

# DC-Netze - Ein ganzheitlicher Systementwurf für verschiedene Schiffstypen

DC-grids - A holistic system design for different types of ships

<https://doi.org/10.15480/882.4392>

**Timon S. Hartwich**<sup>1</sup> M. Sc.  <https://orcid.org/0000-0003-3588-948X>;

**Dipl.-Ing. Kurt Sommer**<sup>2</sup>  <https://orcid.org/0000-0003-0446-1931>;

**Prof. Dr.-Ing. Thorsten A. Kern**<sup>1</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-3336-4383>;

**Laura Haffner**<sup>3</sup> M. Sc.

<sup>1</sup> Technische Universität Hamburg, Institut für Mechatronik im Maschinenbau, 21073 Hamburg

<sup>2</sup> Meyer Werft GmbH & Co. KG, 26871 Papenburg

<sup>3</sup> Siemens Energy Global GmbH & Co. KG, 20099 Hamburg

*Ein Vortrag zu diesem Artikel wurde auf der 116. Hauptversammlung der STG im November 2021 in Lübeck gehalten.*

**Summary.** The shipping industry is responsible for approx. 3% of global CO<sub>2</sub> emissions. The IMO has set a target to reduce them by 40% by 2030. Efficiency gains and options to easily integrate zero-emission energy sources into the ship's energy system must be achieved to reach that goal. A key element is the conversion of on-board power systems to direct current (DC). Modern AC shipboard grids contain numerous power converters for efficient part-load operation of engines. Alternative energy sources such as fuel cells, batteries or photovoltaics are based on DC as well. Coupling all these components in a DC grid avoids the numerous conversion losses of an AC grid. To integrate such a meshed DC grid on a wide variety of ship types, numerous issues need to be investigated. An insight into two research projects is given. Conceptual questions concerning operating voltages, grounding and protection concepts, parallel operation of converters and batteries, power flow control and grid control as well as the grid structure of medium and low voltage grids are investigated experimentally and simulatively. To enable cost-effective applicability to many ship types, the power system is modularized with as many common parts as possible to account for different requirements. The regulatory framework is already being taken into account in the research project. The design of the energy system will be subject to an overall system optimization, which determines a cost-optimal operation and structure of the energy system.

**Zusammenfassung.** Die Schifffahrt verantwortet ca. 3 % der globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen. Die IMO hat sich das Ziel gesetzt, diese bis 2030 um 40 % zu senken. Um dieses Ziel zu erreichen, müssen Effizienzgewinne erlangt und Möglichkeiten geschaffen werden, emissionsfreie Energiequellen möglichst einfach in das Schiffsenergiesystem zu integrieren. Ein Schlüsselement ist die Umstellung der Bordnetze auf Gleichspannung (DC). In modernen AC-Schiffsnetzen sind zahlreiche Stromrichter zum effizienten Teillastbetrieb von Motoren verbaut. Alternative Energiequellen wie Brennstoffzellen, Batterien oder Photovoltaik basieren ebenfalls auf DC. Die Kopplung all dieser Komponenten in einem DC-Netz vermeidet die zahlreichen verlustbehafteten Wandlungen eines AC-Netzes. Um solch ein vermaschtes DC-Netz auf verschiedensten Schiffstypen zu integrieren, sind zahlreiche Fragestellungen zu untersuchen. Es wird ein Einblick in zwei Forschungsprojekte gegeben. Konzeptionelle Fragestellungen bzgl. Betriebsspannungen, Erdungs- und Schutzkonzepten, Parallelbetrieb von Umrichtern und Batterien, Lastflusssteuerung und Netzregelung sowie der Netzstruktur von Mittel- und Niederspannungsnetzen werden experimentell und simulativ untersucht. Um eine kostengünstige Anwendbarkeit auf vielen Schiffstypen zu ermöglichen, wird zur Berücksichtigung der unterschiedlichen Anforderungen eine Modularisierung des Energiesystems mit möglichst vielen Gleichteilen vorgenommen. Dabei werden regulatorische Rahmenbedingungen bereits in den Forschungsprojekten berücksichtigt und die Ausgestaltung des Energiesystems einer Gesamtsystemoptimierung unterworfen, die einen kostenoptimalen Betrieb und Aufbau des Energiesystems ermittelt.

## 1 Einführung

Die Bekämpfung des anthropogenen Klimawandels und der dazu erforderliche Wandel zu einer regenerativen Energieversorgung stellen die vielleicht größte politische, aber auch technische Herausforderung der heutigen Zeit dar [1]. Nicht grundlos befindet sich diese Thematik in der neueren Zeit im verstärkten Fokus der gesellschaftlichen Debatte. Für eine vollständige Energiewende muss die Energieversorgung in sämtlichen Sektoren auf nachhaltige Energiequellen umgestellt werden. Trotz großer Anstrengungen werden bisher weniger als 15 % des weltweiten Primärenergiebedarfs durch regenerativen Energieträger gedeckt [2]. Von besonderer Herausforderung ist der Transportsektor. Dort werden besonders hohe Anforderungen an Energiemengen und Leistungen bei gleichzeitig kleinem Raum und hoher zeitlicher Verfügbarkeit gestellt.

Der Transportsektor ist für ca. 25 % der globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen verantwortlich [3], bzw. für 16 % der Gesamtemission [4]. Die globale Seeschifffahrt emittierte ca. 1,08 Gt CO<sub>2</sub> und ist damit als ein großer Emittent für ca. 3 % der weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen verantwortlich [5]. Sollten keine Emissionsminderungen umgesetzt werden, sehen Prognosen eine Steigerung der Emissionen von 150-250 % bis 2050 aufgrund einer erwarteten Verdreifachung des Welthandelsvolumens [6]. Aus diesem Grund hat die Internationale Maritime Organisation (IMO) den Reedern das Ziel gesetzt, die Emissionen der Schifffahrt bis 2030 um 40 % im Vergleich zu 2008 zu senken [7]. Insbesondere die Reedereien aber auch die Werften sehen sich daher einem starken Handlungsdruck ausgesetzt.

In [6] werden verschiedenste Maßnahmen gegenübergestellt, um den Treibhausgasausstoß von Schiffen zu reduzieren. Diese reichen vom Rumpfdesign über Betriebsoptimierungen bis hin zu alternativen Brennstoffen und neuartigen Energiesystemen. Lediglich alternative Brennstoffe sind eine Maßnahme, die für sich genommen den CO<sub>2</sub>-Ausstoß um bis zu 80% senken kann. Da diese alternativen Brennstoffe in naher Zukunft nicht in ausreichender Menge bereitgestellt werden können, müssen alle Stellschrauben des Energiesystems "Schiff" bemüht werden. Vielversprechende Potentiale liegen im Bereich der Schiffenergiesysteme. Insbesondere hybriden Antriebssystemen und der Steigerung der Komponenten- und Systemeffizienz, sowie einer optimierten Wärmerückgewinnung werden als Einzelmaßnahmen Potentiale von bis zu 20% Emissionsminderung zugeschrieben [6]. Auch die Integration alternativer Energiequellen wie Brennstoffzellen, Photovoltaiksystemen, Windenergie oder auch Batteriespeichern lässt sich hier verorten. Diese Maßnahmen sind hervorzuheben, da diese direkt an der Quelle der CO<sub>2</sub>-Emissionen, der Energiebereitstellung, ansetzen. In den letzten Jahren sind Gleichspannungsnetze (DC-Netze) auf Schiffen als weitere Maßnahme stärker in den Fokus der Wissenschaft gerückt [8 bis 12].

DC-Netze waren in den historischen Anfängen der elektrischen Energieversorgung die bevorzugte Form der Energieverteilung. Dennoch setzten sich die Vorteile der Wechselstromsysteme (AC-Systeme) in der Energieübertragung durch. Diese liegen vor allem in der leichten und effizienten Umformung zwischen verschiedenen Spannungsebenen und einer damit effizienten Energieübertragung über längere Entfernungen, einer einfacheren Abschaltung von Fehlerströmen aber auch dem Betrieb von großen Maschinen durch Drehstrommotoren. Aus diesem Grund verschwanden DC-Systeme immer stärker von der Bildfläche sowohl an Land als auch auf Schiffen.

Fortschritte in der Leistungselektronik in den letzten Jahren und steigende Energie- bzw. Emissionskosten führen dazu, dass eine reine AC-Versorgung immer weniger mit den Anforderungen an Effizienz und Integrationsfähigkeit alternativer Energiequellen mithalten kann. Werden mechanische Lasten, die einen Großteils des Leistungsbedarfs stellen, in Teillast betrieben, liegt die effizienteste Art der Leistungsreduktion in einer Drehzahlreduktion des Motors. In AC-Netzen sind die Drehstrommotoren jedoch an die starre Netzfrequenz gebunden. Drehzahländerungen sind damit nur über leistungselektronische Frequenzumrichter möglich, die wiederum DC benötigen. Dies gilt analog für die verbrennungsmotorisch angetriebenen Generatoren, die in einem AC-Netz so an einem wirkungsgradoptimierten Betrieb gehindert werden. Der zweite entscheidende Faktor liegt darin, dass alternative Energiequellen wie Brennstoffzellen, Batterien oder Photovoltaik inhärente DC-Komponenten sind, deren Einbindung in ein AC-Netz komplex ist. Ferner liegen bereits in heutigen AC-Netzen viele DC-Verbraucher vor.

Mit Hilfe von DC-Netzen ist es möglich, die Anzahl der Wandlungen zwischen den verschiedenen Spannungsformen stark zu reduzieren. Aus diesem Grund rücken DC-Netze immer stärker in den Fokus der Wissenschaft [10 bis 12]. Dadurch, dass leistungselektronische Komponenten in den letzten Jahren durch steigende Stückzahlen signifikant günstiger und leistungsfähiger geworden sind [13], stellen DC-Netze perspektivisch die günstigere Form der elektrischen Energiebereitstellung für Schiffe dar. In ersten, teilweise auf DC basierenden Schiffsneubauten konnten bereits Gesamt-Effizienzsteigerung von ca. 20 % erreicht werden [14]. Insbesondere in Schiffen mit hohem variablen elektrischen Leistungsbedarf, wie zum Beispiel Kreuzfahrtschiffen, aber auch Fähren oder Arbeitsschiffen, bieten sich DC-Netze an. Dennoch ist die Transformation hin zu DC-Netzen mit zahlreichen Herausforderungen verbunden, da größere DC-Netze mit einer Vielzahl von Komponenten herausfordernd sind.

In diesem Artikel wird der Entwurf von DC-Netzen und die zugehörigen Forschungsprojekte vorgestellt. Diese verfolgen das Ziel, DC-Verteilnetze und Antriebsnetze an Bord von Schiffen zu entwickeln. Das Forschungsprojekt „Sustainable DC-Systems“ (*SuSy*) beschäftigt sich mit der Niederspannungsverteilung. Ein Fokus liegt auf der Entwicklung eines vereinfachten Netzes mit einer Vielzahl an Verbrauchern und einem möglichst schlanken Energiesystem mit wenigen parallel vorliegenden Systemen. Gleichzeitig soll eine Schutz-Kleinspannungsebene zur Versorgung von Kleinverbrauchern wie Beleuchtung oder Kabinen entwickelt werden. Der Fokus liegt hierbei auf einer Anwendbarkeit auf möglichst vielen verschiedenen Schiffstypen, da erwartet wird, nur so eine kosteneffiziente Lösung durch möglichst viele Gleichteile entwickeln zu können. Das Forschungsprojekt „Medium Voltage Direct Current for Ships“ (*MVDC4S*) beschäftigt sich mit der Mittelspannungsverteilung der Antriebe von großen Schiffen und betrachtet insbesondere die Hardwareentwicklung der erforderlichen DC-Schlüsselkomponenten.

