



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorthesis

Björn Robert Leckzut

Untersuchung und Bewertung von Peak Shaving
und hybriden Antrieben auf Schiffen

Björn Robert Leckzut
Untersuchung und Bewertung von Peak Shaving
und hybriden Antrieben auf Schiffen

Bachelorthesis eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung
im Studiengang Informations- und Elektrotechnik
am Department Informations- und Elektrotechnik
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer : Prof. Dr. -Ing. Karl-Ragmar Riemschneider
Zweitgutachter : Prof. Dr. -Ing. Michael Röther

Abgegeben am 29. August 2018

Björn Leckzut

Thema der Bachelorthesis

Untersuchung und Bewertung von Peak Shaving und hybriden Antrieben auf Schiffen

Stichworte

Lithium-Ionen-Batterien, Antriebssysteme, Hybridantriebe, Schiffe, Peak Shaving, Lastprofile, Anwendungsfälle Batteriesysteme, Konzipierung Batteriesystem

Kurzzusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit werden die Grundlagen von Lithium-Ionen-Batterien, konventionellen Antriebssystemen, Hybridantrieben und Anwendungsmöglichkeiten von Batteriesystemen dargestellt. Lastprofile der Fahrmotoren und Dieselgeneratoren von Schiffen werden untersucht und analysiert. Auf Grundlage dieser Auswertungen werden Batteriesysteme für verschiedene Anwendungsfälle konzipiert und bewertet.

Björn Leckzut

Title of the paper

Investigation and evaluation of peak shaving and hybrid drives on vessels

Keywords

Lithium-ion batteries, drive systems, hybrid drive systems, vessels, peak shaving, load profile, use caes battery systems, conception battery systems

Abstract

This thesis describes the fundamentals of lithium-ion-batteries, conventional drive systems, hybrid drives and applications for battery systems. Load profiles of the main propulsion drive and diesel generators of vessels are examined and analyzed. Based on the evaluations various battery systems are designed and evaluated for different applications.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich all jenen danken, die durch ihre fachliche und persönliche Unterstützung zum Gelingen dieser Bachelorarbeit beigetragen haben.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Karl-Ragnar Riemschneider für die Unterstützung und die angenehme Betreuung während der Bearbeitung dieser Abschlussarbeit.

Auch Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Röther, in der Rolle des Zweitprüfers, will ich in diesem Zusammenhang meinen Dank aussprechen.

Insbesondere möchte ich Herrn Dipl.-Ing. Frank Zühlsdorf, Herrn Dipl.-Ing. Michael Kranz und Herrn Dipl.-Ing. Rainer Genilke für die firmeninterne Betreuung und das persönliche Vertrauen während meines gesamten dualen Studiums bei der Wärsilä SAM Electronics GmbH danken.

Weiterhin danke ich dem Unternehmen eniram für die Bereitstellung der Lastprofile, ohne die die Ausarbeitung dieser Thesis nicht möglich gewesen wäre.

Inhaltsverzeichnis

1. Einführung	9
1.1. Motivation	9
1.2. Ausgangssituation	11
1.3. Problemstellung	12
1.4. Zielsetzung	12
2. Theoretische Grundlagen Batterien	14
2.1. Überblick über Lithium-Ionen-Batterien	14
2.2. Aufbau und Funktionsweise von Lithium-Ionen-Batterien	14
2.3. Zellspannung	16
2.4. Alterungsprozess	19
2.4.1. Kalendarische Alterung	19
2.4.2. Zyklische Alterung	21
2.5. Batterietypen	24
2.5.1. Auswahlkriterien	24
2.5.2. Nickel-Metallhydrid-Batterie	26
3. Antriebssysteme	28
3.1. Übersichtsschaltbild	28
3.2. Wellengenerator	29
3.3. Frequenzumrichter	31
3.4. Auslegung Dieselgenerator	33
3.5. Konventionelle und hybride Antriebe	34
3.5.1. Diesel-elektrischer Antrieb und serieller Hybridantrieb	34
3.5.2. Diesel-mechanischer Antrieb und paralleler Hybridantrieb	38
4. Anwendungsfälle für Batteriespeicher	42
4.1. Unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV)	42
4.2. Versorgung eines hybriden Antriebssystems	42
4.3. Standby-Betrieb	44
4.4. Versorgung eines rein elektrischen Antriebssystems	46

4.5. Peak Shaving	47
4.5.1. Peak Shaving des Fahrmotors	47
4.5.2. Peak Shaving des Bordnetzes	50
5. Auswertung und Analyse der Lastprofile	53
5.1. Inhalt der Lastprofile	53
5.1.1. Schiff 1	54
5.1.2. Schiff 2	54
5.1.3. Schiff 3	54
5.2. Vorgehen bei der Auswertung der Lastprofile der Fahrmotoren	55
5.3. Vorgehen bei der Auswertung der Lastprofile des Bordnetzes	59
5.3.1. Auswertung der Manöverbetriebe	59
5.3.2. Auswertung des Bordnetzes während der Liegezeiten	64
5.4. Auswertung der Einsatzzeit	66
5.5. Ergebnisse der Auswertungen	67
5.5.1. Absolute Anzahl Entlade- und Ladevorgänge	67
5.5.2. Absolute Anzahl Manöverbetriebe und Liegezeiten	68
5.5.3. Durchschnittliche Peak-Dauer	69
5.5.4. Durchschnittliche Peak-Energie	71
5.5.5. Durchschnittliche Leistung	72
5.5.6. Mittlere Entlade- und Ladekapazität	74
5.5.7. Zyklenzahl	76
5.5.8. Thruster	78
5.6. Zusammenfassung der Ergebnisse	80
5.6.1. Peak Shaving des Fahrmotors	80
5.6.2. Peak Shaving des Bordnetzes während der Manöverbetriebe	80
5.6.3. Peak Shaving des Bordnetzes während der Liegezeiten	82
6. Konzeptentwicklung eines Batteriesystems	84
6.1. Batteriesystem für Peak Shaving des Fahrmotors	84
6.1.1. NiMH-Zelle	84
6.1.2. Li-Ionen-Zelle	87
6.2. Batteriesystem für Peak Shaving des Bordnetzes beim Manöverbetrieb	89
6.2.1. Blei-Zelle	90
6.2.2. Li-Ionen-Zelle	91
6.3. Zusammenfassung der Batteriekonzepte	94
7. Fazit	95
7.1. Zusammenfassung	95
7.2. Kritische Betrachtung	96

7.3. Ausblick	97
Tabellenverzeichnis	98
Abbildungsverzeichnis	99
Literaturverzeichnis	102
A. Abkürzungsverzeichnis	106
B. Glossar	108
C. Aufgabenstellung	111
C.1. Aufgabenstellung der Bachelorarbeit	112
D. Tabellen	115
D.1. Ergebnisse der Auswertungen der Lastschwankungen der Fahrmotoren von den Schiffen 1,2,3	116
D.2. Ergebnisse der Auswertungen der Lastschwankungen der Dieselgenera- toren während der Manöverbetriebe von Schiff 2 beim Einsatz eines Die- selgenerators mit Batteriesystem	117
D.3. Ergebnisse der Auswertungen der Lastschwankungen der Dieselgenera- toren während der Manöverbetriebe von Schiff 2 beim Einsatz von zwei Dieselgeneratoren mit Batteriesystem	118
D.4. Ergebnisse der Auswertungen der Lastschwankungen der Dieselgenera- toren während der Liegezeiten von Schiff 2	119
D.5. Ergebnisse der Auswertungen der Lastschwankungen der Dieselgenera- toren während der Manöverbetriebe von Schiff 3 beim Einsatz eines Die- selgenerators mit Batteriesystem	120
D.6. Ergebnisse der Auswertungen der Lastschwankungen der Dieselgenera- toren während der Manöverbetriebe von Schiff 3 beim Einsatz von zwei Dieselgeneratoren mit Batteriesystem	121
D.7. Ergebnisse der Auswertungen der Lastschwankungen der Dieselgenera- toren während der Liegezeiten von Schiff 3	122
D.8. Übersicht der Kenndaten verschiedener Batterietypen	123
E. Diagramme und Abbildungen	125
E.1. Übersicht der Daten von Schiff 1	126
E.2. Übersicht der Daten von Schiff 2	127
E.3. Übersicht der Daten von Schiff 3	128
E.4. Lastverläufe der Generatoren von Schiff 3 während des Manöverbetriebs 3	129

F. Datenblätter	130
F.1. NiMH-Zelle BK-10V1S	131
F.2. NiMH-Batteriepack BK-10V10T	132
F.3. Blei-Batteriepack LC-QA12110TP	133
F.4. Li-Ionen-Zelle ANR26550M1-b	135
G. Quellcode	137
G.1. Hauptprogramm von Schiff 3	138
G.2. Programm zur Berechnung der Lastschwankungen	141

1. Einführung

1.1. Motivation

"Die Seeschifffahrt ist der mit Abstand umweltfreundlichste Verkehrsträger."¹

Diese Aussage des Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur ist nur bedingt gültig. Im Vergleich verschiedener Transportmittel sind Schiffe in Bezug auf den CO_2 -Ausstoß pro Tonnenkilometer durch ihre hohen Transportmengen bei niedrigem Energiebedarf deutlich sauberere Transportmittel (8g CO_2 pro Tonnenkilometer) als beispielsweise Flugzeuge, die im Vergleich den höchsten CO_2 -Ausstoß pro Tonnenkilometer (665g CO_2 pro Tonnenkilometer) besitzen.[13]

Der Schiffsverkehr ist jedoch nach Angaben des Bundesumweltamtes an rund 60 bis 90% der Schwefeldioxid- (SO_2)-Emission in den Häfen schuld, die auf den Verbrauch von Schweröl zurückzuführen ist. Hinzu kommt die Feinstaubbelastung durch die Schifffahrt, die deutlich höher ist als im Straßen- und Schienenverkehr.[6]

Neben der Verbesserung der Luftqualität in den Häfen und küstennahen Gewässern, die im Fokus des Gesetzgebers stehen, sind für die Reedereien vor allem die Kosten der Treibstoffe und die Verbesserung der Energieeffizienz der Schiffe eines der dringlichsten Probleme.

Durch eine Verbesserung der Energieeffizienz der Schiffe sinken sowohl die Emissionen, die durch die Umweltauflagen gefordert werden, als auch die Betriebs- und Treibstoffkosten der Schiffe.

Derzeit gibt es weltweit mehr als 52.000 Handelsschiffe [26], über 250 Hochseekreuzfahrtschiffe [11] und zahlreiche weitere Schiffstypen, zum Beispiel Forschungs-, Arbeits- und Spezialschiffe sowie Mega-Yachten. Die neuesten Schiffe erfüllen bereits die aktuellen und künftig geforderten Umweltauflagen und haben durch eine Optimierung der Antriebe eine bessere Energieeffizienz erreicht, aber trotzdem sind alle Reedereien daran interessiert, die Energieeffizienz ihrer Schiffe weiter zu verbessern, um die Kosten zu senken.

¹ [6]

Der meist verwendete Treibstoff der heutigen Weltflotte ist nach wie vor Schweröl für die Schiffsmotoren. Derzeit gängige Lösungsvarianten zur Reduzierung der Abgasemissionen bestehen in der Umrüstung der Motoren auf andere Treibstoffklassen, beispielsweise Gasöl² oder flüssiges Erdgas (LNG)³, der Verbesserung der Abgasreinigungssysteme und in der Steigerung der Effizienz der Schiffe. In Hinblick auf den CO_2 -Ausstoß wird hierbei zwar keine wesentliche, jedoch bei der Reduktion der Schwefeloxid-Emission (SO_x) eine deutliche Verbesserung erzielt. [9]

Weitere Varianten zur Reduzierung der Abgasemissionen sind die Verwendung von Abgasreinigungssystemen, den „Scrubbern“ oder den SCR⁴-Katalysatoren. Bei den Scrubber-Anlagen werden die Schwefelverbindungen entweder mit Kalksubstraten zu Gips gebunden (sogenannte "trockene Scrubber") oder der Schwefel wird mittels Salz- oder Süßwasser mit Natronlauge ausgewaschen. [6] Bei den SCR-Katalysatoren wird eine Harnstoff-Wasser-Lösung in die Eindüs- und Mischstrecke dosiert und durch Thermolyse und Hydrolyse Ammoniak erzeugt. Das Ammoniak reagiert mit den Stickoxiden und Sauerstoff zu Stickstoff und Wasser. [15]

Beide dieser Verbesserungen haben jedoch den Nachteil, dass zusätzliche Kosten für die Schiffsbetreiber entstehen.

In der MARPOL⁵ Anlage IV [17] wurden Emissions-Überwachungsgebiete (engl.: **Emission Control Area**) (**ECA**) festgelegt, in denen ein niedrigerer Schwefelgehalt für ölhaltige Brennstoffe gilt, die an Bord von Schiffen verwendet werden müssen, als in den übrigen Seegebieten der Welt (MARPOL Anlage IV, Regel 14). Deshalb wird nach weiteren Möglichkeiten gesucht, die Kosten für die teureren schwefelarmen Brennstoffe oder die Entsorgung der Abfälle der Scrubber zu reduzieren und die Energieeffizienz der Schiffe zu steigern.

Die aktuelle Technik, die derzeit nicht nur in der Schifffahrt, sondern auch bei anderen Verkehrsmitteln wie Kraftfahrzeugen und Zügen Anwendung findet, ist die Verwendung von hybriden Antrieben. In der Schifffahrt finden zusätzlich zu seriellen und parallelen Hybridantrieben auch rein elektrische Antriebe, die durch Batteriesysteme versorgt werden, Anwendung. Als Beispiel für einen rein elektrischen Antrieb mit Batteriesystem in der Schifffahrt gilt die Autofähre „Ampere“ [16], die in Norwegen zum Einsatz kommt.

Durch den gezielten Einsatz von hybriden Antrieben können Schiffsantriebe effizienter, der Schadstoffausstoß reduziert und die Schiffsbetriebskosten gesenkt werden. Die Thematik der Modernisierung der Schiffe durch hybride Antriebe und Batteriesysteme soll in dieser Bachelorarbeit untersucht werden.

²Marinedieselöl oder Gasöl (engl.: **Marine Gas Oil**) (**MGO**)

³Verflüssigtes Erdgas (engl.: **Liquefied natural Gas**) (**LNG**)

⁴Selektive katalytische Reduktion (engl.: **Selective Catalytic Reduction**) (**SCR**)

⁵internationales Übereinkommen zum Schutz der Meeresumwelt

1.2. Ausgangssituation

Um die Energieeffizienz der Schiffe zu steigern, gehören bei mittleren und großen Frachtschiffen Wellengeneratorsysteme oft zum Standard. Die Funktionsweise eines Wellengeneratorsystems lässt sich wie folgt beschreiben (Abschnitt 3.2):

Die Antriebswelle der Hauptmaschine treibt entweder direkt oder über ein Getriebe gekoppelt einen zusätzlichen Generator an, der das Bordnetz versorgt. Für die Nutzung eines Wellengenerators sprechen vor allem folgende Punkte:

- Einsparung von Betriebsstunden der Dieselgeneratoren
- Besserer Wirkungsgrad der Hauptmaschine als die Hilfsdieselmotoren
- Verwendung von günstigerem Schweröl im Vergleich zum Marinedieselöl

Durch die Fluktuation der Kraftstoffpreise können die Betriebskosten positiv oder negativ beeinflusst werden.

Auf Grund des Interesses der Reedereien und Eigner an der Optimierung der Auslastung der Fahrmotoren und Hilfsdieselgeneratoren sollen zukünftig die Antriebssysteme der Schiffe durch zusätzliche Batteriesysteme ergänzt werden, um „Peak Shaving⁶“ (Abschnitt 4.5) zu betreiben. Hierbei gibt es zwei mögliche Anwendungsfälle des Peak Shaving:

- Lastoptimierung der Fahrmotoren
- Bordnetzstabilisation

Zur Realisierung der Lastoptimierung der Fahrmotoren wird das Wellengeneratorsystem des Antriebmotors um ein Batteriesystem ergänzt und soll eine konstante Belastung des Fahrmotors gewährleisten. Zur Bordnetzstabilisation und somit der Lastoptimierung der Hilfsdieselgeneratoren wird das Bordnetz durch ein Batteriesystem erweitert, das für eine konstante Belastung der Hilfsdieselgeneratoren sorgen und selbst als „Hilfsdieselgenerator“ fungieren soll.

Diese Erweiterungen sollen Betriebskosten im Bereich der Wartung, des Kraftstoffverbrauchs und bei der Auslegung der Antriebs- und Generatorsysteme einsparen.

⁶Peak Shaving bezeichnet das Glätten von Lastspitzen bei Stromverbrauchern.

1.3. Problemstellung

Auf Grund von äußeren Einflüssen, zum Beispiel Wellen, Wind, Strömung, schwankt die Last der Fahrmotoren häufig und teils schnell und stark.

Die Lebensdauer von Batterien hängt neben dem natürlichen Alterungsprozess besonders von dem Entlade- und Ladeverhalten ab. Durch die häufig und teils stark schwankende Lastfluktuation werden extreme Anforderungen an die Batterien gestellt. Für die Ergänzung des Antriebssystems eines Schiffes mit einem entsprechenden Batteriesystem müssen die Lastprofile von Fahrmotoren analysiert und ausgewertet werden, um die Größe und Häufigkeit dieser Lastschwankungen zu ermitteln.

Der Einsatz eines Batteriesystems für eben diesen Anwendungsfall erscheint auf Grund von Erfahrungen aus der Praxis jedoch als unrealistisch oder nur schwer zu realisieren. Entscheidend hierfür ist die fehlende Amortisation des Systems durch die vermutlich geringe Lebenserwartung der Batterien.

Teilweise verfügen moderne Hauptmaschinensteuerungen bereits über eine „konstante Leistungsregelung“, die ab festgelegten Leistungswerten verwendet werden kann. Der Leistungssollwert wird während dieser Regelung konstant gehalten, um die Hauptmaschine im optimalen Arbeitspunkt zu betreiben und die Drehzahl schwankt entsprechend der Last am Propeller.

Eine realistischere Anwendung erscheint in der Verwendung eines Batteriesystems für die Bordnetzstabilisation, da dort mit langsameren und seltener auftretenden Lastschwankungen gerechnet werden kann. Eine Analyse und Auswertung der Lastdaten des Bordnetzes sind hierfür aber unabdingbar, um eine entsprechende Aussage über die Anwendbarkeit eines Batteriesystems für das Bordnetz treffen zu können.

1.4. Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung und Bewertung von Peak Shaving und hybriden Antrieben auf Schiffen.

Vor diesem Hintergrund soll die mögliche Anwendbarkeit einer Verwendung und der Nutzen von Batteriesystemen für Peak Shaving auf Schiffen untersucht werden.

Im ersten Teil dieser Arbeit werden zunächst die Grundlagen der Batterietechnologie, Funktionsweisen und Konzepte der Antriebstechnik, Anwendungsfälle für den Einsatz von Batteriespeichern und die verschiedenen Arten des Peak Shavings erläutert.

Im zweiten Teil werden typische Lastprofile von Schiffen gesammelt und analysiert, anhand derer Konzepte für Batteriesysteme erstellt und bewertet werden.

Abschließend werden im Fazit die wichtigsten Ergebnisse zusammengefasst und ein Ausblick für mögliche Weiterentwicklungen dieser Untersuchung gegeben. Der Anhang enthält unter anderem die ursprüngliche Aufgabenstellung, Datenblätter, Lastprofile, Messergebnisse und Quellcodes.

2. Theoretische Grundlagen Batterien

In den Abschnitten des folgenden Kapitels werden die Grundlagen von Batterien, speziell Lithium-Ionen-Batterien (LIB), dargelegt.

2.1. Überblick über Lithium-Ionen-Batterien

Die Entwicklung des ersten funktionsfähigen galvanischen Elements und somit einer Batterie geht auf Alessandro Volta im 18. Jahrhundert zurück.

In den 1970er Jahren wurden die grundlegenden Funktionsprinzipien der LIBs entwickelt und 1972 die erste Primärbatterie durch das Unternehmen Sanyo auf den Markt gebracht. Die erste Sekundärbatterie auf Basis von Lithium als negative Elektrode und Molybdänsulfid als positive Elektrode wurde 1985 durch die Firma Moli Energy entwickelt. Das Unternehmen Sony entwickelte 1991 die erste marktreife wiederaufladbare Lithium-Ionen-Batterie. [25, S.27] [7]

Heutzutage finden Lithium-Ionen-Batterien Anwendung in zahlreichen mobilen Konsumgütern, wie zum Beispiel Handys, Notebooks, Tablets und MP3-Playern, Haushalts- und Gartengeräten, wie zum Beispiel Saug- und Rasenmährobotern, in Elektrowerkzeugen und auch in der Elektromobilität, beispielsweise in Kraftfahrzeugen und Fahrrädern.

2.2. Aufbau und Funktionsweise von Lithium-Ionen-Batterien

Lithiumbatterien werden in die Kategorien der primären (nicht wiederaufladbar) Batterien und der sekundären (wiederaufladbar) Akkumulatoren aufgeteilt. Wenn im folgenden von Batterien gesprochen wird, sind damit wiederaufladbare Lithium-Ionen-Akkumulatoren gemeint. Der prinzipielle Aufbau und die Funktionsweise einer wiederaufladbaren Lithium-Ionen-Zelle ist in Abb. 2.1 dargestellt.

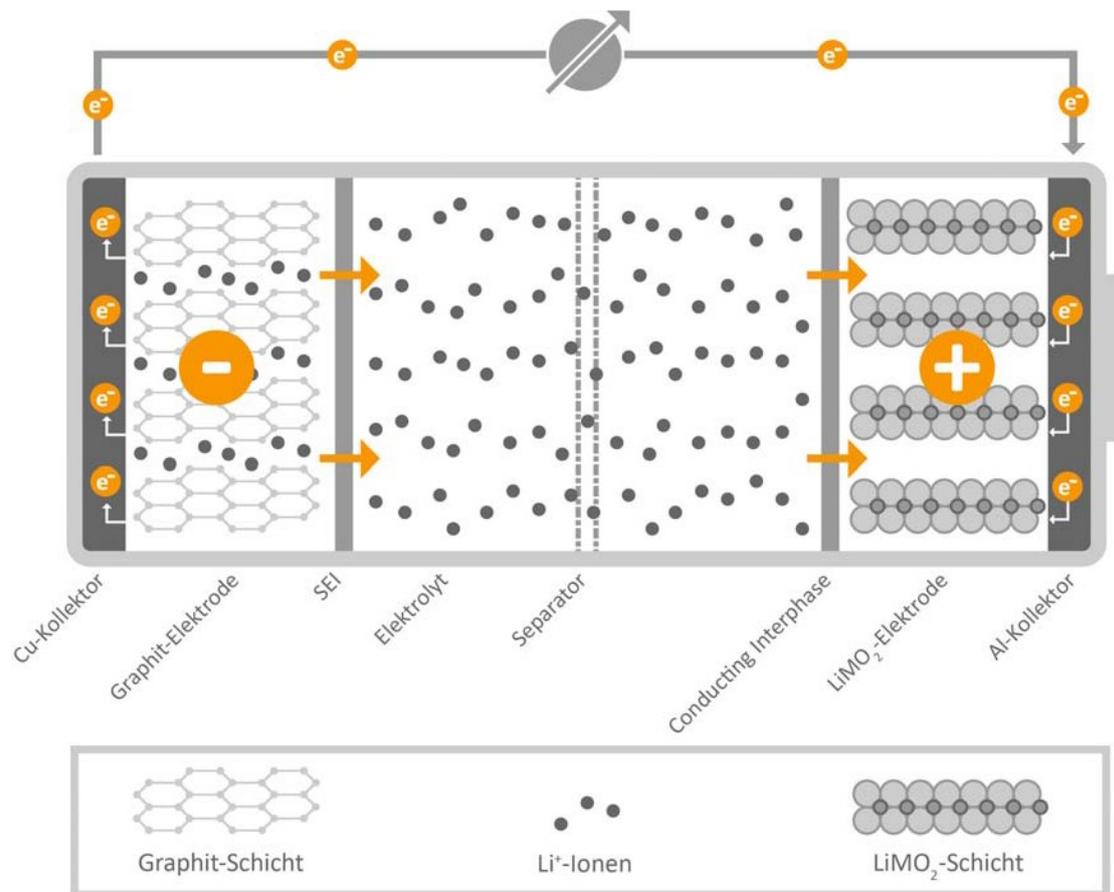
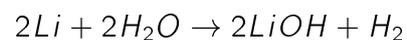


Abbildung 2.1.: Aufbau und Funktion einer Lithium-Ionen-Zelle beim Entladevorgang [24, S.11]

Eine Lithium-Ionen-Zelle besteht aus einer positiven und einer negativen Elektrode, die als Wirtsgitter für die Lithiumatome dienen. Die Materialien entscheiden hierbei über die Zellspannung (Abschnitt 2.5). [7] Lithium stellt als Element, als Ion bzw. Atom, den aktiven Teil der Batterie dar.

Zwischen den beiden Elektroden befindet sich der ionenleitfähige wasserfreie Elektrolyt, der ebenfalls Lithium-Ionen enthält. Der Elektrolyt muss wasserfrei sein, da Lithium stark mit Wasser unter Bildung von Wasserstoff reagiert.



Ein Separator, eine poröse Lithium-Ionen-durchlässige Membran zwischen den beiden Elektroden, trennt diese elektrisch voneinander.

Die negative Elektrode besteht meist aus einer Kupferfolie, die als Stromableiter dient,

und einer Graphitschicht oder einer Schicht aus Lithium-legiertem Metall. Während des Ladeprozesses werden die positiv geladenen Lithium-Ionen in dieser Schicht eingelagert und dienen beim Entladeprozess zur Leistungsbereitstellung. Es werden vorwiegend Graphitelektroden verwendet, da diese ein niedriges Potential besitzen (Abb. 2.2) und nur eine geringe Volumenausdehnung bei der Einlagerung der Lithium-Ionen aufweisen.

Die positive Elektrode besteht aus verschiedenen Mischoxiden (Abschnitt 2.5), die auf einem Aluminiumkollektor aufgebracht sind. Während des Ladeprozesses dienen die Oxidschichten der Zelle als Lithiumquelle, von der aus die Lithium-Ionen zur negativ geladenen Elektrode wandern.

Beim Entladeprozess werden Elektronen über den Stromableiter abgegeben und wandern über einen externen Stromkreis zur positiven Elektrode und werden dort von den Übergangsmetallionen aufgenommen. Gleichzeitig wandern, wie in Abbildung 2.1 dargestellt, Lithium-Ionen, die zwischen den Graphitebenen eingelagert sind, von der negativ geladenen Elektrode durch den Elektrolyten und den Separator zur positiv geladenen Elektrode.

Der Ladevorgang ist ein reversibler¹ Prozess und die Lithium-Ionen wandern von der positiv geladenen Elektrode zur negativ geladenen Elektrode. [25, S.27 ff] [2, S.104 ff]

Entscheidend für die Funktionsfähigkeit einer Lithium-Ionen-Zelle ist die sogenannte Formation². Hierbei wird die neue ungeladene Zelle ($U_{Zelle} = 0V$) erstmalig geladen und bildet an der Anode eine Deckschicht aus, die SEI³, die die Anode vor der korrodierenden Elektrolytlösung schützt, aber gleichzeitig für die Lithium-Ionen durchlässig ist. Bei diesem Vorgang wird Lithium für die Bildung der SEI genutzt, das anschließend nicht mehr für die Zyklisierung zur Verfügung steht.

Durch Lade- und Entladeprozesse wächst die SEI-Schicht und dadurch auch der Widerstand in der Zelle. Damit sind ein Verlust von Lithium-Ionen bzw. Kathodenmaterial und Elektrolyt und eine entsprechende Verringerung der Zellspannung und Ladungsmenge (Ah) verbunden. Um dies zu vermeiden, wird in der Regel ein Überschuss an Elektrolyt und Kathodenmaterial in der Zelle genutzt. [24, S.10 ff.]

2.3. Zellspannung

Im Vergleich mit konventionellen Akku-Systemen, wie Blei-Säure, Nickel-Metall-Hydrid (NiMH) oder Nickel/Cadmium, die überwiegend auf einem festen chemischen Sys-

¹umkehrbar

²Erstmaliges Laden der Lithium-Ionen-Batterie

³Passivierende, elektrochemische Grenzschicht (engl.:Solid Electrolyte Interphase) (SEI)

tem basieren, können in Lithium-Ionen-Zellen verschiedene Aktivmaterialien miteinander kombiniert werden, wodurch sich deren Zellspannung anpassen lässt. Die Wahl der Aktivmaterialien für die positive bzw. negative Elektrode einer Lithium-Ionen-Zelle ist entscheidend für die Zellspannung. Die äußere Zellspannung ergibt sich aus der Differenz des Potentials der positiven Elektrode und der negativen Elektrode. [25, S.109 ff]

Mit einer Zelle aus Lithiummanganphosphat ($LiMnPO_4$) gegen Graphite erzielt man beispielsweise eine höhere Spannung als mit Lithiumeisenphosphat ($LiFePO_4$) gegen Graphite (Abb. 2.2).

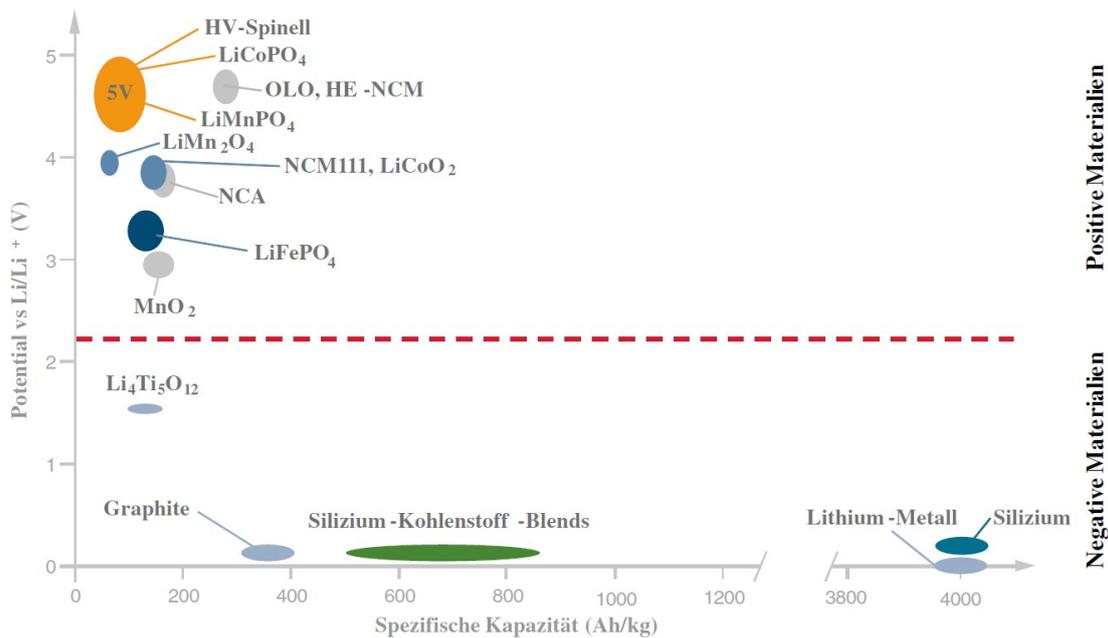


Abbildung 2.2.: Potentiale und spezifische Kapazitäten verschiedener positiver und negativer aktiver Materialien für Lithium-Ionen-Zellen [25, S.120]

Neben weiteren Vorteilen, wie beispielsweise einem geringeren Gewicht, längerer kalendarischer und zyklischer Lebensdauer oder einem geringeren DoD⁴, haben Lithium-Ionen-Batterien auch ihre Nachteile.[12]

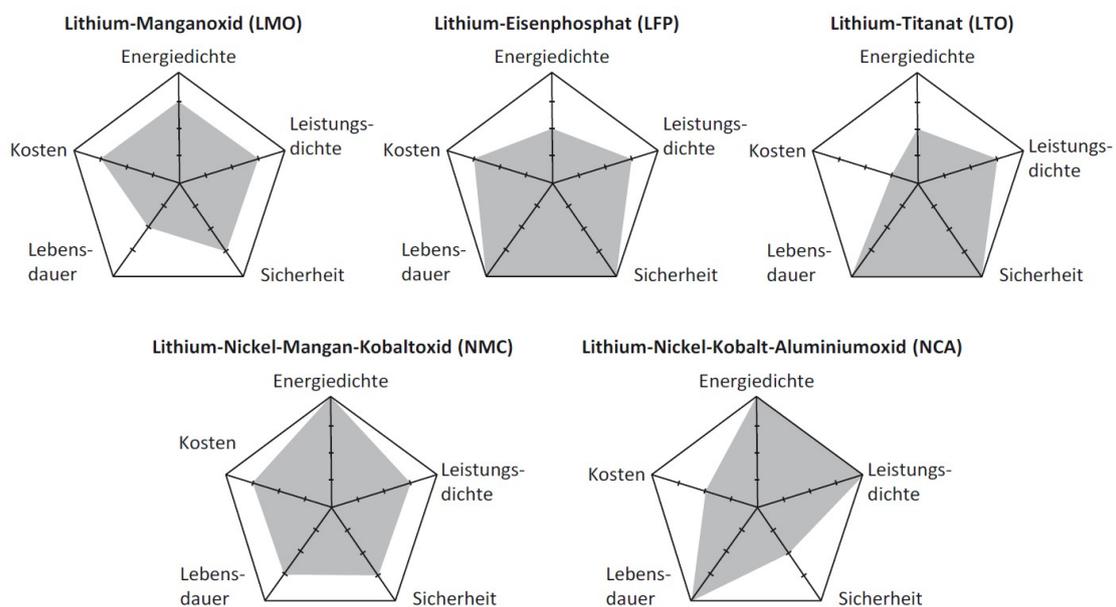
Die größten Nachteile sind, dass Lithium-Ionen-Batterien deutlich teurer als Bleibatterien und empfindlich gegen hohe Temperaturen sind. Außerdem benötigen Lithium-Ionen-Batterien ein Batterieverwaltungssystem (engl.: **B**atterie **M**anagement **S**ystem) (**BMS**), das vor Über- und Unterentladung schützt. Zusätzlich benötigen Lithium-Ionen-Batterien mechanische Sicherheitsvorkehrungen wie Sollbruchstellen und/oder Sicherheitsventile,

⁴Tiefe der Entladung [%] (engl.: **D**ept**h** of **D**ischarge) (**DoD**)

chemische Vorkehrungen, wie irreversibles Abschalten⁵ und Balancierung der Elektroden, damit vorhandene Lithiumatome vollständig in der negativen Elektrode aufgenommen werden können, und elektrische Vorkehrungen wie die Isolierung von Kabeln und Gehäuse.[2]

In Abbildung 2.3 sind ausgewählte Kathodenmaterialien dargestellt. Aus der Abbildung ist zu entnehmen, dass Lithium-Eisenphosphat (LFP) und Lithium-Titanat (LTO) die Eigenschaften von hoher Lebensdauer und Sicherheit erfüllen, die für Batteriesysteme in Hybridanwendungen von entscheidender Rolle sind.

Um die geforderten Ströme und Spannungen, die vom Batteriesystem für die jeweilige Anwendung benötigt werden, zu erreichen, werden einzelne Zellen in Reihe und parallel verschaltet. Die Reihenschaltung der Zellen bewirkt eine Erhöhung der Gesamtspannung, die Parallelschaltung eine Erhöhung des Gesamtstroms.



Anmerkung: Je weiter sich die Fläche entlang einer Anforderung erstreckt, desto besser wird diese erfüllt.

Abbildung 2.3.: Batterieeigenschaften nach gewähltem Kathodenmaterial [8, S.18]

⁵Der Separator schmilzt bei einer bestimmten Temperatur und verhindert somit ein weiteres Aufheizen der Zelle

2.4. Alterungsprozess

Die Alterung bezeichnet die Verschlechterung der elektrochemischen Eigenschaften einer Zelle, zum Beispiel eine geringere Kapazität und verringerte Leistung.

Die Lebensdauer von Zellen wird in zwei Kategorien aufgeteilt: die kalendarische Lebensdauer und die Zyklenlebensdauer.

Der Zeitraum der Lebensdauer einer Zelle wird als die Zeitspanne vom Auslieferungszeitpunkt (engl.: **Begin of Life**) (**BoL**) bis zum Endzeitpunkt (engl.: **End of Life**) (**EoL**) charakterisiert, zu dem die Eigenschaften der Zelle einen zuvor definierten Wert durch Alterung unterschreiten.

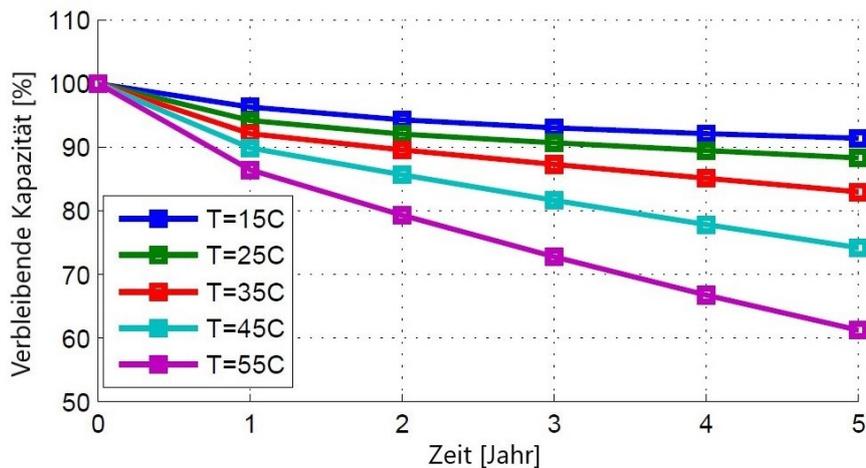
Das Lebensdauerende tritt beispielsweise nach Teil 4 der DIN 43539 (Akkumulatoren; Prüfungen; ortsfeste Zellen und Batterien) bei Unterschreiten der Speicherkapazität auf weniger als 80 % der Nennkapazität ein. [24, S.21]

In der Praxis wird die Lebensdauer von beiden Prozessen, der kalendarischen und der zyklischen Alterung, beeinflusst.

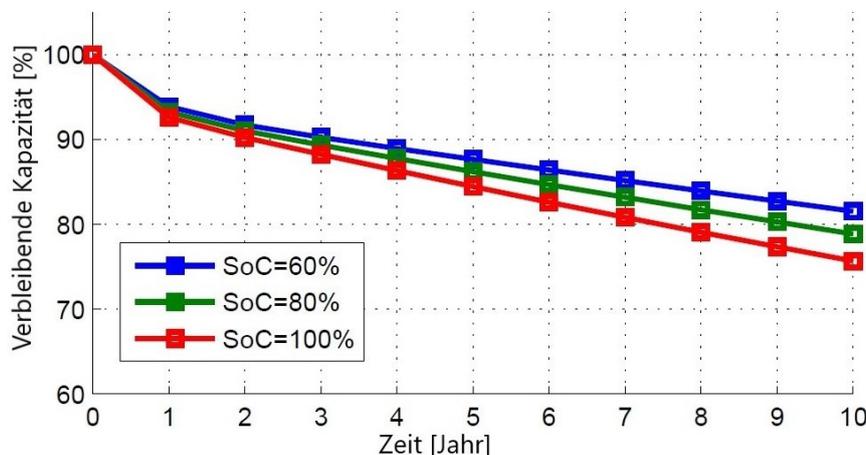
2.4.1. Kalendarische Alterung

Die kalendarische Alterung bezieht sich auf den Zeitraum, in dem das System nicht genutzt wird, d.h. keine aktiven Entlade- oder Ladevorgänge stattfinden. Während des Prozesses der kalendarischen Alterung finden reversible Selbstentladungen und irreversible Kapazitätsverluste statt.

Die reversible Selbstentladung schädigt die Zelle nicht und kann durch Aufladen der Zelle wieder ausgeglichen werden. In der Regel beträgt die Selbstentladung einer Lithium-Ionen-Zelle wenige Prozent pro Monat bei entsprechender temperierter Lagerung und Ladezustand [%] (engl.: **State of Charge**) (**SoC**) (Abb. 2.5). Für eine optimale Lagerung wird ein Ladezustand von ungefähr 30 % und eine Temperatur von 10°C bis 20°C als ideal angesehen. [2, S.140 ff]



(a) Kalendarische Alterung mit variabler Temperatur bei 50% SoC



(b) Kalendarische Alterung mit variablem SoC bei 25°C

Abbildung 2.4.: Kalendarische Alterung einer Lithium-Ionen-Zelle - a) variable Temperatur, konst. SoC 50% b) variabler SoC, konst. Temperatur 25 °C [5, Abschnitt 3, Abb. 3]

Der irreversible Kapazitätsverlust ist die Kapazität, die auch bei erneuter Vollladung der Zelle nicht mehr zur Verfügung steht, er begrenzt die maximale Lebensdauer (Abb. 2.4) einer Zelle, ohne dass diese verwendet wird. Kapazitätsverlust entsteht durch Wechselwirkungen zwischen Elektrolyt und Aktivmaterial und durch Volumenarbeit der Aktivmaterialien in der Zelle (Abschnitt 2.4.2). Dieser Prozess ist entsprechend dem Prozess der reversiblen Selbstentladung von der Lagerungstemperatur und dem Ladezustand der Zelle abhängig (Abb. 2.5). [2, S.140 ff] [24, S.13,21]

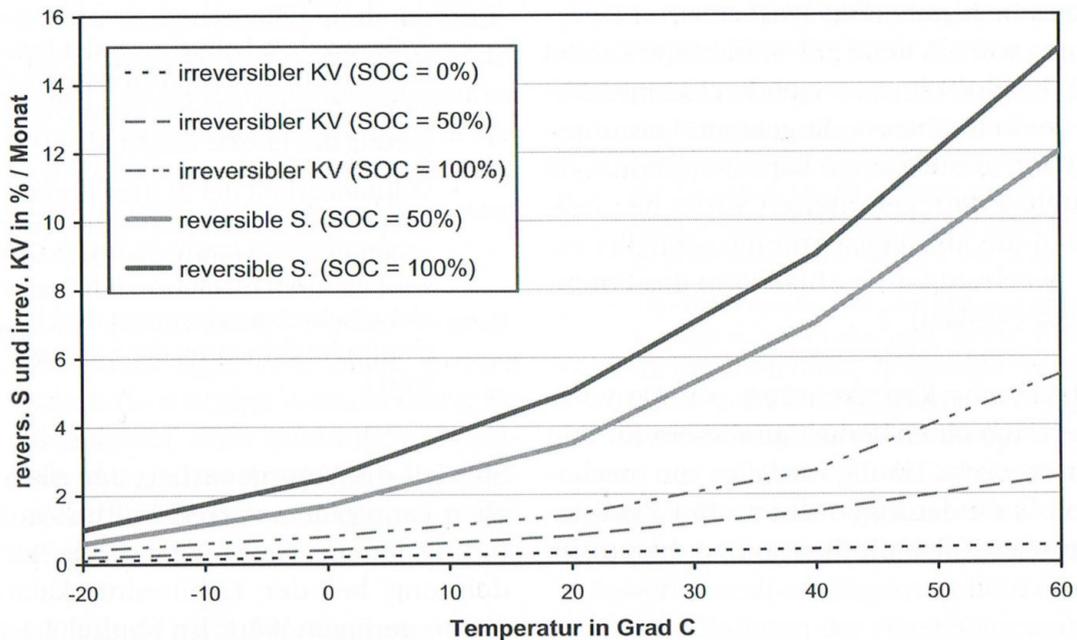


Abbildung 2.5.: Reversible Selbstentladung S und irreversibler Kapazitätsverlust KV in Abhängigkeit des Ladezustands (SoC) und der Temperatur für eine Lithium-Ionen-Zelle [2, S.141]

2.4.2. Zyklische Alterung

Die zyklische Alterung bezieht sich auf den Zeitraum, in dem das System aktiv genutzt wird. Die Zyklenlebensdauer gibt die Anzahl der möglichen Zyklen einer Zelle oder des Batteriesystems an. Bei einem Zyklus wird von einem zusammenhängenden Lade- und Entladevorgang gesprochen, der in Voll- und Teilzyklus unterschieden wird. Von einem Vollzyklus wird gesprochen, wenn eine Energiemenge entsprechend der Speicherkapazität der Batteriezelle einmal umgeschlagen wurde.⁶ Bei einer unvollständigen Entladung oder Aufladung wird von einem Teilzyklus gesprochen. Entscheidende Parameter für die Bestimmung der Zyklenlebensdauer sind der DoD und der SoC. In Abbildung 2.6 wird die erreichte Zyklenanzahl einer Batterie-Zelle bei Beschränkung des SoC und DoD bis zum Erreichen einer Restkapazität von 70 % abgebildet. [24, S.23] Folglich kann die Zyklenlebensdauer einer Zelle drastisch erhöht werden, indem der DoD und der SoC beschränkt werden.

