

Elektrizität an Bord

(und in anderen Fällen, wenn kein Netzanschluß verfügbar ist)

Version 9
November 2012

Elektrizität spielt eine immer größere Rolle an Bord von Yachten. Moderne Navigations- und Kommunikationsgeräte sind davon abhängig, aber auch die Nutzung der gewohnten Haushaltsgeräte an Bord nimmt immer mehr zu.

Mit dieser Veröffentlichung sollen zwei Ziele erreicht werden:

Zum einen möchte ich einige Themen behandeln über die vielfach Unklarheiten bestehen: hier geht es beispielweise um das Laden von Batterien oder um den Stromverbrauch der Geräte an Bord.

Zum anderen will ich Entwurfsingenieuren, Elektrikern aber auch den Eignern Richtlinien an die Hand geben, die helfen können das Interesse und das Verständnis für Elektrizität an Bord zu verbessern. Verschiedene neue Entwicklungen und Produkte ermöglichen einen vielfältigeren und erweiterten Umgang mit Strom an Bord, der sowohl die Sicherheit als auch den Komfort deutlich erhöhen kann.

Reinout Vader

Copyright © 2000 Victron Energy B.V.

Alle Rechten vorbehalten

Es ist nicht gestattet diese Veröffentlichung ganz oder in Teilen daraus in irgendeiner Form, durch irgendeine Methode oder zu irgendeinem Zweck zu vervielfältigen.

VICTRON ENERGY B.V. MAKES NO WARRANTY, EITHER EXPRESSED OR IMPLIED, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, REGARDING VICTRON ENERGIE PRODUCTS AND MAKES SUCH VICTRON ENERGY PRODUCTS AVAILABLE SOLELY ON AN “AS-IS” BASIS.

IN NO EVENT SHALL VICTRON ENERGY B.V. BE LIABLE TO ANYONE FOR SPECIAL, COLLATERAL, INCIDENTAL, OR CONSEQUENTIAL DAMAGES IN CONNECTION WITH OR ARISING OUT OF PURCHASE OR USE OF VICTRON ENERGIE PRODUCTS. THE SOLE AND EXCLUSIVE LIABILITY TO VICTRON ENERGY B.V., REGARDLESS OF THE FORM OF ACTION, SHALL NOT EXCEED THE PURCHASE PRICE OF THE VICTRON ENERGY PRODUCTS DESCRIBED HEREIN.

For conditions of use and permission to use this book for publication in other than the Dutch language, contact Victron Energy B.V.

Victron Energy B.V. reserves the right to revise and improve its products as it sees fit.

Victron Energy B.V.

De Paal 35
1351 JG Almere-Haven

P.O. Box 50016
1305 AA Almere-Haven

Tel : +31 (0)36 535 97 00

Fax : +31 (0)36 535 97 40

E-mail : sales@victronenergy.com

Website : www.victronenergy.com

Elektrizität an Bord

(und in anderen Fällen, wenn kein Netzanschluß verfügbar ist)

Inhaltsverzeichnis

1. EINLEITUNG

2. DIE BATTERIE: MAßNAHMEN GEGEN FRÜHZEITIGE ALTERUNG

Die Batterie ist das Herz eines jeden kleinen Energiesystems. Ohne Batterie kann keine elektrische Energie gespeichert werden. Sie ist außerdem teuer und sie reagiert empfindlich auf falsche Behandlung. Dieses Kapitel behandelt insbesondere den letztgenannten Aspekt.

2.1 Einleitung

2.2 Die Chemie der Batterie

- 2.2.1 Was geschieht in der Zelle während der Entladung?
- 2.2.2 Was passiert während des Ladevorganges?
- 2.2.3 Der Diffusionsprozeß
- 2.2.4 Die Lebensdauer: Masseverlust, Korrosion, Sulfatierung

2.3 Die wesentlichen Schwefelsäure-Batterien

- 2.3.1 Bleiantimon und Bleikalzium
- 2.3.2 Bleisilber Technologie
- 2.3.3 Offene und geschlossene Batterien
- 2.3.4 Die Starterbatterie mit Platten (naß)
- 2.3.5 Die Platten Semi-Traktions-Batterie (naß)
- 2.3.6 Die Traktions- Batterie (naß)
- 2.3.7 Die geschlossene (VLRA) Gel-Batterie
- 2.3.8 Die geschlossene (VLRA) AGM-Batterie
- 2.3.8 Die geschlossene (VLRA) Rundzellen-Batterie

2.4 Funktion und Nutzung der Batterien

2.5 Der Blei-Säure-Batterie im praktischen Betrieb

- 2.5.1 Was kostet die Batterie
- 2.5.2 Abmessungen und Gewichte
- 2.5.3 Der Einfluß der Entladezeit auf die nutzbare Kapazität
- 2.5.4 Kapazität und Temperatur
- 2.5.5 Vorzeitige Alterung 1. Tiefentladung einer Batterie
- 2.5.6 Vorzeitige Alterung 2. Schnellladung und unvollständiges Laden
- 2.5.7 Vorzeitige Alterung 3. Zu geringe Ladung
- 2.5.8 Vorzeitige Alterung 4. Überladung
- 2.5.9 Vorzeitige Alterung 5. Temperatur
- 2.5.10 Selbstentladung

3. ÜBERWACHUNG DES LADEZUSTANDES: DER BATTERIE-MONITOR

Der Batteriemonitor gibt Auskunft über den Ladezustand der Batterie. Er kann auch zum automatischen Start des Ladevorganges oder zur Anzeige der Notwendigkeit des Ladens benutzt werden. Bei größeren Batteriesystemen, die aus mehreren Batterien bestehen, ist ein Monitor mit Amperestunden Anzeige unentbehrlich. Wenn erst dann, wenn die Spannung abgesunken ist, mit dem Laden begonnen wird ist es oft schon zu spät: die Batterie wurde dann zu tief entladen und hat irreversiblen Schaden genommen.

3.1 Verschiedene Methoden zur Überwachung des Ladezustandes

- 3.1.1 Das spezifische Gewicht der Elektrolytlösung
- 3.1.2 Die Batteriespannung
- 3.1.3 Der Amperestunden (Ah) Zähler

3.2 Der Batterie-Monitor als Amperestunden Zähler

- 3.3 Die verfügbare Leistung einer Batterie
- 3.4 Der verfügbare Strom einer Batterie
- 3.5 Der Einfluß des Entladestroms auf die Kapazität
- 3.6 Führt ein hoher Entladestrom zu Kapazitätsverlust?
- 3.7 Weitere nützliche Eigenschaften des Batteriemonitors
 - 3.7.1 Anzeige besonderer Ereignisse
 - 3.7.2 Datenregistrierung

4. DAS LADEN VON BATTERIEN: DIE THEORIE

Unterschiedliche Batterietypen müssen mit entsprechend unterschiedlichen Methoden geladen werden. In diesem Kapitel werden die optimalen Ladekennlinien der gebräuchlichsten Blei-Säure-Batterien vorgestellt.

- 4.1 Einleitung
- 4.2 Laden in drei Stufen (I U₀ U)
 - 4.2.1 Konstantstromphase
 - 4.2.2 Konstantspannungsphase
 - 4.2.3 Erhaltungsladung
- 4.3 Ausgleichsladung
- 4.4 Temperaturkompensation
- 4.5 Übersicht
- 4.6 Zusammenfassung: wie soll die Batterie geladen werden?
 - 4.6.1 Die Bordnetzatterie
 - 4.6.2 Die Starteratterie
 - 4.6.3 Die Bugschraubenatterie

5. LADEN VON BATTERIEN MIT LICHTMASCHINE ODER MIT LADEGERÄT

Die Lichtmaschine mit dem Standard-Regler, wie er im Fahrzeugbau gebraucht wird, ist mit Sicherheit nicht die beste Lösung, insbesondere dann nicht, wenn es um das Laden mehrerer durch Dioden-Isolatoren getrennte Batterien geht.

- 5.1 Die Lichtmaschine
- 5.2 Die Ladung mehrerer Batterien mit einer Lichtmaschine
 - 5.2.1 Einleitung
 - 5.2.2 Problemstellung
 - 5.2.3 Verschiedene Lösungsmöglichkeiten
 - 5.2.1.1 Einfach und preiswert: Mikroprozessor gesteuerte Trennung
 - 5.2.1.2 Erhöhung der Spannung der Lichtmaschine
 - 5.2.1.3 Mehrstufenregler mit Temperatur- und Spannungskompensation
 - 5.2.1.4 Die Starter-Batterie
 - 5.2.1.5 Der Bugschrauben- Batterie
- 5.3 Batterieladegeräte: Vom Wechselstrom zum Gleichstrom
 - 5.3.1 Einleitung
 - 5.3.2 Optimales Laden mit dem Ladegerät
 - 5.2.2 Gleichzeitiges Laden mehrerer Batterien
 - 5.2.2.1 Gleichzeitiges Laden mehrerer Batterien mit einem Ladegerät
 - 5.2.2.2 Getrennte Lader je Batterie - Gruppe
 - 5.2.2.3 Mikroprozessor gesteuerte Batterietrennung

6. ELEKTRISCHE GERÄTE UND STROMVERBRAUCH

Der tägliche Energiebedarf durchlaufender Verbraucher (Instrumente, Kühlschrank, Gefrierbox) wird oft unterschätzt, während demgegenüber der Verbrauch kurzzeitig betriebener „Großverbraucher“ (Elektro-Winschen, Bugstrahler, Waschmaschine, Kochplatten) oft überschätzt wird.

6.1 Einleitung

6.2 Leistung und Energie

6.3 Kühlung

- 6.3.6 Einleitung
- 7.3.7 Theorie der Wärmepumpe
- 8.3.8 Kühlschrank und Gefrierbox in der Praxis
- 9.3.9 Klima-Anlage

6.4 Elektro-Winschen, Ankerwinde und Bugstrahler

6.5 Waschen und Abwaschen mit Batteriestrom?

6.6 Elektrisch Kochen wird möglich

6.7 Der Tauchkompressor

6.8 Wie behandelt man die Anlaufströme von Wechselstrom-Motoren?

6.9 Zusammenfassung und Ergebnis

7. GENERATOREN

7.1 Dieselmotor mit 50 Hz bzw. 60 Hz Wechselstromgenerator

- 6.1.6 Hohe Belastung ist besser als zu wenig
- 7.1.7 Ein Hybridsystem
- 8.1.8 Der Landstrom (beschränkt) ist nicht zu vergessen
- 9.1.9 3000 min⁻¹ oder 1500 min⁻¹?

7.2 Gleichstrom-Generatoren

8. KLEINKRAFTWERKE: ANDERS DENKEN

Mit diesem Kapitel nähern wir uns dem zentralen Thema dieses Buches: Die optimale Abstimmung von Sicherheit und Komfort bei gleichzeitiger Minimierung von Gewicht und Raumbedarf des Energiesystems.

8.1 Einleitung

8.2 Neue Technologien ermöglichen ein vorteilhaftes Gleichstromkonzept (DC)

- 8.2.1 Das DC-Konzept
- 8.2.2 DC-Generatoren
- 8.2.3 Unbeschränkt Strom aus dem Umformer

8.3 Das Wechselstromkonzept (AC) aufgewertet mit *PowerControl* und *PowerAssist*

- 8.3.1 Das AC-Konzept
- 8.3.2 Das AC-Konzept mit generatorfreier Zeit
- 8.3.3 *PowerControl*

8.4 Neu: *PowerAssist*, das AC-Konzept mit Batterie-Unterstützung

- 8.4.1 *PowerAssist*
- 8.4.2 Weitere Vorteile von Phoenix Multi
- 8.4.3 Landstrom

8.5 Eine etwas andere Sichtweise

- 8.5.1 Täglicher Energiebedarf
- 8.5.2 Batterie-Kapazität
- 8.5.3 Landstrom

9. ENERGIEBEDARF BIS ZU 4 kWh PER ETMAL (im Mittel 170 Watt)

9.1 Einleitung

9.2 Geräte und deren Energieverbrauch

- 9.2.1 Navigations-Instrumente
- 9.2.2 GPS
- 9.2.3 Funksprechanlage
- 9.2.4 Positionslampen
- 9.2.5 Selbststeuer-Anlage
- 9.2.6 Radio
- 9.2.7 Innenbeleuchtung
- 9.2.8 Kühlschrank

9.3 Verbrauch während eines Etmals unter Segeln

9.4 Vor Anker oder an der Pier ohne 230 V Landstrom

9.5 „Luxusausrüstung“

- 9.5.1 Elektronische Navigation
- 9.5.2 Kurzwellensender (SSB)
- 9.5.3 Radar
- 9.5.4 Mikrowelle
- 9.5.5 Heizung
- 9.5.6 Klimaanlage
- 9.5.7 Wasserkocher

9.6 Das Laden der Batterien

- 9.6.1 Mit der Lichtmaschine am Hauptmotor
- 9.6.2 Vergrößerung der Batteriekapazität
- 9.6.3 Eine zweite oder eine größere Lichtmaschine
- 9.6.4 Solarzellen
- 9.6.5 Wind-Energie
- 9.6.6 Wasser-Turbine (auf der Propellerwelle oder geschleppt)
- 9.6.7 Landstrom

9.7 Zusammenfassung

10. ENERGIEBEDARF BIS ZU 14 kWh PER ETMAL (im Mittel 600 Watt)

10.1 Einleitung

10.2 Ausrüstung: Das Minimum

- 10.2.1 Navigations-Instrumente
- 10.2.2 Positionslampen und Ankerlicht
- 10.2.3 Selbststeuer-Anlage
- 10.2.4 Kühlschrank
- 10.2.5 Innenbeleuchtung
- 10.2.6 Radio
- 10.2.7 Übrige Verbraucher

10.3 Unter Segeln

10.4 Vor Anker oder an der Pier ohne 230 V Landstrom

10.5 Extras

- 10.5.1 Heißwasserbereiter
- 10.5.2 Elektrische Kochplatten
- 10.5.3 Kleine Waschmaschine
- 10.5.4 Kleiner Geschirrspüler

10.6 Energieerzeugung

- 10.6.1 Mit der Lichtmaschine am Hauptmotor
- 10.6.2 Alternative Energieerzeugung
- 10.6.3 Dieselgenerator
- 10.6.4 *PowerControl* und *PowerAssist*

- 10.6.5 Geringer Landstrom: das Gleichstrom Konzept
- 10.6.6 Der 230V Dieselgenerator auf einem relativ kleinem Schiff
- 10.6.7 Der Gleichstrom-Generator
- 10.6.8 Der Wirkungsgrad des Dieselgenerators
- 10.6.9 Energieversorgung einer 9 bis 15 m Motoryacht oder einer ankernden Segelyacht

10.7 Zusammenfassung

- 10.7.1 Die konventionelle Lösung: der 12 kW Generator
- 10.7.2 Die bessere Lösung: Gewichtseinsparung durch den 6 kW Generator mit *PowerAssist* oder der 5 kW Gleichstrom-Generator

11. ENERGIEBEDARF BIS ZU 48 kWh PER ETMAL (im Mittel 2 kW)

11.1 Einleitung

11.2 Die wesentlichen Verbraucher

11.3 Energiebereitstellung

- 11.3.1 Das „Generatorschiff“: der Generator läuft 24 Std.
- 11.3.2 Eine zusätzliche Batterie ermöglicht eine generatorfreie Zeit
- 11.3.3 Parallel geschaltete Multis und *PowerControl* und ein Gleichstrom-Konzept für den Landanschluß
- 11.3.4 Ein Schritt weiter: Der MultiPlus und *PowerAssist*
- 11.3.5 Der Gleichstrom-Generator
- 11.3.6 Gleichstrom Zusatzgenerator zur Laufzeitverringerung des Hauptgenerators und der Batteriekapazität

11.4 Zusammenfassung

- 11.4.1 Der 20 kW Generator mit generatorfreier Zeit
- 11.4.2 *PowerControl* mit dem Gleichstrom-Konzept und dem Hilfsgenerator für generatorfreie Zeit und kleinere Batterie
- 11.4.3 Der kleinere Generator mit *PowerAssist* : das Gleichstromkonzept für Landstrom und mit Gleichstrom-Generator

12. ENERGIEBEDARF BIS ZU 240 kWh PER ETMAL (im Mittel 10 kW)

12.1 Einleitung

12.2 Die wesentlichen Verbraucher

12.3 Die Energiebereitstellung

- 12.3.1 Generatoren
- 12.3.2 Zusätzliche Batteriekapazität für generatorfreie Zeit und batterieunterstützter Generatorbetrieb (*PowerAssist*)
- 12.2.3 Einbau eines zusätzlichen 8kW ‚Hilfsgenerators‘ zur Laufzeit-Verminderung des Hauptgenerators und zur Reduktion der Batteriegröße

12.4 Vergleich der alternativen Lösungen bei einer mittleren Belastung von 10 kW

13. ZUSAMMENFASSUNG

13.1 Stromverbrauch an Bord

13.2 Energie-Erzeugung

13.3 Das Gleichstrom (DC) – Konzept

13.4 *PowerAssist*: das Batterieunterstützte Wechselstrom (AC) – Konzept

13.5 Die Bordnetzatterie

1. EINLEITUNG

Victron Energy liefert bereits seit 25 Jahren Komponenten und Systeme für die autonome Energieversorgung. Dabei handelt es sich um Systeme für Segel- und Motoryachten, Binnenschiffe, für isoliert liegende Wohnungen ohne Netzanschluß, für zahlreiche mobile Fahrzeug-Anwendungen sowie um weitere kaum aufzählbare oft auch ungewartete Einzelanwendungen.

Aus eigener Erfahrung kennen wir die Komplexität der Probleme, die mit der Erzeugung und Speicherung von Energie in relativ kleinen Anlagen einhergehen.

Die Komponenten derartiger autonomer Systeme sind sowohl teuer als auch empfindlich. Die Batterie zum Beispiel - das unentbehrliche Speichermedium in jedem kleinen System - wird bei fehlerhafter Behandlung schnell unbrauchbar. Es kommt zunächst zum Stromausfall und schließlich führt die Tiefentladung dazu, daß er endgültig ausfällt und vorzeitig in einen Ersatz investiert werden muß.

Neuere Entwicklungen im Zusammenhang mit autonomer Energieversorgung an Bord von Segel- und Motoryachten machen die Situation nicht einfacher. Die Anzahl der elektrischen Geräte an Bord nimmt schnell zu, während andererseits der Platz für Energieerzeugung und Speicherung immer mehr eingeschränkt wird. Dabei haben Lebensraum an Bord und Fahreigenschaften natürlich immer den Vorrang.

Die solchermaßen zunehmenden Anforderungen an die autonome Energieversorgung haben konsequenterweise zur Entwicklung von neuen Konzepten und Produkten geführt. In diesem Handbuch werden diese jetzt vorgestellt, wobei insbesondere Gesichtspunkte der optimierten Integration der Systemkomponenten in das Anforderungsprofil der täglichen Bordpraxis berücksichtigt werden. Bei der weiteren Betrachtung werden Firmen- oder Produktnamen nur dort verwendet, wo es wegen der Einmaligkeit der Leistungsmerkmale unumgänglich ist und entsprechendes nur bei der betreffenden Firma beschafft werden kann. Die in diesem Zusammenhang zu nennenden Produkte von Victron Energy sind:

- **Ladegeräte** mit „selbstdenkender“ Software zur automatischen Optimierung des Ladevorganges

- **Umformer und Umformer/Lader Kombination geeignet für Parallelschaltung**

Mit der Parallelschaltungsoption entfällt die Beschränkung hinsichtlich der Wechselstrommenge die aus einer Batterie entnommen werden kann. Wie später gezeigt wird, ergibt sich hiermit die Möglichkeit, die üblichen Haushaltsgeräte einschließlich elektrischer Kochplatten und der Waschmaschine aus der Bordbatterie zu speisen. Wenggleich die Spitzenbelastung sehr hoch werden kann, ist dennoch der Gesamtverbrauch gut beherrschbar und um einiges niedriger als dies vielfach angenommen wird.

- **PowerControl** ist eine oft zu wenig beachtete aber sehr nützliche Funktion des Phoenix Combi und dessen Nachfolger, dem Phoenix Multi. Der Multi kann beträchtliche Ladestrommengen abgeben und damit auch große Batteriebänke laden. Das bringt andererseits eine erhebliche Belastung (ca. 2 kW oder fast 10 A pro Multi) für den Landanschluß oder den Generator. Mit dem Phoenix Multi Control Bedienungspaneel kann jedoch eine entsprechende Maximalbelastung eingestellt werden. Das Multi berücksichtigt dann die von den Verbrauchern abgenommene Leistung und lädt nur mit dem Strom der noch „übrig“ ist.

- **Powerassist:** mit dem MultiPlus können Sie noch einen Schritt weiter gehen: Das Gerät arbeitet parallel zum Generator oder Landanschluß und verdoppelt die verfügbare Leistung. Bei vorübergehend zu geringem Angebot liefert MultiPlus Zusatzenergie aus der Batterie. Bei geringer Abnahme durch die Verbraucher lädt MultiPlus mit dem Überschuß die Batterie. Die Landstrombegrenzung kann mit einem simplen Drehknopf am Bedienungspaneel eingestellt werden.

Die folgende Übersicht behandelt vorwiegend Anwendungen auf Yachten. Zahlreiche Lösungsvorschläge und Produkte können jedoch auch bei anderen autonomen Energiesystemen angewandt werden. Hierzu gehören z.B. Haushalte ohne Netzanschluß, Wohnmobile oder technische Dienstfahrzeuge.

2. DIE BATTERIE: MASSNAHMEN ZUR VERHINDERUNG DES VORZEITIGEN ALTERNS

2.1 Einleitung

Motoren und insbesondere altmodische Schiffsmotoren ohne elektronischen Schnickschnack mag ich gern. Wenn etwas nicht funktioniert kann man nachsehen, hinhören, schnuppern und wenn nötig auseinander nehmen. Einzelteile können ausgewechselt, repariert oder überholt werden. Dann wird alles wieder zusammengebaut, und der Schaden ist behoben. Mit einer Batterie ist das leider nicht möglich. Der Batterie ist ein geheimnisvolles Produkt. Von außen kann man weder deren Güte, die Alterung oder den Ladezustand erkennen. Auch Aufschrauben liefert keine Information über eine Alterung. Man kann sie zwar auseinandernehmen, aber dann ist sie endgültig hinüber, und lediglich Spezialisten können nach entsprechender Analyse Auskunft über die Fehlerursache geben.

Wenn eine Batterie nicht mehr funktioniert ist sie kaputt und muß ersetzt werden. Eine Reparatur ist nicht möglich!

Eine Batterie ist teuer, groß und schwer. Rechnen Sie einmal mit: Mit 10 Liter Dieselöl (8.4 kg) kann man über den Generator 700 Ah mit einen Energieinhalt $24 \times 700 = 16,8$ kWh in eine 24V Batterie lade. Diese Batterie hat ein Volumen von 300 Litern und wiegt 670 kg!

Darüber hinaus sind Batterien sehr empfindlich. Überladung, unvollständiges Laden, Tiefentladung, Schnellladung oder zu hohe Ladetemperatur: All dies kann passieren, und die Folgen sind verheerend.

In diesem Kapitel wird erläutert, warum Batterien gelegentlich zu schnell altern und was man selbst zu deren Erhaltung und Lebensdauerverlängerung tun kann. Falls Sie sich eine defekte Batterie ansehen wollen, so öffnen Sie diese bitte nicht selbst! Das ist eine schlimme Schufferei und für den Preis einer neuen Hose (ein Tropfen Schwefelsäure reicht um Ihre Hose reif für den Mülleimer zu machen) können Sie besser Nigel Calder's Buch 'Boatowner's Mechanical and Electrical Manual' mit vielen Abbildungen von kaputten Batterien kaufen.

2.2 Die Chemie der Batterie

2.2.1 Was geschieht in den Zellen bei der Entladung?

Bei der Entladung entsteht in den Zellen durch Umwandlung aus der Elektrolytlösung Bleisulfat an den Positiv- und Negativpolen. Die Elektrolytmenge bleibt dabei nahezu gleich, wohingegen der Säuregehalt abnimmt, was an der Veränderung des spezifischen Gewichts meßbar ist.

2.2.2 Was geschieht in den Zellen beim Laden?

Beim Laden findet der umgekehrte Prozeß statt. An beiden Platten wird Säure freigesetzt wobei am positiven Pol Bleioxid ausfällt während am negativen Pol schwammartiges poröses Blei abgelagert wird. Wenn der Ladeprozeß dem Ende zugeht, und das Bleisulfat größtenteils umgewandelt worden ist, führt eine weitere Energiezufuhr zur Aufspaltung des Wassers in Wasserstoff und in Sauerstoff. Dies ist ein äußerst explosives Gemisch und der Grund dafür, daß man beim Laden von Batterien grundsätzlich kein offenes Feuer haben sollte. Auch sollte der Batterieraum ausreichend gut belüftet werden.

2.2.3 Der Diffusionsprozeß

Beim Entladevorgang bewegen sich die Ionen durch die Elektrolytflüssigkeit hin zum aktiven Plattenmaterial, um so mit dem Blei bez. Bleioxid in Kontakt zu kommen, das noch nicht in Bleisulfat umgewandelt wurde. Dieser Bewegungsvorgang wird mit Diffusion bezeichnet. Beim Entladevorgang läuft der Prozeß in umgekehrter Richtung ab. Der Diffusionsprozeß ist relativ langsam, und es ist leicht vorstellbar, daß die Reaktionen zunächst an den Plattenoberflächen und erst später und mit geringerer Geschwindigkeit tief im Inneren des aktiven Plattenmaterials stattfinden.

2.2.4 Die Lebensdauer

Abhängig von der Bauart und vom Anwendungsbereich variiert die Lebensdauer von Batterien zwischen wenigen Jahren bis hin zu 10 Jahren und mehr. Die wesentlichsten Gründe für das Altern der Batterien sind:

- **Masseverlust:** Häufiges Auf- und Entladen (zyklischer Gebrauch) ist hier die wesentlichste Ursache. Die häufig wiederholte chemische Umwandlung des aktiven Plattenmaterials führt zu einer Kohäsionsverminderung, wodurch das aktive Material ausfällt und sich am Boden der Batterien absetzt.
- **Korrosion** am Gitter der positiven Platte. Die tritt beim Ladevorgang auf, insbesondere gegen Ende des Ladens, wenn die Batteriespannung hoch ist. Auch bei der Erhaltungsladung tritt dieser Effekt fortwährend, wenngleich deutlich verlangsamt auf. Die Korrosion erhöht den Innenwiderstand und führt letztendlich zu einer vollständigen Zerstörung der positiven Platten.
- **Sulfatierung:** Im Gegensatz zu den vorgenannten Alterungsprozessen kann der Sulfatierung entgegengewirkt werden. Beim Entladevorgang entstehen durch Umwandlung des aktiven Materials an den positiven und negativen Platten kleine Sulfatkristalle. Wenn jetzt zu lange mit dem Wiederaufladen gewartet wird, zeigen diese Kristalle Neigung zum Wachsen und zur Verhärtung. So entsteht eine undurchdringbare Schicht, die nicht wieder in aktives Material umgewandelt werden kann. Schließlich führt das zu Kapazitätsverlust und zum Totalausfall.

2.3 Die gebräuchlichsten Blei-Schwefelsäure Batterien

2.3.1 Bleiantimon und Bleikalzium

Blei wird mit Antimon und geringen Mengen von Selen oder Zinn oder aber mit Kalzium legiert, um einerseits das Plattenmaterial besser bearbeitbar zu machen und es andererseits haltbarer zu machen. Für den Nutzer ist wichtig zu wissen, daß mit Antimon legierte Batterien eine höhere Selbstentladung haben und eine höhere Ladespannung erfordern. Andererseits führt dies aber zu einer Erhöhung der Anzahl möglicher Lade/Entladezyklen.

2.3.2 Bleisilber Technologie

Eine Neuentwicklung der jüngeren Vergangenheit ist die Bleisilbertechnologie. Hier wird eine Legierung aus Blei, Kalzium und Silber in Verbindung mit einer neuen und optimierten Gitterstruktur verwendet. Die Silberlegierung hat eine feinere Kristallstruktur, wodurch die Stromaufnahme bei gleichzeitiger Reduktion des Wasserverbrauches verbessert wird. Die Batterie hat einen mikroporösen Taschenseparator, der die Stromaufnahme beim Laden zusätzlich verbessert. Der Ladezustand der neuentwickelten Batterie wird mit einem „Power Check“ genannten Inspektionsröhrchen überwacht. Je nach Ladezustand verändert sich die Farbe in einem Inspektionsfenster. Die Batterie ist nur als Starterbatterie oder für die Bugschraube geeignet.

2.3.3 Offene und Geschlossene Batterien

Offene Batterien sind mit flüssigem Elektrolyt gefüllt. In geschlossenen Batterien hingegen liegt der Elektrolyt als Gel vor, oder es ist in einem mikroporösen Trägermaterial eingebettet (AGM-Batterie, **Absorbent Glass Mat**). Bei offenen Batterien tritt gegen Ende des Ladeprozesses Gas (siehe 2.2.2) aus. Bei geschlossenen Batterien wandert der an der positiven Platte entstehende Sauerstoff zur negativen Platte wo er in einem chemischen Prozeß zu Wasser rekombiniert. Es tritt praktisch kein Gas aus. Wasserstoff entsteht dann, wenn Ladestrom und Ladespannung zu hoch sind. Das Gas tritt dann über ein Sicherheitsventil aus, woraus sich der Begriff VRLA-Batterie mit „**Valve Regulated Lead Acid**“ erklärt. Obwohl geschlossene Batterien im allgemeinen als gasdicht bezeichnet werden, ist dies nicht ganz richtig; wenn als Folge unsachgemäßen Ladens wiederholt Gas entweicht wird der Elektrolyt austrocknen und der Batterie wird unbrauchbar.

2.3.4 Die Starter-Batterie mit flachen Platten (Naß)

Diesen Batterietyp findet man hauptsächlich in Kraftfahrzeugen. Er ist ausschließlich für den kurzzeitig hohen Entladestrom für das Anlassen des Motors ausgelegt. Deshalb hat er dünne Platten mit relativ großer Oberfläche. Bei wiederholter Tiefentladung neigen die Platten zu Verformungen und es kommt zu Masseverlust. Dennoch wird dieser Batterietyp als sogenannte „Heavy Duty“ Startbatterie häufig auch als Bordnetz-Batterie auf kleineren Yachten eingesetzt.