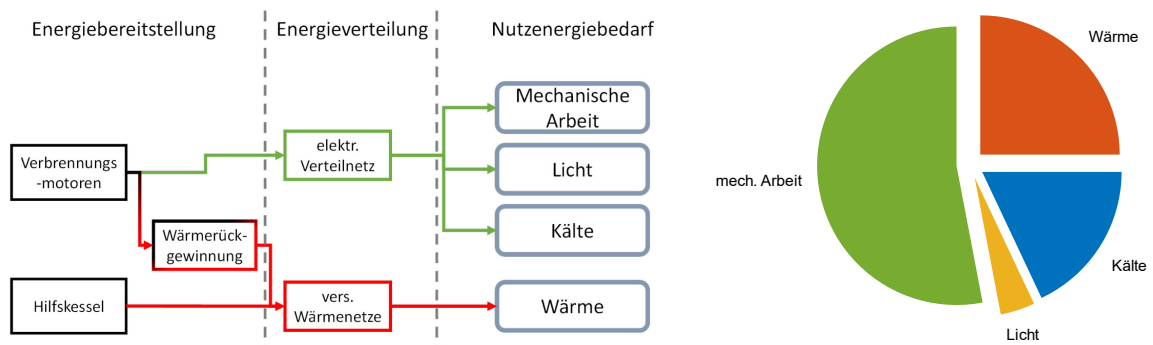
Ziel dieses Artikels ist, anderen Wissenschaftlern einen umfangreichen Einblick in die relevanten Fragestellungen der Netzentwicklung zu geben und erste Ergebnisse zu präsentieren. Dazu werden in Kapitel 2 bisherige Schiffenergiesysteme und deren Energieverteilungskonzepte vorgestellt. Es wird das Prinzip der dezentralen Energiebereitstellung motiviert, die Vorteile und Herausforderungen der DC-Netze genannt sowie das Konzept der Sektorenkopplung eingeführt. Anschließend werden in Kapitel 3 die Forschungsprojekte vorgestellt. Nach dem Vorgehen werden die Forschungsziele und der Forschungsansatz aufgezeigt, sowie die beteiligten Labore vorgestellt. In Kapitel 4 werden die zahlreichen wissenschaftlichen Fragestellungen, die beantwortet werden sollen, motiviert. Es folgt in Kapitel 5 die Vorstellung der Gesamtsystemoptimierung mit deren Hilfe ein kostenoptimales Energiesystem ermittelt werden kann. Es schließt die Zusammenfassung in Kapitel 6.

## 2 Schiffenergiesysteme im Wandel der Technologien

In diesem Kapitel wird der Stand der Technik der Schiffenergiesysteme und deren aktueller Aufbau vorgestellt. Schiffenergiesysteme zeichnen sich durch ein Zusammenspiel verschiedener Energieformen aus. Ziel ist es, Verständnis für die grundlegenden Zusammenhänge bzgl. der Entwicklung von DC-Netzen zu schaffen. Anschließend wird ein Einblick in den Stand der Wissenschaft und Technik der DC-Netze gegeben und das Konzept der Sektorenkopplung auf Schiffen motiviert. An dieser Stelle sei bereits vorweggenommen, dass Kreuzfahrtschiffe aufgrund ihrer komplexen Netze als Referenzschiffe dienen.

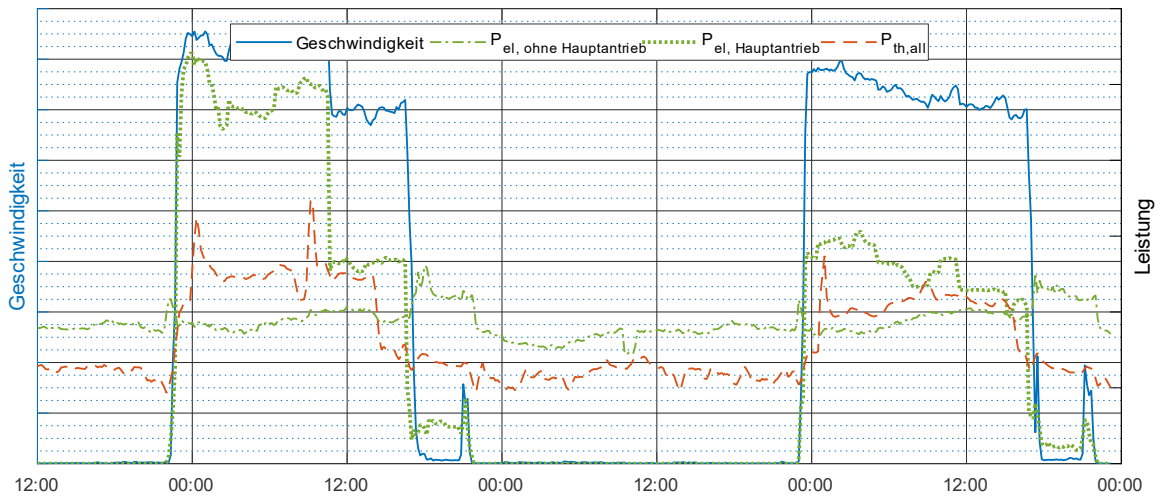
### 2.1 Schiffenergiesysteme als komplexes Zusammenspiel verschiedener Energieformen

Um die Energieeffizienz eines Schiffes zu erhöhen und damit die CO<sub>2</sub>-Emissionen zu mindern, muss das Schiff als ein ganzheitliches Energiesystem betrachtet werden. Ein alleiniger Fokus auf einzelne Teile des Energiesystems kann Einsparungen an andere Stelle wieder zunichtemachen. Um eine hohe Treibstoffausnutzung und damit geringe Emissionen zu erreichen, wird traditionell ein möglichst großer Teil der Abwärme der Hauptmaschinen genutzt, so kann ca. 75 % des Wärmebedarf damit gedeckt werden [15]. Wird nun in zukünftigen Energiesystemen verstärkt auf alternative Energiequellen mit höherem Wirkungsgrad und geringeren Abwärmeleistungen und -temperaturen gesetzt, kann dies dazu führen, dass Einsparungen im elektrischen Netz beispielsweise von unberücksichtigten Wärmebedarfen aufgezehrt werden. Daher muss das gesamte Schiffenergiesystem betrachtet werden. Zweckmäßig ist, das Energiesystem seitens des Verbrauchs aufzuschlüsseln, da dieser als weitestgehend konstant und unabhängig von der Form der Energiebereitstellung angesehen werden kann. Abbildung 1 zeigt, wie der Nutzenergiebedarf eines Schiffes aus konventionellen Energiequellen prinzipiell bereitgestellt wird. Je nach Größe der Schiffe liegen verschieden ausgestaltete Wärmenetze wie Dampfsystem, Heizwassersystem und HVAC-Systeme für Kühlung und Nacherwärmung, sowie ggf. Trinkwassersysteme in nennenswerter Ausdehnung vor. Das rechte Diagramm verdeutlicht typische Anteile der erforderlichen Energiemengen eines Kreuzfahrtschiffs. Mechanische Energie ist die stark dominierende Energieform, die nicht nur für den Antrieb, sondern auch für die zahlreichen Lüfter und andere Motoren benötigt wird. Der Bedarf an Wärme und Kälte variiert je nach Einsatzort und Passagieranzahl. Die Aufteilung für Frachtschiffe weicht hiervon geringfügig ab. Dort dominiert der Anteil der mechanischen Arbeit mit ca. 80 % stärker [16]. Die thermodynamisch motivierte Aufteilung auf diese vier Energieformen ermöglicht, die Gesamtenergiebereitstellung so zu optimieren, dass direkt die Wandelbarkeit der verschiedenen Energieformen über das Konzept der *Exergie* nach [15, 16] abgebildet wird.



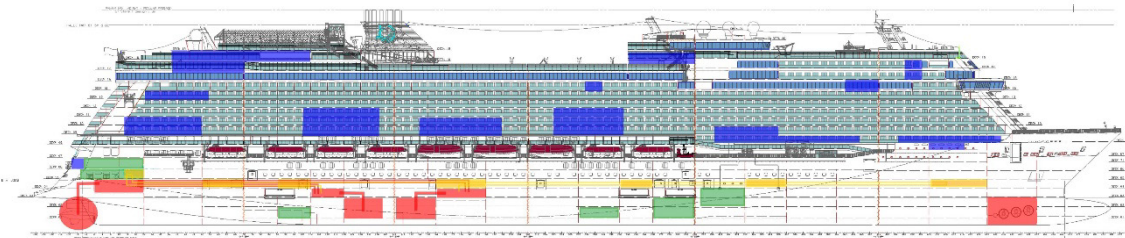
**Abb. 1. Energieverteilungskonzept und Aufteilung des Energiebedarfs eines Kreuzfahrtschiffs, eigene Berechnungen**

Als weitere Randbedingung zur Optimierung der Energiesysteme ist die zeitliche und örtliche Ausgestaltung des Energiebedarfs zu berücksichtigen. Wie Abbildung 2 verdeutlicht, muss im elektrischen Energiesystem zwischen Grund- und Spitzenlast unterschieden werden. Je nachdem, wie stark diese voneinander abweichen, bieten sich verschiedene Formen der Energiebereitstellung an; siehe hierzu Kapitel 5. Bei Kreuzfahrtschiffen ist das diesel-elektrische POD-Antriebskonzept besonders sinnvoll. Dort ermöglichen meist vier mittelgroße Generatoren eine flexible und redundante Energiebereitstellung auch für die zahlreichen anderen Verbraucher bei gleichzeitig verringertem Ausfallrisiko. Auf Frachtschiffen hingegen ist bei kontinuierlichem Fahrtprofil in der Regel das mechanische Direktantriebskonzept aufgrund der geringeren Wandlungsverluste die bessere Wahl. Ist nur für besonders kurze Zeitpunkte eine sehr hohe Spitzenleistung, wie üblicherweise auf Kriegsschiffen, erforderlich, sind andere Faktoren wie Lastaufschaltvermögen, Gewicht und Robustheit Entscheidungskriterien und die Effizienz tritt in den Hintergrund, sodass sich hier PTI-/PTO-Konzepte in verschiedensten Anordnungen unter Zuhilfenahme von Gasturbinen finden lassen. In diesem Artikel liegt der Fokus auf Schiffen mit diskontinuierlichem Fahrtprofil wie Passagierschiffen und Arbeitsschiffen sowie Schiffen mit hohem elektrischen Leistungsbedarf wie großen Containerschiffen, um ein möglichst effizientes und kostengünstiges Energiesystem zu schaffen.



**Abb. 2. Gemessene elektrische und thermische Leistungsbedarfe und Geschwindigkeit eines Kreuzfahrtschiffs**

In der örtlichen Ausgestaltung zeigt sich in Abbildung 3 die weite Verteilung der Lastzentren über ein Kreuzfahrtschiff. Hierfür sind viele verschiedene elektrische und thermische Systeme erforderlich, die die Systemkomplexität steigern, Bauvolumen binden und einen Gewichtseintrag bedeuten. Die Aufgaben der verschiedenen Systeme lassen sich wieder auf die Bereitstellung der vier verschiedenen Formen des Nutzenergiebedarfs reduzieren. Die Bereitstellung von Wärme und Kälte bedeutet einen besonders hohen Bauaufwand, da die Rohrverlegung komplexer als die Kabelverlegung für elektrische Verbraucher ist. Dennoch ist, siehe Kapitel 2.4, aus energetischen Gründen eine Verteilung der rückgewonnenen Energie mit dem verbundenen Verrohrungsaufwand über das gesamte Schiff günstiger. Diese Form der Wärme- und Kälteverteilung sollte im zukünftigen Schiffsdesign überdacht werden, da durch dezentrale Wärme- und Kältebereitstellungskonzepte der Gesamtaufwand reduziert werden kann. Diese dezentralen Bereitstellungskonzepte nutzen dabei im Idealfall die Sektorenkopplung, indem Abwärmequellen aus dem elektrischen Netz verwendet werden und so die vorhandene Energie bestmöglich genutzt werden kann.



**Abb. 3 Verteilung der Großverbraucher auf einem Kreuzfahrtschiff. Rot: elektrische Großverbraucher mit eigener MS-Versorgung, Blau: Klimaräume, Grün: Große Wärmeverbraucher, Gelb: Mittelspannungsringleitung**

## 2.2 Status Quo elektrischer Bordnetze

Elektrische Bordnetze unterscheiden sich je nach Schifftyp und -größe deutlich voneinander. Die Anzahl der Verbraucher und die Größe des elektrischen Leistungsbedarfs sowie dessen örtliche und zeitliche Verteilung bestimmen die Struktur des Netzes maßgeblich. Üblich sind 3-phasige 60 Hz Systeme mit verschiedenen Spannungsniveaus von 400 V, 690 V, 6,6 kV oder 11 kV je nach Leistungsbedarf. Je nach Ausdehnung und Sicherheitsanforderungen kommen IT, TN-S oder TT-Erdungssysteme zum Einsatz, sowie lokale 24 V-Systeme für die Automation und redundante Notstromsysteme für sicherheitsrelevante Verbraucher. Dies führt dazu, dass auf großen Kreuzfahrtschiffen bis zu sieben verschiedenartige elektrische Systeme parallel vorliegen.