⁶http://www.electromotive.eu/?page_id=14

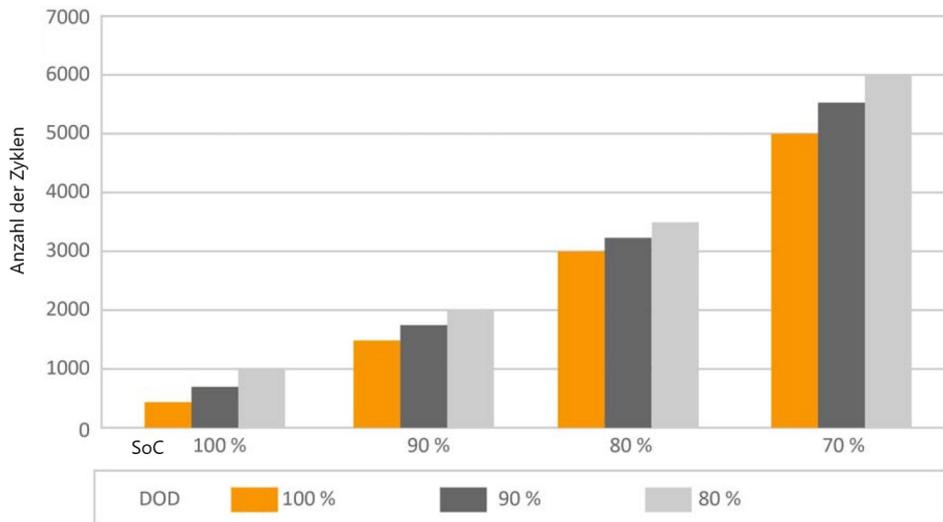


Abbildung 2.6.: Schematische Darstellung der Zyklenlebensdauer bei Beschränkung von SoC und DoD bis zur Restkapazität von 70% [24, Abb. 7]

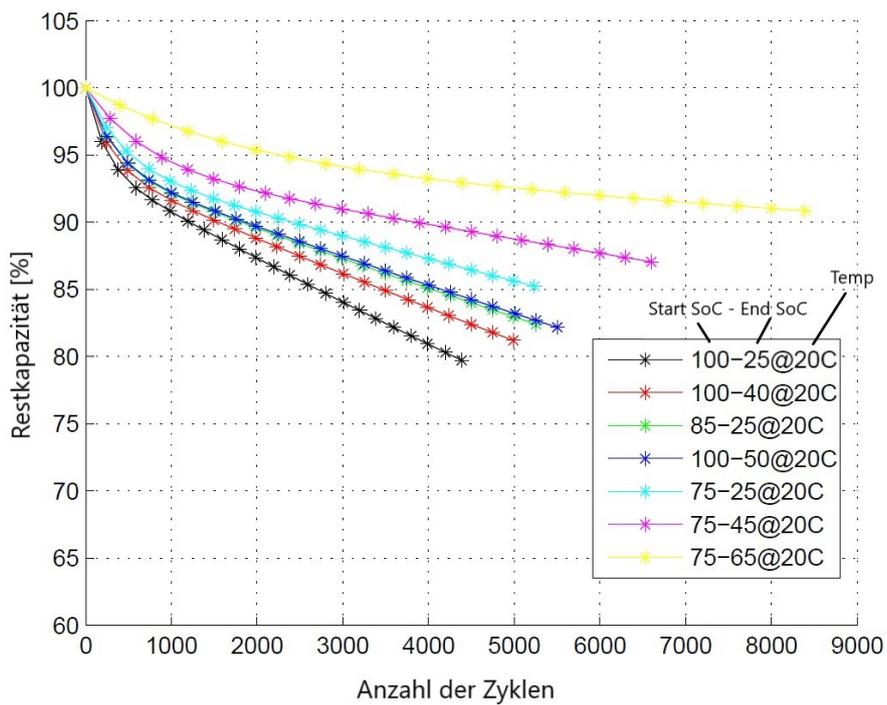


Abbildung 2.7.: Simulation der zyklischen Alterung bei variierenden SoC und DoD, modifiziert nach [5, Abb. 5]

Die Variation von SoC und DoD wird in der wissenschaftlichen Arbeit [5] betrachtet und simuliert. Das Simulationsergebnis (Abb. 2.7) bestätigt die Abhängigkeit der Lebensdauer von SoC und DoD, die bereits aus der schematischen Darstellung (Abb. 2.6) entnommen wurde.

Eine weitere Kategorisierung besteht in Tief- und Flachzyklusbatterien. Ein Zyklus, dessen Zyklustiefe zwischen 50 und 80% seiner Gesamtkapazität liegt, wird als Tiefzyklus bezeichnet. Ein Zyklus mit einer Zyklustiefe von 10 bis 15 % der Gesamtkapazität wird als Flachzyklus bezeichnet.

Tiefzyklusbatterien liefern während einer einzelnen Entladung hunderte Stunden lang einen schwachen Strom von wenigen Ampere. Flachzyklusbatterien, die zum Beispiel bei hybriden Antrieben zum Einsatz kommen, müssen hingegen über wenige Sekunden einen starken Strom von einigen hundert Ampere liefern. [1]

Die Kapazität einer Zelle wird durch weitere Prozesse verringert, die während der Zyklen auftreten.

Durch die Wechselwirkungen zwischen Elektrolyt und Aktivmaterial werden weitere Deckschichten auf der bereits vorhandenen SEI aufgebaut. Dies führt zur Abnahme der Kapazität der Zelle, da ein Teil der für den Leitungsprozess zur Verfügung stehenden Ionen in den Elektroden gebunden werden und somit nicht mehr für die elektrochemischen Reaktionen zur Verfügung stehen. [25, S.31 ff] Außerdem steigt durch die Vergrößerung der SEI-Schicht der Stofftransportwiderstand und somit der ohmsche Widerstand an, den die Lithium-Ionen durchwandern müssen, was einen Leistungsverlust zur Folge hat. [25, S.17] Dieser Prozess wird durch hohe äußere Umgebungstemperaturen und durch große Leistungsanforderungen bei den Entlade- und Ladevorgängen der Batterie verstärkt. Große auftretende Stromstärken haben eine hohe interne Wärmeproduktion zur Folge. [24, S.21] Die Zelle wird aber auch geschädigt, wenn die Umgebungstemperatur zu niedrig ist. Für die Lagerung und die Verwendung kann man daher folgende minimale und maximale Temperaturen [2, S.140] als Richtwerte ansehen:

Temperaturbereich für Ladung: 0 °C bis 40 °C

Temperaturbereich für Entladung: -20 °C bis 50 °C

Temperaturbereich für Lagerung: -20 °C bis 60 °C

Um die Zellen vor zu niedrigen oder zu hohen Temperaturen zu schützen, sollte das Batteriesystem in einem geschlossenen und durch ein externes Kühl-/Heizsystem (Klimaanlage) temperierten Raum installiert werden.

Bei niedrigen Temperaturen und hohen Strömen besteht verstärkt die Gefahr der Bildung

von Dendriten⁷. Werden die Dendriten zu groß und spalten sich von der Elektrode ab, können sie den Separator durchstechen und einen Kurzschluss verursachen.

Ein weiterer Alterungsmechanismus ist die Volumenarbeit der Aktivmaterialien. Die Aktivmaterialien dehnen sich zwischen entladendem und geladendem Zustand durch die Einlagerung der Lithium-Ionen aus, zum Beispiel Graphit 9,2 % Volumenausdehnung, und üben eine mechanische Belastung aus. Der Leitruß⁸ kann hierbei aufgetrennt und die elektrische Leitfähigkeit eingeschränkt werden oder geht komplett in einzelnen Partikeln verloren.

Zusätzlich werden die Aktivmaterialien beim Einlagern der Lithium-Ionen mechanisch belastet. Hierbei können mechanische Spannungen innerhalb der Partikel entstehen, die zu Rissen führen und die Partikel auseinanderbrechen lassen. [25, S.18]

2.5. Batterietypen

2.5.1. Auswahlkriterien

Für die Anwendung eines Batteriesystems ist neben der Energiedichte auch die Zyklenlebensdauer der Batterien entscheidend.

Aus dem Ragone-Diagramm (Abb. 2.8), in dem verschiedene Batterietypen anhand ihrer Energiedichte [Wh/kg] und Leistungsdichte [W/kg] miteinander verglichen werden, geht hervor, dass Lithium-Ionen-Batterien, dicht gefolgt von NiMH-Batterien, die größte Energiedichte besitzen.

⁷Dendriten sind elektrochemische Ablagerungen an den Elektroden eines Akkus

⁸spezieller Kohlenstoffleiter für elektrische Leitpfade zwischen Stromableiter und Partikeln des Aktivmaterials

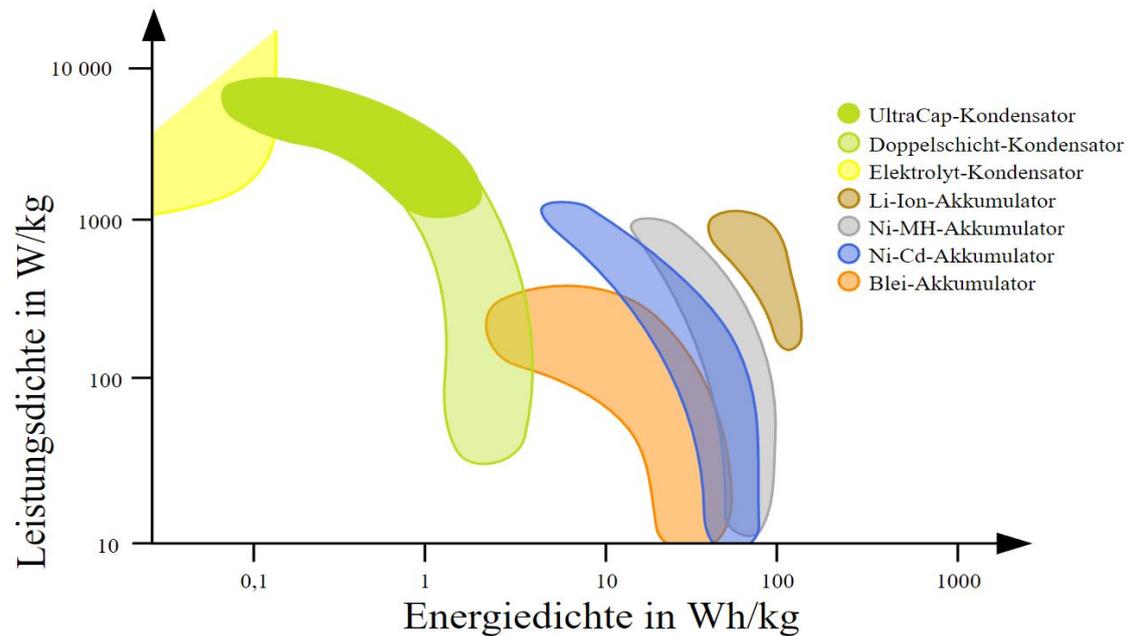


Abbildung 2.8.: Vergleich von Leistungs- und Energiedichte einiger elektrischer Energiespeicher [27]

Hybridantriebe haben andere Anforderungen an das Entlade- und Ladeverhalten des Batteriesystems als konventionelle Konsumer-Geräte. Die wichtigste Anforderung ist der Pulsbetrieb beim Laden und Entladen mit sehr hohen Strömen ($>10C^9$) und keinen vollkommenen Zyklen, wodurch der Alterungsprozess (Abschnitt 2.4) beschleunigt wird. In der Abbildung 2.9 wird die mögliche Zyklenlebensdauer verschiedener Batterietypen in Abhängigkeit des DoD verglichen. Hieraus geht hervor, dass Lithium-Ionen- und Nickel-Metallhydrid-Batterien die höchste Zyklenlebensdauer besitzen. Außerdem sind diese Systeme für Zyklen mit einem DoD von bis zu 100 % einsetzbar.

⁹Die C-Rate gibt die Größe des Lade- und Entladestromes an. (siehe Glossar)

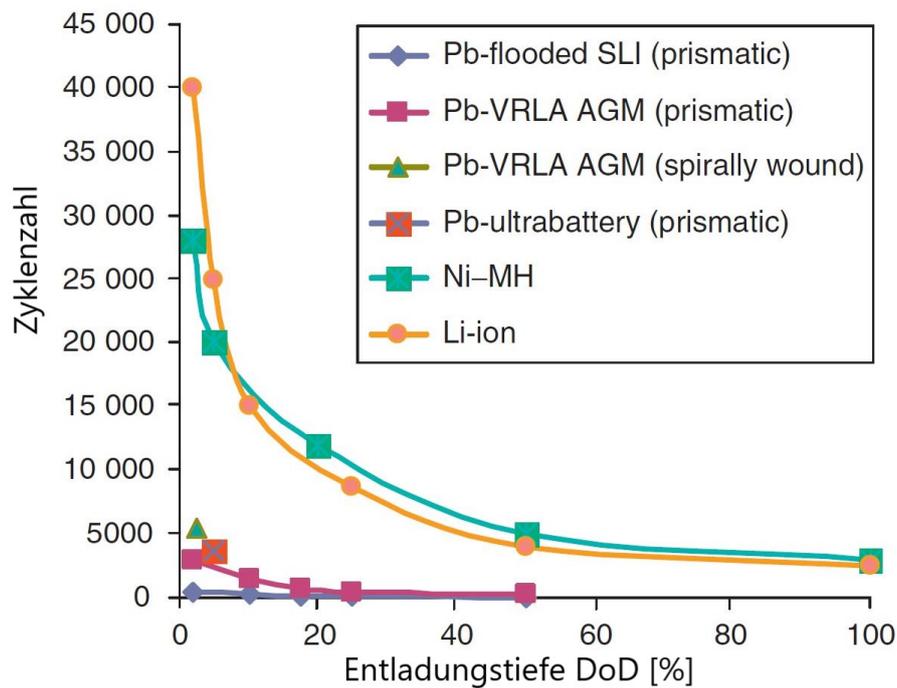


Abbildung 2.9.: Vergleich verschiedener Batterietypen unter dem Einfluss des DoD auf deren mögliche Zyklusanzahl, abgeändert nach [20, S.283]

Abkürzungen in der Abb. 2.9:

- SLI: Start, Beleuchtung und Zündung (engl.: starting, lighting and ignition)
- VRLA: Ventilgeregelte Blei-Säure-Batterie (engl.: valve-regulated lead-acid-battery)
- AGM: Elektrolyt in Vlies aus Glasfaser gebunden (engl.: Absorbent Glass Mat)

Mögliche Batterietypen für die Anwendung in hybriden Antrieben sind somit Lithium-Ionen- und NiMH-Batterien allein oder in Kombination, da beide Systeme eine große Energiedichte und eine hohe Zykluslebensdauer besitzen.

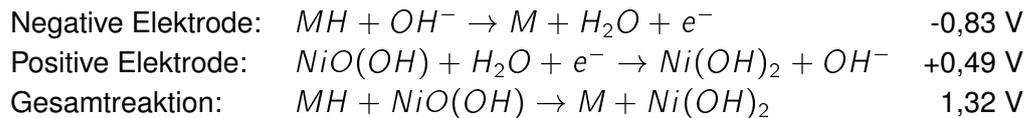
2.5.2. Nickel-Metallhydrid-Batterie

Aufbau und Funktion

Die Nickel-Metallhydrid-Batterie gehört zu den alkalischen Batterien und ist eine Weiterentwicklung der Nickel-Cadmium-Batterie (NiCd). Die Elektroden werden mit zwei Schichten Separator aufgewickelt. Das Aktivmaterial der positiven Elektrode besteht

aus Nickelhydroxid (NiOOH) und die negative Elektrode aus einem Metallhydrid¹⁰, meist einer Legierung aus Nickel und Lanthan oder Titan- und Zirkonium-Legierungen. Als Elektrolyt dient eine verdünnte Kalilauge. [19]

Die Leerlaufspannung einer NiMH Zelle beträgt $U_{NiMH} = 1,32V$, sie ergibt sich aus der chemischen Reaktionsgleichung beim Entladeprozess. Als typischer Wert gilt eine Zellspannung von $U = 1,2V - 1,3V$.



Da es sich bei dieser Reaktion um eine Festkörperreaktion handelt und die Reaktion nicht über eine Lösungsphase wie bei einer Bleibatterie abläuft, wird eine hohe Reversibilität und somit eine hohe Zyklenanzahl erreicht. [2, S.66 ff]

Alterung

Die NiMH-Zelle unterliegt wie die Li-Ionen-Zelle dem Kapazitätsverlust. Hierbei tritt als reversibler Effekt der Memory-Effekt (Glossar B) mit einer Spannungsstufe von bis zu 50mV auf, der bei Lithium-Ionen-Zellen (mit Ausnahme der Materialkombination Lithium-Eisenphosphat $LiFePO_4$ [18]) nicht auftritt.

Zu den irreversiblen Effekten, die durch die kalendarische und zyklische Alterung auftreten, zählen ebenfalls wie bei der Lithium-Ionen-Zelle die Volumenausdehnung, die Zyklustiefe DoD, die Häufigkeit der Zyklen, der steigende Innenwiderstand und zusätzlich der Wasserverlust, der sowohl durch Korrosion als auch bei der Zersetzung des Elektrolyten entsteht. [2]

¹⁰Ein Metallhydrid ist eine metallische Verbindung, die in der Lage ist, Wasserstoff aufzunehmen.

3. Antriebssysteme

In den Abschnitten des folgenden Kapitels werden Antriebssysteme von Schiffen, einige Systemkomponenten und das hybride Antriebssystem vorgestellt.

3.1. Übersichtsschaltbild

Das Antriebssystem eines Schiffes besteht neben den Hauptantrieben aus zusätzlichen Hilfsantrieben, die das Manövrieren erleichtern. In der nachfolgenden Abbildung 3.1 ist ein vereinfachtes Singleline-Diagramm eines Schiffes mit den dazugehörigen Großkomponenten dargestellt. Hierzu gehören neben den Haupt- und Hilfsantrieben auch die Hilfsdiesel- und Wellengeneratoren und je nach Schiffstyp weitere Motoren für beispielsweise Kräne, Winden, Pumpen oder Klimakompressoren, die nicht direkt am Antrieb des Schiffes beteiligt sind, aber für die Auslegung der Generatorleistungen berücksichtigt werden müssen. Zusätzlich ist der Abgang des Bordnetzes von der Hauptsammelschiene eingezeichnet.

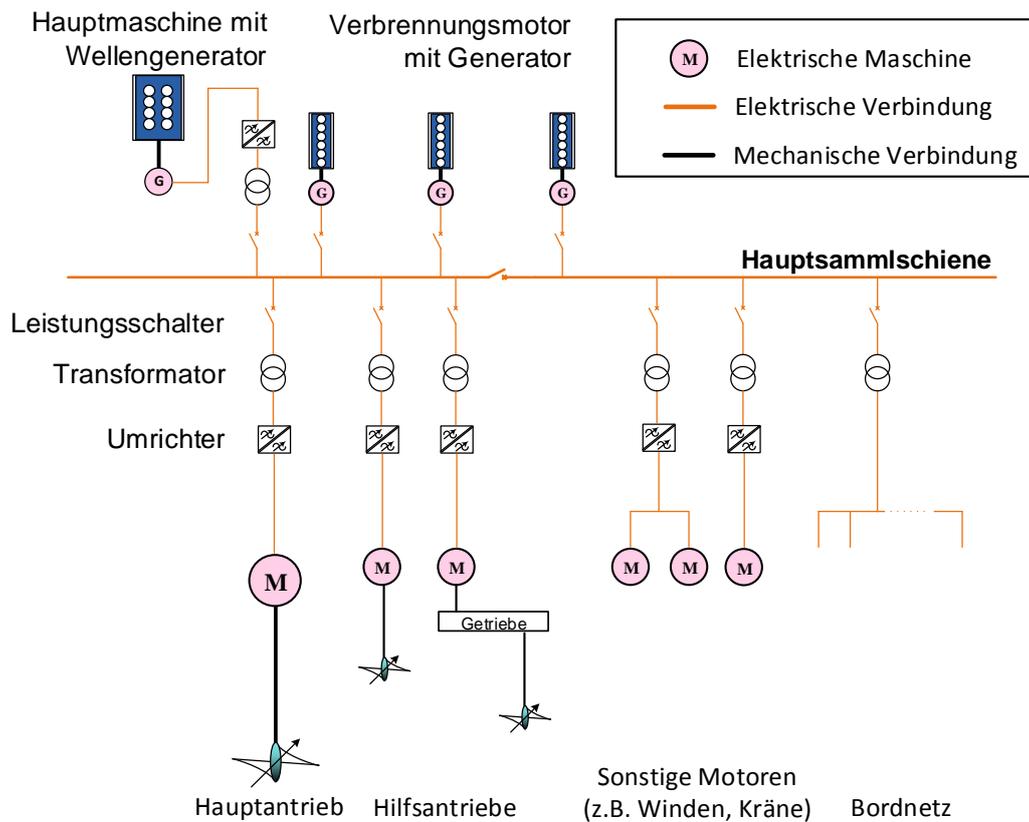


Abbildung 3.1.: Vereinfachtes Übersichtsschaltbild eines Schiffssystems

3.2. Wellengenerator

Ein Wellengenerator ist eine elektrische Maschine, die direkt oder über ein Getriebe mit der Antriebswelle verbunden ist und als Generator oder in einigen Anwendungen zusätzlich auch als Motor betrieben werden kann.

Der Wellengenerator findet auf vielen mittelgroßen und großen Frachtschiffen Anwendung und dient dort als klassisches Hilfsmittel zur Reduzierung der Betriebskosten. Während des Seebetriebs versorgt der Wellengenerator unter bestimmten Voraussetzungen das Bordnetz mit Energie. Diese Betriebsart wird als PTO¹ bezeichnet. In dieser Zeit können die Hilfsdieselgeneratoren abgeschaltet werden, sofern die Gesamtbilanz dies

¹Generatorbetrieb (engl.: **Power Take Out**) (PTO)

zulässt, wodurch sich aus betriebswirtschaftlicher Sicht Einsparungen bei den Brennstoffkosten, den Wartungskosten und den Betriebsstunden der Hilfsdieselgeneratoren erzielen lassen.

Wellengeneratoranlagen können mit oder ohne Frequenzumrichter (Abschnitt 3.3) installiert werden. Entscheidend hierfür sind:

- Ausführung der Hauptmaschine - schnell oder langsam laufend
- Festpropeller oder hydraulischer Verstellpropeller
- Platzbedarf an Bord

Bei einem langsam laufenden Fahrmotor mit einem Festpropeller (engl.: **Fixed Pitch Propeller**) (**FPP**) ist der Rotor des Wellengenerators auf die Schiffswelle montiert und die Drehzahl entscheidet über die Schiffsgeschwindigkeit. Der Einsatz eines Frequenzumrichters ist bei diesem System unabdingbar, damit auch bei variabler Umdrehungszahl der Welle und folglich verschiedenen Schiffsgeschwindigkeiten die Frequenz der Eingangsspannung zum Bordnetz konstant bleibt.

Schiffe, die einen hydraulischen Verstellpropeller (engl.: **Controllable Pitch Propeller**) (**CPP**) besitzen, benötigen nicht zwingend einen Frequenzumrichter, da die Schiffsgeschwindigkeit bei konstanter Drehzahl der Welle durch den Pitch² geregelt werden kann. Für den Einsatz des Wellengenerators ohne Frequenzumrichter wird eine konstante Wellendrehzahl benötigt, wodurch der Wirkungsgrad des Fahrmotors sinken kann. Mit Einsatz eines Frequenzumrichters kann der ideale Wirkungsgrad des Schiffantriebs durch eine Kombination aus Drehzahl und Pitch erzielt werden.

Die zweite Betriebsart eines Wellengenerators ist der PTI³-Modus. In dieser Betriebsart wird der Wellengenerator als Motor betrieben und treibt mit dem Fahrmotor gemeinsam die Antriebswelle an. Die benötigte Energie wird von einem Hilfsdieselgenerator zur Verfügung gestellt.

Die dritte und letztmögliche Betriebsart ist der PTH⁴-Modus. Diese Betriebsart ist eine spezielle Form des PTI-Betriebs und als Notbetrieb konzipiert. Der Wellengenerator wird ebenfalls als Motor betrieben, aber treibt die Antriebswelle allein an. Im Vergleich zur Hauptmaschine kann der Wellengenerator nur eine verringerte Leistung zur Verfügung stellen, da die Leistung der Hauptmaschine in der Regel drei- bis zehnmal größer als die des Wellengenerators ist, aber das Schiff bleibt weiterhin manövrierfähig. Für den PTH-Betrieb wird der Dieselmotor falls möglich für diese Zeit abgekoppelt.

²Flügelsteigung der Schiffsschraube

³Motorbetrieb (engl.: **Power Take In**) (**PTI**)

⁴Spezieller Anwendungsfall des Motorbetriebs (engl.: **Power Take Home**) (**PTH**)

Für den Einsatz zum Glätten der Lastspitzen (Peak Shaving) des Fahrmotors (Abschnitt 4.5) wird ein paralleler Hybridantrieb (Abschnitt 3.5.2) verwendet und der Wellengenerator im PTO-Modus betrieben.

Der wesentliche Vorteil eines Wellengenerators besteht in der alleinigen Stromversorgung des Bordnetzes während des Seebetriebs. Hierdurch werden Betriebsstunden, Treibstoffkosten und Betriebskosten der Dieselgeneratoren gespart. Außerdem kann der Wellengenerator je nach Systemauslegung das Schiff rein elektrisch oder mit dem Verbrennungsmotor gemeinsam die Schiffswelle antreiben.

3.3. Frequenzumrichter

Ein Frequenzumrichter ist eine elektrische Anlage, die aus einer gleichförmigen Wechselspannung eine veränderbare Wechselspannung mit variabler Frequenz und Amplitude erzeugt, die zur direkten Versorgung von elektrischen Maschinen oder des Versorgungsnetzes genutzt werden kann.

Wird eine elektrische Maschine, beispielsweise ein asynchroner Drehstrommotor, an das örtliche Versorgungsnetz angeschlossen, kann dieser nur mit konstanter Umdrehungszahl laufen, da diese durch die eingeprägte Netzfrequenz und die Polpaarzahl des Motors vordefiniert ($n = \frac{f}{p}$) ist. Wenn eine variable Umdrehungszahl für eine Anwendung benötigt wird, wird dem Motor ein Frequenzumrichter vorgeschaltet, um die für die Anwendung geforderte Netzfrequenz zu erzeugen. Hierbei regelt der Frequenzumrichter die Ausgangsfrequenz und die Ausgangsspannung.

Der zweite Anwendungsfall eines Frequenzumrichters ist die Einspeisung ins Versorgungsnetz. In diesem Fall wird der Frequenzumrichter von einem Generator mit variabler Drehzahl und Frequenz gespeist und ist an das örtliche Versorgungsnetz oder auf Schiffen an das Bordnetz mit fester Frequenz angeschlossen. Damit ist der Einsatz eines Frequenzumrichters bei Motoren mit variabler Drehzahl und einer festen Netzfrequenz zwingend notwendig.

Der allgemeine Aufbau eines Frequenzumrichters ist im Blockschaltbild 3.2 dargestellt. Ein Frequenzumrichter besteht aus einem Gleichrichter (1), einem Zwischenkreis (2), einem Wechselrichter (3) und der Regelelektronik (4).

Der Gleichrichter wird von einem Ein- oder Dreiphasen-Versorgungsnetz gespeist und erzeugt eine pulsierende Gleichspannung. Im Zwischenkreis wird die Gleichrichterspannung geglättet und speist den nachfolgenden Wechselrichter. Der Wechselrichter generiert aus der Gleichspannung im Zwischenkreis eine in Frequenz und Amplitude variable Wechselspannung zur Versorgung des Motors. Der Regelkreis übernimmt je nach

Auslegung der Komponenten des Gleichrichters, des Zwischenkreises und des Wechselrichters deren Steuerung. [10]

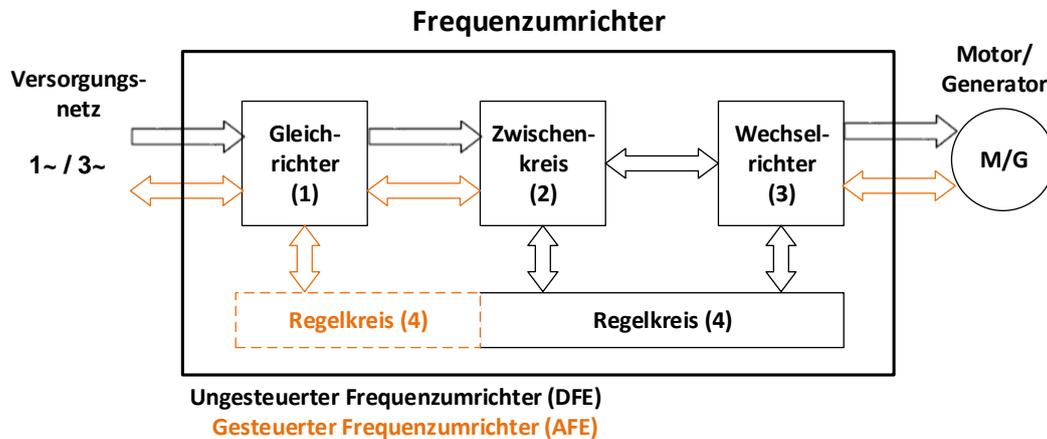


Abbildung 3.2.: Blockschaltbild eines Frequenzumrichters, in Anlehnung an [10, Abb. 2.2]

Es wird zwischen ungesteuerten und gesteuerten Frequenzumrichtern mit Spannungs- und Stromzwischenkreis unterschieden. Im Folgenden werden nur Frequenzumrichter mit einem Spannungszwischenkreis betrachtet.

Ein ungesteuerter Frequenzumrichter, der beispielsweise die Versorgung eines Wellengenerators im PTI-Betrieb übernimmt, wird als Diodengleichrichter (engl.: **D**iode **F**ront **E**nd) (**DFE**) ausgeführt. Der Gleichrichter besteht aus Dioden, die ein Rückspeisen aus dem Zwischenkreis nicht ermöglichen. Die Energie, die beim Bremsvorgang des Motors in den Zwischenkreis eingespeist wird, muss über einen Bremswiderstand (Chopper) abgeführt werden.

Wird ein Wellengenerator im PTI-/PTO-Modus wie im parallelen Hybridantrieb (Abschnitt 3.5.2) betrieben, muss ein gesteuerter Frequenzumrichter als aktiver Gleichrichter (**AFE**) verwendet werden. Hierbei ist der Wechselrichter mit IGBTs⁵ und Freilaufdioden ausgeführt, um ein Rückspeisen der Bremsenergie in das Bordnetz zu ermöglichen. Der Einsatz eines Bremswiderstands entfällt. Das Spannungsniveau des Zwischenkreises muss höher als die Netzspannung sein, um Energie ins Versorgungsnetz rückzuspeisen.

Der klassische geregelte Wellengenerator für reinen PTO-Betrieb hat generatorseitig einen Diodengleichrichter.

⁵Insulated-Gate Bipolar Transistor

3.4. Auslegung Dieselgenerator

Der Elektromotor wird für die geforderte Höchstleistung des Schiffes ausgelegt. Als Höchstleistung wird die maximale Leistung bezeichnet, die aus der Nenn- und darüber hinaus aus der Spitzenleistung besteht, die der Elektromotor kurzzeitig abgeben können muss. Spitzenleistungen treten beispielsweise bei rauer See und starkem Wind auf oder in Gefahrensituationen, in denen die maximale Leistung benötigt wird, um ein Unglück zu verhindern. Der Elektromotor wird daher so groß dimensioniert, dass er nicht nur die gewünschte Nennleistung kontinuierlich, sondern auch die kurzzeitig geforderte Höchstleistung abgeben kann. Der Dieselgenerator muss entsprechend der geforderten Spitzenleistungen dimensioniert werden und wegen eventueller Verluste sogar noch größer sein.

Da die Auslegung der Motoren für die Höchstleistung vorgenommen wird, sind die Dieselgeneratoren bei langsamerer Fahrt im Teillastbetrieb. Dies hat für die Dieselgeneratoren einen schlechteren Wirkungsgrad zur Folge. Das gesamte Schiffssystem besteht jedoch in der Regel aus mehreren Fahr- und Hilfsmotoren und dem Bordnetz als weiterer Grundlast (Abb. 3.1). Die Dieselgeneratoren werden anhand der Nennleistung der Verbraucher und zusätzlich in Abhängigkeit der Systemphilosophie des jeweiligen Schiffes dimensioniert, das bedeutet, dass die verschiedenen Lastprofile betrachtet werden, die durch alleinigen oder gleichzeitigen Betrieb von Fahr- und Hilfsmotoren und den Anforderungen des Bordnetzes entstehen können. Dementsprechend gibt es mehrere Dieselgeneratoren mit teilweise unterschiedlichen Leistungen, damit je nach Lastanforderungsprofil die Leistungen der Dieselgeneratoren kombiniert und somit bestmöglich ausgenutzt werden.

Trotzdem können die Dieselgeneratoren zum Beispiel während des Manöverbetriebs außerhalb ihres Arbeitsbereichs betrieben werden. Dies folgt aus den verschiedenen Vorgaben der unterschiedlichen Klassifikationsgesellschaften für die Manövrierfähigkeit eines Schiffes. Sofern es technisch möglich ist, soll als Leistungsreserve ein Dieselgenerator mehr laufen, als für das jeweilige Manöver eigentlich benötigt wird. Außerdem sind lastabhängige Stopps durch das Energieverwaltungssystem (engl.: **Power Management System**) (**PMS**) im Manöverbetrieb nicht erlaubt.

Ob eine Batterieanwendung auch für Schiffe möglich und sinnvoll ist, um eine schlechte Effizienz der Dieselgeneratoren zu verhindern, wird in Kapitel 5 dieser Arbeit untersucht.

3.5. Konventionelle und hybride Antriebe

Im Schiffbau wird neben den klassischen konventionellen diesel-mechanischen oder diesel-elektrischen Schiffshauptantrieben vermehrt auf hybride Antriebssysteme gesetzt. Ein hybrides Antriebskonzept besteht aus Verbrennungsmotor, Generator, Elektromotor, Batterie und Getriebe. Es wird zwischen seriellen (diesel-elektrischer Antrieb mit Batteriesystem) und parallelen (diesel-mechanischer Antrieb mit Wellengenerator und Batteriesystem) Hybridantrieben unterschieden.

Die Begriffe seriell und parallel sind aus dem Automotive Bereich übernommen worden, sind aber im Schiffbau bisher keine gängigen Begriffe.

3.5.1. Diesel-elektrischer Antrieb und serieller Hybridantrieb

Bei einem diesel-elektrischen Antrieb besteht keine direkte mechanische Verbindung zwischen dem Verbrennungsmotor und der Schiffsschraube. Der Verbrennungsmotor, an den ein Generator gekoppelt ist, dient lediglich der Stromerzeugung und wird auch als Ladegruppe bezeichnet. Der Elektromotor, der von der Ladegruppe gespeist wird, treibt letztendlich die Welle samt Schiffsschraube an.

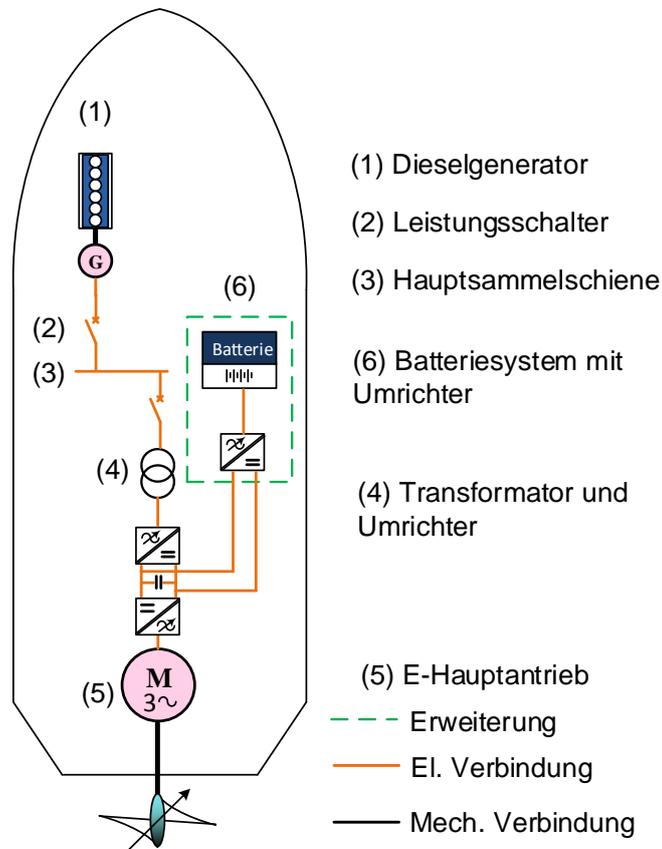


Abbildung 3.3.: Darstellung eines diesel-elektrischen Antriebs mit Erweiterung eines Batteriesystems für den seriellen Hybridantrieb

In Abbildung 3.3 ist das Konzept eines diesel-elektrischen Antriebes eines Schiffes mit der Erweiterung eines Batteriesystems für einen seriellen Hybridantrieb dargestellt. Bei einem diesel-elektrischen Antrieb ist das Dieselgeneratorsystem (1) für die Stromerzeugung zuständig und über einen Leistungsschalter (2) an die Hauptsammelschiene der Hauptschalttafel (3) des Schiffes angeschlossen. Von der Hauptsammelschiene ausgehend wird über einen weiteren Leistungsschalter der Elektromotor (5) angeschlossen, der die Welle und somit die Schiffsschraube antreibt. In Abhängigkeit des Spannungsniveaus der Hauptsammelschiene und der Ausführung des Elektromotors und der Schiffsschraube wird der jeweilige Motor entweder direkt oder mit einem Trafo und/oder Frequenzumrichter (4) angeschlossen.

Mit der Erweiterung des diesel-elektrischen Antriebssystems durch ein Batteriesystem mit Frequenzumrichter (6) entsteht ein serieller Hybridantrieb oder auch Serienhybrid. Die von der Ladegruppe erzeugte Energie wird sowohl zur direkten Versorgung des Elektromotors als auch zum Laden der Batterie verwendet. Die Batterie ermöglicht eine rein elektrische Fahrt oder liefert dem Elektromotor zusätzliche Energie.

Außerdem kann während des Bremsvorgangs über den Motor (5), der nun generatorisch fungiert, Bremsenergie zurückgewonnen und zum Laden der Batterie verwendet werden. Dieser Vorgang wird als Rekuperation bezeichnet. Damit eine Rückspeisung möglich ist, muss ein AFE-Frequenzumrichter verwendet werden.

Der wesentliche Vorteil diesel-elektrischer Antriebe ist die höhere Redundanz. Diese wird durch mehrere kleinere Einheiten der Dieselgeneratoren mit größeren Drehzahlen erreicht. Außerdem besteht eine gute Manövrierfähigkeit durch die Elektromotoren aufgrund der sofortigen Leistungsbereitstellung. Die Leistungen der Elektromotoren werden von den Dieselmotoren der Dieselgeneratoren begrenzt. Zum anderen kann durch die unabhängige Positionierung der Ladegruppe vom Fahrmotor der Maschinenraum bestmöglich ausgenutzt und somit neue Design-Konzepte entwickelt werden. Durch die Erweiterung des diesel-elektrischen Antriebs mit einem Batteriesystem zu einem Serienhybrid wird die Redundanz verbessert, da der Elektromotor unabhängig von den Dieselgeneratoren betrieben werden kann. Zudem wird die Versorgungsleistung erhöht und die Bremsenergie des Elektromotors wird zum Laden der Batterie verwendet.

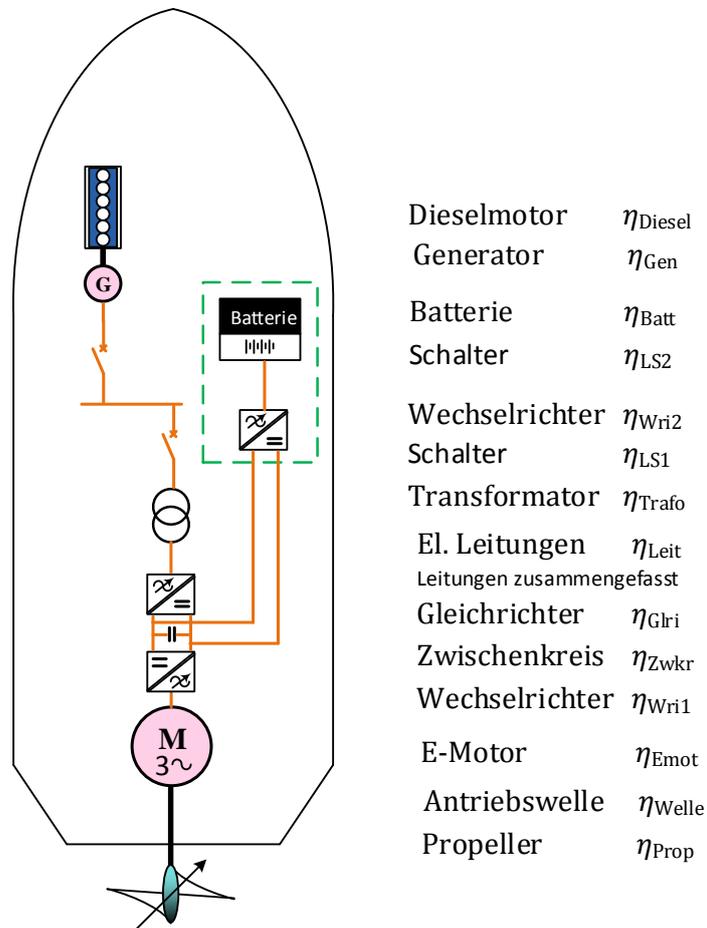


Abbildung 3.4.: Listung der Wirkungsgrade bei einem diesel-elektrischen Antrieb und Serienhybrid

Der entscheidende Nachteil des diesel-elektrischen Antriebs und des Serienhybrids ist die mehrmalige Energieumwandlung. In Abbildung 3.4 ist die größtmögliche Wirkungsgradkette eines diesel-elektrischen Antriebs dargestellt und in Gleichung 3.1 zusammengefasst. Bei einem Serienhybrid kommen weitere Verluste beim Entladen und Laden an der Batterie hinzu. Die größtmögliche Wirkungsgradkette ist in Gleichung 3.2 zusammengefasst. Ein weiterer Nachteil sind die höheren Herstellungskosten der gesamten Komponenten.

$$\eta_{dieselelek} = \eta_{Diesel} \cdot \eta_{Gen} \cdot \eta_{LS2} \cdot \eta_{LS1} \cdot \eta_{Trafo} \cdot \eta_{Leit} \cdot \eta_{Glri} \cdot \eta_{Zwkr} \cdot \eta_{Wri1} \cdot \eta_{Emot} \cdot \eta_{Welle} \cdot \eta_{Prop} \quad (3.1)$$

$$\eta_{serienhybrid} = \eta_{Diesel} \cdot \eta_{Gen} \cdot \eta_{LS2} \cdot \eta_{LS1} \cdot \eta_{Trafo} \cdot \eta_{Leit} \cdot \eta_{Glri} \cdot \eta_{Zwkr}^2 \cdot \eta_{Wri2}^2 \cdot \eta_{Batt}^2 \cdot \eta_{Wri1} \cdot \eta_{Emot} \cdot \eta_{Welle} \cdot \eta_{Prop} \quad (3.2)$$

Im Extremfall kann die gesamte Wirkungsgradkette des Serienhybrids durch mehrfache Energiewandlung beim Laden und Entladen der Batterie aus bis zu 17 einzelnen Wirkungsgraden bestehen. Diese variiert mit der Bauart des jeweiligen Antriebssystems. Im Vergleich zum parallelen Hybridantrieb muss daher bei gleicher Leistung an der Schiffsschraube ein größerer Verbrennungsmotor eingebaut werden, was einen höheren Kraftstoffverbrauch und höhere Emissionen zur Folge hat. „Der Vorteil, der durch den Betrieb des Verbrennungsmotors im verbrauchsoptimalen Bereich erreicht wird, kann leicht durch die elektrischen und chemischen Energieumwandlungsverluste aufgezehrt werden. Speziell wenn viel Energie in der Batterie zwischengespeichert werden muss, ist mit schlechten Verbrauchswerten zu rechnen.“ [23, S.27]

3.5.2. Diesel-mechanischer Antrieb und paralleler Hybridantrieb

Bei einem diesel-mechanischen Antrieb besteht eine direkte mechanische Verbindung zwischen Verbrennungsmotor und Schiffsschraube, er kann durch einen Wellengenerator ergänzt werden. Der Wellengenerator wird parallel zum Verbrennungsmotor betrieben und kann unter bestimmten Bedingungen hinzugeschaltet werden. Der Verbrennungsmotor und der Wellengenerator sind idealerweise voneinander abkuppelbar - das Schiff kann dann rein elektrisch, konventionell oder gemischt betrieben werden. [23] Der Aufbau eines diesel-mechanischen Antriebs mit der Erweiterung eines Batteriesystems für einen parallelen Hybridantrieb ist in Abbildung 3.5 dargestellt.

