

DLR
Kürzel Forschungseinrichtung 1 (FE 1)
ELENIA
Kürzel Forschungseinrichtung 2 (FE 2)
EMV
Kürzel Forschungseinrichtung 3 (FE 3)

MSPROSYS
Akronym / Thema kurz Skizze
2025-1-3
Skizzen-Nr. (wird vom FSM eingetragen)
Herr Eugene Tinjinui Nдох
Ansprechpartner FE für den FSM

Skizze für ein IGF-Vorhaben zum Thema: **MVDC-Schiffsantriebssystem**

1. Kurzzusammenfassung und Fachgebiete / Wirtschaftszweige

Der moderne maritime Sektor braucht einen reibungslosen Übergang zu grüner Energie als optimale Lösung für die aktuellen ökologischen Probleme. Dieser Übergang muss wirtschaftlich selbsttragend sein. Die Elektrifizierung von Schiffen ist eine der wirtschaftlich rentablen grünen Umstellungen, die nicht nur in der Forschung und Entwicklung, sondern auch in der Schiffbauindustrie Beachtung gefunden hat. Bei der Elektrifizierung von Schiffen wird heute überwiegend die Wechselstromtechnologie verwendet. Studien haben jedoch gezeigt, dass die Umstellung auf die Gleichstromtechnologie (DC) die Netzeffizienz des Schiffes [1] und damit seine wirtschaftliche Rentabilität weiter erhöht. Die Gleichstromtechnologie hat jedoch einige Schwächen, insbesondere das Fehlen eines geeigneten Schutzkonzepts, vor allem auf Mittelspannungsebene (MV) [2]. Das heutige DC-Schiffsnetz ist hauptsächlich auf die Niederspannung (LV) und auf kleinere Schiffe beschränkt. Größere Schiffe werden von der DC-Effizienz profitieren, wenn der Übergang auf die MS-Ebene erfolgt. In diesem Projekt wird ein Schiffsnetz entworfen und verwendet, um den Schutz von Gleichstromsystemen zu untersuchen, einschließlich Stromrichter-Fehlerabschaltung und verteiltem Schutz mit Selektivität. Es werden Schutzanforderungen auf Komponentenebene sowie Algorithmen zur Fehlererkennung, -lokalisierung und -isolierung für eine schnelle Fehlerbeseitigung entwickelt. Um die zweite Herausforderung des DC-Schiffsnetzes zu lösen, nämlich die Entwicklung geeigneter MV-Wandler, wird der modulare Multilevel-Konverter (MMC) mit integrierter Batterie untersucht. MMC verwenden Niederspannungsgeräte, die in funktionalen Einheiten, den so genannten Submodulen, zusammengefasst und in einem Muster zur Unterstützung des Mittelspannungsnetzes angeordnet sind. Für die Batterie und den Umrichter werden degradationsminimierende Steuerungen entwickelt. Das Konzept besteht darin, einen kostengünstigen, kompakten und langlebigen Antriebsstrang für das Gleichstromnetz des Schiffes vorzuschlagen. Das Projekt umfasst sowohl den Gleichstromschutz als auch die Leistungselektronik.

2. Wirtschaftliche Relevanz für KMU

2.1 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

Die beiden größten Herausforderungen von Gleichstromnetzen, nämlich Schutzkonzepte und MS-Wandler, werden in diesem Projekt in Angriff genommen. Was die Gleichstrom-Schutzkonzepte betrifft, so ist das Schiffsnetz ein komplexes System mit rekonfigurierbaren Topologien und verschiedenen Komponenten wie Umrichtern und Schutzvorrichtungen in komplexer Wechselwirkung. Dies muss klar verstanden werden, um den ordnungsgemäßen Betrieb unter normalen Bedingungen und die Kontinuität des Betriebs bei Störungen zu gewährleisten. Da es in Gleichstromsystemen keinen natürlichen Nulldurchgang gibt und die Leitungsimpedanzen niedriger sind (was zu stärkeren Kurzschlussströmen führt als bei Wechselstrom), ist ein geeignetes Schutzkonzept erforderlich, um die Zuverlässigkeit des Netzes zu gewährleisten. Fehlerschutzmechanismen wie Fehlererkennung, -ortung und -isolierung mit Selektivität bei höchster Genauigkeit und Geschwindigkeit sind noch offene Forschungsfragen für das Gleichstromnetz von Schiffen. Es werden Testfälle gemäß den verfügbaren Normen für den Gleichstromschutz sowie konforme Schutzalgorithmen entwickelt. Ein weiterer Teil des Projekts wird sich mit dem Design des MV-Wandlers befassen, indem der MMC untersucht wird, der bereits als vielversprechender Typ für MVDC identifiziert worden ist. Diese MMC garantiert niedrigere Kosten, bessere Stromqualität, höhere Zuverlässigkeit, Modularität und Skalierbarkeit [3]. Die Batterien werden in die Leistungselektronik integriert, um Platz und Gewicht zu sparen. Ein Optimierungsalgorithmus wird auch in das Steuersystem integriert, um eine hohe Effizienz und eine minimale Degradation der Leistungselektronik und der Batterien zu gewährleisten, da diese Komponenten die empfindlichsten Elemente sind [4,5] und zu mehr als 70 % der Kosten für Batterien und den elektrischen Antriebsstrang beitragen [6].

