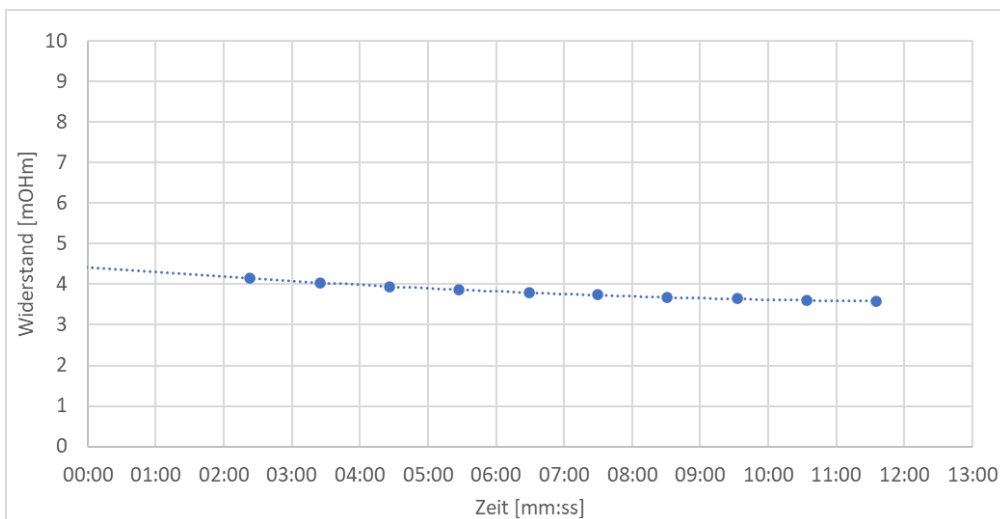


Abbildung 1-32: Messergebnis Warmwiderstandsmessung

Die mittlere Temperatur ist wie folgt zu $T_{avg}=130,8^\circ\text{C}$ berechnet:

$$T_{rise} = \frac{R_{warm}}{R_{ref}} (235 + T_{ref}) - 235 - T_{amb}$$

R_{ref} ist der Wicklungswiderstand bei der Referenztemperatur $T_{ref} = 20^{\circ}\text{C}$. Die mittlere Temperaturerhöhung beträgt $dT_{avg}=100,2\text{K}$ und ist 25K niedriger als die Hotspottemperatur.

Grundsätzlich zeigen die Ergebnisse eine grenzwertige Maximaltemperatur, die für das Wicklungssystem und Kern zwar unkritisch sind, jedoch für den Verguss mit einer Temperaturklasse H eine Lebensdauerreduktion darstellen.

Im Anschluss an den Wärmelauf wurde das erste Forschungsmuster für die weitere Validierung unter den spezifizierten Arbeitsbedingungen (Stromspektren mit $f=20\text{kHz}$) an den Projektpartner Siemens zum Einbau in den DC-DC-Wandler übergeben. Der Wärmelauf des Transformators im DC-DC-Wandler führte zu einer vergleichbaren hohen Temperatur ($T_{max,hotspot}=190^{\circ}\text{C}$). Daher wurde das Kühlsystem des Transformators nochmal analysiert und verbessert.

Das Ziel der Designanpassung war eine Reduktion des Temperaturanstiegs von min 20K. Zudem ist aus den Wärmeläufen im DC-DC-Wandler hervorgegangen, dass sich die innere Wicklung deutlich stärker als die äußere Wicklung erwärmt (Delta = 40K). Somit musste auch das Kühlkonzept dahingehend angepasst werden die Wärme aus der innenliegenden Wicklung abzuführen. Basis bei der Optimierung war die gleiche Kernkonstruktion. Das bedeutet, dass sowohl die magnetische Querschnittsfläche als auch das Kernfenster konstant gehalten wurden. Für das neue Konzept wurde jede Wicklung separat gekühlt. Dabei wurden für die innere Sekundärwicklung (Niederspannungspotential) Kühlelemente direkt auf den Kern gesetzt, die äußere Primärwicklung (Mittelspannung) wurde von außen gekühlt. Da im Wickelfenster aufgrund der konstanten Kernbreite nicht genügend Platz vorhanden war (beschränkt durch die Gesamtbreite des DC-DC Racks) wurde die Wicklung asymmetrisch aufgebaut.