Es wird zwischen der Einwellen- und Zweiwellenlösung unterschieden. In der Einwellenlösung ist der Wellengenerator direkt im Wellenstrang angeordnet. In der Zweiwellenlösung ist der Wellengenerator über ein Getriebe angeschlossen.

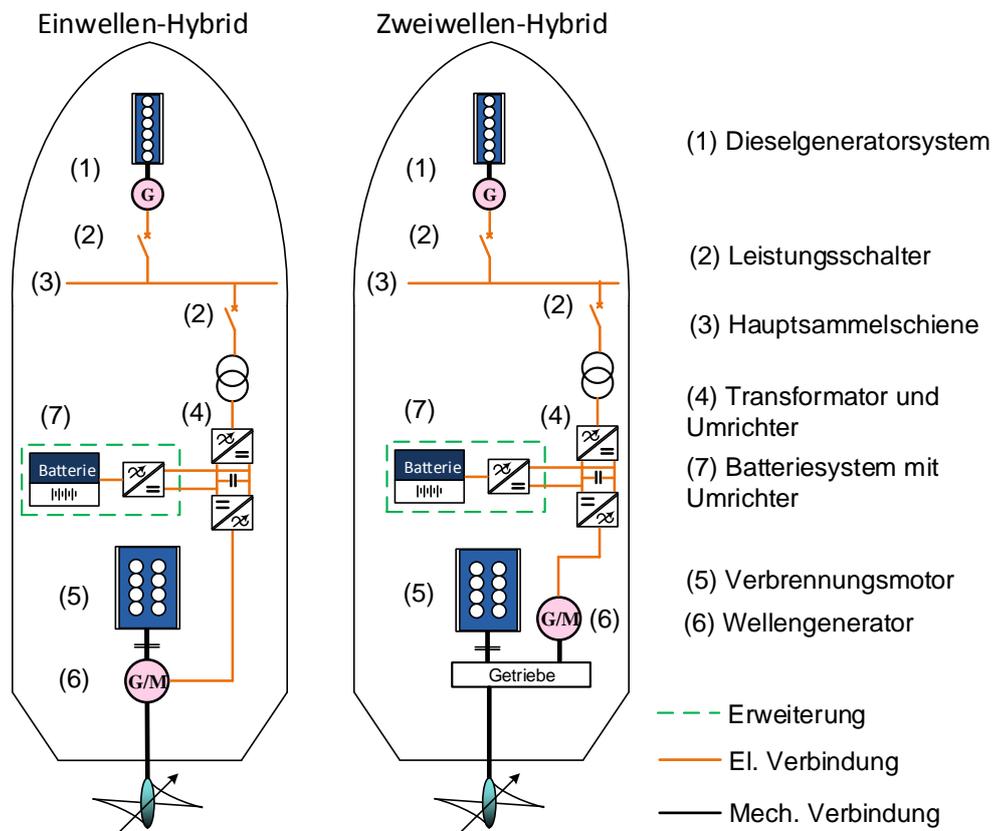


Abbildung 3.5.: Darstellung eines diesel-mechanischen Antriebs mit Erweiterung eines Batteriesystems für den parallelen Hybridantrieb

Bei einem diesel-mechanischen Antriebssystem treibt ein Verbrennungsmotor (5) die Schiffsschraube und unter bestimmten Voraussetzungen ebenfalls den Wellengenerator über eine mechanische Verbindung an. Der Wellengenerator (6) wird in gleicher Weise wie der Elektromotor im Serienhybrid mit einem Leistungsschalter (2) und gegebenenfalls mit einem Trafo und/oder Frequenzumrichter (4) an die Hauptsammelschiene (3) angeschlossen, die von einem oder mehreren Dieselgeneratoren (1) gespeist wird. Der Einsatz eines Wellengenerators mit Frequenzumrichter hängt von den in Abschnitt 3.2 beschriebenen Bedingungen ab.

Mit der Erweiterung eines Batteriesystems (7) entsteht aus dem diesel-mechanischen Antriebssystem ein paralleler Hybridantrieb (Parallelhybrid). Im motorischen Betrieb des Wellengenerators werden die Leistungen des Verbrennungsmotors und des Elektro-

tors addiert, wobei die für den Elektromotor benötigte Energie vom Batteriesystem bereitgestellt wird. Im PTO-Betrieb wird die abgegebene Energie des Wellengenerators zum Laden der Batterie und zur Versorgung des übrigen Bordnetzes verwendet.

Der wesentliche Vorteil des parallelen Hybridantriebs besteht darin, dass eine elektrische Maschine als Motor und Generator eingesetzt werden kann. Außerdem wird durch die direkte mechanische Verbindung zwischen Dieselmotor und Schiffspropeller vor allem bei höheren Geschwindigkeiten der beste Wirkungsgrad erzielt, da die elektrischen Umwandlungsverluste wegfallen. [23, S.40-43]

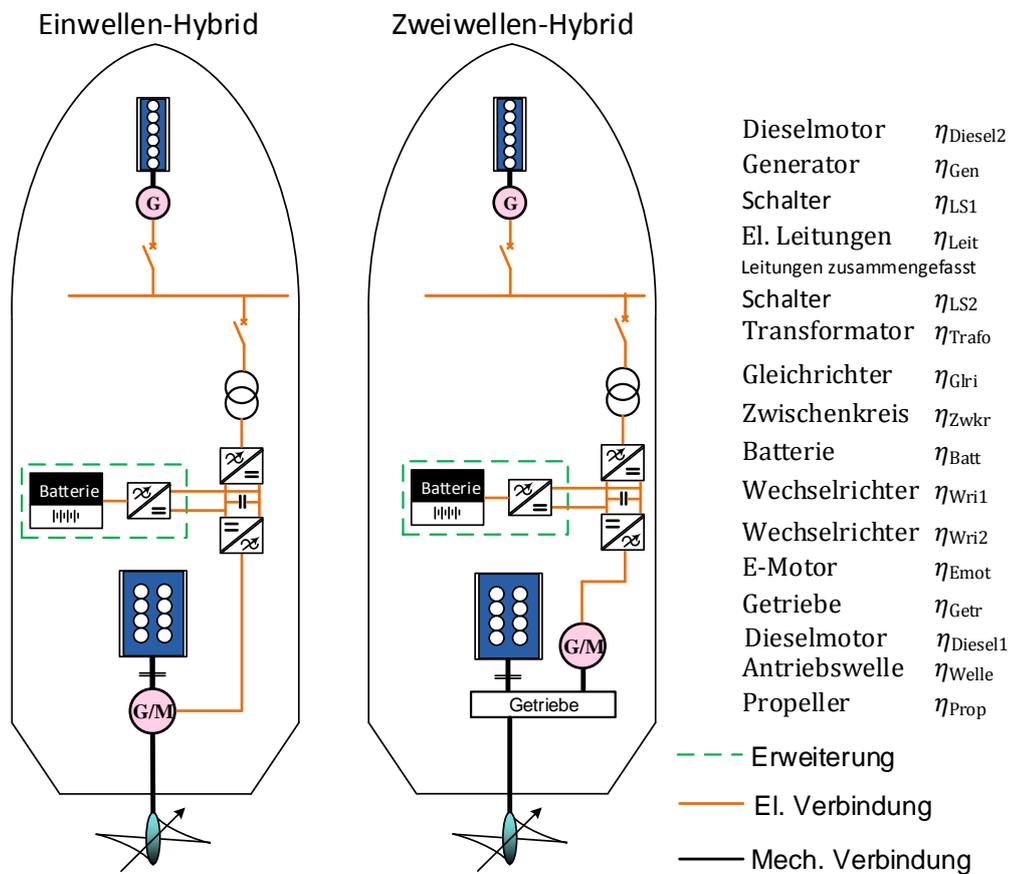


Abbildung 3.6.: Listung der Wirkungsgrade bei einem diesel-mechanischen Antrieb und Parallelhybrid

Da das Schiff bei einem Parallelhybrid rein konventionell, rein elektrisch oder gemischt betrieben werden kann, ergeben sich verschiedene Zusammensetzungen für die An-

triebsleistung. In Abbildung 3.6 sind die verschiedenen Wirkungsgradketten eines Parallelhybrids für die Ein- und Zweiwellenlösung dargestellt und in den nachfolgenden Gleichungen 3.3 und 3.4 zusammengefasst.

Einwellen-Hybrid:

$$\begin{aligned}
 \eta_{konv.,Einw.} &= \eta_{Diesel1} \cdot \eta_{Welle} \cdot \eta_{Prop} \\
 \eta_{elek.,Einw.} &= \eta_{Diesel2} \cdot \eta_{Gen} \cdot \eta_{LS2} \cdot \eta_{LS1} \cdot \eta_{Trafo} \cdot \eta_{Leit} \cdot \eta_{Glr} \cdot \eta_{Zwkr}^2 \\
 &\quad \cdot \eta_{Wri2}^2 \cdot \eta_{Batt}^2 \cdot \eta_{Wri1} \cdot \eta_{Emot} \cdot \eta_{Welle} \cdot \eta_{Prop} \\
 \eta_{parallelhybrid,Einw.} &= \frac{P_{Diesel1} \cdot \eta_{konv.,Einw.} + P_{Diesel2} \cdot \eta_{elek.,Einw.}}{P_{Diesel1} + P_{Diesel2}}
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

Zweiwellen-Hybrid:

$$\begin{aligned}
 \eta_{konv.,Zweiw.} &= \eta_{Diesel1} \cdot \eta_{Getr} \cdot \eta_{Welle} \cdot \eta_{Prop} \\
 \eta_{elek.,Zweiw.} &= \eta_{Diesel2} \cdot \eta_{Gen} \cdot \eta_{LS2} \cdot \eta_{LS1} \cdot \eta_{Trafo} \cdot \eta_{Leit} \cdot \eta_{Glr} \cdot \eta_{Zwkr}^2 \\
 &\quad \cdot \eta_{Wri2}^2 \cdot \eta_{Batt}^2 \cdot \eta_{Wri1} \cdot \eta_{Emot} \cdot \eta_{Getr} \cdot \eta_{Welle} \cdot \eta_{Prop} \\
 \eta_{parallelhybrid,Zweiw.} &= \frac{P_{Diesel1} \cdot \eta_{konv.,Zweiw.} + P_{Diesel2} \cdot \eta_{elek.,Zweiw.}}{P_{Diesel1} + P_{Diesel2}}
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

Ein Nachteil des parallelen Hybridantriebes ist, dass der Verbrennungsmotor nicht mehr stationär und somit nicht unabhängig vom Antrieb der Schiffsschraube arbeiten kann. Beispielsweise entfällt die Möglichkeit, den Verbrennungsmotor stationär im verbrauchs- bzw. emissionsoptimalen Punkt zu betreiben, wenn die Energie nicht durch die Batterie aufgenommen werden kann. [23]

4. Anwendungsfälle für Batteriespeicher

In den Abschnitten des folgenden Kapitels werden die Anwendungsfälle für Batteriespeicher auf Schiffen dargelegt.

Im ersten Abschnitt 4.1 wird der typische und weit verbreitete Einsatz von Batteriespeichern als unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) beschrieben.

Anschließend werden in den folgenden Abschnitten 4.2-4.5 verschiedene Möglichkeiten dargestellt, bei denen das Antriebssystem eines Schiffes direkt oder das Bordnetz durch ein Batteriesystem zusätzlich zur USV ergänzt wird. Die Realisierbarkeit dieser Anwendungen wird in Kapitel 5 untersucht.

4.1. Unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV)

Ein klassischer Anwendungsfall für Batterien auf vielen kommerziellen Schiffen ist der Einsatz von Batteriespeichern als USV.

Eine USV dient zur Pufferung und Versorgung von kritischen Verbrauchern und wichtigem Equipment. Bei einem Ausfall der Stromversorgung werden zum Beispiel die Notbeleuchtung, das Navigationsequipment, die integrierte Alarm- und Überwachungsanlage, die IT, die Notschalttafel, die Dieselsteuerung, die Hauptschalttafel, Schutzgeräte und die Antriebssteuerung jeweils von einer oder mehreren USVen für eine vorgeschriebene Zeit bis zum Einschalten der Notdieselgeneratoren versorgt. Die USVen werden direkt oder über Unterverteilungen an die Hauptschalttafel und in der Regel mit einer zweiten Einspeisung über den Notdiesel angeschlossen und über diese versorgt.

4.2. Versorgung eines hybriden Antriebssystems

Eine weitere Anwendungsmöglichkeit für ein Batteriesystem ist die dauerhafte Versorgung des hybriden Antriebssystems eines Schiffes für einen bestimmten Anwendungs-

fall und einen zuvor festgelegten Zeitraum, beispielsweise für die Revierfahrt oder den Manöverbetrieb.

Als Revierfahrt, die eine Form des Manöverbetriebs darstellt, wird die Strecke bezeichnet, die ein Schiff von der offenen See bis zum Liegeplatz im Hafen oder entsprechend vom Liegeplatz bis zur offenen See zurücklegt. Während der Revierfahrt könnte die Stromversorgung des Antriebssystems von einem Batteriesystem übernommen werden, sofern das Schiff ein hybrides Antriebssystem besitzt. Der Einsatz eines Batteriesystems hat verschiedene Vorteile.

Durch die Verwendung eines Batteriesystems zur Stromversorgung des Antriebssystems können die Antriebsdieselmotoren oder die Dieselgeneratoren vollständig oder teilweise abgeschaltet werden, was eine Verringerung des Schadstoffausstoßes in küstennahen Regionen bedeutet. Des Weiteren werden die Betriebskosten und Betriebsstunden der Dieselgeneratoren und Treibstoffkosten eingespart.

Die Dimensionierung des Batteriesystems wird anhand der Leistungen der Antriebe und der voraussichtlichen Betriebsdauer erstellt. Aufgrund der teils sehr großen Leistungen der Motoren, der Länge der verschiedenen Strecken der Revierfahrten und der Größe der ECAs¹ ist eine allgemeine Dimensionierung des Batteriesystems schwierig. Die Strecke der Revierfahrt von Hamburg bis in die Nordsee beträgt ca. 120 km und ist somit achtmal länger als die Strecke von Rostock in die Ostsee mit nur ca. 15 km. Für den Einsatz in großen ECAs, zum Beispiel in der Nord- und Ostsee, reicht die Batteriekapazität allein nicht für den dauerhaften Fahrbetrieb aus. Daher muss für jedes Schiff entsprechend seines Einsatzgebietes die Dimensionierung der Batteriekapazität vorgenommen werden.

Während des Manöverbetriebs eines Schiffes werden neben den Hauptantrieben auch die Hilfsantriebe, beispielsweise Thruster, benötigt. Ein Batteriesystem kann folglich für die Versorgung der Hilfsantriebe verwendet werden, wodurch ebenfalls Einsparungen bei den Wartungs- und Treibstoffkosten erzielt werden, und um den Schadstoffausstoß besonders in den Hafengebieten zu verringern.

Eine Dimensionierung des Batteriesystems erfolgt ebenfalls anhand der Leistungen und der Betriebsdauer der Hilfsantriebe. Die Betriebsdauer der Hilfsantriebe von Kreuzfahrtschiffen beträgt im Schnitt 30 - 45 min² und ist somit genauer als die Betriebsdauer bei den Revierfahrten zu kalkulieren. Aufgrund der variierenden Antriebsleistung der Hilfsantriebe kann kein allgemeines Batteriesystem dimensioniert werden, sondern muss für jedes Schiff entsprechend entworfen werden.

¹Emissions-Überwachungsgebiete (engl.: **Emission Control Area**)

²Zeitwerte aus Lastprofilen ermittelt (Tabelle 5.6)

Die Batterien können anschließend in den Häfen über einen Landanschluss³ und auf See durch die Dieselgeneratoren geladen werden. Hierbei geht man davon aus, dass die Dieselgeneratoren beim Laden das günstige Schweröl verwenden und der Strompreis der Landversorgung günstiger als der MGO-Treibstoffpreis ist.

Bedingt durch die großen Leistungen der Antriebe, die häufig mehrere Megawatt betragen, werden nicht nur eine große Batteriekapazität, sondern auch der entsprechende Platz zur Installation des Batteriesystems benötigt.

4.3. Standby-Betrieb

Ein Batteriesystem kann auch für den Standby-Betrieb verwendet werden, um einen Teillastbetrieb der Dieselgeneratoren während der Revierfahrt oder des Manöverbetriebs zu vermeiden und kurzfristige Spitzenlasten abzudecken.

Als Standby-Betrieb wird der Betriebszustand eines Dieselgenerators bezeichnet, der ausgeschaltet, aber betriebsbereit ist und jederzeit durch das PMS zur Versorgung gestartet werden kann. Während des normalen Betriebs werden alle nicht benötigten Dieselgeneratoren abgeschaltet und durch das PMS verwaltet. Das PMS kann je nach Auslastung und bei Lastanforderungen durch Großverbraucher, beispielsweise den Thrustern, zusätzliche Dieselgeneratoren starten oder nach Lastabwurf von Großverbrauchern laufende Dieselgeneratoren abschalten. Dieses Verhalten ist in Abbildung 4.1 veranschaulicht.

³Stromversorgung des Schiffes durch das örtliche Versorgungsnetz des Hafens durch eine elektrische Kabelverbindung

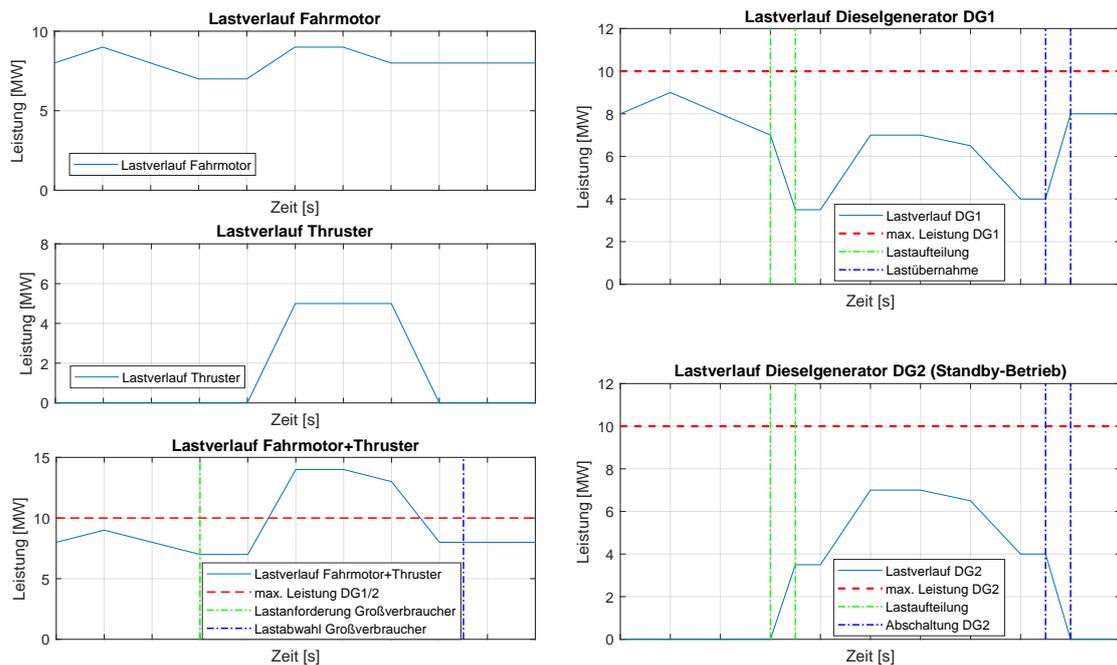


Abbildung 4.1.: Vereinfachte Darstellung des Lastverhaltens eines Dieselgenerators im Standby-Betrieb

Der Lastverlauf eines Batteriesystems, das den Standby-Betrieb eines Dieselgenerators übernimmt, ist in Abbildung 4.2 dargestellt. Die Betriebsart eines Batteriesystems, das im Standby-Betrieb arbeitet, wird auch als Peak Shaving des Bordnetzes bezeichnet und in Abschnitt 4.5.2 erläutert.

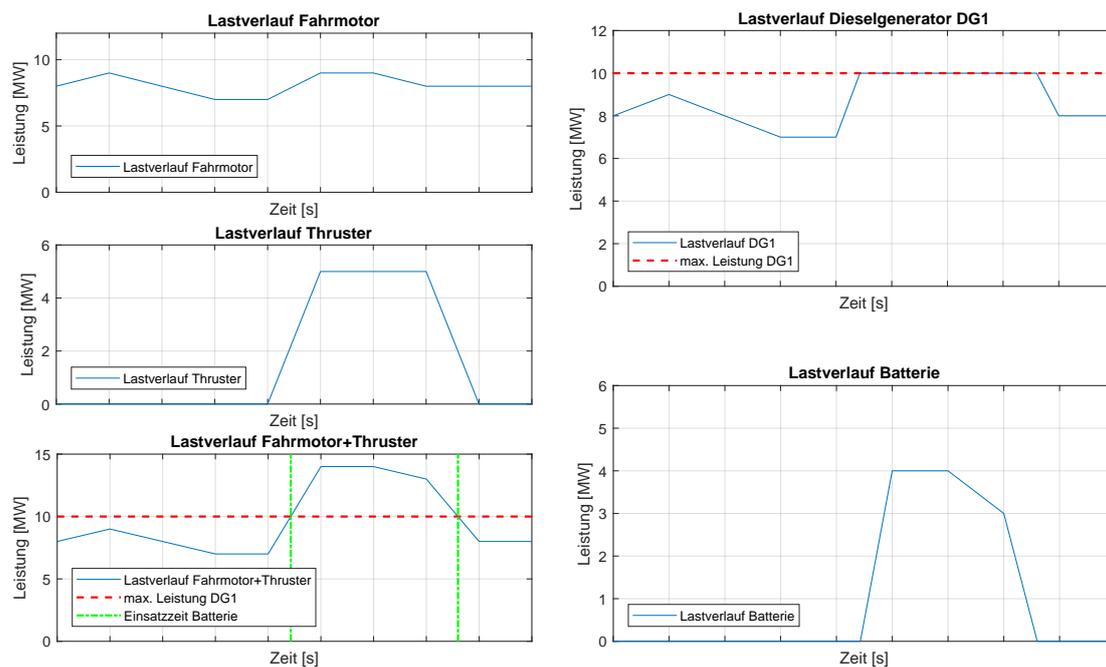


Abbildung 4.2.: Vereinfachte Darstellung des Lastverhaltens eines Dieselgenerators mit einem Batteriesystem im Standby-Betrieb

4.4. Versorgung eines rein elektrischen Antriebssystems

Die Verwendung eines Batteriesystems für die Stromversorgung eines rein elektrischen Antriebssystems ist im Automotive Bereich bereits weit verbreitet und gewinnt im Bereich der Schifffahrt verstärkt an Bedeutung.

Im Gegensatz zur Stromversorgung eines Hybridantriebes (Abschnitt 4.2) wird bei der Versorgung eines rein elektrischen Antriebssystems die gesamte benötigte Energie von einem Batteriesystem bereitgestellt. Vorreiter dieser Anwendung in der Schifffahrt ist Norwegen mit der elektrischen Fähre „Ampere“, wie bereits in der Einführung erwähnt. Das Batteriesystem der Fähre ist so dimensioniert worden, dass die Batterien nachts vollständig geladen, während der Überfahrt teilweise entladen und für jeweils 10 Minuten während des Aufenthalts am Anleger wieder aufgeladen werden. Die Vorteile dieser Anwendung sind der emissionsfreie Betrieb und der Wegfall der Treibstoff- und Wartungskosten der Dieselgeneratoren. [16]

Zusätzlich zu den Fahrmotoren kann durch ein Batteriesystem auch die komplette Bord-

netzversorgung oder die Stromversorgung der übrigen Motoren, beispielsweise der Kräne und Winden, übernommen werden, die nur während eines Aufenthalts im Hafen oder vor Anker liegend verwendet werden.

4.5. Peak Shaving

„Das Senken und damit Glätten von Lastspitzen nennt man auch Peak Shaving. Es dient dazu, in Zeiten mit besonders hoher Stromnachfrage Versorgungsengpässe zu vermeiden sowie das Netz und den Kraftwerkspark zu entlasten und insgesamt effizienter auszunutzen.“⁴

Peak Shaving kann auch auf das Antriebssystem eines Schiffes übertragen werden, um den Antriebsmotor oder den Dieselgenerator besser auszulasten und somit effizienter zu machen. Dieses Ziel kann über zwei Ansätze erreicht werden.

4.5.1. Peak Shaving des Fahrmotors

Bei einem Schiff wird in der Regel die Geschwindigkeit über die Drehzahl der Antriebswelle geregelt, wodurch es einfacher ist, die Hauptmaschine im optimalen Arbeitspunkt zu betreiben.

Wie bereits in Abschnitt 1.3 erwähnt, wird bei modernen Schiffen eine konstante Leistungsregelung eingesetzt, damit die Leistung des Fahrmotors konstant bleibt und weiterhin im optimalen Arbeitspunkt betrieben wird. Voraussetzung für diesen Betrieb ist eine Mindestleistung des Fahrmotors. Diese Regelung findet auf Schiffen mit einem FPP und vorwiegend bei rauer See Anwendung, damit bei variabler Umdrehungszahl der Welle durch starke Lastschwankungen am Propeller der Fahrmotor weiterhin eine konstante Leistung abgibt.

Unter idealen Bedingungen bleibt die Wellendrehzahl konstant und somit auch die abgegebene Leistung von Fahrmotor und Propeller. Unter realen Bedingungen schwankt durch äußere Einflüsse die Last am Propeller. Bei gleichbleibender Leistung des Fahrmotors schwankt entsprechend die Umdrehungszahl der Antriebswelle. Dies führt natürlich dazu, dass sich die Schiffsgeschwindigkeit ändert. Um die Umdrehungszahl der

⁴<https://www.unendlich-viel-energie.de/glossar>

Welle unter realen Bedingungen konstant zu halten, muss die Leistung des Fahrmotors entsprechend

$$P \sim n^3$$

erhöht oder verringert werden, um den Drehzahlsollwert zu erreichen. Dieses Verhältnis gilt näherungsweise für Antriebssysteme mit einem Festpropeller (FPP).

Schiffe, die mit einem CPP ausgestattet sind, können in einem gewissen Maß den Pitch des Propellers verändern.

Den Fahrmotor weiterhin im optimalen Arbeitspunkt zu betreiben, kann durch Peak Shaving erreicht werden.

Für Peak Shaving bietet sich ein Parallelhybrid an, da ein direkter Lastausgleich des Diesel-Hauptantriebs durch das Peak Shaving stattfindet. Bei einem Serienhybrid hingegen würde der Elektromotor ebenfalls mit konstanter Leistung betrieben werden, aber die Leistung der Dieselgeneratoren schwankt.

Der Wellengenerator des Hybridantriebs wird im PTO-Modus betrieben und soll die Drehzahlschwankungen kompensieren, die normalerweise eine Leistungsanpassung des Fahrmotors zur Folge haben. Um die Lastschwankungen auszugleichen, wird die Leistung, die der Wellengenerator abgibt um den entsprechenden Betrag verringert oder erhöht, damit die Wellendrehzahl konstant bleibt. Die benötigte oder freiwerdende Energie des Wellengenerators wird letztendlich durch das Batteriesystem kompensiert. In [Abbildung 4.3](#) ist dieses Prinzip dargestellt.

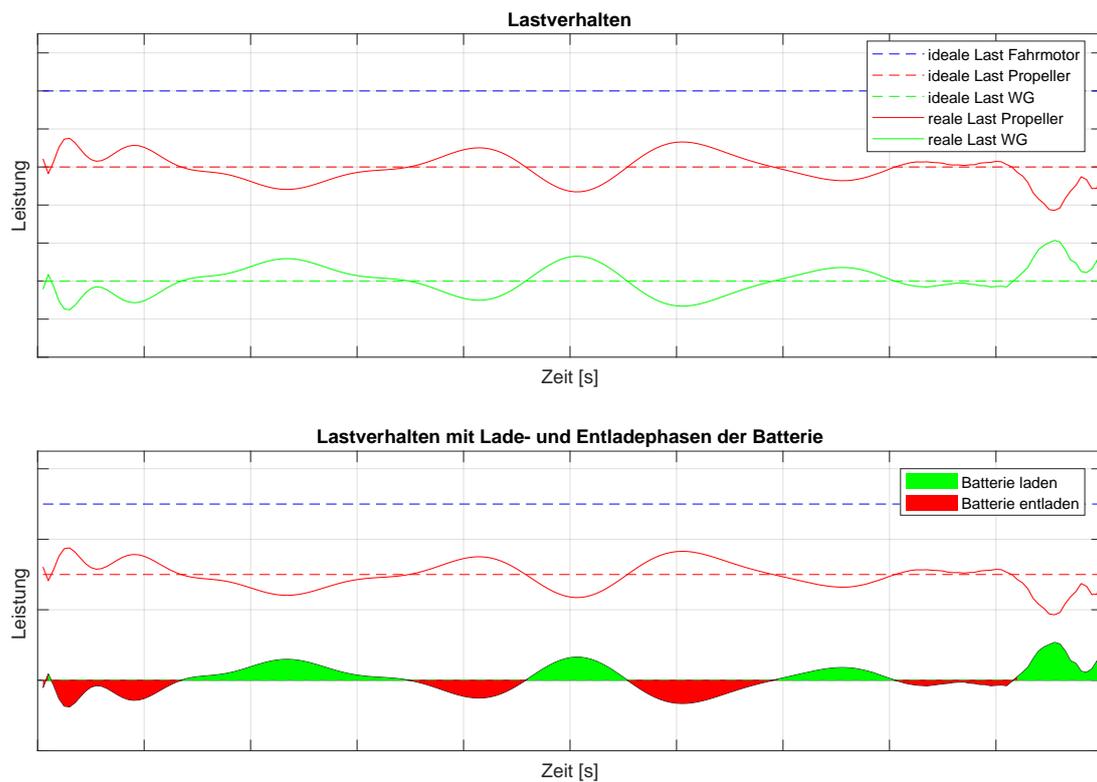


Abbildung 4.3.: Beispielhaftes Lastverhalten von Antrieb, Propeller und Wellengenerator beim Peak Shaving

Bei steigender Last am Propeller, die durch Wind und Wellen gegen die Fahrrichtung (Bremsen) entsteht, sinkt die Umdrehungszahl bei gleichbleibender Leistung des Fahrmotors. Der Wellengenerator verringert in dieser Zeit seine abgegebene Leistung um den gleichen Betrag, den der Propeller an zusätzlicher Leistung benötigt. Dadurch bleibt die Drehzahl konstant. Die fehlende Energie, die ins Bordnetz eingespeist werden muss, wird von der Batterie geliefert.

Bei sinkender Last am Propeller, die durch Wind und Wellen in Fahrrichtung (Beschleunigen) entsteht, steigt die Umdrehungszahl bei gleichbleibender Leistung des Fahrmotors. Der Wellengenerator erhöht entsprechend seine abgegebene Leistung, die zum Laden der Batterie verwendet wird. Da die Leistung des Fahrmotors in beiden Vorgängen konstant bleibt, arbeitet der Fahrmotor weiterhin im optimalen Arbeitspunkt.

Eine mögliche Dimensionierung eines Batteriesystems für Peak Shaving des Fahrmotors wird in Kapitel 6 anhand der Auswertung der Lastprofile aus Abschnitt 5.6.1 vorgenommen.

4.5.2. Peak Shaving des Bordnetzes

Die zweite Möglichkeit für Peak Shaving ist die Stabilisation des Bordnetzes und somit die Steigerung der Effizienz der Dieselgeneratoren.

Dieselgeneratoren werden wie die Fahrmotoren in einem optimalen Arbeitspunkt betrieben. Um die vom Schiff benötigte Leistung zu liefern, werden ein oder mehrere Dieselgeneratoren parallel betrieben. In der Regel arbeiten auf einem Schiff mehrere Generatoren mit teils unterschiedlichen Nennleistungen.

Durch verschiedene Betriebssituationen werden die Dieselgeneratoren teilweise ungünstig ausgelastet und haben somit einen schlechteren Wirkungsgrad. Dies geschieht beispielsweise im Manöverbetrieb. In der Abbildung 4.4 wird der Lastverlauf von drei Dieselgeneratoren und der gesamten geforderten Last des Schiffes exemplarisch dargestellt.

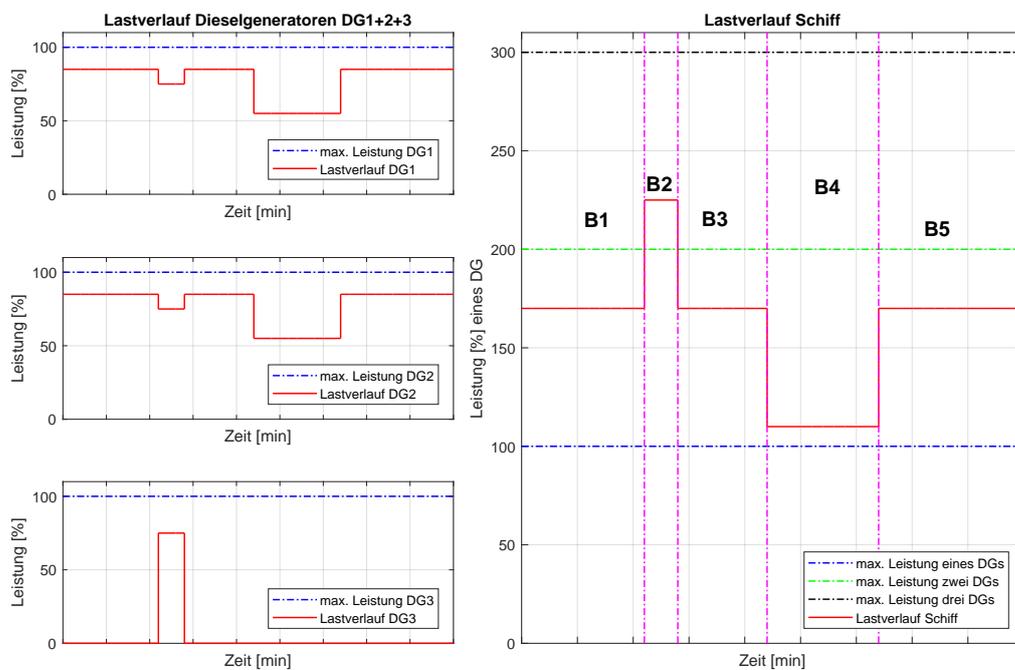


Abbildung 4.4.: Schematischer Lastverlauf von drei Dieselgeneratoren und dem Kapazitätsverlauf eines Batteriesystems für die gesamte Schiffsleistung

In den Bereichen B1, B3 und B5 liegt die gesamte geforderte Schiffsleistung bei 170 %. Die beiden Dieselgeneratoren DG1+2 werden mit jeweils 85 % ausgelastet. Im Bereich

B2 steigt die geforderte Leistung kurzfristig auf 225 % an, wodurch ein weiterer Dieselgenerator DG3 gestartet werden muss, um die zusätzlich benötigte Leistung zu liefern. Die Auslastung der drei Generatoren beträgt 75 %. Im Bereich B4 liegt die geforderte Leistung bei 110 % und somit geringfügig über der maximalen Leistung eines DG, wodurch DG1 und DG2 mit 55% Auslastung betrieben werden, um die benötigte Leistung zu liefern.

Durch die Verwendung eines Batteriesystems können diese kurzfristigen Peaks (Bereich B2) und längere Teillastbetriebe (Bereich B4) kompensiert werden. Hierzu wird das Schiffssystem durch ein Batteriesystem ergänzt (Abb. 4.5).

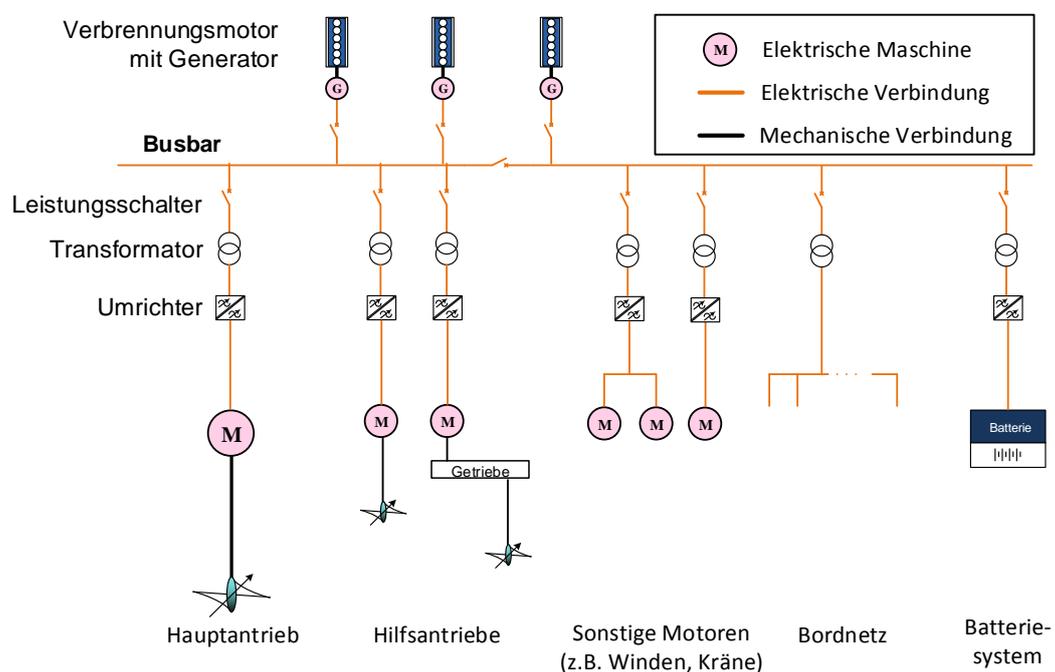


Abbildung 4.5.: Vereinfachtes Singleline-Diagramm eines Schiffsystems mit Batteriesystem

In der Abbildung 4.6 ist das Lastverhalten der Dieselgeneratoren und der Kapazitätsverlauf einer Batterie beim Peak Shaving des Bordnetzes dargestellt. Die Batterie übernimmt die Stromversorgung bei Lastspitzen (Bereich B2) oder Lastanforderungen, die geringfügig oberhalb der Generatorleistung liegen (Bereich B5), damit für diese Zeiträume kein weiterer Generator gestartet werden muss. Die Batterie kann nach ihrem Einsatz durch die Generatoren oder während der Liegezeiten im Hafen über einen Landanschluss wieder aufgeladen werden (Bereich B3+B6).

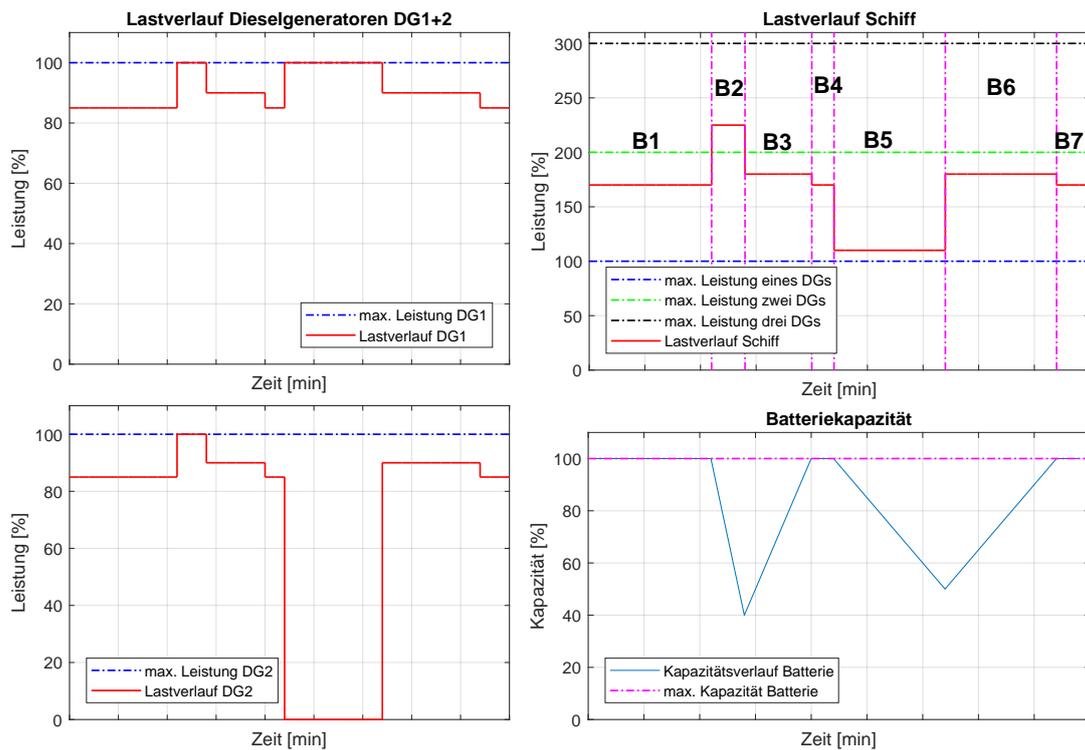


Abbildung 4.6.: Schematischer Lastverlauf von zwei Dieselgeneratoren und dem Kapazitätsverlauf eines Batteriesystems für die Schiffsleistung

Eine mögliche Dimensionierung eines Batteriesystems für Peak Shaving des Bordnetzes wird in Kapitel 6 anhand der Ergebnisse der Auswertungen der Lastprofile aus Abschnitt 5.6.2 vorgenommen.

5. Auswertung und Analyse der Lastprofile

In den Abschnitten des folgenden Kapitels werden die Lastprofile von drei verschiedenen Schiffen ausgewertet. Anhand dieser Auswertungen werden in Kapitel 6 Batteriesysteme für verschiedene Anwendungsfälle konzipiert.

Die Messdaten sind von Wärtsilä Italien und der Tochterfirma eniram des Unternehmens Wärtsilä bereitgestellt worden.

Bei den drei Schiffen handelt es sich um drei große Kreuzfahrtschiffe mit diesel-elektrischen Antriebssystemen und einer Passagierkapazität von rund 2.500 bis 3.000 Passagieren. Weitere Angaben zu den Schiffen dürfen aus Datenschutzgründen nicht gemacht werden.

Die Lastprofile werden hinsichtlich zweier möglicher Anwendungsfälle für Batteriesysteme ausgewertet. Zum einem soll ein mögliches Batteriesystem für Peak Shaving des Fahrmotors und zum anderen für Peak Shaving des Bordnetzes konzipiert werden. Zunächst werden die Leistungen der Fahrmotoren während des Seebetriebs und anschließend die Leistungen der Dieselgeneratoren und Hilfsantriebe während des Manöverbetriebs und der Liegezeiten untersucht. Die Untersuchung soll als Ergebnis die Dauer, Häufigkeit und Höhe der Lastschwankungen liefern.

Alle Diagramme, Excel-Dateien und sonstige Dokumente der Auswertungen befinden sich auf der CD und können bei Herrn Prof. Dr. Riemschneider eingesehen werden.

5.1. Inhalt der Lastprofile

Die zur Verfügung stehenden Daten enthalten die Lastprofile von drei Kreuzfahrtschiffen. Jeder Datensatz erstreckt sich über einen Zeitraum von einer Woche, wobei die Auflösung der Aufzeichnungen und der Inhalt der Daten zwischen den einzelnen Schiffen variieren.

5.1.1. Schiff 1

Der Datensatz von Schiff 1 enthält u.a. die nachfolgenden Daten über einen Zeitraum von 7 Tagen mit einer Auflösung von 60 Sekunden, die zusätzlich im Anhang [E.1](#) dargestellt sind:

- Schiffsgeschwindigkeit über Grund [Knoten] (engl.: **Speed Over Ground**) ([SOG](#))
- Leistung [MW] von 6 Dieselgeneratoren
- Leistung [MW] der Fahrmotoren Backbord (engl.: **Port Side**) ([PS](#)) und Steuerbord (engl.: **Starboard**) ([SB](#))
- Leistung [MW] der sonstigen Schiffslast

5.1.2. Schiff 2

Der Datensatz von Schiff 2 enthält u.a. die nachfolgenden Daten über einen Zeitraum von 7 Tagen mit einer Auflösung von 30 Sekunden, die zusätzlich im Anhang [E.2](#) dargestellt sind:

- Schiffsgeschwindigkeit über Grund [Knoten] ([SOG](#))
- Leistung [MW] von 6 Dieselgeneratoren
- Leistung [MW] von 3 Heizungs-, Lüftungs- und Klimaanlage (engl.: **Heat Ventilation Air Condition**) ([HVAC](#))
- Leistung [MW] der Fahrmotoren PS und SB

5.1.3. Schiff 3

Der Datensatz von Schiff 3 enthält u.a. die nachfolgenden Daten über einen Zeitraum von 7 Tagen mit einer Auflösung von 30 Sekunden, die zusätzlich im Anhang [E.3](#) dargestellt sind:

- Schiffsgeschwindigkeit über Grund [Knoten] ([SOG](#))
- Leistung [MW] von 6 Dieselgeneratoren
- Leistung [MW] von 3 HVAC-Anlagen
- Leistung [MW] von 3 Thrustern

- Leistung [MW] der Fahrmotoren PS und SB

5.2. Vorgehen bei der Auswertung der Lastprofile der Fahrmotoren

Obwohl es sich bei den Antriebssystemen der drei Schiffe um diesel-elektrische Antriebe handelt, wirken sich äußere Einflüsse in gleicher Weise auf den Propeller aus wie bei einem diesel-mechanischen Antrieb. Für die Untersuchung werden lediglich die Lastschwankungen der Fahrmotoren benötigt. Das Ergebnis der Untersuchungen der diesel-elektrischen Antriebe ist in gleicherweise auf das Antriebssystem eines diesel-mechanischen Antriebs anwendbar.