2.2 Wirtschaftliche Bedeutung der angestrebten Forschungsergebnisse für KMU

KMU verfügen in der Regel über kleinere Budgets und sind in der Regel auf der für die Entwicklung künftiger Produkte wichtigen Forschungs- und Entwicklungsebene nicht angemessen vertreten [7]. Da der

Gleichstromschutz ein aktiver Forschungsbereich ist, werden die aus dieser Studie gewonnenen und leicht zugänglichen Erkenntnisse die Entwicklung neuer MVDC-Produkte unterstützen, wovon sowohl Komponentenhersteller als auch Schiffsbauer profitieren. Die Studie wird auch dazu beitragen, neue Normen vorzuschlagen, die einheitlichere Wettbewerbsbedingungen zwischen kleineren und größeren Unternehmen schaffen. Die Studie über batterieintegrierte MMC ermöglicht es den KMU außerdem, vorhandene Niederspannungsgeräte und Konstruktionskenntnisse wiederzuverwenden, um neue Produkte für den MS-Markt anzubieten. Dies ermöglicht die Wiederverwendung vorhandener F&E-Daten, Designs und Fertigungslinien für Niederspannungsgeräte, wodurch die Kosten für den Eintritt in den Mittelspannungsmarkt und das damit verbundene wirtschaftliche Risiko für die KMU gesenkt werden können.

3. Wissenschaftlich-technischer Ansatz

3.1 Stand der Forschung und Entwicklung

Es wird erwartet, dass MVDC-Netze die Elektrifizierung großer Schiffe ermöglicht und dadurch deren Effizienz, Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit steigert. Für einen sicheren, robusten und zuverlässigen Betrieb ist es wichtig, ein Schutzsystem zu entwickeln, das die Fehler selektiv isolieren und zwischen Nennbetrieb und gestörtem Betrieb unterscheiden kann. Es gibt umfangreiche Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet der Evaluierung praktikabler Schutzprinzipien. Auf Komponentenebene reicht dies von der Bewertung supraleitender Fehlerstrombegrenzer, wie in [8] beschrieben, über die Kombination von Sicherungen und Gleichstromschaltgeräten, wie in [9] erläutert, bis hin zu den in [10] gezeigten Weiterentwicklungen von Schaltgeräten zur Verkürzung der Fehlerklärungszeiten. Auch die Fehlerklassifizierung gewinnt zunehmend an Bedeutung, wobei in [11] beispielsweise Algorithmen des maschinellen Lernens eingesetzt werden, die zur Gewährleistung der Selektivität verwendet werden. Auf Systemebene ist die Entwicklung praktikabler Schutzsysteme für verschiedene MVDC-Systemtopologien von Interesse, wie in [12] oder [13] gezeigt wird, und sie ist wichtig für die Anforderungsspezifikation, was von [14] unterstützt wird. Leistungselektronische Systeme müssen ebenfalls berücksichtigt werden, da die Wechselwirkung zwischen diesen Systemen bei Fehlern und Störungen die Performance der Schutzsysteme beeinflusst. Einen Überblick über leistungselektronische Systeme gibt [15]. Diese Aspekte beeinflussen auch den Entwurf der MVDC-Systemtopologie, da verschiedene Architekturen mehr oder weniger tolerant gegenüber Fehlern sind, wie in [16] dargelegt ist. Jüngste Forschungsprojekte belegen die Notwendigkeit eines zunehmenden Verständnisses des Schutzes auf System- und Komponentenebene, einschließlich der Kenntnis der Wechselwirkungen zwischen Gleichstromsystem und Umrichtern in diesem Zusammenhang. In [17] wurde ein DC-Schutzsystem mit verteilten Schutzgeräten zur Erhöhung der Selektivität entwickelt und experimentell validiert. Außerdem wurden hybride Leistungsschalter für ein MVDC-System konstruiert und die Performance untersucht. In [18] wurden Algorithmen und Prinzipien zur Fehlererkennung, der Beitrag von Stromrichtern zur Fehlerstrombegrenzung und Empfehlungen für fehlertolerante DC-Architekturen entwickelt und bewertet.

