

Zukunft der elektrischen Bordnetze von Schiffen – Stand der Technik und Ausblick

Philipp Wagner*, Detlef Schulz
 Professur für Elektrische Energiesysteme
 Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg
 Hamburg, Deutschland
 *philipp.wagner@hsu-hh.de

Kurzfassung – Die Topologie elektrischer Schiffsbordnetze verändert sich aktuell, denn die konventionellen Wechselspannungsverteilstnetze werden durch Gleichspannungsnetze überlagert. Dieses Paper verdeutlicht die verschiedenen Topologien mit ihren jeweiligen Anwendungsbeispielen. Zuletzt wird ein Ausblick auf die zukünftige Topologie gegeben werden. Dazu werden Kriterien zur Auslegung elektrischer Schiffsbordnetze eingeführt.

Stichworte – elektrisches Bordnetz, Schiff, DC-Grid, DC-Netz

NOMENKLATUR

AC	Wechselstrom (engl. alternating current)
DC	Gleichstrom (engl. direct current)
DC-Grid	elektrisches Gleichspannungsverteilstnetz (engl. direct current grid)
E-DiMot	Elektro-Dieselmotor mit gekoppeltem Generator zur Spannungserzeugung
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
HVDC	Hochspannungsgleichstrom (engl. high voltage direct current)
LVDC	Netzennspannung
MVDC	Medium voltage direct current
PTI	Bordnetzgenerator arbeitet als Synchronmotor (engl. power take in)
PTO	Bordnetzgenerator auf Antriebswelle (engl. power take out)
POD	Propellergondel (auch Pod-Antrieb oder Azi-Pod genannt)
USV	Unterbrechungsfreie Stromversorgung
QSA	Querstrahlsteueranlage

I. EINLEITUNG

Moderne Schiffsbordnetze besitzen neben dem elektrischen Wechselspannungsverteilstnetz auf der Hauptnetzebene mit einer Netzennspannung von ca. $U_{nN} = 440 \text{ V}$ bis 690 V auch zunehmend ein Gleichspannungsnetz, das eine Spannung von wenigen 100 V bis hin zu mehreren kV aufweist [1]. Das Gleichspannungsnetz oder DC-Grid ist in der Spannungshöhe variabel innerhalb definierter Spannungsbänder [2]. Die Wahl der Spannungshöhe ist abhängig von verschiedenen Faktoren

und lässt sich in standardisierte Spannungshöhen gem. IEEE 45.1-2017 einordnen, siehe TABELLE III [1, S. 31].

TABELLE I: STANDARDISIERTE SPANNUNGSHÖHEN GEM. IEEE 45.1-2017

Standard	AC [V]	DC [V]
Spannungserzeuger	120, 208, 230, 240, 380, 450, 480, 600, 690, 2400, 3300, 4160, 6600, 11 000, 13 800	120, 240 MVDC Level in IEEE Std 1709
Verbraucher	115, 200, 220, 230, 350, 440, 460, 575, 660, 2300, 3150, 4000, 6300, 10 600, 13 200	12, 24, 28, 115, 230, 270, 380 MVDC Level in IEEE Std 1709

Die Auswahl der AC- oder überlagerten DC-Technologie kann mittels verschiedener Kriterien getroffen werden, Hauptkriterium ist die zu versorgende elektrische Last. So unterscheidet die IEEE 45.1-2017 als praxisbezogene Empfehlung 4 Leistungsklassen:

- kleine Schiffe bis zu 15 kW elektrische Gesamtlast,
- mittlere Schiffe bis zu 100 kW ,
- große Schiffe mit mehreren unterschiedlichen Spannungsebenen
- und Schiffe mit sehr großem elektrischen System [1, S. 31].

DC-Netze für Schiffe gewinnen an Bedeutung aufgrund der fallenden Kosten für die Betriebsmittel und Komponenten. Gleichzeitig steigen die Wirkungsgrade der Komponenten, sodass die Gleichspannungstechnologie bevorzugt wird [2]. Weiterhin gibt es bei der Auswahl der Kombination von Gleichspannungs- mit Wechselspannungsnetzen bei entsprechender Auswahl einer ausreichenden Spannungshöhe Gewichtsvorteile gegenüber der reinen Wechselspannungstechnik [3]. In AC-Schiffnetzen sind zahlreiche Stromrichter zum effizienten Teillastbetrieb von Motoren verbaut, die mittels eines Gleichspannungszwischenkreises arbeiten. Die Einbindung der Motoren mit kleineren dezentralen Wechselrichtern, die aus dem DC-Netz versorgt werden, kann Umrichtertechnik einsparen. Der reduzierte Einsatz von Leistungselektronik kann ebenso die Zuverlässigkeit der Technik erhöhen. Alternative Energiequellen, wie

Brennstoffzellen, Batterien oder Fotovoltaik erzeugen eine Gleichspannung an den Ausgangsklemmen. Die Kopplung all dieser Komponenten in einem DC-Netz vermeidet die zahlreichen verlustbehafteten Energiewandlungen eines AC-Netzes für Gleichspannungsverbraucher.