Abbildung 4 zeigt den typischen Aufbau des elektrischen Energiesystems eines Kreuzfahrtschiffs. Vier Generatoren von meist 10-20 MVA Leistung speisen in zwei redundante Mittelspannungsschalttafeln (MS-ST). Von dort werden die Großverbraucher, wie Bugstrahler, Kompressionskältemaschinen, Maschinenraumtrafos und die doppelt gespeisten POD-Antriebe über eigene 11 kV-Leitungen versorgt. Die großen Antriebsmotoren und die Motoren der Kompressionskältemaschinen sind für einen drehzahloptimierten Betrieb über Frequenzumrichter gekoppelt. Eine im Normalbetrieb geöffnete Mittelspannungs-Ringleitung versorgt die Feuerzonen. Die Maschinenräume werden über mehrere Transformatoren mit 690 V versorgt. In den Feuerzonen, die über Transformatoren mit ca. 2 MVA angebunden sind, werden die Decks über vertikale Busbar-Systeme angeschlossen. Für die größeren Verbraucher wie Lüftungsanlagen in den Klimaräumen, deren frequenzumrichtergekoppelte Motoren Leistungen von bis zu 150 kW aufweisen können, liegt ein 690 V-System vor. Die anderen Verbraucher werden über die backbord- und steuerbordseitigen Busbars versorgt. Zusammen mit der unterbrechungsfreien Stromversorgung (USV) für den Notbetrieb liegen in jeder Feuerzone vier vertikale Busbarsysteme vor. Ferner befindet sich ein Notdiesel auf einem

der oberen Decks, der die Notschalttafeln zur Versorgung der SOLAS-Verbraucher und des USV-Systems speist. Sollen DC-Erzeuger wie Batterien integriert werden, sind Frequenzumrichter zur Kopplung an das AC-Netz nötig.

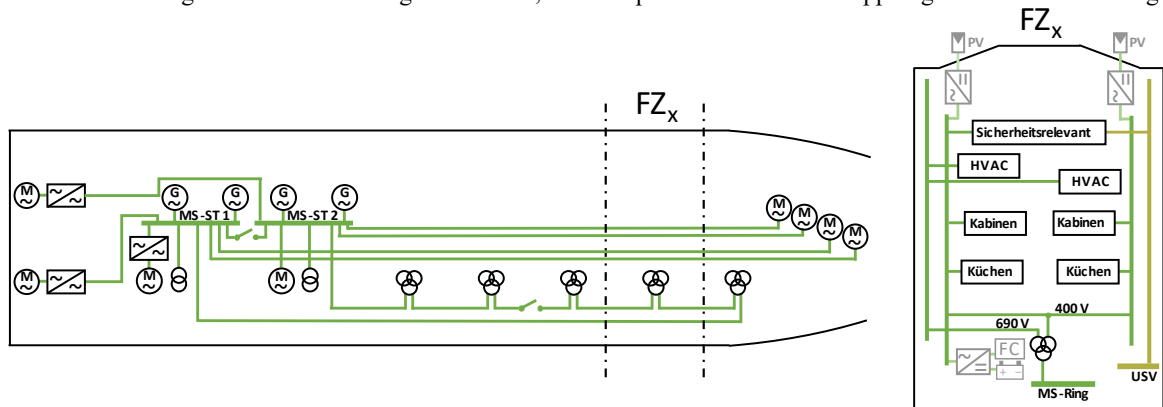


Abb. 4 Klassische Hauptverteilung eines Kreuzfahrtschiffs mit AC-Architektur mit teilweisen DC-Subsystemen

Auf anderen Schiffstypen ist die Anzahl der parallelen elektrischen Netze zwar geringer und diese sind einfacher aufgebaut; dennoch existieren bisher zwischen den Schiffstypen wenige einheitliche Lösungen. Üblicherweise werden die elektrischen Systeme für die verschiedenen Schiffstypen individuell gestaltet und orientieren sich an bereits bestehenden Umsetzungen. Daraus resultiert, dass Gleichteile nur eingeschränkt schiffstypübergreifend verwendet werden können, schiffstyp- oder gar werftübergreifende Gleichteilstrategien nur rudimentär ausgebildet sind und die maritimen Energiesysteme daher höhere Kosten als landgestützte Energiesysteme aufweisen. Unter diesen Rahmenbedingungen ist die Entwicklung neuartiger Netzstrukturen herausfordernd.

Die elektrischen Netze von Kreuzfahrtschiffen werden als Referenz für die Entwicklung der DC-Netze verwendet. Die Anwendbarkeit auf andere Schiffstypen wird dadurch gewährleistet, dass ein modularer Ansatz gewählt wird und das elektrische Energiesystem in auf verschiedenen Schiffen vorliegende gleichartige Bereiche aufgeteilt wird. Dieser modulare Ansatz berücksichtigt im Besonderen Schiffe mit einfach aufgebauten Netzen wie kleine Schiffe oder Frachtschiffe und wird in Kapitel 4.3 vorgestellt. Es kann davon ausgegangen werden, dass die strengeren SOLAS- und Klassifikationsanforderungen, insbesondere bei LNG-betriebenen Kreuzfahrtschiffen mit Brennstoffen mit niedrigem Flammpunkt dazu führen, dass die erforderlichen Netzstrukturen für Fracht- und Arbeitsschiffe mit den für Kreuzfahrtschiffe entwickelten Lösungen abgebildet werden können.

### 2.3 Gleichspannungsnetze und dezentrale Energieversorgung

Wie bereits in Kapitel 1 dargelegt, gewinnen DC-Netze in der Energieversorgung immer stärker an Bedeutung, da Komponentenkosten stark gesunken sind und die Wirkungsgrade zunehmend steigen. Die Vorteile einer DC-Netzstruktur lassen sich nach [14] und [11] in *erhöhte Stabilität* und *Qualität der Stromversorgung* sowie *ökonomische* und *ökologische Vorteile* einteilen, die sich teils gegenseitig bedingen. Wesentliche Vorteile sind nach [11, 14, 17]:

- Drehzahlvariabler Hauptmaschinenbetrieb durch Netzfrequenzentkopplung für wirkungsgradoptimierte Nutzung des gesamten Motorenkennfelds, Kraftstoffeinsparungen bis 20% und Wartungskostenreduktion
- Reduktion der Wandlungsschritte in der Energiebereitstellungskette
- Gewichts- und Platzeinsparungen von bis zu 30% durch Wegfall von Niederfrequenztransformatoren, der Verwendung kleinerer schnelllaufender Generatoren und kleinerer Schalttafeln
- Weniger komplexe Motorsteuergeräte erlauben vereinfachte Integration drehzahlvariabler Motoren, da in den Stromrichtern auf den in AC-Netzen erforderlichen Zwischenkreis verzichtet werden kann
- Vermeidung reaktiver Leistungsflüsse und damit verbundener Spannungsabfälle
- Höhere Übertragungseffizienz [18]
- Einfachere Fehlerstrombegrenzung durch Leistungselektronik, daher geringere Anforderungen an Kurzschlussfestigkeit
- Reduktion des Verkabelungsaufwands und Erhöhung der Systemsicherheit durch Bus-Systemlayouts
- Einfachere Integration von DC-Komponenten wie Batterien, Brennstoffzellen und Photovoltaiksystemen

Die Herausforderungen von DC-Netzen lassen sich auf die folgenden Punkte zusammenfassen:

- Höhere Investitionskosten, da neuartige Technik
- Geringe Komponentenverfügbarkeit, da noch viel Forschungs- und Entwicklungsarbeit notwendig ist
- Hoher Regelungsaufwand zur Lastflussregelung und Netzstabilisierung zahlreicher Stromrichter [19, 20]
- Steile Stromflanken der Kurzschlussströme, die nur vom geringen resistiven Widerstand des Netzes begrenzt werden und damit schnelle Stromabschaltungen und größere Bauteile dafür erfordern [18]
- Im Vergleich zu AC-Netze haben Kurzschlüsse wesentlich großflächigere Netzauswirkungen [18]
- Wechselrichter erforderlich, da effiziente Motoren Wechselstrom benötigen [18]
- Geringe Netzverluste erfordern hohe Spannungen. Spannungen im Bereich von 20 kV sind jedoch stark herausfordernd für leistungselektronische Komponenten sowie Schalt- und Schutzeinrichtungen [18]

- Berücksichtigung von Oberschwingungen und Harmonischen in der Auslegung der Konverter nötig
- Entwicklung von Convertern und Schutzeinrichtungen für Mittelspannung erforderlich [18]

Aus diesen Charakteristiken ergibt sich, dass DC-Netze besonders bei diskontinuierlichen Lastprofilen oder vielen DC-Quellen wie Batterien oder Brennstoffzellen vorteilhaft sind. Je höher ferner der Anteil der Stromrichter ist, desto sinnvoller ist es, auf DC-Netze umzustellen [18]. Neben Passagierschiffen werden Spezialschiffe wie z.B. Kabelleger als besonders aussichtsreiche Anwendungsfälle erachtet. Lediglich Langstrecken-Frachtschiffe weisen geringere Potentiale auf, da das mechanische Direktantriebskonzept bereits sehr hohe Gesamtwirkungsgrade besitzt. Es ist ersichtlich, dass die DC-Netze zahlreiche technische Vorteile aufweisen. Es wird jedoch auch deutlich, dass großer Forschungsbedarf besteht, um die Herausforderungen, die DC-Netze mit sich bringen, zu meistern.

## 2.4 Sektorenkopplung in Schiffsnetzen

Sektorenkopplung bezeichnet klassischerweise die Vernetzung der verschiedenen Sektoren der Energiewirtschaft wie Elektrizität, Verkehr, Wärmeversorgung, Kälteversorgung und Industrie, um sie gemeinsam mit erneuerbaren Energien zu versorgen und deren Schwankungen zu puffern, die Flexibilität zu erhöhen sowie Synergieeffekte zwischen den Sektoren zu nutzen [21]. An Bord von Schiffen kann, wie in Kapitel 2.1 am Beispiel des Kreuzfahrtschiffs gezeigt, ein Bedarf von bis zu 25 % an thermischer Energie vorliegen [15]. Aus diesem Grund ist in konventionellen Energiesystemen die Abwärmerückgewinnung von besonderer Relevanz – u.a. in Form von Abhitze-dampferzeugern und der Nutzung der Energie der Hauptmaschinen-Kühlkreisläufe. In regenerativ gespeisten Schiffenergiesystemen mit geringeren Abwärmemengen müssen neue Wege der Bereitstellung dieser thermischen Energiebedarfe gefunden werden. Eine direkt regenerative Bereitstellung, z.B. durch Solarthermie ist nur begrenzt gewinnbringend umsetzbar [22]. Genauso ist eine direkte Wärmebereitstellung aus der knappen Primärenergie nicht zielführend. Daher wird ein Ansatz verfolgt, der dem Prinzip der Sektorenkopplung zugeordnet werden kann:

Ziel ist, durch die Nutzung von DC-Netzen nicht nur die elektrischen Netze zu vereinfachen, sondern auch die thermischen Energiesysteme in ihrem Umfang zu reduzieren, da diese einen besonders hohen Installationsaufwand aufweisen und sehr bauraumintensiv sind. Dazu wird das Konzept der dezentralen Abwärmenutzung verfolgt. Grundlage für das Konzept der dezentralen Abwärmenutzung bildet die dezentrale Installation von Brennstoffzellen in der Nähe der Wärmeverbraucher und die Schaffung kleinerer dezentraler Wärmenetze. Bei Hochtemperatur-PEM Brennstoffzelle kann diese bei bis zu 120 °C, üblicherweise 100 °C, genutzt werden, womit sich Nutzungsgrade von bis zu 75 % realisieren lassen [23, 24]. Für die Abdeckung der elektrischen Grundlast, die auf größeren Kreuzfahrtschiffen 5-10 MW beträgt, sind ferner Festoxidbrennstoffzellen aussichtsreich, die Wirkungsgrade von ca. 60 % und Nutzungsgrade von bis zu 85 % zu Lasten einer verschwindenden Dynamik ermöglichen [24, 25].

## 3 Entwicklungsprozess der Gleichspannungsnetze

An dieser Stelle wird der angestrebte Entwicklungsprozess für DC-Netze erläutert. Zuerst werden dabei die verschiedenen Systemgrenzen erläutert und die Forschungsziele motiviert. Anschließend werden das Vorgehen und die beteiligten Projektpartner vorgestellt. Abschließend wird auf die angestrebten Hardware-Versuche und die daran beteiligten Labore eingegangen, mit denen bereits in diesem frühen Stadium validierte Konzepte entwickelt, der Entwicklungsprozess beschleunigt und die Notwendigkeit teurer Prototypen reduziert werden soll.

Wie bereits ausgeführt, sollen die entwickelten Netzstrukturen auf möglichst vielen Schiffstypen anwendbar sein. Es wird daher angestrebt, die Netze für die komplexen Netzstrukturen von Kreuzfahrtschiffen zu entwickeln und sie in ihrer Komplexität schrittweise zu reduzieren, um sie auf anderen Schiffstypen anwenden zu können. Da ein Großteil der Herausforderungen in der DC-Netzentwicklung in der Netzgröße, dem Vermaschungsgrad und der Anzahl der Netzteilnehmer liegen, sind die Lösungen mit geringen Anpassungen auf andere oder kleinere Schiffstypen zu übertragen. Der hierfür verfolgte modulare Ansatz wird in Kapitel 4.3 erläutert. Abbildung 5 zeigt die verschiedenen Bereiche des elektrischen Netzes eines Kreuzfahrtschiffs.