2.3.5 Der Semi-traktions- Batterie mit flachen Platten (Naß)

Dieser Batterietyp hat dickere Platten mit verbesserten Abstandshaltern zwischen den Platten um die Verformungen und auch Masseverlust zu verhindern.

2.3.6 Die Traktions-Batterie

Dieser Batterietyp, der sehr gut für zyklischen Betrieb geeignet ist, wird meistens aus Panzertaschenplatten (Panzerplatten) in Kombination mit flachen Gitterplatten gebaut. Sie werden z.B. in Gabelstaplern eingesetzt, wo die Batterie tagsüber auf 60-80% entladen und nachts wieder geladen wird.

Eine Traktionsbatterie sollte von Zeit zu Zeit, insbesondere bei stark zyklischem Betrieb, eine Ausgleichladung erhalten, bei der nach der eigentlichen Ladung mit geringem Strom für einige Stunden nachgeladen wird. Hierbei steigt die Ladespannung an wobei der Anstieg von der chemischen Zusammensetzung und vom Alter der Batterie abhängt.

Die Erhöhung der Ladespannung ist umso mehr von Vorteil, als dadurch eventuelle Reste von Sulfat in aktives Material umgewandelt werden, und eine Säureschichtung der Elektrolytlösung verhindert wird. Die beim Ladevorgang entstehende Schwefelsäure (H_2SO_4) ist schwerer als Wasser und kann nach unten sinken, wodurch es zu unterschiedlicher Säurekonzentration in der Batterie zwischen unten und oben kommt. Die bei der Ausgleichladung entstehende Gasentwicklung sorgt zusätzlich für eine gute Verwirbelung der Elektrolytlösung.

Die sogenannten Panzerzellen sind hoch und schmal, wohingegen die normale Plattenbatterie flache und breite Zellen haben. Um so wichtiger ist bei Panzerzellen die genannte hohe Gasentwicklung zur gleichmäßigen Vermischung der Elektrolytlösung.

2.3.7 Die geschlossene VRLA-Gel Batterie

Bei diesem Typ ist der Elektrolyt in Form eines Gels unbeweglich. Er ist unter den Markennamen *Sonnenschein Dryfit A200*, *Sportline* oder *Exide Prevailer* bekannt.

2.3.8 Die geschlossene Rundzellen VRLA-Batterie

Dieser Batterie ist unter dem Namen *Optima* (Exide hat ein ähnliches Produkt) bekannt geworden. Es handelt sich um eine Variante der VRLA AGM Batterie. Jede Zelle besteht dabei aus einer Wicklung von positivem und negativem Plattenmaterial mit dazwischen liegender Elektrolytmatte. Im Ergebnis hat diese Anordnung eine große Steifigkeit und einen sehr niedrigen Innenwiderstand. Dieser Batterietyp kann kurzzeitig sehr hohe Ströme abgeben, läßt hohe Ladeströme zu ohne übermäßig warm zu werden und übersteht als Sonderform der VRLA-Batterien Ladespannungen von bis zu 15 V (12 V Batterie), ohne daß Gas entweicht.

2.4 Die Funktion und der Gebrauch von Batterien

In einem autonomen Energiesystem hat die Batterie die Funktion eines Energiepuffers zwischen den Stromquellen wie Ladegerät, Solarzellen, Windrad oder Lichtmaschine und den Verbrauchern. In Praxis führt das zu einem allerdings höchst unregelmäßigen zyklischen Betrieb. Im Gegensatz hierzu ist z.B. der Betrieb eines Gabelstaplern sehr gut planbar.

Auf einer Yacht sind beispielsweise die folgenden Situationen vorstellbar:

- Die Yacht ist in Fahrt oder ankert in einer weiten Bucht. Die Besatzung wird aus Geräuschgründen alle benötigte Energie aus der Batterie entnehmen. Ein bis zweimal am Tag wird die Batterie über die Hauptmaschine oder den Hilfsgenerator wieder für die nächste generatorfreie Zeit aufgeladen. Es ergibt sich ein zyklischer Betrieb mit vergleichsweise kurzen Ladeperioden.
- Bei langer Fahrt unter Motor ergibt sich ausreichende Ladezeit mit der Lichtmaschine.
- Die Yacht liegt an der Pier. Die Ladegeräte liegen am Landanschluß, so daß die Batterien 24 Stunden geladen werden. Bei Betrieb entsprechend dem DC- (Gleichstrom) Konzept (Abschnitt 8.2) werden tagsüber gelegentliche Entnahmen mit geringer Entladung auftreten.
- Die Yacht liegt im Winterlager. Die Batterien entladen sich langsam (Selbstentladung, Abschnitt 2.4.10), liegen zur Erhaltungsladung am Ladegerät, oder werden beim Lagern im Freien durch Sonnenpaneel oder Windgenerator geladen.

Die Anzahl der Zyklen pro Jahr, die Umgebungstemperatur sowie zahlreiche andere Einflußfaktoren auf die Nutzungsdauer eines Batterien variieren von Fall zu Fall. Im Folgenden werden die wesentlichen Einflüsse angesprochen.

2.5 Die Bleischwefel-Batterie im praktischen Betrieb

2.5.1 Was kostet eine Batterie?

Die nachfolgende Tabelle zeigt, daß die Kosten in Abhängigkeit von der Batterieauswahl sehr stark variieren, und daß offene Batterien preiswerter sind als die geschlossenen. Bei den Preisen handelt es sich um Richtwerte ohne MwSt. Spezielle und dem Einsatz entsprechende Qualitätsaspekte schlagen sich im Preis nieder.

Geschlossene Batterien bieten eine Reihe von Vorteilen wie

- Wartungsfreiheit
- Entgasungsfrei (solange Sie nicht mit zu hoher Spannung geladen werden)
- Einbaumöglichkeit auch in engen und schlecht zugänglichen Räumen

Andererseits sind einige geschlossene Batterien wegen des besonderen Zellenaufbaus (Wicklung) empfindlicher gegen Überladung. Überladung führt zur Entgasung über das Sicherheitsventil und zu entsprechendem Wasserverlust. Wasser kann nicht wieder aufgefüllt werden und eine vorzeitige Alterung der Batterien durch Austrocknung ist die Folge.

Batterietyp	Anwendung	Systemspannung, Kapazität, Energieinhalt			Kosten	Kosten / kWh
		V	Ah	kWh	€	€/ kWh
Starterbatterie	Starten	12	100	1.2	100	80
Rundzellen	Starten, Bugschraube	12	60	0.72	250	350
Semi-Traktion	Bordnetz-Batterie bis ca. 600 Ah	12	200	2.4	300	125
VRLA AGM-Batterie	Bordnetz-Batterie bis ca. 600 Ah sowie Start und Bugschraube	12	230	2.8	600	210
Traktion (Panzerplatten)	Bordnetz-Batterie bis ca. 2000 Ah	24	1000	24	4.500	190
VRLA-Gel Sonnenschein Dryfit A200	Bordnetz-Batterie bis ca. 600 Ah	12	200	2.4	500	210
VRLA-Gel Sonnenschein Dryfit A600	Bordnetz-Batterie bis ca. 1500 Ah	24	1500	36	11.000	305

2.5.2 Abmessungen und Gewicht

Batterietyp	V	Ah	kWh	Volumen dm ³	Gewicht kg	Spezifisches Volumen Wh / dm ³	Spezifisches Gewicht Wh / kg
Starterbatterie	12	100	1.2	16	28	75	43
Rundzellen	12	60	0.72	8.5	17.2	81	42
Semi-Traktion	12	200	2.4	33	60	73	40
VRLA AGM-Batterie	12	230	2.8	33	62	85	45
Traktion (Panzerplatten)	24	1000	24	280	770	85	32
VRLA-Gel Sonnenschein Dryfit A200	12	200	2.4	33	70	72	34
VRLA-Gel Sonnenschein Dryfit A600	24	1500	36	600	1440	60	25

Die Tabelle macht deutlich, wie schwer und unhandlich Batterien sind. Zur Erinnerung wird der Vergleich aus Absatz 2.1 nochmals herangezogen:

Im Vergleich mit der Energie, die beim Verbrennen von z. B. Dieselöl freigesetzt wird, kann eine Batterie nicht mithalten. Die erwähnten 10 Liter Dieselöl mit einem Gewicht von ca. 8.4 kg setzen bei der Verbrennung ca. 100 kWh thermische Energie frei. Bei einem Gesamt-Wirkungsgrad von etwa 20% liefert der Dieselgenerator mit dieser Ölmenge ca. 20 kWh elektrische Energie. Diese Energie ist ausreichend um einen 24 V Batterie mit 700 Ah zu laden. Eine solche Batterie hat ein Volumen von 300 Litern und ein Gewicht von 670 kg!

Ein weiterer anschaulicher Vergleich sei erlaubt: Um einen Liter Wasser zum Kochen zu bringen, benötigt ein elektrischer Wasserkocher ca. 0,1 kWh. Um diese Energiemenge bereitzustellen benötigt man eine Batterie von ca. 4 kg Gewicht!

2.5.3 Der Einfluß der Entladezeit auf die nutzbare Kapazität von Batterien

Die nutzbare Kapazität einer Batterie ist von der Entladezeit abhängig. Je schneller eine Batterie entladen wird, d. h. je höher der Entladestrom I ist, um so geringer ist die verfügbare Kapazität in Ah. Dies ist durch den in Absatz 2.2.3 beschriebenen Diffusionsprozeß bedingt.

Die Kapazität einer Batterie wird meistens für eine Entladezeit von 20 Std. angegeben (Entladestrom I = C/20). Für eine 200Ah Batterie ergibt sich daraus, daß die nominale Kapazität bei einem Entladestrom von 200 Ah/20 = 10 Ampere abgegeben wird.

Wenn hingegen der Entladestrom auf 200A ansteigt, wird naturgemäß die gleiche Batterie wesentlich schneller „leer“ sein. Eine 200 Ah Gel Batterie hat dann z.B. lediglich eine Kapazität von 100 Ah und ist damit bereits nach ca. 30 Minuten leer. (Siehe auch Absatz 3: Der Batteriemonitor)

Die folgenden Tabellen sollen Anhaltspunkte für die tatsächlich verfügbare Kapazität in Abhängigkeit vom Entladestrom vermitteln. In der 3. Spalte der ersten Tabelle sind die Nennkapazitäten nach Herstellerangaben zusammen mit den entsprechenden Entladezeiten angegeben. Im allgemeinen werden 20 Std. angegeben, aber auch Werte von 10 oder 5 Stunden sind genannt.

Die nachstehenden Tabellen zeigen deutlich die Abnahme der Kapazität bei steigendem Entladestrom, und daß die AGM-Batterien (allen voran der Rundzellen Typ) bei hohen Entladeströmen mehr leisten als Gel-Batterien.

Batterietyp	Entlade Strom I _n	Nennkapazität / Entladezeit	Entlade-Strom	Effektive Kapazität bei 1.83 V / Zelle (11 V)		Entladezeit Std.
				Ah	%	
	A	Ah/h	A (C / 5)			h
Starterbatterie	5	100 Ah / 20 h				
Rundzellen	2.8	56 Ah / 20 h	11.2	52	93	4.6
Semi-Traktion	10	200 Ah / 20 h	40	150	75	3.75
VRLA AGM-Batterie	11.5	230 Ah / 20 h	46	198	86	4.3
Traktion (Panzerplatten)	200	1000 Ah / 5 h	200	1000	100	5
VRLA-Gel Sonnenschein Dryfit A200	10	200 Ah / 20 h	40	158	79	4
VRLA-Gel Sonnenschein Dryfit A600	150	1500 Ah / 10 h	300	900	60	3

Batterietyp	Entlade-Strom	Effektive Kapazität bei 1.83 V / Zelle (11 V)		Entladezeit	Entlade-Strom	Effektive Kapazität bei 1.75 V / Zelle (10.5 V)		Entladezeit
		Ah	%			Minuten	Ah	
	A (C/2)	Ah	%	Minuten	A (C/1)	Ah	%	Minuten
Starterbatterie								
Rundzellen	28	43	77	92	56	42	75	45
Semi-Traktion	100	110	55	66	200	90	45	27
VRLA AGM-Batterie	115	157	68	82	230	142	62	37
Traktion (Panzerplatten)	500	700	70	80	1000	400	40	24
VRLA-Gel Sonnenschein Dryfit A200	100	120	60	72	200	100	50	30
VRLA-Gel Sonnenschein Dryfit A600	750	375	25	15	1500	0*	0	0*

- Bei einem Entladestrom von 1500 A (C/1) sinkt die Spannung einer 600 Ah Batterie nahezu unmittelbar auf 1.65 V / Zelle (d.h. 9.9 V für ein 12 V System bez. 19.8 V für ein 24 V System).

Der Entladestrom wird vielfach als Verhältnis zur nominalen Kapazität angegeben. Für eine 220 Ah Batterie ergibt damit z.B. C/5 einen Entladestrom von 40 A (200 / 5).

2.5.4 Kapazität und Temperatureinfluß

Die effektive Kapazität einer Batterie verhält sich umgekehrt proportional zur Temperatur

5°C	10°C	15°C	20°C	25°C	30°C
80 %	92 %	95 %	100 %	103 %	105 %

2.5.5 Vorzeitige Alterung 1. Tiefentladung

Je tiefer Batterien entladen werden um so schneller altern sie (wegen des beschleunigten Ausfalls der aktiven Masse). Wenn eine bestimmte Grenze (ca. 80 %) überschritten wird, beschleunigt sich dieser Prozeß überproportional. Falls die Batterie dann im entladenen Zustand belassen wird, kommt es überdies zur Sulfatierung an den Platten (Abschnitt 2.2.4).

Wie ebenfalls in Abschnitt 2.2.4 erläutert wurde, altern Batterien auch in geladenem Zustand und wenn sie nicht genutzt werden. Die Hauptursache ist die Korrosion der Gitter in den positiven Platten. Die Tabelle enthält Angaben über mögliche Anzahlen von Lade/Entladezyklen bei verschiedenen Batterietypen sowie Hinweise auf die Empfindlichkeit bezüglich Sulfatierung und Korrosion.

Die Anzahl der möglichen Lade/Entladezyklen ist stark abhängig von der Entladetiefe (engl. **Depth of Discharge, DoD**), wobei das Ende der Nutzungsdauer im allgemeinen erreicht ist, wenn die Kapazität der Batterien dauerhaft auf ca. 80% abgesunken ist.

Obwohl die meisten Batterien sich nach einer völligen Entladung wieder erholen, führt dies dennoch zu einer Verkürzung der Lebensdauer. Sie dürfen keinesfalls vollständig entladen werden, und vor allem sollten sie nicht in entladem Zustand belassen werden. Es muß auch daran erinnert werden, daß die Spannung einer in Betrieb befindlichen Batterie kein geeigneter Meßwert für den Ladezustand ist. Die Batteriespannung wird durch andere Einflußfaktoren wie z.B. den Entladestrom oder die Temperatur beeinflusst. Erst wenn die Batterie nahezu vollständig entladen ist (DoD 80% - 90%) sinkt die Spannung nachhaltig ab. Der Batterie muß vor dem Erreichen dieses Zustandes geladen werden. Aus diesem Grunde wird zur Überwachung größerer und teurer Batterien ein Batteriemonitor (Abschnitt 3) besonders empfohlen.

Batterietyp	Mögliche Zyklenzahl		Einfluß der Sulfatierung bei 100% Entladung	Lebensdauer
	Entladetiefe 80 %	Entladetiefe 60 %		Nahezu durchgängige Ladung bei gelegentlicher zyklischer Belastung (T _{Umgebung} 20° C)
				Jahre
Starterbatterie	Nicht geeignet für zyklische Nutzung			5
Rundzellen	400	650	Binnen weniger Tage durch Sulfatierung unbrauchbar	10
Semi-Traktion	200	350	Binnen weniger Tage durch Sulfatierung unbrauchbar	5
VRLA AGM-Batterie	250	450	Maximal 1 Monat im Kurzschluß	4 - 10
Traktion (Panzerplatten)	1500	2500	Maximal 1 Monat im Entladezustand	10 - 15
VRLA-Gel Sonnenschein Dryfit A200	250	450	Maximal 1 Monat im Entladezustand	4 - 5
VRLA-Gel Sonnenschein Dryfit A600	600	900	Maximal 1 Monat im Entladezustand	15 - 18

2.5.6 Vorzeitige Alterung 2. Zu schnelles Laden und unvollständiges Laden

Batterien können schnell geladen werden, und sie ertragen auch hohe Ladeströme bis die Gasungsspannung erreicht ist. Wenngleich das Laden mit hohen Stromstärken einige Male gut gehen kann, so wird dennoch die Lebensdauer dadurch erheblich verkürzt. Die Ursache liegt in der Abnahme der Kohäsion des aktiven Materials in den Platten. Im allgemeinen wird empfohlen, den Ladestrom auf C/5, d.h. 20% der Nominalkapazität zu begrenzen.

Falls der Ladestrom höher als C/5 ist kann außerdem die Temperatur deutlich ansteigen. Eine Temperaturkompensation der Ladespannung ist dann eine unumgängliche Notwendigkeit (siehe auch 2.5.9). Nach meiner eigenen Erfahrung bringt die Ladung eines auf 50% entladenen 12V / 100 Ah Batterien (naß) mit einem Ladestrom von C/3 einen Temperaturanstieg um 10 bis 15° C. Die Maximaltemperatur wird am Ende der Bulkladung erreicht. Größere Batterien werden noch wärmer. Der

Grund liegt darin, daß die Wärmeentwicklung mit dem Volumen der Batterien zunimmt während die Wärmeabfuhr lediglich über die Oberfläche geschieht.

Ein Beispiel:

Eine Segelyacht (50 Fuß) hat eine Bordnetz-Batterie mit einer Kapazität von 800 Ah: Der maximale Ladestrom ergibt sich dann mit C/5 zu 160 A. In zwei Stunden können also 360 Ah geladen werden. Da gleichzeitig Verbraucher mit 15 A in Betrieb sind, muß das Ladegerät 175 A abgeben. Während den restlichen 22 Stunden des Etmals stehen dann durchschnittlich $320/22 = 14,5$ A zur Verfügung, was andererseits einer Entladung um $320/800 = 40\%$ entspricht. Das sieht nach wenig aus, ist in der Tat aber das Maximum dessen, was zur Verfügung steht, wenn die Ladezeit des Generators auf 2 Stunden begrenzt ist. Wenn der Batterie auf diese Weise betrieben wird, erreicht die Ladung gerade 80% (darüber steigt die Ladespannung bei abnehmendem Ladestrom) und danach folgt wieder eine Entladung auf ca. 40%. Eine weitere Entladung oder ein schnelleres Laden würde zu einer deutlichen Verkürzung der Lebensdauer der Batterien führen. Im beschriebenen Beispiel wird der Batterie also in einem partiell geladenen Zustand zwischen 20 und 60% DoD genutzt.

Es gibt zwei wesentliche Gründe für die Beschränkung der Zyklenzahl bei einem Betrieb mit derartig partiellen Ladezustand:

- 1 Säureschichtung im Elektrolyt: Das Problem betrifft speziell Batterien mit flüssigem Elektrolyt. Als Faustregel kann gelten, daß man derartigen Batterien nicht mehr als 30 Zyklen mit partieller Ladung zumuten sollte. Diese Zahl wird deutlich geringer, wenn zusätzliche Tiefentladungen vorkommen.
- 2 Ungleichgewicht der Zellen: Die einzelnen Zellen einer Batterie sind keineswegs völlig gleich. Einige Zellen haben geringere Kapazität. Einige lassen sich schlechter laden (siehe Abschnitt 3.4). Bei zyklischem Betrieb mit partieller Ladung werden diese „schwächeren“ Zellen stets geringere Ladungen haben, als die normalen. Damit nun die Batterie vollständig geladen wird, muß entsprechend viel Strom zugeführt werden, um die schwächste Zelle vollständig zu laden. Die führt bei den besseren Zellen zur Überladung (siehe Abschnitt 4.3).

Das Ungleichgewicht nimmt bei sehr tiefen Entladungen und sehr hohem Ladestrom schnell zu. Um das Problem der Balance nicht unzulässig groß werden zu lassen, sollte spätestens nach 30 bis 60 Zyklen eine Vollladung durchgeführt werden. Bei dauerndem zyklischen Betrieb (z. B. beim Gabelstapler) reicht eine normale Ladung nicht aus. Sie muß von Zeit zu Zeit durch eine Ausgleichladung ergänzt werden (siehe Abschnitt 4.3).

2.5.7 Vorzeitige Alterung 3. Zu niedrige Ladung

Wie in Abschnitt 2.2.4 beschrieben wurde tritt Sulfatierung auf, wenn eine Batterie über längere Zeit in entladene Zustand belassen wird. Das gleiche passiert, wenn auch etwas langsamer, wenn die Batterie mit partieller Ladung eingelagert wird. Deshalb ist zu empfehlen, die Batterie nie unter 50% Ladung einzulagern und bei längerer Einlagerung (z.B. Winterlager) regelmäßig, d.h. in Monatsabständen, für Wiederaufladung zu sorgen. Im allgemeinen werden die Batterien, und dies gilt speziell für die modernen nassen Batterien mit geringem Antimon Gehalt, zu gering geladen da die Ladespannung des Ladegerätes zu niedrig eingestellt ist (siehe auch Kapitel 4).

Zusammen mit der Tiefentladung ist die Teilladung die wesentliche Ursache für frühzeitiges Altern.

2.5.8 Vorzeitige Alterung 4. Überladung

Überladung führt zu erhöhter Gasentwicklung und damit zu Wasserverlust. Bei offenen Batterien kann dieser Wasserverlust durch Nachfüllen ausgeglichen werden, jedoch kann die gleichzeitig stattfindende erhöhte Korrosion an den positiven Platten nicht rückgängig gemacht werden. Geschlossene Batterien reagieren wesentlich empfindlicher auf Überladung, da der Wasseranteil im über die Ventile entwichenem Gas nicht ausgeglichen werden kann. Eine der Hauptursachen für Überladung ist das Fehlen einer Temperaturkompensation (siehe auch Abschnitt 4.4) oder aber das gleichzeitige Laden mehrerer Batterien über Trenndioden (siehe Abschnitt 5).

2.5.9

Vorzeitige Alterung 5. Temperatur

Die Temperatur von Batterien kann aus unterschiedlichen Gründen stark variieren:

- Schnelles Laden erwärmt die Batterie (Abschnitt 2.5.6 und 2.5.8).
- Der Aufstellungsort der Batterien z. B. im Maschinenraum einer Yacht, wo die Temperatur +50°C oder mehr erreichen kann. Bei Landfahrzeugen sind Werte zwischen -20°C und +50°C vorstellbar.

Da die chemischen Prozesse in der Batterie bei höheren Temperaturen schneller ablaufen, führt ein Temperaturanstieg zwangsläufig zu beschleunigter Alterung. Die Lebensdauerangabe wird von den Herstellern im allgemeinen auf eine Betriebstemperatur von 20°C bezogen. Eine dauernde Temperaturerhöhung um 10°C führt zu einer Halbierung der Lebensdauer! Die nachstehende Tabelle beschreibt die genannten Zusammenhänge.

Batterietyp	Lebensdauererwartung in Jahren bei nahezu ständiger Ladung der Batterien und gelegentlicher zyklischer Belastung		
	20°C	25°C	30°C
Starterbatterie	5	3,6	2,5
Rundzellen	10	7	5
Semi-Traktion	5	3,6	2,5
VRLA AGM-Batterie	8	6	4
Traktion (Panzerplatten)	10	7	5
VRLA-Gel Sonnenschein Dryfit A200	5	3,6	2,5
VRLA-Gel Sonnenschein Dryfit A600	16	11	8

Schließlich spielt die Temperatur auch eine wesentliche Rolle beim Ladevorgang selbst. Die Gasungsspannung und damit die optimale Absorptions-Erhaltungsladespannung, nehmen in dem Maße ab, in dem die Temperatur ansteigt. Dies hat zur Folge, daß bei fest eingestellter Ladespannung eine kalte Batterie möglicherweise unvollständig geladen wird, während die warme Batterie überladen wird. In Abschnitt 4.4 wird dieser Zusammenhang nochmals vertieft beschrieben.

2.5.10 Selbstentladung

Wenn eine Batterie nicht genutzt wird verliert sie durch Selbstentladung Kapazität. Die Selbstentladungsrate ist bauart- und temperaturabhängig. Offene Blei-Antimon Batterien sollten mindestens alle vier Monate voll geladen werden es sei denn, die Umgebungstemperatur ist sehr gering. Geschlossene Batterien können 12 Monate ohne Zuladung überstehen. Wann immer eine Batterie während einer längeren Zeitspanne nicht genutzt wird (z.B. Winterlager) sollte sie mechanisch vom Netz getrennt werden, um keine Entladung infolge von Kriechströmen zu riskieren.

Batterietyp	Legierung	Monatliche Selbstentladungsrate bei 20 °C	Monatliche Selbstentladungsrate bei 10 °C
Starterbatterie	Antimon (1,6 %)	6 %	3 %
Gewickelte Zellen	Blei	4 %	2 %
Semi-Traktion	Antimon (1,6 %)	6 %	3 %
VRLA AGM-Batterie	Antimon (1,6 %)	3 %	1,5 %
Traktion (Panzerplatten)	Antimon (1,6 %)	12 %	6 %
VRLA-Gel Sonnenschein Dryfit A200	Kalzium	2 %	1 %
VRLA-Gel Sonnenschein Dryfit A600	Kalzium	2 %	1 %

3. ÜBERWACHUNG DES LADEZUSTANDES DER „BATTERIE-MONITOR“

3.1 Die verschiedenen Methoden der Überwachung

3.1.1 Das spezifische Gewicht der Elektrolytlösung

Wie bereits im Abschnitt 2.2.1 erwähnt wurde besteht die Elektrolytlösung eines Blei-Schwefel- Batterien aus einem Gemisch von Schwefelsäure und Wasser. Im vollgeladenen Zustand besteht die aktive Masse an der negativen Platte aus reinem Bleischwamm, die der positiven Platte hingegen aus Bleioxid. Die Konzentration der Schwefelsäure im Elektrolyt ist dann ebenso wie das spezifische Gewicht hoch. Während der Entladung reagiert die Schwefelsäure mit dem aktiven Material an den beiden Plattenpolen wodurch Bleisulfat und Wasser entsteht. Gleichzeitig nimmt der Säuregehalt und das spezifische Gewicht der Elektrolytlösung ab.

Während der Entladung kann der Ladezustand durch eine Kontrolle des spezifischen Gewichts mit einem Säureheber gut überprüft werden. Die nachstehende Tabelle zeigt dies:

Entladungstiefe	Spezifisches Gewicht γ	Batteriespannung
0	Zwischen 1,265 und 1,285	12,65 +
25	1,225	12,45
50	1,190	12,24
75	1,155	12,06
100	1,120	11,89

Während des Ladens läuft der Prozeß umgekehrt ab und es wird Schwefelsäure gebildet. Die Säure ist schwerer als Wasser und sinkt daher bei flüssigem Elektrolyt in den unteren Teil der Batterie. Das führt dort zu einer Erhöhung der Säurekonzentration. Oberhalb der Platten bleibt die Säurekonzentration nahezu konstant. (Dieses Problem gibt es bei AGM- und Gel-Batterien nicht)

Nützliche Informationen zum Elektrolyt:

- Säureschichtung

Wenn während des Ladens die Gasungsspannung erreicht ist (2,39 V / Zelle bez. 14,34 V bei einem 12 V Batterie bei 20°C), wird die Elektrolytlösung durch die aufsteigenden Gasblasen wieder durchmischt. Der Zeitbedarf für eine vollständige Durchmischung hängt von der Bauart der Batterie und von der Gasentwicklung ab, die wiederum von der Ladespannung, dem Antimongehalt und vom Alter der Batterie abhängig ist.

Bei Batterien mit höheren Antimongehalten (> 2,5%) reicht die Gasentwicklung während der Absorptionsphase im allgemeinen aus um eine homogene Durchmischung zu erreichen. Bei modernen Batterien mit niedrigen Antimongehalten (< 1,6%) ist hingegen die Gasentwicklung so niedrig, daß der normale Ladezyklus nicht ausreicht um eine vollständige Durchmischung zu erzielen. Es bedarf sehr langer Erhaltungsladung mit entsprechend geringer Gasentwicklung, bis der Elektrolyt wieder gut durchmischt ist. Entsprechend kann auch bei voll geladenem Batterie eine geringes spezifisches Gewicht des Elektrolyts gemessen werden. Schwingungen oder Schiffsbewegungen helfen natürlich bei der Durchmischung.

- Temperatur-Korrektur bei der γ - Bestimmung mit dem Säureheber

Das spezifische Gewicht ist umgekehrt proportional zur Temperatur. Pro 14°C Temperaturanstieg oberhalb 20°C fällt der gemessene Wert um 0,01 d.h. eine Messung von 1,27 bei 34°C entspricht 1,28 bei 20°C.

- Gebietsabhängige Anpassung des spezifischen Gewichtes γ

Die γ -Werte in der obenstehenden Tabelle gelten in Gebieten mit gemäßigttem Klima. In warmen Klimazonen wird im allgemeinen Schwefelsäure geringerer Konzentration benutzt um den Negativeffekt der hohen Umgebungstemperatur auf die Lebensdauer der Batterien gering zu halten:

γ bei vollgeladenem Batterie in gemäßigttem Klima: 1,265 – 1,285

γ bei vollgeladenem Batterie in subtropischem Klima: 1,250 – 1,265

γ bei vollgeladenem Batterie in tropischem Klima: 1,235 – 1,250

3.1.2 Batteriespannung

Für eine ungefähre Abschätzung des Ladezustandes kann auch die Batteriespannung herangezogen werden (Siehe auch Tabelle 3.1.1). Eine brauchbare Angabe erhält man jedoch nur dann, wenn die Batterie einige Zeit unbelastet war (keine Ladung/Entladung).

3.1.2 Amperestunden Zähler

Die sicherste und einfachste Methode den Ladezustand zu überwachen ist mit einem Amperestunden Zähler gegeben. Der Batteriemonitor, ein Produkt, das speziell für diesen Zweck entwickelt wurde, wird im nächsten Abschnitt vorgestellt.