II. METHODIK

Es werden die verschiedenen Bordnetztopologien von Schiffen vorgestellt und die Gründe der Entwicklung hin zum DC-Netz vorgestellt. Für die verschiedenen elektrische Energieversorgungssysteme wird zu Beginn des jeweiligen Abschnitts die typische Energieerzeugung bis zum Bordnetz beschrieben. Kleinere reine Gleichspannungsbordnetze, wie von Sportbooten und Yachten werden in diesem Papier nicht betrachtet, da die Leistungsaufnahme im Vergleich zu Schiffen deutlich geringer ist.

III. ÜBERBLICK DER BORDNETZ-TOPOLOGIEN

Begonnen wird mit den klassischen Topologien, die ihre Relevanz bei Schiffen mit sehr großen elektrischen Systemen und hoher elektrischer Leistung hat.

A. Wechselspannungstopologie

1) Grundlagen und Spannungserzeugung

Die elektrische Energieerzeugung wird grundsätzlich auf zwei Wegen realisiert. Zum einen wird ein an die Propellerwelle mittels Getriebe aufgebracht Generator genutzt, um neben Vortrieb gleichzeitig elektrische Energie zu erzeugen. Durch den direkten Zusammenhang der Drehzahl des Drehstrom-Synchrongenerators n_s ergibt sich aus dem Verhältnis der festen Frequenz f der Spannung und der Polpaarzahl p des Generators nach der Formel (1)

$$n_s = \frac{f}{p} \tag{1}$$

Daraus ergibt sich die Vorgabe, dass die Wellendrehzahl vorgegeben ist. Mit der Festlegung zweier Werte ist die effizienteste Konstellation wählbar. Erstens ist die Polpaarzahl p des Generators ganzzahlig vorgebar. Typische Polpaarzahlen sind für die üblichen beiden Frequenzen in TABELLE II angegeben. Die zweite festlegbare Größe ist die Übersetzung des Getriebes.

TABELLE II: BEISPIELE FÜR MOTORENDREHZAHL FÜR VERSCHIEDENE POLPAARE

Anzahl Polpaare	Drehzahl bei Netzfrequenz	
	50 Hz	60 Hz
1	3000 U/min	3600 U/min
2	1500 U/min	1800 U/min
3	1000 U/min	1200 U/min
4	750 U/min	900 U/min

2) Topologien

Eine für die Wechselspannungstopologie typische Energieerzeugung ist in ABILDUNG 1 (A) dargestellt. Neben dem Wellengenerator kommen zusätzlich auf die maximale elektrische Last ausgelegte Anzahl von Hilfs-Diesel-Generatoren (E-DiMot), die ebenso in das Bordnetz einspeisen. Diese Aggregate geben dem Schiffsentwurf auch die notwendigen Freiheitsgrade, Wellendrehzahlbereiche zu nutzen, in denen der Wellengenerator nicht nutzbar ist. Um den Wellengenerator, angetrieben von der effizienten, leistungsstarken Hauptmaschine, mit verschiedenen Schiffsgeschwindigkeiten nutzen zu können, ist der Schiffspropeller mit einem variablen Anstellwinkel. Die Steigung kann mittels