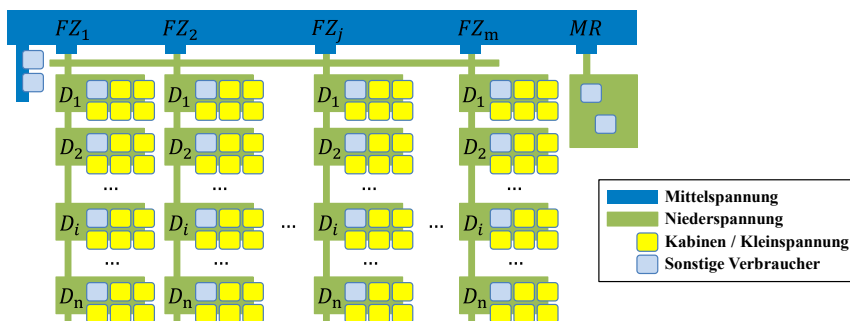


Abb. 5 Forschungsbereiche der Gleichspannungsnetze

Die Spannungsniveaus bzw. Farben lassen sich den verschiedenen Forschungsprojekten zuordnen. Es wird die übliche horizontale Aufteilung in  $m$  Feuerzonen ( $FZ_j$ ) mit  $n$  zugehörigen Decks ( $D_i$ ) sowie die gesonderten Maschinenräume ( $MR$ ) berücksichtigt. In den vier verschiedenen Bereichen sind unterschiedliche

Forschungsfragestellungen zu beantworten. Das Forschungsprojekt *Medium Voltage Direct Current for Ships (MVDC4S)* befasst sich mit dem Mittelspannungsnetz (blau). Das Projekt *EcoCab* mit neuartigen Kabinenkonzepten auch unter Verwendung einer Schutz-Kleinspannung (gelb). Eine besondere Rolle kommt dem *Sustainable DC-Systems (SuSy)*-Projekt der Niederspannung zur Kopplung der anderen Systemebenen zu (grün). Für Verbraucher in verschiedenen Spannungsniveaus werden Anbindungskonzepte erarbeitet. Dieser Artikel fokussiert sich im Besonderen auf das *SuSy*-Projekt.

### 3.1 Forschungsziele der Entwicklung von Gleichspannungsnetzen

In Kapitel 2.3 sind die (technischen) Vorteile der DC-Netze genannt. Sich diese Vorteile zu Nutze zu machen ist das Hauptziel der Forschungsprojekte. So werden etwa bis zu 20% Wirkungsgradverbesserung angestrebt. Die genannten Nachteile resultieren mit Ausnahme des erhöhten Regelungsaufwands aus der Neuheit der DC-Netze. Es wird erwartet, dass diese durch die zunehmende Forschungsaktivität in diesem Bereich überwunden werden können. In der Entwicklung der DC-Netze werden die folgenden Ziele verfolgt:

- Schaffung eines technischen und regulatorischen Standards für DC-Netze
- Implementierung möglichst einfacher Regelungskonzepte für stabile, ggf. vermaschte DC-Netze
- Funktionsnachweis der entwickelten Netzkonzepte
- Entwicklung von Mittelspannungs-DC/DC-Wandlern als gestackte Dual-Active-Bridge Konverter zur galvanisch getrennten Koppelung der Mittel- und Niederspannung

Mit diesen Zielen gehen ferner die technischen Ziele einher:

- Erhöhung der Effizienz und Systemresilienz
- Reduktion redundanter Systeme und des Installationsaufwands
- Flexible Steuerung des Energieflusses dezentral verteilter Erzeuger
- Vereinfachte Integration dezentraler Energiequellen und Verbraucher: Batterien, Brennstoffzellen, Photovoltaik, LED-Beleuchtung und Elektronik
- Schaffung einer Gleichteilstrategie unter Berücksichtigung der Anforderungen an Schutzeinrichtungen
- Entwicklung eines bauvolumen- und gewichtsoptimierten Netzkonzeptes

### 3.2 Forschungsansatz und Vorgehensweise im SuSy-Projekt

Der Wechsel zu einer vollständigen DC-Versorgung hat das Potential einer disruptiven Technologie. Das elektrische Netz wird von Grund auf überarbeitet. Die Auswirkungen auf das gesamte Energiesystem sind massiv. Angefangen bei der Energiebereitstellung aus erneuerbaren Energiequellen über eine vereinfachte Verteilung bis hin zu neuartigen leistungselektronischen Komponenten und weitreichenden Kopplungen in die thermischen Energiesysteme werden neue Technologien erarbeitet. Aus diesem Grund ist ein fein abgestimmtes Vorgehen nötig. An dieser Stelle werden zunächst der grundlegende Forschungsansatz und die Vorgehensweise vorgestellt.

Der verfolgte Forschungsansatz soll ermöglichen, bereits während der Projektlaufzeit valide Simulationsmodelle der DC-Netze zu erstellen und die gewonnenen Ergebnisse in Methoden und Verfahrensanweisungen sowie Simulations- und Planungswerkzeugen zu integrieren. Dazu wird eine intensive Kopplung der Simulationen mit den Ergebnissen der Hardwareuntersuchungen durch Power Hardware-in-the-Loop umgesetzt. Reale sowie simulierte Lastprofile und die Sicherheitsvorgaben werden berücksichtigt, da diese das Netzdesign maßgeblich beeinflussen. In Abbildung 6 sind die angestrebten Schritte dargestellt.

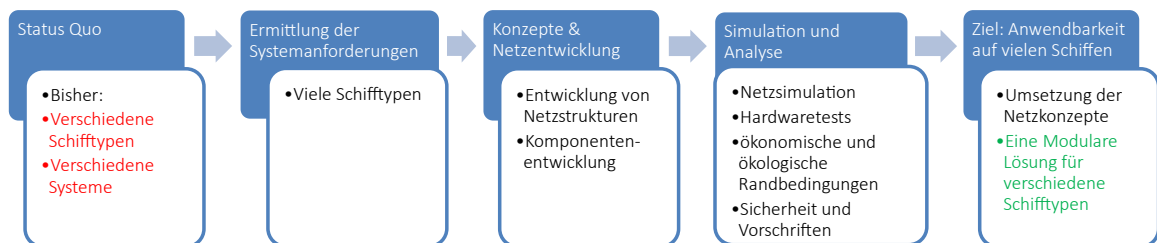


Abb. 6 Vorgehensweise der Gleichspannungs-Netzentwicklung im SuSy-Forschungsprojekt

Zuerst wird der Status Quo der Schiffsnetze erarbeitet. Ziel ist, die Designspirale des Schiffentwurfs nicht zu verlängern und die DC-Netze in bestehende Schiffskonzepte zu integrieren. Es wird davon ausgegangen, dass sich durch die DC-Netze und die Verbesserungen der thermischen Energiesystemen zunächst keine großen Änderungen des restlichen Schiffsdesigns ergeben. Eine wichtige Annahme dazu ist der in Kapitel 2.1 motivierte konstante Nutzenergiebedarf, der für verschiedene Schiffstypen ermittelt wird und als Grundlage der Konzeptentwicklung und Simulation dient. In der Ermittlung der Systemanforderungen werden für Kreuzfahrtschiffe, Frachtschiffe, Fähren oder Arbeitsschiffe u.a. Lastprofile, die örtliche Verteilung des Energiebedarfs, Begrenzungen in Bauvolumen und -masse sowie Sicherheitsvorgaben der SOLAS und Klassen herausgearbeitet. In der Netzstruktur- und Komponententwicklung dienen Kreuzfahrtschiffe als Referenz und verschiedene DC-Netzkonzepte werden erarbeitet. Mit Hilfe von Netzsimulationen der entwickelten Konzepte und Hardwaretests werden die Systeme hinsichtlich

Sicherheit bei Kurzschlüssen und Komponentenausfällen optimiert und ein Regelungskonzept erstellt. Power Hardware-in-the-Loop-Untersuchungen ermöglichen dabei, die Simulationsmodelle feinzustimmen und zu validieren, Hardware frühzeitig realen Lastszenarien auszusetzen und so langwierigen Prototypenbau zu vermeiden. Key-Performance-Indicators dienen zum Vergleich und zur Bewertung der Systemkonzepte. Im letzten Schritt werden Empfehlungen zur Umsetzung der Netzkonzepte erstellt. Dazu gehört die Erarbeitung eines Technologiekatalogs, die für verschiedene Schiffstypen empfohlenen Netzstrukturen und die entwickelten Regelungskonzepte. In nachfolgenden Projekten sollen erste Schiffbauten mit den entwickelten Netzen ausgestattet werden.

### 3.3 Projektpartner

An dieser Stelle soll ein kurzer Überblick über die an den Projekten beteiligten Industrie- und Forschungspartner gegeben werden, um die Forschungsinitiativen in den Wirtschaft- und Wissenschaftsstandort Deutschland einordnen zu können. Das *SuSy*-Projektkonsortium besteht aus insgesamt 8 Projektpartnern. Unter Leitung der *Meyer Werft* sind *Siemens Energy*, die *Technische Universität Hamburg (TUHH)*, das *Institut für Vernetzte Energiesysteme* des *Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR-VE)*, *Lloyd's Register*, *morEnergy*, *DAMEN Shipyards* und *Schneider Electric* beteiligt. In diesem Konsortium sind u.a. Kompetenzen im Schiffbau, zu elektrischer Netzplanung, elektrischen Schaltelementen, Netzqualitätsuntersuchungen, Simulationen, Systemoptimierung und Hardwaretests vertreten. Hervorzuheben ist die Beteiligung der Klassifikationsgesellschaft *Lloyd's Register*, um möglichst früh im Entwurfsprozess Klassifikationsvorgaben berücksichtigen und anpassen zu können.

Das *MVDC4S*-Projektkonsortium besteht aus den Projektpartnern *Meyer Werft*, *Siemens Energy*, *Siemens*, *Semikron*, der *AQ Group* und dem *Fraunhofer-Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie (IISB)*. Der Fokus liegt auf der Entwicklung und dem Test von Schlüsselkomponenten eines neuartigen MVDC-Antriebsnetzes.

### 3.4 Beteiligte Forschungslabore

Die Projekte zeichnen sich dadurch aus, dass in insgesamt drei leistungsfähigen Laboren der Forschungspartner Untersuchungen durchgeführt werden. Im *SuSy*-Projekt sind die Niederspannungs-*Power Hardware-in-the-Loop (PHIL)* Labore der TUHH und des DLR-VE beteiligt. Das Konzept des Power Hardware-in-the-Loop ermöglicht, verschiedene elektrische Hardwarekomponenten in einer elektrischen Testumgebung zu betreiben. Leistungsverstärker werden dazu über Echtzeitsimulatoren gesteuert und erlauben damit, Strom und Spannung eines elektrischen Netzes in Echtzeit zu steuern und damit Fragestellungen zu beantworten, die sonst nur in Feldversuchen realisiert werden können. So kann untersucht werden, wie sich die Testkomponenten in bestimmten Situationen und vor allem Fehlerfällen verhalten und ob es unvorhergesehene Kopplungseffekte dieser Komponenten gibt. Damit ist es möglich, bereits in einer sehr frühen Phase der Netzentwicklung validierte Simulationen aufzubauen ohne tatsächlich ein Schiffsnetz bauen zu müssen. Die Entwicklungsdauer der DC-Netze lässt sich dadurch massiv reduzieren. In dem Projekt *MVDC4S* werden unter Leitung von Siemens Energy zwei Testcontainer entwickelt und konstruiert, um die neuentwickelten Komponenten einzeln und im Netzbetrieb unter realen Bedingungen zu testen. Diese Container werden im Mittelspannungslabor des Fraunhofer *IISB* integriert. Abbildung 7 zeigt das *Power Hardware-in-the-Loop Labor (PHILsLab)* der TUHH [26]. Der Fokus dieses Labors liegt auf der Echtzeitanalyse von insgesamt bis zu zwölf Komponenten in DC und AC mit insgesamt bis zu 120 kW. Hochpräzise Messtechnik erlaubt Leistungsanalysen mit einer Genauigkeit von  $0,015\% \pm 0,01\%$ . Hochfrequenzeffekte bis zu 200 MHz können untersucht werden. Ein besonderer Fokus liegt auf der Integration verschiedenster Netztopologien: So können bipolare DC-Netze mit bis zu 1000V und verschiedenen Erdungskonzepten von TN-S über IT bis hin zu Netzen mit mehreren lokalen Erdungspunkten und der Überwachung hochfrequenter Erdungsströme abgebildet werden. Ein Motorenprüfstand erlaubt einen Betrieb von Generatorsätzen bis zu 100kVA. Umfangreiche Schaltheilungen zur Erzeugung von Lastspitzen und Fehlerstellen sind möglich.