3.2 Der Batteriemonitor als Amperestunden Zähler

Die wichtigste Aufgabe des Batteriemonitors ist die Beobachtung und die Anzeige des Ladezustandes einer Batterie um damit insbesondere eine unerwartete weitgehende Entladung zu verhindern. Ein Batteriemonitor überwacht die Lade- und Entladeströme der Batterien. Die zeitliche Integration dieser Werte liefert dann Angaben über Amperestunden die der Batterie zugeführt oder entnommen wurden. Bei konstantem Strom reduziert sich die Integration auf eine einfache Multiplikation von Ladestrom und Zeit. Beispielsweise ergibt ein Entladestrom von 10 A über eine Zeit von 2 Stunden eine Entladung von 20 Amperestunden (Ah).

3.3 Der Energie-Wirkungsgrad einer Batterie

Beim Laden und Entladen einer Batterie entstehen Verluste. Die Gesamtmenge an Energie, die während der Entladung abgegeben wird, ist ca. 25% niedriger als die während des Ladevorganges zugeführte: Der Wirkungsgrad ist 75%. Hohe Lade oder Entladeströme verringern den Wirkungsgrad. Die Hauptursache für die Verluste ist der Unterschied zwischen Entlade- und Ladespannung, d.h. die Entladespannung ist immer niedriger als die Ladespannung. Weitere Verluste entstehen dadurch, daß gegen Ende des Ladezyklus ein Teil des Ladestroms für die Aufspaltung des Elektrolytwassers in Sauerstoff und Wasserstoff verbraucht wird. Batterien, die nur eine geringe Gasungsneigung haben (geringer Antimon Gehalt) und geringe Innenwiderstände aufweisen, haben die besseren Wirkungsgrade. Wann immer eine Batterie im partiell geladenen Zustand (siehe Abschnitt 2.4.6) betrieben wird, ist der Energie-Wirkungsgrad sehr hoch d.h. er liegt bei ca. 89%.

3.4 Der Strom-Wirkungsgrad

Bei der Aufladung der Batterie werden mehr Ah zugeführt als später bei der Entladung wieder zurückgewonnen werden können. Dieses Verhältnis wird mit Stromwirkungsgrad oder auch Ah- oder Coulomb-Wirkungsgrad bezeichnet. (1 Ah = 3600 C)

Dieser Wirkungsgrad kann nahezu 100% erreichen, solange keine Gasentwicklung stattfindet. Bei der Gasentwicklung wird ein Teil der zugeführten Energie nicht in den chemischen Umwandlungsprozeß an den Platten geleitet, sondern für die Aufspaltung des Wassers in Sauerstoff und Wasserstoff verbraucht. Dies gilt auch für die Endphase des Ladeprozesses bei geschlossenen Batterien (Abschnitt 2.3.2). Lediglich die Ampère Stunden, die in den Platten gespeichert sind, können auch wieder zurückgewonnen werden.

Die Höhe der Verluste und damit der Wirkungsgrad ist eine Funktion von:

- **Der Bauart der Batterie:** geringes Gasen = hoher Wirkungsgrad
- **Der Art und Weise wie geladen wird:** Wenn die Batterie vornehmlich im partiell geladenen Zyklus betrieben wird, und nur gelegentlich eine Vollladung stattfindet, so wird der durchschnittliche Wirkungsgrad höher sein, als wenn nach jeder Entladung wieder eine Vollladung stattfindet.
- **Ladestrom und Spannung:** wenn mit hohem Strom und Spannungswerten und damit auch bei hohen Temperaturen geladen wird, entstehen durch die früher einsetzende Gasentwicklung Verluste, die zu geringerem Wirkungsgraden bezüglich Strom und Energie führen.

In der Praxis variiert der Stromwirkungsgrad zwischen 80% und 95%. Ein Batteriemonitor muß diesen Umständen Rechnung tragen; andernfalls werden die angezeigten Werte zu hoch ausfallen. Wenn erstmals ein Wert von Hand eingestellt werden soll ist zu empfehlen einen niedrigen Wert von z.B. 85% zu wählen, und diesen erst später entsprechend den gewonnenen Erfahrungswerten heraufzusetzen.

3.5 Der Einfluß des Entladestroms auf die Kapazität

Im Abschnitt 2.4.3 wurde bereits auf die Zusammenhänge zwischen Entladestrom und Kapazität hingewiesen. Je schneller die Entladung ist, um so geringer ist die verfügbare Kapazität.

1897 beschrieb der Wissenschaftler Peukert den Zusammenhang zwischen dem Entladestrom I und der Entladezeit T (Zeit zwischen Vollladung und vollständiger Entladung) mit der folgenden Näherungsgleichung:

$$C_P = I^n \times T$$

mit C_P als Konstante (die Peukert-Kapazität) und n als Peukert Exponent. Der Peukert Exponent ist immer größer als 1. Je größer n ist, um so weniger leistet die Batterie bei hohen Entladeströmen. Der Peukert Exponent kann auf der Basis von Messungen an einer Batterie oder an Hand von Entladetabellen oder Diagrammen bestimmt werden.

Mit Werten T_1 und T_2 für zwei sehr unterschiedlich Entladeströme I_1 und I_2 gilt

$$C_P = I_1^n \times T_1 = I_2^n \times T_2$$

und dann:

$$n = \log(T_1 / T_2) / \log(I_1 / I_2)$$

Bei Anwendung dieser Zusammenhänge auf die Tabellen in Abschnitt 2.4.3 ergibt sich damit bei einer Erhöhung des Entladestromes von $C/20$ auf $C/1$ (d.h. bei einer 200 Ah Batterie von $200/20 = 10$ A auf $200/1 = 200$ A) eine Verminderung der verfügbaren Kapazität um 50%!

Ein Batteriemonitor muß daher die verfügbare Kapazität entsprechend der Entladegeschwindigkeit kompensieren. In der Realität ist dies nicht einfach, da eine Bordnetz-batterie zeitabhängig sehr unterschiedlich belastet wird.

3.6 Führt hoher Entladestrom zu Kapazitätsverlusten?

Im Abschnitt 2.4.3 wurde eine Batterie beschrieben, deren Nennkapazität bei einer Entladezeit von 20 Stunden 200 Ah beträgt. Der entsprechende Entladestrom ergibt sich zu

$$I_{20} = C_{20} / 20 = 10A$$

Mit einem Entladestrom von 200 A ist er in 30 Minuten entleert. Obwohl wir mit einer 200 Ah Batterie begannen war er bereits nach einer Entnahme von 100 Ah leer. Dies bedeutet jedoch nicht, daß mit einem Entladestrom von 200 A der Kapazitätsunterschied von 100 Ah entsprechend ($C_{20} - C_1 = 200 - 100 = 100$ Ah) „verschwunden“ ist, sondern daß auf Grund der langsam ablaufenden chemischen Prozesse die Spannung sehr tief absinkt. Daraus folgt aber auch, daß eine Batterie, die mit 200 A entladen wird und bereits nach 30 Minuten scheinbar „leer“ ist, mit einer Zufuhr von 100 Ah wieder nahezu voll sein wird. Analog hierzu muß dieselbe Batterie, wenn sie mit 10 A in 20 Stunden entladen wird, wieder mit 200 Ah aufgeladen werden.

Eine Batterie, die mit hohem Strom schnell entladen wurde, kann sich außerdem selbst regenerieren, so daß nach einer Ruhephase von einigen Stunden bis zu einem Tag die Restkapazität entnommen werden kann.

3.7 Weitere Vorteile eines Batterie-Monitors

Nach meiner Ansicht ist die Möglichkeit außergewöhnliche Ereignisse mitzuzählen und zu registrieren ein großer Vorteil eines Batteriemonitors.

3.7.1 Zählung besonderer Ereignisse

Das Zählen bedeutsamer Ereignisse soll insbesondere dafür sorgen, daß spezielle Gegebenheiten, die möglicherweise schädlich oder für die Wartung wichtig sind, im Speicher des Batteriemonitors festgehalten werden. Dabei kann es sich um folgende Dinge handeln:

- Überspannung
- Unterspannung
- Anzahl der Lade/Entladezyklen
- 100% Entladung
- 100% Ladung

3.7.2 Ereignisspeicherung

Dies beinhaltet die Registrierung und Speicherung von Betriebsereignissen mit der Absicht, sie zu späteren Zeitpunkten wieder aufrufen zu können.

4. BATTERIE-LADUNG: DIE THEORIE

4.1 Einleitung

Es wäre schön, wenn es für die Batterie-Ladung ein einfaches Patentrezept gäbe, das unabhängig von der konkreten Situation allgemein anwendbar wäre. Leider ist das nicht so. Die Situation wird weiter kompliziert durch die Tatsache, daß oft mehrere Lademöglichkeiten für eine Batterie gleichzeitig bestehen und der Nettoladestrom wegen der angeschlossenen Verbraucher nicht genau bekannt ist. Die beste Methode zur Elimination des Einflusses angeschlossener Verbraucher besteht darin, mit konstanter Spannung zu laden. Hier hat sich die bekannte dreistufige Ladecharakteristik durchgesetzt, die mit einer strombegrenzten Phase beginnt, an die sich zwei spannungsbegrenzte Phasen anschließen, nämlich die Absorptionsphase und dann die Erhaltungsphase. Im Abschnitt 5.3.2 wird eine von Victron Energy entwickelte Weiterentwicklung, nämlich die adaptive Ladecharakteristik, beschrieben.

4.2 DIE DREISTUFEN LADUNG (I - U₀ - U)

4.2.1 Konstantstromphase (Bulkladen)

Zu Beginn des Ladezyklus steigt die Batteriespannung schnell auf 2,1 V/Zelle (12,6 V beim 12 V Batterie und 25,2 V beim 24 V Batterie). Danach steigt sie langsam weiter an, bis die Absorptionsspannung (Gasungsspannung) erreicht ist. Während dieser Ladephase nimmt die Batterie den vollen angebotenen Strom an: Der Ladestrom wird in dieser Phase nur durch das Ladegerät begrenzt.

Bei großen Batteriebänken wird empfohlen, den Ladestrom auf C/5 oder noch besser auf C/10 zu begrenzen, was beispielsweise bei einer 1000 Ah Batterie 200 A bez. 100 A entspricht. Preiswerte kleine Batterien werden oft mit höheren Ladeströmen wie z.B. C/3 geladen, obwohl das der Lebensdauer u.U. abträglich ist.

Bis zu einer Ladung von ca. 80% nimmt eine Batterie jeden beliebigen Ladestrom an. Danach wird die Absorptionsspannung erreicht. Nach Erreichung dieses Zustandes nimmt (absorbiert) die Batterie nur den Strom auf, der dieser Ladephase entspricht. Diese erste Spannungsgrenze wird deshalb mit Absorptionsspannung bezeichnet, und die sich anschließende Ladephase ist die Absorptionsphase.

Ein hoher Konstantladestrom führt zur Temperaturerhöhung und zu verstärkter Gasentwicklung sowie zusätzlich zu einer Verlängerung der Absorptionsphase. Mit anderen Worten: Ein hoher Ladestrom ist nicht besonders wirkungsvoll, denn er verkürzt die Ladezeit nur in beschränktem Maße.

In jedem Fall muß der Ladestrom auf C/5 oder weniger begrenzt werden, sobald die Gasungsspannung erreicht ist (bei 20°C beträgt sie ca. 2,4 V/Zelle d.h. 14,4 V bez. 28,8 V/Batterie von 12 V bez. 24 V). Andernfalls kann durch die starke Gasentwicklung die Aktivmasse aus dem Plattengitter gedrängt werden.

4.2.2 Konstantspannungsphase (Absorptionsphase)

Nach Erreichen der Absorptionsspannung wird der Ladevorgang durch die Strommenge begrenzt, die dieser Spannung entspricht. Während der Absorptionsphase nimmt der Strom stetig ab bis die Batterie vollständig aufgeladen ist.

Wie in Abschnitt 2.2.3 bereits beschrieben wurde, läuft beim Laden- oder Entladen ein Diffusionsprozeß ab. Über diesen Prozeß können viele Vorgänge während des Ladens und Entladens erklärt werden:

- Bei schneller aber geringer Entladung geschieht der an den Platten einsetzende chemische Prozeß nicht tief im Platteninneren, sondern bleibt auf deren Oberfläche beschränkt. Um eine so entladene Batterie wieder aufzuladen, ist lediglich eine kurzzeitige oder gar keine Absorptionsphase nötig (Eine Autobatterie wird z.B. immer mit 14 V geladen). Andererseits ist nach einer langen und tiefen Entladung eine lange Absorptionsphase erforderlich um das aktive Material in den Platten wieder vollständig umzuwandeln.
- Starterbatterien mit dünnen Platten benötigen kürzere Absorptionsphasen als Batterien mit dickeren oder mit Panzerplatten.
- Die notwendige Absorptionszeit nimmt in dem Maß ab, in dem die Absorptionsspannung ansteigt, da höhere Spannung zu stärkeren Feldern führt, die wiederum die Diffusionsgeschwindigkeit erhöhen. Entsprechend der Erhöhung der Absorptionsspannung nimmt auch die Gasentwicklung zu, was schließlich dazu führt, daß die Aktivmasse aus dem Plattengitter gedrängt wird. Bei geschlossenen Batterien entweicht das Gas über die Ventile, was ein Austrocknen des Elektrolyts zur Folge hat.

Die weitere Beschäftigung mit dem Thema führt zu Folgendem:

1) **Nasse Blei-Antimon Batterien**

Bei diesem Typ liegen die Grenzen der Absorptionsspannung innerhalb eines relativ breiten Korridors zwischen 2,33 V/Zelle (14 V) mit einer langen Absorptionszeit und 2,6 V/Zelle (15,6 V) bei einer deutlich kürzeren Absorptionsperiode.

Zur Vermeidung übermäßiger Gasentwicklung muß der Ladestrom oberhalb der Gasungsspannung (2,4 V/Zelle) auf maximal 10% (besser ist 5%) der Kapazität begrenzt werden d.h. auf 40A bei einem 400 Ah Batterie. Dies kann durch eine Strombegrenzung am Ladegerät erreicht werden, oder aber durch eine Beschränkung des Ladespannungsanstiegs auf ca. 0,1 V/Zelle und Stunde (0,6 V pro Stunde bei einem 12 V Batterie bez. auf 1,2 V pro Stunde für den 24 V Batterie).

Darüber hinaus sollte beachtet werden, daß nicht jedesmal nach einer Entladung eine vollständige Wiederaufladung erforderlich ist, sondern es ausreicht, wenn im Mittel auf 80% bis 90% aufgeladen wird (partielle Ladung mit genügender Gasentwicklung um Säureschichtung zu vermeiden) und die Batterie lediglich ca. einmal pro Monat vollgeladen wird.

2) Die **Rundzellenbatterie** hat den Vorteil eines relativ weiten der Konstantspannungsbereichs zwischen 14 V und 15 V.

3) Andere **VRLA-Batterien** haben im allgemeinen niedrigere Grenzen der Absorptionsspannung die nicht überschritten werden dürfen. Bei zu hohen Spannungswerten entweicht Gas und die Batterie kann austrocknen.

4.2.2 Die Erhaltungsladung

Wenn die Batterie vollständig geladen ist wird die Spannung weiter abgesenkt um Korrosion und Gasentwicklung so weit wie möglich zu reduzieren. Dabei muß die Spannung allerdings hoch genug bleiben um Selbstentladung zu verhindern d.h. den Batterie voll geladen zu halten.

Eine zu hohe Spannung in diesem Zustand führt zu vorzeitiger Alterung durch Korrosion an den positiven Platten. Bei einer Zunahme der Zellenspannung um ca. 50 mV (d.h. 0,3 V bez. 0,6 V beim 12 V bez. 24 V Batterie) verdoppelt sich die Korrosionsrate.

Im Gegensatz hierzu führt eine zu niedrige Erhaltungsspannung zur Selbstentladung und damit letztendlich zur Sulfatierung.

Bezüglich der Erhaltungsladung soll der Unterschied zwischen nassen und VRLA Batterien an dieser Stelle besonders verdeutlicht werden:

1) Die Empfehlungen hinsichtlich der Höhe der Erhaltungsspannung bei **nassen Batterien** variieren zwischen 2,15 V und 2,33 V pro Zelle (12,9 V bis 14 V beim 12 V Batterie). Nasse Batterien sind **nicht für längere Zeiträume** (mehrere Monate oder Jahre) unter **Erhaltungsladung** geeignet. Dies führt zur Korrosion der Gitter an der Plus-Platte und damit zur Abkürzung der Nutzungsdauer. Bei Batterien mit höheren Antimongehalten sollte regelmäßig destilliertes Wasser aufgefüllt werden.

Die Erhaltungsladung mit bei niedriger Spannung z. B. 2,15 V/Zelle verringert die Alterung und die Gasentwicklung. Es ist jedoch zu empfehlen in regelmäßigen Abständen eine kurze „Auffrischungsladung“ (bei Absorptionsspannung) durchzuführen, um die volle Ladung der Batterie zu erhalten.

- 2) **VRLA-Batterien** sind grundsätzlich für Erhaltungsladungen über längere Perioden geeignet. Untersuchungen haben ergeben, daß die vorstehend für nasse Batterien gegebenen Ladeempfehlungen auch bei diesem Batterietyp zu einer Verlängerung der möglichen Nutzungsdauer führen (Batterietechnik, H. Wenzl, Expert Verlag, 1999).

Die nachstehende Tabelle beschreibt Wasserverluste durch Gasentwicklung bei neuwertigen Batterien mit niedrigem Antimongehalt. Die Gasentwicklung nimmt mit dem Alter zu, und Batterien mit höheren Antimongehalten benötigen die zwei bis fünffache Wassermenge.

	Zellen-Spannung (V)	Batteriespannung (V)	Gasmenge/100Ah (cc/h)	Wasser-Verbrauch pro 100 Ah	Nachfüll-Intervall	H ₂ O-Verlust/Ladezyklus	Ah Verlust/100Ah Batterie-Kapazität
Ruhe-Spannung	2,13	12,8	20	0,1 l/Jahr	5 Jahre		44 / Jahr
Float	2,17	13	25	0,1 l/Jahr	5 Jahre		54 / Jahr
Float	2,2	13,2	60	0,3 l/Jahr	1,5 Jahre		130 / Jahr
Float	2,25	13,5	90	0,4 l/Jahr	1 Jahr		200 / Jahr
Float	2,3	13,8	150	0,6 l/Jahr	10 Monate		300 / Jahr
Absorption	2,33	14	180	0,8 l/Jahr	7 Monate	2 cc	2 / Zyklus
Absorption	2,4	14,4	500	2,2 l/Jahr	3 Monate	3 ccm	3 / Zyklus
Absorption	2,45	14,7	1000	4,2 l/Jahr		4 ccm	4 / Zyklus
Absorption	2,5	15	1500	6,5 l/Jahr		6 ccm	6 / Zyklus

Die Gasung und der Wasserverbrauch gelten für eine sechszellige 12V Batterie. Das Nachfüllintervall bezieht sich auf 0,5 l Wasserverlust pro 100 Ah. Der Wasserüberschuß der Batterie ist auf 1l/ 100Ah bezogen.

Es gelten folgende Beziehungen:

- bei der Zerlegung von 1g Wasser entsteht ein Gasvolumen von 1,85 l Sauerstoff und Wasserstoff.
- beim Verlust einer Ah durch Gasentwicklung entsteht in einer 12V Batterie (6 Zellen) ein Gasvolumen von 3,7 l.

Die Tabelle zeigt, daß eine Erhaltungsspannung von 13,5 V (eine häufig empfohlene Spannung bei den hier behandelten nassen Batterien) ein vernünftiger Kompromiß ist. Eine geringere Spannung kompensiert nicht die Selbstentladung, und höhere Spannung führt dazu, daß mehrmals pro Jahr Wasser nachgefüllt werden muß und außerdem die Batterie wegen der auftretenden Korrosion schneller altert.

Nach meiner Erfahrung ist es sinnvoll, statt einer langwierigen Suche nach dem Gleichgewicht zwischen Selbstentladung und Gasentwicklung, die Batterie einfach abzuklemmen und nach einige Monate wiedervoll zu laden, oder um die Erhaltungsspannung auf einen sehr niedrigen Wert (z.B. 2,2 V/Zelle bzw. 13,2V oder 26,4V) einzustellen und gelegentlich mit höherer Spannung nachzuladen (siehe auch Abschnitt 5.3.2).

4.3 Ausgleichsladung

Für die Alterung einer unvollständig geladenen Batterie sind folgende Ursachen verantwortlich:

- Sulfatierung,
- Säureschichtung (nur bei nassen Batterien, Abschnitt 2.3.6) und
- Zellen-Ungleichgewicht (Abschnitt 2.4.6)

Normalerweise erreichen Batterien ihren vollen Ladezustand in der Absorptionsphase oder nach längerer Erhaltungsladung. Falls über längere Zeit ein partieller Entladezustand bestanden hat, können sie durch folgende Maßnahmen wieder voll aufgeladen werden:

- wiederholtes Durchlaufen des vollständigen Ladezyklus,
- ausreichend lange Absorptions- und Erhaltungsladung und
- eine vollkommene Ausgleichsladung wie sie nachstehend beschrieben wird.

Insbesondere Traktionsbatterien bedürfen von Zeit zu Zeit eine Egalisierung. Hierzu wird zunächst der übliche Ladezyklus durchlaufen, an den sich dann eine strombegrenzte Phase anschließt (3% - 5% der Ah Kapazität z. B. 3 bis 5 Ampere für einen 100 Ah Batterie), während der die Spannung auf 15V - 16V (30V - 32V bei einer 24V Batterie) ansteigt. Diese Ausgleichsladung muß im allgemeinen einige Stunden dauern, bis schließlich das spezifische Gewicht des Elektrolyten auch in der schwächsten Zelle nicht mehr zunimmt. Während dieses Prozesses sollte die Batterie von allen Verbrauchern, die gegen Überspannung empfindlich sein könnten, getrennt sein.

Wann muß eine Ausgleichladung durchgeführt werden?

Zunächst hängt dies vom Batterietyp und von der Art des Betriebs ab. Bei Batterien mit hohem Antimon Gehalt sollte man gelegentlich und nach einer normalen Vollladung das spezifische Gewicht überprüfen:

- Wenn alle Zellen gleiche Werte von $\gamma = 1,28$ zeigen, ist keine Ausgleichladung nötig.
- Wenn γ zwischen 1,24 und 1,28 liegt ist eine Egalisierung zwar noch nicht unbedingt notwendig aber dennoch zu empfehlen.
- Wenn γ in einigen Zellen unter 1,24 liegt sollte egalisiert werden.
- Wenn alle Zellen einen γ -Wert von unter 1,24 aufweisen, hat die Batterie eine ungenügende Ladung; es sollte entweder die Absorptionszeit verlängert oder die Absorptionsspannung erhöht werden.

Bei VRLA-Batterien kann das spezifische Gewicht nicht gemessen werden und bei nassen Batterien mit niedrigem Antimon Gehalt sind die gemessenen Werte unzuverlässig. Um bei diesen Batterietypen eine zuverlässige Aussage über die Vollladung zu erhalten, sollte man den Stromverlauf während der Konstantspannungsphase beobachten. Er muß stetig abnehmen und dann konstant bleiben: dies deutet an, daß der chemische Prozeß der Masseumwandlung abgeschlossen ist, und daß die verbleibende chemische Aktivität auf die Aufspaltung des Wassers in Sauerstoff O_2 und Wasserstoff H (Gasentwicklung) beschränkt ist.

4.4 Temperaturkompensation

Wie bereits in Abschnitt 2.5.9 beschrieben wurde, spielt die Temperatur eine wichtige Rolle beim Laden von Batterien. Die Gasungsspannung und damit auch die Konstant- und Erhaltungsspannung ist umgekehrt proportional zur Temperatur. Das bedeutet, daß eine kalte Batterie bei einer bestimmten Spannung nicht voll wird, während eine warme Batterie bei der gleichen Spannung möglicherweise überladen wird.

Beim Laden einer warmen Batterie kann es ohne Temperaturkompensation zu einer Instabilität (engl. thermal runaway) kommen. Während die Gasungsspannung bei steigender Temperatur abnimmt, steigt der Konstantspannungs- bez. Erhaltungsladestrom an, und die Batterie wird noch wärmer. Das führt dann schnell zu vollständiger Zerstörung der Batterie. Die übermäßige Gasentwicklung drückt die aktive Masse aus den Platten und durch inneren Kurzschluß kann es zur Explosion des Sauerstoff/ Wasserstoff Gasgemisches (Knallgas) kommen.

Die von europäischen Batterielieferanten angegebene Ladespannung bezieht sich auf eine Temperatur von 20°C, und diese kann konstant gehalten werden, solange auch die Batterietemperatur einigermaßen konstant (15°C – 25°C) bleibt. Außerhalb des genannten Bereichs sollte eine Temperaturkompensation vorgesehen werden. Obwohl die Hersteller-Angaben recht unterschiedlich sind, kann eine Temperaturkompensation von $-4\text{mV}/^\circ\text{C}$ und Zelle als gemeinhin akzeptierter Wert gelten. Das führt zu $-24\text{mV}/^\circ\text{C}$ bei einer 12V Batterie und zu $-48\text{mV}/^\circ\text{C}$ bei der 24 V Batterie.

Wenn der Hersteller eine Konstantspannung von z.B. 28,2V bei 20°C angibt, muß diese Spannung bei 30°C auf 27,7V reduziert werden. Dieser Unterschied von 0,5 V sollte nicht vernachlässigt werden.

Wenn bei einer Umgebungstemperatur von 30°C die innere Temperatur der Batterie nochmals um 10°C ansteigt, was während des Ladens völlig normal ist, dann muß die Absorptionsspannung auf 27,2°C zurückgenommen werden. Ohne Temperaturkompensation würde die Ladespannung bei 28,2V liegen haben, wodurch die teure Gel- oder AGM-Batterie schnell zerstört würde.

Dies unterstreicht die Bedeutung der Temperaturkompensation speziell für teure und große Batterien.

4.5 Übersicht

Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht über die Ladeverfahren verschiedener Batterietypen nach einer 50% Entladung. In Praxis sind hiervon abweichende Empfehlungen der Hersteller je nach Anwendungsgebiet möglich. In jedem Fall sollte in Zweifelfällen der Hersteller gefragt werden.

Batterietyp	Legierung	Konstantspannungszeit bei 20 °C	Erhaltungsspannung bei 20 °C
Starter-Batterie	Antimon 1,6%	4 Std. bei 2,50V/Zelle (15,0V) 6 Std. bei 2,45V/Zelle (14,7V) 8 Std. bei 2,40V/Zelle (14,4V) 10 Std. bei 2,33V/Zelle (14 V)	2,33 V / Zelle (14 V) nach einigen Tagen vermindern auf 2,2 V / Zelle (13,2 V)
Rundzellen	Blei - Silber	4 Std. bei 2,50V/Zelle (15,0V) 8 Std. bei 2,45V/Zelle (14,7V) 16 Std. bei 2,40V/Zelle (14,4V) 1 Woche bei 2,30V/Zelle (13,8 V)	2,3 V / Zelle (13,8 V)
Semi Traktion	Antimon 1,6%	5 Std. bei 2,50V/Zelle (15,0V) 7 Std. bei 2,45V/Zelle (14,7V) 10 Std. bei 2,40V/Zelle (14,4V) 12 Std. bei 2,33V/Zelle (14 V)	2,33 V / Zelle (14 V) nach einigen Tagen vermindern auf 2,2 V / Zelle (13,2 V)
Traktion Panzerplatten	Antimon 5%	6 Std. bei 2,50V/Zelle (15,0V) 8 Std. bei 2,45V/Zelle (14,7V) 10 Std. bei 2,40V/Zelle (14,4 V)	2,33 V / Zelle (14 V) nach einigen Tagen vermindern auf 2,2 V / Zelle (13,2 V)
VRLA-Gel Sonnenschein Dryfit A200	Kalzium	4 Std. bei 2,40 V / Zelle (14,4 V) Spannung sollte nicht überschritten werden!	2,3 V / Zelle (13,8 V)
VRLA-Gel Sonnenschein Dryfit A600	Kalzium	4 Std. bei 2,34 V / Zelle (14,04 V) Spannung sollte nicht überschritten werden!	2,25 / Zelle (13,5)

Anmerkung:

- 1) Wenn kein Landstrom vorhanden ist, werden die Batterien auf Yachten häufig sehr schnell geladen und so im partiell geladenen Zustand betrieben. Die ist solange akzeptabel, wie in regelmäßigen Abständen eine Vollladung erfolgt (s.a. Abschnitt 4.3).
- 2) Wenn die Batterie mit einer Spannung, die oberhalb der Gasungsspannung liegt geladen wird, sollte der Strom auf maximal 10% der Kapazität beschränkt werden. Andernfalls muß der Ladeprozess sorgfältig beobachtet werden wobei die Spannung reduziert werden muß, wenn der Strom über die genannten 10% ansteigt.
- 3) Beim Erhaltungsladen mit 2.2 V / Zelle ist eine regelmäßige „Auffrischungsladung“ erforderlich.
- 4) Bezüglich Lebensdauer und Überladungsgefahr ist besonders die Tatsache, daß Start- und Bugschraubenbatterien häufig parallel zur Hauptbatterie geladen zu beachten (s.a. Abschnitt 5.2). Im Ergebnis werden die genannten Batterien oft mit hoher Spannung (15V und mehr) geladen, obwohl sie bereits voll sind. In einer solchen Anordnung sollten keine geschlossenen Batterien eingebaut werden, da die durch das unvermeidliche Gasen schnell austrocknen würden. Eine Ausnahme bildet die geschlossene Rundzellenbatterie, die 15V Ladespannung verträgt.

Nasse und Rundzellen-Batterien werden die genannte Ladungsart zwar überleben, aber sie altern dann schneller. Der wesentliche Alterungsprozeß ist dabei die Korrosion der Zellgitter an den Plusplatten. Die Korrosionsgeschwindigkeit verdoppelt sich bei jeder Spannungszunahme um 50mV/Zelle. Das bedeutet beispielweise für eine Optima Rundzellen Batterie, deren Lebensdauer mit 10 Jahren angegeben wird, bei einer Erhöhung der empfohlenen Float-Spannung von 13,8V auf 15V eine Verkürzung um den Faktor $4 \text{ (} 15-13,8 \text{) } / 0,05 = 4$. Diese Verkürzung auf 2,5 Jahre wird in Wirklichkeit nicht eintreten, da ja nicht konstant mit 15V geladen wird, und sich der Einfluß der Überspannung lediglich auf die Erhaltungsladungsperiode bezieht. Dennoch: als Folge des häufigen Überladens wird die Lebensdauer verkürzt. Ähnliches gilt auch für alle nassen Batterien.