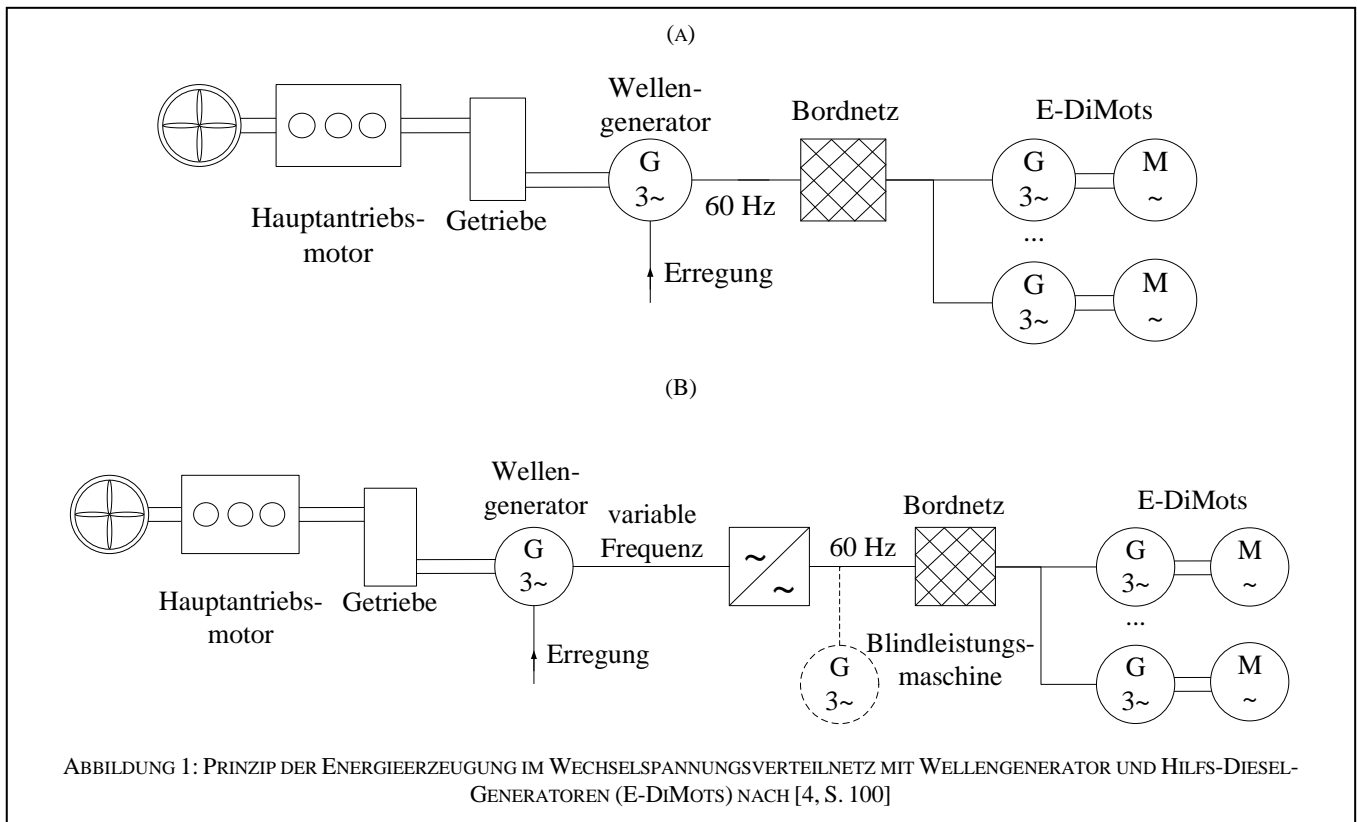


ABBILDUNG 1: PRINZIP DER ENERGIEERZEUGUNG IM WECHSELSPANNUNGSVERTEILNETZ MIT WELLENGENERATOR UND HILFS-DIESEL-GENERATOREN (E-DiMOTS) NACH [4, S. 100]

mehrere von 0 ° (Nullschub) bis hin zur Konstruktionssteigerung (maximaler Vortrieb) verstellt werden. Diese Auslegung erlaubt es, schnelle Veränderungen der Fahrtstufen vorzunehmen. Dies ist im Manövrierbetrieb besonders gegenüber der langsameren Drehzahlverstellung der Hauptmaschine vorteilhaft. Bei der Nutzung eines Frequenzumrichters in ABBILDUNG 1 (B) kann die Wellendrehzahl unabhängig von der Netzfrequenz betrieben werden. Wenn ein netzgeführter Frequenzumrichter eingesetzt wird, muss ein Generator zur Blindleistungsbereitstellung hinzugefügt werden. Bei selbstgeführten Umrichtern ist die Wirk- und Blindleistungsbereitstellung gewährleistet.

Das Bordnetz eines Kreuzfahrtschiffes ist in ABBILDUNG 2 dargestellt. Die Spannungserzeugung wird durch 6 dieselektrische Generatoren realisiert. Es ist weiterhin ein Not-Diesel-elektrischer Generator vorhanden, der beim Ausfall der Hauptgeneratoren ein Minimum an elektrischer Energie bereitstellt. Die Generatoren sind in diesem Beispiel direkt an die Mittelspannungssammelschiene mit einer Nennspannung von $U_{nN} = 11 \text{ kV}$ angeschlossen. Die elektrischen Großverbraucher, wie die in Gondeln unter dem Schiff befindlichen Propellergondel (PODs) und Bug- oder Heckstrahlruder (QSAs), werden mit Frequenzumrichtern betrieben.

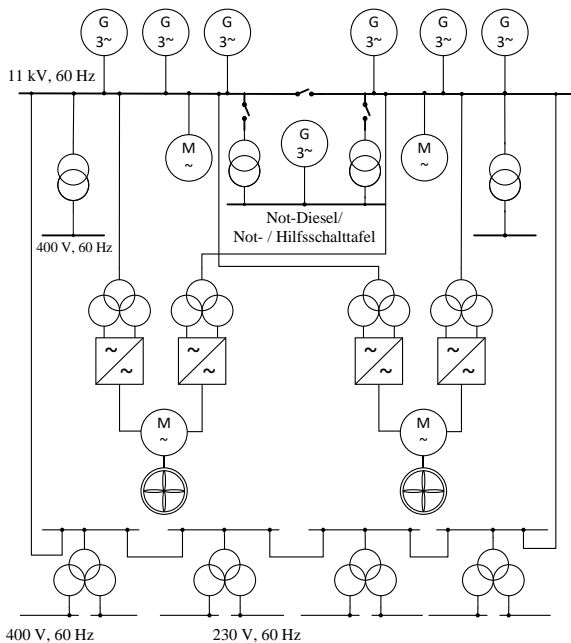


ABBILDUNG 2: MITTELSPANNUNGSANLAGE EINES KREUZFAHRTSCHIFFES MIT POD (PROPELLERGONDEL)-ANTRIEB NACH [5]