Die Analysen und Auswertungen der Lastschwankungen der Fahrmotoren erfolgen für alle drei Schiffe nach dem gleichen Verfahren und werden exemplarisch für Schiff 2 vorgestellt. Bei allen drei Schiffen wird der Fahrmotor der Backbordseite (PS) des Schiffes untersucht.

Zur Auswertung der Lastprofile wird das Programm MATLAB verwendet.

Um die Lastschwankungen des Fahrmotors zu analysieren, werden einzelne Zeiträume betrachtet, wie in Abbildung 5.1 dargestellt, in denen die Leistung des Fahrmotors nahezu konstant ist.

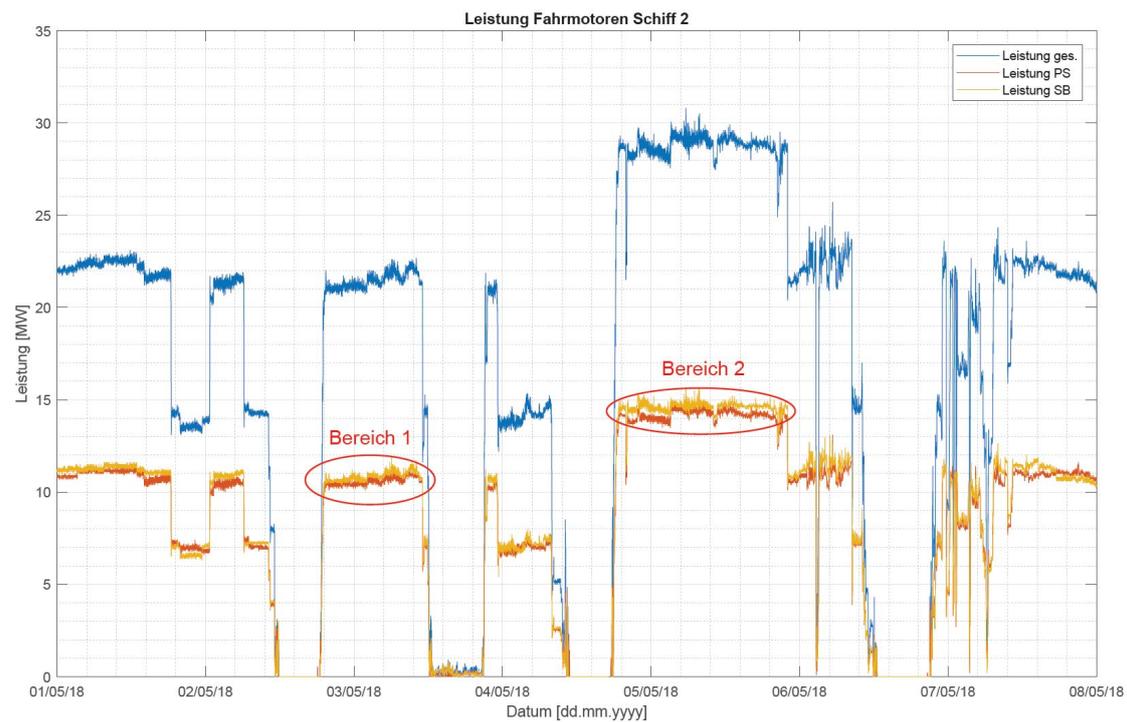


Abbildung 5.1.: Leistungsdaten der Fahrmotoren (Schiff 2) mit Markierungen der zu analysierenden Bereiche

Die Bereiche werden anschließend in [Abbildung 5.2](#) vergrößert dargestellt und mittlere Leistungen per Hand für den Fahrmotor festgelegt. Eine Mittlung mit der polyval-/polyfit-Funktion von MATLAB wurde nur bei der Auswertung der Lastdaten von Schiff 1 angewandt, da die Lastschwankungen um den Mittelwert dort nicht so groß sind. Für die beiden anderen Schiffe erweist sich die Mittlung per Hand als praktikabler. Die Festlegung der mittleren Leistungen wird benötigt, damit bestimmt werden kann, wann die Batterie geladen bzw. entladen wird.

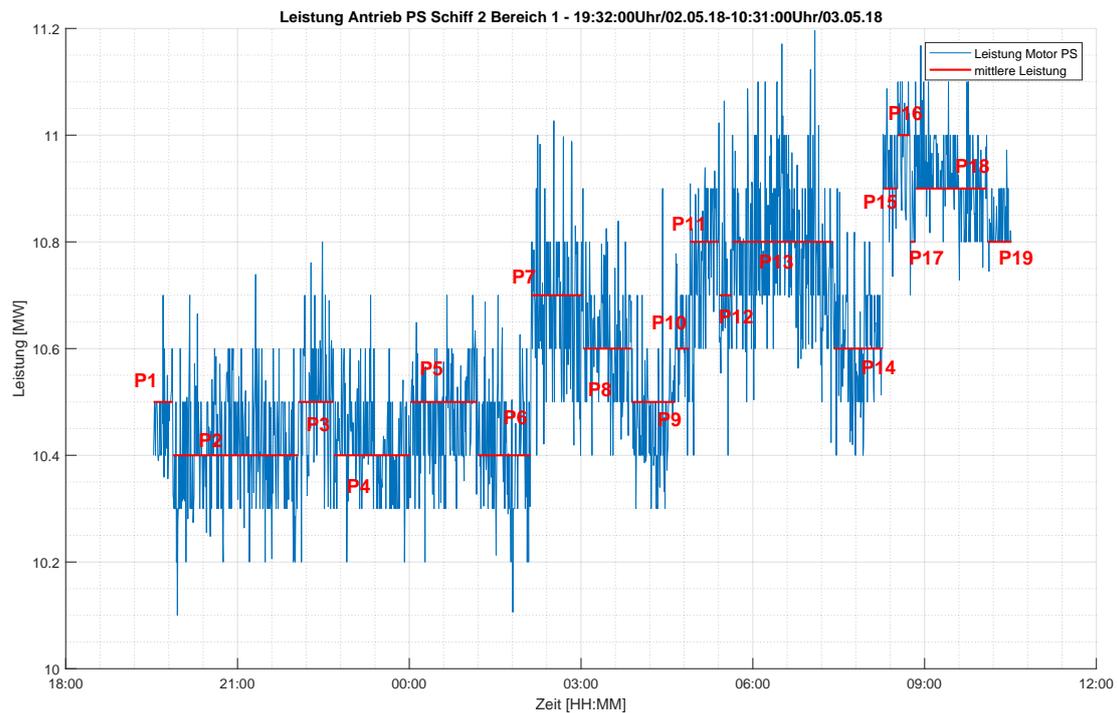


Abbildung 5.2.: Bereich 1 des Fahrmotors PS von Schiff 2 mit mittleren Leistungen (P1-19) des Fahrmotors

In Abbildung 5.3 sind die Lastschwankungen um die mittlere Leistung P2 des Bereiches 1 von Schiff 2 dargestellt, die mit Hilfe von MATLAB ausgewertet werden. Im oberen Teil dieser Abbildung ist der Lastverlauf des Fahrmotors mit der mittleren Leistung dargestellt. Im unteren Teil dieser Abbildung ist die Größe der Lastspitzen um die mittlere Leistung und das zugehörige Verhalten der Batterie, ob diese geladen oder entladen wird, dargestellt. Das gleiche Verfahren wird auch für alle anderen Abschnitte des Bereiches durchgeführt.

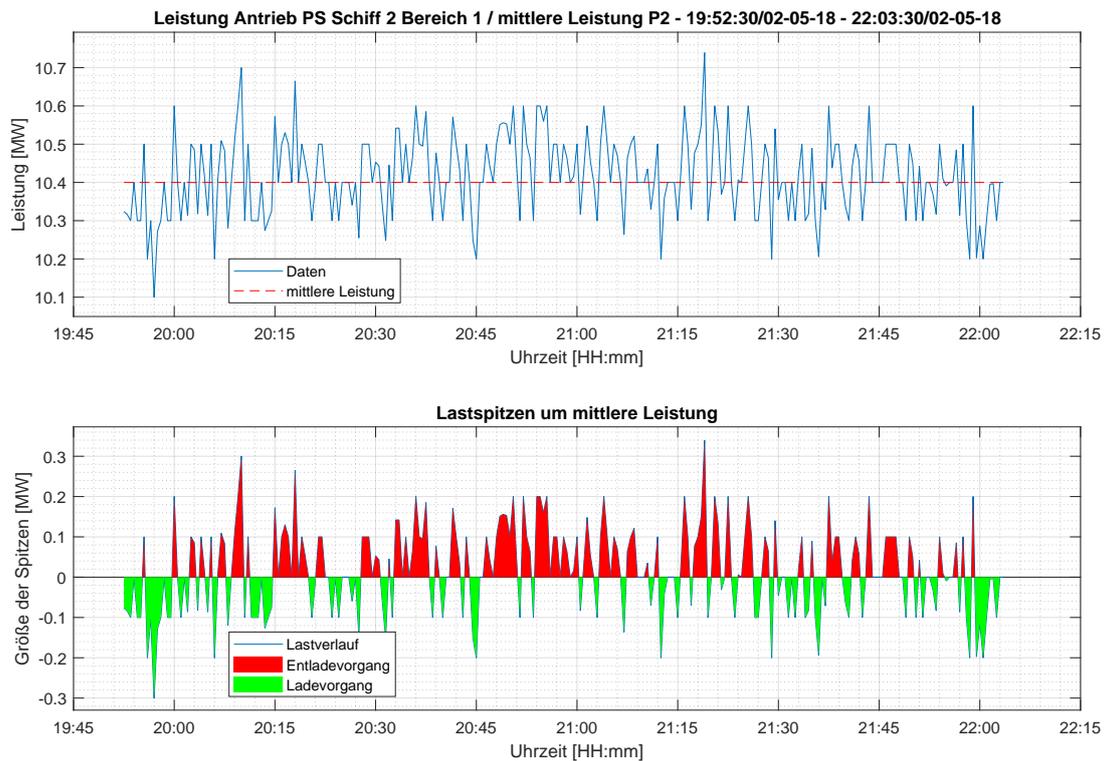


Abbildung 5.3.: Lastverlauf des Fahrmotors PS von Schiff 2 um die mittlere Leistung P2 von Bereich 1

Neben der Visualisierung der Messdaten werden mit MATLAB auch die benötigten Werte in einer Excel-Datei (Tabelle 5.1) ausgegeben. In Abschnitt 5.5 werden die Ergebnisse der Auswertungen grafisch dargestellt und sind in der Tabelle D.1 im Anhang zusammengefasst.

Tabelle 5.1.: Ergebnisse der Auswertung der Lastschwankungen um die mittlere Leistung P2 von Bereich 1 von Schiff 2

Parameter	Entladen	Laden
Anzahl der Vorgänge	55	54
gesamte Energie [kWh]	96,37	-59,5
gesamte Zeit [h]	1,15	0,88
durchschnittliche Peak-Dauer [h]	0,021	0,016
durchschnittliche Peak-Energie [kWh]	1,75	-1,1
durchschnittliche Leistung [kW]	83,55	-66,99

5.3. Vorgehen bei der Auswertung der Lastprofile des Bordnetzes

Die für das Peak Shaving das Bordnetzes relevanten Bereiche sind die Abschnitte, in denen die Leistungen der Dieselgeneratoren ober- oder unterhalb ihres Arbeitsbereichs liegen und diese somit mit einem schlechteren Wirkungsgrad gegenüber ihres Nennarbeitsbereichs betrieben werden. Dies ist während der Manöverbetriebe und teilweise während der Liegezeiten der Fall. Die Arbeitsbereiche der Generatoren sind durch das PMS festgelegt. Liegt die Leistung eines Dieselgenerators unterhalb der minimalen Leistungsgrenze $P_{Geno,min}$, wird der Dieselgenerator sofern möglich abgeschaltet, liegt die Leistung über der maximalen Leistungsgrenze $P_{Geno,max}$, wird ein weiterer Generator sofern möglich gestartet. Die minimale maximale Leistungsgrenze entspricht nicht der minimalen und maximalen Leistung des jeweiligen Dieselgenerators, sondern wird vom PMS für das Abschalten eines Dieselgenerators oder für das Zuschalten eines weiteren Dieselgenerators verwendet.

Der Auslastungsbereich der Dieselgeneratoren von Schiff 2 liegt zwischen 45 % bis 80 %, was einer Leistung von $P_{Geno,Schiff2,min} = 4,678MW$ bis $P_{Geno,Schiff2,max} = 8,316MW$ entspricht. Der Auslastungsbereich der Dieselgeneratoren von Schiff 3 liegt zwischen 45 % bis 77,5 %, was einer Leistung von $P_{Geno,Schiff3,min} = 4,678MW$ bis $P_{Geno,Schiff3,max} = 8,056MW$ entspricht.

Die Auswertung der Lastprofile des Bordnetzes wird anhand der Schiffe 2 und 3 durchgeführt, da dort die Auslastungsbereiche der Generatoren gegeben sind.

5.3.1. Auswertung der Manöverbetriebe

Neben den Lastverläufen der Dieselgeneratoren enthält der Datensatz von Schiff 3 die Lastverläufe der drei Thruster des Schiffes. Für die Auswertung des Bordnetzes während der Manöverbetriebe werden die Lastverläufe der Dieselgeneratoren von Schiff 2 und 3 und der Thruster von Schiff 3 untersucht.

Das Vorgehen der Auswertung wird exemplarisch für Schiff 3 dargestellt, da dort die Lastverläufe der Thruster vorliegen und somit die genauen Zeiträume der Manöverbetriebe bekannt sind.

In Abbildung 5.4 sind die Lastverläufe der Dieselgeneratoren und Thruster dargestellt und die Bereiche der Manöverbetriebe markiert.

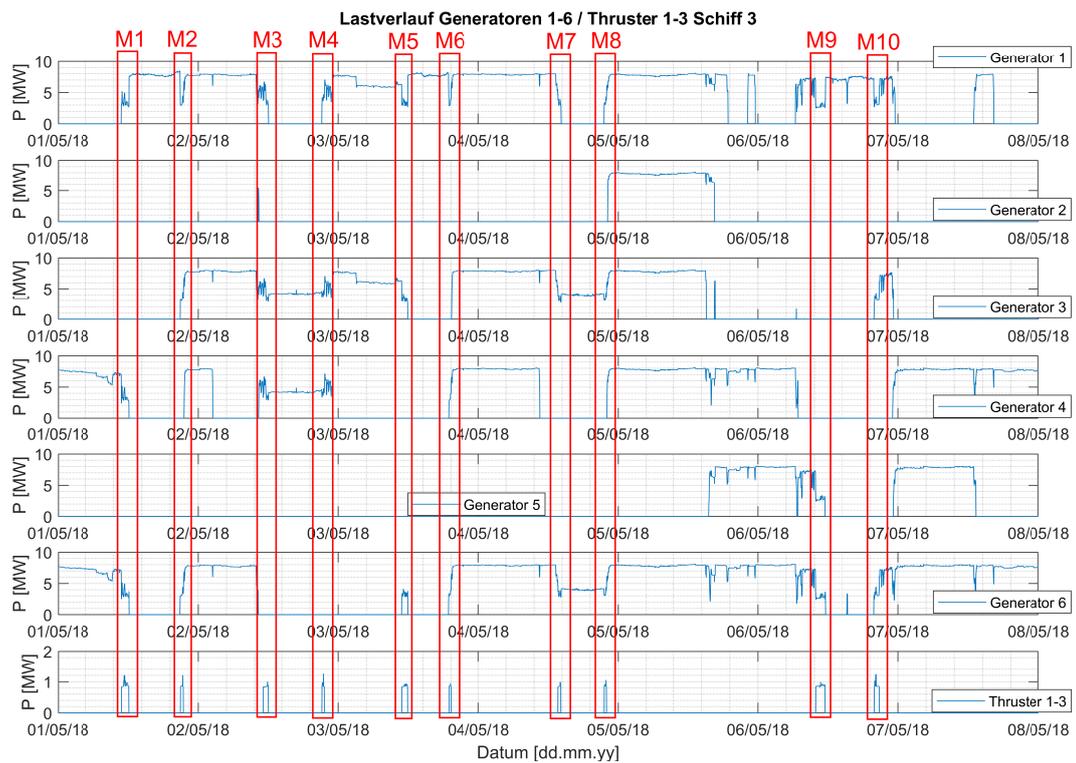


Abbildung 5.4.: Lastverläufe der Dieselgeneratoren und Thruster von Schiff 3 mit Markierungen der Manöverbetriebe (M1-10)

Für jeden Manöverbetrieb werden die einzelnen Lastverläufe und der gesamte Lastverlauf der in dem Zeitraum arbeitenden Dieselgeneratoren dargestellt und ausgewertet.

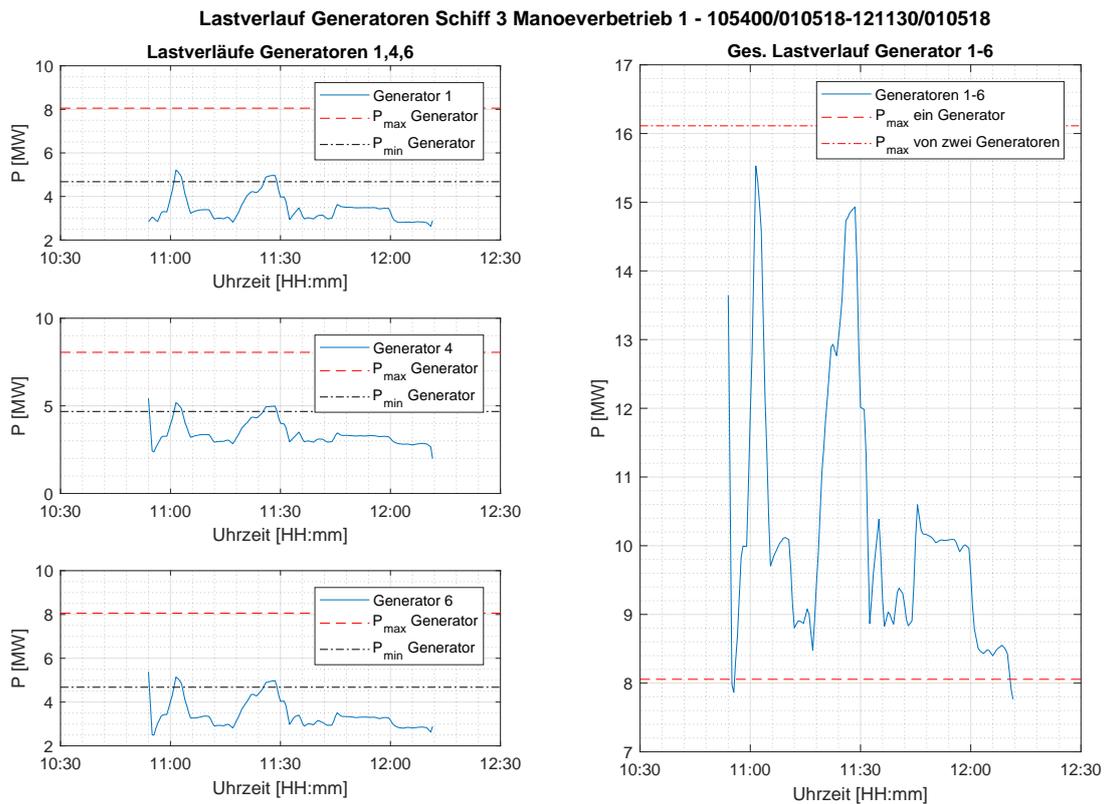


Abbildung 5.5.: Lastverläufe der Generatoren von Manöverbetrieb 1

Im ersten Manöverbetrieb werden die Generatoren 1,4 und 6 unterhalb der minimalen Leistungsgrenze betrieben (Abb. 5.5). Die Abschaltung eines Dieselgenerators ist aufgrund des Manöverbetriebs und der entsprechenden Vorgaben der Klassifikationsgesellschaften nicht zulässig. Um eine bessere Auslastung der Dieselgeneratoren zu erzielen, können entweder ein oder zwei Dieselgeneratoren mit einem zusätzlichen Batteriesystem betrieben werden und daraus ergeben sich folgende Betriebsituationen.

Während des Manöverbetriebs wird ein Dieselgenerator verwendet und das Batteriesystem liefert dauerhaft die benötigte Energie, die oberhalb der Leistung eines Dieselgenerators liegt, oder während des Manöverbetriebs werden zwei Dieselgeneratoren betrieben und das Batterie-System im Standby-Betrieb verwendet. Das Batteriesystem übernimmt die kurzzeitige Versorgung der Spitzenlasten, die oberhalb der Leistung der beiden Dieselgeneratoren liegen, beispielsweise im Manöverbetrieb 3 von Schiff 3 (siehe Anhang E.4)

Mit MATLAB werden die Lastschwankungen, die oberhalb der maximalen zur Verfügung stehenden Leistung beim Einsatz von einem und zwei Dieselgeneratoren liegen, ermittelt und in einer Excel-Datei (Tabelle 5.2) ausgegeben.

Tabelle 5.2.: Ergebnisse der Auswertung des 1. Manöverbetriebs von Schiff 3

Parameter	Ein DG		Zwei DGs	
	Entladen	Laden	Entladen	Laden
Anzahl der Vorgänge	2	2	0	1
gesamte Energie [kWh]	2.884,67	-3,63	0	-7.524,76
gesamte Zeit [h]	1,267	0,025	0	1,292
durchs. Peak-Dauer [h]	0,633	0,013	0	1,292
durchs. Peak-Energie [kWh]	1.442,34	-1,81	0	-7.524,77
durchs. Leistung [kW]	2.277,61	-144,32	0	-5.825,62

Durch den Einsatz eines Batteriesystems werden Betriebsstunden der Dieselgeneratoren eingespart, da ein oder zwei Dieselgeneratoren durch die Verwendung eines Batteriesystems abgeschaltet werden können. Betriebsstunden werden auch eingespart, wenn das Batteriesystem im Standby-Betrieb während der Manöverbetriebe eingesetzt, aber nicht verwendet wird, d.h. nicht entladen wird.

Außerdem wird für Schiff 3 eine Auswertung der Lastverläufe der Thruster (Abb. 5.6) durchgeführt, um das Lastverhalten während der Manöverbetriebe zu bestimmen. In der linken Hälfte der Abbildung sind die einzelnen Lastverläufe der Thruster des 1. Manöverbetriebs von Schiff 3 und auf der rechten Seite ist der gesamte Lastverlauf der drei Thruster mit ihren Spitzenleistungen abgebildet. Die Thruster werden im eingeschalteten Zustand dauerhaft mit einer Grundlast von $P_{Thruster,Grundlast} = 0,84 MW$ betrieben.

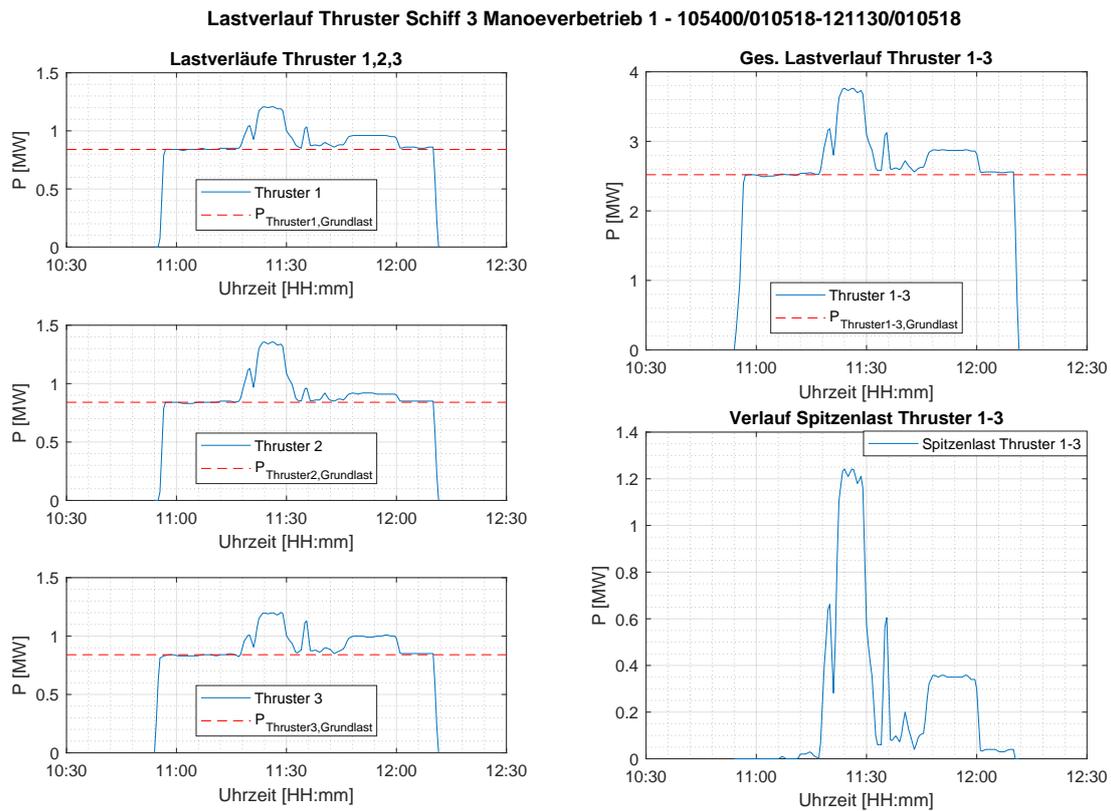


Abbildung 5.6.: Lastverläufe der Thruster des 1. Manöverbetriebs von Schiff 3

Mit Hilfe von MATLAB werden die Leistungen der Thruster hinsichtlich ihrer Grund-, Spitzen- und Gesamtlast ermittelt und in einer Excel-Datei (Tabelle 5.3) ausgegeben.

Tabelle 5.3.: Ergebnisse der Auswertung des 1. Manöverbetriebs der Thruster

Parameter	Grundlast	Spitzenlast	Gesamt
Anzahl der Vorgänge	1	2	1
gesamte Energie [kWh]	3.154,78	327,5	3.482,28
gesamte Zeit [h]	1,292	1,03	1,292
durchs. Peak-Dauer [h]	1,292	0,517	1,292
durchs. Peak-Energie [kWh]	3.154,78	163,75	3.482,28
durchs. Leistung [kW]	2.442,4	316,93	2.695,96

5.3.2. Auswertung des Bordnetzes während der Liegezeiten

Für die Auswertung des Bordnetzes während der Liegezeiten werden die Lastverläufe der Dieselgeneratoren von Schiff 2 und 3 untersucht, da dort die Arbeitsbereiche der Dieselgeneratoren bekannt sind. Das Verfahren wird exemplarisch für Schiff 3 dargestellt.

Für die Auswertung der Liegezeiten werden die Zeiträume betrachtet, in denen die Leistung der Dieselgeneratoren während der Liegezeiten unterhalb ihrer minimalen Leistungsgrenze liegt.

In Abbildung 5.7 sind die Lastverläufe der Dieselgeneratoren und die Schiffsgeschwindigkeit (SOG) dargestellt und die Bereiche der Liegezeiten L1 und L2 markiert, in denen die Leistungen der Dieselgeneratoren unterhalb ihrer minimalen Leistungsgrenze liegen.

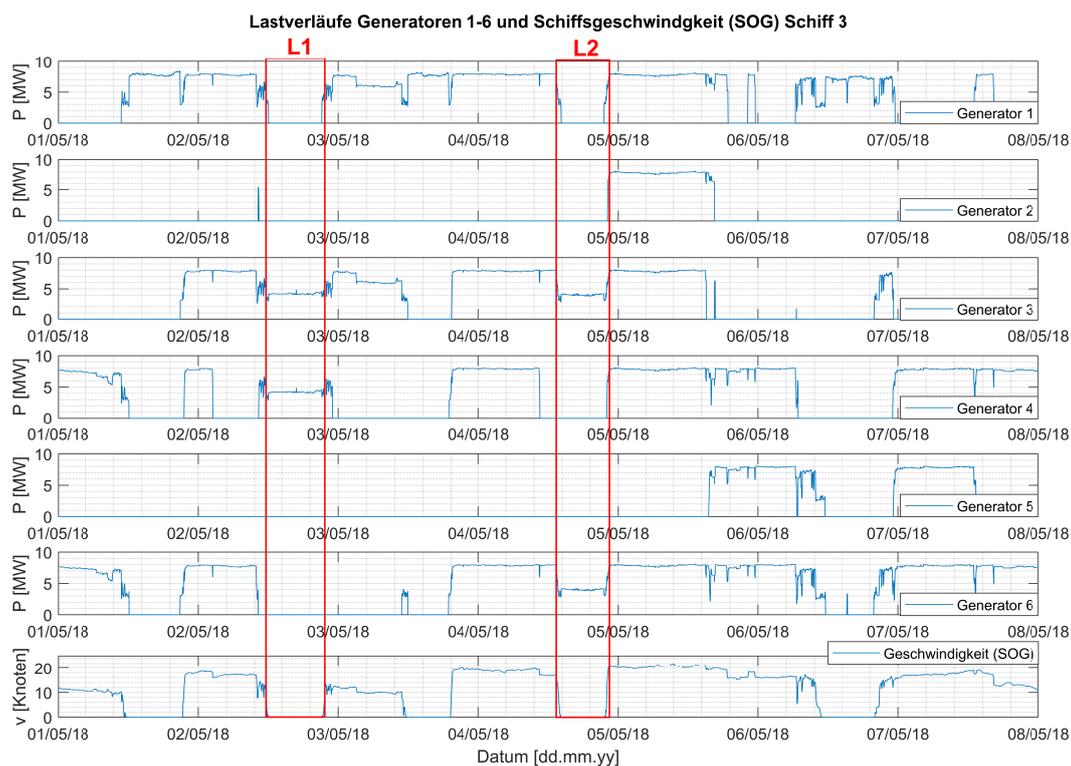


Abbildung 5.7.: Lastverläufe der Dieselgeneratoren und die Schiffsgeschwindigkeit von Schiff 3 mit Markierungen der Liegezeiten

Für die beiden markierten Liegezeiten werden die einzelnen Lastverläufe und der gesamte Lastverlauf der in dem Zeitraum arbeitenden Dieselgeneratoren dargestellt und ausgewertet.

Im Zeitraum der ersten markierten Liegezeit befinden sich die Generatoren 3 und 4 im Teillastbetrieb (Abb. 5.8). Um eine bessere Auslastung in diesem Bereich zu erzielen, muss nur ein Dieselgenerator betrieben werden. Das Batteriesystem liefert dann dauerhaft die benötigte Energie, die oberhalb der Leistung eines Dieselgenerators liegt.

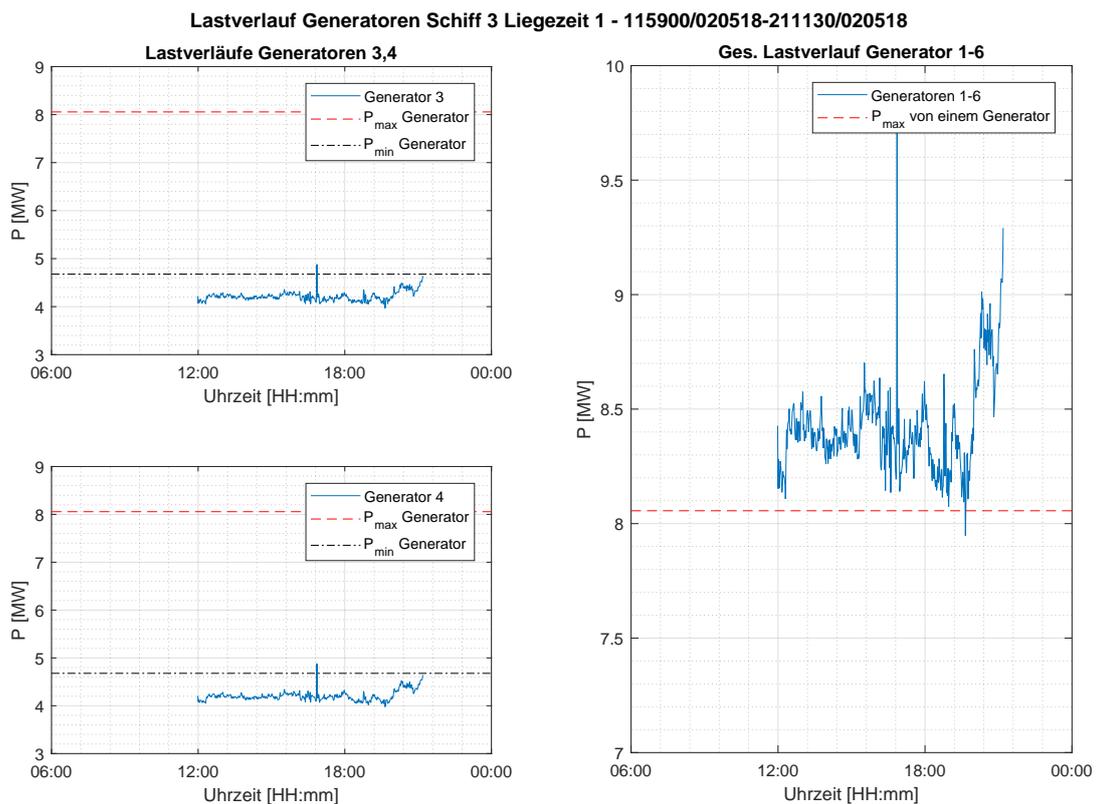


Abbildung 5.8.: Lastverläufe der Generatoren während der 1. Liegezeit von Schiff 3

Mit MATLAB werden die Lastschwankungen, die oberhalb der maximalen zur Verfügung stehenden Leistung liegen, ermittelt und in einer Excel-Datei (Tabelle 5.4) ausgegeben.

Tabelle 5.4.: Ergebnisse der Auswertung der 1. Liegezeit von Schiff 3

Parameter	Entladen	Laden
Anzahl der Vorgänge	2	1
gesamte Energie [kWh]	3.341,32	-1,52
gesamte Zeit [h]	9,18	0,027
durchs. Peak-Dauer [h]	4,59	0,027
durchs. Peak-Energie [kWh]	1.670,66	-1,52
durchs. Leistung [kW]	363,94	-55,62

5.4. Auswertung der Einsatzzeit

Die Lebensdauer einer Batterie wird durch ihre Zyklenzahl begrenzt, weshalb die Auswertung der Einsatzzeit entscheidend ist, um eine nachhaltige Aussage über die Anzahl von Lade- und Entladevorgängen zu treffen.

Um die Einsatzzeit eines Batteriesystems für den Fahrmotor (Tabelle 5.5) zu bestimmen, werden die einzelnen Ergebnisse der Auswertungen der Lastschwankungen der Fahrmotoren und die Betriebsstunden der Fahrmotoren verwendet.

Tabelle 5.5.: Auswertung der Nutzungsdauer der Fahrmotoren

Parameter	Schiff 1	Schiff 2	Schiff 3
Dauer des Datensatzes [h]	168	168	168
Fahrzeit [h]	128,93	138	127
Liegezeit [h]	39,05	29,99	40,97
Zeit der Auswertungsbereiche [h]	6,933	40,1	30,4
Zeit der Lade-/Entladevorgänge der Bereiche [h]	6,933	34,39	17,13
Nutzung eines Batteriesystems während der Bereiche [%]	100	85,5	56,3
Einsatzzeit des Batteriesystem für die ges. Fahrzeit [h]	128,9	118,4	71,56

Um die gesamte Zeit der Manöverbetriebe von Schiff 2 und 3 zu bestimmen, werden die Zeiträume der Manöverbetriebe aus einer Woche addiert.

Tabelle 5.6.: Auswertung der Dauer der Manöverbetriebe

Schiff	Dauer der Manöverbetriebe (M1-10) [h]										gesamte Zeit [h]
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	
Schiff 2	0,675	0,25	0,7	0,3	0,41	0,275	0,57	0,42	-	-	3,59
Schiff 3	1,28	0,52	0,89	0,45	0,98	0,39	0,55	0,44	1,59	0,86	7,95

Um die gesamte Liegezeit von Schiff 2 und 3 zu bestimmen, werden die Zeiträume der Liegezeiten aus einer Woche addiert.

Tabelle 5.7.: Auswertung der Dauer der Liegezeiten

Schiff	Liegezeit 1 [h]	Liegezeit 2 [h]	gesamte Zeit [h]
Schiff 2	7,808	–	7,808
Schiff 3	9,21	7,32	16,53

5.5. Ergebnisse der Auswertungen

In den nachfolgenden Abschnitten sind die Ergebnisse der Auswertungen der Lastschwankungen der Fahrmotoren und der Dieselgeneratoren während der Manöverbetriebe und der Liegezeiten dargestellt. Die Ergebnisse beziehen sich auf den gesamten Zeitraum einer Woche der vorliegenden Lastprofile. In den Diagrammen 5.13 bis 5.18 wird neben der Übersicht der gesamten Daten auch ein kleinerer Y-Achsenabschnitt gewählt, um die geringeren Werte deutlicher darzustellen.

Die zugehörigen Werte befinden sich in den Tabellen D.2 bis D.7 im Anhang.

Eine Zusammenfassung der Werte zur Dimensionierung eines Batteriesystems für die jeweiligen Anwendungen befindet sich in Abschnitt 5.6.

5.5.1. Absolute Anzahl Entlade- und Ladevorgänge

Im Diagramm 5.9 ist die absolute Anzahl der Entlade- und Ladevorgänge eines Batteriesystems für Peak Shaving der Fahrmotoren bzw. Dieselgeneratoren während der Manöverbetriebe und Liegezeiten dargestellt.

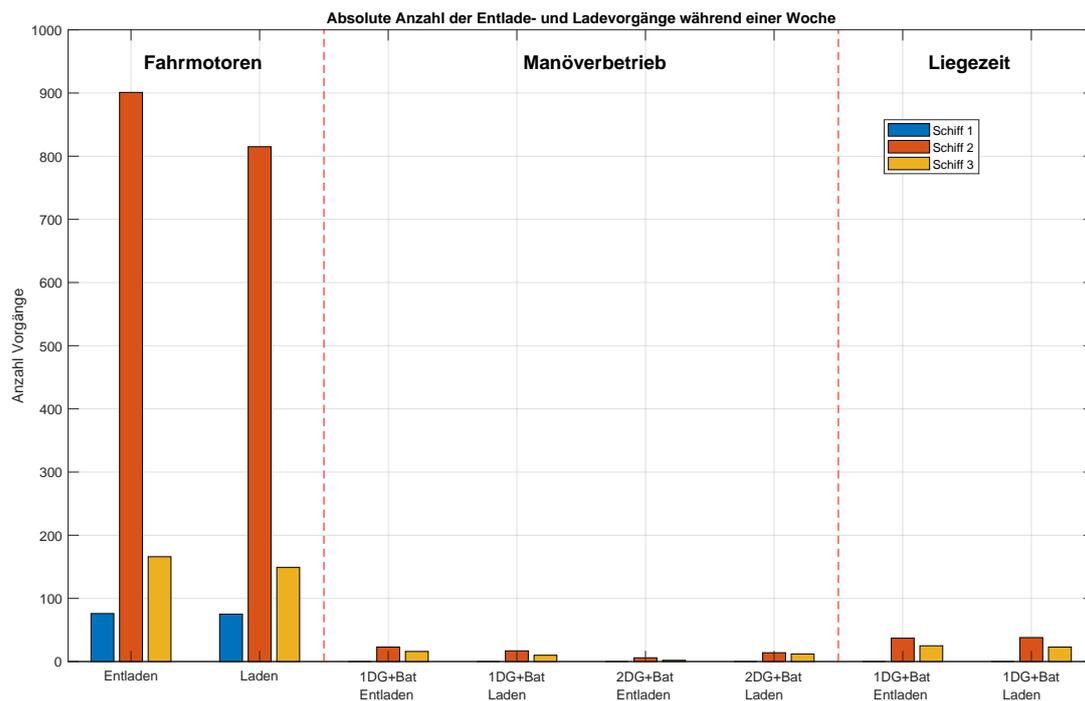


Abbildung 5.9.: Absolute Anzahl der Entlade- und Ladevorgänge

5.5.2. Absolute Anzahl Manöverbetriebe und Liegezeiten

Im Diagramm 5.10 ist die absolute Anzahl der Manöverbetriebe und Liegezeiten für den Einsatz eines Batteriesystems für Peak Shaving der Dieselgeneratoren während der Manöverbetriebe und Liegezeiten dargestellt.

Beim Einsatz von zwei Dieselgeneratoren mit einem Batteriesystem wird die Leistungsgrenze zum Starten eines weiteren Dieselgenerators nur während eines Manövers von Schiff 3 und bei zwei Manövern von Schiff 2 überstiegen. Dies ist zusätzlich im Diagramm (2DG+Bat Überschreitung) dargestellt. Ein Batteriesystem für diesen Anwendungsfall wird im Standby-Betrieb verwendet.

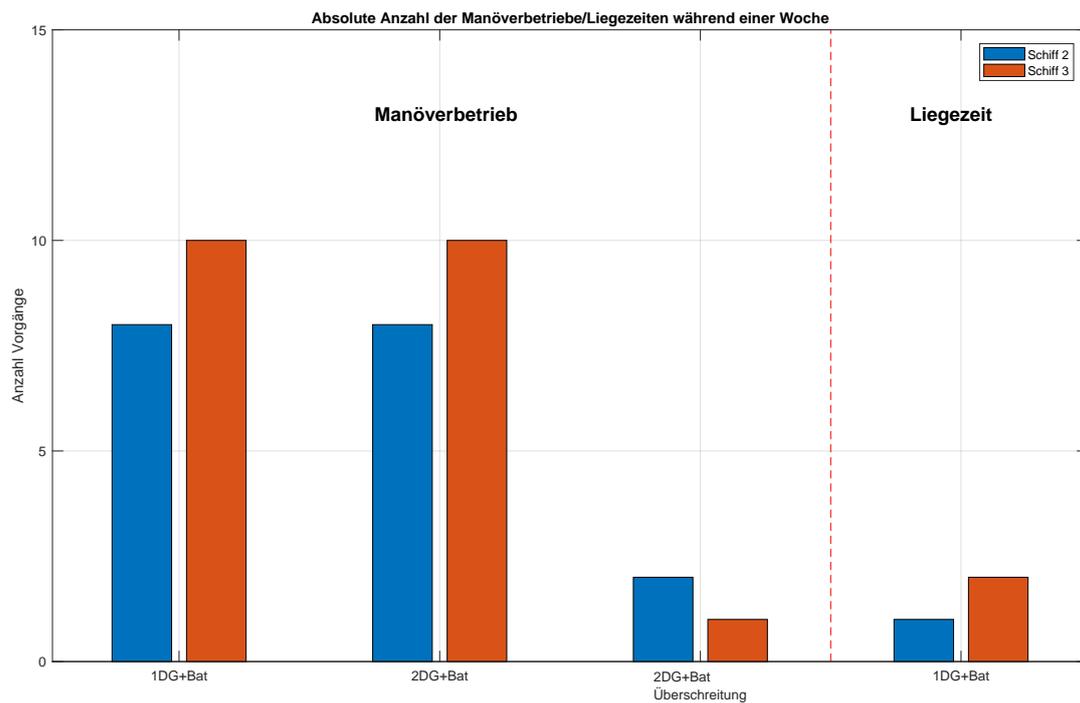


Abbildung 5.10.: Absolute Anzahl der Manöverbetriebe und Liegezeiten

5.5.3. Durchschnittliche Peak-Dauer

In den Diagrammen 5.11 und 5.12 sind die durchschnittlichen Peak-Dauern für die absolute Anzahl der Entlade- und Ladevorgänge und für die absolute Anzahl der Manöverbetriebe und Liegezeiten dargestellt.