In Bezug auf den MVDC-Konverter hat sich der Modular Multilevel Converter (MMC) als einer der am besten geeigneten Wandlertypen erwiesen, wenn man die Anforderungen an die Netzqualität, die Kosten und die Zuverlässigkeit berücksichtigt [3]. Er wurde hauptsächlich mit traditioneller PI-Regelung untersucht [19,20,21]. Es wurden auch fortschrittliche Steuerungen wie Model Predictive Control (MPC) vorgeschlagen [22]. Allerdings haben sich nur sehr wenige Studien mit der Integration von Batteriesystemen in die MMC-Submodule befasst [23]. Einige dieser integrierten MMCs wurden mit modernen Optimierungsalgorithmen wie MPC validiert, jedoch hat sich bisher keine der Studien an die Minimierung der Degradation des Batteriespeicher-Wandler-Paares herangewagt. Dies ist notwendig, um die Lebensdauer des Antriebsstrangs zu verlängern.

Forschungsergebnisse aus dem Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungsnetzen (HGÜ) können nicht direkt für MVDC-Netze verwendet werden, insbesondere im Bereich des Schutzes. Neue Methoden werden auf das MVDC-Schiffsnetz abgestimmt und untersucht. Auf dem Gebiet der MMC-Regelung wurden bereits einige Erfahrungen mit PI- und MPC-Regelungen gesammelt. In diesem Projekt wird die Optimierung des MMC-Wandler-Batterie-Paares analysiert.

3.2 Arbeitshypothese

Ziel der Forschungsarbeiten ist es, das Verständnis für die Steuerung und den Schutz von MVDC-Schiffsnetzen zu vertiefen, indem eine Reihe von Tests und Interaktionen zwischen Steuer- und Schutzgeräten durchgeführt werden, auf deren Grundlage Standards und geeignete Algorithmen entwickelt werden. Zu diesem Zweck werden Benchmark-Systeme mit realistischen Topologien,

Spannungs- und Leistungspegeln entwickelt. Ein weiteres Ziel ist es, ein integriertes Antriebskonzept vorzuschlagen, das sowohl Batteriespeicher als auch Leistungselektronik kombiniert und die Degradation des Batterie-Wechselrichter-Paares sowie den Wirkungsgrad optimiert.

4. Lösungsweg

4.1 Bearbeitungsschritte und Personaleinsatz

AP 1: Anforderungsdefinition und Entwicklung von Benchmark-Systemen

In diesem Arbeitspaket werden die Grundlagen für die notwendigen Studien geschaffen. Zunächst wird der Stand der Technik analysiert, Komponentenmodelle werden erstellt, Systemtopologie definiert und verschiedene Testszenarien und Missionsprofile entwickelt.

AP 1.1: Anforderungen an die Modellierung von zukünftigen MVDC-Antriebssystemen

Es wird eine detaillierte Analyse des Stands der Technik und zukünftiger MVDC-Antriebssysteme durchgeführt. Als Ergebnis werden Anforderungen definiert, um geeignete Systeme zu modellieren, einschließlich MVDC-Systemtopologien, Spannungs- und Leistungsniveaus, Komponenten wie Umrichter, Batteriespeichersysteme und den Antriebsstrang, sowie Regelungs- und Schutzsysteme.

AP 1.2: Definition von Missionsprofilen und Testfällen

Ein repräsentativer Schiffstyp wird ausgewählt, um standardisierte Missionsprofile für den Betrieb des MVDC-Antriebssystems zu definieren. Anschließend werden Testfälle abgeleitet, um die relevanten Eigenschaften der System- und Komponenteninteraktionen abzubilden und zu analysieren, wobei der Fokus auf Fehler und Störungen liegt. Anhand der Testfälle können insbesondere die Wechselwirkungen zwischen Schutz- und Regelungssystemen untersucht werden, was die Definition von Anforderungen an zukünftige Antriebssysteme in dieser Hinsicht unterstützt.

AP 1.3: Modellierung und Implementierung

Mit den Anforderungen, Missionsprofilen und Testfällen werden Modelle von MVDC-Antriebssystemen so entwickelt, dass ein herstellernerutraler Austausch der Modelle möglich ist. Anschließend werden die Modelle in einer geeigneten Simulationsumgebung implementiert und später als frei zugängliche Benchmark-Systeme veröffentlicht, um die Anpassung und Weiterentwicklung durch verschiedene Stakeholder zu erleichtern. Die entwickelten Modelle und ihre Steuerungen werden zur Analyse der Stabilität auf Systemebene verwendet. Es werden auch übergeordnete Regelungen für das Energiemanagement und die Steuerung des Leistungsflusses implementiert.