In

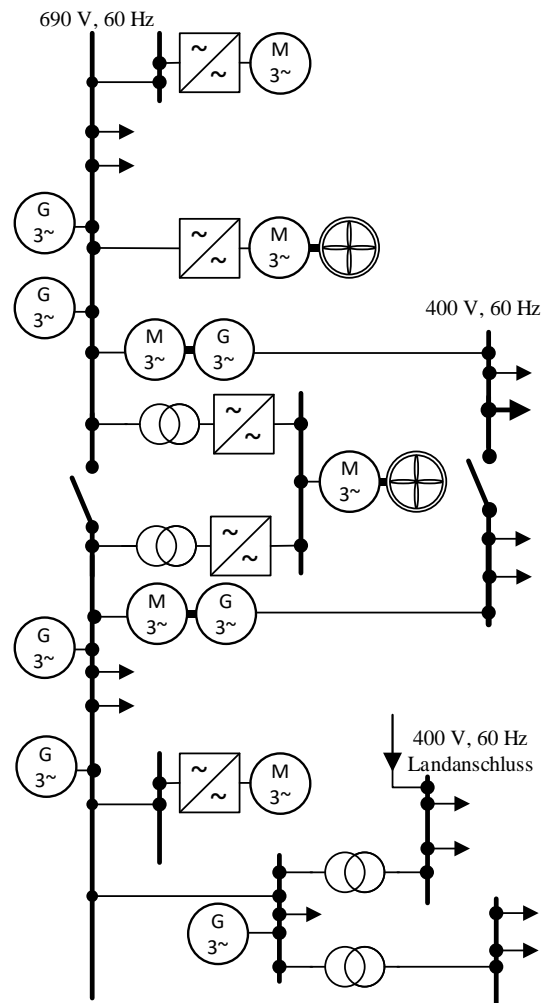


ABBILDUNG 3 ist ein Niederspannungs-Wechselspannungsnetz eines Tankers abgebildet. Die 4 Synchrongeneratoren speisen in eine mittels Kuppelschalter trennbare Sammelschiene mit einer Spannung von $U_{nN} = 690 \text{ V}$ ein. Die elektrischen Großverbraucher, wie der elektrische Hauptantriebsmotor, werden zur Drehzeleinstellung über Frequenzumrichter betrieben. Weitere Großverbraucher, wie QSA, Ladungspumpen, sind ebenfalls über einen Frequenzumrichter an die Hauptnetzebene angeschlossen. Weitere Drehstromgroßverbraucher sind ebenso direkt von der Sammelschiene versorgt. Kleinere Verbraucher sind aus einem Unternetz versorgt, das über einen Transformator gespeist wird.

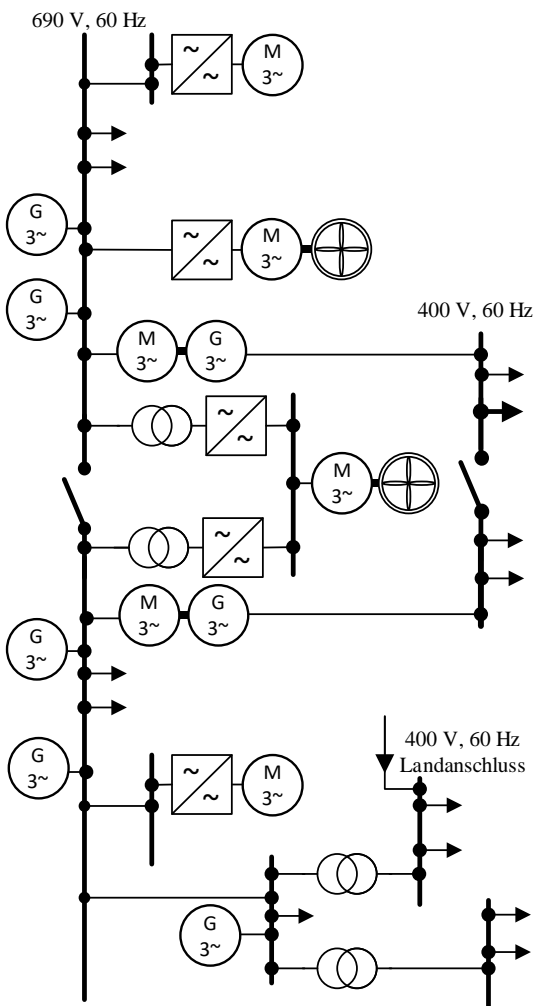


ABBILDUNG 3: WECHSELSPANNUNGSTOPOLOGIE MIT VERSCHIEDENEN FÜR EIN TANKSCHIFF TYPISCHEN ELEKTRISCHEN VERBRAUCHERN NACH [4, S. 102]

B. Gleichspannungsverteilstnetz mit unterlagertem Wechselspannungsnetz

Mit den Fortschritten in der elektrischen Energietechnik wurden auch hybride Bordnetze entwickelt. Diese kombinieren sowohl Gleichspannung als auch Wechselspannung, um Effizienz und Flexibilität zu erhöhen. Hierbei handelt es sich um ein innovativeres Konzept, das in modernen Schiffen zunehmend Verwendung findet. Hauptmerkmale von hybriden Bordnetzen sind:

- Gleichspannungssysteme: Gleichspannung wird für bestimmte kritische Bereiche wie Hauptmaschinen, Antriebssysteme und Energiespeicherung verwendet. Gleichspannung bietet den Vorteil höherer Effizienz bei der Energieübertragung über längere Strecken und ermöglicht die Integration erneuerbarer Energiequellen.
- Wechselspannungssysteme: Wechselspannung wird für die allgemeine Stromversorgung und nicht-kritische Verbraucher verwendet.
- Vorteile der hybriden Netze: reduzierter Energieverbrauch, erhöhte Flexibilität bei der Energieverteilung, bessere Integration von erneuerbaren Energiequellen und Energiespeicherung.

Die Wahl zwischen reinen Wechselspannungsnetzen und hybriden Netzen hängt von verschiedenen Faktoren ab, darunter der Art des Schiffes (Kriegsschiff, Frachtschiff, Passagierschiff usw.), der geplanten Einsatzdauer, der Energieeffizienz, der Integration von erneuerbaren Energien und der Gesamtleistung des Systems.

1) Grundlagen und Energieerzeugung

Die Spannungserzeuger können bei einem Gleichspannungsverteilstnetz flexibler ausgewählt werden. Herkömmliche dieselelektrische Generatoren können durch eine variable Frequenz im kraftstoffverbrauchsoptimierten Betriebspunkt betrieben werden, da die erzeugte Spannung anschließend gleichgerichtet wird. Andere Kraftmaschinen, wie Wellengeneratoren, Dampf- oder Gasturbinen können ebenfalls unabhängig von der Drehzahl in das DC-Netz eingebunden werden. Zusätzlich ist es möglich, zentral oder dezentral Gleichspannungserzeuger einzubinden. Für Schiffsanwendungen sind primär 3 Erzeuger bzw. Speicher denkbar:

- Batteriespeicher
- Brennstoffzellen-Systeme
- Fotovoltaikanlagen

Die verschiedenen regenerativen Erzeuger sind in ABBILDUNG 2 neben der klassischen Kraftmaschine dargestellt.

Die Spannung des DC-Netzes ist entsprechend der Bemessungsleistung der großen elektrischen Verbraucher gewählt, damit der fließende Laststrom beherrschbar in Bezug auf Leistungs- und Lastschalter ist [3]. Ein Wechselspannungssystem mit einer Nennspannung von $U_{nN} = 690 \text{ V}$ könnte danach durch ein DC-Netz mit mindestens $U_{nN} = 796 \text{ V}$ ersetzt werden. Der Wert ergibt sich nach der Formel (2) nach [3].