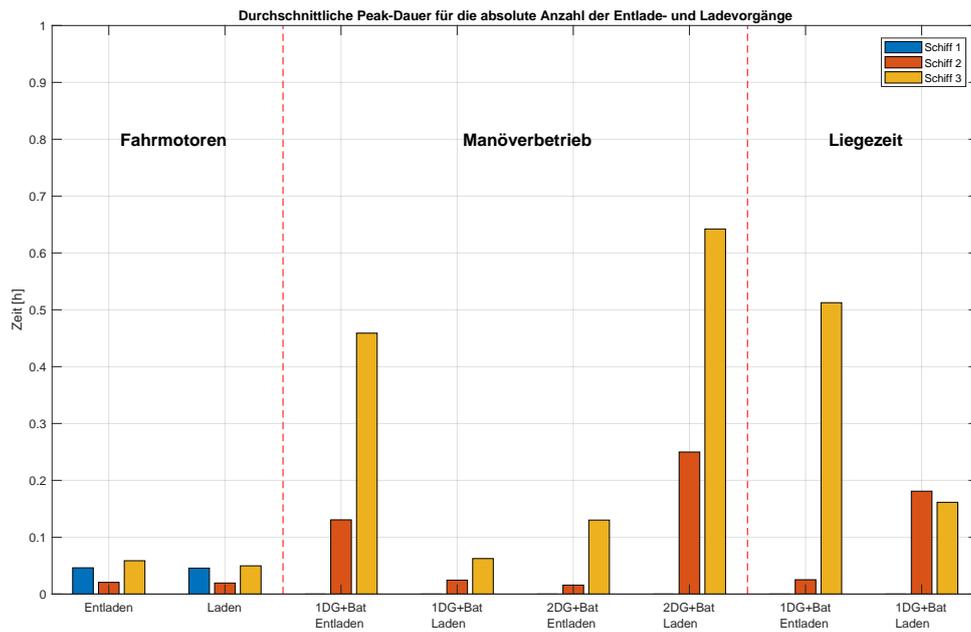


Abbildung 5.11.: Durchschnittliche Peak-Dauer für die absolute Anzahl der Entlade- und Ladevorgänge

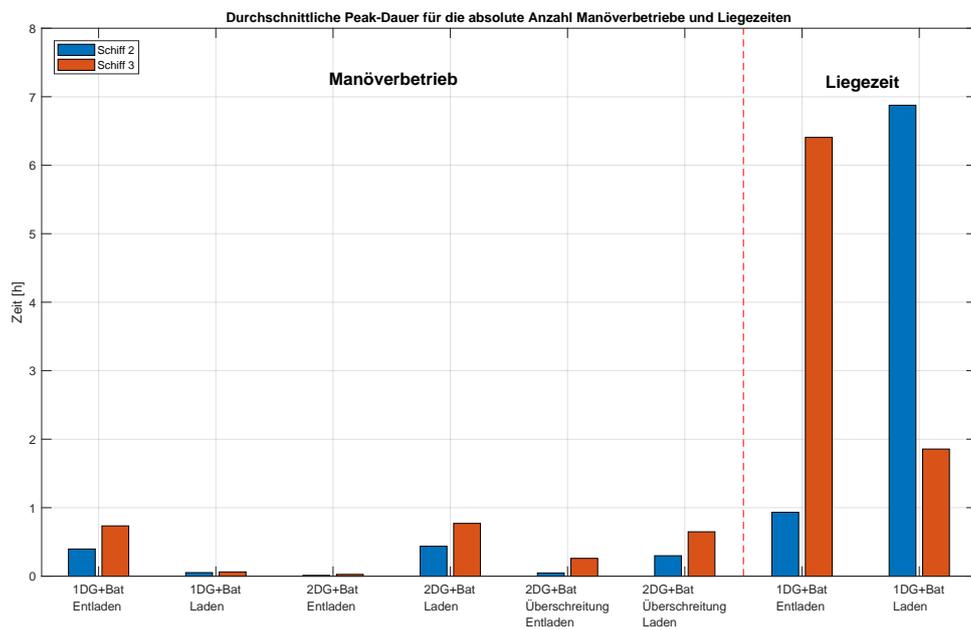


Abbildung 5.12.: Durchschnittliche Peak-Dauer für die absolute Anzahl der Manöverbetriebe und Liegezeiten

5.5.4. Durchschnittliche Peak-Energie

In den Diagrammen 5.13 und 5.14 sind die durchschnittlichen Peak-Energien für die absolute Anzahl der Entlade- und Ladevorgänge und für die absolute Anzahl der Manöverbetriebe und Liegezeiten dargestellt.

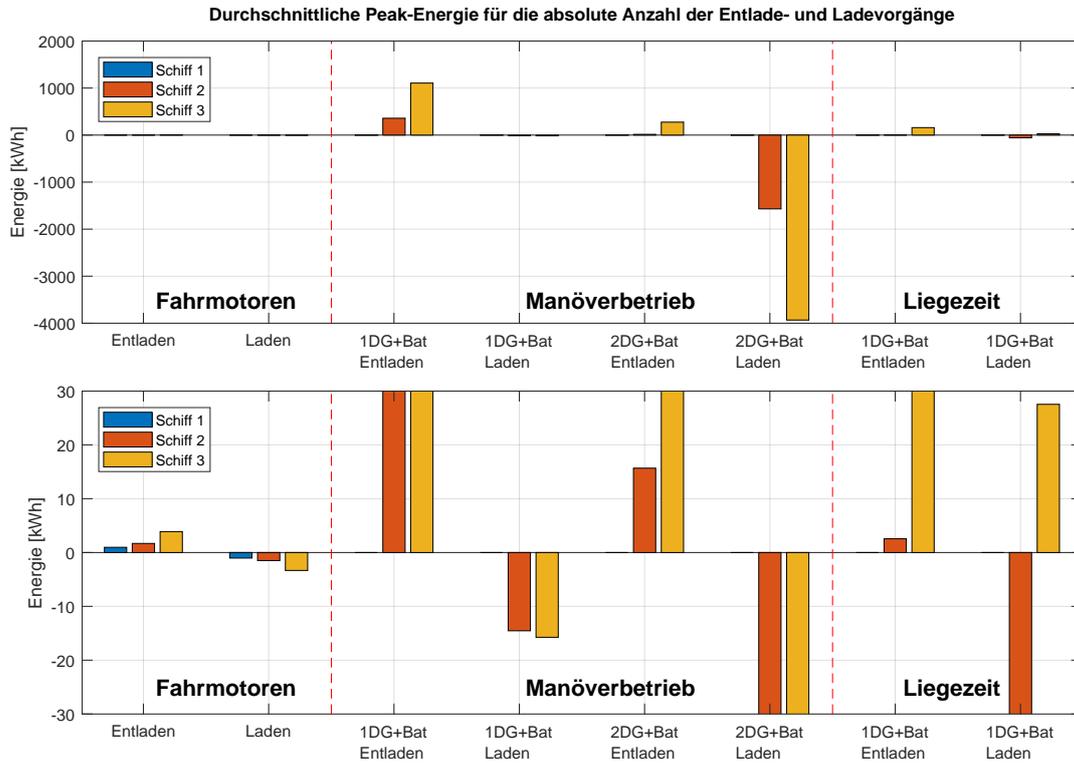


Abbildung 5.13.: Durchschnittliche Peak-Energie für die absolute Anzahl der Entlade- und Ladevorgänge

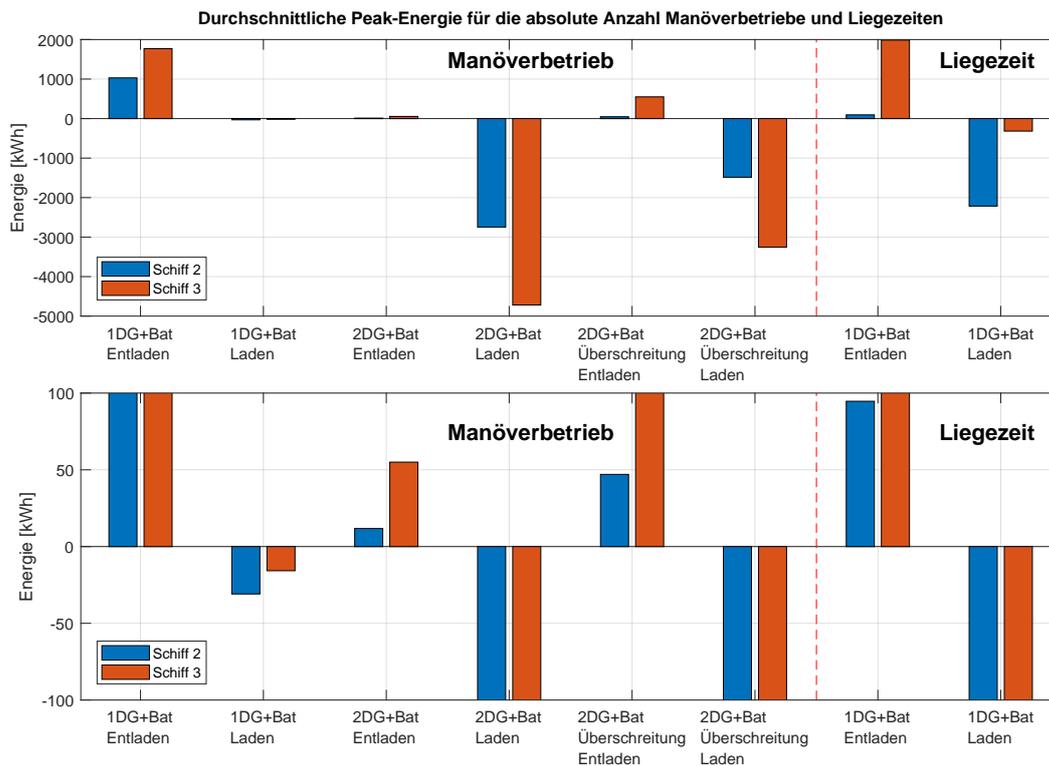


Abbildung 5.14.: Durchschnittliche Peak-Energie für die absolute Anzahl der Manöverbetriebe und Liegezeiten

5.5.5. Durchschnittliche Leistung

In den Diagrammen 5.15 und 5.16 sind die durchschnittlichen Leistungen für die absolute Anzahl der Entlade- und Ladevorgänge und für die absolute Anzahl der Manöverbetriebe und Liegezeiten dargestellt.

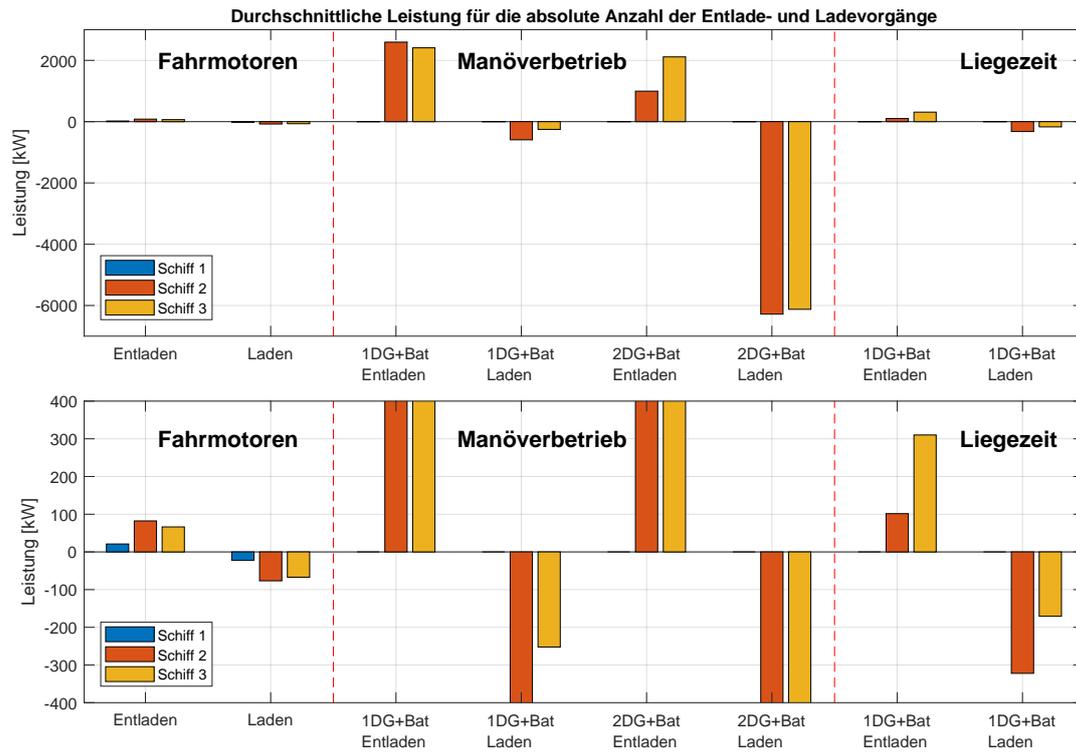


Abbildung 5.15.: Durchschnittliche Leistung für die absolute Anzahl der Entlade- und Ladevorgänge

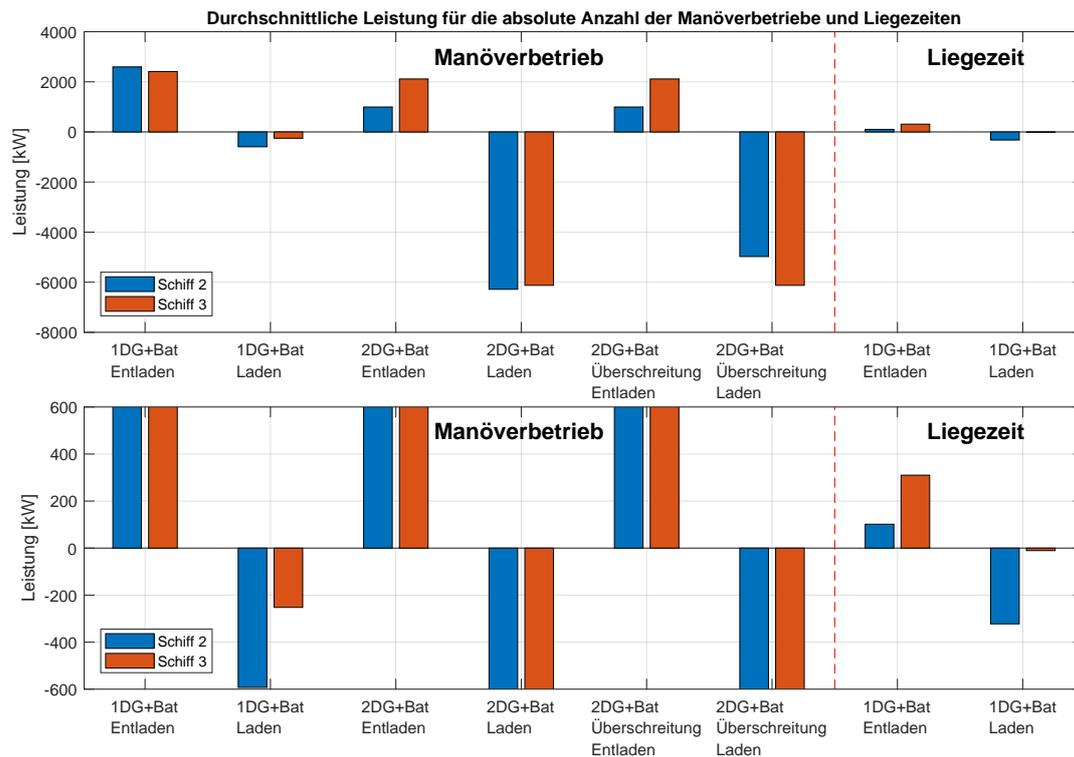


Abbildung 5.16.: Durchschnittliche Leistung für die absolute Anzahl der Manöverbetriebe und Liegezeiten

5.5.6. Mittlere Entlade- und Ladekapazität

„Die Kapazität eines Primär- oder Sekundärelementes ist definiert als $C = I_E \cdot t$, wobei I_E der konstante Entladenennstrom, und t die Zeit vom Beginn des Entladens bis zum Erreichen der Entladeschlußspannung ist.“ [21, S.110]

Aus der durchschnittlichen Peak-Energie E und der Ausgangsspannung des Batteriesystems U kann die mittlere Entlade- und Ladekapazität C berechnet werden.

$$\begin{aligned}
 C_{\text{mittel}} [Ah] &= I_{\text{mittel}} \cdot t \\
 &= \frac{P_{\text{mittel}}}{U_{\text{Bat,Nenn}}} \cdot t \quad | E_{\text{mittel}} = P_{\text{mittel}} \cdot t \\
 &= \frac{E_{\text{mittel}}}{U_{\text{Bat,Nenn}}} = \frac{E_{\text{durchs. Peak-Energie}} [kWh]}{U_{\text{Bat,Nenn}} [kV]}
 \end{aligned}$$

Um den Zwischenkreis (Niederspannung [$U = 690 \text{ V}$]) eines Frequenzumrichters durch

ein Batteriesystem zu versorgen, wird eine Ausgangsnennspannung von $U_{Bat,Nenn} \simeq 1.000V$ benötigt. Die Spannungshöhe ist durch Erfahrungswerte festgelegt worden. Daraus berechnet sich die mittlere Entlade- und Ladekapazität, die in den Diagrammen 5.17 und 5.18 dargestellt ist.

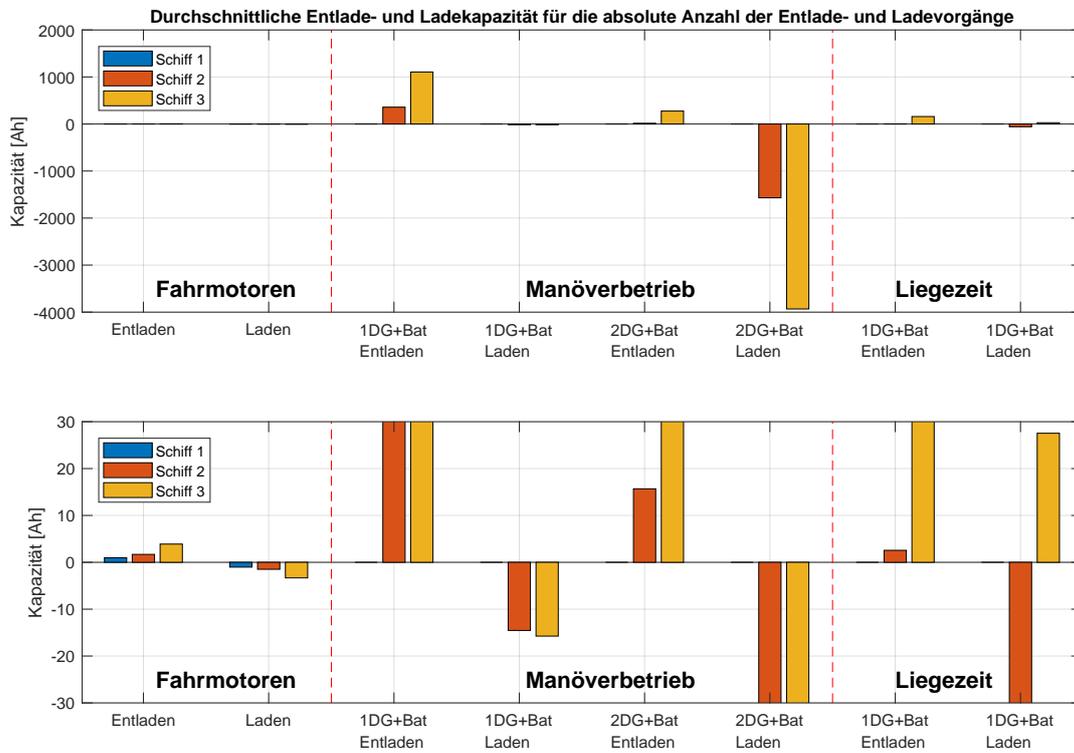


Abbildung 5.17.: Durchschnittliche Entlade- und Ladekapazität für die absolute Anzahl der Entlade- und Ladevorgänge

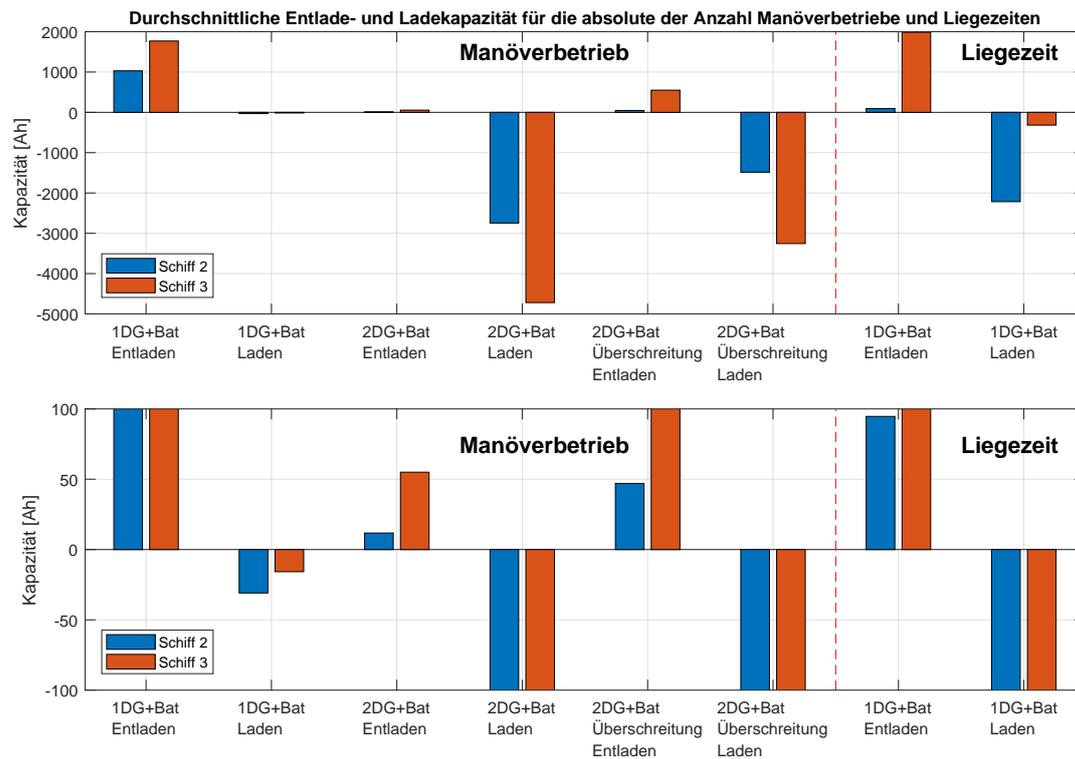


Abbildung 5.18.: Durchschnittliche Entlade- und Ladekapazität für die absolute Anzahl der Manöverbetriebe und Liegezeiten

5.5.7. Zyklenzahl

Die Zyklenzahl des Batteriesystems für den Fahrmotor wird aus der durchschnittlichen Peak-Dauer $t_{Peak,gesamt}$ und aus der Einsatzzeit eines Batteriesystems während der Fahrzeit $t_{Einsatzzeit}$ berechnet.

$$t_{Peak,gesamt} = t_{Peak,Laden} + t_{Peak,Entladen}$$

Tabelle 5.8.: Durchschnittliche Peak-Dauer und Einsatzzeit der Fahrmotoren

Schiff	durchschnittliche Peak-Dauer [h]			Einsatzzeit [h]
	Entladen	Laden	gesamt	
Schiff 1	0,046	0,046	0,092	128,9
Schiff 2	0,019	0,021	0,040	118,4
Schiff 3	0,052	0,059	0,111	71,56

Daraus folgt als Hochrechnung für die Zyklenzahl:

$$Zyklenzahl = \frac{t_{Einsatzzeit}}{t_{Peak,gesamt}}$$

Tabelle 5.9.: Hochrechnung für die Zyklenzahl eines Batteriesystems für die Fahrmotoren

Schiff	Zyklenzahl		
	1 Woche	1 Jahr	10 Jahre
Schiff 1	1.404	73.011	730.112
Schiff 2	2.957	153.757	1.537.569
Schiff 3	661	34.374	343.742

Die Zyklenzahl des Batteriesystems für die Manöverbetriebe berechnet sich aus der Anzahl der Manöverbetriebe des Datensatzes und ist für den Einsatz von einem Dieseldieselgenerator und zwei Dieseldieselgeneratoren gleich. Zusätzlich wird die Zyklenzahl der Manöverbetriebe berechnet, in denen die angeforderte Leistung die Leistungsgrenze von zwei Dieseldieselgeneratoren zum Start eines dritten Dieseldieselgenerators überschreitet.

Tabelle 5.10.: Hochrechnung für die Zyklenzahl im Manöverbetrieb beim Einsatz von einem und von zwei Dieseldieselgeneratoren mit Batteriesystem

Schiff	Zyklenzahl 1 DG / 2 DG			Zyklenzahl 2 DG + Überschreitung		
	1 Woche	1 Jahr	10 Jahre	1 Woche	1 Jahr	10 Jahre
Schiff 2	8	416	4.160	2	104	1.040
Schiff 3	10	520	5.200	1	52	520

Die Zyklenzahl eines Batteriesystems beim Einsatz eines Generators für die Liegezeiten berechnet sich aus der Anzahl der Liegezeiten des Datensatzes.

Tabelle 5.11.: Hochrechnung der Zyklenzahl für die Dieselgeneratoren mit Batteriesystem während der Liegezeiten

Schiff	Zyklenzahl		
	1 Woche	1 Jahr	10 Jahre
Schiff 2	1	52	520
Schiff 3	2	104	1.040

5.5.8. Thruster

In Tabelle 5.12 sind die Spitzenlasten der gesamten Last von Schiff 3 während der Manöverbetriebe mit und ohne Last der Thruster und die Mindestanzahl der Generatoren aufgeführt, um die Spitzenlast des Schiffes zu versorgen.

Tabelle 5.12.: Spitzenlasten und Mindestanzahl der Dieselgeneratoren während der Manöverbetriebe von Schiff 3

Manöver- betriebe (M1-10)	Schiff 3			
	mit Thruster		ohne Thruster	
	Last [kW]	Genos	Last [kW]	Genos
M1	15,2	2	13,65	2
M2	13,38	2	11,2	2
M3	20,15	3	17,67	3
M4	15,6	2	15,61	2
M5	12,58	2	10,06	2
M6	14,3	2	14,3	2
M7	14,46	2	13,73	2
M8	14,45	2	14,45	2
M9	10,35	2	10,35	2
M10	15,88	2	15,88	2

In Abbildung 5.19 ist die Lastaufteilung von Schiff 3 während des ersten Manöverbetriebs dargestellt. Die übrigen Lastaufteilungen befinden sich auf der CD im Anhang.

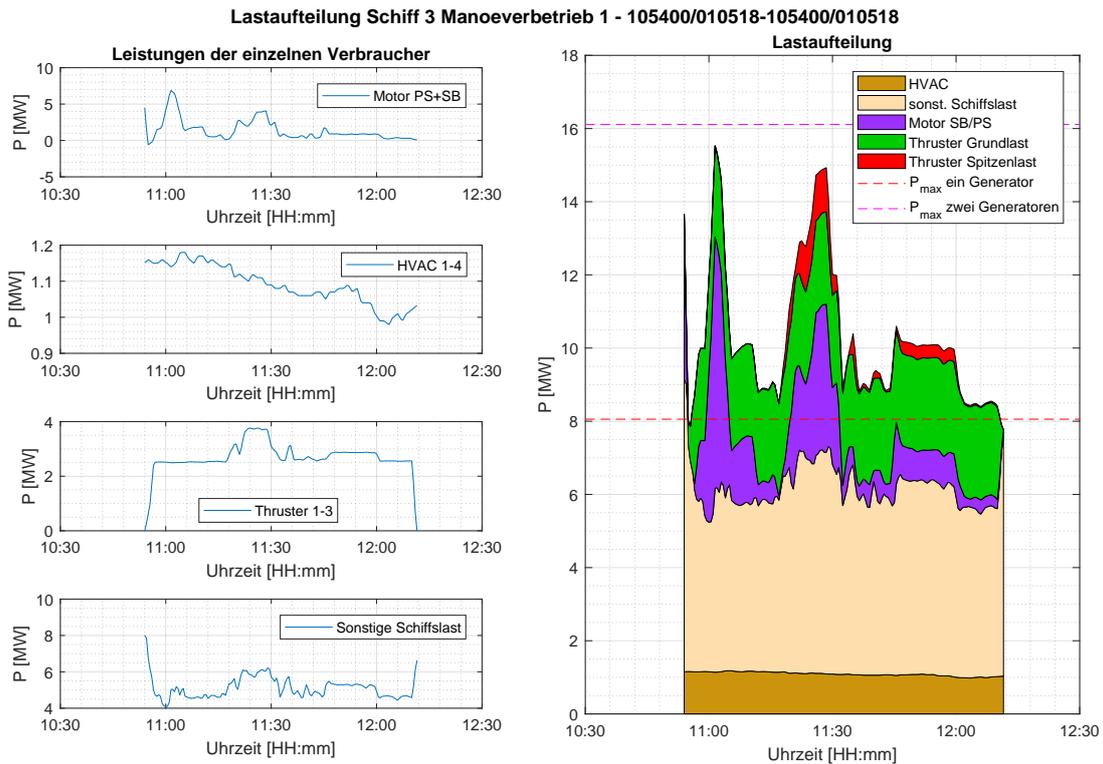


Abbildung 5.19.: Lastaufteilung von Schiff 3 im 1. Manöverbetrieb

Aus der durchschnittlichen Peak-Dauer (Tabelle 5.12) und den Lastaufteilungen (Abb. 5.19) folgt, dass auch dann zwei Diesellgeneratoren benötigt werden, wenn das Batteriesystem die Last für die Thruster übernimmt, um die Spitzenlast abzudecken.

Der alleinige Einsatz eines Batteriesystems für die Übernahme der Last der Thruster während der Manöverbetriebe ist unpraktikabel, da keine Einsparungen bei den Betriebsstunden der Diesellgeneratoren erzielt werden können. Die Ergebnisse der Auswertung der Thruster werden daher nicht weiter analysiert.

5.6. Zusammenfassung der Ergebnisse

5.6.1. Peak Shaving des Fahrmotors

Für den Einsatz einer Batterie zum Peak Shaving des Fahrmotors ergeben sich folgende Anforderungen und Parameter an das Batteriesystem.

Tabelle 5.13.: Parameter für ein Batteriesystem zum Peak Shaving des Fahrmotors

Parameter	Schiff 1	Schiff 2	Schiff 3
Ausgangsnennspannung Batteriesystem [V]	1.000	1.000	1.000
Mittlere Entladekapazität [Ah]	0,973	1,693	3,887
Mittlere Ladekapazität [Ah]	-1,03	-1,491	-3,333
Durchschnittliche Entladeleistung [kW]	21,06	82,27	66,34
Durchschnittliche Ladeleistung [kW]	-22,51	-76,65	-67,13
Durchschnittliche Entladezeit [h]	0,0462	0,0206	0,0586
Durchschnittliche Ladezeit [h]	0,0457	0,0195	0,0496
Zyklenzahl [Zyklen/Woche]	1.404	2.957	661
Zyklenzahl [Zyklen/Jahr]	73.011	153.757	34.374
Zyklenzahl [Zyklen/10 Jahre]	730.112	1.537.568	343.742

5.6.2. Peak Shaving des Bordnetzes während der Manöverbetriebe

Um die Dieselgeneratoren während der Manöverbetriebe besser auszunutzen, gibt es zwei Möglichkeiten, wie in Abschnitt 5.3.1 beschrieben.

Einsatz von einem Dieselgenerator

Für die Verwendung eines Dieselgenerators mit Batteriesystem für den dauerhaften Einsatz während der Manöverbetriebe ergeben sich folgende Einsparungen für die ausgeschalteten Dieselgeneratoren und Anforderungen an das Batteriesystem.

Einsparungen der Betriebsstunden je ausgeschaltetem Dieselgenerator:

- $t_{Woche} = 3,59 \text{ h/Woche} \rightarrow t_{Woche,gesamt} = 7,18 \text{ h/Woche}$

- $t_{Jahr} = 186,68 \text{ h/Jahr} \rightarrow t_{Jahr,gesamt} = 373,36 \text{ h/Woche}$
- $t_{10 \text{ Jahre}} = 1866,8 \text{ h/Jahr} \rightarrow t_{10 \text{ Jahre,gesamt}} = 3733,6 \text{ h/Woche}$

Tabelle 5.14.: Parameter für ein Batteriesystem zum Peak Shaving des Bordnetzes während der Manöverbetriebe beim Einsatz von einem Dieselgenerator

Parameter	Schiff 2	Schiff 3
Ausgangsnennspannung Batteriesystem [V]	1.000	1.000
Mittlere Entladekapazität [Ah]	.1029,93	1.769,29
Mittlere Ladekapazität [Ah]	-30,89	-15,75
Durchschnittliche Entladeleistung [kW]	2.595,41	2.409,68
Durchschnittliche Ladeleistung [kW]	-592,56	-252,32
Durchschnittliche Entladezeit [h]	0,3968	0,734
Durchschnittliche Ladezeit [h]	0,0521	0,062
Zyklenzahl [Zyklen/Woche]	8	10
Zyklenzahl [Zyklen/Jahr]	416	520
Zyklenzahl [Zyklen/10 Jahre]	4.160	5.200

Einsatz von zwei Dieselgeneratoren

Für die Verwendung von zwei Dieselgeneratoren mit Batteriesystem im Standby-Betrieb zur Versorgung von Spitzenlasten ergeben sich folgende Einsparungen für den ausgeschalteten Dieselgenerator und Anforderungen an das Batteriesystem.

Einsparungen der Betriebsstunden des ausgeschalteten Dieselgenerators:

- $t_{Woche} = 7,95 \text{ h/Woche}$
- $t_{Jahr} = 413,4 \text{ h/Jahr}$
- $t_{10 \text{ Jahre}} = 4134 \text{ h/Jahr}$

Tabelle 5.15.: Parameter für ein Batteriesystem (Standby-Betrieb) zum Peak Shaving des Bordnetzes während der Manöverbetriebe beim Einsatz von zwei Dieselsegeneratoren

Parameter	Schiff 2	Schiff 3
Ausgangsnennspannung Batteriesystem [V]	1.000	1.000
Mittlere Entladekapazität [Ah]	47,03	550,06
Mittlere Ladekapazität [Ah]	- 1.485,09	-3.254,61
Durchschnittliche Entladeleistung [kW]	994,94	2.113,56
Durchschnittliche Ladeleistung [kW]	-4.974,13	-5.021,92,14
Durchschnittliche Entladezeit [h]	0,047	0,26
Durchschnittliche Ladezeit [h]	0,299	0,648
Zyklenzahl [Zyklen/Woche]	2	1
Zyklenzahl [Zyklen/Jahr]	104	52
Zyklenzahl [Zyklen/10 Jahre]	1.040	520

5.6.3. Peak Shaving des Bordnetzes während der Liegezeiten

Für die Verwendung eines Dieselsegenerators mit Batteriesystem für den dauerhaften Einsatz während der Liegezeiten, ergeben sich folgende Einsparungen für den ausgeschalteten Dieselsegenerator und Anforderungen an das Batteriesystem.

Einsparungen der Betriebsstunden des ausgeschalteten Dieselsegenerators:

- $t_{Woche} = 7,95$ h/Woche
- $t_{Jahr} = 413,4$ h/Jahr
- $t_{10\text{ Jahre}} = 4134$ h/Jahr

Tabelle 5.16.: Parameter für ein Batteriesystem zum Peak Shaving des Bordnetzes während der Liegezeiten beim Einsatz von einem Dieselgenerator

Parameter	Schiff 2	Schiff 3
Ausgangsnennspannung Batteriesystem [V]	1.000	1.000
Mittlere Entladekapazität [Ah]	94,67	1.987,24
Mittlere Ladekapazität [Ah]	-2.215,45	-316,68
Durchschnittliche Entladeleistung [kW]	101,51	310,2
Durchschnittliche Ladeleistung [kW]	-322,21	-170,61
Durchschnittliche Entladezeit [h]	0,933	6,41
Durchschnittliche Ladezeit [h]	6,875	1,856
Zyklenzahl [Zyklen/Woche]	1	2
Zyklenzahl [Zyklen/Jahr]	52	104
Zyklenzahl [Zyklen/10 Jahre]	520	1.040

6. Konzeptentwicklung eines Batteriesystems

In den Abschnitten des folgenden Kapitels werden auf Grundlage der Ergebnisse der Auswertungen aus Kapitel 5 Batteriesysteme zum Peak Shaving der Fahrmotoren und des Bordnetzes konzipiert.

In persönlichen Gesprächen mit einem Mitarbeiter der Firma Panasonic in Hamburg sind anhand der Ergebnisse der Auswertungen der Lastprofile mögliche Konzepte für Batteriesysteme zum Peak Shaving des Fahrmotors und des Bordnetzes betrachtet worden.

6.1. Batteriesystem für Peak Shaving des Fahrmotors

Für die Konzeptionierung eines Batteriesystem für Peak Shaving des Fahrmotors werden die Parameter von Schiff 1 (Tabelle 5.13) verwendet. Die Konzipierungen der Batteriesysteme werden mit NiMH- und mit Li-Ionen-Zellen vorgenommen.

6.1.1. NiMH-Zelle

Als Batterie wird das Batteriepack BK-10V10T (Anhang F.2) verwendet, in dem zehn NiMH-Zelle des Typs BK-10V1S (Anhang F.1) verbaut sind.

Um auf die geforderte Ausgangsnennspannung des Batteriesystems $U_{Bat, Nenn} \simeq 1.000V$ zu kommen, wird eine Batteriebank aus 100 Batteriemodulen des Typs BK-10V10T konfiguriert.

$$U_{Bat} = 100 \cdot U_{BK-10V10T} = 100 \cdot 12 V = 1.200 V$$

Die höhere Ausgangsspannung stellt kein Problem für die Anwendung dar, da das Batteriesystem über einen DC/DC-Wandler an den Zwischenkreis des Frequenzumrichters

angeschlossen wird. Aufgrund einer höheren Ausgangsspannung des Batteriesystems sinkt der Strom und ebenfalls die mittlere Entlade- und Ladekapazität C_{mittel} .

$$C_{Entl.,mittel} = \frac{E_{Entl.Peak,mittel}}{U_{Bat}} = \frac{0,973 \text{ kWh}}{1.200 \text{ V}} = 0,811 \text{ Ah}$$

$$C_{Laden,mittel} = \frac{E_{LadePeak,mittel}}{U_{Bat}} = \frac{-1,028 \text{ kWh}}{1.200 \text{ V}} = -0,857 \text{ Ah}$$

Der mittlere Entlade- und Ladestrom I_{mittel} beträgt

$$I_{Entl.,mittel} = \frac{C_{Entl.,mittel}}{t_{Entl.,mittel}} = \frac{0,811 \text{ Ah}}{0,0462 \text{ h}} = 17,55 \text{ A}$$

$$I_{Laden,mittel} = \frac{C_{Laden,mittel}}{t_{Laden,mittel}} = \frac{-0,857 \text{ Ah}}{0,0457 \text{ h}} = -18,75 \text{ A}$$

Die C-Rate einer mittleren Entladung beträgt

$$C - Rate = \frac{I_{Entl.,mittel}}{C_{BK-10V10T}} = \frac{17,55 \text{ A}}{90 \text{ Ah}} = 0,195 \text{ C}$$

Die C-Rate liegt damit unterhalb der optimalen C-Rate einer NiMH-Zelle von 0,5 C (Tabelle D.8). Der mittlere Ladestrom liegt unterhalb des typischen Schnellladestroms der Batteriezelle $I_{BK-10V1S} = 20 \text{ A}$.

Um die Lebenszeit des Batteriesystems zu verlängern, wird der SoC auf 20 bis 80 % begrenzt. Außerdem müssen die SoC-Grenzen (Level) nach einem definierten Zeitraum geändert werden, um den Memory-Effekt abzuschwächen. Vorstellbar ist ein wöchentlicher Wechsel, beispielsweise ein SoC-Level 50 bis 80 % → SoC-Level 30 bis 60 % → SoC-Level 50 bis 80 % → usw. [22]

Bei einer mittleren Entladekapazität $C_{Entl.,mittel} = 0,811 \text{ Ah}$ beträgt die Entladungstiefe $\sim 1 \%$ DoD.

$$DoD = \frac{C_{Entl.,mittel}}{C_{BatSys,min}} = \frac{0,811 \text{ Ah}}{90 \text{ Ah}} = 0,009 \rightarrow \sim 1\%$$

Aus der Charakteristik der Zyklenzahl einer BK-10V1S Batterie (Abb. 6.1) erreicht man bei 1 % DoD eine Zyklenzahl von ca. 55.000 Zyklen. Bei einer Begrenzung des SoC auf 20 bis 80 % kann die Zyklenzahl ungefähr verdoppelt werden. [22]

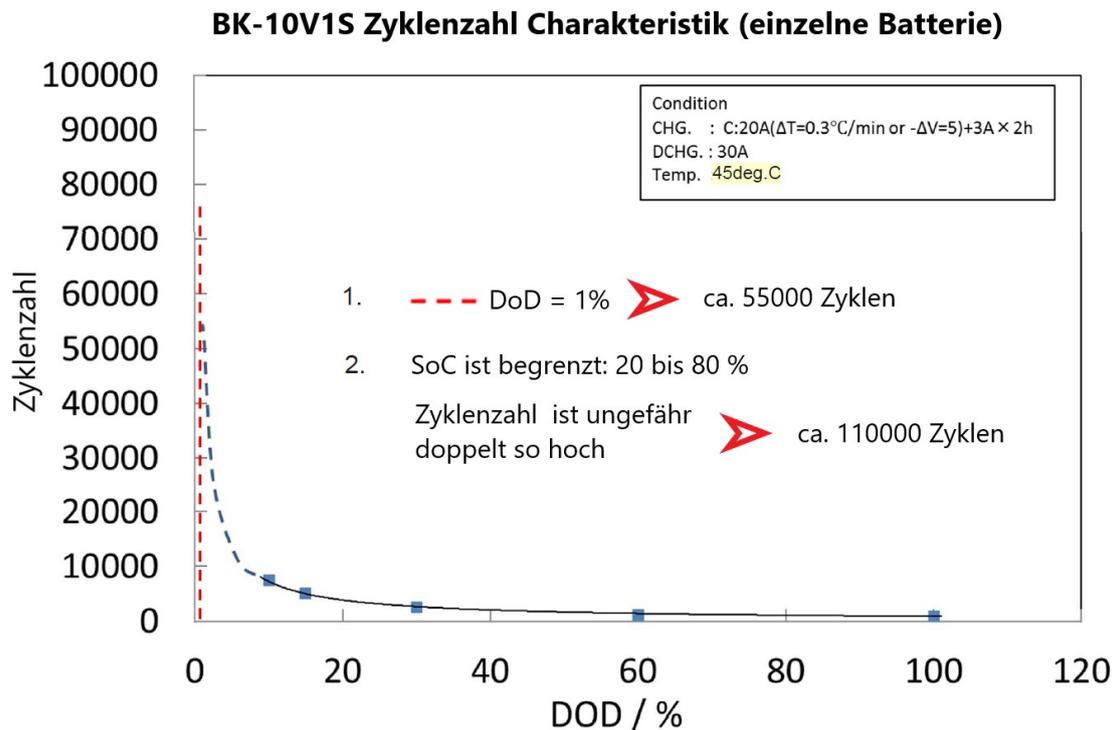


Abbildung 6.1.: Charakteristik der Zyklenzahl einer BK-10V1S Batterie [22]

Eine Zyklenzahl von 110.000 Zyklen reicht nach den Ergebnissen der Auswertung der Lastschwankungen des Fahrmotors von Schiff 1 für 1,5 Jahre. Um auf eine geforderte Lebenszeit von 10 Jahren zu kommen, muss das ganze System mindestens 2fach überdimensioniert werden. Da die Zyklencurve allerdings exponentiell verläuft, müsste eine Entladetiefe von 0,5 % DoD ausreichend sein. [22]

Das Gesamtgewichts der Batterien eines Batteriesystems, das 2fach überdimensioniert ist, beträgt 4.600 kg.

$$\begin{aligned}
 m_{gesamt} &= \text{Anzahl Baenke} \cdot \text{Anzahl Zellen/Bank} \cdot m_{BK-10V10T} \\
 &= 2 \cdot 100 \cdot 23 \text{ kg} = 4600 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

Die C-Rate eines solchen Batteriesystem beträgt 0,0975C.

$$C - Rate = \frac{I_{Entl.,mittel}}{2 \cdot C_{BK-10V10T}} = \frac{17,55 \text{ A}}{180 \text{ Ah}} = 0,0975C$$

Für ein Batteriesystem, das aus 100 BK-10V10T Batteriepacks besteht und mindestens

2fach für die geforderte Lebenszeit von 10 Jahren überdimensioniert wird, entstehen Systemkosten von ungefähr 3 Millionen Euro. [22] Aufgrund des wöchentlich wechselnden Ladezustands entstehen zusätzliche Herausforderungen an das BMS.

Bei der Verwendung von NiMH-Batterien ist das System sehr sicher.