Abb. 7 Power Hardware-in-the-Loop Labor (PHILsLab) der TUHH

Abbildung 8 zeigt das *Emulationszentrum für Vernetzte Energiesysteme (NESTEC)* des DLR-VE. Der Fokus dieses Labors liegt auf der Echtzeitsimulation komplexer Netzstrukturen mit bis zu 25 Teilnehmern bei 1 MVA Gesamtleistung in DC und AC. Modernste Echtzeitsimulatoren erlauben die Echtzeitsimulation zahlreicher Netzteilnehmer. Damit können große und vernetzte Netzstrukturen abgebildet werden. Das Labor ermöglicht so, zukünftige DC-Netze und deren Energiemanagement- und Netzregelungsmethoden zu testen. Damit können die Einflüsse verschiedener Netzregelungsmethoden und Netztopologien auf die Netzstabilität auch in Hardware-Versuchen

untersucht werden, um so die Simulationsmodelle weiter zu verfeinern. Zahlreiche Schnittstellen zur Einbindung weiterer, realer Hardwarekomponenten wie Motoren oder auch Ladeinfrastruktur ermöglichen die Interaktion der simulierten Netzstruktur mit realen Komponenten.



Abb. 8: Power hardware-in-the-Loop Netzlabor (NESTEC) des DLR-VE

Die beiden Power Hardware-in-the-Loop Labore ergänzen sich, um einerseits sehr detaillierte Modelle von Hardware-Komponenten und deren Interaktion in verschiedenen Erdungskonzepten zu erstellen und andererseits komplexe Netzstrukturen wie sie auf Schiffen vorliegen und im *SuSy*-Projekt entwickelt werden sollen im Labor nachzubilden und zu testen. Ergänzt werden diese beiden Labore des *SuSy*-Projekts durch das Mittelspannungslabor des Fraunhofer IISB im *MVDC4S*-Projekt. Abbildung 9 zeigt das Labor, mit dessen Hilfe Mittelspannungskomponenten getestet werden. Das Labor trägt damit maßgeblich dazu bei, die Lücke der Leistungselektronik in der Mittelspannungsgleichspannung zu schließen. Es können Wandler und Antriebe bis zu 20 MW bei bis zu 30 kV<sub>AC</sub> und 15 kV<sub>DC</sub> getestet werden. Umfangreiche Kühlsysteme garantieren einen realitätsnahen Betrieb mit verschiedenen Lastflussrichtungen. Mit Hilfe des Labors wird maßgeblich die Entwicklung von stacked Dual-Active-Bridge Konvertern für Mittelspannung vorangetrieben, um so eine effiziente und kostengünstige elektrische Energieversorgung auf Schiffen im Multimegawattbereich zu gewährleisten.



Abb. 9: Mittelspannungslabor des Fraunhofer IISB

## 4 Wissenschaftliche Fragestellungen

An dieser Stelle soll der Überblick über die relevanten wissenschaftlichen Fragestellungen gegeben werden. Es folgt die Vorstellung eines ersten Konzeptvorschlags für eine DC-Netzstruktur. Abschließend wird die Modularisierung des Energiesystems vorgestellt.

### 4.1 Forschungsfragestellungen

Es werden zahlreiche Fragestellungen identifiziert, die in insgesamt sechs Bereiche unterteilt werden. Die Fragestellungen beeinflussen sich gegenseitig, werden aber an dieser Stelle separat vorgestellt.

#### 4.1.1 Netzform

In den Fragestellungen, die der Netzform zuzuordnen sind, werden zunächst **Spannungsgrenzen & Spannungsbänder** festgelegt, da bisher kein genormtes DC-Spannungsniveau existiert. Aus diesem Grund sind die Nennspannungen und zulässigen *Spannungsgrenzen* für Mittel-, Nieder-, und Schutz-Kleinspannung zu definieren. Da das Netz nicht durch direktgekoppelte rotierende Maschinen gespeist wird, ergeben sich weitere Möglichkeiten, mit Hilfe der leistungselektronischen Quellen *Spannungsbänder* zur Lastflussregelung und zur Steuerung von Verbrauchern sowie zur Aktivierung des Notbetriebs zu nutzen. Uni- und bipolare Netze werden betrachtet, um das Übersetzungsverhältnis der DC-DC-Wandler von Mittel- zu Niederspannung zu begrenzen. **Erdungskonzepte & galvanische Trennung** sind aufgrund der zahlreichen Stromrichter in DC-Netzen von besonderer Bedeutung. DC-

Leckströme können u.U. größere Korrosionseffekte in der Schiffstruktur bewirken [27]. Die **Netztopologie & Feuerzonenkopplung** verbindet, wie in Abbildung 5 illustriert, die verschiedenen Bereiche des Schiffes miteinander und wird stark durch Sicherheitsanforderungen beeinflusst. Es stellen sich Fragen nach der optimalen Ausgestaltung einer redundanten Versorgung innerhalb einzelner Decks, einer Feuerzone sowie zwischen den Feuerzonen, nach einer effizienten Energiebereitstellung sowie Kontrolle und Abschaltung von Fehlerströmen.

#### 4.1.2 Sicherheit

Die gültigen Sicherheitsanforderung der SOLAS und die Vorgaben der Klassifikationsgesellschaften müssen auf DC-Netze übertragen und in der Netzentwicklung berücksichtigt werden. **Schutztechnik & Redundanzen** werden zur Abschaltung von Fehlerströmen und gleichzeitiger Aufrechterhaltung des Betriebs sowie zur Notversorgung benötigt. In DC-Netzen bieten sich hierfür Solid-State-Circuit-Breaker (SSCBs) an, die den Nennstrom über IGBTs führen und im Fehlerfall innerhalb weniger  $\mu\text{s}$  abschalten können. Eine sichere und kostengünstige Ausgestaltung wird angestrebt. Es wird untersucht, wie sich mit sogenannte **Power Islands & Batteriespeichereinbindungen** eine neue Art der **unterbrechungsfreien Stromversorgung** (USV) aufbauen lässt, um so im Fehlerfall einen autarken Inselbetrieb zu ermöglichen, gleichzeitig aber die Anzahl redundanter Systeme zu reduzieren.

#### 4.1.3 Hardwareentwicklung

Die Notwendigkeit der Hardwareentwicklung resultiert aus dem Bedarf nach verfügbarer Leistungselektronik (insbesondere für Schutztechnik) in Nieder- und Mittelspannung bei sehr hoher Leistung, da DC-Technik bisher vor allem in Klein- und Hochspannung angewendet wird. Es werden zum einen Komponenten wie **SSCBs & DC-DC-Wandler** benötigt. SSCBs sind kostenintensiv und noch keine etablierte Technologie, weisen aber eine in AC unerreichte Performance in der Geschwindigkeit der Fehlerstromabschaltung auf. Ziel ist, deren Verluste zu reduzieren, sowie DC-Wandler zur einstufigen Wandlung von Mittelspannung auf Niederspannung weiterzuentwickeln. Bauelemente wie **Trafos & Leistungshalbleiter** müssen optimiert werden, um diese auf Schiffen in großer Anzahl effizient einsetzen zu können und für die maritime Umgebung zu ertüchtigen.

#### 4.1.4 Konnektivität

Die Konnektivität befasst sich mit der Verbindung zwischen den verschiedenen Komponenten. Es wird zwischen Daten- und Leistungsverbindungen unterschieden. Die **Kommunikationskonzepte** an Bord von Schiffen sollen vereinfacht und möglichst vereinheitlicht werden. In DC-Netzen kommt der Kommunikation der zahlreichen Stromrichter eine zentrale Rolle zu, da für einen stabilen Netzbetrieb eine Abstimmung der Stromrichter der Quellen, idealerweise auch der Verbraucher, erforderlich ist. Ein Energiemanagementsystem zur verbrauchsoptimierten Betriebsweise ist nur mit einem entsprechenden Kommunikationsnetz zwischen den DC-Komponenten möglich. In den **Anbindungskonzepten** werden grundsätzliche Verschaltungsarten von z.B. Kabinen oder Lüftungsanlagen erarbeitet. Dabei wird die notwendige Installationstechnik wie Leiter oder Verbindungstechnik und die Verfügbarkeit von entsprechenden DC-Komponenten untersucht.

#### 4.1.5 Netzregelung & Netzstabilität

Ein wichtiger Aspekt der Netzregelung ist die **Lastflussregelung**. Gibt es in einem AC-Netz die starke Kopplung von Wirkleistung und Netzfrequenz bzw. Blindleistung und Knotenspannung, liegt in einem DC-Netz die idealerweise möglichst konstante Gleichspannung als Netzparameter vor. Es wird daher angestrebt, die Lastflussregelung über eine Statik der Netzspannung umzusetzen. Wie in Kapitel 4.1.1 beschrieben, lassen sich bei Verwendung dezidiert Spannungsbänder damit auch Verbraucher steuern. Eine Netzregelung über hochfrequente Steuersignale im Netz steht im Widerspruch zum Ziel hoher elektromagnetischer Verträglichkeit, die durch aufwendige DC-Netzfilter eben den ausgeprägten **Einfluss der Stromrichter** minimiert.

#### 4.1.6 Systemoptimierung

Neben dem Aufbau des Netzes stellen sich Fragen, welche Arten und Kombinationen von Energiequellen für welche Schiffstypen und Fahrprofile optimal sind. Dazu sind **ökonomische & ökologische Randbedingungen** zu ermitteln. Investitionskosten erneuerbarer Komponenten wie Brennstoffzellen und Batterien aber auch von Verbrennungsmotoren, die Betriebskosten und die Lebensdauer bestimmen neben den Effizienzen maßgeblich die Struktur des Energiesystems. Treibhausgas- und Schadstoffemissionen und der ökologische Fußabdruck der Komponenten sind ferner Einflussgrößen. Ebenso sind Betriebscharakteristika wie Lastaufschaltvermögen und Schwarzstartfähigkeit wichtig. Es sollen neue dezentrale **Brennstoffzellen- & Photovoltaikintegrationskonzepte** entwickelt werden. Damit einher geht die Frage der **Lokalisierung von Komponenten & Sektorenkopplung**, um zu ermitteln an welchen Stellen im Schiff die elektrischen Komponenten installiert werden sollten um unter Berücksichtigung der Sektorenkopplung als Verbindung von Strom und Wärme, ein möglichst schlankes Energiesystem aufzubauen. Es spannt sich ein umfangreiches Optimierungsproblem auf, das einerseits eine sichere Energiebereitstellung bei gleichzeitig geringen Umweltauswirkungen garantieren soll. Andererseits aber auch geringe Investitions- und Betriebskosten aufweisen und möglichst einfach aufgebaut sein soll.

## 4.2 Mögliche DC-Netzkonzepte

In Abbildung 4 in Kapitel 2.2 ist das übliche Hybridnetz eines Kreuzfahrtschiffs dargestellt. Beim Übergang zu DC-Netzen soll die hybride Struktur eingespart werden und die Mittelspannungs-Großverbraucher nicht länger durch einzelne Verbindungen direkt versorgt werden. Ziel ist, die weiter entfernten Verbraucher wie die Bugstrahler auch an das Mittelspannungsnetz zu koppeln, um damit den Verkabelungsaufwand zu reduzieren und die Flexibilität der dezentralen Verbraucher zu erhöhen. Dennoch orientieren sich die entwickelten Netzstrukturen an der bisherigen. Es werden die beiden Konzepte der Mittelspannungsring- und -busstruktur mit verschiedenen ausgestalteten Feuerzonen- und Decksverteilungen verfolgt. Als Mittelspannungsnetz wird ein IT-Netz mit 6 kV Nennspannung angestrebt, sodass sich Leistungen im zweistelligen Megawattbereich effizient übertragen lassen. Für die Niederspannung wird ein bipolares TN-S-System mit  $\pm 350$  V angestrebt. Auch wenn damit ein zusätzlicher Leiter benötigt wird, können so einstufige DC-DC-Wandler aufgrund eines Übersetzungsverhältnisses von 8,6 zur Wandlung auf 700 V Niederspannung verwendet werden. Außerdem kann mit 700 V<sub>DC</sub> einfach ein 400 V-Drehstromsystem aufgebaut werden. Durch eine kapazitive Mittelpunktbildung zur Schaffung des Neutralleiters kann anschließend mit einem Übersetzungsverhältnis von 7,3 von 350 V auf 48 V Schutzkleinspannung gewandelt werden. Abbildung 10 zeigt links die Mittelspannungs-Ringtopologie und rechts zwei mögliche Feuerzonen-Versorgungskonzepte. Die Redundanz im Ringnetz wird durch den im Normalbetrieb geöffneten Koppelschalter erreicht. In den einzelnen Feuerzonen kommt die Redundanz wahlweise durch dezentrale Power Islands oder Kopplungen mit benachbarten Feuerzonen mit reduzierter Leistung (rechtes Konzept) oder aber durch eine doppelte Feuerzonen- speisung mit jeweils voller Leistung (linkes Konzept) zustande. Dieser Vorschlag basiert stark auf dem bisherigen Netzkonzept unter Minimierung der elektrischen Leitungen. Mit Hilfe der dezentralen Energiebereitstellung in den Feuerzonen lassen sich die Notverbraucher direkt aus der zugehörigen Feuerzone versorgen, sodass auf aufwendige USV-Systeme weitestgehend verzichtet werden kann. Die genaue Ausgestaltung der vertikalen Busbars, u.a. ob diese bipolar oder unipolar geführt werden, ist Gegenstand weiterer Untersuchungen.