$$U_{DC} = \frac{2}{3} \sqrt{3} U_{nN} \approx 1,155 \cdot U_{nN} \quad (2)$$

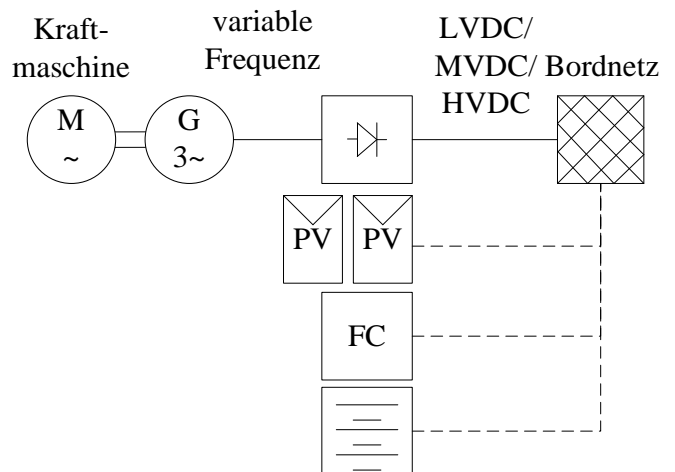
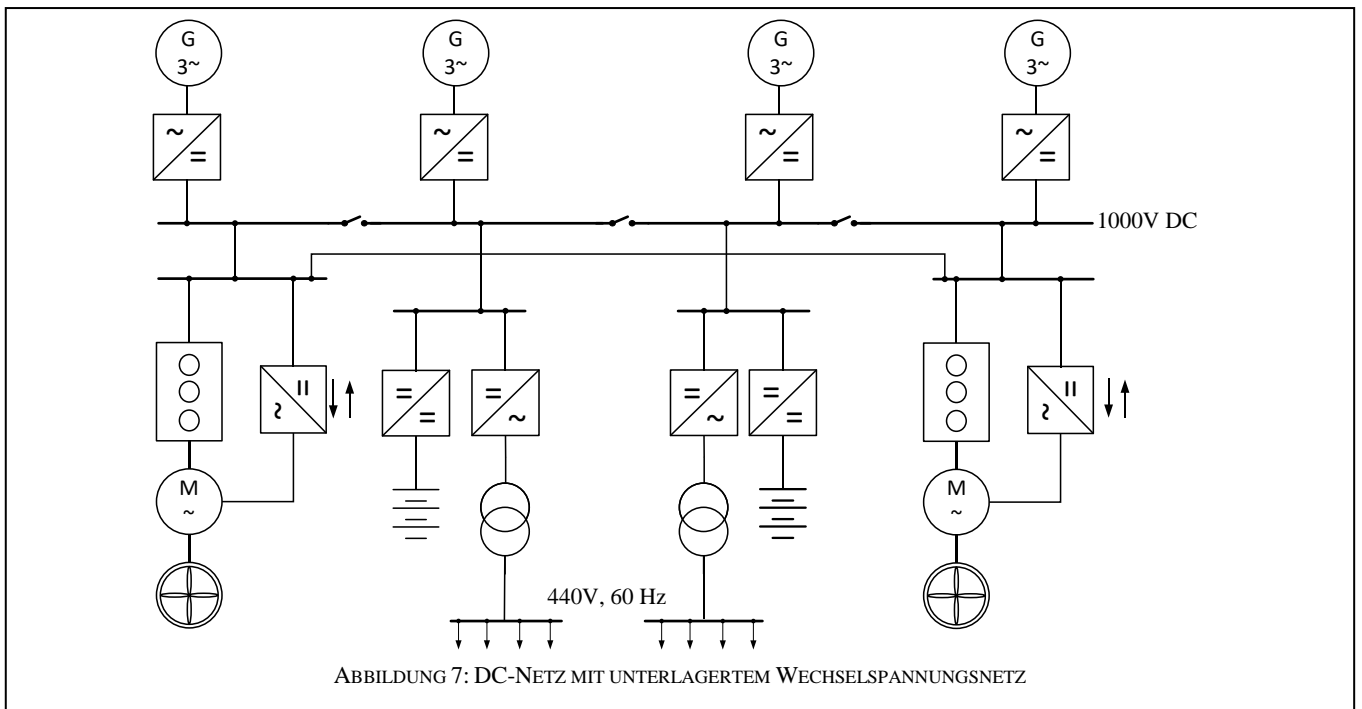


ABBILDUNG 4: ENERGIEERZEUGUNG BEI DC-NETZ TOPOLOGIE

2) Zentrales Konzept

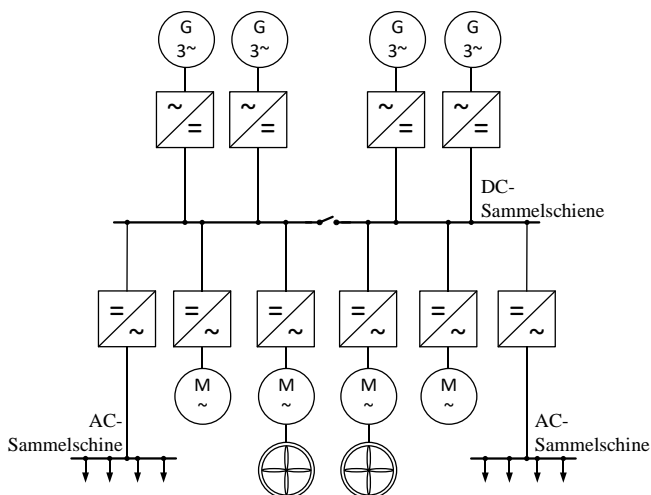
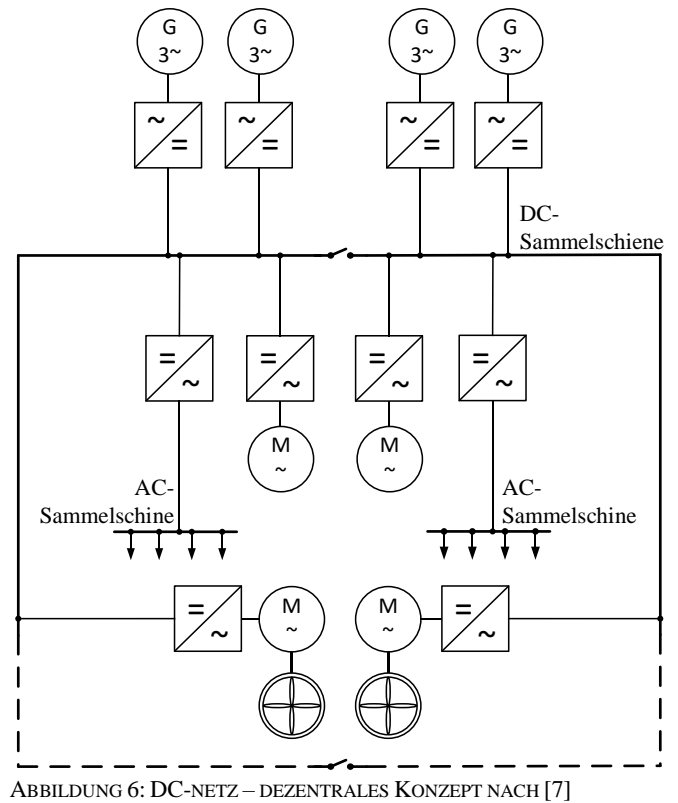
Bei dieser Topologie existiert eine zentrale DC-Sammelschiene, auf die die Generatoren den gleichgerichteten Strom speisen. Von der Sammelschiene werden die Großverbraucher direkt versorgt [6]. Das AC-Netz wird durch