4.6 Zusammenfassung: wie sollte eine Batterie geladen werden?

Aus dem Vorangehenden ergibt sich, daß es kein einfaches Allerweltsrezept für alle Batterietypen und Anwendungsfälle gibt. In der Tat ist kaum irgendwo eine größere Vielfalt von Anwendungs-Szenarien und Batterietypen vorstellbar, als an Bord von Yachten.

Zur Verdeutlichung des Einflusses des Einsatzprofils der Batterie auf deren Ladevorgang wird wieder das Beispiel aus Abschnitt 2.4 gewählt. Die Yacht hat drei Batterien, nämlich die Bordnetz-Batterie, den Start-Akku und die Bugstrahlruder-Batterie.

4.6.1 Die Bordnetz-Batterie

Das Anwendungsprofil ist in Abschnitt 2.4 beschrieben:

- 1) Zyklischer Einsatz im partiellen Ladezustand während des Segelns oder vor Anker. Die Ladung geschieht mit der Lichtmaschine des Motors oder mit dem Bordgenerator. Bei diesem Betriebsprofil sind kurze Ladezeiten erwünscht. Zur Verhinderung frühzeitigen Alterns durch Überhitzung und starke Gasentwicklung ist Temperaturkompensation unumgänglich.
- 2) Kombination von Erhaltungsladungen (Float) und kurzen flachen Entladungen während der Fahrt unter Motor oder der Hafentiegezeit am Landanschluß (Anwendung des DC-Konzepts). Hier besteht die Gefahr, daß ein Dreistufen-Laderegler der Lichtmaschine oder das Ladegerät am Landstrom nach jeder dieser flachen Entladungen auf Bulkladen (Konstantstrom) mit anschließender festeingestellter Konstantspannungsphase schaltet. Dann kann es passieren, daß nahezu durchlaufend eine Konstantspannungsladung erfolgt. Es ist deshalb erforderlich, die Absorptionsladungszeit deutlich abzukürzen. Zum Thema adaptives Laden mehr in Abschnitt 5.3.2.
- 3) Die Batterie wird über längere Zeiträume abgeklemmt oder unter Erhaltungsladung belassen, z.B. während des Winterlagers. In Abschnitt 4.2.3 wurde erwähnt, daß die meisten nassen Batterien sehr schnell altern, wenn sie über lange Zeiträume mit 2,3 V / Zelle (13,8V) geladen werden. Auf Grund meiner persönlichen Erfahrungen und auf Grund von vielen Gesprächen mit Eignern und Werften möchte ich empfehlen, sowohl nasse als auch Gel-Batterien während des Winterlagers abzuklemmen und sie mit Erhaltungsladung von 13,2V und gelegentlicher Auffrischungsladung zu pflegen.

4.6.2 Die Starterbatterie

Diese Batterie unterliegt zwei Betriebsarten:

- flache Entladung durch täglich mehrmaliges Starten des Motors
- gar keine Entladung. Dann ist es auch am besten bis auf gelegentliche Erhaltungsladung nicht zu laden

Üblicherweise wird die Starterbatterie parallel mit der Bordnetz Batterie geladen was grundsätzlich in Ordnung ist, solange eine gewisse Abkürzung der Lebensdauer akzeptiert werden kann (siehe Fußnote 4, Abschnitt 4,5).

4.6.3 Der Bugschrauben-Batterie

Da die Bugschraube sehr intensiv genutzt wird, kann es zu tiefen Entladungen kommen, und dennoch soll die Batterie schnell wieder aufgeladen werden. Die einfachste Lösung besteht darin, diese Batterie zusammen mit der Bordnetz Batterie zu laden. Oft werden hier Rundzellen-Batterien wegen des hohen Spitzenstroms eingebaut. Wie in der Fußnote 4 in Abschnitt 4.5 erwähnt wird können derartige Batterien hohe Ladespannungen gut vertragen.

5 BATTERIE-LADUNG MIT LICHTMASCHINE ODER LADEGERÄT

5.1 Die Wechselstromlichtmaschine

Der Hauptmotor einer Yacht ist üblicherweise mit einem Wechselstromgenerator* mit eingebautem Regler und mit Temperaturkompensation ausgerüstet. Die Temperatur wird im Regler gemessen. Dies wurde aus der Autotechnik übernommen, bei der üblicherweise die Batterietemperatur mit der des Reglers übereinstimmt. Im Auto ist weiterhin die Batterie fast immer voll geladen, da sie nur beim Motorstart geringfügig entladen wird. Anschließend liefert der Dynamo ausreichend Strom, auch im stationärem Betrieb, um alle Verbraucher ausreichend zu versorgen und die Batterie wieder aufzuladen. Da die Batterie in der Regel nie tief entladen wird, und meistens ausreichende Ladezeit vorhanden ist, wird die in Abschnitt 4 behandelte Absorptionsphase überflüssig. Der Dynamo lädt mit einem von der Drehzahl abhängigen Strom bis die eingestellte Erhaltungsspannung erreicht ist. Anschließend wird mit konstanter Spannung weitergeladen. Die Spannung ist üblicherweise auf 2,33 V/Zelle d.h. 14V bei 12V Systemen und 28V bei 24V Systemen eingestellt. Diese Lademethode arbeitet ausgezeichnet unter den folgenden Voraussetzungen:

- es handelt sich um eine Platten-Batterie
- die Batterie ist nahezu ständig voll geladen
- der Temperaturunterschied zwischen Lichtmaschine und Batterie ist klein
- der Spannungsabfall über Kabelverbindungen zwischen der Batterie und dem Dynamo ist vernachlässigbar (d.h. < 0,1V einschließlich Schalter, Isolation etc.).

Sobald eine der genannten Voraussetzungen nicht erfüllt ist, können Probleme entstehen.

In den folgenden Abschnitten wird die Praxis des Ladens einer Bordnetzatterie Schritt für Schritt erläutert. Für eine erschöpfende Behandlung aller Probleme in Verbindung mit Reglern von Wechselstromdynamos, Isolatoren und anderen dazugehörigen Dingen sei das Standardwerk von Nigel Calder „Boatowner's Mechanical and Electrical Manual“ empfohlen. Außerdem sei auf die Web-Seiten von Ample Power (amplepower.com) Balmar (balmar.net) und Heart Interface (xantrex.com) hingewiesen.

* In einer Wechselstrom-Lichtmaschine sind Gleichrichterdiode eingebaut, so daß an den Klemmen Gleichstrom anliegt

5.2 Wenn die Lichtmaschine mehrere Batterien lädt

5.2.1 Einleitung

Eine Yacht hat üblicherweise mindestens zwei Batterien: eine die ausschließlich zum Starten des Hauptmotors dient und die Bordnetzatterie. Um sicherzustellen, daß der Hauptantrieb jederzeit startbereit ist, sind alle Verbraucher (Navigation, Beleuchtung, Autopilot, Kühlschränke etc.) auf die Bordnetzatterie gelegt.

Oft ist noch eine dritte Batterie an Bord, z.B. für den Bugstrahler, aber auch ein Vierter kann u.U. allein für die Navigations- und Kommunikationsausrüstung vorhanden sein. Die Batterien sind durch Relais, Trenndioden oder sonstwie voneinander getrennt. In größeren Bordsystemen hat die Starterbatterie häufig einen eigenen Dynamo. Auch die Spannung kann unterschiedlich sein, z. B. 12V für Starter und Navigationsausrüstung und 24V für den Bugstrahler und den Servicebereich.

5.2.2 Problemstellung

Wenn eine normale Kraftfahrzeugdynamo benutzt wird um mehrere Batterien gleichzeitig zu laden, entstehen folgende Probleme:

- Üblicherweise sind auf einem Schiff die Kabelwege wesentlich länger als bei Autos wodurch ein Spannungsabfall entsteht. Der Spannungsabfall über ein Kabel von 5m Länge und einem Querschnitt von 10 mm² beträgt 0,5V bei einem Strom von 50 A.
- Trenndioden verursachen zusätzlichen Spannungsabfall: 0,4V bis 0,8V bei Silizium Dioden und 0,1V bis 0,4V bei FET-Transistoren
- Die Lichtmaschine im Motorraum registriert eine Temperatur von 40°C oder mehr, während die Bordnetzatterie tiefer im Schiff deutlich kälter ist, z.B. 20°C. Das führt zu einer zu niedrigen Ladespannung auf Grund der Temperatur-Kompensation.
- Der Bordnetzatterie wird üblicherweise recht tief entladen und muß mit hoher (Absorptions-) Spannung geladen werden. Das ist besonders dann gegeben, wenn die Lichtmaschine am Hauptmotor die einzige Stromquelle ist, die kurzzeitig zum Laden genutzt werden kann.
- Der Starter Batterie ist nahezu dauernd voll geladen und benötigt keine Absorptionsladung.
- Vielfach werden zum Starten, für die Bugschraube und den Bordnetzbereich unterschiedliche Batterietypen verwendet. Jeder Typ hat seine eigene Ladecharakteristik.

5.2.3 Die Lösungsmöglichkeiten

Es ist sicher übertrieben zu behaupten, es gäbe so viele Möglichkeiten wie Boote, aber ebenso sicher ist, daß die Zahl der Lösungswege erheblich ist. gibt. Nachstehend werden einige und sicherlich nicht alle vorgestellt.

5.2.3.1 Einfach und nicht teuer: mikroprozessor gesteuerte Batterietrennung

Die Starterbatterie wird direkt and die Lichtmaschine angeschlossen. Zwischen den Dynamo und den Bordnetzatterie wird ein Mikroprozessor gesteuerter Trennschalter gesetzt (z.B. Cynix von Victron Energy). Wann immer einer der beiden Batterien geladen wird (die Starterbatterie durch die Lichtmaschine und der Service-Batterie durch das Ladegerät), und die Spannung bis auf nahe 14V oder 28V ansteigt, schließt der Mikroprozessor das Relais, so daß beide Batterien parallel geladen werden. Sobald Strom entnommen wird und die Spannung abfällt, öffnet das Relais so, daß beide Batterien wieder getrennt sind.

Diese Lösung ist einfach und nicht teuer. Der Dynamo muß nicht verändert oder gar ersetzt werden. Der Nachteil ist die lange Ladezeit für die Bordnetzatterie, da die Ladespannung an der unteren Grenze liegt. Oft wird auch der Motor abgestellt lange, bevor die Batterie voll ist. Dies ist solange kein Problem wie die Batterien regelmäßig voll geladen werden wenn z.B. Landstrom verfügbar ist.

Der „Cyrinx“-Batterietrenner ist bidirektional: an beiden Plus-Polen wird die Spannung gemessen, und der Ladestrom läuft einfach vom Batterie mit der höheren Ladespannung zu dem mit der niedrigeren. Als Beispiel: Die Lichtmaschine ist an die Starterbatterie angeschlossen und das Ladegerät an die Bordnetzatterie; wenn diese beiden Speicher über ein „Cyrinx“ verbunden werden, können beide sowohl von der Lichtmaschine als auch vom Ladegerät geladen werden.

5.2.3.2 Erhöhung der Dynamospannung

Die meisten Lichtmaschinen mit eingebautem Regler können auf höhere Ladespannungen eingestellt werden. Durch Reihenschaltung einer Diode mit dem Spannungsmesser des Reglers wird die Ladespannung um ca. 0,6V heraufgesetzt. Dies ist zwar eine Arbeit für den Fachmann, aber es ist eine preiswerte Lösung, die es in Verbindung mit den in 5.2.3.1 genannten Maßnahmen ermöglicht, die Batterien schneller zu laden. Eine stärkere Überladung kann erst dann eintreten, wenn der Motor längerfristig läuft. Das Problem ist dadurch lösbar, daß man die Batterie in einem solchen Fall einfach abklemmt. Das sollte man allerdings nicht während des Ladebetriebs tun, da die entstehende Spannungsspitze die Gleichrichterdiode der Lichtmaschine zerstören kann.

5.2.3.3 Mehrstufenregler mit Temperatur und Spannungskompensation

Falls die Entscheidung in Richtung eines Mehrstufenreglers entsprechend Abschnitt 4 geht, ist auf höchste Qualität und die folgenden Einbauaspekte zu achten:

- Der Spannungssensor sollte am Batteriepol messen, denn dadurch werden Leitungsverluste automatisch kompensiert.
- Der Temperatursensor muß an der Bordnetzatterie eingebaut werden.

5.2.3.4 Die Starterbatterie

Die in den beiden vorausgehenden Abschnitten genannten Lösungen verbessern die Ladung der Bordnetzatterie. Nachstehend werden Lösungen für die Starterbatterie genannt. Die Batterien sollen gleichzeitig bei laufendem Motor über ein Relais, eine Trenndiode oder einen FET Isolator geladen werden. Nahezu der gesamte Ladestrom fließt dann in die Bordnetzatterie, weil sie die größte Kapazität und den geringsten Innenwiderstand hat, sowie partiell oder ganz entladen ist. Dies setzt voraus, daß der Spannungsabfall im Kabel vom Dynamo zur Bordnetzatterie geringer ist, als der vom Dynamo zur Starterbatterie. Zu empfehlen ist, die Ausgangsspannung an der Lichtmaschine auf 15,4V zu erhöhen um so zu gewährleisten, daß auf jeden Fall eine Absorptionsspannung von 14,4V an der Bordnetzatterie ankommt, d.h. ein Spannungsabfall zwischen Dynamo und Batterie von 1V angenommen werden kann. Mit 15,4V als Generatorspannung erreicht die Spannung an der Starterbatterie dann aber leicht 15V (!), weil bei der geringen Strommenge, die dahin fließt, auch der Spannungsabfall gering sein wird. Im Ergebnis wird die Starterbatterie, die schon voll ist, überladen. Welche Lösung bietet sich an?

- a) Die Situation kann zunächst dadurch verbessert werden, daß der Spannungsverlust so niedrig wie möglich gehalten wird. Unter Umständen muß die Starterbatterie früher ausgewechselt werden, was natürlich davon abhängt, wie häufig die vorstehend geschilderte Situation auftritt, und um welche Art von Batterie es sich handelt. Eine Gel-Batterie sollte nicht genommen werden, da sie zu schnell austrocknen kann. In Abschnitt 4.5 werden Abschätzungsmöglichkeiten für die Lebensdauer für entsprechende Batterietypen bei zu hoher Ladespannung angegeben.
- b) Durch Einbau von 1 oder 2 Dioden in das Batteriekabel kann die Spannung am Batteriepol verringert werden.
- c) Durch Einbau eines Serienreglers in das Startbatteriekabel, wie z.B. ein „Eliminator“ von Ample Power.
- d) Laden der Starterbatterie mit einer eigenen Lichtmaschine.

5.2.3.4 Die Bugstrahlruder-Batterie

Die Rundzellenbatterie (Typ Optima) eignet sich hervorragend für diese Anwendung. Diese Bauart zeichnet sich durch hohe Stromabgabe und die schnelle Wiederaufladbarkeit mit hohen Strömen aus.

5.3 Batterieladegeräte: vom Wechselstrom zum Gleichstrom

5.3.1 Einleitung

In den Abschnitten 2, 3 und 4 wurde erklärt, welche Ladungsmöglichkeiten für Batterien es gibt, und warum sie schnell altern, wenn sie nicht richtig geladen werden. In Abschnitt 5.2 wurde gezeigt, daß die Batterieladung mit der Lichtmaschine des Motors Kompromisse erfordert. Mit reinen Ladegeräten wird es weniger schwierig, da sie meistens bei hoher Ausgangsleistung auch mit Temperatur- und Spannungssensoren ausgestattet sind. Viele Ladegeräte haben außerdem zwei bis drei getrennte Ausgänge um mehrere Batterien gleichzeitig laden zu können. Zusätzlich arbeiten fast alle mit einer dreistufigen Ladecharakteristik.

Der Einbau von den Batteriegruppen zugeordneten Ladern ist sicher eine elegantere Lösung als der Einbau mehrerer Lichtmaschinen am Hauptmotor.

5.3.2 Optimiertes Laden mit Ladegeräten

Das Laden von Batterien erfordert sorgfältige Überlegungen und Planungen. In den Phoenix Ladegeräten von Victron Energy wurden alle Erkenntnisse und Erfahrungen, die sie in diesem Handbuch beschrieben sind, berücksichtigt.

Die Ladegeräte haben eine adaptive 4-Stufen Ladecharakteristik

Das Mikroprozessor gesteuerte adaptive Batterie-Management kann auf die jeweiligen Batterietypen eingestellt werden. Die Adaptionfunktion paßt den Ladeprozeß automatisch den Betriebsbedingungen an.

Durch Anpassung der Absorptionszeit sichert das Gerät die richtige Ladungsmenge

Bei geringer Stromentnahme wird die Absorptionszeit verkürzt um Überladung und Gasung zu verhindern. Andererseits wird nach einer Tiefentladung die Absorptionszeit automatisch verlängert um eine vollständige Ladung zu erreichen.

Begrenzung des Spannungsanstiegs (*BatterySafe* Funktion) zur Einschränkung der Alterung durch erhöhte Gasentwicklung

Wenn zur Verkürzung der Ladezeit hoher Ladestrom und erhöhte Ladespannung eingestellt wurden, wird der Phoenix Lader nach Erreichen der Gasungsspannung die Geschwindigkeit des Spannungsanstiegs begrenzen. Damit wird übermäßiges Gasen in der Endphase des Ladezyklus verhindert.

Verringerung von Wartungsaufwandes und Alterung bei längerer Stilllegung: (*BatteryStorage* Funktion)

Das Phoenix Ladegerät schaltet auf die Betriebsart „Stilllegung“, wenn nach mehr als 24 Stunden kein Strom entnommen wird. Die Zellenspannung wird dann auf 2,2V reduziert (13,2V beim 12V Batterie). Die Gasentwicklung unterbleibt dann fast völlig, und die Korrosion wird weitestgehend unterbunden. Wöchentlich einmal wird die Spannung kurzzeitig auf das Absorptionsniveau angehoben um die Batterie nachzuladen. Dies verhindert Säureschichtung und Sulfatierung an den Platten.

Drei Ausgänge für drei Batterien

Die Phoenix Ladegeräte haben drei Ausgänge wovon zwei den vollen Ausgangstrom abgeben können. Der dritte Ausgang ist für das Laden der Starterbatterien vorgesehen. Der Ausgang ist auf 4A begrenzt und hat eine etwas geringere Ausgangsspannung.

Temperaturkompensation

Ein auf dem Minus-Pol der Batterie montierter Temperaturfühler sorgt für eine Spannungsreduktion bei ansteigender Batterietemperatur. Diese Funktion ist besonders bei Gel- und AGM-Batterien von Bedeutung, um überladungsbedingtes Austrocknen zu verhindern.

„Voltage Sense“

Zur Kompensation von Spannungsverlusten in der Verkabelung sind Phoenix Ladegeräte mit einer „Voltage Sense“ genannten Funktion ausgerüstet, die dafür sorgt, daß die Batterien die jeweils richtige Ladespannung erhalten.

5.3.3 Laden von mehreren Batterien

Das Problem ist analog zu dem in Abschnitt 5.2.2 für die Lichtmaschine beschriebenen. Die preiswerteste Lösung ist ein Ladegerät mit mehreren Ausgängen. bei der Besten hat jede Batterie ein Ladegerät.

5.3.3.1 Mehrere Batterien an einem Ladegerät

Viele Ladegeräte haben zwei oder drei Ausgänge die voneinander durch Dioden getrennt sind. Die Spannung wird am Primäreingang der Dioden geregelt, und sie ist im allgemeinen etwas höher eingestellt, um den mittleren Spannungsverlust die Dioden selbst zu kompensieren. Zusammen mit der Verkabelung kann hier insbesondere bei hohem Strom ein Spannungsverlust von mehr als 1,5V auflaufen. Bei niedrigen Strömen reduziert sich der Abfall auf weniger als 0,5V. Das bedingt nun beispielsweise, daß eine Ladespannung von 14,4V bei niedrigem Strom auf 13,4V bei hohem Strom abfällt. Dies ist solange ohne Bedeutung wie die Batterien regelmäßig geladen werden, ohne daß gleichzeitig viel Strom durch angeschlossene Verbraucher entnommen wird. Die genannte Ladespannung von 14,4V kann nämlich nur dann erreicht werden, wenn der Strom während der Konstantspannungsphase auf einen niedrigen Wert sinkt.

Temperaturkompensation:

Die Temperaturkompensation ist dann nur eingeschränkt wirksam, wenn die einzelnen Batterien unterschiedliche Temperatur haben

„Voltage Sense“:

Die Kompensation des Spannungsabfalls durch die Messung der Ladespannung direkt am Gleichstromeingang von einer der Batterien resultiert in einer richtigen Ladung dieser Batterien und einer eventuellen Überladung der Übrigen.

5.3.3.2 Je ein Lader für eine Batteriegruppe ist sicher die beste aber auch die teuerste Lösung.

5.3.3.3 Mikroprozessor gesteuerte Batterietrennung

Ein guter Kompromiß besteht darin, die teure Bordnetzatterie bestmöglich einschließlich von Temperatur- und Spannungskompensation zu laden, und die übrigen Batterien über eine Mikroprozessor gesteuerte Trennung an diese Batterie anzuschließen. Ein mit dieser Lösung einhergehender weiterer Vorteil ist, daß dann die Lichtmaschine des Hauptmotors auch alle Batterien laden kann.

6. ENERGIEVERBRAUCH ELEKTRISCHER GERÄTE

6.1 Einleitung

Nach den vorangegangenen Betrachtungen über Batterien und die Batterieladung ist es an der Zeit einige Überlegungen zur Verwendung der gespeicherten Energie anzustellen. Zum besseren Verständnis des Energieverbrauchs der an Bord üblichen Verbraucher ist es hilfreich, sie in drei verschiedene Kategorien einzuteilen.

- **Dauerverbraucher** wie z.B. Standby-Strom für Funkgeräte, Kühlschrank, Kühlbox,
- **Längerdauernde Verbraucher** wie Navigationsbeleuchtung, Selbststeueranlage, Boiler oder Kabinenbeleuchtung, mit Betriebszeiten von einer bis zu mehreren Stunden und
- **Kurzzeitverbraucher** wie z.B. Pumpen, Winschen, Bugstrahlruder, Mikrowelle, Waschmaschine, elektrische Kochplatten, die von einigen Sekunden bis hin zu ca. einer Stunde am Netz sind.

Nach meiner Erfahrung sind nahezu alle -mich selbst dabei eingeschlossen- geneigt, den Energieverbrauch der dauernden und länger dauernden Verbraucher zu unterschätzen und den der Kurzzeitverbraucher zu überschätzen.

6.2 Leistung und Energie

Zunächst einmal ist es wichtig, die Begriffe Leistung und Energie zu trennen.

Leistung ist Arbeit pro Zeiteinheit und wird in Watt (W) oder Kilowatt (kW) angegeben.

Energie ist das Produkt aus Leistung und Zeit. Eine Batterie speichert keine Leistung, sondern Energie. Geringe Leistung über lange Zeiträume kann zu beträchtlichem Energieverbrauch führen und eine Batterie unbemerkt entladen. Energie wird in Watt-Stunden oder Kilowatt-Stunden (Wh; kWh) angegeben.

Gespeicherte Energie in der Batterie wird in Amperestunden (Ah) angegeben.

Energie kann auch als Produkt von Kapazität (Amperestunde) und Spannung angegeben werden, d.h. $Wh = Ah \times V$ und $kWh = Ah \times V \times 1000$.

Eine Leistung von 2kW über eine Stunde entspricht also einem Energieverbrauch von 2kWh. Einer 12V Batterie werden demnach $2kWh / 12V = 166,7$ Ah an gespeicherter Energie entnommen.

Bei einer Leistung von 2kW über eine Sekunde ergeben sich entsprechend $(2000/3600) / 12 = 0,046$ Ah, während je Minute $(2000/60) / 12 = 2,7$ Ah entnommen würden.

Die Leistung von 2kW über 10 Stunden erfordert schon 1667 Ah an gespeicherter Energie!

Zur Vorbereitung auf die folgenden Kapitel werden in den nachstehenden Abschnitten einige Beispiele von Leistung und Energieverbrauch vorgestellt.

6.3 Kühlung

6.3.1 Einleitung

Oft ist der Kühlschrank an Bord ein Quell dauernden Ärgers. Auf kleinen Yachten zieht er oft mehr Energie aus der Batterie als alle anderen Verbraucher zusammen. Auf mittleren Booten bilden Kühlschrank und Kühlbox oft die stärkste Belastung der Batterie.

Bei großen Yachten kann es vorkommen, daß allein wegen der Klimaanlage der Bordgenerator ununterbrochen laufen muß.

Zum besseren Verständnis der Problematik und zur Verdeutlichung der Möglichkeiten werden nachstehend einige theoretische Grundlagen erläutert.

6.3.2

Die Grundlagen der Wärmepumpe

Zur Zeit sind fast alle Kühlschränke Kompressor-Wärmepumpen. Die Wirkungsweise ist die folgende: Ein Kompressor, angetrieben durch einen Wechsel- oder Gleichstrommotor komprimiert ein Gas, das sich dabei erwärmt. Das Gas wird anschließend in einem Wärmetauscher, dem Kondensator, abgekühlt. Auf Yachten gibt es unterschiedliche Kondensatoranordnungen, von kleinen luftgekühlten über den an der Rückwand des Kühlschranks natürlich ventilierten (Haushaltstyp) bis hin zu wassergekühlten Bauarten. Im Kondensator wird das erwärmte Gas verflüssigt wobei Wärme freigesetzt wird. Das abgekühlte verflüssigte Gas wird dann in den Verdampfer im Kühlschrank geleitet. Durch Entspannung verdampft es dort wieder und entzieht dem Inneren des Kühlgerätes die dazu benötigte Wärme. Das verdampfte Kühlmittel fließt dann wieder zum Kompressor und der Prozeß wiederholt sich.

Die Energiemenge, die nötig ist um einer bestimmten Gasmenge eine bestimmte Wärmemenge zu entziehen, kann nach folgender Formel berechnet werden:

$$\epsilon = n_r \cdot n_c = n_r \cdot x T_u (T_h - T_u)$$

mit ϵ = Leistungszahl, T_u = Verdampfertemperatur in Grad Kelvin ($^{\circ}\text{K} = ^{\circ}\text{C} + 273$), T_h = Kondensatortemperatur in $^{\circ}\text{K}$, n_r = Maschinenwirkungsgrad und n_c = der theoretische Kühlwirkungsgrad Carnot-Wirkungsgrad. Der Maschinenwirkungsgrad n_r ist immer kleiner als 1 und berücksichtigt alle in der Kühlmaschine auftretenden Verluste.

Für einen Kühlschrank ergibt sich als Beispiel:

- Wärmetauschertemperatur im Kühlschrank: -5°C d.h: $T_u = -5 + 273 = 268^{\circ}\text{K}$
- Kondensatortemperatur $45^{\circ}\text{C} = 45 + 273 = 318^{\circ}\text{K}$
- Maschinenwirkungsgrad: 25%

Damit wird $\epsilon = 0.25 \times 268 / (318 - 268) = 1,34$

Das bedeutet, daß für jede kWh Wärmeentzug im Kühlschrank eine elektrische Leistung von $1/1,34 = 0,75$ kW elektrische Leistung erforderlich ist.

6.3.3 Kühlschrank und Kühlbox in der Praxis

Der mittlere Energieverbrauch des Kompressormotors eines Kühlschranks liegt bei ca. 50W woraus sich mit einem 12V Batterie ein Strom von 4,2A ergibt. Der Kühlschrank wird thermostatgesteuert ein- und ausgeschaltet. Wenn er 24h durchläuft, würden der Batterie 101 Ah entzogen! Eine Einschaltdauer von 50% ergibt immer noch ca. 50 Ah und selbst bei 25% verbleiben noch 25 Ah.

Das Ziel ist geringerer Energieverbrauch: die Frage ist, wie das erreichbar ist.

- 1) **Verbesserung der Leistungszahl ϵ** durch Verringerung des Temperaturunterschiedes zwischen Verdampfer und Kondensator oder durch Wirkungsgradverbesserung des Kompressors. Wenn z.B. die Kondensatortemperatur auf 20°C reduziert wird, was nicht utopisch ist, da der Kühlschrank meistens unter dem Arbeitsplatz neben dem Spülbecken eingebaut ist, ergibt sich:

$$\epsilon = 0,25 \times 268 (293 - 268) = 2,68$$

Damit sind jetzt nur noch $1/2,68 = 0,37$ kWh erforderlich um 1kWh Wärme abzuführen. Mit anderen Worten: die Ersparnis an elektrischer Energie beträgt 50%! Weitere Verbesserungen können dadurch erreicht werden, daß die Verdampferfläche im Kühlschrank vergrößert wird. Dann reicht eine Temperatur um ca. 0°C statt der im Beispiel genannten von -5°C aus, um die gewünschte Kühlung zu erreichen.

Auch beim Kompressorwirkungsgrad sind Verbesserungen möglich, was in Praxis allerdings schwer umsetzbar ist, da alle nach speziellen Spezifikationen gebaut werden.

2) Verbesserung der Isolation

Zunächst soll bestimmt werden welche Energiemenge nötig ist um Speisen im Kühlschrank zu kühlen. Hierbei ist zu berücksichtigen, daß die spezifische Wärme von Wasser $1,16 \text{ Wh/}^\circ\text{C}$ beträgt. Getränke und die meisten Lebensmittel haben ähnliche Werte. Dies bedeutet, daß zur Erwärmung oder Abkühlung von einem Liter oder kg Nahrung ca. $1,16 \text{ Wh}$ zu- oder abgeführt werden müssen.

Wenn z.B. 5 Liter Mineralwasser, die in der Sonne auf 35°C aufgewärmt wurden, im Kühlschrank auf 10°C abgekühlt werden sollen, müssen dem Wasser $5 \times (35-10) \times 1,16 = 0,145 \text{ Wh}$ entzogen werden. Mit einem ϵ -Wert von 1,34 wird die hierfür nötige elektrische Energie mit $0,145/1,34=0,108 \text{ kWh}$ berechnet. Dies entspricht bei einer 12V Batterie einer Entnahme von 9Ah was nicht allzuviel ist, obwohl eine niedrige Leistungszahl angenommen wurde.