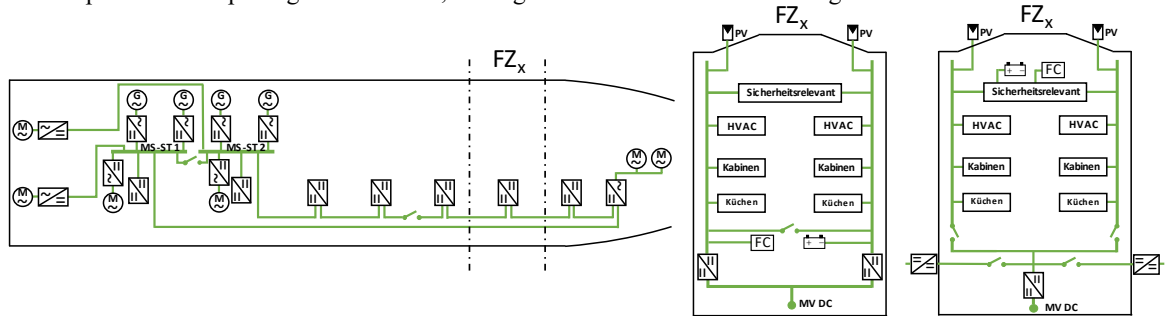


Abb. 10 Ring-Topologie der DC-Mittelspannungsebene mit zwei verschiedenen Feuerzonen-Versorgungskonzepten

Die Bus-Topologie aus Abbildung 11 unterscheidet sich von der Ringtopologie dadurch, dass die Back- und Steuerbordleitung nicht miteinander gekoppelt werden. Außerdem wird auf umfangreiche Schaltanlagen weitgehend verzichtet und die Verbraucher werden über die Busleitungen versorgt. Beide Leitungen sind in der Lage, jeweils die gesamte Leistung zu führen, sind im Regelbetrieb aber nur halb ausgelastet. Damit ist eine hohe Redundanz gegeben. Optionale Koppelschalter zwischen den beiden Leitungen können die Redundanz weiter steigern, ohne dass dafür zusätzliche Leitungen erforderlich sind. Das gleiche Prinzip wird auch in den Feuerzonen angewendet, sodass keine weiteren Notsysteme erforderlich sind. Werden in den Feuerzonen dezentrale Erzeugeranlagen installiert, kann die Redundanz für Notverbraucher sogar auf Zweifelhersicherheit angehoben werden.

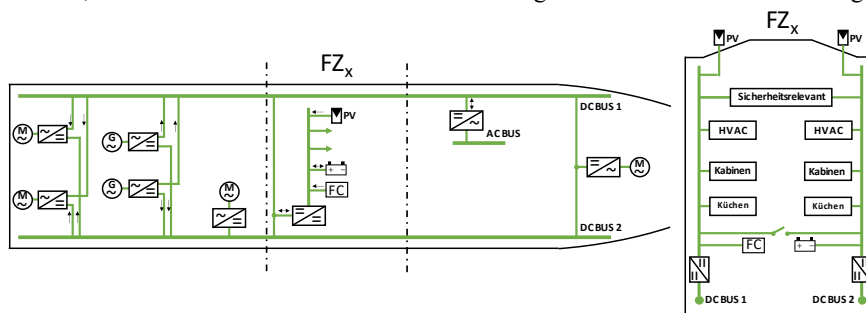


Abb. 11 Bus-Topologie der DC-Mittelspannungsnetze mit Feuerzonen-Versorgungskonzept

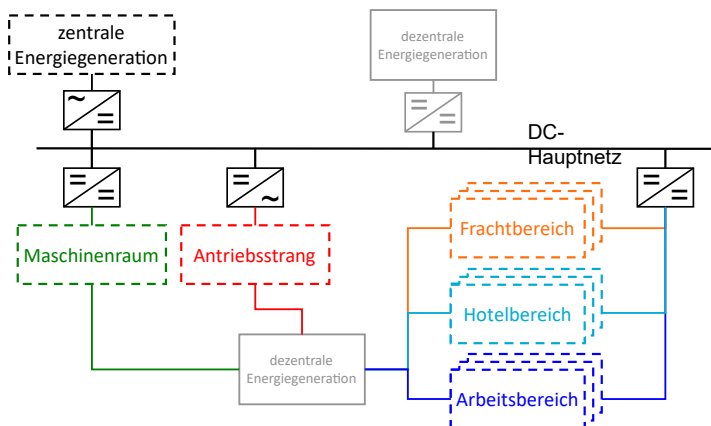
In beiden Topologievorschlägen sind Photovoltaiksysteme als zusätzliche Energiequellen vorgesehen. Auf Kreuzfahrtschiffen besteht ein Interessenkonflikt bei der Nutzung geeigneter Flächen mit Passagierbedürfnissen. Auf Frachtschiffen ist das daher Potential größer, muss jedoch noch erfasst werden.

### 4.3 Modularisierung des Energiesystems

Die Modularisierung des elektrischen Energiesystems ist ein wesentlicher Baustein, um die Anwendbarkeit auf verschiedenen Schiffstypen zu ermöglichen. Nur durch möglichst ähnliche elektrische Systeme ist es möglich, eine schiffübergreifende Gleichteilstrategie zu entwickeln. Dazu ist es erforderlich, die entwickelten Standards bzgl. Netzspannungen und einheitlichen Regelstrategien konsequent umzusetzen. Insbesondere im frühen Anwendungsstadium liegt hier eine Herausforderung, da die entwickelten Konzepte noch wenig von Skaleneffekten profitieren und individuell angepasste Lösungen u.U. günstiger sein können. Es wird davon ausgegangen, dass langfristig die Skaleneffekte überwiegen und sich die Standards gegenüber den Individuallösungen durchsetzen werden. In der Modularisierung werden dazu zwei Ziele verfolgt. Zum einen sollen die Module über die gleichen Koppellemente verbunden werden, um verschiedene Module je nach Schiffstyp miteinander kombinieren zu können. Dazu sind einheitliche Spannungsniveaus und Erdungs-, Regel- sowie Schutzkonzepte erforderlich. Zum anderen sollen die Module jeweils in ihrer Größe skalierbar sein, um auch unterschiedlich große Schiffe abbilden zu können. Abbildung 12 zeigt den zugrundeliegende Netzaufbau des Modularisierungskonzeptes. Das Energiesystem wird dazu in die folgenden Module unterteilt, die je nach Schiffgröße auch mehrfach vorliegen können:

- Zentrale Energiegeneration
- Maschinenraum
- Antriebsstrang
- Frachtbereich
- Hotelbereich
- Arbeitsbereich

Ferner gibt es ein DC-Hauptnetz, welches entsprechend der Schiffgröße entweder in Mittel- oder Niederspannung aufgebaut wird. Die Wandler zur Kopplung der Module werden dem Hauptnetz zugeordnet, sodass der Aufbau der Module unabhängig von der Spannungsebene des Hauptnetzes ist. Eine direkte Interaktion zwischen einzelnen verschiedenartigen Modulen ist nicht vorgesehen. Auf Hauptschalttafeln und zentrale Notsysteme soll weitgehend verzichtet werden. Als Hauptverteilung kommen in Mittelspannung die in Kapitel 4.2 vorgestellten Strukturen in Frage. In Abbildung 12 ist die Bus-Struktur abgebildet, da diese vom Modularisierungskonzept besonders profitiert.



**Abb. 12 Modularisierungskonzept des elektrischen Energiesystems zur Anwendbarkeit auf vielen Schiffstypen**

Die dezentrale Energiegeneration ist ein weiterer Baustein, der an gewünschter Stelle im System oder den Teilmodulen beliebig oft integriert werden und den Autarkiegrad der Bereiche erhöhen kann. Für die einzelnen Teil-Module können nun Teil-Lösungen erstellt werden, die simulativ und durch PHIL-Untersuchungen validiert und zum Gesamtsystem verbunden werden. Um das vorgeschlagene Konzept umsetzen zu können, ist dazu eine dezentrale Netzregelung erforderlich. Nur so können die Bereiche eigenständig entwickelt werden. Sorgfalt ist bei der Festlegung der Netzkapazitäten erforderlich, da hierzu die einzelnen Leistungsbedarfe der Bereiche und etwaige dezentrale Erzeuger berücksichtigt werden müssen.

## 5 Gesamtsystemoptimierung eines dezentralen DC-Schiffsnetzes

Im klassischen Schiffentwurf wird sich bei der Ausgestaltung des Energiesystems stark an vorherigen Schiffen orientiert. Die Verteilstrukturen aus Abbildung 1 der Energiesysteme sind klassischerweise zentral aufgebaut. Eine Weiterentwicklung bei neuen Schiffen findet in der Regel nur in Details statt. Die grundlegende Struktur bleibt unverändert. Da DC-Netze, wie in Kapitel 3.2 beschrieben, eine disruptive Technologie darstellen, wird insbesondere durch die Dezentralisierung des Energiesystems eine grundlegend neuartige Netzstruktur möglich. Dies betrifft alle an Bord vorliegenden Energiesysteme elektrischer und thermischer Art. Um das vollständige Potential eines dezentralen Netzes ausnutzen zu können, müssen sämtliche Systeme mit einbezogen werden. An die Optimierung wird die wesentliche Randbedingung gestellt, dass der Endenergiebedarf im Zeitverhalten und der örtlichen Verteilung weitgehend unverändert bleibt. Diese Annahme wurde bereits in Kapitel 2.1 motiviert und ist mit

Ausnahme etwaigen Demand-Side-Managements für sämtliche Verbraucher gültig. Die Gesamtsystemoptimierung hat das Ziel, einen kostenoptimalen Aufbau des Schiff-Energiesystems zu ermitteln. Es sollen dabei drei zentrale Fragestellungen beantwortet werden:

- Welche Leistungen der Energieerzeugungsanlagen sind im Schiffsnetz erforderlich, um dieses in allen Betriebszuständen sicher zu versorgen?
- Welche Arten Energiequellen und -speicher sind an welchen Positionen im Energiesystem zu installieren?
- Wie lassen sich diese Energiequellen und -speicher optimal betreiben?

In der Entwicklung dieser Netzstruktur liegen zahlreiche Freiheitsgrade und Einflussgrößen, sodass sich ein mehrdimensionales Optimierungsproblem aufspannt. Die Zielfunktion hinsichtlich der diese Fragestellungen optimiert werden sind die Kosten. Dazu ist es erforderlich, neben den reinen Investitions- und Betriebskosten auch die anderen Einflussgrößen durch Kosten zu abstrahieren.

Zuerst wird dazu der Optimierungsansatz vorgestellt. Anschließend werden die Randbedingungen der Optimierung erläutert und das Konzept der Topologieoptimierung vorgestellt. Es folgte eine Vorstellung erster Ergebnisse.

## 5.1 Optimierungsansatz

Der erste Schritt der Gesamtsystemoptimierung besteht darin, die Leistungsbedarfe der Endenergie zeitlich und örtlich aufgelöst zu ermitteln. Dies erfolgt zum einen durch repräsentative Messwerte ähnlicher Schiffe oder über Simulationen für neue Schiffe. Damit ist bekannt welche Leistungen an welcher Stelle, zu welcher Zeit und in welcher Form benötigt werden. Die Energiequellen und -speicher müssen nun dazu so kombiniert werden, dass dieser Bedarf zu jeder Zeit erfüllt wird und ferner den Sicherheitsanforderungen genügt. Dazu ist das Optimierungsmodell anhand einer elektrischen und thermischen Leistungsbilanz aufgebaut, die zu jedem Zeitpunkt erfüllt sein muss. Abbildung 13 stellt das Vorgehen dar: Von den Verbrauchern ist dabei die absolute Position  $(x,y,z)$  im Schiff und zu jedem Zeitpunkt die erforderliche Leistung  $p(t)$  bekannt. Die Energiebereitstellung und -verteilung wird hinsichtlich der beiden folgenden Aspekte in einer geschachtelten Optimierung optimiert.