AP 2: Regelungs- und Schutzsysteme

In diesem Arbeitspaket werden die Regelungssysteme für die verschiedenen Komponenten entworfen. Das System wird im Normalbetrieb mit standardisierten Lastprofilen simuliert. Für Fehlerstudien wird auch die Rolle eines MMC für die Fehlerstrombegrenzung untersucht. Die Studie wird sowohl auf Komponentenebene als auch auf Systemebene durchgeführt. Eine weitere Studie betrachtet die Entwicklung fortschrittlicher Regelungsalgorithmen für batterieintegrierte MMC, die eine Minimierung der Batterie- und Umrichterdegradation bewirken.

AP 2.1: Interaktionsstudien mit Schwerpunkt auf Fehlern und Störungen

Unter Verwendung der in AP 1 entwickelten Benchmark-Systeme werden Simulationsstudien durchgeführt, um die Leistung der Regelungs- und Schutzsysteme sowohl auf Komponenten- als auch auf Systemebene zu bewerten. Insbesondere wird die Wechselwirkung zwischen Umrichtern und ihren Regelungen bei Fehlern und Störungen analysiert, um den Forschungsbedarf für die Verbesserung von Komponenten, Reglerdesigns und Mechanismen zur Gewährleistung der Systemstabilität aufzuzeigen. In ähnlicher Weise wird die Leistung der Schutzsysteme im Hinblick auf Selektivität, Empfindlichkeit, Zuverlässigkeit und Robustheit bewertet. Die erwarteten Transienten und Wechselwirkungen verbessern

das Verständnis der Systemperformance und führen zu Empfehlungen für die Verbesserung der Regelungs- und Schutzsysteme.

AP 2.2: Entwicklung von Schutzsystemen

Die wichtigsten Erkenntnisse aus AP 2.1 werden genutzt, um Schutzsysteme für zukünftige MVDC-Antriebssysteme sowohl auf Komponenten- als auch auf Systemebene weiterzuentwickeln. Auf Komponentenebene werden mehrere Aspekte analysiert. Erstens liegt ein Schwerpunkt auf den Anforderungen an Schaltgeräten, wobei insbesondere hybride Leistungsschalter zur schnellen Fehlerstromunterbrechung untersucht werden. Zweitens werden Algorithmen zur Fehlererkennung und -klassifizierung entwickelt, die dem Stand der Technik und künftigen Entwicklungen entsprechen, um die Selektivität, Empfindlichkeit, Zuverlässigkeit und Robustheit von Schutzgeräten zu erhöhen. Drittens wird die Rolle von Umrichtern für die Fehlerstrombegrenzung bewertet. Schließlich wird ein Gesamtschutzsystem entwickelt, das mehrere verteilte Schutzgeräte berücksichtigt, um die Gesamtleistung und Robustheit des Systems zu erhöhen, wobei der Schwerpunkt auf der Gewährleistung der Selektivität liegt. Die Platzierung der Geräte und die Kommunikationsschnittstellen werden berücksichtigt.

AP 2.3: Entwicklung von Regelungssystemen

Ähnlich wie im vorangegangenen Arbeitspaket werden die wichtigsten Erkenntnisse aus AP 2.1 in Bezug auf die Wechselwirkungen zwischen Komponenten und Steuerungssystemen als Grundlage für die weitere Entwicklung von Regelungen verwendet, um die Robustheit der verwendeten Komponenten, insbesondere der Umrichter, in Bezug auf Fault Ride Through und Rekonfigurationsfähigkeiten zu erhöhen und die Systemstabilität aufgrund von Störungen sowie die Leistungsflusssteuerung zu gewährleisten. Darüber hinaus werden verbesserte Energiemanagement- und Leistungsverteilungssteuerungen auf höherer Ebene entwickelt.

AP 2.4: Validierung auf Systemebene

Die Entwicklungen im Bereich der Regelungs- und Schutzsysteme werden in die Benchmark-Systeme integriert, um eine simulative Validierung auf Systemebene mit den definierten Missionsprofilen, Testfällen, Fehlerszenarien und Störungen aus AP 1.2 durchzuführen. Dadurch wird sichergestellt, dass die Steuerungs- und Schutzsysteme die Gesamtsystemperformance deutlich erhöhen und sich nicht gegenseitig negativ beeinflussen, was zu Instabilitäten oder einer Verringerung der Funktionalität der Schutzsysteme, der Robustheit der Umrichter, der Leistungsflusssteuerung, Fault Ride Through und Rekonfigurationsmöglichkeiten führen könnte.