Üblicherweise ist der tägliche Energieverbrauch eines Kühlschranks an Bord recht hoch, meistens zwischen 50Ah und 100 Ah selbst wenn die Tür immer geschlossen bleibt. Die deutet darauf hin, daß der tägliche Energieverbrauch weniger durch Abkühlen von Nahrungsmitteln und Getränken entsteht, als durch Wärmeverluste über Wände und Tür des Kühlschranks.

Zusammengefaßt heißt das:

Hoher Energieverbrauch von Kühlschrank und Kühlbox wird durch schlechte Isolierung und schlechte Leistungszahl ϵ des Kompressors und nicht durch das Abkühlen von Getränken und Speisen verursacht. Verbesserung der Isolierung ist also der Schlüssel zum Energiesparen.

Ein normaler Kühlschrank, wie er in jedem Haushaltsgeschäft gekauft werden kann, ist heutzutage sehr gut isoliert. Der jährliche Energieverbrauch beläuft sich auf ca. 100 kWh, was sich auf tägliche $100/365=0,27 \text{ kWh}$ bez. stündliche $0,27 \times 1000/24=11 \text{ W}$ umrechnen läßt. Mit einem 12 V Kompressor wird damit der tägliche Energieverbrauch $0,27 \times 1000/12=23 \text{ Ah}$. Der Energieverbrauch einer modernen Kühlbox ist ungefähr doppelt so hoch.

Kühlschränke auf Yachten sind häufig Maßanfertigungen. Die Isolierung besteht dann aus Schaum und ist wirklich schlecht, so daß der Energieverbrauch entsprechend hoch ist. Besser ist es einen Standard 220V Kühlschrank zu nehmen, und den über einen Umformer zu betreiben.

6.3.4 Klimaanlage

Klimaanlagen sind Energiefresser. Dies trifft insbesondere auf kleinere Anlagen mit Leistungen von 1 bis 5kW zu, die besonders schlechte Wirkungsgrade haben. Wenn ein Generator vorhanden ist, mag das bis auf den Dieselverbrauch unproblematisch sein. Wenn allerdings die Klimaanlage aus der Batterie betrieben werden soll, spielt der Wirkungsgrad eine wichtige Rolle. Wie beim Kühlschrank handelt es sich bei der Klimaanlage um eine Wärmepumpe mit Kompressor, Kondensator und Verdampfer.

Mit der Leistungszahl-Betrachtung kommt man zu folgendem Ergebnis:

- Kondensator Temperatur: 27°C (Kühlwasser 25°C)
- Verdampfer Temperatur: -15°C (Raumtemperatur 25°C)
- Kompressorwirkungsgrad: 25%

Damit wird $\epsilon = 0,25 \times 288 / (300-288)=6$

In der Praxis liegt die Leistungszahl kleiner Klimaanlagen zwischen 2 und 3! Das liegt hauptsächlich an einer viel höheren Kondensatortemperatur und einer deutlich niedrigeren Verdampfer Temperatur. Wenn man von $\epsilon =2,5$ ausgeht, wird für eine Kühlleistung von 2kW mit $2/2,5=0,8 \text{ kW}$ an elektrischer Leistung erforderlich, die bei einem Betrieb über 10 Stunden $0,8 \times 1000 \times 10/24=333 \text{ Ah}$ aus einer 24V Batterie entnimmt.

Vor der Anschaffung einer Klimaanlage sollte man also gründlich an den Energieverbrauch denken!

6.4 Elektrische Winschen, Ankerwinde und Bugstrahlruder

Selbst auf kleinen Schiffen verbrauchen Winden und das Bugstrahlruder sehr viel Strom, wenn auch nur kurzzeitig.

- Eine Elektrowinde auf einem Schiff von ca. 15 m wird üblicherweise mit einem 1 PS (0,736) Motor betrieben. Bei Nennlast ergibt das $736/12=61$ A im 12V System. Bei einer Laufzeit von einer Minute wird der Verbrauch damit $61/60=1$ Ah (siehe auch 6.2). Der Energieverbrauch ist also trotz des hohen Stroms kein Problem.
- Ein Bugstrahlruder verbraucht mehr Strom. Ein 10 PS (7,36kW) Motor zieht bei einer 24V Batterie einen Strom von 300 A. Mit einer Einschaltdauer von 1 Minute ergibt das lediglich eine Entnahme von $300/60=5$ Ah.

6.5 Waschen und Abwaschen mit Batteriestrom

Ein Waschzyklus bei 60°C mit einer Waschmaschine verbraucht 0,9kWh an elektrischer Energie bzw. $900/24=38$ Ah aus einer 24 V Batterie. Bei 40 °C reduziert sich das auf 0,6 kWh bzw. auf $600/24=25$ Ah. Bei einem Geschirrspüler liegen die Werte ähnlich.

Der Großteil der Energie wird für die Erwärmung des Wassers verbraucht womit sich der große Unterschied in der Absenkung von 60°C auf 40°C erklärt. Wenn mit bereits erwärmtem Wasser gewaschen wird, läßt sich der Energieverbrauch noch weiter absenken.

Der Energieverbrauch eines Wäschetrockners ist beträchtlich! Die Leistungsaufnahme liegt bei 3 kW und bei einer Trocknungsdauer von 1 Stunde werden einem 24V Batterie $3000/24=125$ Ah entnommen. Der Grund liegt darin, daß der Trocknungsprozeß mit vorgewärmter Luft abläuft. Waschtrockner, die mit Luftvorwärmung über Warmwasser Wärmetauscher arbeiten, sind nicht bekannt. Ein vollständiger Wasch- und Trocknungszyklus mit auf Yachten typischerweise eingebauten Kombinationsgeräten benötigt ca. 2.7 kWh.

6.6 Elektrisches Kochen ist möglich

Die oft vertretene Auffassung, elektrisches Kochen sei an Bord nicht möglich, kann durch eine überschlägige Rechnung widerlegt werden. Auf meinem Trimaran benutze ich ein Kochfeld mit zwei Induktionsplatten in Verbindung mit einem Phoenix Multi 24/3000/70 an einer 24V/200 Ah Batterie. Der Vorzug der Induktionsplatte ist, daß nicht die Platte erwärmt wird, sondern direkt der Topfboden. Im übrigen ist elektrische Induktion ca. 20% effizienter als die normale Platte.

Der theoretische Hintergrund ist recht einfach: bereits in Abschnitt 6.3.3 wurde festgestellt, daß die spezifische Wärme von Wasser 1,16 Wh pro °C ist. Theoretisch sollte also 1l Wasser von 20°C mit $1,16 \times (100-20)=93$ Wh zum Kochen gebracht werden. In Wirklichkeit werden mehr als 100 Wh gebraucht, weil es unvermeidbare Verluste gibt, die von der Wärmekapazität des Topfes und anderen Gegebenheiten abhängig sind. Ein Teil dieser Verluste kann dadurch aufgefangen werden, daß Warmwasser aus dem Boiler entnommen wird. 100 Wh sind dennoch ein vernünftiger Überschlagswert.

Und jetzt zum eigentlichen Kochen: Es wird beispielsweise für vier Personen Spaghetti mit selbstgemachter Sauce und einen Pudding zum Nachtisch geben.

Zunächst werden vier Liter Wasser zum Kochen gebracht, dann werden die Spaghetti hinzugefügt. Das Ganze wird abermals aufgekocht und dann für acht Minuten auf kleinerer Flamme weitergekocht. Der Energieverbrauch ist: 400 Wh für das Wasserkochen, 100 Wh zum Wiederaufkochen und 400 W über acht Minuten Garzeit, zusammen also $400+100+400 \times 8/60 = 550$ Wh.

Für die Sauce werden zunächst Zwiebeln geschmort (150 Wh), dann wird Hackfleisch dazugegeben, und das Ganze wird erneut erhitzt (150 Wh). Anschließend werden frische Tomaten, Kräuter und Gewürze hinzugegeben und mit 1 l Wasser (also 100 Wh) erhitzt und für 20 Minuten garen gelassen (200 W über 20 Minuten). Das ergibt zusammen $150+150+100+200 \times 20/60=470$ Wh.

Für den Nachtisch werden 2 Liter Milch aus dem Kühlschrank genommen und erwärmt (300 Wh) und dann 3 Minuten auf kleiner Flamme warm gehalten (30 Wh), zusammen also 330 Wh.

Insgesamt wird für die Mahlzeit folgende Energiemenge benötigt: $550+470+330=1350$ Wh bez. $1350/24=56$ Ah aus einer 24 V Batterie.

Die Überprüfung in der Praxis bestätigt diesen Überschlag, und man kann damit rechnen, daß für eine 4 Personen Mannschaft eine 3 Gänge-Mahlzeit zwischen 1200 und 1400 Wh bez. 50 bis 60 Ah aus einer 24 V Batterie verbraucht werden.

6.7 Der Tauchkompressor

Für Freunde des Tauchsports ist es angenehm, einen Tauchkompressor an Bord zu haben um nicht nach jedem Tauchgang einen Hafen zum Wiederaufladen der Atemluftflaschen anlaufen zu müssen. Ein kleiner Tauchkompressor hat einen Elektromotor von ca. 3 kW, wobei der Anlaufstrom ungefähr das 10 fache beträgt. Kurzum: zuviel für einen Landanschluß, und auch zuviel für einen Umformer oder den Generator.

Die Lösung liefert ein Drehstrommotor mit Frequenzregler mit einem Eingang zum Anschluß an den Umformer oder den Landanschluß und einem Dreiphasen-Ausgang. Der Frequenzregler sorgt für ein allmähliches Anlaufen mit vernachlässigbarem Anlaufstrom.

Für das Auffüllen einer 10 Liter Druckluftflasche werden ungefähr 30 Minuten benötigt. Daraus ergibt sich mit einer 24V Batterie ein Verbrauch von $(3 \text{ kW}/24\text{V}) \times 0,5 = 62 \text{ Ah}$.

6.8 Anlaufstrom von Wechselstrommotoren

Eine Lösung dieses Problems ist im vorangehenden Abschnitt aufgezeigt. Die andere Möglichkeit ergibt sich mit der Verwendung von Drehstrommotoren.

6.9 Zusammenfassung

Der schlecht isolierte Kühlschrank verbraucht mehr Energie als kurzzeitige Verbraucher wie Waschmaschine, Geschirrspüler oder als elektrische Kochplatten.

7. GENERATOREN

7.1 Dieselmotor mit 50 Hz oder 60 Hz Wechselstromgenerator

Wenn die Stromerzeugung mit der Lichtmaschine am Hauptmotor nicht mehr ausreicht, ist das die übliche Art, den notwendigen Strom zu erzeugen.

7.1.1 Höhere Belastung ist besser als geringere

Für die Erzeugung von 50 Hz oder 60 Hz Wechselstrom muß der Generator mit konstanter Drehzahl arbeiten, d.h. für einen 50 Hz Wechselstrom mit 3000 min^{-1} oder 1500 min^{-1} je nach Polzahl ($3000 \text{ min}^{-1} / 60 \text{ sec} = 50 \text{ sec}^{-1} = 50 \text{ Hz}$). Bei geringer oder keiner Belastung wird der Motor trotz hoher Drehzahl nicht warm und es kann zu Feuchtigkeitsausscheidungen im Schmieröl und zu Rußbildung kommen. Es ist also nicht zu empfehlen, den Generator tagsüber durchlaufen zu lassen ganz abgesehen vom Lärm und sonstigen Belästigungen.

7.1.2 Ein Hybridsystem

Hier bietet sich eine Hybridlösung an, die den Generator nur bei hohen Stromanforderungen zuschaltet und ansonsten den Strombedarf über den Umformer aus der Batterie abdeckt. Das System kann durch Parallelschaltung mehrerer Phoenix Multi oder MultiPlus dem Bedarf angepaßt werden (siehe Beispiel in 10.6). Die Vorteile sind:

- ununterbrochene Wechselstromversorgung an Bord
- bessere Auslastung und Verringerung von Raumbedarf und Gewicht durch mögliche Reduzierung der Generatorgröße. Durch die Parallelschaltung von MultiPlus und Generator werden Belastungsspitzen durch Zuschaltung von Batteriestrom vermieden (siehe Beispiel 10.6.5 und die Schrift „Das Unmögliche wird wahr“ sowie die Webseite).

7.1.3 Landstrom nicht zu vergessen

Waschmaschine, Geschirrspüler, elektrische Kochplatten, u.U. Klimaanlage sind Verbraucher die sicherlich von einem entsprechenden Generator versorgt werden können. Im Hafen jedoch ist das problematisch, und oft ist der angebotene Landstrom relativ niedrig abgesichert. Selbst mit 16 A sind das gerade mal 3,68 kW ($230\text{V} \times 16\text{A}$). Auch hier als bietet die MultiPlus-Lösung einen Ausweg an.

7.1.4 3000 oder 1500 min^{-1}

Bei häufigem und länger dauerndem Generatorbetrieb mit höherer Belastung sollte eine Maschine mit 1500 min^{-1} gewählt werden. Geräte mit 3000 min^{-1} sind im allgemeinen nicht für Dauerbetrieb bei Nennlast ausgelegt. Sie sollten deshalb bei längerem Betrieb keinesfalls mit mehr als 80 % der Nennleistung betrieben werden. Die Hersteller von Generatorsätzen benutzen häufig die gleichen Motoren, geben aber verschiedene Leistungen an. Ein detaillierter Vergleich ist daher zu empfehlen.

7.2 Gleichstromgeneratoren

Neben den erwähnten 230V Generatoren bieten immer mehr Hersteller auch Gleichstrom-Generatoren an. Bei Leistungen von 10kW kann man damit einen Ladestrom von nahezu 300A bei 28V erzeugen. Im Vergleich zu den Wechselstrommaschinen sind Gleichstromgeneratoren leichter und haben einen besseren Wirkungsgrad. Darüber hinaus kann die Drehzahl der erforderlichen Leistung angepaßt werden, so daß selbst bei geringer Last der Wirkungsgrad hoch bleibt. Der Gleichstromgenerator wird zur Batterieladung eingesetzt. Über Umformer wird dann Wechselstrom erzeugt. Die Leistungsbestimmung hängt von der möglichen Zahl der täglichen Betriebsstunden und von der zulässigen Höhe des Ladestroms ab. Der hohe Ladestrom setzt eine entsprechende Batteriekapazität voraus. Bei 300A sollten das beispielsweise 1500Ah wenn mit C/5 geladen wird (siehe Abschnitt 2.4.6).

8. KLEINE ENERGIE-ERZEUGUNGSANLAGEN

8.1 Einleitung

Im vorliegenden Buch werde kleine Anlagen zur Energieerzeugung von einigen hundert Watt bis zu 10 kW behandelt. In 24 Stunden ergeben sich damit $24 \times 0,2 = 4,8\text{kW}$ bis zu $24 \times 10 = 240\text{kW}$ an elektrischer Leistung. Das ist in etwa die Menge, die eine kleine Personengruppe in einer Wohnung, in einem Wohnmobil oder auf einem Schiff benötigt um einigermaßen komfortabel zu leben.

Derzeit gibt es für derartige Anwendungen einige neue Entwicklungen, die es sinnvoll erscheinen lassen, bisher übliche Konzepte und Lösungen einer kritischen Betrachtung zu unterziehen. Ein wesentlicher Teil des Problems liegt in der Beherrschung der zeitlich erheblichen Leistungsschwankungen: Während zeitweise der Verbrauch gegen Null gehen kann, werden u.U. kurzzeitig später sehr hohe Leistungen verlangt.

Beim Einsatz eines Dieseldgenerators zur Deckung des Leistungsbedarfes muß dieser zunächst nach der Maximalleistung ausgelegt werden. Im Betrieb wird er aber nur selten ausgelastet werden, was neben hohem Treibstoffverbrauch zu unnötiger Lärm- und Abgasbelastung und zu erhöhten Wartungsaufwand führt.

Weiterhin ist vorwiegend bei Yachten der Landanschluß ein Problem. Häufig ist wegen zu niedriger Absicherung der Betrieb größere Verbraucher wie Waschmaschine, elektrische Kochplatten oder Klimaanlage nicht möglich. Vor allem in Übersee können zusätzlich Probleme durch nicht angepaßte Netzfrequenz (60 Hz) entstehen. Mit den erwähnten neuen Technologien können in diesen Fällen relativ einfache und kostengünstige Lösungen angeboten werden.

8.2 Neue Technologie für die Gleichstromlösung

8.2.1 Das Gleichstromkonzept

Die Batterie ist das Herz des Gleichstromkonzepts: Energieerzeuger und Verbraucher sind daran angeschlossen. Die Batterie ist in der Lage Angebot und Nachfrage von Energie durch Abgabe und Speicherung auszugleichen. Sie wirkt gewissermaßen als Puffer zwischen Angebot und Nachfrage. Anders ausgedrückt: die Batterie übernimmt den Spitzenausgleich.

Das Gleichstromkonzept wird auf nahezu allen kleineren Yachten angewendet. Strom wird durch eine oder mehrere vom Hauptmotor angetriebene Lichtmaschinen erzeugt. Gelegentlich werden auch noch andere Quellen wie Solarzellen, Windgeneratoren oder Wasserturbinen genutzt. Alle Erzeuger laden in die Bordnetz- bzw. Hauptbatterie aus der alle Verbraucher wie z.B. die Navigationsgeräte, die Beleuchtung, der Umformer etc. daraus versorgt werden.

Auf größeren Yachten hingegen ist die übliche Lösung ein ständig oder zeitweise laufender 230V Dieseldgenerator für die elektrisch betriebenen Haushaltsgeräte und Maschinen.

In den folgenden Abschnitten werden drei neuere Entwicklungen vorgestellt, die auch für größere Yachten das Gleichstromkonzept vorteilhaft werden lassen.

8.2.2 Gleichstromgeneratoren

Zunehmend mehr Hersteller bieten heutzutage neben 230V Wechselstromgeneratoren auch Gleichstrommaschinen an. Sie sind vergleichsweise leichter und haben einen besseren Wirkungsgrad. Darüber hinaus kann die Drehzahl der erforderlichen Leistung angepaßt werden, wodurch selbst bei geringer Last der hohe Wirkungsgrad erhalten bleibt und Lärm sowie Verschleiß reduziert werden.

8.2.3 Unbeschränktes Stromangebot aus dem Umformer

Sinus-Umformer sind heutzutage Stand der Technik und werden mit immer größeren Leistungen angeboten.

Durch die neue Möglichkeit der Parallelschaltung mehrerer Umformer wird das Leistungsspektrum deutlich erweitert. Victron Energy hat Umformer und Umformer/Lader Kombinationen entwickelt, die sowohl für Einphasen- als auch für Dreiphasenbetrieb parallel geschaltet werden können. Beispielsweise liefern die Multi 12/2500/120 bzw. 24/3000/70 eine Dauerleistung vom 2kW bei 12V bzw. 2,5kW bei 24V. Je Phase können maximal 5 Geräte parallel geschaltet werden. Bei einem 24V System können beispielsweise die folgenden Ausgangsleistungen bereitgestellt werden:

Einphasenbetrieb 6 x Multi 24/3000	Dauerleistung 6 x 2,5 = 15kW	P30 18kW	Maximalleistung 30kW
Dreiphasenbetrieb 18 x Multi 24/3000	Dauerleistung 18 x 2,5 = 45kW	P30 54kW	Maximalleistung 90kW

Daraus folgt, daß für alle in diesem Buch beschriebenen Anwendungen ein reichliches Leistungsangebot bereitgestellt werden kann. Wo früher ein 230V Dieselgenerators notwendig war, bieten jetzt parallelgeschaltete Umformer eine echte Alternative.

8.3 Das Wechselstrom-Konzept mit *PowerControl* und *PowerAssist*

8.3.1 Das Wechselstrom-Konzept

Einer oder mehrere Dieselgeneratoren sind die zentrale Komponente beim Wechselstrom-Konzept. Die Generatorleistung muß der Spitzenbelastung entsprechen. Oft wird der Generator im Verbund mit einem Ladegerät benutzt um eine oder mehrere kleine Bordnetz-Batterien für Navigationsgeräte, Beleuchtung, kleine Pumpen etc. zu laden. Bei diesem Konzept muß auch die Absicherung des Landanschlusses der höchsten zu erwartenden Belastung entsprechen.

8.3.2 Das Wechselstrom-Konzept mit generatorfreier Periode

Die Nachteile kleiner Wechselstromsysteme werden schnell offenbar. Der Generator läuft über längere Zeiträume ohne ausreichende Belastung oder er muß häufig an- und abgestellt werden. Das führt neben Lärm- und Abgasbelästigung zu hohem Verbrauch und Verschleiß.

Dieser Nachteil kann durch generatorfreie Zeitabschnitte ausgeglichen werden, was allerdings den Einbau einer zusätzlichen größeren Batterie, eines Ladegerätes und eines Umformers voraussetzt. Bei Stillstand des Generators werden alle Verbraucher aus der Batterie gespeist. In bestimmten Zeitabständen, oder bei hohem Leistungsbedarf wird der Generator zugeschaltet, der dann auch wieder die Batterien auflädt.

Zur weiteren Perfektionierung des Wechselstrom-Konzepts sind neue technische Möglichkeiten entwickelt worden, die im folgenden näher beschrieben werden.

8.3.3 *PowerControl*

Das Ziel des Konzeptes mit generatorfreien Zeitabschnitten war es, den Generator so wenig wie möglich laufen zu lassen. Wann immer er in Betrieb ist, soll auch die Bordnetz-Batterie geladen werden. Das wiederum hat zur Folge, daß ein Teil der erzeugten Leistung in die Batterie fließt, womit sich letztendlich die Notwendigkeit eines größeren Generators ergibt.

Mit *PowerControl* kann hier Abhilfe geschaffen werden. Mit dieser Funktion des Phoenix Multi wird der Ladestrom automatisch reduziert, wenn die Gefahr besteht, den Generator durch zugeschaltete Verbraucher zu überlasten. Das Gerät überwacht also die Stromaufnahme der Verbraucher und sorgt dafür, daß nur der Strom, der sozusagen „übrig“ ist, der Batterie zugeführt wird.

Das folgende Beispiel zeigt dies:

Die Yacht ist mit Generator und Phoenix Multi 24/3000/70 ausgerüstet. Auf der Generatorschiene liegt eine Waschmaschine, die mit eingeschalteter Wasserheizung 2kW zieht, während im Waschbetrieb lediglich 150W benötigt werden. Die mittlere Belastung liegt bei 500W.

Die 24V Batterie hat eine Kapazität von 400Ah und der maximale Ladestrom des Multi beträgt 70A. der Multi hat also eine Stromaufnahme von ca. $70A \times 30V = 2,1kW$. Die maximale Belastung ergibt mit 2kW für die Waschmaschine und 2,1kW für die Batterieladung also 4.1kW an erforderlicher Generatorleistung. Zur Vermeidung von Überlastung muß eine Leistung von ca. 5kW gewählt werden, denn die üblichen kleineren 230V Generatoren können nicht dauernd mit Vollast betrieben werden. Nun besteht die Möglichkeit die Batterieladung während der Heizperiode der Waschmaschine zu unterbrechen. Dann würde eine Generatorleistung von 2,1kW genügen. Ohne den Generator zu überlasten, würde also eine 3kW Maschine ausreichen.

Die *PowerControl* Funktion des Multi erlaubt es nun mit dem 3kW Generator auch noch Strom in die Batterie zu laden während der Waschvorgang ohne Heizung läuft. Über das Phoenix Multi Control Bedienungspaneel kann der maximale Generatorstrom eingestellt werden. Zum Beispiel wird der Strom auf 10A eingestellt, womit die elektrische Ausgangsleistung des Generators auf $10A \times 230V = 2,3kW$ begrenzt wird. Das entspricht 77% der nominalen Leistung. Nach dem Generatorstart schaltet der Multi automatisch vom Umformerbetrieb auf den Ladebetrieb mit 70A. Wenn jetzt die Waschmaschine eingeschaltet wird, und nur der Trommelmotor läuft (80 % der Einschaltzeit), liefert der Multi weiterhin 70A Ladestrom an die Batterie. Die Belastung des Generators ergibt sich dann zu $150W + 2,1kW = 2,25kW$ also knapp unterhalb des eingestellten Grenzwertes von 2,3kW.

Wenn jetzt die Heizung der Waschmaschine zuschaltet (20% des Waschvorgangs), steigt der Verbrauch der Waschmaschine auf 2kW, so daß nur noch $2,3kW - 2kW = 300W$ zum Batterieladen übrigbleiben. Mit *PowerControl* reduziert das Ladegerät den Ladestrom automatisch auf $300W/30A = 10A$.

Das Beispiel zeigt, daß mit *PowerControl* der Generator wesentlich effizienter betrieben wird und über 80% der Zeit des Waschvorganges die Batterie mit vollem Ladestrom geladen werden kann.

Vorstehendes Beispiel läßt sich auch auf den Landanschluß übertragen. Oft sind deren Anschlußwerte zu niedrig um auch bei abgeschaltetem Ladebetrieb die Haushaltsgeräte an Bord zu betreiben. Der Waschvorgang aus dem vorstehenden Beispiel würde einen Landstrom von wenigstens $2kW/230V = 9A$ erfordern. Eine Kochplatte mit 7,5kW würde sogar fast 35 A ziehen! Zur Lösung dieses Problems wurde *PowerAssist* entwickelt.

8.4 **PowerAssist: Das neue batterieunterstützte Wechselstrom-Konzept**

8.4.1 **PowerAssist**

PowerAssist ist ein Leistungsmerkmal des Phoenix MultiPlus. Immer dann, wenn durch zu schwachen Landstrom oder zu geringe Generatorleistung bei der Versorgung angeschlossener Geräte Probleme entstehen, bietet *PowerAssist* eine entsprechende Lösung. MultiPlus verteilt und regelt vollautomatisch die Stromzufuhr. Ein zu geringes Stromangebot aus dem Landanschluß oder dem Generator wird durch Stromentnahme aus der Batterie aufgefüllt. Im Umkehrfall wird überschüssiger Strom bei niedrigem Bedarf automatisch in die Batterie eingespeist. Die einzige Einstellung, die vorgenommen werden muß, ist die der Stromstärke am Multi Control Bedienfeld. Multi Plus erledigt den Rest. Durch Parallelschaltung mehrerer Einheiten kann mit dieser „Zuliefer-Funktionalität“ praktisch jede gewünschte Leistung erreicht werden.

Die folgenden zwei Beispiele sollen das verdeutlichen:

Beispiel 1: 4 Ampere Landstrom-Anschluß

Die Mikrowelle mit 1500VA soll der stärkste Verbraucher sein. Der entsprechende Landstrom müßte $1500VA/230V = 6,5A$ betragen. Der Kaffee aus der Kaffeemaschine duftet bereits, wobei die Stromentnahme 4A beträgt. Wenn jetzt die Mikrowelle zuschaltet, steigt der Strom auf $4 + 6,5 = 10,5A$. Das Ergebnis ist wieder einmal ein durch die Landstromsicherung abgeschalteter Landanschluß. Die Lösung bietet ein MultiPlus z.B. mit Phoenix MultiPlus 12/2000/120 in Verbindung mit einem Phoenix Multi Control Paneel.

Über den entsprechenden Drehknopf wird der Landstrom auf 4A begrenzt. Wenn dann für 5 Minuten die Mikrowelle eingeschaltet wird, liefert der MultiPlus $6,5A - 4A = 2,5A$ zusätzlich aus der Batterie. Dabei entsteht ein Entladestrom von $2,5A \times 230V / 12V = 50A$. Über die 5 Minuten wird der Batterie eine Energiemenge von $50A \times 5/60 = 4Ah$ entnommen. Wenn gleichzeitig noch die Kaffeemaschine läuft, nimmt die Stromentnahme um weitere $4A \times 230V / 12V = 80A$ zu auf zusammen $80 + 50 = 130A$. Die Gesamtentnahme über die 5 Minuten ist dann $130 \times 5 / 60 = 11Ah$! Nach dem Abschalten von Mikrowelle und Kaffeemaschine wird MultiPlus den verfügbaren Landstrom zum Wiederaufladen der Batterie nutzen. Mit 4A Landstrom wird der Ladestrom $4A \times 230V / 12V = 77A$ (in Wirklichkeit ca. 50A wegen Netzverlusten und wegen einer höheren Ladespannung). Dennoch wird die Batterie nach ca. 15 Minuten wieder voll geladen sein.

Beispiel 2: Elektrisch Kochen mit 16A Landstrom und 3 parallelgeschaltete MultiPlus 24/2500/70

An Bord befindet sich ein 11kVA Dieselgenerator und ein E-Herd mit vier Induktionsplatten mit einem Anschlußwert von maximal 7,5kW, d.h. bei voller Leistung fließt auf einer Phase ein Strom von $7500W / 230V = 33A$! Für den Generator ist das problemlos, aber selbst bei 16A Landstromabsicherung geht da nichts mehr. Mit dem MultiPlus System wird jedoch eine Lösung möglich. Wenn alle Kochplatten volle Leistung ziehen, muß MultiPlus $33A - 16A = 17A$ beisteuern. Das ergibt einen Entladestrom aus der Batterie von $17A \times 230V / 24V = 165A$. Länger als fünf Minuten werden die vier Platten kaum gleichzeitig mit Vollast arbeiten, d.h. während dieser Zeit werden der Batterie gerade einmal $165A \times 5 / 60 = 14Ah$ entnommen. Wenn erst das Wasser kocht und die Pfanne heiß ist, wird die Leistung reduziert und aus Erfahrung kann man davon ausgehen, daß dann kaum mehr als die 16A benötigt werden. Die Batterie

wird dann nicht oder nur geringfügig weiter entladen, d.h. auch mit niedriger Landstrom-Absicherung ist elektrisches Kochen ohne nennenswerte Stromentnahme aus der Batterie möglich.

Eine weitere Verbesserung kann erzielt werden, wenn das MultiPlus über den PowerMan mit dem Generator verbunden wird. Dadurch wird die Verzerrung der Ausgangsspannung des Generators verringert (Induktionsplatten reagieren empfindlich auf Spannungsverzerrung) und es steht ein Ladestrom von $3 \times 70A = 210A$ zur Verfügung.