Abbildung 1-33 zeigt auf der linken Seite den Querschnitt des ersten Forschungsmusters für die FEM-Simulation und auf der rechten Seite das angepasste Design. Die Abweichungen zwischen Simulation und Messung sind u.a. in der nicht idealen Anbindung von Kühler zu Wicklung begründet. Jedoch zeigt der relative Vergleich die zu erwartende Temperaturreduktion.

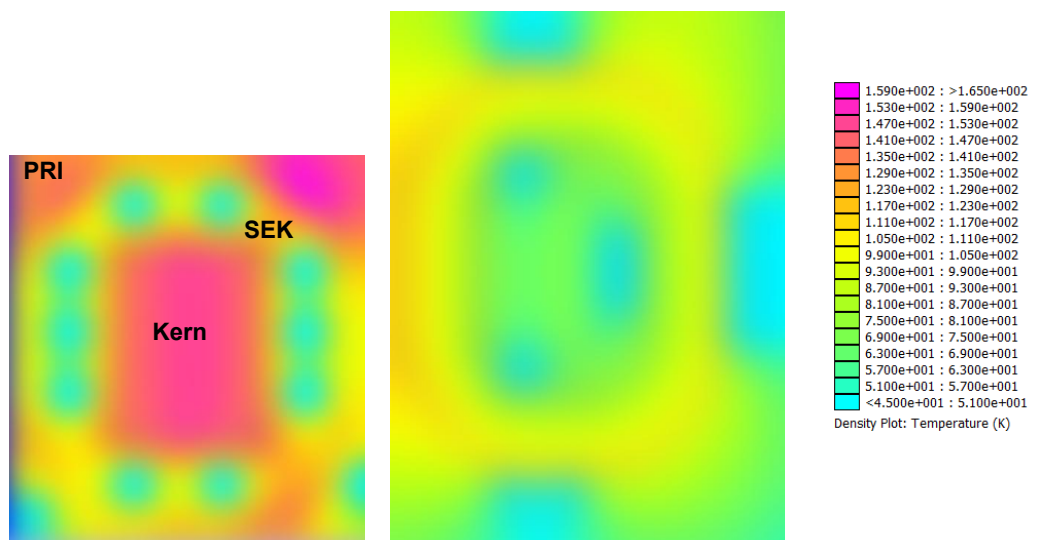


Abbildung 1-33: thermische Betrachtung angepasster Transformator (Bild rechts) zu Prototyp (Bild links)

Zusätzlich zur Verbesserung der Kühlung wurde im optimierten Forschungsmuster die Folienwicklung verbreitert werden. Hiermit wurde die Querschnittsfläche um 33% erhöht, sodass nicht nur die Verluste reduziert werden konnten, sondern auch die Kühlfläche erhöht wurde. Als negative Folge hat sich die geforderte Streuinduktivität reduziert, weswegen der

Streukanal zwischen beiden Wicklungen angepasst wurde. Tabelle 1-9 stellt die Hauptunterschiede beider Konzepte gegenüber.

	Prototyp 1	Designupdate
Länge [mm]	320	315+55
Höhe [mm]	110+43	140+40
Tiefe [mm]	190	210
Gewicht [kg]	18	26
Verluste [W]	950	755

Tabelle 1-9: Gegenüberstellung Erstes Forschungsmuster mit optimiertem Design.

Basierend auf dem aktualisierten Design wurde ein optimiertes Forschungsmuster aufgebaut. In nachfolgender Abbildung 1-34 ist der Transformator im finalen Zustand zu sehen.