Wechselrichter und je nach Spannungsunterschied vom DC-Netz und vorgesehenem Unternetz mit Transformatoren erzeugt. Das AC-Netz versorgt entsprechend der vorgestellten Wechselspannungstopologie die weiteren elektrischen Verbraucher entsprechend der Darstellung in ABBILDUNG 5.

3) Dezentrales Konzept

Das dezentrale Konzept unterscheidet sich vom zentralen dadurch, dass die DC-Sammelschiene sich über einen weiten Bereich des Schiffs erstreckt. Erst dezentral, am Ort des Bedarfs wird die Gleichspannung von der Sammelschiene abgegriffen und genutzt beziehungsweise zur Nutzung umgewandelt. Eine Erweiterung dieses Konzepts ist eine Ring-Struktur, wie sie in ABBILDUNG 6 gestrichelt dargestellt ist.



IV. TECHNOLOGIEWECHSEL ZUR GLEICHSPANNUNGSTOPOLOGIE

In den frühen Zeiten der elektrischen Energieversorgung waren DC-Netze die bevorzugte Methode zur Energieverteilung. Dennoch setzten sich die Vorteile von AC-Systemen bei der Energieübertragung durch. Diese Vorteile liegen hauptsächlich in der einfachen und effizienten Umwandlung zwischen verschiedenen Spannungsebenen sowie in der effizienten Übertragung von Energie über große Entfernungen. AC-Systeme ermöglichen auch eine einfachere Abschaltung von Fehlerströmen und den Betrieb großer Maschinen mithilfe von Drehstrommotoren.

A. Energieverteilung

AC-Systeme werden sowohl an Land als auch auf Schiffen zunehmend weniger verwendet. In den letzten Jahren haben Fortschritte in der Leistungselektronik und steigende Energie- und Emissionskosten dazu geführt, dass eine reine AC-Versorgung immer weniger den Anforderungen an Effizienz und Integration von alternativen Energiequellen gerecht werden kann. Wenn mechanische Lasten, die einen Großteil des Energiebedarfs ausmachen, in Teillast betrieben werden, ist die effizienteste Methode zur Leistungsreduzierung eine Verringerung der Drehzahl des Motors. In AC-Netzen sind die Drehstrommotoren jedoch an die feste Netzfrequenz gebunden. Änderungen der Drehzahl sind daher nur durch den Einsatz von leistungselektronischen Frequenzumrichtern möglich, die wiederum Gleichstrom benötigen [2, S. 2]. Mit der Nutzung von DC-Netzen und angepasster Spannungsversorgung kann die Anzahl der Wandlung von Spannungen reduziert werden und somit die jeweiligen Verluste begrenzt werden.

B. Vorteile der Gleichspannungstechnik

Vorteile der Gleichspannungstechnik sind u. a.:

- für DC-Lasten werden grundsätzlich nur 2 statt 3 Kabel benötigt, damit kann Kabelführung und Gewicht eingespart werden;
- keine Verluste durch Blindströme in den Übertragungskabeln;
- keine Spannungsfälle durch Kabelimpedanzen, nur ohmsche Verluste;
- Flexibilität bei der Auswahl der Energiequelle, so sind erneuerbare Energiequellen einbindbar;
- Stabilität des Netzes, da nur die Netzspannung innerhalb eines Toleranzbandes geregelt werden muss;
- Grundsätzlich ist nur die Regelung der Wirkleistung notwendig.
- Redundanz ist gegeben durch die Einbindung einer unterbrechungsfreien Spannungsversorgung (USV) auf DC-Ebene statt dezentraler USV auf der separaten 24 V- Gleichspannungsebene.
- DC-Systeme sind effizienter als AC-Systeme, da der Betrieb der Diesel-Aggregate in einem auf den Kraftstoffverbrauch optimierten Betriebspunkt möglich ist [8, S. 133-138]

C. Herausforderungen der Gleichspannungstechnik

Den Vorteilen gegenüber stehen einige technologische Herausforderungen, die bei der Wechselspannungstechnik beherrschbar sind:

- einfache Leistungsschalter im Vergleich zu Gleichstrom, da elektrische Lichtbögen bei Nulldurchgang des Stroms gelöscht werden
- einfache und zuverlässige Anpassung der Spannungsebene durch Transformatoren
- Die Impedanz des Kabels begrenzt automatisch Kurzschlussströme.
- Herkömmliche Spannungserzeuger, überwiegend Synchrongeneratoren, erzeugen Wechselspannung

- Der überwiegende Teil der elektrischen Verbraucher ist motorisch und benötigt ein dreiphasiges AC-System. Viele der Verbraucher sind jedoch mit einem Frequenzumrichter ausgestattet und damit mit DC-Zwischenkreis.