AP 3: Dissemination

In diesem Arbeitspaket liegt der Fokus auf der Aufbereitung der Benchmark-Systeme und Modelle, sowie die Abgabe von Empfehlungen für zukünftige Regelungs- und Schutzsysteme, welche von den relevanten Stakeholdern genutzt werden können.

AP 3.1: Open-Access-Modelle

Die Modelle der Komponenten, Topologien, Regelungs- und Schutzsysteme werden herstellerneutral definiert, so dass sie von den verschiedenen Stakeholdern in diesem Projekt und darüber hinaus als eine Sammlung von Benchmark-Systemen verwendet werden können. Dies erleichtert den Austausch zwischen ihnen und zwischen verschiedenen Forschungsbereichen, so dass die Auswirkungen von Entwicklungen in einem Gesamtsystemkontext untersucht werden können. Darüber hinaus werden die in einer Simulationsumgebung implementierten Modelle als Open Access veröffentlicht, was die Entwicklungsprozesse von KMUs beschleunigt, indem eine Grundlage für die Durchführung von Studien und die Validierung der Technologien geschaffen wird.

AP 3.2: Empfehlungen für zukünftige Kontroll- und Schutzsysteme

Mit den Erkenntnissen aus den Interaktionsstudien von AP 2.1 und den Weiterentwicklungen der Regelungs- und Schutzsysteme können den KMUs Empfehlungen zur Verbesserung der entsprechenden Technologien gegeben werden. Dazu gehören u.a. Anforderungen an Spannungs- und Leistungslevel, Fehlerklärungszeiten, die Dimensionierung von Komponenten, erwartete Transienten, notwendige Regelungskonzepte, Kommunikations-schnittstellen, Reaktionszeiten und Systemtopologien. Durch die Veranstaltung von Workshops können die Empfehlungen gemeinsam mit den Beteiligten hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit verfeinert werden, und zwar wiederum herstellerneutral, um die Austauschbarkeit zu gewährleisten.

4.2 Arbeitsdiagramm

HAP	Arbeitspaket	AP Leiter	Teilnahme	PM	J1				J2				J3				
					Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	
HAP1	Definition der Anforderungen und Entwicklung eines Benchmark-Systems	DLR	EMV, ELENIA	2													
1.1	Anforderungen an die Modellierung zukünftiger MVDC-Antriebssysteme	DLR	EMV, ELENIA	2													
1.2	Missionsprofile und Testfalldefinition	DLR	EMV, ELENIA	2													
1.3	Modellierung und Implementierung	DLR	EMV, ELENIA	2													
HAP2	Kontroll- und Schutzsysteme	EMV	DLR, ELENIA,	5													
2.1	Interaktionsstudien mit Schwerpunkt auf Fehlern und Störungen	EMV	DLR, ELENIA,	5													
2.2	Entwicklung von Schutzsystemen	EMV	DLR, ELENIA,	5													
2.3	Entwicklung von Kontrollsystemen	ELENIA	EMV, DLR	5													
2.4	Validierung auf Systemebene	EMV	DLR, ELENIA	5													
HAP3	Verbreitung	ELENIA	EMV, DLR	2													
3.1	Modelle mit offenem Zugang	ELENIA	EMV, DLR	2													
3.2	Empfehlungen für zukünftige Kontroll- und Schutzsysteme	ELENIA	EMV, DLR	2													
	◆ Bericht																

5. Umsetzbarkeit und Transfer der Ergebnisse

5.1 Aussagen zur voraussichtlichen industriellen Umsetzung der FuE-Ergebnisse nach Projektende

Im Hinblick auf die industrielle Umsetzung wird erwartet, dass das Projekt bahnbrechende Konzepte und Lösungen für die Hauptprobleme der MVDC-Netze liefert, die bereits ein aktiver industrieller Forschungsbereich sind. Daher werden alle Ergebnisse ohne weiteres von der Industrie übernommen werden. Außerdem dürfte der für die Mittelspannungswandler verwendete Ansatz die KMU dazu ermutigen, sich auf die HGÜ-Märkte zu wagen, da sie ihre bestehenden Produktionsketten für Niederspannungsnetze leicht erweitern können, was geringere Markteintrittskosten bei minimalem wirtschaftlichem Risiko bedeutet.

5.2 Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Während des Projekts wird ein ständiges Feedback mit der Industrie über den Beirat erfolgen. Die Ergebnisse werden über frei zugängliche Fachzeitschriften, Konferenzbeiträge und Workshops der Öffentlichkeit zugänglich gemacht.