Zusammengefaßt:

- MultiPlus unterstützt das Bordnetz und selbst ein kleinerer Generator reicht aus.
- Für die Tasse Kaffee oder den Toast zwischendurch muß nicht der Generator gestartet werden; MultiPlus sorgt für die notwendige Leistung (ca. 10 bis 20Ah).
- Letztendlich kann ein Ausgangssignal des MultiPlus bei längerem und höherem Verbrauch genutzt werden, um den Generator automatisch zu starten und auf das Netz zu schalten.

Mit der Möglichkeit, zeitweilig erforderliche Zusatzleistung aus der Batterie bereitzustellen, kann mit MultiPlus das Problem niedrig abgesicherter Landanschlüsse oder zu geringer Generatorleistung gelöst werden.

8.4.1 Weitere Vorteile von Combis oder Multis

Dauernde Wechselstrom-Versorgung

- Wechselspannung ist jederzeit über die Multis, den Generator oder Landstrom verfügbar
- Einstellungen an elektrischen Geräten wie z.B. Digitaluhr oder Videorecorder müssen nicht bei jedem Neustart des Generators erneut eingestellt werden.

Unmittelbare Verfügbarkeit

- Wenn das erforderliche Leistungspotentials durch Einbau der Multis (gegebenenfalls in Parallelschaltung) vorhanden ist, können alle Geräte an Bord unmittelbar und ohne vorherigen Generatorstart genutzt werden. Der Generator kann gegebenenfalls durch ein entsprechendes Signal des Batteriemonitors oder über ein Relais im Multi gestartet und zugeschaltet werden.

8.4.2 Landstrom

Wie gezeigt kann das Landstrom-Problem mit MultiPlus und *PowerAssist* gelöst werden. In der Praxis ist es aus Gründen des dynamischen Verhaltens zu empfehlen, für jeden Multi mindestens 2A Landstrom bereitzustellen. Wenn zum Beispiel 3 Multis parallel geschaltet sind, sollte der Landanschluß mindestens $3 \times 2A = 6A$ zur Verfügung stellen können.

Wenn andererseits bei mehr als zwei Multis die Landstromabsicherung lediglich einen Strom von 4A zuläßt, sollte nach dem Gleichstrom-Konzept gearbeitet werden. Dabei wird der Landstrom zunächst über das Ladegerät als Gleichstrom in die Batterie gespeichert und dann nach Bedarf über die Umformer, Combis oder Multis die ohnehin an Bord sind den Verbrauchern zur Verfügung gestellt. Bei hohem Energieverbrauch liefert die Batterie dann die notwendige Energiemenge, während bei geringer Abnahme geladen wird. Bei Landstrom von 4A muß der Ladestrom bei einem 24V Ladegerät auf $230V \times 4A / 30V = 30A$ begrenzt werden. Für den 12V Batterie gilt entsprechend eine Begrenzung auf 60A.

8.5 Veränderte Betrachtungsweise

8.5.1 Täglicher Energiebedarf

Sowohl beim Gleichstromkonzepts als auch bei der batterieunterstützten Wechselstrom Nutzung kommt es auf die richtige Fragestellung an. Bei der Auswahl des passenden Generators sollte nicht gefragt werden, wie hoch kann maximal der Strom- oder Energiebedarf werden, sondern es sollte vielmehr der tägliche Energiebedarf ermittelt werden. Sowohl die Anwendung der Gleichstromlösung als auch die Nutzung des batteriegestützten Wechselstrom-Konzepts führt nicht mehr zur Festlegung der Generatorleistung nach dem Höchstverbrauch, sondern nach dem täglichen Mittelwert.

Landstrom ist im allgemeinen über 24 Stunden verfügbar. Das führt zu folgender Rechnung:

Mittelwert der Leistung (Watt) = täglicher Energiebedarf (kWh) x 1000 / 24 und

Mindestanschlußwert = Mittelwert der Leistung / 230V

Beispiel:

- Energiebedarf pro Etmal: 48kWh (siehe Abschnitt 11)
- Mittelwert der Leistung: $48kWh \times 1000 / 24 \text{ Std.} = 2000 \text{ W}$
- Mindestanschlußwert des Landanschlusses: $2000 / 230V = 8A$

In der Praxis sollte etwas Reserve z.B. für Batterieladung vorgehalten werden, so daß der Landanschluß mit 10A oder 16A abgesichert sein sollte.

Lichtmaschinen am Hauptmotor oder Generatoren sind üblicherweise nicht über 24 Std. in Betrieb. Die folgende Beziehung ermöglicht es, die für die Erzeugung der benötigten Energiemenge notwendige tägliche Betriebszeit zu ermitteln.

Betriebszeit (Std.) = täglicher Energiebedarf (kWh) / Leistung der Energiequelle(n) (kW)

Falls die tägliche Betriebszeit auf eine bestimmte Stundenzahl beschränkt ist ergibt sich:

Leistung der Energiequelle(n) (kW) = täglicher Energiebedarf (kWh) / Betriebszeit (Std.)

Einige Beispiele:

8.5.1.1 Täglicher Energiebedarf: 4kWh (siehe Abschnitt 9)

Energiequelle: Lichtmaschine am Hauptmotor liefert 100A in eine 12V Batterie d.h.
 $100A \times 12V = 1,2kW$.

Erforderliche tägliche Betriebszeit: $4kWh / 1,2kW = 3,3$ Std. (die tatsächliche Betriebszeit muß etwas höher liegen um Netzverluste auszugleichen, und um die möglicherweise niedrige Absorptionskapazität am Ende des Ladezyklus der Batterie auszugleichen. Für eine erste Abschätzung ist der Wert hinreichend genau.

8.5.1.2 Täglicher Energiebedarf: 14kWh (siehe Abschnitt 10)

Energiequelle: Dieselgenerator mit auf 4 Stunden pro Tag beschränkter Laufzeit
Minimale Nennleistung des Generators: $14kWh / 4Std. = 3,5kW$

8.5.2 Batteriekapazität

Wenn die Energieerzeugung auf einige Stunden am Tag beschränkt ist (Lichtmaschine am Hauptmotor oder Generator mit eingeschränkter Betriebszeit), wird die Batteriekapazität durch die Energiemenge bestimmt, die während der Stillstandszeit der Generatoren verbraucht bzw. benötigt wird.

Die Batterie wird wegen der kurzen Ladezeiten selten auf mehr als 80% geladen. Andererseits sollte sie auch nicht allzuoft auf weniger als 30% der Nennkapazität entladen werden. Damit liegt die nutzbare Batteriekapazität bei höchstens $80\% - 30\% = 50\%$.

Darüber hinaus sollte eine Sicherheitsmarge vorgehalten werden: Wenn die Batterie bis 70% entladen wird, ist keine Reserve für Unvorhergesehenes mehr vorhanden. Da es keine verbindliche Regel hinsichtlich der Höhe der Sicherheitsmarge gibt, werden 10% angesetzt. Damit kommt man auf eine Entladung bis auf 60% d.h. eine nutzbare Kapazität von 40%. Schließlich sollte noch beachtet werden, daß die Batterie altert, womit ein Kapazitätsverlust von 20% einhergeht. Damit wird letztendlich die wirklich nutzbare Kapazität auf $40\% \times (100 - 22) = 32\%$ der Nennkapazität verringert.

Der zeitliche Verlauf der Entladung spielt auch eine Rolle. Die Nennkapazität einer Batterie ist auf eine Entladezeit von 20 Std. bezogen (Abschnitt 2.5.3). Bei abweichenden Verläufen muß ein Korrekturfaktor berücksichtigt werden. Üblicherweise werden die Bordnetzbatterien in 8 bis 12 Stunden entladen. Eine Entladung von 32% in 8 Stunden entspricht $32 \times 24 / 8 = 96\%$ Entladung in 20 Std. Bei diesem Wert kann auf eine Zeitkorrektur verzichtet werden. (Es soll hier nicht der Eindruck erweckt werden, daß die Kapazität künstlich heruntergerechnet werden soll!).

Der nächste Schritt ist die Bestimmung des Energieverbrauchs bezüglich der Menge und des zeitlichen Verlaufes. Das ist Gegenstand der nächsten Kapitel.

Zusammenfassung:

Die exakte Berechnung der benötigten Batteriekapazität ist alles andere als einfach. Einige praktische Faustregeln können dabei hilfreich sein:

Eine dieser Faustregeln aus der Praxis besagt, daß bei 2 Ladezyklen pro Etmal die Batteriekapazität mindestens dem doppelten des Verbrauchs pro Etmal in Ah entsprechen sollte. Bei einem täglichen Verbrauch von 128 Ah sollte die Batteriekapazität also mindestens 256 Ah betragen. Mit der Annahme, daß diese Batterie mit konstantem Strom entladen wird, sollte sie dann über einen Zeitraum von 12 Stunden eine Entladung um $128/2 = 64$ Ah erfahren haben.

Eine aus der Theorie abgeleitete Faustregel besagt, daß die nutzbare Kapazität 32% der Nennkapazität sein sollte. Bei einem Zeitabstand von maximal 12 Stunden zwischen den Ladezyklen und einem Verbrauch von 64 Ah während dieser Periode errechnet sich mit einer Nutzkapazität von 32% eine Batteriekapazität von $64Ah / 0,32 = 200Ah$.

Die Differenz von 56 Ah zwischen den beiden Überschlagsrechnungen kann als Ausgleich dafür angesehen werden, daß in der Realität der Entladestrom nicht konstant ist, sondern davon abhängt, welche Verbraucher wann zugeschaltet werden. Die Dauer der Ladeperioden wird ebenfalls unterschiedlich sein. Im Ergebnis kann festgehalten werden, daß die genannten Faustregeln zu brauchbaren Ergebnissen führen.

Die zwei einfachen Berechnungsformeln sind also:

- 1) **Die Kapazität der Bordnetzatterie sollte mindestens dem Dreifachen der erwarteten Entladung während der generatorfreien Zeit entsprechen ($100\% / 32\% = 3,1$).**
- 2) **Bei zweimaligem Laden der Betriebsatterie je Etmal sollte die Kapazität mindestens dem Doppelten des täglichen Verbrauchs entsprechen.**

Zwei Beispiele:

- 1) Der Energieverbrauch während der generatorfreien Zeit beträgt 4kWh
Die Minimalkapazität der Batterie ist: $4\text{kWh} \times 3/12\text{V} = 1000\text{Ah}$ (12V Anlage) bez.
 $4\text{kWh} \times 3/24\text{V} = 500\text{Ah}$ (24V Anlage)
- 2) Täglicher Energieverbrauch: $4\text{ kWh} \equiv 4000\text{Wh}/12\text{V} = 333\text{Ah}$ (12V Anlage)
Anzahl der täglichen Ladezyklen: 2
Erforderliche Batteriegröße: $333\text{Ah} \times 2 = 666\text{Ah}$ (12V Anlage)

8.5.3 Landstrom

Wenn der Bordgenerator letztendlich so bemessen wurde, daß er den täglichen Energiebedarf decken kann, dann sollte auch der Landanschluß entsprechend ausgelegt sein. Wenn z.B. unterstellt wird, daß die Mikrowelle mit 1500 W der größte Einzelverbraucher an Bord ist, muß der Landanschluß dementsprechend für $1500\text{W} / 230\text{V} = 6,5\text{A}$ ausgelegt sein. Das ist deutlich mehr als die vielfach üblichen 4A oder 6A. Wenn dann zusätzlich der Warmwasserboiler mit 4 bis 5 Ampere einschaltet, sowie die Kaffeemaschine mit weiteren 4A den Duft frischgebrühten Kaffees verbreitet, steigt der Stromverbrauch auf zusammen $6,5 + 5 + 4 = 15,5\text{A}$. Mit anderen Worten: selbst ein 16A Landanschluß wäre hier an der Grenze der Belastbarkeit. Für die Waschmaschine oder elektrische Kochplatten ist nichts mehr übrig.

Es müßte also der Generator gestartet werden, was unangenehm für die Nachbarn im Hafen ist und im übrigen zunehmend häufiger nicht erlaubt wird.

Mit einer veränderten Vorgehensweise kann dennoch eine Lösung gefunden werden:

Der Ausweg liegt in der Anwendung des oben beschriebenen Gleichstromkonzepts bez. der Nutzung der Möglichkeit von *PowerAssist* mit der Wechselstrom-Alternative.

Die im Beispiel genannte Mikrowelle zieht einen Strom von 6,5 A allerdings nur für 5 Minuten. Wenn dieser Strom auf 50 Minuten verteilt würde, blieben lediglich 0,65A übrig.

Das ist genau das, was mit dem Gleichstromkonzept gemeint ist: Nutzung der Hauptbatterie zur Glättung der Spitzenlast (peak shaving).

Das im folgenden Kapitel behandelte Beispiel einer vollständig ausgerüsteten Yacht, bei der die Mikrowelle tatsächlich der größte Verbraucher ist, hat einen täglichen Energieverbrauch von 3kWh, wenn das Schiff ankert. Daraus läßt sich ein mittlerer Verbrauch von $3000/24 = 125\text{W}$ ableiten, was wiederum einen mittleren Entladestrom von ca. 11A aus der 12V Batterie ergibt. Ein Landanschluß würde bei diesem gemittelten Verbrauch von gerade einmal 125W lediglich mit 0,6A belastet. In Wirklichkeit sollte er etwas höher sein, da Netzverluste und etwas Reserve in der Batterie berücksichtigt werden sollten. Aber selbst 1A wäre fast nichts!

Das Beispiel in Kapitel 10 zeigt, daß auch mit noch mehr elektrischen Geräten an Bord mit Hilfe des Gleichstromkonzepts der eigentlich notwendige 8kW Landanschluß (Dreiphasen 16A) auf lediglich 1,3kW (6A / 230V Landanschluß) zurückgeführt werden kann.

Verringerung der Leistung des Landanschlusses um den Faktor 10

Die Beispiele zeigen klar und deutlich, wie das Gleichstrom Konzept zur drastischen Verringerung der erforderlichen Landanschlußleistung führen kann. Der gemittelte Strombedarf beträgt in der Regel weniger als ein Viertel und, abhängig von den Gegebenheiten an Bord, oft nur ein Zehntel des Spitzenbedarfs. Aus den genannten Gründen kann das Batterieladegerät auch recht klein gehalten werden, was natürlich auch den Geldbeutel schont. Zusätzlich kann man erwarten, daß ein Landanschluß für kleinere Ladeströme leichter zu finden ist, als ein 16A oder gar Drei Phasen Anschluß.

Weitere Vorteile des Gleichstrom Konzeptes:

Glatte, stabile und störungsfreie Wechselspannung

Was auch immer mit dem Landnetz passiert, die Batterie und die Umformer bilden die einzige Wechselspannungsquelle an Bord.

Integrierter Frequenzwandler

Moderne Batterieladegeräte arbeiten sowohl mit 50 als auch mit 60 Hz. Einige Ladegeräte sind für Eingangsspannungen von 90 V bis zu 260 V ausgelegt. Mit der entsprechenden Anpassung kann das Gleichstromkonzept überall auf der Welt mit Landstrom versorgt werden. Teure und schwere Frequenzumformer sind nicht notwendig.

9. ENERGIEBEDARF BIS ZU 4 kWh PRO ETMAL (im Mittel 170 Watt)

9.1 Einleitung

Nach den vorausgegangenen Ausführungen ist es jetzt an der Zeit, praktische Anwendungen zu betrachten. Der Umfang der Ausrüstung ist auf allen Yachten je nach Absicht und Budget des Eigners unterschiedlich. Einige planen eine Weltumrundung, während andere lediglich auf Flüssen und Kanälen fahren wollen, oder gar nur Tagesausflüge vorhaben. Ein weiterer Unterschied besteht, wenn der Eigner das Schiff selbst nutzt und pflegt, oder ob es sich um ein Charterschiff handelt. Zusätzlich sind ähnliche Anlagen in Wohnmobilen oder fernab gelegenen Häusern ohne Netzanschluß zu betrachten.

Wegen der großen Erfahrungen des Autors mit Yachten sind die folgenden Beispiele aus diesem Bereich entnommen. Die nachstehenden Überlegungen können also nicht ohne weiteres auf andere Bereiche übertragen werden. Im ersten Beispiel handelt es sich bezüglich der E-Anlage um ein einfaches Boot mit einem Minimum an elektrischen Verbrauchern. Es kann als Beispiel für ein 9 m Motorboot bzw. eine 12 m Segelyacht gelten. Das Schiff hat eine 12V Anlage, deren Details nachfolgend beschrieben werden.

9.2 Ausrüstung und Stromverbrauch

9.2.1 Navigationsinstrumente (Windmesser, Log, Echolot, etc.): weniger als 0,2A

9.2.2 GPS: ca. 0,2A

9.2.3 Funksprechanlage:

Der Standby-Verbrauch ist gering (0,1A) und die Sendezeiten (ca. 5A) sind kurz, so daß im Mittel mit niedrigem Verbrauch gerechnet werden kann.

9.2.4 Navigationslichter, Ankerlanterne: ca. 2,1A ($25W / 12V = 2.1W$)

9.2.5 Selbststeuer

Das elektrisch betriebene Selbststeuer kann bei länger dauerndem Einsatz einer der größten Verbraucher werden. Die Stromaufnahme des Motors steigt schnell auf 5A. Mit einer Einschaltdauer von ca. 30% wird der mittlere Verbrauch $5 \times 0,3 = 1,5A$. Zu beachten ist, daß dies eine sehr grobe Annäherung ist, und der wirkliche Verbrauch je nach Schiff und Wind/Seegang wesentlich variieren kann.

9.2.6 Radio

Besonders auf langen Fahrten wird oft das Radio (Autoradio) eingeschaltet: Verbrauch ca. 1A.

9.2.7 Innenbeleuchtung

Heutzutage werden üblicherweise Halogenlampen (10 bis 20W/Lampe) und Leuchtstoffröhren (ca. 8W) eingebaut. Glühlampen sind nicht zu empfehlen, da sie für die gleiche Lichtausbeute den ca. 5-fachen Strom verbrauchen. Mit 10 Leuchtstellen und bei sparsamem Einsatz kann man mit ca. 10 Ah pro Etmal rechnen.

9.2.8 Kühlschrank

Das Thema wurde bereits in Abschnitt 6.3 ausführlich behandelt. In diesem Beispiel wird eine Leistungsaufnahme des Kompressormotors von 50W bei einer Einschaltdauer von 50% angenommen. Dies kann für gemäßigte Klimazonen als brauchbarer Richtwert gelten.

9.3 Verbrauch während eines Etmals (24 Std.)

Der Ausgangspunkt ist ein Zeitraum von 24 Stunden (Etmal) unter Segeln. Auf einer Motoryacht ist der Stromverbrauch während der Fahrt bedeutungslos, da er über die mitlaufende Lichtmaschine ausgeglichen wird. Die zur Versorgung der angeschlossenen Verbraucher notwendige Batteriekapazität läßt sich jetzt ermitteln. In der nachstehenden Tabelle sind die Verbraucher entsprechend der Betriebszeit in Gruppen eingeteilt. (Dauernd: C; Längerfristig: L; Kurzfristig: K).

Es fällt auf, daß der Kühlschrank der bei weitem größte Verbraucher ist. Dessen Verbrauch könnte durch den Einbau eines teureren wassergekühlten Wärmetauschers und durch bessere Isolierung in etwa halbiert werden. Der Gesamtverbrauch je Etmal würde sich damit auf 103 Ah verringern.

	Verbrauch		Einschaltzeit / Etmal		Verbrauch / Etmal	
	Watt	Ampere	Stunden	%	kWh	Ah (12V)
C Navigations-Ausrüstung		0,2	24			5
C GPS		0,2	24			5
C Funksprechanlage, standby		0,1	24			2
K Funksprechanlage, Senden		5,0	0,2			1
C Kühlschrank, luftgekühlter WT	50	4,2	24	50		50
L Navigationslichter / Ankerlicht	25	2,1	8			17
L Selbststeuer		5,0	20	30		30
L Radio		1,0	3			3
K Beleuchtung	200		0,6			10
K Verschiedene Verbraucher						5
Gesamtverbrauch je Etmal					1,5	128
Durchschnittsverbrauch	64	5,3				
Mindest Batteriekapazität bei 2 Ladezyklen pro Tag						256

9.4 Vor Anker oder an der Pier ohne Landanschluß

Der Ausgangspunkt ist wieder 1 Etmal, wobei jetzt kein Unterschied zwischen Segel- und Motoryacht gemacht wird.

	Verbrauch		Einschaltzeit / Etmal		Verbrauch / Etmal	
	Watt	Ampere	Stunden	%	kWh	Ah (12V)
C Kühlschrank, luftgekühlter WT	50	4,2	24	50		50
L Ankerlicht	25	2,1	8			17
L Radio		1,0	3			3
K Beleuchtung	200		0,6			10
K Verschiedene Verbraucher						5
Gesamtverbrauch je Etmal					1,0	85
Durchschnittsverbrauch	64	5,3				
Mindest Batteriekapazität bei 2 Ladezyklen pro Tag						170

9.5 Zusätzlicher Komfort und Spezialausrüstung

Selbst auf kleineren Yachten gibt es heutzutage Zusatzausrüstungen, teils zur Erhöhung der Sicherheit, teils zur Steigerung des Komforts. Nachstehend sind einige derartige Optionen aufgelistet, wobei einige davon den Betrieb des Umformers erfordern. Da der Wirkungsgrad moderner Umformer bei mehr als 90% liegt, soll deren Stromverbrauch im folgenden unberücksichtigt bleiben.

9.5.1 Elektronische Navigation

Selbst auf kleinen Yachten ist dies zunehmend anzutreffen.

9.5.2 Kurzwellensender (SSB)

Bei Hochseetörns zu empfehlen

9.5.3 Radar

Erhöht die Sicherheit des Nachts und bei unsichtigem Wetter

9.5.4 Mikrowelle

Die Mikrowelle verbraucht in kurzer Zeit viel Energie (bis zu 1,5kW). Bei einer täglichen Nutzung von ca. 12 Minuten ergibt das einen Verbrauch von $1500 \times 0,2 / 12 = 25\text{Ah}$.

9.5.5 Heizung

Der Stromverbrauch einer dieselbetriebenen Heizung beschränkt sich auf die Ölpumpe und das Gebläse. Die Stromaufnahme liegt insgesamt bei ca. 5A.

9.5.6 Klimaanlage

Vor dem Einbau einer Klimaanlage sollte man sich über deren Stromverbrauch im klaren sein, da der erhebliche Strombedarf aus der Batterie entnommen wird.

9.5.7 Trinkwassererzeuger

Gegenwärtig sind recht gute Wassererzeuger für 12V-Betrieb im Markt. Deren Stromverbrauch liegt bei ca. 20A für 60 Liter Trinkwasser pro Stunde. Damit wird für kleine Yachten, die lange Seetörns machen, ein Trinkwassererzeuger (und damit die Süßwasserdusche an Deck) zu einer realen Option.

In der folgenden Tabelle ist der Stromverbrauch für die genannten Zusatzeinrichtungen aufgelistet. Es wurde eine zwei- bis dreiköpfige Besatzung angenommen.

	Verbrauch		Einschaltzeit	Verbrauch /	
	Watt	Ampere	Etmal	kWh	Ah (12V)
C Elektronische Navigation		2,0	24		48
C Kurzwellenfunkanlage		12,0	0,1		7
L Radar		3,0	8		24
K Mikrowelle	1500		0,2	0,3	25
L Heizung		5,0	6 x 0,5 = 3		15
L Klimaanlage, Kühlleistung 1kW	350		6 x 0,5 = 3	0,5	(45)
L Trinkwassererzeuger		10,0	5		50
Gesamtverbrauch je Etmal				20	169
Durchschnittsverbrauch	85	7,0			

Mit diesen Zusatzeinrichtungen beläuft sich der Gesamtenergieverbrauch pro Tag auf:

- In Fahrt: $1,5 + 2,0 = 3,5$ kWh bzw. $128 + 169 = 297$ Ah
- Vor Anker: $1,0 + 2,0 = 3,0$ kWh bzw. $85 + 169 = 254$ Ah

Das läßt sich auf folgende Batteriekapazitäten bzw. mittlere Entladeströme umrechnen:

- In Fahrt: $297 \times 2 = \text{ca. } 600$ Ah und $12,3$ A Entladestrom
- Vor Anker: $254 \times 2 = \text{ca. } 500$ Ah bei $10,5$ A Entladestrom

Jetzt läßt sich ermitteln, wie die benötigte Energie für die Basisyacht (1,0 bis 1,5 kWh) und für die „Luxusyacht“ (3,0 bis 3,3 kWh) erzeugt werden kann.

9.6 Aufladen der Batterie

9.6.1 Mit der Lichtmaschine am Hauptmotor

Üblicherweise hat der Hauptmotor eine Lichtmaschine mit 14V / 60A. Diesen Strom von 60A gibt sie bei 6000 min^{-1} ab. Wenn das Übersetzungsverhältnis der Riemenscheiben zwischen Motor und Dynamo 2:1 ist, muß der Motor also mit 3000 min^{-1} drehen um die Ladestromstärke von 60A zu erreichen. In der Praxis dreht der Motor allein schon wegen des Lärms nicht so hoch. Eine Drehzahl zwischen 1500 und 2000 min^{-1} ist zu erwarten. Der Ladestrom liegt damit zwischen 40% und 80% des Nennwertes d.h. bei 30 bis 50 Ampere.

Dies führt dazu, daß der Motor 2 bis 3 Stunden am Tag auf der Basisyacht und 7 bis 8 Stunden pro Tag auf der „Luxusyacht“ laufen muß, um die Batterien aufzuladen. Das ist keine ideale Lösung es sei denn:

- normalerweise wird jeden Tag eine größere Strecke unter Motor gefahren, oder
- das Schiff wird nur für Tagestrips genutzt.

Welche Auswege bieten sich an?

9.6.2 Vergrößerung der Batteriekapazität

Das setzt voraus, daß man mehrere Tage segeln oder vor Anker liegen kann und will. Es ist eine einfache und preiswerte Lösung, wobei man annimmt, daß alle paar Tage entweder der Motor für längere Zeit läuft, oder aber bei Hafentiegezeiten Landstrom genutzt werden kann.

9.6.3 Ein weitere oder ein größere Lichtmaschine

Entsprechende Hinweise in Abschnitt 4 und 5 sollten beachtet werden. Einerseits kann durch die Erhöhung des Ladestroms auf 80A die notwendige Ladezeit auf ein bis zwei Stunden am Tag reduziert werden. Andererseits ist aber zu bedenken, daß eine Ladestromerhöhung ihre Grenzen hat, wenn die Batterie keinen Schaden nehmen soll.

Zwei Bemerkungen zu Wirkungsgraden:

- 1) Um die Verluste in der Batterie (Der Energiewirkungsgrad bei teilweise geladener Batterie ist ca. 89%, siehe Abschnitt 3.3), in der Verkabelung, in Trenndioden, Gleichrichtern und eventuell im für einige Geräte notwendigen Umformerbetrieb auszugleichen, wird bei allen Berechnungen für das Laden von einer Ladespannung von 15V bzw. 30V ausgegangen. Mit anderen Worten: hier wird mit $\eta = 12V/15V = 80\%$ gerechnet.

Ein Beispiel:

- Die Entladung einer Batterie um 150Ah bei 12V entspricht einem Energieverbrauch von $150 \times 12V = 1,8 \text{ kWh}$;
- Das Aufladen bei 15V entspricht einer Energiezufuhr von $150A \times 15V = 2,25 \text{ kWh}$
- Der Unterschied von $2,25 - 1,8 = 0,45 \text{ kWh}$ entspricht dem im Prozeß entstandenen Verlust.

- 2) Der Wirkungsgrad einer Lichtmaschine mit Keilriemenantrieb liegt bei ca. 50%. Wenn der Hauptmotor lediglich mit 10% bis 20% Belastung läuft, liegt der Brennstoff-Wirkungsgrad bei ca. 10%. Zusammen mit dem unter 1) berechneten Wirkungsgrad läßt sich für die gesamte Kette ein Wirkungsgrad von lediglich $\eta = 0,8 \times 0,5 \times 0,1 = 0,04 = 4\%$ ermitteln. Das bedeutet:

Lediglich 4% der bei der Verbrennung des Dieselöls freigesetzten Energie steht den elektrischen Verbrauchern an Bord zur Verfügung.

9.6.4 Solarenergie

Solarpaneele können in unseren Breiten derzeit ca. 300 Watt pro m^2 und Tag liefern (1 $\text{m}^2 = 2$ Paneele zu je 50 Watt). Das führt zu 25 Ah Ladung pro Tag und m^2 Solarzelle in eine 12V Batterie. Im Mittelmeer oder in der Karibik werden Werte von 35Ah bzw. 50Ah erreicht. Mit anderen Worten: Solarpaneele können deutliche Beiträge zur Energieversorgung leisten. Das gilt besonders für Katamarane und Motoryachten, wo große freie Decksflächen zur Verfügung stehen.

9.6.5 Windenergie

Ein Windgenerator mit 1m Rotordurchmesser kann bei ca. 10 Knoten Windgeschwindigkeit ca. 25W (2A in eine 12V Batterie) erzeugen. Ein Energiebeitrag von 40Ah bis 80Ah pro Etmal kann damit erwartet werden. Bei geringem Stromverbrauch an Bord kann ein Windgenerator sehr vorteilhaft sein. Selbst auf größeren Yachten sind Windgeneratoren u. U. in Verbindung mit Solarpaneelen eine realistische Möglichkeit zum Laden beziehungsweise zur Ladungserhaltung, insbesondere auch während längerer Liegezeiten. Hier müssen aber gute Regler vorhanden sein um Überladung zu verhindern.

9.6.6 Wasserturbine

Wenn das Schiff in Fahrt ist, kann bei Seglern auch mit einem auf der Schraubenwelle eingebauten Generator Strom erzeugt werden. Als Nachteil entsteht höherer Widerstand, Geräusch und Verschleiß. Auch sind geschleppte Wasserturbinen bekannt. Diese sollen ca. 12 Watt (1A) je Knoten Fahrtgeschwindigkeit und damit bei einer 12V Batterie zwischen 40Ah und 50Ah je Etmal liefern. Der Zusatzwiderstand führt zu einem Geschwindigkeitsverlust von ca. 0,5kn.

9.6.7 Landstrom

Die beste Landstromnutzung wird mit einem entsprechenden Ladegerät und dem beschriebenen Gleichstrom-Konzept (Abschnitte 8.2.1 und 8.4.3) erreicht. Dabei kann als Faustregel gelten, daß die Ladeleistung mindestens dem Doppelten des täglichen Energiebedarfs entsprechen sollte. Falls die Bordnetzatterie schnell geladen werden soll, sind entsprechend höhere Leistungen vorzusehen.