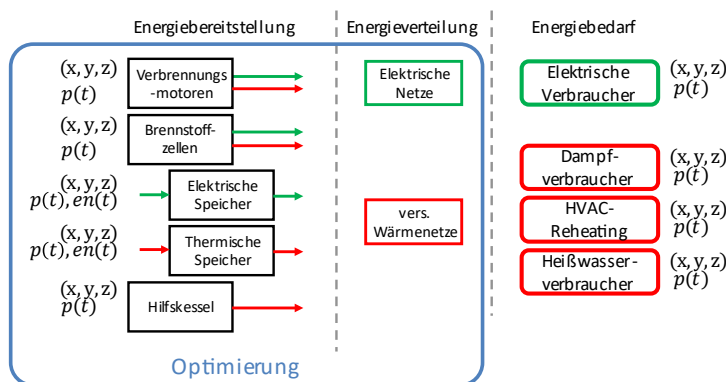


Abb. 13 Grundsätzliche Struktur der Optimierung des Energiesystems

Einerseits wird das Energiesystem einer Betriebsoptimierung unterworfen, um die Energiequellen stets so zu betreiben, dass die geringsten Betriebskosten erzielt werden. Dies wird im linken Teil der Zeichnung durch die Leistungsflüsse und die in den Energiespeichern gespeicherten Energiemengen  $en(t)$  zum Zeitpunkt  $t$  verdeutlicht. Diese Optimierung findet mit Hilfe einer generischen gemischt-ganzzahligen linearen Programmierung statt. Diese ist in der Kraftwerkseinsatzplanung Stand der Technik [28] und kann sehr komplexe Systeme mit Millionen Optimierungsvariablen und Randbedingungen zur Abbildung komplexer physikalischer Zusammenhänge schnell lösen. Die Betriebsoptimierung ist in die Systemoptimierung eingebettet, deren Ziel es ist, den Aufbau des Energiesystems zu optimieren. Diese Systemoptimierung findet mit Hilfe eines genetischen Algorithmus statt. Die Gesamtsystemoptimierung, als Verbindung der Betriebsoptimierung und der Systemoptimierung, wird daher als *genetisch-generische Optimierung* bezeichnet. Der genetische Algorithmus beinhaltet als Erbinformationen die Informationen über das Energiesystem. Diese beinhalten die Art der Erzeuger, ob es sich dabei beispielsweise um Brennstoffzellen, klassische Verbrennungsmotoren oder aber Batterien handelt, die Größen der Komponente und mit welchen Komponenten diese verbunden sind. Es wird ferner berücksichtigt, ob die Energiequellen zentral lokalisiert sind oder sich in direkter Nähe zu den Verbrauchern befinden, um so die (thermischen) Leitungen einsparen zu können. Die erforderlichen Leistungslängen zur Verbindung werden berücksichtigt. Mit Hilfe der Lokalisation können ferner die Sicherheitsanforderungen bzgl. verschiedener Fehlerszenarien überprüft werden.

Die drei zentralen Fragestellungen, die mit der Gesamtsystemoptimierung beantwortet werden sollen, erfordern dabei, dass die verschiedensten Einflussgrößen durch einen Vergleichsparameter, die Kosten, abstrahiert werden. Dieser Ansatz stellt eine praxisnahe Lösung dar, die besonders wirtschaftliche Konzepte finden kann, wenn die Kosten entsprechend gewichtet werden. Es werden folgende Arten der Abstraktion angewendet:

- Ein besonders **effizientes Energiesystem** wird dadurch ermittelt, dass Energiekosten enthalten sind. Verbunden mit der Berücksichtigung von Wirkungsgraden, Verlusten und Teillastverhalten der in Frage kommenden Komponenten, wird damit eine besonders effiziente Systemkonfiguration günstiger.

- Ein besonders **umweltverträgliches Energiesystem** ergibt sich durch die Berücksichtigung von Emissionskosten für Treibhausgase und Schadstoffe. Dies ermöglicht ferner die Integration zukünftiger Regularien. Dies wird in Form von zusätzlichen Betriebskosten berücksichtigt, kann aber auch durch zusätzliche Investitionskosten in den Herstellungskosten enthalten sein.
- Ein **einfach aufgebautes Energiesystem** kann durch Installationskosten berücksichtigt werden.
- Die **Topologie des Energiesystems** soll ein Energiesystem mit möglichst wenig Komponenten und Leitungen erreichen. Dies wird durch die Berücksichtigung für Kosten für umbautes Volumen berücksichtigt.
- Ein besonders **wirtschaftliches Energiesystem** ergibt sich aus der Überlagerung der vorherigen Einflussgrößen und wird durch die Betriebsoptimierung und die Systemoptimierung erreicht.

## 5.2 Randbedingungen

An dieser Stelle wird ein kurzer Einblick gegeben, welche physikalischen Randbedingungen in der Betriebsoptimierung abgebildet werden, um einen realitätsnahen Betrieb zu ermitteln und damit mit der Systemoptimierung ein optimales Energiesystem zu ermitteln, welches in der Praxis tatsächlich so betrieben werden kann. Im generischen Optimierungsmodell wird neben Verbrauchern prinzipiell zwischen drei verschiedenen Komponenten unterschieden: Energiequellen, Energiespeichern und Energiesystemen, d.h. Verknüpfungen zwischen Komponenten. Diese Komponenten sind generisch aufgebaut: Bei Energiespeichern kann es sich, z.B. um Batterien, thermische Speicher oder aber Superkondensatoren handeln, die über die entsprechenden Parameter festgelegt werden. Die Energiequellen können z.B. klassische Verbrennungsmotoren, Brennstoffzellen aber auch Heizkessel sein. Der generische Aufbau ermöglicht dabei zahlreiche Freiheitsgrade, die über die folgenden modellierten physikalischen Eigenschaften, welche die Rand- /Nebenbedingungen der Betriebsoptimierung darstellen, abgebildet werden:

- Die Leistung von Komponenten liegt stets zwischen *minimalem und maximalem Wert* oder ist Null.
- Erzeuger können mehrere Energieformen liefern, die durch *Leistungsverhältnisse* berücksichtigt werden.
- Energiequellen sind Trägheiten unterworfen, die durch *Lastgradienten* abgebildet werden.
- *Wirkungsgrade* sind in Energiebereitstellung, -wandlung, -speicherung und -übertragung berücksichtigt.
- Der *Lade- /speicherzustand* von Energiespeichern und deren *Größe* wird abgebildet.
- Das *Volumen* von Komponenten ist modelliert.
- Die *Emissionen, Lebensdauer* und *Investitionskosten* von Komponenten sind berücksichtigt, gehen aber direkt in die Zielfunktion als Kosten ein und bestimmen damit die Systemoptimierung.

## 5.3 Topologieoptimierung

Das Ziel der Topologieoptimierung ist die Verringerung der erforderlichen Leitungen bei gleichzeitiger Sicherheit des Energiesystems. Dazu müssen die Komponenten möglichst realitätsnah miteinander vernetzt werden und die Form der Vernetzung optimierbar sein. Im linken Teil von Abbildung 14 ist die Vernetzung der Leistungsflüsse für ein Beispiel-Kreuzfahrtschiff dargestellt. Im oberen Teil speisen insgesamt fünf Energiequellen vier verschiedene Energiesysteme. Es liegt eine dezentrale Brennstoffzelle vor, die direkt Feuerzonentrafo 4 speist. Die Anzahl der Verbraucher variiert je nach Energiesystem.

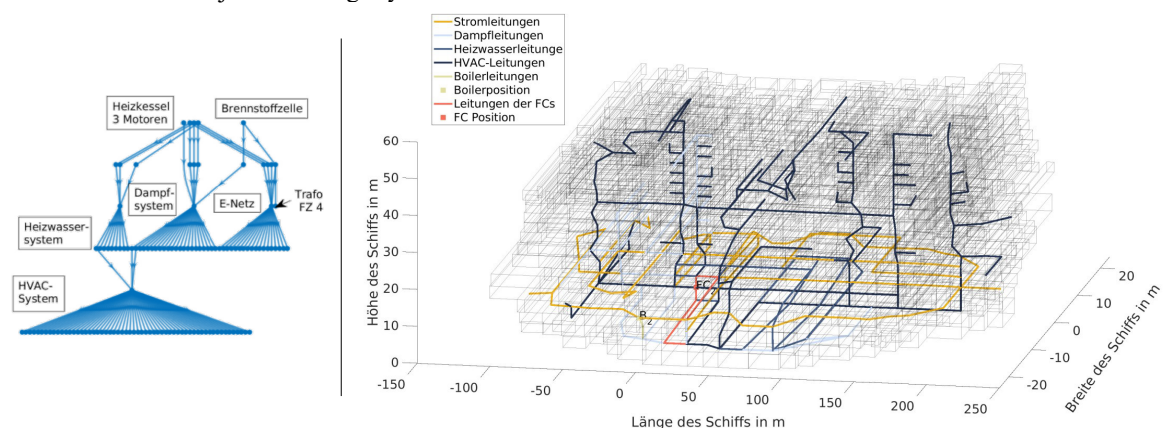


Abb. 14 Vernetzung der Leistungsflüsse und Topologie des Energiesystems eines Kreuzfahrtschiffs

Der Fokus der abgebildeten Topologie liegt auf dem Klimatisierungssystem (HVAC) zur Heizung. In der aktuell dargestellten Form noch zentral gespeist, soll mit Hilfe der Optimierung ermittelt werden, ob eine dezentrale Wärmeversorgung der weit verteilten Klimaräume, siehe hierzu auch Abbildung 3, möglich und unter welchen Bedingungen auch sinnvoll ist. Die Berücksichtigung von realen Lastprofilen ermöglicht auch, ggf. Teile dezentral zu versorgen, die ein besonderes geeignetes Lastprofil aufweisen. Vom elektrischen Netz sind in Gelb das Mittelspannungsnetz und die dortigen Großverbraucher abgebildet. Mit Hilfe der Modellierung der Topologie kann nun der Einfluss von sicherheitskritischen Ereignissen wie Bränden und die Auswirkungen auf die verschiedenen Teile des

Energiesystems untersucht werden. Damit kann eine geeignete Verteilung der Erzeugerleistungen ermittelt werden. Ziel ist ferner die Untersuchung von Leitungsfehlern auf die Systemredundanz. Hierbei liegt der Fokus jedoch nicht auf einer detaillierten elektrischen Modellierung, sondern auf der Optimierung der Struktur des Energiesystems.

#### 5.4 Erste Ergebnisse der finanziellen Untersuchung

Die große Stärke der Gesamtsystemoptimierung liegt darin, die finanziell optimale Struktur des Energiesystems in Abhängigkeit verschiedener Markteinflussgrößen zu ermitteln. So kann anschließend mit Hilfe einer Sensitivitätsanalyse ermittelt werden, wie die verschiedenen Einflussgrößen, wie Kraftstoffkosten, Emissionen, Lebensdauern oder Umweltauflagen die Form der Energiebereitstellung beeinflussen. Es kann zwar bereits erwartet werden, dass beispielweise Brennstoffzellen bei hohen Umweltauflagen eine effiziente Form der Grundlastbereitstellung darstellen können. Es bleibt aber ohne solche eine Optimierung ungewiss, wie hoch genau der Anteil der Erzeugerleistung durch Brennstoffzellen sein muss und in welchem Maße Spitzenlasterzeuger wie Verbrennungsmotoren oder Batterien installiert werden müssen. Die durchgeführte Betriebsoptimierung garantiert ferner, dass das Energiesystem auch alle Lastanforderungen bedienen kann, dabei aber dennoch kostenoptimal arbeitet.

Im Folgenden wird der Einfluss der verschiedenen Markteinflussgrößen auf die Wirtschaftlichkeit einer Brennstoffzellenintegration in ein Kreuzfahrtschiff anhand einer Sensitivitätsanalyse gegenübergestellt. Es werden dabei drei verschiedene Markteinflussgrößen variiert. Dies sind einerseits die CO<sub>2</sub>-Emissionskosten, die von 0 €/t auf bis zu 200€/t variiert werden. Außerdem werden die Investitionskosten und die Brennstoffkosten der Brennstoffzellen variiert. Um Brennstoffzellen an dieser Stelle wirtschaftlich werden zu lassen, wird mit einer Preisprojektion und daher geringen Investitionskosten gearbeitet. Die verwendeten Parametrierungen sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Für die Verbrennungsmotoren als Alternative zu Brennstoffzellen wird mit Brennstoffkosten von 20 €/MWh und Investitionskosten von 700 €/kW sowie einer Lebensdauer von 20 Jahren gerechnet. Bei Brennstoffzellen wird von 5 Jahren Lebensdauer ausgegangen.

Tab. 1: Parametrierungen der Sensitivitätsanalyse

	Parametrierung		
	I	II	III
Investitionskosten Brennstoffzellen [€/kW]	1000	1000	1333
Brennstoffkosten Brennstoffzellen [€/MWh]	40	30	30

An dieser Stelle zeigt sich die Stärke der Gesamtsystemoptimierung und der Sensitivitätsanalyse, dass keine hochgradig exakten Marktdaten erforderlich sind, sondern mit Abschätzungen gerechnet werden kann und so der Einfluss dieser auf das Energiesystem ermittelt werden kann. Es ist damit ein Vergleich verschiedener Lösungen und Technologien möglich. Abbildung 15 zeigt die Ergebnisse dieser mehrdimensionalen Sensitivitätsanalyse für eine einwöchige Referenzkreuzfahrt. Auf der Applikate sind die Erzeugerleistungen dargestellt. Die Speichergrößen sind dort gemeinsam dargestellt, da sich die Werte in der gleichen Größenordnung befinden.