6. Durchführende Forschungseinrichtungen

	Forschungseinrichtung 1	Forschungseinrichtung 2	Forschungseinrichtung 3
Name :	DLR-Institut für Maritime Energiesysteme Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)	Technische Universität Braunschweig Institut für Hochspannungstechnik und Energiesysteme (elenia)	Technische Universität Braunschweig Institut für Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)
Anschrift :	Düneberger Strasse 108, 21502 Geesthacht	Schleinitzstraße 23, 38106 Braunschweig	Schleinitzstraße 23 B – 1. OG, 38106 Braunschweig
Leiter der Forschungseinrichtung :	Prof. Dr. Sören Ehlers (soeren.ehlers@dlr.de)	Prof. Dr.-Ing. Michael Kurrat (m.kurrat@tu-braunschweig.de)	Prof. Dr.-Ing. Michael Terörde (michael.teroerde@tu-braunschweig.de)
Projektleiter :	Herr Eugene Tinjinui Nдох	Prof. Dr.-Ing. Michael Kurrat	Prof. Dr.-Ing. Michael Terörde
Projektbearbeiter /-in :	Dr. Saravanakumar Arumugam, Dr. Dheeraj Gosala	Fabian Benedikt Witt, Fanke Zeng	Mehrabanjahromi Abbas, Naderi Akhormeh Ahmadreza
Ansprechpartner :	Herr Eugene Tinjinui Nдох	Herr Marc René Lotz	Herr Herman Jiopo