6.1.2. Li-Ionen-Zelle

Als Batterie wird die Li-Ionen-Zelle ANR26650M1-b (Anhang F.4) verwendet. Bei dieser Konzipierung handelt es sich um eine Berechnung für den Anwendungsfall von Peak Shaving des Fahrmotors von Schiff 1, um eine Mindestgröße des Li-Ionen-Batteriesystems für die geforderten Bedingungen zu erhalten. Eine Aussage über die Wechselwirkungen der Entlade- und Ladevorgänge wird nicht getroffen.

Um auf die geforderte Ausgangsnennspannung des Batteriesystems $U_{Bat,Nenn} \simeq 1.000 V$ zu kommen, wird eine Batteriebank aus 364 Batteriezellen des Typs ANR26650M1-b konfiguriert. Es wird eine Batterieausgangsspannung von $U_{Bat,Nenn} \simeq 1.200 V$ entsprechend des NiMH-Batteriesystems gewählt.

$$U_{Bat} = 364 \cdot U_{ANR26650M1-b} = 364 \cdot 3,3 V = 1201,2 V \sim 1.200 V$$

Die höhere Ausgangsspannung stellt wie bei dem NiMH-Batteriesystem ebenfalls kein Problem für die Anwendung dar.

Die mittlere Entlade- und Ladekapazität C_{mittel} und der mittlere Entlade- und Ladestrom I_{mittel} haben die gleichen Werte wie bei dem NiMH-Batteriesystem.

Die Nennzellkapazität der Li-Ionen-Zelle ANR26650M1-b beträgt $C_{ANR26650M1-b,Nenn} = 2,5 Ah$ bei einer C-Rate von 0,5C. Um die geforderte C-Rate von 0,5C zu erreichen, müssen mindestens 15 Batteriebanken parallel verschaltet werden.

$$C_{BatSys,min} = \frac{I_{Entl,mittel}}{C-Rate} = \frac{17,55 A}{0,5C} = 35,1 Ah$$

$$Anzahl Baenke = \frac{C_{BatSys,min}}{C_{ANR26650M1-b,Nenn}} = \frac{35,1 Ah}{2,5 Ah} = 14,04 \rightarrow 15$$

Die Entladungstiefe für ein Batteriesystem aus 15 Batteriebanken beträgt 2,59 % DoD.

$$DoD = \frac{C_{Entl,mittel}}{15 \cdot C_{ANR26650M1-b}} = \frac{0,973 Ah}{15 \cdot 2,5 Ah} = 0,0259 \rightarrow 2,59\%$$

Bei einer Entladungstiefe von 2,59% DoD werden für Li-Ionen-Zellen ungefähr 35.000-40.000 Zyklen (Abb. 2.9) erreicht. Um auf eine Zyklenzahl von ungefähr 730.000 Zyklen in 10 Jahren zu kommen, werden 0,5% DoD entsprechend dem DoD des NiMH-Batteriesystems angenommen. Um 0,5% DoD zu erreichen, müssen 65 Batteriebanken parallel verschaltet werden.

$$C_{BatSys,0.5DoD} = \frac{C_{Entl,mittel}}{DoD} = \frac{0,811 Ah}{0,5\%} = 162,2 Ah$$

$$Anzahl Baenke = \frac{C_{BatSys,0.5DoD}}{C_{ANR26650M1-b,Nenn}} = \frac{162,26 Ah}{2,5 Ah} = 64,88 \rightarrow 65$$

Der mittlere Ladestrom eines solchen Batteriesystems beträgt pro Batteriebank $I_{Laden,Bank} = 0,237 A$ und übersteigt nicht die zulässigen Werte der Li-Ionen-Zelle.

$$I_{Laden,Bank} = \frac{I_{Laden,mittel}}{Anzahl Baenke} = \frac{-18,75 A}{65} = 0,288 A$$

Das Gesamtgewichts der Batterien eines Batteriesystems, das aus 65 Batteriebanken à 364 Li-Ionen-Zellen besteht, beträgt 1.798,16 kg.

$$m_{gesamt} = Anzahl Baenke \cdot Anzahl Zellen/Bank \cdot m_{ANR26650M1-b}$$

$$= 65 \cdot 364 \cdot 0,076 kg = 1.798,16 kg$$

Die C-Rate eines solchen Batteriesystem beträgt 0,108C.

$$C - Rate = \frac{I_{Entl,mittel}}{65 \cdot C_{Bank}} = \frac{17,55 A}{65 \cdot 2,5 Ah} = 0,108C$$

Ein Li-Ionen-Batteriesystem für Peak Shaving des Fahrmotors von Schiff 1 muss mindestens aus 65 parallel verschalteten Batteriebanken à 364 Li-Ionen-Zellen ANR26650M1-b bestehen, um rechnerisch die geforderten Bedingungen der Anwendung zu erfüllen. Bei einem Zellpreis von ungefähr 10Euro/Zelle¹ entstehen reine Zellkosten von 236.600 Euro. Weitere Kosten entstehen durch das BMS und die Installation.

Der größte Nachteil eines Li-Ionen-Batteriesystems besteht im Sicherheitsaspekt der Li-Ionen-Technologie.

Eine Zusammenfassung der Batteriesysteme erfolgt in Abschnitt 6.3.

¹<https://www.akkuparts24.de/A123-ANR26650M1B-33V-2500-mAh-LiFePo4-Zelle>

6.2. Batteriesystem für Peak Shaving des Bordnetzes beim Manöverbetrieb

Für die Konzeptionierung eines Batteriesystems für Peak Shaving des Bordnetzes und somit der Dieselgeneratoren werden die Parameter von Schiff 2 und 3 (Tabelle 5.15) verwendet.

Bei dem Design elektrochemischer Leistungsspeicher gilt dieselbe Regel wie bei der elektrischen Leistungsübertragung: Je höher die Spannung desto geringer der Strom. Außerdem gilt ein zweiter Grundsatz: Je geringer der Strom desto größer die Zyklenzahl.

Bei Leistungen im Megawatt-Bereich, wie es bei Schiff 2 und 3 der Fall ist, und lediglich einer Batterienennspannung von ungefähr 1 kV resultiert daraus ein Strom von 1.000 A, den kein kommerzielles Batteriesystem auf Zellebene bereitstellen kann. Bei 1/10 des Stromes, also 100 A, ist bereits das obere Limit erreicht, das eine 100 Ah Zelle (BK-10V10T) zu leisten im Stande ist.

In der Praxis heißt dies für ein Batteriesystem aus NiMH-Batterien, dass dieses mindestens 10fach besser 15fach parallel geschaltet werden muss, um den geforderten Strom liefern zu können. Ab dieser Größenordnung wird es schwierig, ein solches Batteriesystem auf Grund der Leitungslängen und Impedanzen zu konzipieren. [22] Darüber hinaus steht auf Schiffen nur ein begrenzter Platz zur Verfügung und außerdem wird ein solches System sehr teuer.

Eine Abschätzung der Werte für die Größenordnung im Megawattbereich ist in der Tabelle 6.1 aufgelistet.

Tabelle 6.1.: Allgemeine Parameter eines NiMH-Batteriesystems für Peak Shaving des Bordnetzes während des Manöverbetriebs

Parameter	1 Batterie-pack	Dimensionierung		
		1fach	10fach	15fach
Anzahl Batteriepacks	1	84	840	1.260
Ausgangsspannung [V]	12	1.008	1.008	1.008
Entladestrom [A]	100	100	1.000	1.500
Kapazität [Ah]	90	90	900	1350
Gewicht [kg]	23	1.932	19320	28.980
Volumen [l]	18,4	1.545,6	15.456	23.184
Modulkosten ca. [Euro]	4.000	336.000	3.360.000	5.040.000

Eine mögliche Variante für Peak Shaving des Bordnetzes im Manöverbetrieb stellen Bleibatterien dar, da diese einen höheren Strom liefern können, oder Lithium-Ionen-Batterien, da diese eine höhere Energiedichte besitzen.

6.2.1. Blei-Zelle

Für den Anwendungsfall des Peak Shavings von Schiff 2 beim Einsatz von zwei Dieselmotoren und einem Batteriesystem im Standby-Betrieb sieht ein Batteriesystem mit Bleibatterien folgendermaßen aus.

Als Batterie wird das Batteriepack LC-QA12110TP (Anhang F.3) verwendet, das für über 12 Jahre Lebenszeit ausgelegt ist.

Um auf die geforderte Ausgangsnennspannung des Batteriesystems $U_{Bat,Nenn} \simeq 1.000 V$ zu kommen, wird eine Batteriebank aus 84 Batteriemodulen des Typs BK-10V10T konfiguriert.

$$U_{Bat} = 100 \cdot U_{LC-QA12110TP} = 84 \cdot 12 V = 1.008 V$$

Der mittlere Entladestrom I_{mittel} beträgt

$$I_{Entl.,mittel} = \frac{C_{Entl.,mittel}}{t_{Entl.,mittel}} = \frac{47,03 Ah}{0,047 h} = 1.000,64 A$$

Durch Parallelschaltung von vier Batteriebanken entsteht für das Batteriesystem eine Nennkapazität von 440 Ah.

$$C_{BatSys,Nenn} = 4 \cdot C_{LC-QA12110TP,Nenn} = 4 \cdot 110 Ah = 440 Ah$$

Der mittlere Strom pro Batteriebank beträgt $I_{BatSys,mittel} = 250 A$ mit Spitzenströmen bis $I_{BatSys,Spitze} = 450 A$ für eine maximale Zeitspanne von $t_{Spitze,max} = 100 s$. [22] Bei einer mittleren Entladekapazität von $C_{Entl,mittel} = 47,03 Ah$ ergibt sich für die Entladungstiefe 11 % DoD.

$$C_{EntlBank,mittel} = \frac{C_{Entl,mittel}}{4} = \frac{47,03 Ah}{4} = 11,8 Ah$$

$$DoD_{Bank,mittel} = \frac{C_{EntlBank,mittel}}{C_{LC-QA12110TP,Nenn}} = \frac{11,8 Ah}{110 Ah} \approx 0,11 \rightarrow 11 \%$$

Die C-Rate eines solchen Batteriesystem beträgt 2,27C.

$$C - Rate = \frac{I_{Entl.,mittel}}{4 \cdot C_{Bank}} = \frac{1.000,64 A}{4 \cdot 110 Ah} = 2,27C$$

Für eine Entladungstiefe von 11 % DoD erreicht die Bleibatterie LC-QA12110TP ungefähr 1400 Zyklen. Das entspricht einer Batterielebenszeit von 12 Jahren bei 104 Zyklen pro Jahr für ein Batteriesystem im Standby-Betrieb für die Manöverbetriebe von Schiff 2. [22]

Der Ladestrom muss auf 0,4C, also 44 A/Batteriebank, begrenzt werden, wodurch nicht die gesamte Kapazität der Batterie während der Ladephasen aufgeladen werden kann. Der Batteriespeicher muss daher im Anschluss an den Manöverbetrieb durch das Bordnetz oder im Hafen durch einen Landanschluss aufgeladen werden. Die Lade- und Überwachungstechnik ist einfach und robust für ein solches Batteriesystem, lediglich der voltage und current ripple sind eng begrenzt (+/- 1% bzw. +/- 5%). Der Preis für die gesamte Speicherkapazität beträgt ungefähr 75.000 Euro. [22]

Das Gesamtgewicht eines Batteriesystems aus vier Batteriebanken mit jeweils 84 Batteriepacks LC-QA12110TP à 36 kg beträgt 12.096 kg und liegt somit unterhalb des Gewichts eines gleichwertigen Batteriesystems mit NiMH-Batterien.

Ein Batteriesystem aus Bleibatterien verträgt keine schnellen Lastanforderungen und ist daher für den Einsatz zur Deckung einer Grundlast geeignet.

6.2.2. Li-Ionen-Zelle

Als Batterie wird die Li-Ionen-Zelle ANR26650M1-b (Anhang F.4) verwendet. Bei dieser Konzipierung handelt es sich um eine Berechnung für den Anwendungsfall von Peak Shaving des Bordnetzes während der Manöverbetriebe von Schiff 2, um eine Mindestgröße des Li-Ionen-Batteriesystems für die geforderten Bedingungen zu erhalten. Eine Aussage über die Wechselwirkungen der Entlade- und Ladevorgänge wird nicht getroffen.

Um auf die geforderte Ausgangsnennspannung des Batteriesystems $U_{Bat,Nenn} \simeq 1.000 V$ zu kommen, wird eine Batteriebank aus 364 Batteriezellen des Typs ANR26650M1-b konfiguriert. Es wird eine Batterieausgangsspannung von $U_{Bat,Nenn} \simeq$

1.200 V entsprechend des NiMH-Batteriesystems gewählt.

$$\text{Anzahl} = \frac{U_{\text{Bat},\text{Nenn}}}{U_{\text{ANR26650M1-b}}} = \frac{1000 \text{ V}}{3,3 \text{ V}} = 303,03 \rightarrow \sim 304$$

$$U_{\text{Bat},304} = 304 \cdot U_{\text{ANR26650M1-b}} = 304 \cdot 3,3 \text{ V} = 1.003,2 \text{ V} \rightarrow \sim 1.000 \text{ V}$$

Der mittlere Entladestrom I_{mittel} beträgt

$$I_{\text{Entl.,mittel}} = \frac{C_{\text{Entl.,mittel}}}{t_{\text{Entl.,mittel}}} = \frac{47,03 \text{ Ah}}{0,047 \text{ h}} = 1.000,64 \text{ A}$$

Die Nennzellkapazität der Li-Ionen-Zelle ANR26650M1-b beträgt $C_{\text{ANR26650M1-b},\text{Nenn}} = 2,5 \text{ Ah}$ bei einer C-Rate von 0,5C. Um die geforderte C-Rate von 0,5C zu erreichen, müssen mindestens 801 Batteriebanken parallel verschaltet werden.

$$C_{\text{BatSys,min}} = \frac{I_{\text{Entl.,mittel}}}{C\text{-Rate}} = \frac{1.000,64 \text{ A}}{0,5\text{C}} = 2.001,28 \text{ Ah}$$

$$\text{Anzahl Baenke} = \frac{C_{\text{BatSys,min}}}{C_{\text{ANR26650M1-b},\text{Nenn}}} = \frac{2.001,28 \text{ Ah}}{2,5 \text{ Ah}} = 800,512 \rightarrow 801$$

Die Entladungstiefe für ein Batteriesystem aus 801 Batteriebanken beträgt 2,35 % DoD.

$$\text{DoD} = \frac{C_{\text{Entl.,mittel}}}{C_{\text{BatSys,min}}} = \frac{47,03 \text{ Ah}}{2.001,28 \text{ Ah}} = 0,0235 \rightarrow 2,35\%$$

Bei einer Entladungstiefe von 2,35% DoD werden für Li-Ionen-Zellen ungefähr 35.000-40.000 Zyklen (Abb. 2.9) erreicht. Um auf eine Zyklenzahl von ungefähr 730.000 Zyklen in 10 Jahren zu kommen, werden 0,5% DoD entsprechend dem DoD des NiMH-Batteriesystems angenommen. Um 0,5% DoD zu erreichen, müssen 3.763 Batteriebanken parallel verschaltet werden.

$$C_{\text{BatSys},0,5\text{DoD}} = \frac{C_{\text{Entl.,mittel}}}{\text{DoD}} = \frac{47,03 \text{ Ah}}{0,5\%} = 9.406 \text{ Ah}$$

$$\text{Anzahl Baenke} = \frac{C_{\text{BatSys},0,5\text{DoD}}}{C_{\text{ANR26650M1-b},\text{Nenn}}} = \frac{9.406 \text{ Ah}}{2,5 \text{ Ah}} = 3.762,4 \rightarrow 3.763$$

Das Gesamtgewichts der Batterien eines Batteriesystems, das aus 3.763 Batteriebän-

ken à 304 Li-Ionen-Zellen besteht, beträgt 86.940,35 kg.

$$\begin{aligned} m_{\text{gesamt}} &= \text{Anzahl Baenke} \cdot \text{Anzahl Zellen/Bank} \cdot m_{\text{ANR26650M1-b}} \\ &= 3.763 \cdot 304 \cdot 0,076 \text{ kg} = 86.940,35 \text{ kg} \end{aligned}$$

Die C-Rate eines solchen Batteriesystem beträgt 0,0019C.

$$C - \text{Rate} = \frac{I_{\text{Entl.,mittel}}}{C_{\text{BatSys},0.5\text{DoD}}} = \frac{17,55 \text{ A}}{9.406 \text{ Ah}} = 0,0019\text{C}$$

Ein Li-Ionen-Batteriesystem für Peak Shaving der Dieselgeneratoren während der Manöverbetriebe von Schiff 2 muss mindestens aus 3.763 parallel verschalteten Batteriebanken à 304 Li-Ionen-Zellen ANR26650M1-b bestehen, um rechnerisch die geforderten Bedingungen der Anwendung zu erfüllen. Bei einem Zellpreis von ungefähr 10Euro/Zelle² entstehen reine Zellkosten von 11.439.520 Euro. Weitere Kosten entstehen durch das BMS und die Installation.

Neben den hohen Zellkosten besteht der größte Nachteil im Sicherheitsaspekt der Li-Ionen-Technologie.

Eine Zusammenfassung der Batteriesysteme erfolgt in Abschnitt 6.3.

²<https://www.akkuparts24.de/A123-ANR26650M1B-33V-2500-mAh-LiFePo4-Zelle>

6.3. Zusammenfassung der Batteriekonzepte

In der nachfolgenden Tabelle 6.2 sind die Parameter der erstellten Batteriekonzepte zusammengefasst.

Tabelle 6.2.: Zusammenfassung der Parameter der Batteriekonzepte

Parameter Zelltyp	Fahrmotor		Bordnetz	
	NiMH	Li-Ionen	Blei	Li-Ionen
Anzahl Packs/Zellen	200	23.660	400	1.143.952
Ausgangsspannung [V]	1.200	1.200	1.000	1.000
Kapazität [Ah]	180	162,5	440	9.406
max. kontinuierlicher Entladestrom [A]	200	3.250	1.000	188.150
max. kurzfristiger Entladestrom	k.A.	7.800 A/10s	1.800 A/100s	451,6 kA/10s
C-Rate [C]	0,0975	0,108	2,27	0,0019
Entladungstiefe DoD [%]	0,5	0,5	11	0,5
Gewicht [kg]	4.600	1.798	12.096	86.940
Volumen [l]	1.837	3.266	5.551	157.913
Kosten ca. [Euro]	400.000	236.600	75.000	11.439.520
Lebensdauer [Jahre]	10	10	12	10

7. Fazit

Diese Arbeit hat das Ziel, die Vorteile und Problematik von Peak Shaving des Fahrmotors und des Bordnetzes auf Schiffen aufzuzeigen. Insbesondere die Modernisierung der bestehenden Systeme durch die zusätzliche Installation von Batteriesystemen und die damit einhergehenden Anwendungsmöglichkeiten sind untersucht und bewertet worden. Des Weiteren sollen die Grundlagen von Batterien, die Funktionsweisen und Konzepte von Schiffs- und Hybridantrieben und mögliche Anwendungsfälle für Batteriesysteme auf Schiffen vermittelt werden.

7.1. Zusammenfassung

Zum Erreichen dieser Ziele wurden zunächst durch Literaturrecherche und Fachkenntnisse die Grundlagen von Batterien am Beispiel von Lithium-Ionen-Batterien dargestellt. Anschließend sind die grundlegenden Funktionsweisen und Konzepte von Schiffs- und Hybridantrieben und zugehörige Systemkomponenten vorgestellt und erläutert worden. Auf diesen Grundlagen basierend, sind mögliche Anwendungsfälle für Batterieanwendungen auf Schiffen betrachtet und erörtert worden.

Diese theoretischen Grundkenntnisse wurden angewandt, um mit Hilfe von MATLAB Lastprofile von drei Kreuzfahrtschiffen zu untersuchen. Die Lastprofile der Fahrmotoren während des Seebetriebs und die Lastprofile der Dieselgeneratoren während der Manöverbetriebe und Liegezeiten sind hinsichtlich ihrer Lastschwankungen in Größe, Häufigkeit und Dauer analysiert und ausgewertet worden.

Die Ergebnisse der Auswertungen der Lastprofile und die Grundlagen der Batterietechnik dienen der Konzeptionierung von Batteriesystemen für den Anwendungsfall des Peak Shaving der Fahrmotoren und des Peak Shaving des Bordnetzes während der Manöverbetriebe. Für beide Anwendungsfälle wurden jeweils Batteriezellen vom Typ Nickel-Metallhydrid- bzw. Blei- und Lithium-Ionen-Zellen verwendet.

7.2. Kritische Betrachtung

Damit ein Batteriesystem bei der Konzeptionierung die geforderte Lebenszeit von mindestens 10 Jahren erfüllt, war eine ausführliche Darstellung der Batteriegrundlagen notwendig. Hierbei sind vor allem die Faktoren herausgearbeitet worden, die für den Alterungsprozess von Batterien verantwortlich sind.

Die Beschaffung von Lastprofilen erwies sich als schwierig, da die meisten Reedereien gar nicht auf Anfragen reagierten oder aufgrund von Datenschutzbestimmungen die Daten nicht weitergeben durften. Letztendlich sind die Daten von Wärtsilä Italien und der Tochterfirma eniram zur Verfügung gestellt worden.

Um eine sinnvolle Auswertung der vorliegenden Lastprofile durchzuführen, sind die möglichen Anwendungsfälle von Batteriesystemen auf Schiffen betrachtet worden. Anschließend wurden die Lastprofile der Fahrmotoren während des Seebetriebs und die Lastprofile des Bordnetzes während der Manöverbetriebe und Liegezeiten, in denen die Dieselgeneratoren mit einer geringen Auslastung betrieben wurden, analysiert, ausgewertet und grafisch dargestellt.

Mit den Ergebnissen der Auswertungen der Lastprofile sind abschließend jeweils zwei Batteriesysteme für Peak Shaving des Fahrmotors und Peak Shaving des Bordnetzes während der Manöverbetriebe konzipiert worden. Bei der Konzeptionierung wurde jeweils ein Batteriesystem mit Lithium-Ionen-Zellen und ein System mit Blei- bzw. NiMH-Zellen dimensioniert.

Die Konzepte der Batteriesysteme, speziell mit den Lithium-Ionen-Zellen, dienen dazu, um Aussagen über die Mindestgröße solcher Batteriesysteme in Hinsicht auf Anzahl, Gewicht und Volumen der Zellen sowie eine Abschätzung der Kosten zu treffen. Über die Wechselwirkungen während der Entlade- und Ladevorgänge, Vor- und Einrichtungen für die Installation der Batteriesysteme und eine mögliche Realisierbarkeit eines Batteriesystems in den dimensionierten Größenordnungen wird keine Aussage getroffen.

Die Ergebnisse der Dimensionierung zeigen, dass Peak Shaving auf Schiffen unter Berücksichtigung bestimmter Bedingungen möglich ist. Die Realisierung eines Batteriesystems für Peak Shaving wird in erster Linie durch technische Faktoren eingeschränkt. Die Batteriesysteme werden durch die Leistungsgrenzen der jeweiligen Batteriezellen und durch die Systemanforderungen des jeweiligen Schiffes begrenzt. Hinzu kommen weitere Begrenzungen durch die Lebensdauer des Batteriesystems und den verfügbaren Platz auf einem Schiff.

Neben der Realisierbarkeit eines solchen Batteriesystems für Peak Shaving ist für Reedereien die Amortisation entscheidend.

Da eine schnelle grundlegende technische Verbesserung der bisherigen Antriebstechnik, beispielsweise die Verwendung von Brennstoffzellen oder Wasserstoffmotoren, unrealistisch erscheint, muss die bisherige Technik durch Modifikationen verbessert werden, um den Schadstoffausstoß zu reduzieren.

Durch die Verwendung von Batteriesystemen zum Peak Shaving kann besonders in den Küstengebieten und Häfen der Schadstoffausstoß reduziert werden.

7.3. Ausblick

Nachfolgend werden mehrere Möglichkeiten aufgezeigt, die sich für weitere Untersuchungen anbieten.

Batteriesysteme werden zwar durch technische Faktoren begrenzt, aber letztendlich wegen der hohen Kosten seltener verwendet. Um Batteriesysteme für Peak Shaving auf Schiffen einzusetzen, könnten mehrere Zelltypen kombiniert werden. Beispielsweise könnten Bleizellen zur Deckung der Grundlast, Lithium-Ionen-Zellen für die Spitzenlasten und Superkondensatoren für sehr schnelle Lastanforderungen verwendet werden. Durch die Kombinationen unterschiedlicher Zelltypen können die Anwendungsbedingungen besser erfüllt und die Kosten gesenkt werden.

Der Nachweis der Amortisation von Batteriesystemen für Peak Shaving ist für Reedereien ein wichtiger Aspekt. Folglich bieten sich genauere Untersuchungen an, wie hoch die Einsparungen durch Batteriesysteme tatsächlich sind und wann sich die Investitionskosten amortisiert haben.

Bei der Verwendung von NiMH-Zellen kann auf eine langjährige Praxiserfahrung zurückgegriffen werden, bei Lithium-Ionen-Zellen hingegen nicht. Der Einsatz von Lithium-Ionen-Systemen bedarf aufgrund der Sicherheitsaspekte weiterer technischer Lösungen. Dies gilt vor allem beim Einsatz von großen Lithium-Ionen-Systemen in der Umgebung von Menschen.

Das Recycling der Batteriesysteme muss bei der Schadstoffreduzierung berücksichtigt werden. Während Blei-Batterien zu einem sehr hohen Teil, nämlich zu etwa 95%, recycelt werden können, liegt der Anteil bei Lithium-Ionen-Batterien nur bei 30%. Aufgrund des stetig wachsenden Marktanteils von Lithium-Ionen-Batterien müssen daher bessere Verfahren zum Recyceln von Lithium-Ionen-Batterien gefunden werden.

Tabellenverzeichnis

5.1. Ergebnisse der Auswertung der Lastschwankungen um die mittlere Leistung P2 von Bereich 1 von Schiff 2	58
5.2. Ergebnisse der Auswertung des 1. Manöverbetriebs von Schiff 3	62
5.3. Ergebnisse der Auswertung des 1. Manöverbetriebs der Thruster	63
5.4. Ergebnisse der Auswertung der 1. Liegezeit von Schiff 3	66
5.5. Auswertung der Nutzungsdauer der Fahrmotoren	66
5.6. Auswertung der Dauer der Manöverbetriebe	67
5.7. Auswertung der Dauer der Liegezeiten	67
5.8. Durchschnittliche Peak-Dauer und Einsatzzeit der Fahrmotoren	77
5.9. Hochrechnung für die Zyklenzahl eines Batteriesystems für die Fahrmotoren	77
5.10. Hochrechnung für die Zyklenzahl im Manöverbetrieb beim Einsatz von einem und von zwei Dieselgeneratoren mit Batteriesystem	77
5.11. Hochrechnung der Zyklenzahl für die Dieselgeneratoren mit Batteriesystem während der Liegezeiten	78
5.12. Spitzenlasten und Mindestanzahl der Dieselgeneratoren während der Manöverbetriebe von Schiff 3	78
5.13. Parameter für ein Batteriesystem zum Peak Shaving des Fahrmotors	80
5.14. Parameter für ein Batteriesystem zum Peak Shaving des Bordnetzes während der Manöverbetriebe beim Einsatz von einem Dieselgenerator	81
5.15. Parameter für ein Batteriesystem (Standby-Betrieb) zum Peak Shaving des Bordnetzes während der Manöverbetriebe beim Einsatz von zwei Dieselgeneratoren	82
5.16. Parameter für ein Batteriesystem zum Peak Shaving des Bordnetzes während der Liegezeiten beim Einsatz von einem Dieselgenerator	83
6.1. Allgemeine Parameter eines NiMH-Batteriesystems für Peak Shaving des Bordnetzes während des Manöverbetriebs	89
6.2. Zusammenfassung der Parameter der Batteriekonzepte	94

Abbildungsverzeichnis

2.1. Aufbau und Funktion einer Lithium-Ionen-Zelle beim Entladevorgang [24, S.11]	15
2.2. Potentiale und spezifische Kapazitäten verschiedener positiver und negativer aktiver Materialien für Lithium-Ionen-Zellen [25, S.120]	17
2.3. Batterieeigenschaften nach gewähltem Kathodenmaterial [8, S.18]	18
2.4. Kalendarische Alterung einer Lithium-Ionen-Zelle - a) variable Temperatur, konst. SoC 50% b) variabler SoC, konst. Temperatur 25 °C [5, Abschnitt 3, Abb. 3]	20
2.5. Reversible Selbstentladung S und irreversibler Kapazitätsverlust KV in Abhängigkeit des Ladezustands (SoC) und der Temperatur für eine Lithium-Ionen-Zelle [2, S.141]	21
2.6. Schematische Darstellung der Zyklenlebensdauer bei Beschränkung von SoC und DoD bis zur Restkapazität von 70% [24, Abb. 7]	22
2.7. Simulation der zyklischen Alterung bei variierenden SoC und DoD, modifiziert nach [5, Abb. 5]	22
2.8. Vergleich von Leistungs- und Energiedichte einiger elektrischer Energiespeicher [27]	25
2.9. Vergleich verschiedener Batterietypen unter dem Einfluss des DoD auf deren mögliche Zyklenanzahl, abgeändert nach [20, S.283]	26
3.1. Vereinfachtes Übersichtsschaltbild eines Schiffssystems	29
3.2. Blockschaltbild eines Frequenzumrichters, in Anlehnung an [10, Abb. 2.2]	32
3.3. Darstellung eines diesel-elektrischen Antriebs mit Erweiterung eines Batteriesystems für den seriellen Hybridantrieb	35
3.4. Leistung der Wirkungsgrade bei einem diesel-elektrischen Antrieb und Serienhybrid	37
3.5. Darstellung eines diesel-mechanischen Antriebs mit Erweiterung eines Batteriesystems für den parallelen Hybridantrieb	39
3.6. Leistung der Wirkungsgrade bei einem diesel-mechanischen Antrieb und Parallelhybrid	40

4.1. Vereinfachte Darstellung des Lastverhaltens eines Dieselgenerators im Standby-Betrieb	45
4.2. Vereinfachte Darstellung des Lastverhaltens eines Dieselgenerators mit einem Batteriesystem im Standby-Betrieb	46
4.3. Beispielhaftes Lastverhalten von Antrieb, Propeller und Wellengenerator beim Peak Shaving	49
4.4. Schematischer Lastverlauf von drei Dieselgeneratoren und dem Kapazitätsverlauf eines Batteriesystems für die gesamte Schiffsleistung	50
4.5. Vereinfachtes Singleline-Diagramm eines Schiffsystems mit Batteriesystem	51
4.6. Schematischer Lastverlauf von zwei Dieselgeneratoren und dem Kapazitätsverlauf eines Batteriesystems für die Schiffsleistung	52
5.1. Leistungsdaten der Fahrmotoren (Schiff 2) mit Markierungen der zu analysierenden Bereiche	56
5.2. Bereich 1 des Fahrmotors PS von Schiff 2 mit mittleren Leistungen (P1-19) des Fahrmotors	57
5.3. Lastverlauf des Fahrmotors PS von Schiff 2 um die mittlere Leistung P2 von Bereich 1	58
5.4. Lastverläufe der Dieselgeneratoren und Thruster von Schiff 3 mit Markierungen der Manöverbetriebe (M1-10)	60
5.5. Lastverläufe der Generatoren von Manöverbetrieb 1	61
5.6. Lastverläufe der Thruster des 1. Manöverbetriebs von Schiff 3	63
5.7. Lastverläufe der Dieselgeneratoren und die Schiffsgeschwindigkeit von Schiff 3 mit Markierungen der Liegezeiten	64
5.8. Lastverläufe der Generatoren während der 1. Liegezeit von Schiff 3	65
5.9. Absolute Anzahl der Entlade- und Ladevorgänge	68
5.10. Absolute Anzahl der Manöverbetriebe und Liegezeiten	69
5.11. Durchschnittliche Peak-Dauer für die absolute Anzahl der Entlade- und Ladevorgänge	70
5.12. Durchschnittliche Peak-Dauer für die absolute Anzahl der Manöverbetriebe und Liegezeiten	70
5.13. Durchschnittliche Peak-Energie für die absolute Anzahl der Entlade- und Ladevorgänge	71
5.14. Durchschnittliche Peak-Energie für die absolute Anzahl der Manöverbetriebe und Liegezeiten	72
5.15. Durchschnittliche Leistung für die absolute Anzahl der Entlade- und Ladevorgänge	73
5.16. Durchschnittliche Leistung für die absolute Anzahl der Manöverbetriebe und Liegezeiten	74

5.17. Durchschnittliche Entlade- und Ladekapazität für die absolute Anzahl der Entlade- und Ladevorgänge	75
5.18. Durchschnittliche Entlade- und Ladekapazität für die absolute Anzahl der Manöverbetriebe und Liegezeiten	76
5.19. Lastaufteilung von Schiff 3 im 1. Manöverbetrieb	79
6.1. Charakteristik der Zyklenzahl einer BK-10V1S Batterie [22]	86

Literaturverzeichnis

- [1] ANDREAS HAGERMANN: *Batteriezyklen einfach erklärt*. – URL <https://patona.de/blog/akkus/batteriezyklen-einfach-erklart>. – Eingesehen am 30.06.18 12:08 Uhr
- [2] ANDREAS JOSSEN, WOLFGANG WEYDANZ: *Moderne Akkumulatoren richtig einsetzen*. Inge Reichardt Verlag, 2006. – ISBN 978-3-939359-11-1
- [3] BATTERIEFORUM-DEUTSCHLAND: *Batterie Lexikon*. – URL <https://www.batterieforum-deutschland.de/infoportal/lexikon/>. – Eingesehen am 21.08.18 13:55 Uhr
- [4] BATTERIEN-ABC: *Batterien - ABC*. – URL https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwIU-un89qzbAhXJx6YKHS7KB0gQFggnMAA&url=https%3A%2F%2Fwww.batteryuniversity.eu%2F%3FdFHASH%3D3b712de48137572f3849aabd5666a4e3&usg=AOvVaw0LY_3ax5FYuCyD-RcsG7ZI. – Eingesehen am 30.05.18 09:39 Uhr
- [5] BOLUN XU, ALEXANDRE OUDALOV, ANDREAS ULBIG, D.S. KIRSCHEN: *Modeling of Lithium-Ion Battery Degradation for Cell Life Assessment*. 2018. – URL https://www.researchgate.net/publication/303890624_Modeling_of_Lithium-Ion_Battery_Degradation_for_Cell_Life_Assessment?enrichId=rgreq-45e4d876bd726bfab3c8b1a49418abc2-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzMwMzg5MDYyNDtBUzo1OTUzMtAxNzA2MjgwOTZAMT3D%3D&el=1_x_2&_esc=publicationCoverPdf. – Eingesehen am 18.02.18 09:20 Uhr
- [6] BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR: *Luftverunreinigung und Energieeffizienz (Anlage VI)*. 2018. – URL <https://www.deutsche-flagge.de/de/umweltschutz/marpol/luft-energieeffizienz>. – Eingesehen am 11.05.2018 10:58Uhr

- [7] CHEMIE-SCHULE: *Lithium-Ionen-Akkumulator*. 2013. – URL <https://www.chemie-schule.de/KnowHow/Lithium-Ionen-Akku>. – Eingesehen am 25.06.18 08:35 Uhr
- [8] CHRISTIAN HUTH: *Strategische Planung der Fertigungstiefe bei Unsicherheit und Dynamik*. Springer, 2014. – ISBN 978-3-658-06831-8
- [9] CRUISETRICKS.DE: *Marinediesel, Schweroel & Co. - Schiffstreibstoffe im Ueberblick*. 2016. – URL <https://www.cruisetricks.de/marinediesel-schweroel-co-schiffstreibstoffe-im-ueberblick/>. – Eingesehen am 11.05.2018 12:42Uhr
- [10] DIVERSE MITARBEITER GÜTZGOLD ELEKTROTECHNIK GMBH: *Wissenswertes über Frequenzumrichter*. 2015. – URL https://www.guetzold.com/images/PDFs/Wissenswertes_ueber_Frequenzumrichter.pdf. – Eingesehen am 04.07.18 15:57 Uhr
- [11] E-HOI.DE: *Kreuzfahrtschiffe - Hochseeschiffe*. 2018. – URL <https://www.e-hoi.de/kreuzfahrt-schiffe/hochseeschiffe.html?page=3>. – Eingesehen am 07.05.2018 10:12Uhr
- [12] ENERGIE-EXPERTEN.ORG: *Bleiakku als Stromspeicher für Solaranlagen*. 2016. – URL <https://www.energie-experten.org/erneuerbare-energien/photovoltaik/stromspeicher/bleiakku.html>. – Eingesehen am 26.04.18 09:20 Uhr
- [13] FORSCHUNGS-INFORMATIONSSYSTEM: *Umwelt- und Klimabelastung der Seeschifffahrt im modalen Vergleich*. 2018. – URL <https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/334495/>. – Eingesehen am 11.05.2018 11:10Uhr
- [14] FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT: *Batterie-Glossar*. – URL <http://www1.ict.fraunhofer.de/deutsch/scope/ae/bg.html>. – Eingesehen am 30.05.18 09:40 Uhr
- [15] HOCHSCHULE, Zuercher: *Projektbeispiel: SCR-Harnstoffeinspritzung*. – URL <https://www.zhaw.ch/storage/engineering/institute-zentren/iefe/PDFs/cfd-studie.pdf>. – Eingesehen am 15.05.2018 09:49 Uhr
- [16] INGENIEUR.DE, Werder G.: *Weltweit erste Elektrofaehre in Norwegen im Einsatz*. 2015. – URL <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/e-mobilitaet/>

- [weltweit-elektrofaehre-in-norwegen-im-einsatz/](#). – Eingesehen am 14.05.2018 10:49 Uhr
- [17] INTERNATIONAL: *Anlage-6-MARPOL-Uebk-Regeln-zur-Verhuetung-der-Luftverunreinigung-durch-Schiffe*. 2012. – URL <https://www.jurion.de/document/fullview/1:2107173,43,20130801/?fullLaw=1>. – Eingesehen am 14.05.2018 09:35Uhr
- [18] JENS IHLENFELD: *Lithium-Ionen-Akkus haben doch einen Memory-Effekt*. 2013. – URL <https://www.golem.de/news/paul-scherrer-institut-lithium-ionen-akkus-haben-doch-einen-memory-html>. – Eingesehen am 30.06.18 13:35 Uhr
- [19] JENS SEILER: *Nickel-Metallhydrid-Akkus*. 2015. – URL <http://www.jens-seiler.de/bastelecke/akkus/>. – Eingesehen am 04.07.18 15:57 Uhr
- [20] JÜRGEN GARCHE, CHRIS K. DYER, PATRICK T. MOSELEY, ZEMPACHI OGUMI OGUMI, ZEMPACHI, DAVID A. RAND, BRUNO SCROSATI: *Encyclopedia of electrochemical power sources*. newnes, 2013. – ISBN 978-0-444-52745-5
- [21] LEONHARD STINY: *Grundwissen Elektrotechnik*. Franzis Verlag GmbH, 2009. – ISBN 978-3-7723-5328-4
- [22] PANASONIC, Mitarbeiter: *Allgemeine Informationen und Hilfestellungen zur Auslegung von Batterien*. Persönliche Gespräche und Nachrichten. 2018
- [23] PETER HOFMANN: *Hybridfahrzeuge - Ein alternatives Antriebssystem für die Zukunft*. Springer, 2014. – ISBN 978-3-7091-1780-4
- [24] RAHIMZEI, SANN, DR.VOGEL: *Kompodium: Li-Ionen-Batterien - Grundlagen, Bewertungskriterien, Gesetze und Normen*. 2015. – URL <https://www.dke.de/resource/blob/933404/fa7a24099c84ef613d8e7afd2c860a39/kompodium-li-ionen-batterien-data.pdf>. – Eingesehen am 16.04.18 08:31 Uhr
- [25] REINER KORTHAUER (HRSG.): *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*. Springer, 2013. – ISBN 978-3-642-30652-5
- [26] STATISTA: *Anzahl der Schiffe in der Welthandelsflotte im Jahr 2017 nach Schiffstypen*. 2018. – URL <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/29147/umfrage/anzahl-der-handelsschiffe-in-der-welthandelsflotte/>. – Eingesehen am 07.05.2018 10:00Uhr

- [27] WIKIPEDIA.ORG: *Bleiakkumulator*. 2018. – URL <https://en.wikipedia.org/wiki/Bleiakkumulator>. – Eingesehen am 25.06.18 12:32 Uhr

A. Abkürzungsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis

- AFE** Aktiver Gleichrichter (engl.: **Active FrontEnd**)
- BMS** Batterieverwaltungssystem (engl.: **Batterie Management System**)
- BoL** Auslieferungszeitpunkt (engl.: **Begin of Life**)
- CPP** Verstellpropeller (engl.: **Controllable Pitch Propeller**)
- DFE** Diodengleichrichter (engl.: **Diode Front End**)
- DoD** Tiefe der Entladung [%] (engl.: **Depth of Discharge**)
- ECA** Emissions-Überwachungsgebiete (engl.: **Emission Control Area**)
- EoL** Endzeitpunkt (engl.: **End of Life**)
- FPP** Festpropeller (engl.: **Fixed Pitch Propeller**)
- HVAC** Heizungs-, Lüftungs- und Klimaanlage (engl.: **Heat Ventilation Air Condition**)
- LIB** Lithium-Ionen-Batterien
- LNG** Verflüssigtes Erdgas (engl.: **Liquefied natural Gas**)
- MGO** Marinedieselöl oder Gasöl (engl.: **Marine Gas Oil**)
- PS** Backbord (engl.: **Port Side**)
- PMS** Energiemanagementsystem (engl.: **Power Management System**)
- PTH** Spezieller Anwendungsfall des Motorbetriebs (engl.: **Power Take Home**)
- PTI** Motorbetrieb (engl.: **Power Take In**)
- PTO** Generatorbetrieb (engl.: **Power Take Out**)
- SB** Steuerbord (engl.: **Starboard**)

SEI Passivierende, elektrochemische Grenzschicht (engl.: **S**olid **E**lectrolyte **I**nterphase)

SCR Selektive katalytische Reduktion (engl.: **S**elective **C**atalytic **R**eduction)

SoC Ladezustand [%] (engl.: **S**tate **o**f **C**harge)

SOG Schiffsgeschwindigkeit über Grund [Knoten] (engl.: **S**peed **O**ver **G**round)

USV unterbrechungsfreie Stromversorgung

B. Glossar

Glossar

Backbord und **Steuerbord** sind nautische Begriffe, die die Richtung rechts und links angeben. Backbord steht hierbei für links (engl. Port Side) und Steuerbord steht für rechts (engl. Starboard).

BoL „Begin of Life“ kennzeichnet den Auslieferungszeitpunkt einer Batterie.

Die **C-Rate** beschreibt den normierten Entlade- und Ladestrom in Abhängigkeit der Kapazität und der Zeit, wird mit dem Buchstaben „C“ gekennzeichnet und ist eine dimensionslose Zahl. 1C bedeutet beispielsweise, dass eine Batterie mit einer Nennkapazität von 1 Amperestunde (Ah) eine Stunde lang einen Entladestrom von 1 Ampere liefern.

C-Rate	Batteriekapazität [Ah]	Entladestrom [A]	Entladezeit [h]
1C	1	1	1
2C	1	2	0,5
0,5C	1	0,5	2

Der **coulombsche Wirkungsgrad** (Coulomb-Wirkungsgrad, Ladewirkungsgrad) entspricht dem Verhältnis von entnommenen Amperestunden zu den eingeladenen Amperestunden. Er gibt Aufschluss über die Ladungsverluste der Batterie beim Laden und Entladen. [3]

Die Entladetiefe **DoD „Depth of Discharge“** gibt die auf die Nennkapazität bezogene Entladetiefe an. Eine vollständige Entladung entspricht einem DoD von 100%.

Bei elektrochemischen Reaktionen werden von den aktiven Massen stets Ionen aufgenommen oder abgegeben. In einer elektrochemischen Zelle ist damit unter Belastung (Stromfluss durch einen externen Verbraucher) ein Transport von Ionen von der einen zur anderen Elektrode erforderlich. Dieser Transport erfolgt durch ein Medium, das die

Ionen in ausreichender Konzentration und Beweglichkeit enthält. Ein **Elektrolyt** kann eine keramische Festsubstanz, ein Polymer mit ionogenen Gruppen oder eine Flüssigkeit mit einem gelösten, dissoziierten Leitsalz sein. Zum Stromfluß außerhalb der Zelle durch den Verbraucher gehört der Ladungstransport durch Ionen innerhalb der Zelle. [14]

Der **energetische Wirkungsgrad** schließt hingegen nicht nur die Ladungsverluste, sondern auch Spannungs- (siehe elektrische Spannung) und thermische Verluste ein und ist deshalb als eine Art Gesamtwirkungsgrad der Batterie zu verstehen. Er gibt das Verhältnis von entnommener Energie zu eingeladener Energie an. [3]

EoL „End of Life“ bezeichnet das Lebensdauerende einer Batterie.