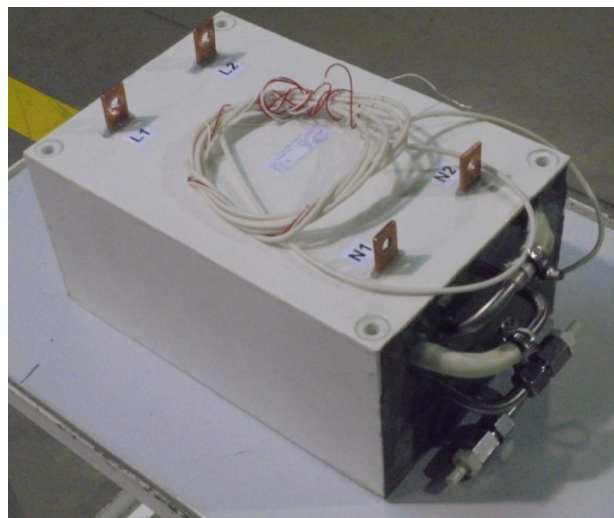


Abbildung 1-34: Optimiertes Forschungsmuster des MVMF-Transformators.

Zur Validierung des neuen Designs wurde ein Wärmelauf mit den gleichen Testparametern wie beim ersten Forschungsmuster durchgeführt. Das Ergebnis ist in Abbildung 1-35 dargestellt.

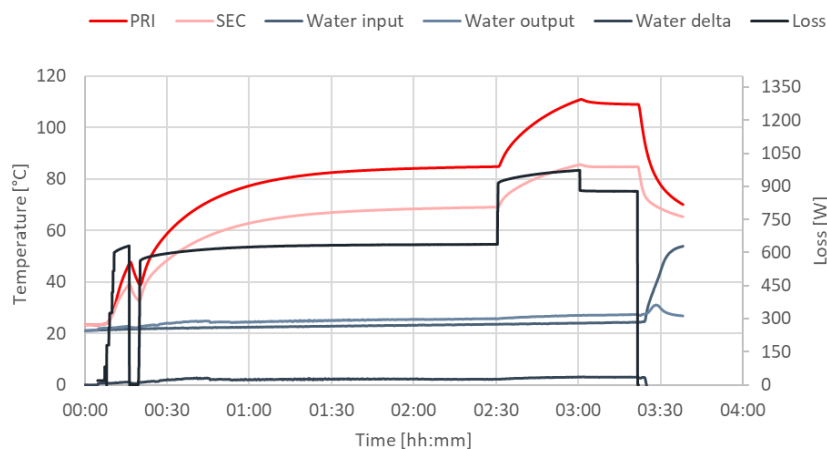


Abbildung 1-35: Wärmelauf des optimierten Forschungsmusters.

Die dargestellten Verläufe zeigen die Temperatureaufnahme über PT100-Fühler in Primär- und Sekundärwicklung, die Messung der Wasser- Ein und Auslasstemperatur, sowie die

eingespeisten Verluste. Nach Beendigung des Wärmelaufes wurde zusätzlich die mittlere Wicklungstemperatur über eine Warmwiderstandsmessung bestimmt. Die Primärwicklung besitzt eine mittlere Temperatur von $T_{avg} = 86^\circ\text{C}$, die Sekundärwicklung von $T_{avg} = 81^\circ\text{C}$ bei einer Vorlauftemperatur von $T_{einlass} = 24^\circ\text{C}$. Man sieht, dass der sekundärseitige Temperaturfühler annähernd die mittlere Widerstandstemperatur misst und der primärseitige Fühler die Hotspottemperatur widerspiegelt. Beim Vergleich der eingespeisten Verlustleistung zu der im Wasser aufgenommenen Leistung, zeigt sich eine Effizienz der Wasserkühlung von 93%.

Basierend auf dem eingeschwungenen Zustand bei reduzierter Leistung zeigt Tabelle 1-10 die signifikante Verbesserung der beiden Forschungsmuster.

	Forschungs- muster 1	Forschungs- muster 2	Änderung
Verluste [W]	1220	880	-28%
Hotspot [K]	128	86	-33%
T_{avg} PRI [K]	101	62	-39%
T_{avg} SEK [K]	100	57	-43%

Tabelle 1-10: Gegenüberstellung Wärmelaufergebnisse.

Die finale Validierung des neuen Kühlkonzeptes erfolgt wieder im DC-DC-Wandler mit dem korrekten Stromspektrum bei einer Taktfrequenz von 20kHz.

Abbildung 1-36 zeigt die Temperaturen für unterschiedliche Arbeitspunkte des DC-DC-Wandlers. Der letzte Zeitabschnitt (AP1) zeigt den Temperaturanstieg bei maximaler übertragener Leistung und bei gleichzeitig minimaler Ausgangsspannung. In diesem Betriebspunkt treten die höchsten Verluste auf.