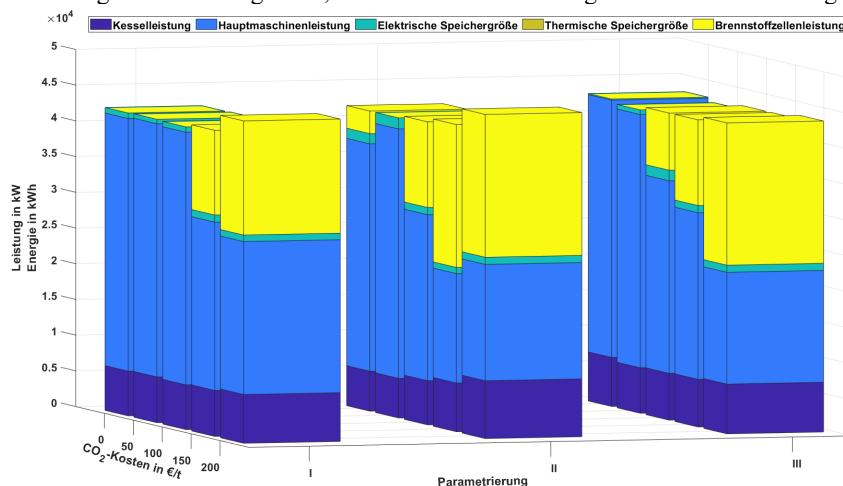


Abb. 15: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse eines Kreuzfahrtschiff-Energiesystems verschiedener Marktbedingungen

Es zeigt sich, dass mit zunehmenden CO<sub>2</sub>-Emissionskosten die Attraktivität von Brennstoffzellen zunimmt. Aufgrund der begrenzten Dynamik der Brennstoffzellen und des hohen Spitzenlastbedarfs, ist es dennoch sinnvoll, weiterhin zusätzlich Verbrennungsmotoren einzusetzen. Interessant ist die Integration von durchweg ca. 900 kWh-Batteriekapazität für ein effizientes Peak-Shaving. Zur Bereitstellung der erforderlichen Wärmemengen werden mit steigender Brennstoffzellenleistung höhere Heizkesselleistungen installiert. Dies ist in der geringeren

Abwärmeleistung der Brennstoffzellen begründet. Thermische Energiespeicher werden in der durchgeführten Parametrierung nicht installiert. Zwischen den Parametrierungen zeigt, sich, dass Parametrierung II die günstigste zur Brennstoffzellen-Integration ist. Im Vergleich zu Parametrierung I und III zeigt sich, dass die Brennstoffzellen sensibler auf die Erhöhung der Treibstoffkosten um 33% reagieren als auf die Erhöhung der Investitionskosten. Es zeigt sich aber klar, dass in der aktuellen Marktsituation ohne Besteuerung von CO<sub>2</sub>-Emissionen aus rein wirtschaftlichen Gründen Brennstoffzellen in der untersuchten Referenzkreuzfahrt nicht sinnvoll integrierbar sind.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Artikel wurde ein Systementwurf zur Entwicklung von Gleichspannungsnetzen vorgestellt. Es wurden die grundlegenden Einflussgrößen, das Vorgehen, Randbedingungen und Annahmen sowie erste Ergebnisse vorgestellt. DC-Netze stellen eine von verschiedenen Maßnahmen dar, die Emissionen von Schiffen zu senken und können Emissionsminderungen von 20 % ermöglichen. Die DC-Netze bieten dabei zahlreiche technische Vorteile, haben sich jedoch noch nicht als Stand der Technik etabliert, sodass Forschungsarbeit nötig ist. In der Entwicklung sind die verschiedenen Formen des Nutzenergiebedarfs zu berücksichtigen sowie die zeitliche und örtliche Verteilung des Bedarfs im Schiff. Bei Kreuzfahrtschiffen können so bis zu 25 % thermische Energie benötigt werden. DC-Netze ermöglichen dezentrale Netzstrukturen und Kopplungen mit den thermischen Versorgungssystemen, um so den Aufwand der Versorgungsleitungen zu reduzieren.

In zwei Forschungsprojekten werden DC-Netze entwickelt. Ziel ist, die Grundlage für einen technischen Standard auf verschiedenen Schiffstypen zu schaffen und einen Funktionsnachweis zu erbringen. Dazu werden in Power Hardware-in-the-loop Laboren Netzanalysen und Hardwaretests durchgeführt und in einem Mittelspannungslabor Hardwarekomponenten entwickelt. Es werden zahlreiche wissenschaftliche Fragestellungen zu Themen der Netzform, Sicherheit, Hardwareentwicklung, Konnektivität, Netzregelung/ -stabilität und der Systemoptimierung untersucht. Als Netzform wird im Niederspannungsbereich ein bipolares  $\pm 350$  V TN-S-Netz verfolgt. Im Mittelspannungsnetz wird ein 6 kV, IT-Netz angestrebt. Die Netzstruktur ist Gegenstand laufender Untersuchung sowohl im Mittel- als auch Niederspannungsnetz. Mit Hilfe einer Gesamtsystemoptimierung wird die kostenoptimale Struktur des Energiesystems ermittelt. Mit Hilfe der Schachtelung einer Betriebsoptimierung in eine Strukturoptimierung können verschiedene Markteinflussgrößen auf das Energiesystem abgebildet werden. So zeigt sich in einer ersten Analyse, dass bereits unter aktuellen Randbedingungen Batteriespeicher zur Spitzenlastreduktion sinnvoll sind, während Brennstoffzellen aufgrund ihrer höheren Kosten erst bei CO<sub>2</sub>-Emissionskosten von ca. 100 €/t wirtschaftlich werden. Im weiteren Fortschreiten der Projekte werden die Netzstrukturen weiter ausgearbeitet und simuliert. Ziel ist die Beantwortung der in Kapitel 4 vorgestellten wissenschaftlichen Fragestellungen.

## 7 Förderung

Die Projekte werden durch den Projektträger Jülich vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördert.

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



Projektträger Jülich  
Forschungszentrum Jülich

## Literaturangaben

- [1] Zukunftsinstitut GmbH: Der wichtigste Megatrend unserer Zeit, 2020. <https://www.zukunftsinstitut.de/artikel/der-wichtigste-megatrend-unserer-zeit/>, abgerufen am: 01.11.2021
- [2] Hannah Ritchie u. Max Roser: Energy, 2020. <https://ourworldindata.org/energy>, abgerufen am: 02.11.2021
- [3] Statista: Anteil der Verkehrsträger an den weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe im Jahr 2018, 2021. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/317683/umfrage/verkehrstraeger-anteil-co2-emissionen-fossile-brennstoffe/>, abgerufen am: 30.11.2021
- [4] Hannah Ritchie u. Max Roser: CO<sub>2</sub> and Greenhouse Gas Emissions, 2020. <https://ourworldindata.org/emissions-by-sector>, abgerufen am: 02.11.2021
- [5] IMO: Fourth Greenhouse Gas Study 2020, 2022. <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Fourth-IMO-Greenhouse-Gas-Study-2020.aspx>, abgerufen am: 30.11.2021

- [6] Bouman, E. A., Lindstad, E., Riialand, A. I. u. Strømman, A. H.: State-of-the-art technologies, measures, and potential for reducing GHG emissions from shipping – A review. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 52 (2017), S. 408–421
- [7] Joung, T.-H., Kang, S.-G., Lee, J.-K. u. Ahn, J.: The IMO initial strategy for reducing Greenhouse Gas(GHG) emissions, and its follow-up actions towards 2050. *Journal of International Maritime Safety, Environmental Affairs, and Shipping* 4 (2020) 1, S. 1–7
- [8] Ciezki, J. G. u. Ashton, R. W.: Selection and stability issues associated with a navy shipboard DC zonal electric distribution system. *IEEE Transactions on Power Delivery* 15 (2000) 2, S. 665–669
- [9] Jin, Z., Savaghebi, M., Vasquez, J. C., Meng, L. u. Guerrero, J. M.: Maritime DC microgrids - a combination of microgrid technologies and maritime onboard power system for future ships. 2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia). IEEE 2016 - 2016, S. 179–184
- [10] Jin, Z., Sulligoi, G., Cuzner, R., Meng, L., Vasquez, J. C. u. Guerrero, J. M.: Next-Generation Shipboard DC Power System: Introduction Smart Grid and dc Microgrid Technologies into Maritime Electrical Netowrks. *IEEE Electrification Magazine* 4 (2016) 2, S. 45–57
- [11] Kim, K., Park, K., Roh, G. u. Chun, K.: DC-grid system for ships: a study of benefits and technical considerations. *Journal of International Maritime Safety, Environmental Affairs, and Shipping* 2 (2018) 1, S. 1–12
- [12] Zahedi, B. u. Norum, L. E.: Efficiency analysis of shipboard dc power systems. IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. IEEE 2013 - 2013, S. 689–694
- [13] Domingues-Olavarria, G., Fyhr, P., Reinap, A., Andersson, M. u. Alakula, M.: From Chip to Converter: A Complete Cost Model for Power Electronics Converters. *IEEE Transactions on Power Electronics* 32 (2017) 11, S. 8681–8692
- [14] Kanellos, F. D., Prousalidis, J. u. Tsekouras, G. J.: Optimal Active Power Management in All Electric Ship Employing DC Grid Technology. *Operational Research in Business and Economics*. Cham: Springer International Publishing 2017, S. 271–284
- [15] Baldi, F., Ahlgren, F., Nguyen, T.-V., Thern, M. u. Andersson, K.: Energy and Exergy Analysis of a Cruise Ship. *Energies* 11 (2018) 10, S. 2508
- [16] Baldi, F., Johnson, H., Gabriellii, C. u. Andersson, K.: Energy and exergy analysis of ship energy systems – the case study of a chemical tanker. *International Journal of Thermodynamics* 18 (2015) 2, S. 82
- [17] Hansen, J. F., Lindtjörn, J. O., Vanska, K. u. Abb, O.: Onboard DC Grid for enhanced DP operation in ships (2011)
- [18] Staudt, V., Bartelt, R. u. Heising, C.: Fault Scenarios in DC Ship Grids: The advantages and disadvantages of modular multilevel converters. *IEEE Electrification Magazine* 3 (2015) 2, S. 40–48
- [19] Cupelli, M., Ponci, F., Sulligoi, G., Vicenzutti, A., Edrington, C. S., El-Mezyani, T. u. Monti, A.: Power Flow Control and Network Stability in an All-Electric Ship. *Proceedings of the IEEE* 103 (2015) 12, S. 2355–2380
- [20] Fan, X., Yang, G., Xiao, F., Wang, R. u. Guo, P.: Linear and Nonlinear Composite Control Strategy of a Three-Level Phase-Shift PWM DC-DC Converter for Electric Ship MVDC Application. *Proceedings of the 37th Chinese Control Conference*. Piscataway, NJ: IEEE 2018, S. 361–367
- [21] van Nuffel, L. u. Gorenstein Dedecca, J.: Sector coupling: how can it be enhanced in the EU to foster grid stability and decarbonise? *European Parliament* (2018)
- [22] Cotorcea, A. u. Visa, I.: Analysis of the opportunity to implement solar-thermal systems on ships. *Case study: The voyage of a cruise ship in the Black Sea* 2 (2017), S. 49–58
- [23] Gentner, C.: Einbindung von Brennstoffzellenanlagen in schiffstechnische Systeme, TUHH Universitätsbibliothek 2018
- [24] Stolten, P. D., Samsun, D. R. C. u. Garland, D. N.: Fuel cells. Data, facts, and figures. Weinheim: Wiley-VCH 2016
- [25] Baldi, F., Moret, S., Tammi, K. u. Maréchal, F.: The role of solid oxide fuel cells in future ship energy systems. *Energy* 194 (2020), S. 116811
- [26] Ihrens, J., Möws, S., Wilkening, L., Kern, T. A. u. Becker, C.: The Impact of Time Delays for Power Hardware-in-the-Loop Investigations. *Energies* 14 (2021) 11, S. 3154
- [27] Liu, Y.-C., Chang, E.-C., Shyu, J.-L. u. Chen, X.-G.: Dynamic Analysis of the Leakage Current Corrosion for the Non-Grounded DC Railway Systems. *International Journal of Electrical Energy* 3 (2015) 4
- [28] Kannengießner, A.: Entwicklung eines generischen Modells zur Einsatzoptimierung von Energiespeichern für die techno-ökonomische Bewertung stationärer Speicheranwendungen. Zugl.: Dortmund, Techn. Univ., Diss., 2013. UMSICHT-Schriftenreihe / Fraunhofer-Institut Umwelt-, Sicherheits-, Energietechnik UMSICHT, Bd. 69. Oberhausen: Laufen 2014