Die **Kalenderlebensdauer** bezeichnet die maximale Lagerzeit einer Batterie ohne zyklische Belastung und unter geeigneten Temperaturbedingungen, bis die Kapazität eine untere Grenze unterschreitet und nicht mehr wieder hergestellt werden kann.

Eine **Ladegruppe** besteht aus einem Verbrennungsmotor und einem Generator und erzeugt Energie, die direkt zum Elektromotor transferiert wird oder zum Laden der Batterie verwendet werden kann. [23]

Neben der physikalischen Alterung und dem damit verbundenen Kapazitätsverlust kann die Kapazität einer Zelle ebenfalls durch den sogenannten **Memory- oder Lazy-Battery-Effekt** beeinträchtigt werden. Der Memory-Effekt tritt auf, wenn Zellen häufig nur teilentladen werden. Hierbei wird die Teilentladungsstufe von der Zelle „im Gedächtnis gespeichert“ und dem Nutzer steht anschließend nur noch ein Teil der ursprünglichen Kapazität zur Verfügung. [4, Folie 7] Durch eine oder mehrere Tiefenentladungen kann der Effekt umgekehrt werden. [14]

Lithium-Ionen-Zellen haben den Vorteil, bis auf spezielle Materialkombinationen (Lithium-Eisenphosphat $LiFePO_4$) [18], keinen oder nur einen sehr geringen Memory-Effekt vorzuweisen. [24, S.22]

Die **Nennkapazität** bezeichnet die Energiemenge einer Batterie und wird in Amperestunden [Ah] angegeben.

Als **Primärbatterie** wird eine Batterie bezeichnet, die nur einmalig entladen werden und nicht wieder aufgeladen werden kann.

Eine Querstrahlsteueranlage (engl. **tunnel/transverse thruster**; auch Bug- oder Heckstrahlruder) sind die auf Schiffen unterhalb der Wasserlinie quer zur eigentlichen Fahrtrichtung eingebauten Antriebe, die zum flexibleren Manövrieren dienen, indem Fahrt zur Seite möglich wird und sich der Wendekreis verkleinert.¹

¹<https://de.wikipedia.org/wiki/Querstrahlsteueranlage>

Unter einer **reversiblen Reaktion** versteht man eine chemische Reaktion, welche umkehrbar ist.

Rekuperation bezeichnet die Umwandlung von kinetischer in elektrische Energie und findet während des Bremsvorgang statt.

Als **Sekundärbatterie** wird eine Batterie oder auch Akkumulator (kurz Akku) bezeichnet, die nach der Entladung neu aufgeladen und entladen werden kann.

Der Ladezustand **SoC „State of Charge“** beschreibt die aktuelle Kapazität einer Batterie als Prozentangabe im Verhältnis zu ihrer maximalen Kapazität. [3]

„Die **SEI „Solid-Electrolyte Interphase“** ist eine passivierende, elektrochemische Grenzschicht zwischen Aktivmaterial und Elektrolyt. Sie verhindert das Aufblättern der feinen Schichten beim Einlagern der Lithium-Ionen, in dem die SEI die im Elektrolyt entstehende Solvathülle von den Lithium-Ionen abstreifen kann. Unter anderem durch diese Eigenschaft ist die SEI mit hauptverantwortlich für Alterung und Qualität der entstehenden Batteriezelle.“²

²<http://www.exzelltum.de/index.php/die-solid-electrolyte-interphase.html>

C. Aufgabenstellung

C.1. Aufgabenstellung der Bachelorarbeit



Hochschule für Angewandte
Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Department Informations- und Elektrotechnik
Prof. Dr.-Ing. Karl-Ragmar Riemschneider

14.05.2018

Bachelorarbeit Björn Leckzut

Untersuchung und Bewertung von Peak Shaving und hybriden Antrieben auf Schiffen

Motivation

Die Firma Wärtsilä SAM Electronics GmbH in Hamburg verkauft und installiert Antriebssysteme für Schiffe. Die Antriebssysteme gibt es als diesel-mechanische und diesel-elektrische Ausführungen. Für die konstante Belastung der Dieselmotoren bei den diesel-mechanischen Antrieben als auch der Dieselgeneratoren bei den diesel-elektrischen Antrieben sollen Energiespeicher in Form von Batteriesystemen installiert werden, die durch das Verfahren des Peak Shaving eine konstante Belastung erzeugen. Für den optimierten diesel-mechanischen Belastungsbetrieb ist die Auswirkung des Peak Shaving auf die Batterien zu untersuchen.

Ziele

Herr Leckzut erhält die Aufgabe, den Nutzen von Peak Shaving für hybride Antriebe zu untersuchen. Mit dieser Untersuchung soll die mögliche Anwendbarkeit einer Verwendung von Batteriesystemen für Peak Shaving auf Schiffen und die damit einhergehende Auswirkung auf die Batterien und mögliche Kosteneinsparungen ermittelt werden. Anstrebenswerte Ziele werden dabei in folgenden Aspekten gesehen:

- Erstellung und Erläuterung der möglichen Anwendungsfällen von Batteriesystemen einschließlich der Antriebstechnik
- Betrachtung der Lebenszeit der Batterien in Abhängigkeit von äußeren Einflüssen
- Messwerterfassung/-beschaffung und Analyse der Lastprofile von Schiffen
- Beurteilung des Konzepts eines Antriebssystem mit angeschlossenem Batteriesystem
- Amortisationsrechnung (optional)

Aufgabe

Herr Leckzut soll in der Bachelorarbeit die folgenden Arbeitspakete umsetzen:

1. Einarbeitung und Analyse der Rahmenbedingungen und Lösungsmöglichkeiten

- Einarbeitung in die Zielstellung und Aufgabe der Bachelorarbeit durch Recherche und Literatur
- Erfassen der Anforderungen und technischen Daten sowie Aufwandsabschätzung
- Planung des zeitlichen Rahmen

2. Grundlegende Funktionsweisen und Konzepte

- Betrachtung und Darstellung der Antriebskonzepte
 - o diesel-elektrischer und diesel-mechanischer Antrieb
 - o diesel-mechanischer Antrieb mit Wellengenerator
- Analyse und Darstellung der Anwendungsfälle für Batteriespeicher auf Schiffen
 - o Peak Shaving
 - Bordnetzstabilisation
 - Lastausgleich des Hauptantriebs
 - o Elektroantrieb (Hafenbetrieb oder Revierfahrten)
 - o Standby-Betrieb (Redundanz)
 - o Sonstiges (Fährbetrieb)
- Erläuterung des Peak-Shaving-Verfahrens

3. Grundlagen der Lithium-Ionen-Batterie

- Einarbeitung durch Recherche und Literatur
- Darstellung des Aufbaus und der Funktion
- Welche Faktoren begrenzen den Einsatz der Batterie als Hybridlösung
- Analyse des Alterungsprozesses (Einflüsse auf die Lebensdauer)
- Vergleich mit anderen Batterietypen

4. Lastprofile/Messdaten

- Lastprofile verschiedener Betriebsarten
 - o z.B. Revierfahrt, Kranbetrieb, Lastspitzen, Normalbetrieb
- Sammeln entsprechenden Daten
 - o Beschaffung der Lastprofile (eigene Messungen sofern möglich) von Reedereien oder anderen Institutionen
- Durchführung und Analyse der Betriebssituation (Dauer, Häufigkeit und Größe der Lastspitzen)
 - o Spitzen der Hauptmaschine
 - o Spitzen im Bordnetz

5. Konzeptentwicklung eines Batteriesystems

- Dimensionierung eines Batteriespeichers zum Peak Shaving sowohl für die Hauptmaschine als auch das Bordnetz unter Berücksichtigung der Lastprofile
 - o Beurteilung der Peaks und deren Auswirkung auf die Lebensdauer der Batterien
- Beurteilung der verwendeten Komponenten und deren Dimensionierung

6. Wirtschaftliche Betrachtung

- Darstellung der Kosten an einem Fallbeispiel mit zugehörigen Parametern

7. Auswertung und Bewertung

- Darstellung und Dokumentation der Lösungsvarianten
- Gegenüberstellung und Analyse der Ergebnisse und Lösungen
- Diskussion und Bewertung unter Berücksichtigung der Ergebnisse
- Möglichkeiten zur Verbesserung für zukünftige Arbeiten vorgeben

Dokumentation

Die Fachliteratur, die Vorarbeiten und die kommerziellen Unterlagen sind zielgerichtet zu recherchieren. Dabei sind insbesondere wichtige Grundlagen, andere aktuelle Produkte und Anwendungsfälle und die vorgesehene Anwendung näher zu betrachten. Die Funktionsweise der Simulationen ist gut nachvollziehbar zu dokumentieren.

Die gesetzten Rahmenbedingungen, die Grundkonzeption, auftretende Probleme und wesentliche Folgerungen sollen beschrieben werden. Die Simulationsergebnisse sind in repräsentativen Umfang zu erfassen, auszuwerten und als Diagramme zusammenfassend darzustellen. Die Ergebnisse sind kritisch einordnend zu bewerten. Ansätze für Verbesserungen und weitere Arbeiten sind zu nennen.

Hamburg, den _____

Verfasser

Björn Leckzut

Betreuender Professor

Prof. Dr.-Ing. Karl-Ragmar Riemschneider

Zweitprüfer:

Prof. Dr.-Ing. Michael Röther

Betreuer (Wärtsilä SAM Electronics GmbH):

Michael Kranz

Frank Zühlsdorf

D. Tabellen

D.2. Ergebnisse der Auswertungen der Lastschwankungen der Dieselgeneratoren während der Manöverbetriebe von Schiff 2 beim Einsatz eines Dieselgenerators mit Batteriesystem

		absAnzahlEntladevorgaenge	gesLadeenergie_kWh	gesEntladezeit_h	durchsPeakDauer_s	durchsPeakEnergie_kWh	durchsLeistung_kW
Betrieb 1	Entladen	2	1540,58969	0,664289193	1195,72	770,2948474	2319,155139
	Laden	1	-0,5730282	0,010710807	38,5589	-0,573028191	-53,5
Betrieb 2	Entladen	1	770,654167	0,25	900	770,6541667	3082,616667
	Laden	0	0	0	0	0	0
Betrieb 3	Entladen	3	1298,5256	0,677255384	812,706	432,8418657	1917,335214
	Laden	2	-2,4672639	0,022744616	40,9403	-1,23363194	-108,4768331
Betrieb 4	Entladen	1	1045,5375	0,3	1080	1045,5375	3485,125
	Laden	0	0	0	0	0	0
Betrieb 5	Entladen	5	508,617621	0,24532205	176,632	101,7235243	2073,265004
	Laden	5	-70,288455	0,163011283	117,368	-14,05769095	-431,1876663
Betrieb 6	Entladen	2	1473,26296	0,274769479	494,585	736,6314805	5361,814441
	Laden	1	-0,000461	0,000230521	0,82988	-0,000461042	-2
Betrieb 7	Entladen	8	199,532047	0,347152822	156,219	24,9415059	574,7671762
	Laden	7	-173,60705	0,219513845	112,893	-24,80100674	-790,8706053
Betrieb 8	Entladen	1	1402,71163	0,415827988	1496,98	1402,711633	3373,29779
	Laden	1	-0,1907994	0,000838679	3,01924	-0,190799418	-227,5
Betrieb 9	Entladen	0	0	0	0	0	0
	Laden	0	0	0	0	0	0
Betrieb 10	Entladen	0	0	0	0	0	0
	Laden	0	0	0	0	0	0

Absolute Anzahl der Entlade- und Ladevorgänge

Gesamt	Entladen	23	8239,43122	3,174616916	496,897	358,2361401	2595,4096
	Laden	17	-247,12705	0,41704975	88,3164	-14,53688556	-592,5601304

Absolute Anzahl der Manöverbetriebe

Gesamt	Entladen	8	8239,43122	3,174616916	1428,58	1029,928903	2595,4096
	Laden	8	-247,12705	0,41704975	187,672	-30,89088181	-592,5601304

D.3. Ergebnisse der Auswertungen der Lastschwankungen der Dieselgeneratoren während der Manöverbetriebe von Schiff 2 beim Einsatz von zwei Dieselgeneratoren mit Batteriesystem

		absAnzahlEntladevorgaenge	gesLadeenergie_kWh	gesEntladezeit_h	durchsPeakDauer_s	durchsPeakEnergie_kWh	durchsLeistung_kw
Betrieb 1	Entladen	0	0	0	0	0	0
	Laden	1	-4073,283333	0,675	2430	-4073,28333	-6034,493827
Betrieb 2	Entladen	0	0	0	0	0	0
	Laden	1	-1308,345833	0,25	900	-1308,34583	-5233,383333
Betrieb 3	Entladen	0	0	0	0	0	0
	Laden	1	-4525,141667	0,7	2520	-4525,14167	-6464,488095
Betrieb 4	Entladen	0	0	0	0	0	0
	Laden	1	-1449,2625	0,3	1080	-1449,2625	-4830,875
Betrieb 5	Entladen	0	0	0	0	0	0
	Laden	1	-2957,370833	0,408333333	1470	-2957,37083	-7242,540816
Betrieb 6	Entladen	4	93,91599021	0,09292088	83,62879208	23,47899755	1010,70922
	Laden	5	-907,5534902	0,18207912	131,0969663	-181,510698	-4984,3908
Betrieb 7	Entladen	0	0	0	0	0	0
	Laden	1	-4686,475	0,566666667	2040	-4686,475	-8270,25
Betrieb 8	Entladen	2	0,147186651	0,001620474	2,916852316	0,073593326	90,82940922
	Laden	3	-2062,626353	0,415046193	498,0554318	-687,542118	-4969,63082
Betrieb 9	Entladen	0	0	0	0	0	0
	Laden	0	0	0	0	0	0
Betrieb 10	Entladen	0	0	0	0	0	0
	Laden	0	0	0	0	0	0

Absolute Anzahl der Entlade- und Ladevorgänge

Gesamt	Entladen	6	94,06317686	0,094541354	56,7248124	15,67719614	994,9421378
	Laden	14	-21970,05901	3,497125313	899,2607948	-1569,28993	-6282,319632

Absolute Anzahl der Manöverbetriebe

Gesamt	Entladen	8	94,06317686	0,094541354	42,5436093	11,75789711	994,9421378
	Laden	8	-21970,05901	3,497125313	1573,706391	-2746,25738	-6282,319632

Überschreitung der Leistungsgrenze von 2 DG

Betrieb 6	Entladen	4	93,91599021	0,09292088	83,62879208	23,47899755	1010,70922
	Laden	5	-907,5534902	0,18207912	131,0969663	-181,510698	-4984,3908
Betrieb 8	Entladen	2	0,147186651	0,001620474	2,916852316	0,073593326	90,82940922
	Laden	3	-2062,626353	0,415046193	498,0554318	-687,542118	-4969,63082
Gesamt	Entladen	2	94,06317686	0,094541354	170,1744372	47,03158843	994,9421378
	Laden	2	-2970,179843	0,597125313	1074,825563	-1485,08992	-4974,131524

D.4. Ergebnisse der Auswertungen der Lastschwankungen der Dieselgeneratoren während der Liegezeiten von Schiff 2

		absAnzahlEntladevorgaenge	gesLadeenergie_kWh	gesEntladezeit_h	durchsPeakDauer_s	durchsPeakEnergie_kWh	durchsLeistung_kW
Betrieb 1	Entladen	37	94,66643332	0,932546854	90,7343	2,558552252	101,5138627
	Laden	38	-2215,4456	6,875786479	651,39	-58,3012	-322,2097729
Betrieb 2	Entladen						
	Laden						
Betrieb 3	Entladen						
	Laden						
Betrieb 4	Entladen						
	Laden						
Betrieb 5	Entladen						
	Laden						
Betrieb 6	Entladen						
	Laden						
Betrieb 7	Entladen						
	Laden						
Betrieb 8	Entladen						
	Laden						
Betrieb 9	Entladen						
	Laden						
Betrieb 10	Entladen						
	Laden						

Absolute Anzahl der Entlade- und Ladevorgänge

Gesamt	Entladen	37	94,66643332	0,932546854	90,7343	2,558552252	101,5138627
	Laden	38	-2215,4456	6,875786479	651,39	-58,3012	-322,2097729

Absolute Anzahl der Manöverbetriebe

Gesamt	Entladen	1	94,66643332	0,932546854	3357,17	94,66643332	101,5138627
	Laden	1	-2215,4456	6,875786479	24752,8	-2215,4456	-322,2097729

D.5. Ergebnisse der Auswertungen der Lastschwankungen der Dieselgeneratoren während der Manöverbetriebe von Schiff 3 beim Einsatz eines Dieselgenerators mit Batteriesystem

		absAnzahlEntladevorgaenge	gesLadeenergie_kWh	gesEntladezeit_h	durchsPeakDauer_s	durchsPeakEnergie_kWh	durchsLeistung_kW
Betrieb 1	Entladen	2	2884,6895	1,26654235	2279,77622	1442,34473	2277,60996
	Laden	2	-3,6259239	0,02512432	45,2237778	-1,81296195	-144,319279
Betrieb 2	Entladen	1	1057,2729	0,51666667	1860	1057,27292	2046,33468
	Laden	0	0	0	0	0	0
Betrieb 3	Entladen	1	4613,099	0,90833333	3270	4613,09896	5078,64106
	Laden	0	0	0	0	0	0
Betrieb 4	Entladen	1	1873,0531	0,44166667	1590	1873,05313	4240,875
	Laden	0	0	0	0	0	0
Betrieb 5	Entladen	1	1868,835	0,98193678	3534,9724	1868,83501	1903,21318
	Laden	1	-1,2798044	0,00972989	35,0276025	-1,27980436	-131,533287
Betrieb 6	Entladen	1	754,95417	0,4	1440	754,954167	1887,38542
	Laden	0	0	0	0	0	0
Betrieb 7	Entladen	1	1197,376	0,525	1890	1197,37604	2280,71627
	Laden	0	0	0	0	0	0
Betrieb 8	Entladen	1	1011,825	0,43333333	1560	1011,825	2334,98077
	Laden	0	0	0	0	0	0
Betrieb 9	Entladen	6	722,95166	1,05343525	632,061149	120,491943	686,28011
	Laden	6	-145,99749	0,54656475	327,938851	-24,3329152	-267,11838
Betrieb 10	Entladen	1	1708,8432	0,81550036	2935,80128	1708,84323	2095,45369
	Laden	1	-6,6088558	0,04283298	154,198718	-6,60885584	-154,293637

Absolute Anzahl der Entlade- und Ladevorgänge

Gesamt	Entladen	16	17692,9	7,34241473	1652,04331	1105,80622	2409,68404
	Laden	10	-157,51208	0,62425194	224,730698	-15,7512075	-252,321323

Absolute Anzahl der Manöverbetriebe

Gesamt	Entladen	10	17692,9	7,34241473	2643,2693	1769,28996	2409,68404
	Laden	10	-157,51208	0,62425194	224,730698	-15,7512075	-252,321323

D.6. Ergebnisse der Auswertungen der Lastschwankungen der Dieselgeneratoren während der Manöverbetriebe von Schiff 3 beim Einsatz von zwei Dieselgeneratoren mit Batteriesystem

		absAnzahlEntladevorgaenge	gesLadeenergie_kWh	gesEntladezeit_h	durchsPeakDauer_s	durchsPeakEnergie_kWh	durchsLeistung_kW
Betrieb 1	Entladen	0	0	0	0	0	0
	Laden	1	-7524,76458	1,2916667	4650	-7524,7646	-5825,62419
Betrieb 2	Entladen	0	0	0	0	0	0
	Laden	1	-3105,05833	0,5166667	1860	-3105,0583	-6009,79032
Betrieb 3	Entladen	2	550,061764	0,2602528	468,455	275,03088	2113,567397
	Laden	3	-3254,60968	0,6480806	777,697	-1084,8699	-5021,92143
Betrieb 4	Entladen	0	0	0	0	0	0
	Laden	1	-1685,06875	0,4416667	1590	-1685,0688	-3815,25
Betrieb 5	Entladen	0	0	0	0	0	0
	Laden	1	-6121,43542	0,9916667	3570	-6121,4354	-6172,87605
Betrieb 6	Entladen	0	0	0	0	0	0
	Laden	1	-2467,49583	0,4	1440	-2467,4958	-6168,73958
Betrieb 7	Entladen	0	0	0	0	0	0
	Laden	1	-3032,08958	0,525	1890	-3032,0896	-5775,40873
Betrieb 8	Entladen	0	0	0	0	0	0
	Laden	1	-2479,1625	0,4333333	1560	-2479,1625	-5721,14423
Betrieb 9	Entladen	0	0	0	0	0	0
	Laden	1	-12312,8458	1,6	5760	-12312,846	-7695,52865
Betrieb 10	Entladen	0	0	0	0	0	0
	Laden	1	-5212,60625	0,8583333	3090	-5212,6063	-6072,93932

Absolute Anzahl der Entlade- und Ladevorgänge

Gesamt	Entladen	2	550,061764	0,2602528	468,455	275,03088	2113,5674
	Laden	12	-47195,1368	7,7064139	2311,92	-3932,9281	-6124,13729

Absolute Anzahl der Manöverbetriebe

Gesamt	Entladen	10	550,061764	0,2602528	93,691	55,006176	2113,5674
	Laden	10	-47195,1368	7,7064139	2774,31	-4719,5137	-6124,13729

Überschreitung der Leistungsgrenze von 2 DG

Betrieb 3	Entladen	2	550,061764	0,2602528	468,455	275,03088	2113,567397
	Laden	3	-3254,60968	0,6480806	777,697	-1084,8699	-5021,92143
Gesamt	Entladen	1	550,061764	0,2602528	936,91	550,06176	2113,5674
	Laden	1	-3254,60968	0,6480806	2333,09	-3254,6097	-5021,92143

D.7. Ergebnisse der Auswertungen der Lastschwankungen der Dieselgeneratoren während der Liegezeiten von Schiff 3

		absAnzahlEntladevorgaenge	gesLadeenergie_kWh	gesEntladezeit_h	durchsPeakDauer_s	durchsPeakEnergie_kWh	durchsLeistung_kW
Betrieb 1	Entladen	2	3341,315568	9,181064612	16525,9	1670,657784	363,9355249
	Laden	1	-1,516610078	0,027268722	98,1674	-1,516610078	-55,61720501
Betrieb 2	Entladen	23	633,1633241	3,631631963	568,429	27,52884018	174,346776
	Laden	22	-631,8487408	3,685034704	603,006	-28,72039731	-171,4634438
Betrieb 3	Entladen	0	0	0	0	0	0
	Laden	0	0	0	0	0	0
Betrieb 4	Entladen	0	0	0	0	0	0
	Laden	0	0	0	0	0	0
Betrieb 5	Entladen	0	0	0	0	0	0
	Laden	0	0	0	0	0	0
Betrieb 6	Entladen	0	0	0	0	0	0
	Laden	0	0	0	0	0	0
Betrieb 7	Entladen	0	0	0	0	0	0
	Laden	0	0	0	0	0	0
Betrieb 8	Entladen	0	0	0	0	0	0
	Laden	0	0	0	0	0	0
Betrieb 9	Entladen	0	0	0	0	0	0
	Laden	0	0	0	0	0	0
Betrieb 10	Entladen	0	0	0	0	0	0
	Laden	0	0	0	0	0	0

Absolute Anzahl der Entlade- und Ladevorgänge

Gesamt	Entladen	25	3974,478893	12,81269657	1845,03	158,9791557	310,1984715
	Laden	23	-633,3653509	3,712303426	581,056	-27,53762395	-170,6124953

Absolute Anzahl der Manöverbetriebe

Gesamt	Entladen	2	3974,478893	12,81269657	23062,9	1987,239446	310,1984715
	Laden	2	-633,3653509	3,712303426	6682,15	-316,6826754	-170,6124953

D.8. Übersicht der Kenndaten verschiedener Batterietypen

Beschreibung	Blei	NiCd Nickel- Cadmium	NiMH Nickel- Metallhydrid	Li-Ionen ¹		
				Cobalt	Magnesium	Phosphate
Spezifische Energie [Wh/kg]	30-50	45-80	60-120	150-250	100-150	90-120
Interner Widerstand	sehr gering	sehr gering	gering	moderat	gering	sehr gering
Zykluslebensdauer ² (80% DoD)	200-300	1000	300-500 ³	500-1000	500-1000	1000-2000
Ladezeit ⁴ [h]	8-16	1-2	2-4	2-4	1-2	1-2
Überladungstoleranz	hoch	moderat	gering		gering	
Selbstentladung/Monat (Raumtemperatur)	5%	20% ⁵	30%	Schutzbeschaltung verbraucht < 3%		
Nenn-Zellspannung [V]	2	1,2 ⁶	1,2	3,6	3,7 ⁷	3,2-3,3
Ladeabbruchspannung [V/Zelle]	2,4	Ladeüberwachung durch Spannungssignatur		typ. 4,2 größere Spg. Möglich		
Entladeabbruchspannung [V/Zelle, 1C]	1,75	1,0	1,0	2,5-3,0	2,5-3,0	2,5
Spitzenlaststrom [C-Rate] (Beste Ergebnisse für)	5 ⁸ 0,2	20 1	5 0,5	2 < 1	> 30 < 10	>30 < 10
Ladetemperatur [°C]	-20 bis 50	0 bis 45		0 bis 45 ⁹		
Entladetemperatur [°C]	-20 bis 50	-20 bis 65		-20 bis 60		
Wartungsbedingungen	3-6 Monate ¹⁰	Alle 90 Tage bei vollem Gebrauch		wartungsfrei		
Sicherheitsbedingungen		thermisch stabil		Schutzbeschaltung ¹¹ benötigt		
Giftig	sehr hoch	sehr hoch	gering	gering		
Coulomb-Effekt ¹²	ca. 90%	ca. 70% langsames Laden ca. 90% schnelles Laden		ca. 99%		
Kosten	gering	moderat		hoch ¹³		

Die Tabelle samt Indexzahlen sind der Quelle¹ entnommen.

Indexzahlen:

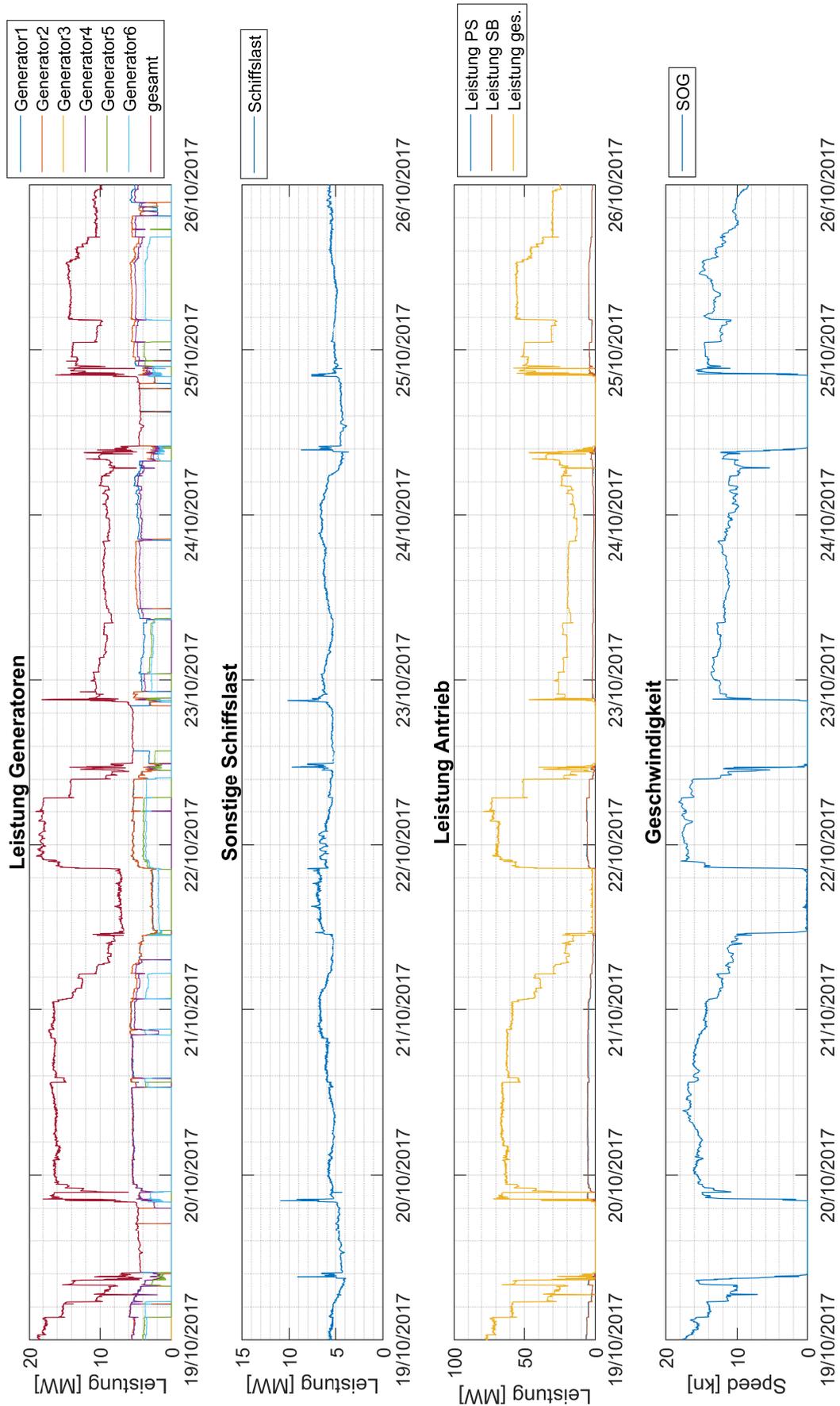
1. Die Kombination von Kobalt, Nickel, Mangan und Aluminium erhöht die Energiedichte auf 250 Wh/kg.
2. Die Zykluslebensdauer basiert auf der Entladetiefe (DoD). Ein geringer DoD verlängert die Zykluslebensdauer.
3. Die Zykluslebensdauer ist abhängig von einer regelmäßigen Wartung der Batterie, um den Memory-Effekt zu verhindern.
4. Ultraschnelle Lade-Batterien werden für spezielle Anwendungen hergestellt.
5. Die Selbstentladung ist unmittelbar nach der Ladung am höchsten. NiCd verliert in den ersten 24 Stunden 10%, sinkt dann auf 10% alle 30 Tage. Hohe Temperaturen und Alter erhöhen die Selbstentladung.
6. 1,25 V sind traditionell; 1,20 V sind häufiger.
7. Die Hersteller können die Spannung wegen des geringen internen Widerstands höher bewerten (Marketing).
8. Geeignet für hohe Strompulse; braucht Zeit, um sich zu erholen.
9. Li-Ionen-Batterien nicht unter dem Gefrierpunkt laden.
10. Die Wartung kann in Form eines Ausgleichs oder einer Topping-Ladung* erfolgen, um Sulfation zu verhindern.
11. Der Schutzkreis schneidet bei den meisten Li-Ionen-Batterien unter ca. 2,20 V und über 4,30 V ab; für Lithium-Eisen-Phosphat gelten unterschiedliche Spannungseinstellungen.
12. Der Coulomb-Effekt ist für schnellere Ladungen höher (teilweise aufgrund von Selbstentladungsfehlern).
13. Li-Ionen-Batterien haben niedrigere Kosten pro Zyklus als Blei Säure.

* Die Topping-Aufladung erfolgt für Batterien, die im Service oder in der Lagerung sind, um die volle Ladung zu erhalten und die Sulfation bei Blei-Säure-Batterien zu verhindern.

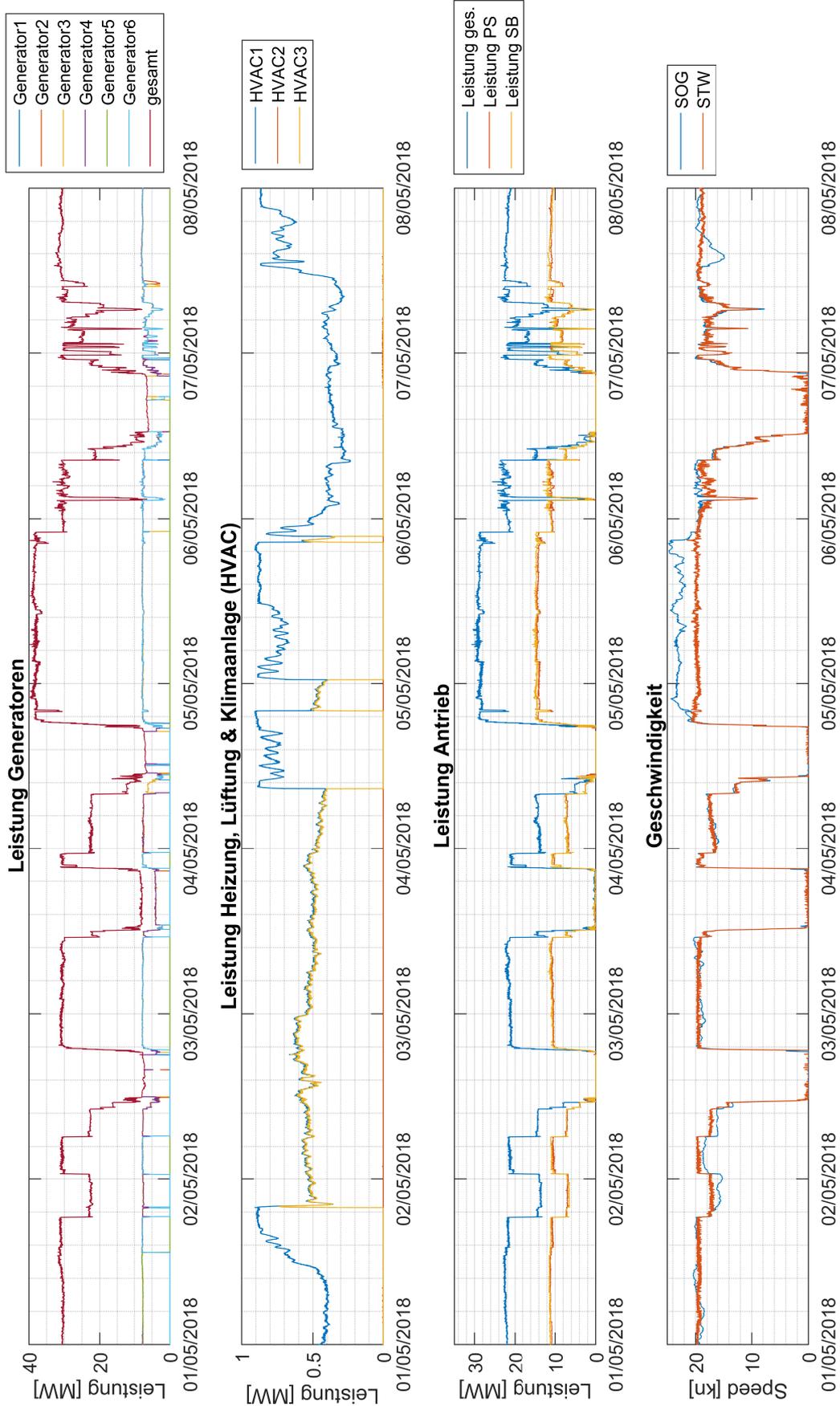
¹http://batteryuniversity.com/learn/article/secondary_batteries

E. Diagramme und Abbildungen

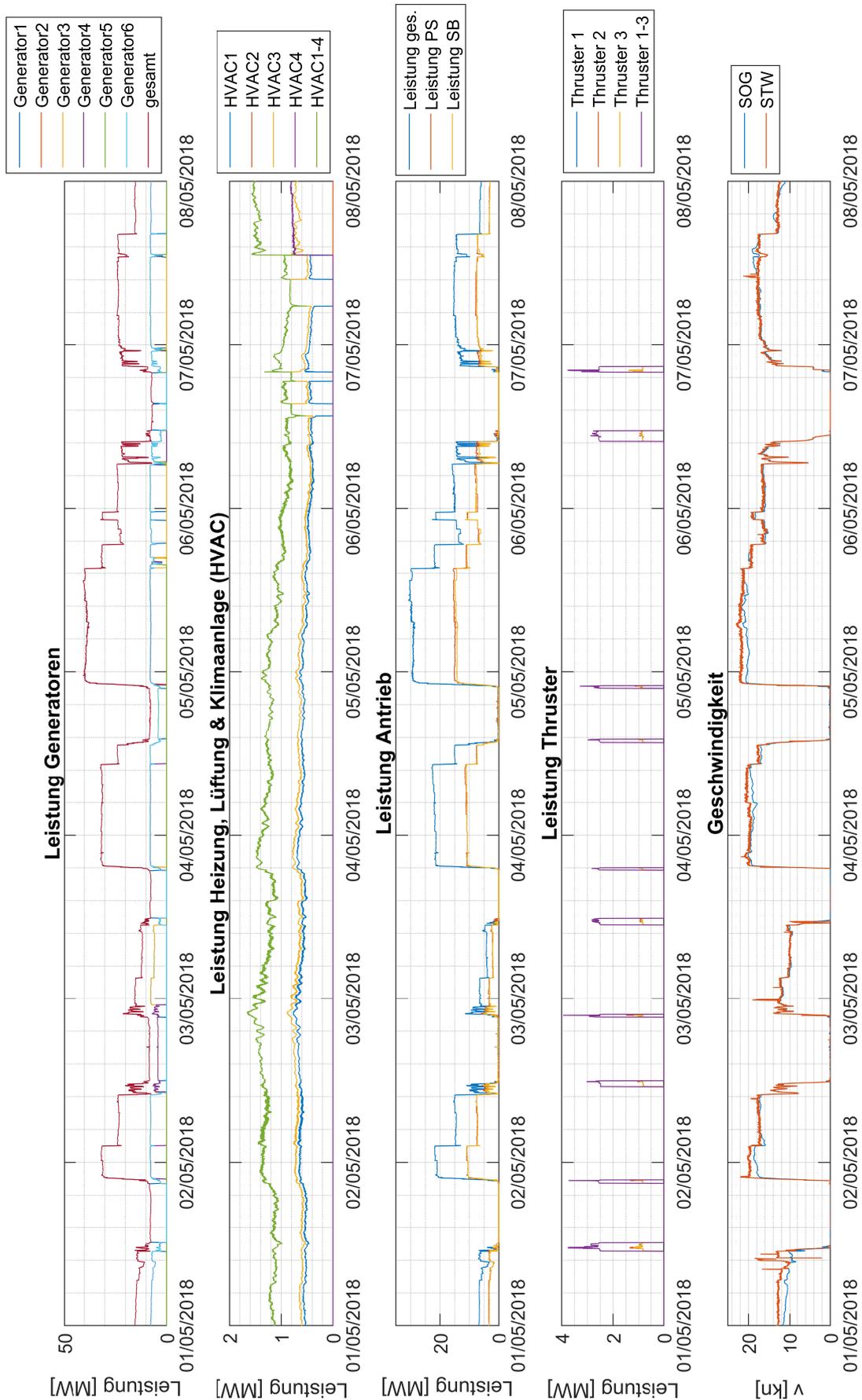
E.1. Übersicht der Daten von Schiff 1



E.2. Übersicht der Daten von Schiff 2

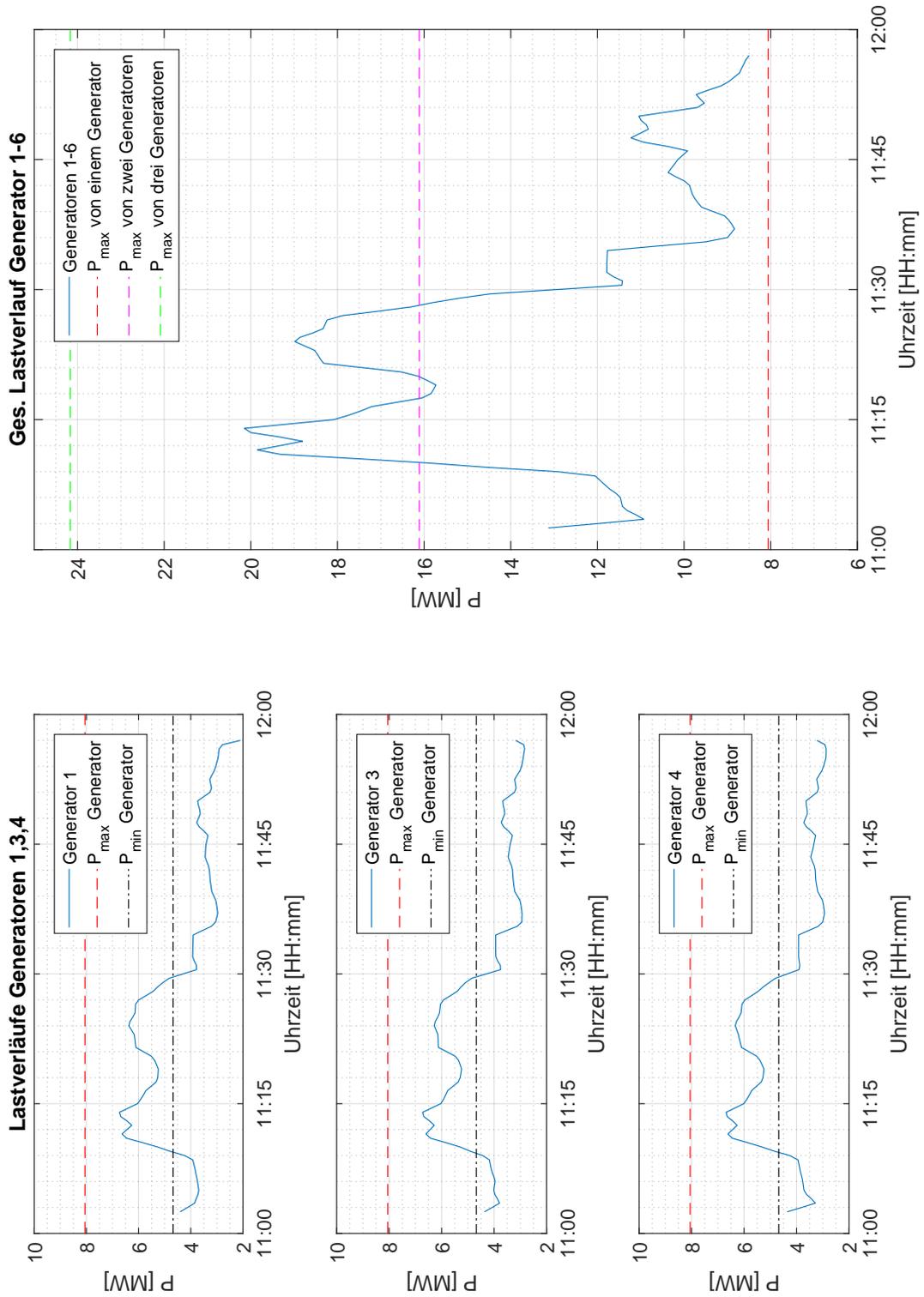


E.3. Übersicht der Daten von Schiff 3



E.4. Lastverläufe der Generatoren von Schiff 3 während des Manöverbetriebs 3

Lastverlauf Generatoren Schiff 3 Manoeverbetrieb 3 - 110230/020518-115700/020518



F. Datenblätter

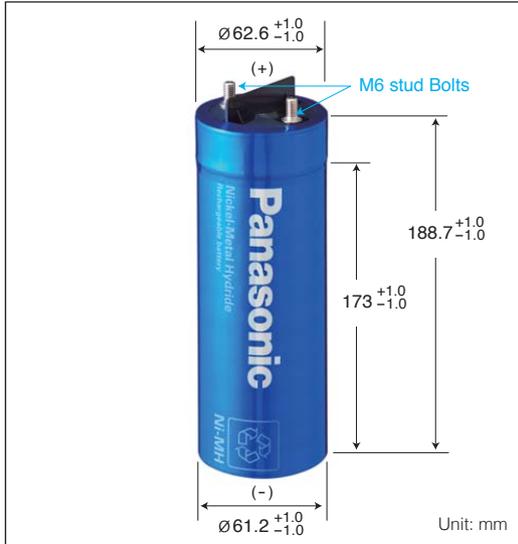
F.1. NiMH-Zelle BK-10V1S

Panasonic

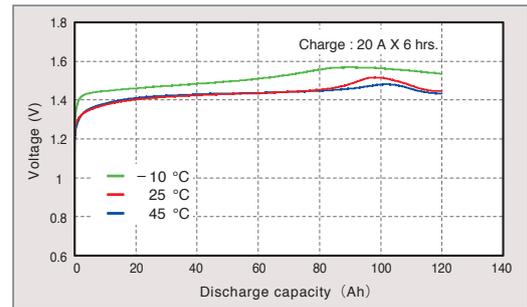
New
BK-10V1S
V size

Infrastructure type

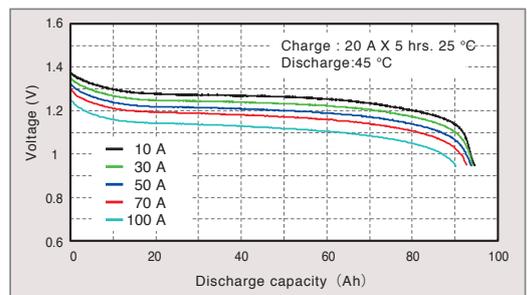
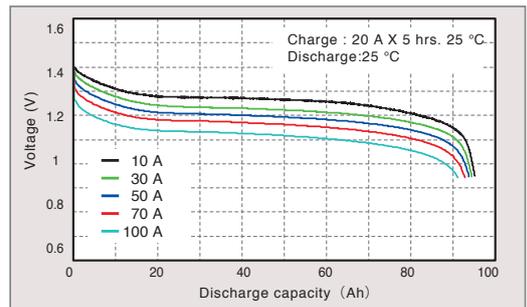
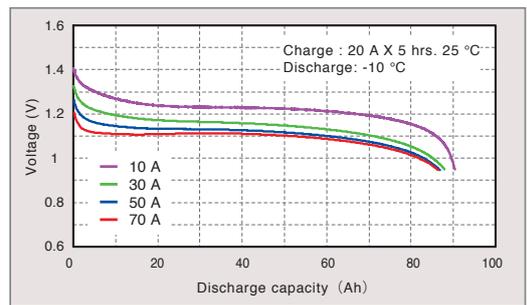
■ Dimensions (with Stud Bolts)



■ Typical charge characteristics



■ Typical discharge characteristics



■ Specifications

Diameter	62.6 +1.0 / -1.0 mm
Height	188.7 +1.0 / -1.0 mm
Approximate Weight	1,700 g

Nominal Voltage		1.2 V		
Discharge Capacity	Average ^{*1}	95 Ah		
	Rated (min.)	90 Ah		
Approx. Internal impedance at 1000Hz at charged state.		1.6 mΩ		
Charge	Standard	10 A X 12 hrs.		
	Rapid ^{*3}	20 A X 5 hrs.		
Ambient Temperature	Charge	Standard		
	Rapid	-20 °C to 55 °C		
Storage	Discharge		-20 °C to 60 °C	
	<1 year	-20 °C to 35 °C		
		<6 months	-20 °C to 45 °C	
			<12 hours	-20 °C to 55 °C

^{*1} After charging at 0.1 It for 16 hours, discharging at 0.2 It.
^{*2} For reference only.
^{*3} Need specially designed control system. Please contact Panasonic for details.