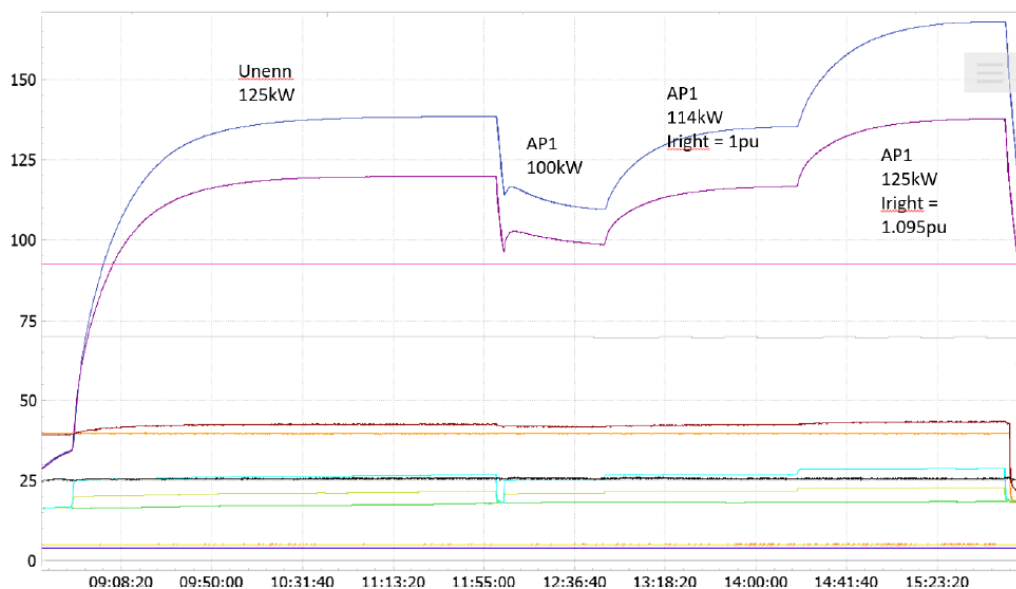


Abbildung 1-36: Messergebnis Wärmeläufe Siemens an Prototyp 2

Die Hotspottemperatur ergibt sich hier zu $T = 170^\circ\text{C}$. Die Vorlauftemperatur entsprach der Maximaltemperatur des finalen Systems von $T_{vorlauf} = 40^\circ\text{C}$. Die Anforderungen für den Betrieb des Transformators im Demonstrator sind erfüllt.

Neben der optimierten Kühlung diene das zweite Forschungsmuster zur Bewertung der Teilentladungsfestigkeit sowie der Druckfestigkeit der Kühlanlüsse.

Für die Teilentladungsfestigkeit des Konzeptes wurde auf die zusätzlichen Thermoelemente verzichtet, die beim ersten Forschungsmuster innerhalb der Wicklungen mit eingebunden waren. Das Ergebnis der Teilentladungsuntersuchung ist in folgender Tabelle 1-11 dargestellt. Grundlage für die Zielwerte nach DIN EN 61800-5-1 ist die maximal spezifizierte Isolationsspannung von $U_{PD}=7,74\text{kV}$ (Spitzenspannung).

Q=10 pC	Stressspannung	Aussetzspannung
Ziel	10,3kV [U_{pk}]	8,2kV [U_{pk}]
Ergebnis	Einsetzspannung 7,9 kV [$U_{pk}/\sqrt{2}$]	7,1 kV [$U_{pk}/\sqrt{2}$]

Tabelle 1-11: Messergebnis Teilentladungsprüfung an Prototyp 2

An dem Ergebnis ist ersichtlich, dass die Zielvorgabe nach Standard nicht erreicht wurde. Da die maximale Betriebsspannung von $U_{PD}=7,74\text{kV}$ aber einer Spitzenspannungswert entspricht und die gemessene Stressspannung einem Spitzenwert von $U_{stress}= 11,2\text{kV}$ entspricht, ist ein sicherer Betrieb des Transformators im System gegeben. Dennoch werden innerhalb des Designs Verbesserungen vorgenommen, um den Abstand an kritischen Stellen zu vergrößern und damit die Feldbelastung zu reduzieren.