Ein Beispiel:

Die in 9.5 beschriebene gut ausgerüstete Yacht hat im Hafen einen täglichen Energiebedarf von 132Ah bzw. 1,6kWh ohne Navigationslichter, Funkanlagen, Radar u. Trinkwassererzeuger.

- Bei einer Gleichrichtergröße, die dem Doppelten des täglichen Energiebedarfs entspricht, sollte der Gleichrichter $1,6 \text{ kWh} \times /24\text{h} = 133\text{W}$ liefern, was bei einer 12V Batterie einen Strom von $133/12 = 11\text{A}$ entspricht.

Der mittlere Stromverbrauch lag bei $11/2 = 5,5\text{A}$, so daß noch 5,5A zum Laden der Batterie übrig bleiben. Die Batteriekapazität sollte mindestens 500Ah betragen. Wenn diese Batterie auf ca. die Hälfte entladen wurde, dauert es $(500/2)/5,5 = 46$ Stunden bis zur Volladung.

- Bei einer Vergrößerung der Ladeleistung auf das Vierfache ergibt sich entsprechend ein Strom von 22A d.h. es verbleiben 16,5A für die Batterieladung. Für eine 80- bis 90-prozentige Ladung reichen dann ca. 15 Stunden.

In diesem Beispiel sollte man ein Ladegerät mit 25A oder 50A einbauen. Das 50 Ampere Gerät wird den Landanschluß mit maximal $50A \times 15V/230V = 3,3A$ belasten. Eine 4A Absicherung reicht in diesem Falle also vollständig aus.

Der direkte Anschluß des Warmwasserboilers mit einem Anschlußwert von ca. 5A an den Landanschluß kann problematisch werden. Hier bietet sich entsprechend dem Gleichstromkonzept ein Anschluß des Boilers an die Batterie über den Umformer an.

9.7 Zusammenfassung

- Solarpaneele, Windräder und Wasserturbinen können deutliche Beiträge zur täglichen Energieversorgung einer Yacht leisten.
- Die praktische Obergrenze für die tägliche Ladung einer 12V Batterie mit der Lichtmaschine des Hauptmotors liegt bei ca. 4kWh oder 300Ah bei 14V Ladestrom. Das reicht aber aus, um dem hohen Bedarf der „Luxusyacht“ aus Abschnitt 9.5 zu genügen.
- Mit einer 24V Anlage und einer entsprechenden Lichtmaschine von 150A am Motor (die Belastung entspricht 9kW) kann die tägliche Belastung auf 8kW ansteigen.
- Ein Kühlschrank mit schlechten Wirkungsgraden und einem nahezu dauernd laufenden 50W Kompressormotor verschwendet täglich ca. 100Ah an wertvoller Batteriekapazität.
- Die Anwendung des Gleichstromkonzepts reduziert die Landstrombelastung auf unter 4A.

10. ENERGIEBEDARF BIS 14 KWH PRO ETMAL (IM MITTEL 600 W)

10.1 Einleitung

Im vorangehenden Abschnitt 9 wurde gezeigt, wie relativ einfach sich der Energiebedarf von 4 kWh mit dem Gleichstromkonzept darstellen läßt. Neben der Grundausstattung für die ca. 1,5 kWh notwendig waren, konnten allerlei Extras mit 2,5 kWh bedient werden. Die erforderliche Batteriekapazität variierte zwischen 250 Ah für die Basisausstattung und 600 Ah für die Vollausstattung.

Selbst bei einem Verbrauch von mehr als 4 kWh pro Tag ist ein System mit starken Dynamos am Hauptmotor machbar, wobei der Hauptmotor sicherlich zuverlässiger ist, als ein kleiner Generator mit 3000 min^{-1} .

Aus verschiedensten Gründen wie Lärm- und Geruchsbelästigung, Wirkungsgraden und möglichen Schädigungen des Motors durch häufigen Teillastbetrieb, ist es sicherlich lohnenswert, nach Alternativen zu suchen.

Hier bieten sich an:

- Der 230V Dieselgenerator mit Direktanschluß der Verbraucher: Das Wechselstromkonzept
- Ein 230V Generatorset mit einer zusätzlichen Batterie: Das Wechselstromkonzept mit generatorfreier Zeit.
- Ein Gleichstromgenerator: Erweiterung des im vorigen Kapitel beschriebenen Gleichstromkonzepts in einen höheren Leistungsbereich.

Ein Tagesverbrauch von 14 kWh ist keineswegs gering und kommt dem normalen Haushaltsverbrauch an Land schon sehr nahe. Ein Blick auf die Stromrechnung zu Hause wird das bestätigen. Derartige Verbräuche findet man auf Motoryachten und Segelkatamaranen bis ca. 15 Meter und auf Segelyachten bis zu 18 Meter Länge. Die weiteren Rechnungen in diesem Kapitel gelten für 24V Batterien. Zunächst wird die Standardausrüstung betrachtet:

10.2 Die Minimal-Ausstattung

10.2.1 Navigationsausrüstung

Auf größeren Yachten gehört der Navigationscomputer schon zur Standardausrüstung. Unter Berücksichtigung von GPS, der Funkanlage einschließlich Kurzwelle, Radar und Inmarsat steigt der mittlere Stromverbrauch bei 24V schnell auf 2A.

10.2.2 Navigationslampen und Ankerlaterne: 25W

10.2.3 Autopilot

Der Energieverbrauch ist abhängig vom Gerätetyp, den Einsatzbedingungen etc. Es wird eine Durchschnittsbelastung von 5A bis 10A bei 30% Einsatzzeit angenommen.

10.2.4 Kühlschrank und Tiefkühlbox

Hier wird eine Anlage mit zwei 50W Kompressoren mit wassergekühlten Kondensatoren unterstellt. Es wird weiterhin angenommen, daß durch gute Isolierung vergleichsweise geringe Einschaltzeiten mit 25% beim Kühlschrank und 50% für die Kühlbox erreicht werden.

10.2.5 Beleuchtung

Hier gibt es mehr Brennstellen bei weniger sparsamem Verbrauch, so daß 25Ah pro Etmaal angesetzt werden.

10.2.6 Radio: ca. 2A

10.2.7 Übrige Verbraucher

Es kann ein höherer Verbrauch bei mehr Anzahl von Pumpen, der Dusche etc. erwartet werden. Es werden 10A angesetzt.

10.3 Unter Segeln

Wie im vorigen Kapitel 9 wird auch hier der Energieverbrauch für ein Etmal von 24 Stunden berechnet.

	Verbrauch		Einschaltzeit / Etmal		Verbrauch / Etmal	
	Watt	Ampere	Stunden	%	kWh	Ah (24V)
C Navigations-Ausrüstung		2,0	24		1,2	48
L Navigationslichter / Ankerlicht	25	2,1	8		0,2	8
L Selbststeuer		5,0	20	30	0,8	30
C Kühlschrank, Tiefkühlbox (Wk)	50 + 50	4,2	24	25 + 50	0,9	38
K Radio		2,0	3		0,1	6
K Beleuchtung	400		1,2		0,5	20
K Verschiedene Verbraucher					0,2	10
Gesamtverbrauch je Etmal					3,9	160
Durchschnittsverbrauch	160	6,7				
Mindest Batteriekapazität bei 2 Ladezyklen pro Tag (siehe Abschnitt 8.4.2)						320

Die Tabelle zeigt Folgendes:

- durch die Verbesserungen beim Kühlschrank und der Kühlbox liegt deren Energieverbrauch jetzt im Rahmen der übrigen Verbraucher. Man sollte sich allerdings deutlich vor Augen halten, daß allein durch schlechte Isolierung Kühlschränke oft ständig laufen, und dann einen zusätzlichen Energiebedarf von gut 60Ah verursachen können.
- während des Segelns beläuft sich der tägliche Minimalverbrauch auf einer 12 bis 18 Meter Yacht auf ca. 4kWh. Damit werden 160 Ah aus einer 24V Batterie und 360 Ah aus einer 12V Batterie entnommen.
- der durchschnittliche Strom liegt bei ca. 6,7A aus einer 24V Batterie und ist damit nahezu bedeutungslos, solange man unter Motor läuft.

10.4 Vor Anker oder an der Pier ohne Landanschluß

Nachstehende Tabelle gilt sowohl für Motor- als auch für Segeljachten.

	Verbrauch		Einschaltzeit / Etmal		Verbrauch / Etmal	
	Watt	Ampere	Stunden	%	kWh	Ah (24V)
L Ankerlicht	25	2,1	8		0,2	8
C Kühlschrank, Tiefkühlbox (Wk)	50 + 50	4,2	24	25 + 50	0,9	38
K Radio		2,0	3		0,1	6
K Beleuchtung	400		1,2		0,5	20
K Verschiedene Verbraucher					0,2	10
Gesamtverbrauch je Etmal					1,9	82
Durchschnittsverbrauch	82	3,4				
Mindest Batteriekapazität bei 2 Ladezyklen pro Tag (siehe Abschnitt 8.4.2)						164

10.5 Zusatzausrüstung

Aus der Liste der Zusatzeinrichtungen im vorigen Abschnitt 9.5 sind die elektronische Navigationsausrüstung, der Kurzwellensender sowie das Radar bereits in der Tabelle 10.2 enthalten. Im Folgenden werden neben den in Tabelle 9,5 erwähnten noch die nachstehend genannten weiteren Geräte berücksichtigt.

10.5.1 Wasserkocher

Ein nützlicher Apparat für die schnelle Tasse Tee oder heiße Suppe. Der Wärmehalt von einem Liter Wasser beträgt 1,16W/°C (siehe 6.3.3). Zum Aufkochen von einem Liter benötigt man also 0,1kWh bzw. 4,2Ah aus der 24V Batterie.

10.5.2 Elektrische Kochplatten

Gas an Bord kann gefährlich sein, und das Schleppen der Flaschen macht auch kein Vergnügen. Zwei E-Platten mit je 1,5 kW ziehen bei zusammen 3kW ca. 150A aus der 24V Batterie. Bei vier Platten ist man schnell bei 6 bis 8 kW. Eine Mahlzeit für vier Personen erfordert ca. 1,2kWh d.h. 50 Ah bei 24V (siehe Abschnitt 6.6).

10.5.3 Die kleine Waschmaschine

Auch die ist in 6.6 erwähnt. Der Energieverbrauch eines Wasch/Trocken-Zyklus beträgt ca. 2,7kW. Der wesentliche Energieanteil geht in die Wasseraufheizung und das Trocknen. Bei Nutzung von Warmwasser z.B. aus dem Boiler und Weglassen des Trocknens reduziert sich der Verbrauch auf ca. 0,5kWh.

10.5.4 Der kleine Geschirrspüler

Der Verbrauch liegt pro Lauf bei etwa 1kWh. Auch hier kann die Maschine an die Warmwasserleitung angeschlossen werden, womit der Verbrauch auf unter 0,5kWh sinkt.

Wenn jetzt der Gesamtverbrauch je Etmal ermittelt wird, soll eine vierköpfigen Besetzung und subtropisches Klima vorausgesetzt werden, so daß statt der Heizung die Klimaanlage in Betrieb ist. Letztgenannte soll im Beispiel 12 Stunden am Tag laufen, d.h. über 50% des Etmals. Der Trinkwassererzeuger wird mit einer Hochdruckpumpe statt mit dem energienintensiven wasserhydraulischen Gleichstromsystem betrieben. In der Berechnung wird unterstellt, daß die Waschmaschinen an das Kaltwassersystem angeschlossen sind.

	Verbrauch		Einschaltzeit / Etmal	Verbrauch / Etmal	
	Watt	Ampere	Stunden	kWh	Ah (24V)
Mikrowelle	1500		0,25	0,4	16
Wasserkocher (6 Liter/Tag)	2000			0,6	25
E-Herd (4 Pers.)	6000			1,2	50
Heizung		3,0	6 x 0,5 = 3		(9)
Klimaanlage, Kühlleistung 4kW	1400		12 x 0,5 = 6	8,4	350
Trinkwassererzeuger, 200l/Tag			5	1,4	60
Waschmaschine, alle zwei Tage	2000			0,5 x 2,7	56
Kleiner Geschirrspüler, täglich	2000			1,0	42
Zusätzliche Pumpen					10
Gesamtverbrauch je Etmal				25	609

Die Tabelle zeigt deutlich, daß die Klimaanlage besonders viel Energie verbraucht, obwohl die tägliche Betriebszeit lediglich mit 12 Stunden angesetzt wurde. Bei einem täglichen Energiebedarf von 8,4kWh, was 350Ah pro Tag entspricht, verbraucht sie - falls sie aus der Batterie versorgt wird - mehr Energie als alle übrigen Geräte zusammen. Um einen generatorfreien Betrieb von ca. 20 Stunden zu gewährleisten, ist eine Batterie mit einer Kapazität von 1500Ah erforderlich. Obwohl es zahlreiche derartige Installationen gibt, ist es wohl doch empfehlenswerter, hier einen Generator laufen zu lassen und Lärm, zusätzliche Wartung und Ölverbrauch zu akzeptieren.

Der erste Schritt zur Verbrauchsreduktion - wenn denn die Klimaanlage wirklich erforderlich ist – besteht in einer Minimierung der Laufzeit, und dann im Ersatz des Trinkwassererzeugers durch den energetisch wirkungsvolleren wasserhydraulischen Typ der mit Gleichstrom betrieben wird und im übrigen auch deutlich leiser arbeitet.

	Verbrauch		Einschaltzeit / Etmal	Verbrauch / Etmal	
	Watt	Ampere	Stunden	kWh	Ah (24V)
Mikrowelle	1500		0,25	0,4	16
Wasserkocher (6 Liter/Tag)	2000			0,6	25
E-Herd (4 Pers.)	6000			1,2	50
Klimaanlage, Kühlleistung 4kW	700	29	12 x 0,5 = 6	4,2	175
Trinkwassererzeuger, 200l/Tag		10	3,3	1,4	33
Waschmaschine, alle zwei Tage	2000			0,5 x 2,7	56
Kleiner Geschirrspüler, täglich	2000			1,0	42
Zusätzliche Pumpen					10
Gesamtverbrauch je Etmal				9,6	407

Zusammen mit dem Basisverbrauch liegt der Gesamtverbrauch je Etmal jetzt bei:

- Mit Klimaanlage: $160 + 407 = 567$ Ah je 24 Stunden
- bei einem mittleren Batteriestrom: $567 / 24 = 24A$
- Gesamtverbrauch je Etmal: $567 \times 24 = 13,6$ kWh

- ohne Klimaanlage: $160 + 232 = 392$ Ah je 24 Stunden
- bei einem mittleren Batteriestrom: $392 / 24 = 16 A$
- Gesamtverbrauch je Etmal: $392 \times 24 = 9,4$ kWh.

10.6 Energieerzeugung

10.6.1 Dynamos am Hauptmotor

Eine einfache Lösung (Kapitel 9)

10.6.2 Alternative Energiequellen

Mit Solarpaneel (1m²), Windgenerator (1m Rotordurchmesser) und Wasserturbine (ca. 60W bei 5kn) lassen sich zusammen nahezu 2,4kWh (100Ah mit einer 24V Batterie) je Etmal erzeugen. Mit anderen Worten: es läßt sich mit diesen Energiequellen eine ansehnliche Reduktion der zur Energieerzeugung erforderlichen Motorstunden erreichen, wenn lediglich die Basisausrüstung an Bord ist.

Wenn allerdings der Energiebedarf darüber hinausgeht, müssen andere und im Folgenden beschriebene Methoden der Energieerzeugung und Bereitstellung gefunden werden.

10.6.3 Dieselgenerator

Der 230V Dieselgenerator gilt allgemein für die Versorgung von größeren Verbrauchern wie Waschmaschine oder elektrische Kochplatten als die Energiequelle schlechthin. Um zu verhindern, daß der Generator ständig läuft oder häufig gestartet werden muß, wird er üblicherweise in ein System mit Bordnetzatterie und Umformer eingebunden. Damit können dann auch längere Zeiten ohne Generatorbetrieb eingeplant werden. So kann der Generator z.B. abends während der Zubereitung des Abendessens und bis zum Stop des Geschirrspülers für ca. 4 Stunden laufen. Dabei kann auch gleichzeitig z.B. die Wasch/Trockner-Kombination laufen, der Warmwasserboiler entweder elektrisch oder mit Kühlwasser aufgeheizt werden und die Batterie geladen werden. Falls erforderlich kann eine weitere Perioden von 1 bis 2 Stunden morgens während des Frühstücks eingeplant werden.

Die Laufzeit des Generators wird aus den folgenden Gründen möglichst kurz gehalten:

- Geräuschbelästigung und Schwingungen
- Verschleiß und Wartung generell
- Reduktion von Teillastbetrieb zur Verhinderung von vorzeitigem Verschleiß und Rußbildung
- Treibstoffverbrauch

Aus Gründen von Zuverlässigkeit und Lebensdauer ist eine Drehzahl von 1500 min⁻¹ zu empfehlen.

Kapazität der Bordnetzatterie

Nach Festlegung der täglichen Generatorlaufzeit - im Beispiel 4 Stunden - kann die für die generatorfreie Zeit erforderliche Batteriekapazität in Ah ermittelt werden.

- a) In Fahrt, d.h. während 24 - 4 = 20 Stunden mit einem der Basisversion nach 10.3 entsprechenden Verbrauch sind $160 \times 20/24 = 133$ Ah erforderlich.
- b) Bezüglich der Zusatzausrüstung wird angenommen, daß die Nutzung von Mikrowelle und Wasserkochers sowie 2/3 der Laufzeit der Klimaanlage in diesem Zeitintervall liegen. Das erfordert weitere $16 + 25 + 175 \times 2 / 3 = 158$ Ah.

Zusammen muß die Batterie also $133 + 158 = 291$ Ah bereitstellen. Es ist also eine Batteriekapazität von 600 Ah (2 Ladezyklen/tag nach 8.5.2) erforderlich, und mit etwas Reserve z. B. für die Klimaanlage nachts, kommt man auf 800 Ah.

Umformer und Ladegeräte

Im beschriebenen Fall ist bezüglich der Umformerleistung eine Multi 24/3000/70

Umformer/Ladegerätkombination ausreichend, da bei mehr als 3 kW Leistungsanforderung der Generator zugeschaltet werden kann. Als Ladegerät liefert das Multi während der 4 stündigen Generatorpause allerdings nur $4 \times 70A = 280$ Ah. Während dieser Zeit müssen jedoch 291 Ah sowie zusätzlich aus der Grundbelastung $6,7 \times 4 = 27Ah$ also insgesamt 307 Ah geladen werden. Mit etwas Reserve sollte man also einen Ladestrom von 100 A zur Verfügung haben. Deshalb muß zusätzlich zum Multi noch ein 24V/50A Ladegerät eingebaut werden.

Der Generator

Die Kochplatten erfordern 6 kW; dazu kommen $100A \times 30V = 3kW$ für das Ladegerät. Mit etwas Reserve für den Verbrauch von wenigstens einem Teil der Zusatzausrüstungen (z.B. der Klimaanlage) sollte ein 12 kW Generator gewählt werden.

Landanschluß und Frequenzumformer

Im vorliegenden Beispiel kann die Landstromaufnahme auf 8 kW begrenzt werden, da im Hafen genügend Zeit zum Aufladen vorhanden ist. Für diese Leistung ist allerdings ein Dreiphasen Kraftstrom Anschluß erforderlich. Falls Überseehäfen angelaufen werden sollen, ist außerdem mit 60 Hz Landstrom zu rechnen, was zusätzlich einen 8kW Frequenzumformer für die elektrische Ausrüstung an Bord erforderlich macht.

Bei näherer Betrachtung erscheint das alles etwas zu aufwendig für ein 15 Meter Segelschiff oder eine 13 Meter Motoryacht zu sein. Das System wird zu groß, zu teuer und zu komplex. Deshalb wird eine solche Installation wohl nur auf noch größeren Booten Sinn machen, wie z.B. bei Seglern ab 20 Metern oder Motoryachten ab 15 Metern.

Lösungsmöglichkeiten für kleinere Schiffe

- 1) Eine Lösungsmöglichkeit ist es, die elektrischen Kochplatten durch Gaskocher zu ersetzen. Dann würde ein 6 kW Generator mit 4 bis 8 Stunden täglicher Laufzeit ausreichen, je nachdem wie intensiv die Klimaanlage genutzt wird.
- 2) Die Klimaanlage läuft lediglich zeitgleich mit dem Generator.
- 3) Der Landstromleistung kann durch entsprechende Anpassung einer Gleichstrom-Konzeption (entsprechend 8.2 und 8.5.3) von 8 kW auf lediglich 1,2 kW gedrückt werden. Dann reicht in europäischen Häfen ein normaler 6 A Anschluß aus. Die Frequenzumformung von 60Hz nach 50 Hz ist im System vorhanden. Zur Anpassung an die Gleichstrom-Konzeption muß der Landstrom auf einen Gleichrichter mit 40 A bis 50 A gelegt werden um die Batterie zu laden. Alle Wechselstromverbraucher werden dann aus 2 bis 3 parallel geschalteten Umformern von je 2,5 kW versorgt.

Im folgenden Abschnitt werden zwei weitere Alternativen zur Reduzierung der Generatorleistung behandelt.

10.6.4 Powercontrol und PowerAssist

Der Einsatz von Multis mit **PowerControl** in Zusammenwirken mit einem Generator bringt die nachstehenden Vorteile (siehe Kapitel 8):

- Ununterbrochene Verfügbarkeit von Wechselstrom. Ohne Generatorbetrieb liefern die Multis den Wechselstrom. Wenn der Generator zugeschaltet wird, übernimmt er automatisch die Last, und die Multis arbeiten als Ladegeräte. Das Umgekehrte geschieht, wenn der Generator abgestellt wird.
- Mit der **PowerControl** Funktion wird eine Überlastung des Generators ausgeschlossen. Der Batterieladestrom wird automatisch heruntergeregelt, wenn der Leistungsbedarf der Multis zusammen mit anderen Verbrauchern zu einer Überlastung führen würde. Bei zwei Multis kann das $2 \times 70A \times 30V = 4,2kW$ ausmachen.

PowerAssist: der "Booster" für Landstrom und Generator

PowerAssist ist die sogenannte "Zuliefer-Funktion" des Phoenix MultiPlus (Kapitel 8). Zunächst wird dies am Beispiel des 6kW Generators aus dem vorigen Abschnitt gezeigt: Zwei Multis können eine Leistungserhöhung um 5 kW bewirken, so daß jetzt insgesamt 11 kW zur Verfügung stehen. Damit können die elektrischen Kochplatten wieder betrieben werden. Wenn der tatsächliche Verbrauch unter einen voreingestellten Maximalwert (z. B. 5 kW, um den Generator nicht dauernd unter Vollast zu fahren) fällt, werden die Multis die überschüssige Leistung zur Batterieladung bis zu maximal $2 \times 70 = 140$ A freigeben.

Analog hierzu wird natürlich auch der Landanschluß mit 5kW unterstützt. Ein 16A Anschluß kann auf diese Weise zusammen mit den zwei Multis auf 8,7 kW „hochgefahren“ werden. ($16 \text{ A} \times 230 \text{ V} = 3.680 \text{ W}$; $3,7 \text{ kW} + 5 \text{ kW} = 8,7 \text{ kW}$)

Elektrisches Kochen mit Landanschluß ist also kein Problem mehr!

10.6.5 Geringere Landstromversorgung: Das Gleichstrom-Konzept

Mit dem Gleichstrom-Konzept wird es möglich, den erforderlichen Landstrom auf ca. das Doppelte des mittleren Strombedarfs reduzieren (Abschnitt 8.4.3). Wenn der Durchschnittsverbrauch auf unter 600 W (das sind 14 kWh je Etmal) fällt, kann ein 50A Ladegerät zusammen mit einem 6A Landanschluß (Strombegrenzung eingestellt auf $1.200\text{W} / 30\text{V} = 40\text{A}$) noch ausreichen, um die benötigte Energie bereitzustellen. Zwei oder auch drei parallel geschaltete Multis (u.U. auch parallel zum Generator) können bequem alle an Bord installierten Wechselstromverbraucher versorgen.

Von den 40A, die das Ladegerät abgibt, stehen ca. 20A für die Ladung der 800Ah Batterie zur Verfügung. Bei einer auf 50% entladenen Batterie ist also eine Ladezeit von $400\text{Ah}/20\text{V} = 20$ Stunden erforderlich.

Mit dem Gleichstromkonzept wird die Energieversorgung an Bord zusätzlich unempfindlich gegen Spannungsschwankungen und andere Störungen im Landnetz. Im Übrigen arbeitet die Anlage unabhängig von 50Hz oder 60Hz Landstrom gleichermaßen gut.

10.6.6 Der 230 V Generator auf einem relativ kleinen Schiff

Üblicherweise wird die Generatorleistung nach dem höchsten an Bord zu erwartenden Leistungsbedarf bestimmt. Durch den erheblichen Leistungsbedarf moderner Haushaltsgeräte ist die oft anzutreffende Landstromabsicherung mit 16 A schon zu schwach. Das führt dazu, daß auch im Hafen der Generator laufen muß, wenn die Waschmaschine oder ein größerer E-Herd angestellt werden soll. Ohne Konzessionen an Komfort an Bord können durch neuartige Technologien und entsprechende Auslegung sowohl Umfang, Gewicht als auch Kosten des Elektro-Systems verringert werden.

Durch die Kombination von 3 Multis mit *PowerAssist* und einem Ladegerät mit 50 A wird es möglich

- zwei Zeitabschnitte von zusammen 20 Stunden ohne Generatorbetrieb zu erreichen,
- die erforderliche Generatorleistung von 12 kW auf 6 kW zu reduzieren,
- die Landstromleistung von 8 kW/16A Drehstrom auf lediglich 1,3 kW/6A Wechselstrom zu verringern,
- die Notwendigkeit eines Frequenzumformers ganz zu eliminieren,
- ununterbrochenen Wechselstrombetrieb an Bord zu ermöglichen und
- Gas an Bord überflüssig zu machen und damit die Sicherheit deutlich zu erhöhen.

10.6.7 Der Diesel-Gleichstromgenerator oder DC-Generator

Neben den üblichen 230V Generatoren bieten zahlreiche Hersteller neuerdings auch DC-Generatoren an. Mit Leistungen von bis zu 10kW können damit Ladeströme von bis zu 300A bei 28V erreicht werden. DC-Generatoren sind kleiner und leichter als Wechselstrommaschinen, und sie haben einen höheren Wirkungsgrad. Zusätzlich kann die Drehzahl dem Strombedarf entsprechend geregelt werden, so daß der hohe Wirkungsgrad auch bei kleinen Leistungen erhalten bleibt. Der DC-Generator wird zur Batterieladung eingesetzt. Der Wechselstrom wird über den Umformer erzeugt. Die Bestimmung der erforderlichen Leistung wird durch den gewünschten Ladestrom und die täglich zulässige Zahl von Betriebsstunden bestimmt. Bei einem täglichen Strombedarf von 14 kWh ergibt sich beispielweise mit einem 6kW Generator eine erforderliche Laufzeit von ca. 2 bis 3 Stunden.

10.6.8 Wirkungsgrad des Dieselgenerators

Bei Vollast erreicht ein Dieselgenerator einen Wirkungsgrad von etwas mehr als 30%. Bei abnehmender Leistung fällt der Wirkungsgrad. Üblicherweise läuft der Generator auf Yachten mit relativ niedriger Belastung. Der Wirkungsgrad liegt dann in etwa bei 10% - 20. Mit **PowerControl** und **PowerAssist** kann der Wirkungsgrad indirekt verbessert werden, da der damit mögliche kleinere Generator durch die höhere Belastung im besseren Wirkungsgradbereich arbeitet (Abschnitt 8.3.3 und 8.4).

10.6.9 Energiebereitstellung auf eine 9m bis 15 m Motoryacht

Nahezu die gesamte Wunschliste aus Abschnitt 10.5 kann hinsichtlich des Energiebedarfs von den Lichtmaschinen am Hauptmotor einer Motoryacht mit einem durchschnittlichen Verbrauch von 24A bei 24V Gleichstrom erfüllt werden, solange das Schiff in Fahrt ist. Mit anderen Worten: wenn zu erwarten ist, daß man täglich einige Stunden motort und abends im Hafen am Landstrom liegen kann, dann kann der tägliche Energieverbrauch von 14 kWh ohne einen Dieselgenerator bereitgestellt werden. Vor Anker nimmt der Verbrauch auf 22 A ab, da die Navigationsausrüstung ausgeschaltet ist. Wenn man allerdings längere Zeit ankern will sollte man den Generator doch wieder in Betracht ziehen wie oben erläutert wurde (10.6.3 bis 10.6.7).

10.7 Zusammenfassung

In der nachstehenden Tabelle werden die behandelten Alternativen aufgelistet.

Energiebedarf bis zu 14 kWh je Etmal (durchschnittlich 600 W)			
	5 kW DC-Generator	6 kW Dieselgenerator mit PowerAssist	12 kW Dieselgenerator
DC-Generator			
Stunden je Etmal	3 bis 8		
Verbrauch je Etmal	7 Liter		
Gewicht	150 kg		
Dieselgenerator			
Laufzeit in 24 Stunden		3 bis 8	4 bis 8
Verbrauch		9 Liter	11 Liter
Geräuschpegel		67 dBA	69 dBA
Gewicht		250 kg	350 kg
Batterie			
Kapazität	24V/800Ah	24V/800Ah	24V/800Ah
Gewicht	700kg	700 kg	700 kg
Landanschluß			
Stromstärke	6A	6A (DC- Konzept)	3 Phasen 8 kW
Ladegeräte	50A / 8kg	50 A / 8kg	50A / 8kg
50/60 Hz Landstromwandler	Ja, aber kein zusätzlicher Wandler	Ja, aber kein zusätzlicher Wandler	Nein, spezieller Wandler erforderlich
DC-AC Umformer			
Leistung	7,5kW (3 x Phoenix Umformer je 2,5kW)	7,5kW (3 x MultiPlus)	2,5kW Multi
Gewicht	54kg	54kg	18kg
Gesamtgewicht der Installation	962kg	1012kg	1076kg
Treibstoff für 2 Wochen	98 Liter	126 Liter	154 Liter
Gesamtgewicht einschl. Treibstoff für 2 Wochen	990kg	1118kg	1205kg

Aus der Tabelle läßt sich folgendes ablesen:

10.7.1 Die konventionelle Lösung: der 12kW Generator

Diese Alternative ist schwer und beansprucht viel Platz. Die mittlere Auslastung des Generators mit 12kW wird

- bei vier Betriebsstunden am Tag: $14 / (4 \times 12) = 29 \%$
- bei sechs Betriebsstunden am Tag: $14 / (6 \times 12) = 19 \%$

Der Landstrombedarf liegt in der Größenordnung von 8 kW. Wenn hingegen das Gleichstromkonzept angewendet wird, reduziert sich das mit einem 6 A Landanschluß auf 1,38 kW.