Battery performance and cycle life are strongly affected by how they are used. In order to maximize battery safety, please consult Panasonic when determining charge/discharge specs, warning label contents and unit design.

*The data in this document are for descriptive purposes only and are not intended to make or imply any guarantee or warranty.

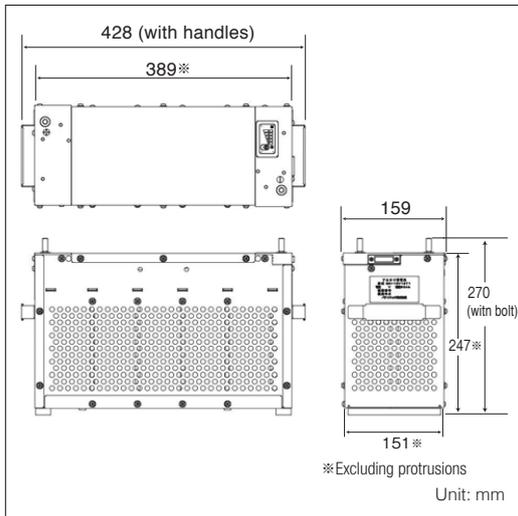
F.2. NiMH-Batteriepack BK-10V10T

Panasonic

New BK-10V10T	Old (HHR-10V10T)	Infrastructure type
-------------------------	---------------------	----------------------------



■ Dimensions



■ Main Specifications

Rated(battery pack)	12 V / 90 Ah
Discharge current	100 A
Operating temperature range	-20 °C to 60 °C
Dimensions(mm)	W: 428 x D: 159 x H: 270
Battery cell	BK-10V1S x 10
Volume	18.4 ℓ
Mass	23 kg
Display function	Remaining capacity

*Specifications subject to change.
*Handle, excluding protrusions.

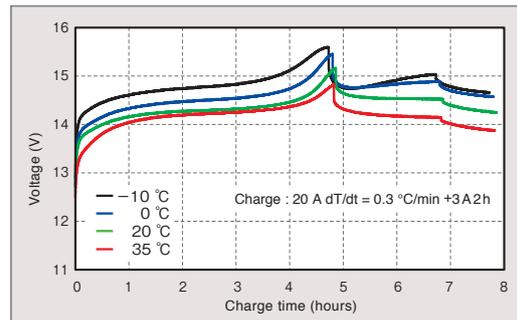
■ Exclusive battery charger

*Under battery charger development

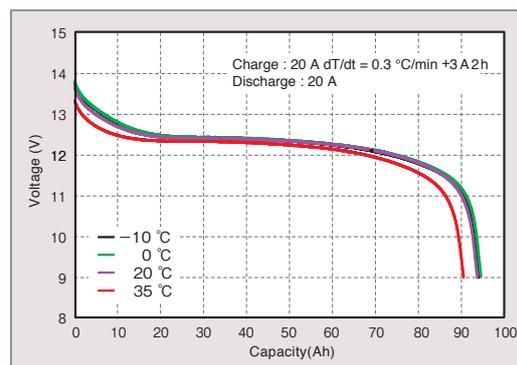
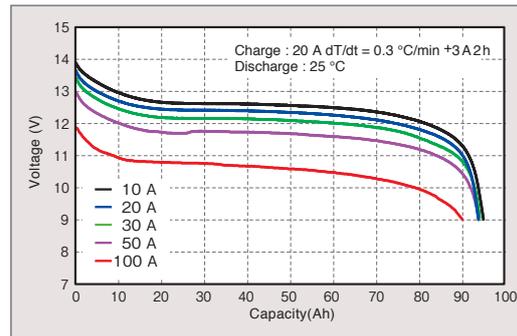
Battery performance and cycle life are strongly affected by how they are used. In order to maximize battery safety, please consult Panasonic when determining charge/discharge specs, warning label contents and unit design.

*The data in this document are for descriptive purposes only and are not intended to make or imply any guarantee or warranty.

■ Typical charge characteristics



■ Typical discharge characteristics



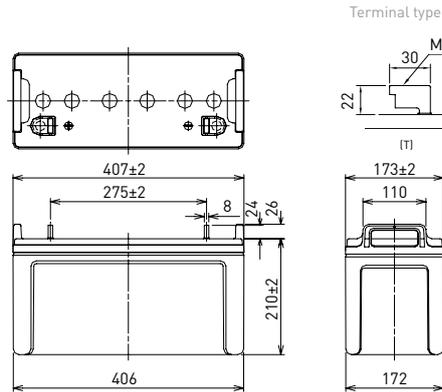
F.3. Blei-Batteriepack LC-QA12110TP

INDIVIDUAL DATA SHEETS

LC-QA12110TP

FOR STANDBY POWER SUPPLIES.
EXPECTED TRICKLE DESIGN LIFE: 15 YEARS AT 20°C.

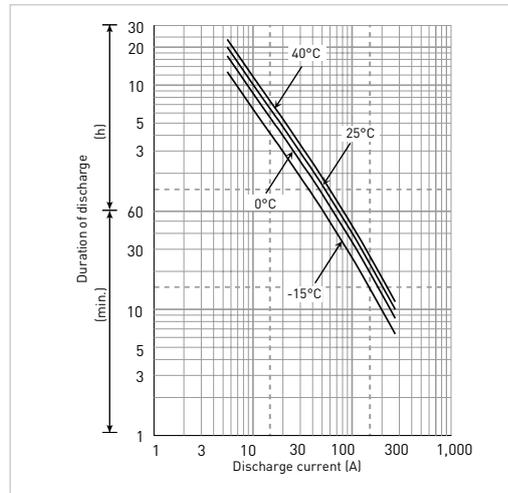
DIMENSIONS (MM)



Contents indicated (including the recycle marking, etc.) are subject to change without notice. Battery case resin: flame-retardant (UL94 V-0)

Specifications		LC-QA12110TP
Nominal voltage (V)		12
Nominal capacity	20 hours rate (Ah)	110
	Length (mm)	173
Dimensions	Width (mm)	407
	Total height (mm)	236
Approx. mass (kg)		36.0
Terminal type		M8 T-shape
Capacity (25°C)	20 hours rate (Ah)	110
	10 hours rate (Ah)	101
	3 hours rate (Ah)	86
	1 hour rate (Ah)	75
Impedance (mΩ)	Fully charged battery (25°C)	4
	Temperature dependency of capacity (%) – 20 hours rate	
	40°C	102
	25°C	100
	0°C	85
	-15°C	65
Remaining capacity (25°C)	After 3 months (%)	91
	After 6 months (%)	82
	After 12 months (%)	64

DURATION OF DISCHARGE VS. DISCHARGE CURRENT



WATT TABLE (25°C)

(Wattage/battery)

Cut-off	10min.	15min.	20min.	30min.	45min.	1h	1.5h	2h	3h	4h	5h	6h	10h	20h
9.6V	2,987	2,270	1,872	1,391	1,017	793	578	482	353	279	232	197	124	63.7
9.9V	2,920	2,215	1,827	1,358	995	772	563	469	346	273	225	192	120	63.2
10.2V	2,855	2,136	1,761	1,314	984	751	548	463	340	267	218	186	118	62.7
10.5V	2,764	2,110	1,748	1,303	968	730	532	453	334	264	215	185	117	62.1
10.8V	2,522	2,010	1,739	1,261	933	720	525	442	328	258	212	183	116	61.6

AMPERE TABLE (25°C)

(Ampere/battery)

Cut-off	10min.	15min.	20min.	30min.	45min.	1h	1.5h	2h	3h	4h	5h	6h	10h	20h
9.6V	272	212	175	133	96.7	76.7	53.6	43.2	30.2	23.3	19.7	16.1	10.4	5.50
9.9V	269	211	174	132	94.0	76.4	52.6	42.8	29.6	23.1	19.4	16.0	10.3	5.50
10.2V	268	210	172	130	93.5	75.9	52.1	42.3	29.4	22.9	19.1	15.9	10.2	5.50
10.5V	245	198	164	128	92.5	75.4	51.5	41.8	28.8	22.6	19.0	15.7	10.1	5.50
10.8V	232	192	160	126	79.9	65.4	46.4	39.7	28.1	22.3	18.9	15.5	10.0	5.39

All mentioned values are average values

INDIVIDUAL DATA SHEETS

LC-QA12110TP

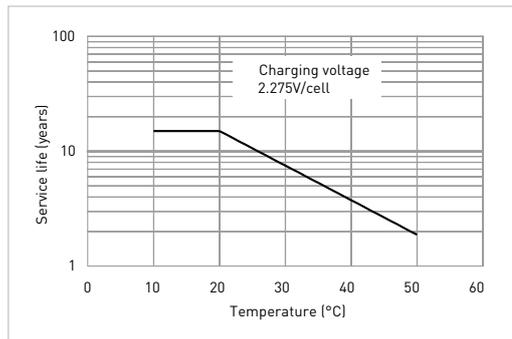
CHARGING METHOD (25°C)

Cycle use	Control voltage: 13.6V - 13.8V Initial current: 16.5A or smaller
------------------	---

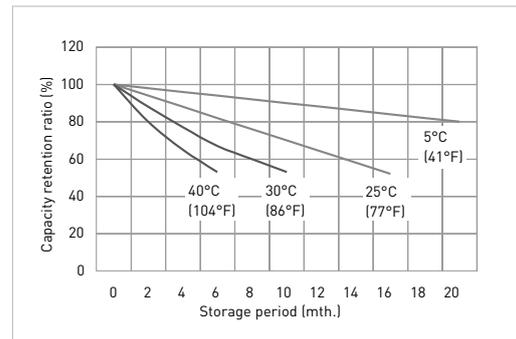
CUT-OFF VOLTAGE

Discharge current	5.50A - 22.0A	22.0A - 55.0A	55.0A - 110A	110A - 220A	220A - 330A
Cut-off voltage	10.5V	10.2V	9.9V	9.3V	8.7V

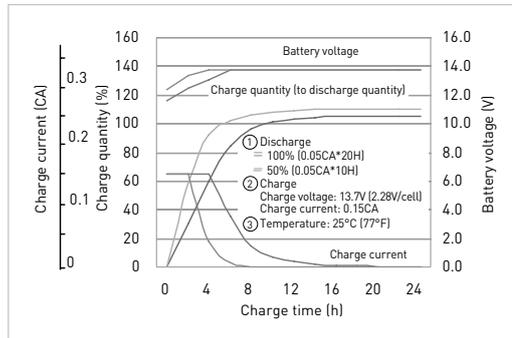
INFLUENCE OF TEMPERATURE ON TRICKLE LIFE



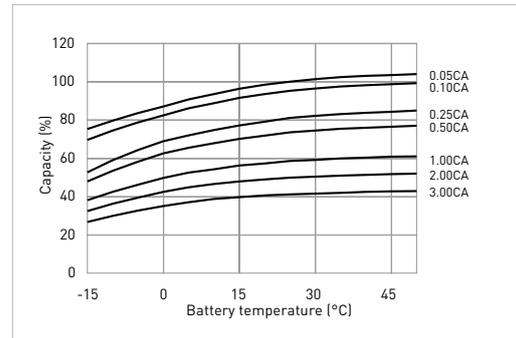
RESIDUAL CAPACITY TEST RESULT



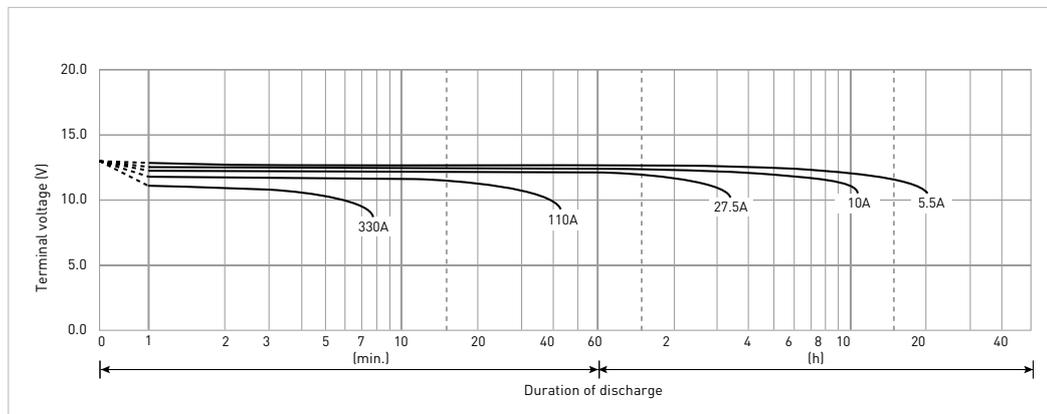
CONSTANT-VOLTAGE CONSTANT-CURRENT CHARGE CHARACTERISTICS FOR TRICKLE USE



DISCHARGE CAPACITY BY TEMPERATURE AND BY DISCHARGE CURRENT



DISCHARGE CHARACTERISTICS



The data in this document are for descriptive purposes only and are not intended to make or imply any guarantee or warranty. Regarding handling and safety please consult our VRLA technical handbook chapter 'Precautions for handling VRLA batteries'.

F.4. Li-Ionen-Zelle ANR26550M1-b

+ Nanophosphate[®] High Power Lithium Ion Cell ANR26650**M1-B**



A123's high-performance Nanophosphate[®] lithium iron phosphate (LiFePO₄) battery technology delivers high power and energy density combined with excellent safety performance and extensive life cycling in a lighter weight, more compact package. Our cells have low capacity loss and impedance growth over time as well as high usable energy over a wide state of charge (SOC) range, allowing our systems to meet end-of-life power and energy requirements with minimal pack oversizing.



APPLICATIONS

COMMERCIAL SOLUTIONS

Advanced lead acid replacement batteries for:

- + Datacenter UPS
- + Telecom backup
- + IT backup
- + Autonomously guided vehicles (AGVs)
- + Industrial robotics and material handling equipment
- + Medical devices

GOVERNMENT SOLUTIONS

- + Military vehicles
- + Military power grids
- + Soldier power
- + Directed energy

GRID SOLUTIONS

Versatile, flexible and proven storage solutions for the grid:

- + Frequency regulation
- + Renewables integration
- + Reserve capacity
- + Transmission and distribution

TRANSPORTATION SOLUTIONS

Hybrid, plug-in hybrid and electric vehicle battery systems for:

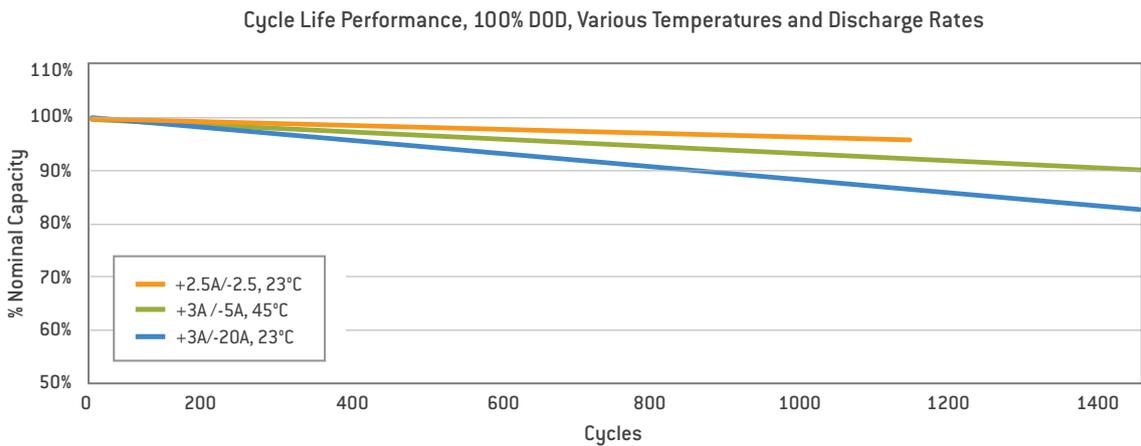
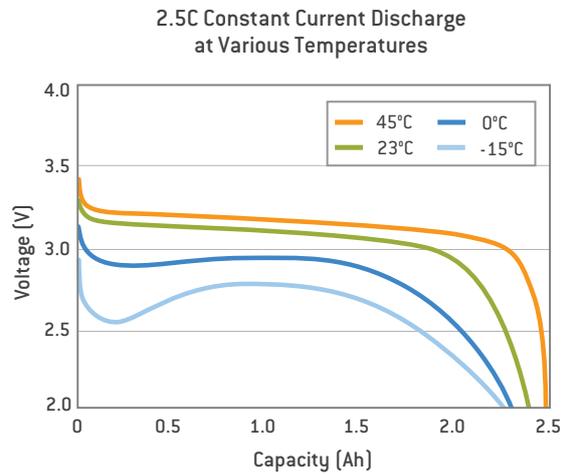
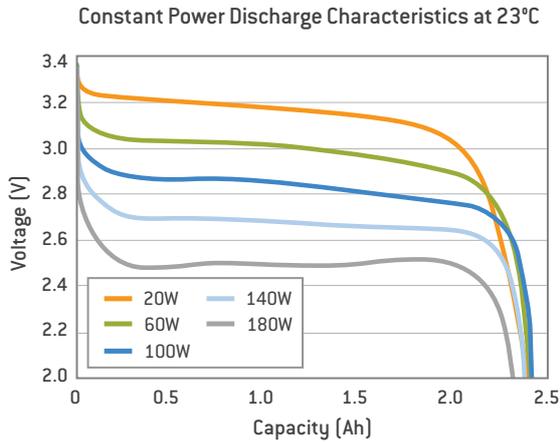
- + Commercial vehicles
- + Off-highway vehicles
- + Passenger vehicles

ANR26650**M1-B** TECHNICAL DATA

Cell Dimensions	ø26 x 65 mm
Cell Weight	76g
Cell Capacity (nominal/minimum) (0.5C Rate)	2.5/2.4 Ah
Voltage (nominal)	3.3V
Internal Impedance (1kHz AC typical)	6mΩ
Power*	2600 W/kg
Recommended Standard Charge Method	2.5A to 3.6V CCCV, 60 min
Recommended Fast Charge Method to 80% SOC	10A to 3.6V CC, 12 min
Maximum Continuous Discharge	50A
Maximum Pulse Discharge (10 seconds)	120A
Cycle Life at 20A Discharge, 100% DOD	>1,000 cycles
Operating Temperature	-30°C to 55°C
Storage Temperature	-40°C to 60°C

* -200W as measured by A123 modified HPPC Method @ 23°C, 50% SOC, 10 second discharge

+ Nanophosphate[®] High Power Lithium Ion Cell ANR26650M1-B



This document represents typical data. Performance may vary depending on use conditions and application. A123 Systems makes no warranty explicit or implied with this data sheet. Contents subject to change without notice.

CORPORATE HEADQUARTERS

A123 Systems, Inc.
200 West Street
Waltham, MA 02451

www.a123systems.com



©2012 A123 Systems, Inc. All rights reserved.
MD100113-02

G. Quellcode

G.1. Hauptprogramm von Schiff 3

Hauptprogramm - Auswertung Messdaten von Schiff 3

```

%% Auswertung Messdaten von Schiff 3

% Einlesen der Daten
filename = 'D:\Dropbox\Bachelorarbeit\7_Messdaten\2_Messdaten\Schiff3\gesamt.csv';
% Format der Daten in der .csv-Datei
formatSpec = '%{yyyy-MM-dd
HH:mm:ss)D%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f%f';
daten = readtable(filename,'Delimiter',';', ...
    'Format', formatSpec);

%% Daten zuordnen
datum = datenum(table2array(daten(:,1)));
fuel = table2array(daten(:,3:8));
powerGenerator = table2array(daten(:,9:14));
powerHVAC = table2array(daten(:,15:18));
powerProp = table2array(daten(:,19:21));
powerThruster = table2array(daten(:,22:24));
speed = table2array(daten(:,25:26));

%Gesamtleistung Generatoren/Thruster/HVAC/sonstige Schiffsleistung
for i = 1:length(powerGenerator)
    powerGenerator(i,7) = sum(powerGenerator(i,:));
    powerThruster(i,4) = sum(powerThruster(i,:));
    if powerThruster(i,4) > 0.84*3
        powerThruster(i,5) = powerThruster(i,4)-0.84*3;
    else
        powerThruster(i,5) = 0;
    end
    powerThruster(i,6) = powerThruster(i,4)-powerThruster(i,5);
    powerHVAC(i,5) = sum(powerHVAC(i,:));
    powerShip(i,1) = powerGenerator(i,7)-
    (powerThruster(i,4)+powerHVAC(i,5)+powerProp(i,1));

```

Seite 1 von 6

Hauptprogramm - Auswertung Messdaten von Schiff 3

```

end

%% Mittelwertbildung und Peakanalyse
% Durch auskommentieren den gewünschten Bereich auswählen

% Fahrmotoren - Bereich 1 und 2
% Bereich1
i=1;
b(1,1)=8099; b(1,2)=9836; % 19:29:30Uhr/03.05.18-09:58:00Uhr/04.05.18
b(i,1)=8099; b(i,2)=8215; b(i,3)=10.8; i=i+1; % 19:29:30-20:27:30Uhr/03.05.18
b(i,1)=8216; b(i,2)=8325; b(i,3)=10.9; i=i+1; % 20:28:00-21:22:30Uhr/03.05.18
b(i,1)=8326; b(i,2)=8701; b(i,3)=10.7; i=i+1; % 21:23:00Uhr/03.05.18-
00:30:30Uhr/04.05.18
b(i,1)=8706; b(i,2)=8819; b(i,3)=10.9; i=i+1; % 00:32:30-01:29:30Uhr/04.05.18
b(i,1)=8820; b(i,2)=9005; b(i,3)=10.8; i=i+1; % 01:30:00-03:02:30Uhr/04.05.18
b(i,1)=9008; b(i,2)=9217; b(i,3)=11.2; i=i+1; % 03:04:00-04:48:30Uhr/04.05.18
b(i,1)=9218; b(i,2)=9528; b(i,3)=11.1; i=i+1; % 04:49:00-07:24:00Uhr/04.05.18
b(i,1)=9534; b(i,2)=9622; b(i,3)=11.4; i=i+1; % 07:27:00-08:11:00Uhr/04.05.18
b(i,1)=9624; b(i,2)=9836; b(i,3)=11.5; i=i+1; % 08:12:00-09:58:00Uhr/04.05.18

% Bereich2
i=1;
b(1,1)=11367; b(1,2)=13277; %22:43:30Uhr/04.05.18-14:39:00Uhr/05.05.18
b(i,1)=11367; b(i,2)=11425; b(i,3)=15.0; i=i+1; % 22:43:30-23:12:30Uhr/04.05.18
b(i,1)=11427; b(i,2)=11625; b(i,3)=15.1; i=i+1; % 23:13:30Uhr/04.05.18-
00:53:00Uhr/05.05.18
b(i,1)=11629; b(i,2)=11932; b(i,3)=14.9; i=i+1; % 00:55:00-03:26:30Uhr/05.05.18
b(i,1)=11935; b(i,2)=11996; b(i,3)=15.0; i=i+1; % 03:28:00-03:58:30Uhr/05.05.18
b(i,1)=11997; b(i,2)=12164; b(i,3)=14.9; i=i+1; % 03:59:30-05:22:30Uhr/05.05.18
b(i,1)=12165; b(i,2)=12235; b(i,3)=14.8; i=i+1; % 05:23:00-05:58:00Uhr/05.05.18
b(i,1)=12237; b(i,2)=12360; b(i,3)=14.9; i=i+1; % 05:59:00-07:00:30Uhr/05.05.18
b(i,1)=12363; b(i,2)=12394; b(i,3)=14.8; i=i+1; % 07:02:00-07:17:30Uhr/05.05.18

```

Seite 2 von 6

Hauptprogramm - Auswertung Messdaten von Schiff 3

```

b(i,1)=12395; b(i,2)=12530; b(i,3)=15.2; i=i+1; % 07:18:00-08:25:30Uhr/05.05.18
b(i,1)=12533; b(i,2)=12583; b(i,3)=15.1; i=i+1; % 08:27:00-08:52:00Uhr/05.05.18
b(i,1)=12585; b(i,2)=12672; b(i,3)=15.2; i=i+1; % 08:53:00-09:36:30Uhr/05.05.18
b(i,1)=12675; b(i,2)=12741; b(i,3)=15.1; i=i+1; % 09:38:00-10:11:00Uhr/05.05.18
b(i,1)=12744; b(i,2)=12754; b(i,3)=15.2; i=i+1; % 10:12:30-10:17:30Uhr/05.05.18
b(i,1)=12757; b(i,2)=12770; b(i,3)=15.3; i=i+1; % 10:19:00-10:25:30Uhr/05.05.18
b(i,1)=12771; b(i,2)=13118; b(i,3)=15.4; i=i+1; % 10:26:00-13:19:30Uhr/05.05.18
b(i,1)=13121; b(i,2)=13169; b(i,3)=15.2; i=i+1; % 13:21:00-13:45:00Uhr/05.05.18
b(i,1)=13172; b(i,2)=13277; b(i,3)=15.1; i=i+1; % 13:46:30-14:39:00Uhr/05.05.18

% Manöverbetrieb
i=1;
b(i,1)=1309; b(i,2)=1464; i=i+1; % Betrieb1 - Einlaufen1
b(i,1)=2515; b(i,2)=2577; i=i+1; % Betrieb2 - Auslaufen1
b(i,1)=4206; b(i,2)=4315; i=i+1; % Betrieb3 - Einlaufen2
b(i,1)=5427; b(i,2)=5480; i=i+1; % Betrieb4 - Auslaufen2
b(i,1)=7060; b(i,2)=7179; i=i+1; % Betrieb5 - Einlaufen3
b(i,1)=8021; b(i,2)=8069; i=i+1; % Betrieb6 - Auslaufen3
b(i,1)=10279; b(i,2)=10342; i=i+1; % Betrieb7 - Einlaufen4
b(i,1)=11228; b(i,2)=11280; i=i+1; % Betrieb8 - Auslaufen4
b(i,1)=15577; b(i,2)=15769; i=i+1; % Betrieb9 - Einlaufen5
b(i,1)=16794; b(i,2)=16897; i=i+1; % Betrieb10 - Auslaufen5
b(i,1)=1; b(i,2)=20158; i=i+1; % gesamte Daten

% Liegezeiten
i=1;
b(i,1)=4319; b(i,2)=5424; i=i+1; % Liegezeit 1
b(i,1)=10349; b(i,2)=11227; i=i+1; % Liegezeit 2

%% Berechnung der Manöverbetriebe/Thruster
% Bereichsauswahl des jeweiligen Manövers, Liegezeit oder der mittleren
% Leistung der Bereiche

```

Seite 3 von 6

Hauptprogramm - Auswertung Messdaten von Schiff 3

```

betrieb = 1;

a = b(bereich,1):b(bereich,2); % Übergabevariable für die Funktion
datumArea = (datum(a,1)); % Übergabevariable für die Funktion

% Berechnung der Lastschwankungen um die mittlere Leistung des jeweiligen
% ausgeählten Bereichs
if length(b(:,1)) > 1
    power = powerProp(a,2);
    for i = 1:length(a)
        PeakSchwankungen(1,i) = power(i)-b(bereich,3);
    end
    [KapBat,LeistungsdatenAuswertung] =
    BerechnungPeaks30sec(datumArea,PeakSchwankungen);
end

% Berechnung der Auslastung und des zeitlichen Anteils der Generatoren
[GeneratorTable] = BerechnungGeneratoren(powerGenerator);

% Thrusterleistung
BerechnungThruster(datum,powerThruster,b,betrieb)

%% Thruster
[KapBatThruster,LeistungsdatenAuswertungThruster] =
    BerechnungPeaks30sec(datum(:,1),powerThruster(:,4));
titel = ['Leistungsdaten_Schiff3_powerThruster_gesamt' '.xlsx'];
writetable(LeistungsdatenAuswertungThruster,titel,'WriteRowNames',true)
%% Leistungsdaten in Excel-File schreiben
titell = ['Leistungsdaten_Schiff3_powerPropPS_Teil' int2str(bereich) '_']
datestr(table2array(daten(b(bereich,1),1)), 'HHMMSS_ddmmyy-')
datestr(table2array(daten(b(bereich,2),1)), 'HHMMSS_ddmmyy') '.xlsx'];

```

Seite 4 von 6

Hauptprogramm - Auswertung Messdaten von Schiff 3

```

    titel2 = ['Leistung Antrieb PS Schiff 3 - '
datestr(table2array(daten(b(bereich,1),1)), 'HH:MM:SS/dd-mm-yy') ' - '
datestr(table2array(daten(b(bereich,2),1)), 'HH:MM:SS/dd-mm-yy')]];
    titel3 = ['Leistungsdaten_Schiff3_powerPropPS_Teil' int2str(bereich) '_']
datestr(table2array(daten(b(bereich,1),1)), 'HHMMSS_ddmmyy-')
datestr(table2array(daten(b(bereich,2),1)), 'HHMMSS_ddmmyy-')]];
    titel4 = ['Leistungsdaten_Schiff3_powerPropPS_Teil' int2str(bereich) '_mitKap_']
datestr(table2array(daten(b(bereich,1),1)), 'HHMMSS_ddmmyy-')
datestr(table2array(daten(b(bereich,2),1)), 'HHMMSS_ddmmyy-')]];
    titel5 = ['Leistungsdaten_Schiff3_Generatoren' '.xls*'];

writetable(LeistungsdatenAuswertung,titel1,'WriteRowNames',true)
writetable(GeneratorTable,titel5,'WriteRowNames',true)

%% Plotten
% Peak Schwankungen um mittlere Leistung
plottenSubplot2_var2 (datumArea,power,b(bereich,3),titel3,titel2,PeakSchwankungen);

% Uebersicht der Daten des gesamten Zeitraums des Datensatzes

plotLeistungKomplettSchiff3(datum,powerGenerator,powerHVAC,powerProp,speed,powerThruster)

% Lastverlaeufe der sechs Generatoren für den gesamten Zeitraum des
% Datensatzes
PlotLastverlaufGeneratoren(datum(:,1),powerGenerator(:,1:6))

% Lastverlauf der Generatoren und Thruster

PlotLastverlaufGeneratorenThruster(datum(:,1),powerGenerator(:,1:6),powerThruster(:,4))

```

Seite 5 von 6

Hauptprogramm - Auswertung Messdaten von Schiff 3

```

% Lastverlauf der Generatoren und Schiffsgeschwindigkeit
PlotLastverlaufGeneratorenSpeed(datum(:,1),powerGenerator(:,1:6),speed(:,1))

% Gesamte Lastverteilung des Schiffes

BerechnungPlotLasterteilungGes(datum,powerProp,powerHVAC,powerThruster,powerShip,powerGenerator,b,betrieb)

% Plot des gesamten Lastverlaufs der Fahrmotoren von Bereich 1 oder 2
% (entsprechend Auswahl)
hold on
plot(datum(b(1,1):b(length(b(:,1)),2),1),powerProp(b(1,1):b(length(b(:,1)),2),2))%,datum(a,:),speed(a,1))
datetick('x',15)
grid on
grid minor
for i = 1:length(b(:,1))
    line([datum(b(i,1),1),datum(b(i,2),1)], [b(i,3),b(i,3)], 'Color','r', 'LineStyle','-', 'LineWidth',1.5)
end
legend('Leistung Motor PS', 'mittlere Leistung')
title('Leistung Antrieb PS Schiff 3 Bereich 1 - 19:29:30Uhr/03.05.18-09:58:00Uhr/04.05.18')
ylabel('Leistung [MW]')
xlabel('Zeit [HH:MM]')
set(gcf, 'PaperOrientation', 'Landscape', 'PaperPositionMode', 'auto')
hold off

```

Seite 6 von 6

G.2. Programm zur Berechnung der Lastschwankungen

Berechnung der Lastschwankungen

```
% Berechnung der Lastschwankungen

function [sumPeakPowerTime,LeistungsdatenTable] =
BerechnungPeaks30sec(datumArea,PeakSchwankungen)
%% Funktion
fun = @(x,m,b) m.*x+b; %Lineare Funktion

%% Berechnung der Peaks - Steigung, Fläche, Zeit
%x = 0:1:length(datumArea)-1;
x = 0:0.5:(length(datumArea)/2)-0.5;
j = 1; %Laufvariable für das Flächenarray
t = 0; % Variable für die Peakdauer
k = 1; % Variable für den Zeitstempel der KapBat
for i = 1:1:(length(PeakSchwankungen)-1)
    if i == length(x)% | k == length(datumArea)
        PeakPower(j,i) = 0;
        PeakTime(j,i) = 0;
    elseif PeakSchwankungen(1,i) == 0 && PeakSchwankungen(1,i+1) == 0
        if i > 1 && PeakSchwankungen(1,i-1) ~= 0
            j = j+1;
        end
        PeakTime(j,i) = 0.5;
        PeakPower(j,i) = 0;
    elseif (PeakSchwankungen(1,i) >= 0 && PeakSchwankungen(1,i+1) > 0) ||
(PeakSchwankungen(1,i) > 0 && PeakSchwankungen(1,i+1) >= 0)
        if PeakSchwankungen(1,i) == 0
            j = j+1;
        end
        m = (PeakSchwankungen(i+1)-PeakSchwankungen(i))/(x(i+1)-x(i)); %Steigung
    berechnen
        b = PeakSchwankungen(i)-m*x(i); %Schnittpunkt y-Achse
    bestimmen
```

Seite 1 von 6

Berechnung der Lastschwankungen

```
PeakPower(j,i) = integral(@(x) fun(x,m,b),x(1,i),x(1,i+1))/60;
t = t+(x(i+1)-x(i)); %Erhöhung um lmin
k = k +1;
if m > 0
    Steigung(1,i) = m*60;
    Steigung(2,i) = 30;
end
PeakTime(j,i) = 0.5; %Speicherung Peakzeit
elseif (PeakSchwankungen(1,i) <= 0 && PeakSchwankungen(1,i+1) < 0) ||
(PeakSchwankungen(1,i) < 0 && PeakSchwankungen(1,i+1) <= 0)
    if PeakSchwankungen(1,i) == 0
        j = j+1;
    end
    m = (PeakSchwankungen(i+1)-PeakSchwankungen(i))/(x(i+1)-x(i)); %Steigung
    berechnen
    b = PeakSchwankungen(i)-m*x(i); %Schnittpunkt y-Achse
    bestimmen
PeakPower(j,i) = integral(@(x) fun(x,m,b),x(1,i),x(1,i+1))/60;
t = t+(x(i+1)-x(i)); %Erhöhung um 0.5min
k = k +1;
if m < 0
    Steigung(3,i) = m*60;
    Steigung(4,i) = 30;
end
PeakTime(j,i) = 0.5; %Speicherung Peakzeit
elseif PeakSchwankungen(1,i) > 0 && PeakSchwankungen(1,i+1) < 0 %Peak Batterie
Entladen
    m = (PeakSchwankungen(i+1)-PeakSchwankungen(i))/(x(i+1)-x(i)); %Steigung
    berechnen
    b = PeakSchwankungen(i)-m*x(i); %Schnittpunkt y-Achse
    bestimmen
```

Seite 2 von 6

Berechnung der Lastschwankungen

```

        x0 = -(PeakSchwankungen(1,i)/(m))+x(1,i);           %Schnittpunkt x-Achse
    bestimmen
        t = t+(x0-x(i)); %Erhöhung um Zeit bis zur Nullstelle
        PeakPower(j,i) = integral(@(x) fun(x,m,b),x(1,i),x0)/60;
        PeakTime(j,i) = (x0-x(i));                       %Speicherung Peakzeit
        j = j+1;
        k = k+1;
        t=0;
        t = t+(x(i+1)-x0);                               %Erhöhung um Zeit ab Nullstelle
        PeakTime(j,i) = (x(i+1)-x0);                   %Speicherung Peakzeit
        Steigung(3,i) = m*60;
        Steigung(4,i) = t*60;
        PeakPower(j,i) = integral(@(x) fun(x,m,b),x0,x(i+1))/60;
    elseif PeakSchwankungen(1,i) < 0 && PeakSchwankungen(1,i+1) > 0 %Peak Batterie
    Laden
        m = (PeakSchwankungen(i+1)-PeakSchwankungen(i))/(x(i+1)-x(i)); %Steigung
    berechnen
        b = PeakSchwankungen(i)-m*x(i);                 %Schnittpunkt y-Achse
    bestimmen
        x0 = -(PeakSchwankungen(1,i)/(m))+x(1,i);           %Schnittpunkt x-Achse
    bestimmen
        PeakPower(j,i) = integral(@(x) fun(x,m,b),x(1,i),x0)/60;
        t = t+(x0-x(i));                               %Erhöhung um Zeit bis zur
    Nullstelle
        PeakTime(j,i) = (x0-x(i));                       %Speicherung Peakzeit
        j = j+1;
        k = k+1;
        t=0;
        t = t+(x(i+1)-x0);                               %Erhöhung um Zeit bis zur
    Nullstelle
        Steigung(1,i) = m*60;

```

Seite 3 von 6

Berechnung der Lastschwankungen

```

        Steigung(2,i) = t*60;
        PeakTime(j,i) = (x(i+1)-x0);                   %Speicherung Peakzeit
        PeakPower(j,i) = integral(@(x) fun(x,m,b),x0,x(i+1))/60;
    end
end
%% Berechnung der Summe der Flächen jedes einzelnen Peaks inkl. Minuten
k = 1;
j = 1;
l = 1;
for i = 1:length(PeakPower(:,1))
    if sum(PeakPower(i,:)) > 0
        sumPeakPowerTime(1,k) = (sum(PeakPower(i,:))); % kWh des Peaks
        sumPeakPowerTime(2,k) = sum(PeakTime(i,:));    % Dauer des Peaks
        k = k+1;
    elseif sum(PeakPower(i,:)) < 0
        sumPeakPowerTime(3,j) = (sum(PeakPower(i,:))); % kWh des Peaks
        sumPeakPowerTime(4,j) = sum(PeakTime(i,:));    % Dauer des Peaks
        j = j+1;
    else
        sumPeakPowerTime(5,l) = sum(PeakTime(i,:));    % Dauer des Peaks
        l = l+1;
    end
end
%% Berechnung Batteriekapazität
for i = 1:length(PeakPower)+1
    if i == 1
        sumPeakPowerTime(6,i) = 0;
        sumPeakPowerTime(7,i) = 0;
        sumPeakPowerTime(8,i) = 0;
    else
        sumPeakPowerTime(6,i) = sumPeakPowerTime(6,i-1)+max(PeakPower(:,i-1));
    end
end

```

Seite 4 von 6

Berechnung der Lastschwankungen

```

        sumPeakPowerTime(7,i) = sumPeakPowerTime(7,i-1)+min(PeakPower(:,i-1));
        sumPeakPowerTime(8,i) = sumPeakPowerTime(6,i)+sumPeakPowerTime(7,i);
    end
end

%% Informationen zum Fahrprofilausschnitts
% Entladeprozess
Leistungsdaten(1,1) = length(find(sumPeakPowerTime(1,:))); % abs. Anzahl
Entladevorgänge
Leistungsdaten(1,2) = sum(sumPeakPowerTime(1,:))*1000; % ges. Entladeenergie [kWh]
Leistungsdaten(1,3) = sum(sumPeakPowerTime(2,:))/60; % ges. Entladezeit [h]
Leistungsdaten(1,4) = (Leistungsdaten(1,3)*3600)/Leistungsdaten(1,1); % durchs. Peak
Dauer [s]
Leistungsdaten(1,5) = Leistungsdaten(1,2)/Leistungsdaten(1,1); % durchs. Peak Energie
[kWh]
Leistungsdaten(1,6) = Leistungsdaten(1,2)/Leistungsdaten(1,3); % durchs. Leistung
[kW]
Leistungsdaten(1,7) = max(PeakSchwankungen)*1000; % max. Leistung [kW]
if sum(Steigung(1,:)) > 0
Leistungsdaten(1,8) = sum(Steigung(1,:))/length(find(Steigung(1,:)))*1000;% durchs.
Anstiegsgeschwindigkeit [kW/h]
Leistungsdaten(1,9) = sum(Steigung(2,:))/length(find(Steigung(2,:)))*1000;% durchs. Dauer
Anstiegsgeschwindigkeit [s]
Leistungsdaten(1,10) = max(Steigung(1,:))*1000; % max. Anstiegsgeschwindigkeit [kW/h]
else
    Leistungsdaten(1,8) = 0;
    Leistungsdaten(1,9) = 0;
    Leistungsdaten(1,10) = 0;
end
% Ladeprozess
Leistungsdaten(2,1) = length(find(sumPeakPowerTime(3,:))); % abs. Anzahl
Entladevorgänge

```

Seite 5 von 6

Berechnung der Lastschwankungen

```

Leistungsdaten(2,2) = sum(sumPeakPowerTime(3,:))*1000; % ges. Ladeenergie [kW]
Leistungsdaten(2,3) = sum(sumPeakPowerTime(4,:))/60; % ges. Entladezeit [h]
Leistungsdaten(2,4) = (Leistungsdaten(2,3)*3600)/Leistungsdaten(2,1); % durchs. Peak
Dauer [s]
Leistungsdaten(2,5) = Leistungsdaten(2,2)/Leistungsdaten(2,1); % durchs. Peak Energie
[kWh]
Leistungsdaten(2,6) = Leistungsdaten(2,2)/Leistungsdaten(2,3); % durchs. Leistung
[kW]
Leistungsdaten(2,7) = min(PeakSchwankungen)*1000; % max. Leistung [kW]
if length(Steigung(:,1)) > 2
    Leistungsdaten(2,8) = sum(Steigung(3,:))/length(find(Steigung(3,:)))*1000;%
durchs. Anstiegsgeschwindigkeit [kW/h]
    Leistungsdaten(2,9) = sum(Steigung(4,:))/length(find(Steigung(4,:)))*1000;% durchs.
Dauer Anstiegsgeschwindigkeit [s]
    Leistungsdaten(2,10) = min(Steigung(3,:))*1000; % max. Anstiegsgeschwindigkeit
[kW/h]
else
    Leistungsdaten(2,8) = 0;
    Leistungsdaten(2,9) = 0;
    Leistungsdaten(2,10) = 0;
end

% Tabelle erstellen
LeistungsdatenTable = array2table(Leistungsdaten,...

'RowNames',{'Entladevorgang','Ladevorgang'},'VariableNames',{'absAnzahlEntladevorgaen
ge','gesLadeenergie_kWh','gesEntladezeit_h','durchsPeakDauer_s','durchsPeakEnergie_kW
h','durchsLeistung_kW','maxLeistung_kW','durchsAnstiegsgeschwindigkeit_kWh','durchsD
auerAnstiegsgeschwindigkeit_s','max_Anstiegsgeschwindigkeit_kWh'});

```

Seite 6 von 6

Versicherung über die Selbstständigkeit

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit im Sinne der Prüfungsordnung nach §16(5) APSO-TI-BM ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen habe ich unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Hamburg, 29. August 2018

Ort, Datum

Unterschrift