Vor der Übergabe des optimierten Forschungsmusters wurde die Druckfestigkeit bis zu einem Druck bis $p=6$ bar nachgewiesen (Abbildung 1-37).



Abbildung 1-37: Wasseranschlüsse des zweiten Forschungsmusters.

1.4 AP4: MVDC-Netzdemonstrator

1.4.1 T 4.7: Aufbau des erforschten MV-MF-Transformators für den Demonstrator

In diesem Arbeitspaket wurden auf Basis der Forschungsmuster aus AP2 die Prototypen für den Demonstrator aufgebaut.



Abbildung 1-38: DC-DC-Wandlermodul inkl. MVMF-Transformator.

Aufgrund des modularen Aufbaus werden 8 Module nach Abbildung 1-38 in das Gesamtsystem (Abbildung 1-39) eingebaut.



Abbildung 1-39: Foto des MV-DC-DC Wandlers.

In den Validierungsmessungen des zweiten Forschungsmusters ging hervor, dass die außen liegende Primärwicklung ca. 30K wärmer, als die innenliegende Sekundärwicklung wird (vgl. blaue zu lila Kurve in Abbildung 1-36). Damit die Transformatoren eine Lebensdauer von 20 Jahren erfüllen können wird vor dem Bau der 8 Prototypen für den Demonstrator noch eine weitere Optimierung der Primärkühlung implementiert und durch einen Wärmelauf im DC-DC-Wandler validiert.

Um die Feldbelastung bei der Teilentladungsprüfung zu reduzieren, wurden die Strecken zwischen Niederspannungs-Erdpotential und Hochspannungspotential vergrößert. Hier ging es maßgeblich um die Anordnung innerhalb des Transformators.

Entsprechend der aufgeführten Änderung an Kühlung und Feldbelastung wurden die acht Transformatoren für den Demonstrator aufgebaut. Vor Auslieferung der Transformatoren wurde eine Serienprüfung an allen Bauteilen durchgeführt.

No.	RDC (150°C)			No load			Short Circuit							
	PRI	SEK	ratio	U	I	P	Lh [mH]	f	I	U	P	S	L [µH]	
1	6,297	3,707	1,0822	1,9	4,08	0,27	1,48619778	49,9	209,27	1,92	360,43	402,85	13,1048758	
2	6,33	3,73	1,0785	2	3,74	0,24	1,70306877	50	209,68	1,75	323,25	367,71	12,6895813	
3	6,387	3,712	1,0806	1,9	3,79	0,28	1,59663714	50,01	209,7	1,77	329,2	372,15	12,5607451	
4	6,326	3,719	1,0905	1,9	3,71	0,24	1,63175683	49,98	211,42	1,9	357,2	401,56	13,0701245	
5	6,311	3,713	1,0829	2	3,62	0,24	1,76064158	49,97	211,42	1,91	361,2	404,37	12,9539472	
6	6,301	3,698	1,0813	1,9	3,75	0,26	1,61481384	49,97	210,97	1,87	351,5	395,34	12,9484694	
7	6,286	3,704	1,0821	2	3,95	0,25	1,61347133	49,97	210,34	1,75	324,9	367,13	12,3066555	
8	6,326	3,701	1,0811	1,9	4	0,28	1,52828196	49,5	209,38	1,74	322,1	365,3	12,6383733	
Mittelwert	6,321	3,711	1,082		3,830								12,784	
stdAbw	0,029	0,010	0,003										0,262	

Abbildung 1-40: Serienprüfung der Prototypen.

Abbildung 1-40 zeigt die Übersicht der Ergebnisse. Es wurden die Widerstände und Übersetzungen gemessen, sowie eine Leerlauf- und Kurzschlussprüfung durchgeführt, um die Transformatorspezifischen Kennwerte zu ermitteln. Alle Ergebnisse sind innerhalb der nach IEC 60076-1 geforderten Serienabweichungen. Genauso wurde die dielektrische Festigkeit mit 13kV Stehwechselfspannung für 60sec geprüft (PRI zu SEK), die alle Transformatoren problemlos bestanden haben. Schließlich wurde die Teilentladungsprüfung an allen Bauteilen durchgeführt.