D. Zusammenfassung

Das Konzept des DC-Netzes hat besonders an Bord von Schiffen mit variablem Lastprofil weitere Vorteile:

- Schwachlastbetrieb der Motoren durch erhöhte Anforderungen an die Redundanz und Standkraft und damit einhergehend besseres Betriebsstundenmanagement, Reduzierung von Wartungsintervallen
- temporäre vollwertige Ersatzstromversorgung bei Ausfall aller Energieerzeuger durch Batteriepufferung der Gleichspannungsebene
- Reduzierung der Anzahl und Auslegungsgröße von Energiewandlern durch direkte Nutzung der Gleichspannung, damit geringere Auswahrscheinlichkeit vieler unterschiedlicher Komponenten

V. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In diesem Paper wurden verschiedene Bordnetze von Schiffen vorgestellt. Die DC-Netze bieten dabei zahlreiche technische Vorteile, setzen sich zunehmend als Stand der Technik durch. In weiteren Forschungsarbeiten werden aktuell Konzepte zum Einsatz von Gleichspannungsnetzen auf MVDC und HVDC- Ebene entwickelt und getestet. Ein weiterer Schwerpunkt ist die dafür notwendige DC-Schutztechnik und die Bewertung der Netzqualität, elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) und Ausfallsicherheit, die Vor- und Nachteile sind in TABELLE III gegenübergestellt.

TABELLE III: GEGENÜBERSTELLUNG AUSGEWÄHLTER KRITERIEN DER VERSCHIEDENEN TECHNOLOGIEN

Technologie	AC-Netz	DC Hauptnetz- mit AC- Unternetz
Kriterium		
Regelungskriterien	Spannungsamplitude, Frequenz	Spannungshöhe
Effizienz	induktive, kapazitive und ohmsche Verluste	ohmsche Verluste
Integration zusätzlicher Energiequellen ins Netz	schwierig, Phasenlage, Spannungshöhe und Frequenz abgeglichen werden müssen	einfach, Spannungshöhe muss angeglichen werden
Integration erneuerbarer Energien	komplexer	einfacher
Blindleistungsbereitstellung durch Generatoren	notwendig	nicht notwendig
Spannungs- und Stromunsymmetrien	durch ungleichmäßig verteilte Lasten	bei unipolaren

Technologie Kriterium	AC-Netz	DC Hauptnetz- mit AC- Unternetz
		Netzen nicht möglich
Direkte Nutzbarkeit der Spannung für Verbraucher	bei Asynchron- motoren ohne Drehzahl- verstellung einfach möglich	bei Motoren, die drehzahl- geregelt werden, entfällt die Gleichrichter- stufe des Umrichters, keine PFC Stufe notwendig

VI. LITERATUR

VII. LITERATUR

- [1] *IEEE Recommended Practice for 1 kV to 35 kV Medium-Voltage DC Power Systems on Ships*, Piscataway, NJ, USA.
- [2] T. S. Hartwich, K. Sommer, T. A. Kern und L. Haffner, „DC-Netze: Ein ganzheitlicher Systementwurf für verschiedene Schiffstypen,“ 2023, doi: 10.15480/882.4392.
- [3] M. C. Di Piazza, M. Luna, G. La Tona, M. Pucci, A. Accetta und A. Pietra, „A New Method for Selecting the Voltage Level for an Advantageous Transition to DC Distribution in Ships,“ in *2018 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC)*, Nottingham, 2018, S. 1–5, doi: 10.1109/ESARS-ITEC.2018.8607438.
- [4] K. Heuck, K.-D. Dettmann und D. Schulz, *Elektrische Energieversorgung*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013.
- [5] hochhaus-schiffsbetriebs Webseite! „Elektrische Anlagen auf Fähr- und Kreuzfahrtschiffen.“ <https://hochhaus-schiffsbetrieb.jimdo.com/elektrische-anlagen-auf-f%C3%A4hr-und-kreuzfahrtschiffen/> (Zugriff am: 28. August 2023).
- [6] Z. Huan, W. Guilian, L. Hongyang, D. Yi und L. Meng, „Adaptability Research and Construction Scheme of DC Distribution Network Topologies,“ in *2018 2nd IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC)*, Xi'an, 2018, S. 1114–1118, doi: 10.1109/IMCEC.2018.8469222.
- [7] Jan-Fredrik Hansen, John Olav Lindtjörn, „Gleichstrom- netz an Bord Neues Konzept für Stromversorgungs- und Antriebssysteme auf Schiffen ABB,“ *ABB technik*, Jg. 2011, 2|12, S. 28–33, 2011. [Online]. Verfügbar unter: https://library.e.abb.com/public/b62565508d138c7bc1257a250032be41/28-33%20m212_DE_72dpi.pdf
- [8] T. Völker, *Hybridantriebskonzepte auf Schiffen: Tagungsband zur NEIS 2015* (S. 133-138). Wiesbaden, GERMANY: Springer Vieweg, 2016.