7. Literaturverzeichnis

- [1] Kim, K., Park, K., Roh, G., & Chun, K. (2018). DC-grid system for ships: a study of benefits and technical considerations. *Journal of International Maritime Safety, Environmental Affairs, and Shipping*, 2(1), 1–12. <https://doi.org/10.1080/25725084.2018.1490239>
- [2] Javed, U.; Mughees, N.; Jawad, M.; Azeem, O.; Abbas, G.; Ullah, N.; Chowdhury, M.S.; Techato, K.; Zaidi, K.S.; Tahir, U. A Systematic Review of Key Challenges in Hybrid HVAC–HVDC Grids. *Energies* 2021, 14, 5451.
- [3] Raju, M. N., Sreedevi, J., Mandi, R. P., & Meera, K. (2018). Modular multilevel converters technology: a comprehensive study on its topologies, modelling, control and applications. *IET Power Electronics*, 12(2), 149–169. <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2018.5734>
- [4] M. Abdelbaky, J.R. Peeters, J.R. Dufflou, W. Dewulf "Forecasting the EU recycling potential for batteries from electric vehicles" *Procedia CIRP*, 90 (2020), pp. 432-436
- [5] M. Brüll, A. Ayad, A. Greif, S. Rogge, and M. Töns, "Lifetime analysis 1305 of electronics and power electronic components in electric vehicles," in 1306 *Proc. 32nd Electr. Vehicle Symp. (EVS)*, 2019, pp. 1–12
- [6] Gujarathi, P. K., Shah, V. A., & Lokhande, M. M. (2018). Cost Analysis for Conversion of Conventional Vehicle into Plug-InHybrid Electric Vehicle. *Journal of Green Engineering*, 8(4), 497–518. <https://doi.org/10.13052/jge1904-4720.843>
- [7] BMWi, "Building on SMEs: Greater Responsibility - Greater Freedom", Federal Ministry of Economics and Technology (BmwI), Berlin, www.bmw.de Jan 2011, <https://www.bmwk.de/Redaktion/EN/Publikationen/building-on-smes.html> (accessed Feb. 03, 2025)
- [8] Z. Li et al., "Application of Flux-Coupling-Type Superconducting Fault Current Limiter on Shipboard MVDC Integrated Power System," in *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 30, no. 4, pp. 1-8, June 2020, Art no. 5601908, doi: 10.1109/TASC.2020.2986747.
- [9] Piotr Dworakowski, Juan D. Páez, Wolfgang Grieshaber, Alberto Bertinato, Eric Lamard, Protection of radial MVDC electric network based on DC circuit breaker and DC fuses, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Volume 153, 2023, 109398, ISSN 0142-0615, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.109398>.
- [10] C. Xu et al., "Piezoelectrically Actuated Fast Mechanical Switch for MVDC Protection," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 36, no. 5, pp. 2955-2964, Oct. 2021, doi: 10.1109/TPWRD.2020.3030869.
- [11] Sheng Liu, Yue Sun, Lanyong Zhang, Peng Su, Fault diagnosis of shipboard medium-voltage DC power system based on machine learning, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Volume 124, 2021, 106399, ISSN 0142-0615, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106399>.
- [12] K. Satpathi, N. Thukral, A. Ukil and M. A. Zagrodnik, "Directional protection scheme for MVDC shipboard power system," *IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Florence, Italy, 2016, pp. 3840-3847, doi: 10.1109/IECON.2016.7793893.
- [13] R. T. Wang, L. J. Fu, F. Xiao and X. X. Fan, "System Protection for vessel DC Zonal Electrical System supplied by Medium Voltage DC," 2013 *IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices*, Beijing, China, 2013, pp. 89-93, doi: 10.1109/ASEMD.2013.6780714.
- [14] R. M. Cuzner and V. Singh, "Future Shipboard MVdc System Protection Requirements and Solid-State Protective Device Topological Tradeoffs," in *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 5, no. 1, pp. 244-259, March 2017, doi: 10.1109/JESTPE.2016.2638921.
- [15] Simone Castellan, Roberto Menis, Alberto Tassarolo, Fabio Luise, Teresa Mazzuca, A review of power electronics equipment for all-electric ship MVDC power systems, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Volume 96, 2018, Pages 306-323, ISSN 0142-0615, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.09.040>.
- [16] R. M. Cuzner and D. A. Esmaili, "Fault tolerant shipboard MVDC architectures," 2015 *International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles (ESARS)*, Aachen, Germany, 2015, pp. 1-6, doi: 10.1109/ESARS.2015.7101536.
- [17] Verbundvorhaben SMS-II: 'SMART MODULAR SWITCHGEAR II' Modulares Schutzsystem zur selektiven Fehlerabschaltung in Mittelspannungs-Gleichstrom-Netzkonfigurationen, Zeitraum 01.01.2019 – 31.12.2023, Förderkennzeichen 03EK3058B, Projektträger Forschungszentrum Jülich GmbH (PT-J.EGF2)
- [18] Sustainable and Energy-Efficient Aviation – SE²A, DFG project G:(GEPRIS)390881007, Beginn: 2019
- [19] Ndoh, Eugene Tinjinui and Byeon, Seongsu and Rene Marc, Lotz and Ehlers, Sören (2024) A Method to Enable Reduced Sensor Capacitor Voltage Estimation in Modular Multilevel Converters. In: 4th International Conference on Modeling and Optimisation of Ship Energy Systems (MOSES), MAS 2023. TU Delft OPEN Publishing. Modelling and Optimisation of Ship Energy Systems (MOSES 2023), 2023-10-26 - 2023-10-27, Delft, Netherlands. doi: 10.59490/moses.2023.672 <<https://doi.org/10.59490/moses.2023.672>>.
- [20] S. Zhou, B. Li, J. Wang and D. Xu, "A Modified Modular Multilevel Converter for Motor Drives Capable of High-Torque Operation at Zero/Low Motor Speeds," in *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 68, no. 7, pp. 2493-2497, July 2021, doi: 10.1109/TCSII.2021.3058523.
- [21] S. Prasoon, S. Gaurav, D. Kumar and C. Kumar, "Modular Multilevel DC-DC Converter Based EV Battery Charger," 2022 *IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, Jaipur, India, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/PEDES56012.2022.10080325.
- [22] Y. Wang, W. Cong, M. Li, N. Li, M. Cao and W. Lei, "Model predictive control of modular multilevel converter with reduced computational load," 2014 *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC 2014*, Fort Worth, TX, USA, 2014, pp. 1776-1779, doi: 10.1109/APEC.2014.6803546.
- [23] A. Balachandran, T. Jonsson and L. Eriksson, "Design and Analysis of Battery-Integrated Modular Multilevel Converters for Automotive Powertrain Applications," 2021 23rd European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'21 ECCE Europe), Ghent, Belgium, 2021, pp. P.1-P.12, doi: 10.23919/EPE21ECCEEurope50061.2021.9570570.
- [24] L. L. Oi, J. Lindtjorn and H. Krattiger, "MVDC Marine: from Customer Needs to Technical Requirements, Product Gaps, Potential Solutions," 2023 *IEEE Electric Ship Technologies Symposium (ESTS)*, Alexandria, VA, USA, 2023, pp. 197-202, doi: 10.1109/ESTS56571.2023.10220541.
- [25] Z. Cai and L. Ren, "Design and Analysis of Superconducting Current-Limiting Switch in Ship MVDC System," 2020 *IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD)*, Tianjin, China, 2020, pp. 1-2, doi: 10.1109/ASEMD49065.2020.9276127.
- [26] Nasibeh Zohrabi, Jian Shi, Sherif Abdelwahed, An overview of design specifications and requirements for the MVDC shipboard power system, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Volume 104, 2019, Pages 680-693, ISSN 0142-0615, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.07.050>.
- [27] Marounfa Djibo, Paul Moses, Ike Flory, "Fault Protection Considerations for MVDC Shipboard Power Systems Operating with Pulsed-Power Loads," *WSEAS Transactions on Power Systems*, vol. 16, pp. 139-148, 2021, DOI:10.37394/232016.2021.16.14
- [28] Sichere und zuverlässige elektrische und thermische Netzwerke für hybrid-elektrische Antriebssysteme (ETHAN), gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

8. Mitglieder des Projektbegleitenden Ausschusses (PA)

Zusätzlich zu der untenstehenden Liste wurden weitere potenzielle Unternehmen kontaktiert.