Hier konnte keine Verbesserung gegenüber dem zweiten Forschungsmuster erzielt werden. Die Teilentladungsfestigkeit der 8 Prototypen ist auf dem Niveau des zweiten Forschungsmusters. Wie in AP2 beschrieben, stellt dieser Wert für den Betrieb der Transformatoren im Demonstrator aber kein Problem dar. Dennoch wurde der Fertigungsprozess des Transformators noch einmal auf weitere Verbesserungsmöglichkeiten überprüft. Dabei wurde insbesondere das Befüllen des Transformatorgehäuses mit Epoxidharz angepasst und das Bauteil vorgewärmt. Hierdurch sollten die Fließigenschaften des Vergusses verbessert werden. Die anschließende Teilentladungsmessung ergab eine erhöhte Aussetzspannung von $U_{TEaus} = 7,4kV (U_{pk}/\sqrt{2})$.

Für einen der acht Prototypen wurde im DC-DC-Wandler ein finaler Wärmelauf durchgeführt. Das Ergebnis ist in Abbildung 1-41 dargestellt. Im Vergleich zum vorherigen Wärmelauf (SN3) konnte der Temperaturanstieg des optimierten Prototyps (SN6) nochmal um 10K reduziert werden.

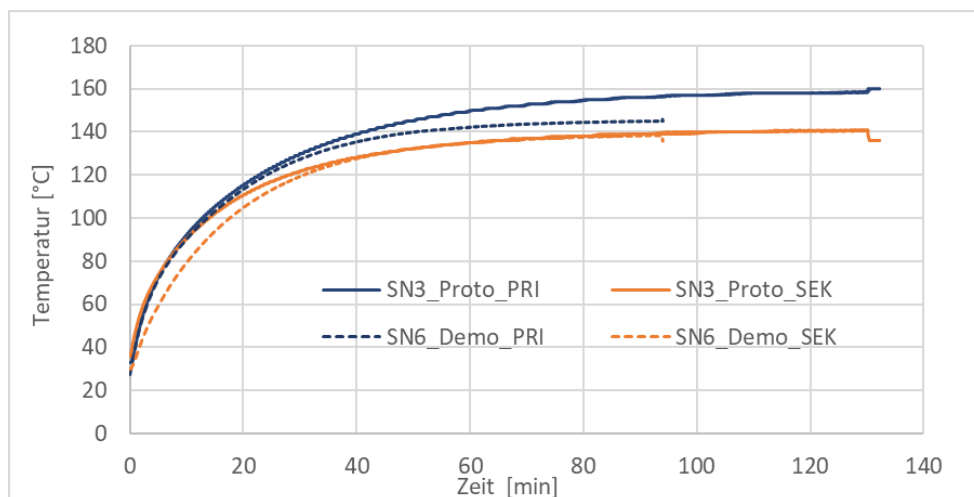


Abbildung 1-41: Wärmelaufdaten nach Optimierung der Transformator Kühlung.

Die Prototypen für den Demonstrator erfüllen die thermischen Anforderungen und das Vorhaben konnte erfolgreich abgeschlossen werden.

2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises sind in Tabelle 2-1 aufgelistet.

Lfd. Nr.	Task	Beschreibung
1	T2.2	Versuchsmuster für Voruntersuchungen <ul style="list-style-type: none"> - Kühlkonzept Panel - Kühlkonzept Rohr - Kühlkonzept Schlauch - Isolation Wickelzug - Isolation Teilentladungsfestigkeit - Isolation Spannungsbelastung
2	T2.2	Forschungsmuster 1 – 130kW- MVMF-Transformator für AP3
3	T2.2	Forschungsmuster 2 - Optimierter 130kW - Transformator für AP3
4	T4.7	8Stk. Prototypen 130kW- MVMF-Transformatoren für AP4
5	T4.7	Optimierter Prototyp 130kW-MVMF-Transformator für AP4