Unternehmen (Name, Sitz)	Ansprechpartner/-in	Kompetenz	Interesse PA	KMU	FSM-Mitglie
Lloyd's Register EMEA	Brüggmann, Jörn	Zulieferer	ja	nein	ja
Fr. Fassmer GmbH & Co. KG	Bley, Maximilian	Werft	angefragt	nein	ja
O.S. Energy GmbH - Marine Power Solutions	Vincent Nürnberg	Reeder	angefragt	nein	ja
SDC Ship Design & Consult GmbH	Michael Wächter	Zulieferer	angefragt	ja	ja
Tamsen Maritim GmbH	Michael Wächter	Werft	angefragt	ja	nein
RedoCell GmbH	Dmitrij Madlener	Werft	angefragt	ja	nein

9. Laufzeit und Beantragte Zuwendung (bZ)

Das Projekt ist auf 36 Monate angelegt. Da es das Schutzproblem aus einer ganzheitlichen Perspektive angeht und die Wechselwirkungen zwischen Schutz und Kontrolle untersucht.

Beantragte Zuwendung (bZ) FE 1 (DLR, Institut für Maritime Energiesysteme) in EUR

Beantragte Zuwendung (bZ)	1. Jahr	2. Jahr	3. Jahr	Summe
A.1 Bruttoentgelte für wiss.-techn. Personal	66.300,00	66.300,00	66.300,00	198.900,00
A.2 Bruttoentgelte für übriges Fachpersonal	0,00	0,00	0,00	0,00
A.3 Bruttoentgelte für Hilfskräfte	0,00	0,00	0,00	0,00
A.4 Pauschale für Personalausgaben (6 %)	4000,00	4000,00	4000,00	12000,00
B. Ausgaben für Gerätebeschaffung	0,00	0,00	0,00	0,00
C. Ausgaben für Leistungen Dritter	0,00	0,00	0,00	0,00
D. Pauschale für Sonstige Ausgaben (20 %)	13.000,00	13.000,00	13.000,00	39.000,00
Summe der bZ	83.300,00	83.300,00	83.300,00	249.900,00

Beantragte Zuwendung (bZ) FE 2 (TU Braunschweig, Elenia) in EUR

Beantragte Zuwendung (bZ)	1. Jahr	2. Jahr	3. Jahr	Summe
A.1 Bruttoentgelte für wiss.-techn. Personal	81.600,00	81.600,00	81.600,00	244.800,00
A.2 Bruttoentgelte für übriges Fachpersonal	0,00	0,00	0,00	0,00
A.3 Bruttoentgelte für Hilfskräfte	0,00	0,00	0,00	0,00
A.4 Pauschale für Personalausgaben (6 %)	0,00	0,00	0,00	0,00
B. Ausgaben für Gerätebeschaffung	3.000,00	0,00	0,00	3.000,00
C. Ausgaben für Leistungen Dritter	0,00	0,00	0,00	0,00
D. Pauschale für Sonstige Ausgaben (20 %)	700,00	700,00	700,00	2.100,00
Summe der bZ	85.300,00	82.300,00	82.300,00	249.900,00

Beantragte Zuwendung (bZ) FE 3 (TU Braunschweig, EMV) in EUR

Beantragte Zuwendung (bZ)	1. Jahr	2. Jahr	3. Jahr	Summe
A.1 Bruttoentgelte für wiss.-techn. Personal	80.700,00	80.700,00	80.700,00	242.100,00
A.2 Bruttoentgelte für übriges Fachpersonal	0,00	0,00	0,00	0,00
A.3 Bruttoentgelte für Hilfskräfte	0,00	0,00	0,00	0,00
A.4 Pauschale für Personalausgaben (6 %)	0,00	0,00	0,00	0,00
B. Ausgaben für Gerätebeschaffung	4.850,00	0,00	0,00	4.850,00
C. Ausgaben für Leistungen Dritter	0,00	0,00	0,00	0,00
D. Pauschale für Sonstige Ausgaben (20 %)	1.000,00	1.000,00	1.000,00	3.000,00
Summe der bZ	86.550,00	81.700,00	81.700,00	249.950,00