Tabelle 2-1: Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Notwendigkeit der Arbeit bestand darin, dass zu Beginn des Vorhabens noch keine geeigneten Mittelspannungs-Mittelfrequenztransformatoren für Mittelspannungs-DC-Wandler erforscht waren. Der Mittelspannungs-Mittelfrequenz-Transformator ist eine Schlüsselkomponente, die maßgeblich zu den Zielen des Gesamtvorhabens beiträgt. Ohne diesen kompakten Mittelspannungs-Mittelfrequenz-Transformator ist der Aufbau und Betrieb des Mittelspannungs-DC-Wandlers nicht möglich. Die im Konsortium durchgeführten, nachfolgenden Untersuchungen zum MVDC-Verteilnetz und deren Validierung im Gesamtdemonstrator wären ohne den erforschten MVMF-Transformator nicht möglich gewesen.

Durch die hohen Anforderungen an das Isolationssystem und das Kühlsystem war das Konzept des Transformators grundlegend zu erforschen. Da hier technologisches Neuland betreten wurde, mussten die einzelnen Entwicklungsschritte durch verschiedene Versuchsmuster und auch Forschungsmuster der MV-MF-Transformatoren gestützt werden. Nur so konnten schon an reduzierten Modellen Validierungsmessungen durchgeführt werden. Diese Voruntersuchungen haben es erst ermöglicht, schließlich einen optimierten Prototyp eines MVMV-Transformators für den Gesamtdemonstrator bereitzustellen.

Die Angemessenheit der Arbeit zeigt sich in der Qualität der erbrachten Leistungen und der effizienten Nutzung der verfügbaren Ressourcen. Die durchgeführten Maßnahmen waren sowohl zeitlich als auch inhaltlich angemessen, um die Projektanforderungen zu erfüllen und einen erfolgreichen Abschluss zu gewährleisten.

4. Voraussichtlicher Nutzen für das Unternehmen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses

Durch die Entwicklung und Implementierung des Mittelspannungs-Mittelfrequenz-Transformators wird das Unternehmen in der Lage sein, diese für innovative Mittelspannungs-DC-Wandler zu produzieren, die eine höhere Effizienz und Zuverlässigkeit bieten. Dies eröffnet neue Marktchancen und stärkt die Wettbewerbsfähigkeit des Unternehmens in der Energiebranche.

Die erfolgreiche Erforschung und Validierung des Transformators ermöglicht es dem Unternehmen, sich als führender Anbieter von fortschrittlichen Energielösungen zu positionieren. Dies kann zu einer Steigerung des Umsatzes und einer Erweiterung des Kundenstamms führen, da die Nachfrage nach nachhaltigen und effizienten Energietechnologien weiter wächst.

Darüber hinaus trägt die Entwicklung des Transformators zur Verbesserung der internen Forschungs- und Entwicklungsprozesse bei, indem wertvolle Erfahrungen und Erkenntnisse gewonnen werden, die in zukünftige Projekte einfließen können. Dies fördert die Innovationskraft und die langfristige Wettbewerbsfähigkeit des Unternehmens.

5. Darstellung des während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordenen Fortschritts auf diesem Gebiet bei anderen Stellen

Von dritter Seite sind keine Informationen bekannt geworden, die sich negativ auf das Projekt oder die Verwertung auswirken bzw. die weitere Durchführung des Projektes gefährden.

6. Veröffentlichungen

Die Ergebnisse des Projekts wurden in einer gemeinsamen Publikation der Konsortialpartner auf der Statustagung Maritime Technologien 2024 veröffentlicht:

Weiss, Roland, Manuel Blum, Ingo Rabl, Tim Villbusch, Konstantin Troidl, Thomas Heckel, und Klaus Brand: „MVDC4S: Erforschung von DC-Mittelspannungs-Verteilnetzen zum umweltschonenden Betrieb von Schiffen“, 2024, Statustagung Maritime Technologien 2024.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Erforschung von Mittelfrequenz- Mittelspannungs-Transformatoren für DC-Mittelspannungs-Verteilnetze zum umweltschonenden Betrieb von Schiffen	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Riemer, Björn, Muth Markus, Villbusch Tim	5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.09.2024
	6. Veröffentlichungsdatum
	7. Form der Publikation Document Control Sheet
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) AQ Inductive Components Germany GmbH	9. Ber.-Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 03SX536E
	11. Seitenzahl 39
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) BMWK	13. Literaturangaben
	14. Tabellen 11
	15. Abbildungen 43
16. DOI (Digital Object Identifier)	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung Das Projekt MVDC4S zielte auf die Erforschung von Mittelspannungs-Gleichspannungs-(MVDC)-Verteilnetzen auf Kreuzfahrtschiffen ab. Im Vergleich zu bestehenden Mittelspannungs-Wechselspannungs-Netzen sollte durch das MVDC-Netz eine Einsparung von etwa 30% beim Bauraum und 10% beim Materialaufwand realisiert werden. Bei Nennleistung sollte das neue Konzept eine Energieeinsparung von 3% und im Teillastbereich eine Einsparung von 15% ermöglichen. Als Referenz diente die AIDAnova. Im Gesamtprojekt konnten diese Ziele erreicht werden. Zur Erreichung der oben genannten übergeordneten Projektziele wurden in diesem Teilvorhaben Mittelspannungs-Mittelfrequenz-Transformatoren erforscht. Ziel war es, Transformatoren mit hoher Frequenz und gleichzeitig hoher Isolationsspannung zu realisieren. Dabei sollte eine Reduktion der Baugröße sowie eine Gewichts- und Materialeinsparung von etwa 25% erreicht werden. Als Referenz diente ein Mittelfrequenztransformator mit einer Leistung von 5 MW, einer Spannung von 5 kV und einer Frequenz von 1 kHz. Ein weiteres Ziel war es, das Isolationssystem für neuartige SiC-Halbleiter auszulegen, um Spannungssteilheiten von bis zu 20-30 kV/µs standzuhalten. Ein essenzieller Faktor für den Mittelfrequenztransformator war das Kühlsystem, welches innerhalb des Vorhabens intensiv erforscht wurde. Die Arbeiten im Vorhaben wurden durch den Bau verschiedener Forschungsmuster und Prototypen unterstützt, sodass alle Ziele dieses Vorhabens erreicht wurden.	
19. Schlagwörter DC_Wandler, MVMF-Transformator	
20. Verlag	21. Preis

Nicht änderbare Endfassung mit der Kennung 2659596-6

Document control sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Veröffentlichung (Publikation)	
3. title Research of medium-frequency medium-voltage transformers for DC medium-voltage distribution grids for environmentally friendly operation of ships		
4. author(s) (family name, first name(s)) Riemer, Björn, Muth Markus, Villbusch Tim	5. end of project 30.09.2024	6. publication date
	7. form of publication Document Control Sheet	
	8. performing organization(s) name, address AQ Inductive Components Germany GmbH	
12. sponsoring agency (name, address) BMWK	9. originators report no.	
	10. reference no. 03SX536E	
	11. no. of pages 39	
13. no. of references	14. no. of tables 11	
	15. no. of figures 43	
	16. DOI (Digital Object Identifier)	
17. presented at (title, place, date)		
18. abstract The MVDC4S project aimed to research medium-voltage direct current (MVDC) distribution grids on cruise ships. Compared to existing medium-voltage AC grids, the MVDC grid was to achieve savings of around 30% in installation space and 10% in material costs. At nominal power, the new concept should enable energy savings of 3% and 15% in the partial load range. The AIDAnova served as a reference. These goals were achieved in the overall project. Medium-voltage medium-frequency transformers were researched in this sub-project in order to achieve the overarching project objectives mentioned above. The aim was to realize transformers with a high frequency and high insulation voltage at the same time. The aim was to achieve a reduction in size as well as weight and material savings of around 25%. A medium-frequency transformer with an output of 5 MW, a voltage of 5 kV and a frequency of 1 kHz served as a reference. Another objective was to design the insulation system for new SiC semiconductors in order to withstand voltage gradients of up to 20-30 kV/μs. An essential factor for the medium-frequency transformer was the cooling system, which was intensively researched within the project. The work in the project was supported by the construction of various research samples and prototypes, so that all the objectives of this project were achieved.		
19. keywords DC_DC converter, MVMF-Transformer		
20. publisher	21. price	

Nicht änderbare Endfassung mit der Kennung 2661000-5