10.7.2 Die bessere Lösung: weniger Platz und Gewicht mit 6kW Generator und *PowerAssist* oder ein 5kW DC-Generator

PowerAssist erfordert im Beispiel der vollständig ausgerüsteten Yacht in Verbindung mit einem 6kW Dieselgenerator 2 Multis. Bei Anwendung des DC-Konzepts mit Landstrom sind 3 Multis erforderlich.

11. ENERGIEBEDARF BIS ZU 48 kWh JE ETMAL (Durchschnitt 2kWh)

11.1 Einleitung

Im vorausgegangenen Kapitel 10 wurden Schiffe mit einem Energiebedarf bis zu maximal 14 kWh betrachtet. Es konnte festgestellt werden, daß eine tägliche Energiemenge von 14 kWh in etwa für einen 4 bis 6 Personenhaushalt, ob an Bord oder in einer Wohnung an Land, mit allen notwendigen Haushaltsgeräten vollständig ausreicht, solange eine Klimaanlage nicht oder nur in geringem Umfang betrieben wird.

Ein täglicher Energieverbrauch in der Größenordnung von 4 bis 14 kWh kann als Auslegungsgröße für Motoryachten und Segel-Katamarane zwischen 9 und 15 Meter sowie für Einrumpfsegler von 12 bis zu 18 Meter gelten.

Wenn dann das Schiff nur ein paar Meter länger wird, nimmt der Energiebedarf unverhältnismäßig schnell zu. Diese größeren Yachten, seien es Charterschiffe oder nicht, haben oft eine Profimannschaft an Bord, und statt mit 4 bis 6 Personen muß mit 8 bis 12 Personen gerechnet werden. Meistens fahren derartige Yachten in tropischen oder subtropischen Gewässern was den Dauerbetrieb der Klimaanlage nach sich zieht.

Das Energieproblem wird häufig wie folgt gelöst:

- Der Dieselgenerator ist durchgängig in Betrieb
- Zusätzlich zum Dieselgenerator wird eine große Batteriebank installiert, um Perioden ohne Generatorbetrieb zu ermöglichen.

Weiterhin ist reichlich Landstrom erforderlich (was bei der Auswahl von Liegeplätzen in Yachthäfen zu Einschränkungen führt) da die Batterie nicht zur Abdeckung von Lastspitzen geeignet ist. Zusätzlich ist u.U. ein teurer und schwerer Frequenzumformer erforderlich um 60Hz Landstrom in 50Hz Bordnetzstrom umzuwandeln.

Nachstehend wird eine Yacht mit einem täglichen Energiebedarf von 48 kWh bzw. einem Durchschnittsbedarf von 2kW untersucht.

11.2 Die wesentlichsten Verbraucher

Die wesentlichen Dauer- bzw. Langzeitverbraucher sind

- Kühl- und Tiefkühlschränke: im Durchschnitt ca. 300 W,
- Klimaanlage: 12 kW (41.000 BTU) mit einer elektrischen Leistungsaufnahme von 3 kW.

Die wesentlichen kurzzeitigen Verbraucher sind

- E-Herd mit sechs Kochstellen und Backofen: 12kW
- Trinkwassererzeuger für 300 l/Std. Trinkwasser: 3kW (Anlaufstrom 15 kW)
- Waschmaschine und Geschirrspüler: 6 kW bis 12 kW
- Tauchkompressor

Alle übrigen Verbraucher spielen bei der Auslegung des Gesamtsystems eine untergeordnete Rolle. Der Durchschnittsverbrauch liegt bei 2kW.

11.3 Energieerzeugung

11.3.1 Das Generator-Schiff: Generatorbetrieb 24 Std.

Unter der Voraussetzung, daß kurzzeitige Verbraucher während des Kochens abgeschaltet sind und nicht alle Kochplatten gleichzeitig unter Vollast stehen, wird ein Generator mit einer Leistung von 15 kW erforderlich. Aus praktischen Gründen wird ein 20 kW Generator eingebaut. Häufig wird an eine derartige Maschine zusätzlich eine Hydraulikpumpe z.B. zur Versorgung des Bugstrahlruders angeschlossen. Bei der Auslegung des Systems für kontinuierlichen Generatorbetrieb wird oft noch ein kleinerer - z.B. 6 kW - Generator zusätzlich für die Zwischenperioden mit geringerer Leistungsanforderung vorgesehen. Bei dieser Auslegung können Batteriekapazitäten und Ladegeräte klein gehalten werden, da nahezu durchgängig Generatorstrom bereitsteht.

Obwohl dieses Konzept auf den ersten Blick einfach und kostengünstig aussieht, so hat es doch einige erhebliche Nachteile:

- Für eine unterbrechungsfreie Stromversorgung werden aufwendige Umschalteneinrichtungen mit Synchronisationseinrichtung beim Umschalten bez. der Lastverteilung zwischen Generatoren oder zum Landanschluß erforderlich. Diese sind komplex und teuer.
- Der Landanschluß mit 20 kW muß über mindestens 32 A Dreiphasenstrom verfügen
- Für eventuell erforderlich werdende Frequenzumwandlung (z.B. USA) muß ein teurer und schwerer Wandler für 20 kW vorhanden sein.
- Der 20 kW Generator hat bei 24-stündigem Betrieb und einer Durchschnittslast von 2 kW eine Auslastung von lediglich 10%. Das ist schlecht für den Motor und es erhöht den Treibstoffverbrauch. Selbst mit dem zweiten kleineren Generator steigt die Auslastung nur auf 20% was zwar besser aber immer noch nicht zufriedenstellend ist.
- Schließlich darf man Dauergeräusch, Vibrationen, Dieselgeruch und andere Verunreinigungen nicht übersehen. Außerdem wird zunehmend der Generatorbetrieb in Yachthäfen und Naturschutzgebieten verboten.

11.3.2 Einbau einer Batterie für generatorfreie Perioden

Die Möglichkeit wurde schon in 10.6.3 erwähnt, wobei allerdings hier die Batterie wesentlich größer wird.

Batteriekapazität

Die Kapazität wird durch die Dauer der generatorfreien Periode und ganz wesentlich vom Betrieb der Klimaanlage bestimmt. Es wird angenommen, daß der Generator wenigstens zweimal täglich mit insgesamt ca. 8 Stunden läuft, und daß währen dieser Zeit der Herd, der Trinkwassererzeuger, die Waschmaschine und der Geschirrspüler in Betrieb sind. Die Durchschnittslast während der generatorfreien Perioden soll ca. 1,5 kW (63 A) entsprechen. Daraus ergibt sich mit $1,5 \times (24 - 8) = 24$ kWh bez. eine Strommenge von $24 \text{ kWh} / 24 \text{ V} = 1000$ Ah, die Tag für Tag der Batterie entnommen wird. Die erforderliche Batteriekapazität ergibt sich entsprechend der Faustregel aus Abschnitt 8.5.2 mit 2.000 Ah. In diesem Fall werden also 50% der je Etmal erforderlichen 48 kWh durch die Batterie bereitgestellt und die übrigen 24 kWh liefert der Generator.

Der Generator

Während 8 Stunden muß der Generator 8.000 Ah in die Batterie laden. Der Ladestrom muß durchgängig höher sein als $1000/8 = 125$ A. z.B. werden 175 A angenommen. Daraus ergibt sich für den Generator eine Belastung von $175 \text{ A} / 30 \text{ V} = 5,25$ kW. Dies kann der genannte 20 kW Generator unter der Voraussetzung leisten, daß die Ladegräte abschalten, sobald der E-Herd und andere starke Verbraucher gleichzeitig zugeschaltet werden. Der Generator liefert dann $1000 \text{ Ah} \times 30 \text{ V} = 30$ kWh für die Batterie und zusätzlich 24 kWh für die angeschlossenen Geräte. Insgesamt werden also $30 \text{ kWh} + 24 \text{ kWh} = 54 \text{ kWh}$ einschließlich von Lade/Entladeverlusten erzeugt.

Durch den Einbau der 2000 Ah Bordnetzatterie erreicht man:

- Ruhe an Bord während der zwei mal achtstündigen Abschaltzeit des Generators
- Reduktion der Generatorstunden von 24 auf 8
- Die durchschnittliche Generatorbelastung steigt von 2kW auf $54/8 = 6,75$ kW.

Dennoch ist noch ein Landanschluß von 15 kW und der 50/60 Hz Frequenzumformer notwendig.

11.3.3 Multis mit *PowerControl* in Parallelschaltung und DC-Konzept für Landstrom

Die Nutzung von Multis und *PowerControl* bringt im Zusammenwirken mit dem Generator folgende Vorteile (siehe Kapitel 8):

- An Stelle eines Drehstromgenerators kann ein eine Einphasenmaschine genommen werden. Auch der Landstrom ist üblicherweise einphasig.
- Keine Unterbrechung der des Stroms. Bei Stillstand des Generators übernehmen die Multis die Wechselstromversorgung. Sobald der Generator gestartet wird, werden alle Lasten automatisch und unterbrechungsfrei darauf geschaltet, während die Multis die Ladefunktion übernehmen. Der umgekehrte Vorgang läuft beim Abschalten des Generators ab.
- Mit der *PowerControl* Funktion wird das Risiko der Überlastung des Generators ausgeschlossen. Der Ladestrom für die Batterie wird automatisch heruntergefahren, wenn der Energiebedarf der Multis in Verbindung mit anderen Verbrauchern zu einer Überlastung führen würde (5 Multis liefern $5 \times 70A \times 30V = 10,5kWh$).
- Durch eine entsprechende Anwendung des DC-Konzepts kann die benötigte Landstromleistung von 15 kW auf 3,5 kW zurückgenommen werden. In europäischen Häfen führt das zu einem normalen Wechselstromanschluß mit 16 A statt eines Dreiphasenanschlusses. Die 50/60 Hz Frequenzumformerfunktion ist im Multi enthalten. Die Anpassung des DC-Konzepts bedeutet, daß der Landstrom auf ein oder mehrere Ladegeräte gelegt wird, so daß ein Ladestrom von 100 A zur Verfügung steht. Die Verbraucher an Bord werden dann aus den 5 Multis versorgt, die zusammen eine Dauerleistung von 10 kW und kurzzeitig 15 kW abgeben können.

Ein Ladestrom von 100 A erscheint zunächst gering: der tägliche Energiebedarf von 48 kWh führt zu einem durchschnittlichen Strom von $(48kWh/24h) / 24V = 83A$. Andererseits ist es sehr angenehm mit einem 16A Landanschluß auszukommen. In der Realität wird der Energieverbrauch im Hafen niedriger werden, da die Navigationsausrüstung, der Trinkwassererzeuger und andere Verbraucher abgeschaltet sein werden.

11.3.4 Der nächste Schritt: MultiPlus mit *PowerAssist*

Bei einem Energiebedarf von 48 kWh je Etmal, d.h. 54 kWh unter Berücksichtigung aller Lade/Entlade-Verluste muß der Generator während der 8 Betriebstunden im Durchschnitt $54/8 = 6,75kW$ leisten. Auf der Basis dieses Durchschnittsverbrauchs könnte selbst unter Einschluß von Reserve statt des 20 kW Generators einer mit 10 kW ausreichen. Der Einbau von 5 MultiPlus mit *PowerAssist* erhöht die verfügbare Leistung von 10 kW auf $10 + 5 \times 2,5 = 22,5kW$.

Sobald die abgenommene Leistung über einen voreingestellten Wert (im Beispiel auf 8 kW, damit der Generator nicht ständig unter Vollast läuft) ansteigt werden die Multis die zusätzlich benötigte Leistung aus der Batterie bereitstellen. Die verfügbare Energie aus der 2000 Ah Batterie ($24 \times 2000 \times 0,5 = 24kWh$) ist mehr als ausreichend um kurzzeitige Energiespitzen über die *PowerAssist* Funktionalität abzufangen.

Wenn die abgenommene Leistung wieder unter 8kW fällt, werden die Multis die Überschußenergie in die Batterien laden. Der maximal mögliche Ladestrom der 5 parallel geschalteten Multis ist 350 A, was $350A \times 30V = 10,5kW$ entspricht. Das ist mehr als nötig und mehr als der Generator abgeben kann.

Landstrom

Wenn immer Landstrom genutzt werden soll, ist die in Abschnitt 11.3.3. beschriebene DC-Konzeption die beste Lösung.

Zusammenfassung zum Thema Dieselgenerator

Mit einer 2000 Ah Batterie, 5 Multiplus-Geräten mit *PowerAssist* und einem 100 A Gleichrichter ist jetzt Folgendes möglich:

- zwei Stillstandsperioden des Generators von zusammen 16 Stunden,
- Leistungsreduktion des Generators von 20 kW (Dreiphasen) auf 10 kW Wechselstrom,
- Reduktion der Landanschlußleistung von 15 kW (Dreiphasen 25 A) auf nur 3 kW (6A 230 V),
- Elimination des 15 kW Frequenzumformers (60/50 Hz),
- ununterbrochene Bordstromversorgung und
- Erhöhung der inneren Redundanz im System und damit größere Sicherheit

11.3.5 Der Gleichstromgenerator

Eine Alternative zum 230V Generator mit 10kW ist entsprechend Abschnitt 10.6.7 ein Gleichstromgenerator gleicher Leistung.

11.3.6 Zusätzlicher Einbau eines kleinen DC-Hilfsgenerators

Hiermit wird eine weitere Reduktion der Betriebszeit des Hauptgenerators und die der Batteriekapazität auf ca. auf 1000 Ah erreicht werden. Dieser kleine Generator kann auf einer größeren Yacht so eingebaut werden, daß er nicht mehr wahrnehmbar ist.

11.4 Zusammenfassung

In der Tabelle sind die Alternativen für den täglichen Leistungsbedarf von 48 kWh aufgelistet.

Energiebedarf bis zu 48 kWh je Etmal (Durchschnitt 2 kW)			
	10 kW DC-Generator mit <i>PowerAssist</i> und Hilfs-Generator	20 kW Dieselgenerator mit <i>PowerControl</i> und Hilfs-Generator	20 kW Dieselgenerator mit generatorfreien Perioden
Hilfsgenerator 5 kW			
Betriebsstunden je Etmal	12	12	
Verbrauch je Etmal	8 Liter	8 Liter	
Gewicht	150 kg	150 kg	
Generator			
Betriebsstunden je Etmal	6	6	8
Verbrauch je Etmal	15 Liter	20 Liter	30 Liter
Gewicht	300 kg	450 kg	450 kg
Batterie			
Kapazität	24 V / 1000 Ah	24 V / 1000 Ah	24 V / 2000 Ah
Gewicht	1000 kg	1000 kg	2000 kg
Landstrom	3,5 kW	3,5 kW	15 kW
Anschlußwert	16 A 1-Phase	16 A 1-Phase	32 A 3-Phasen
Gewicht 15 kW Frequenz-Umformer	Nicht erforderlich	Nicht erforderlich	545 kg
Ladegeräte / Umformer			
Ladegeräte	100 A 12 kg	100 A 12 kg	200 A 24 kg
Umformer	12,5 kW (5 x MultiPlus)	10 kW (4 x Multi)	2,5 kW
Gewicht	90 kg	72 kg	18 kg
Gesamtgewicht	1552 kg	1684 kg	3037 kg

Die Tabelle verdeutlicht folgendes:

11.4.1 Der 20 kW Generator mit generatorfreien Perioden (rechte Spalte)

Diese Alternative weist das höchste Gewicht aus; die Batterie ist schwer und teuer, besonders wenn hier ein Fehler auftritt und ein Austausch vorgenommen werden muß. Die Alternative mit über 24 Stunden durchlaufendem Generator ist auch nicht besonders attraktiv. Ein zweiter Generator mit 6kW Leistung reicht für den längeren Teil des Tages aus, so daß der große 20kW Generator nur eingeschaltet wird, wenn der Bedarf es erfordert. Neben Geräusch- und Abgasbelastigung fallen hohe Wartungskosten an: auch ein 1500 min⁻¹ Generator muß neben der regelmäßigen Wartung nach 8000 bis 20000 Betriebsstunden (ein bis drei Jahre) eine Generalüberholung haben. Je nach Fahrtgebiet muß zusätzlich ein teurer und schwerer Frequenzumformer installiert werden.

11.4.2 *PowerControl* und das DC-Konzept für Landstrom und ein Hilfsgenerator zur Verringerung der Batteriekapazität (mittlere Spalte)

Durch Anwendung des DC-Konzepts wird das Landstrom Problem gelöst. Durch den zusätzlichen Einbau eines kleinen Generators kann die Batteriekapazität auf 1000 Ah zurückgenommen werden. Dadurch verringert sich auch das Gewicht um 1000 kg.

11.4.3 Kleiner Generator und *PowerAssist* : DC-Konzept bei Landstrom und Gleichstrom-Generator (linke Spalte)

Der wesentliche Unterschied im Vergleich zu 11.4.2 ist der kleinere Generator mit 10 kW statt 20 kW, wodurch das Gewicht nochmals um 130 kg verringert wird.

12 ENERGIEBEDARF BIS ZU 240 kWh JE ETMAL (durchschnittlich 10 kW)

12.1. Einleitung

In Kapitel 11 wurde gezeigt, wie mit neuen Technologien der Umfang, das Gewicht und die Komplexität eines Energiesystems beträchtlich reduziert werden kann. Im folgenden sollen noch höhere Leistungsbereiche behandelt werden, und es wird gezeigt, welche Rolle die Multis dabei übernehmen können.

12.2. Die wichtigsten Verbraucher

Ein durchschnittlicher Verbrauch von 10 kW ist auf Yachten bis ca. 30 Meter zu erwarten.

- Größte Einzelverbraucherin ist im allgemeinen die Klimaanlage, die in tropischen Gewässern über 24 Stunden durchläuft. Die nominale Kühlleistung liegt z.B. bei 100.000 BTU (30 kW). Bei einer Leistungszahl von 4 (Abschnitt 6.2) ergibt das bei voller Leistung einen elektrischen Leistungsbedarf von $30/4 = 7,5$ kW. Selbst wenn durchschnittlich nur 5 kW erforderlich sind, ist das immer noch die Hälfte des Gesamtverbrauchs!
- Die nächstgrößten Verbraucher sind Küchen-Einrichtungen und -Geräte sowie Waschmaschinen, Trinkwassererzeuger und Beleuchtung. Im allgemeinen ist Nachts der Verbrauch um ein Drittel niedriger.

12.3. Energiequellen

12.3.1. Generatoren

Der Hauptgenerator kann z.B. eine Leistung von 50 kW haben. Ein zweiter mit ca. 8 kW wird benutzt, wenn nur wenige Personen an Bord sind. Diese Auslegung hat die gleichen Nachteile wie die aus Abschnitt 11.3.1 bekannten:

- Wenn eine unterbrechungsfreie Versorgung auch beim Umschalten zwischen den Generatoren oder auf den Landanschluß gewährleistet sein soll, müssen aufwendige Synchronisierungseinrichtungen vorhanden sein.
- Der Landanschluß muß eine Leistung von 50 kW sicherstellen.
- Für Übersee-Fahrten sind u.U. aufwendige und schwere Frequenzumformer erforderlich.
- Der 50 kW Generator wird im Durchschnitt lediglich mit $10/50 = 20\%$ ausgelastet. Das ist nicht nur schlecht für den Generator, sondern auch für den Brennstoffverbrauch. Ein zweiter kleinerer Generator kann den Auslastungsgrad möglicherweise auf 30% anheben, aber wirklich besser ist das nicht.
- Schließlich stören Lärm, Vibrationsbelastung und Abgase. Einschränkungen hinsichtlich der Betriebserlaubnis von Generatoren an Bord von Yachten erschweren die Situation zusätzlich.

12.3.2 Zusatzbatterie für generatorfreie Perioden und Generatorbetrieb mit *PowerAssist*

Diese Alternative ist nur dann sinnvoll, wenn die hohe Leistung von 50kW nur kurzzeitig und selten benötigt wird, und sonst meist unter 20 kW bleibt.

Die Batterie

Wenn der Verbrauch über längerer Zeiträume, z.B. für 8 Stunden des Nachts und 6 bis 8 Stunden am Tag, auf durchschnittlich 4,5 kW reduziert werden kann, ergibt sich die Batteriekapazität mit $4,5\text{kW} \times 16\text{h} = 72\text{kWh}$ und $72\text{kWh}/24\text{V} = 3000\text{Ah}$ entsprechend der Faustregel aus Abschnitt 8.5.2 zu 6000 Ah.

Generator, Multis und Landstrom

Es ist jetzt sinnvoll, die Überlegungen auf den durchschnittlichen Bedarf an Stelle des Spitzenbedarfs zu lenken (Abschnitt 8.5).

Im vorliegenden Beispiel wird ein Anteil von 72 kWh des täglichen Gesamtbedarfs von 240 kWh aus der Batterie bereitgestellt. Die restlichen 168 kWh liefert der Generator. Die zur Batterieladung notwendige Energiemenge beträgt $3000\text{Ah} \times 30\text{V} = 90\text{kWh}$. Dementsprechend muß der Generator täglich $168\text{kWh} + 90\text{kWh} = 258\text{kWh}$ bereitstellen. Bei einer Laufzeit von täglich 8 Stunden ist eine Leistung von mindestens $258\text{kWh}/8\text{h} = 32\text{kW}$ erforderlich. Mit entsprechender Leistungsreserve sollte eine 40 kW Maschine vorgesehen werden.

Mit 5 Multis je Phase kann die verfügbare Dauerleistung um $15 \times 2,5\text{kW} = 37,5\text{kW}$ auf insgesamt $37,5\text{kW} + 40\text{kW} = 77,5\text{kW}$ erhöht werden. Wenn jetzt die benötigte Wechsellastleistung über einen eingestellten Grenzwert von z.B. 35kW - um den Generator nicht bis zur Leistungsgrenze zu belasten - ansteigt, werden die Multis die Differenz aus der Batterie entnehmen und ins Netz speisen. Die aus der 6000Ah Batterie zur Verfügung stehende Energie ($24\text{V} \times 6000\text{Ah} \times 0,5 = 72\text{kWh}$) ist mehr als

ausreichend, um für eine gewisse Zeit 10 bis 20 kW zusätzlich bereitzustellen. Sobald die tatsächlich benötigte Leistung unter 35 kW fällt, wird über die Multis die Batterie geladen. Der maximale Ladestrom der 15 Multis beläuft sich auf $15 \times 70A = 1050A$ d.h. weit mehr als nötig ist.

Eine wertvolle zusätzliche Eigenschaft der Multis besteht darin, eventuell unterschiedliche Phasenbelastung des Generators automatisch auszugleichen.

Die Reduktion der Landstrombelastung führt wiederum zum DC - Konzept. Der tägliche Energiebedarf von 240 kWh läßt sich auf $240kWh / 24h / 24V = 416A$ bei 24V umrechnen. Dieser Strom kann von 6 Ladegeräten zu je 100A geliefert werden. Die erforderliche Landstromleistung ist dann 18 kW (32 A Dreiphasenstrom). Die Landstrombegrenzung auf 18 A kann auch durch die Multis in Verbindung mit der *PowerAssist* Funktion erreicht werden; dann ist allerdings keine Frequenzumformung mehr möglich.

Mit einer 6000 Ah Batterie, 15 Multis und 6 Ladegeräten zu je 100 A kann man im System

- zwei generatorfreie Perioden mit zusammen 16 Stunden Dauer schaffen,
- den Leistungsbedarf für den Generator von 50 kW auf 40 kW (3-Phasen) reduzieren,
- die Landstromleistung von 50kW (3-Phasen 75A) auf 20kW (3-Phasen 32A) reduzieren,
- den 50 kW Frequenzumformer für 60 Hz Landstrom eliminieren,
- eine ununterbrochene Stromversorgung an Bord gewährleisten und
- die Redundanz im System und damit die Sicherheit deutlich verbessern.

12.3.3 Einbau eines 8 kW Hilfsdiesels zur Reduktion der Laufzeit des Hauptgenerators und zur Verringerung der Batteriekapazität

Auf einem großen Schiff kann ein kleiner Generator so eingebaut werden, daß keine nennenswerte Geräuschbelastung entsteht. Die Batteriekapazität kann dann auf ca. 2000 Ah reduziert werden. Dieser (Einphasen) Generator kann zusammen mit 3 von 9 Multis auf einer Phase eine Spitzenleistung von $8 + 7,5 = 15,5$ kW abdecken, während auf den anderen beiden Phasen je drei Multis weitere 7,5 kW leisten.

12.4 Vergleich der Alternativen bei 10 kW Durchschnittsverbrauch

Energiebedarf bis 240 kWh per Etmal (Durchschnitt 10 kW)		
	40 kW Generator mit 9 Multis und <i>PowerAssist</i> . 2000 Ah Bordnetzatterie 8 kW Hilfsdiesel	AC-Konzept
Generatoren		
Leistung	1 x 40 kW + 1 x 8 kW	1 x 50 kW + 1 x 10 kW
Betriebs-Stunden je Etmal	1 x 4 Stunden + 1 x 20 Stunden	1 x 10 Stunden
		1 x 14 Stunden
Verbrauch je Etmal	95 Liter	120 Liter
Gewicht	800 kg	1200 kg
Batterie		
Kapazität	2000 Ah	400 Ah
Gewicht	2000 kg	400 kg
Landanschluß	18 kW	50 kW
Nennstrom	3 x 32 A	3 x 100 A
Gewicht Frequenzwandler 50 kW	Nicht erforderlich	1300 kg
Umformer		
Leistung	37.5 kW (15 Multis)	6 kW
Gewicht	270 kg	54 kg
Batterie-Ladegeräte		
Strom	600 A	75 A
Gewicht	80 kg	10 kg
Gesamtgewicht	3000 kg	2964 kg
Brennstoffverbrauch für 2 Wochen	1330 Liter	1680 Liter
Gesamtgewicht einschließlich Brennstoff für 2 Wochen	4017 kg	4375 kg

Die Tabelle zeigt folgendes:

Das wesentliche Ergebnis ist, daß mit einem täglichen Leistungsbedarf von ca. 240 kWh die Grenzen der in dieser Schrift behandelten neuartigen Technologien erreicht wurden. Die für die Anwendung des DC-Konzepts mit *PowerAssist* erforderliche Batteriegröße erhöht Gewicht und Kosten erheblich. Lediglich dann, wenn längere Generatorpausen möglich sind, oder die Leistungsanforderung über längere Zeit deutlich unter 240 kWh fällt, kann *PowerAssist* in Verbindung mit dem DC-Konzept eine brauchbare Alternative sein.

13. ZUSAMMENFASSUNG

13.1 Stromverbrauch an Bord

- An Bord von kleineren Yachten sind Kühlschrank und Tiefkühlschrank oft die größten Verbraucher. Mit guter Isolierungen und wassergekühlten Wärmetauschern kann die erforderliche Batteriekapazität deutlich reduziert werden.
- Selbst kleine Klimaanlage sind wahre Energievernichter.
- Der Energieverbrauch von Langzeitverbrauchern - und hier hauptsächlich von Navigations-Ausrüstung und Kühlschränken - wird häufig unterschätzt.
- Im Gegensatz dazu wird der Energieverbrauch von Kurzzeit-Verbrauchern wie Mikrowelle, E-Herd, Waschmaschine oder Pumpen und Winschen oft überbewertet.

13.2 Energiebereitstellung

- Der erste Schritt zur Bereitstellung von mehr Energie kann durch den Einbau einer zweiten oder größeren Lichtmaschine sowie durch die Erhöhung der Batteriekapazität auf mindestens das Dreifache des Ladestroms (maximal C / 3) getan werden.
- Die Auslegung der elektrischen Systeme an Bord sollte mit einer sorgfältigen Berechnung des zu erwartenden Energiebedarfs je Etmaal beginnen.
- Häufig wird die geringe Leistung des Landanschlusses bei der geplanten Installation eines Generators übersehen. Er ist häufig leistungsfähiger als der Landanschluß, was dazu führt, daß er auch im Hafen laufen muß; um z.B. zu kochen oder zu waschen.

13.3 Das DC-Konzept

- Beim DC-Konzept ist die Batterie das Herz der Anlage. Hier sind sowohl Energiequellen als auch Verbraucher angeschlossen. Aus der Batterie wird Zusatzenergie bereitgestellt, wenn der Bedarf das erfordert und umgekehrt wird überschüssige Energie gespeichert, wenn der Bedarf wieder abnimmt. Die Batterie arbeitet als Spitzenlastausgleich (peak shaving).
- Das DC-Konzept ermöglicht es, auch bei eingeschränktem Energieangebot durch Landanschluß oder kleineren Generator die elektrischen Geräte an Bord ohne Einschränkung nutzen zu können.
- Mit dem DC-Konzept hat man zusätzlich einen 50/60 Hz Frequenzumformer.

13.4 *PowerAssist* – Das batteriegestützte AC-Konzept

- Ähnlich wie beim DC-Konzept nutzt *PowerAssist* eine Batterie als Energiespeicher, nur ist jetzt die Verbindung zwischen Energielieferant und Verbraucher eine Wechselspannung statt einer Gleichspannung. Eine oder mehrere MultPlus Umformer/Lader-Kombinationen, die zum Generator oder zum Landanschluß parallel geschaltet sind, liefern je nach Anforderung mehr Leistung oder speichern den Überschuß bei geringerer Abnahme in die Batterie.
- So wie beim DC-Konzept ermöglicht es *PowerAssist*, auch bei eingeschränktem Energieangebot durch den Landanschluß oder einen kleinerem Generator die elektrischen Geräte an Bord ohne Einschränkung nutzen zu können.
- Mit der *PowerAssist* Funktionalität kann Gewicht und Platz an Bord gespart werden.
- Die durch *PowerAssist* mögliche höhere durchschnittliche Generatorbelastung führt zu geringerem Wartungsaufwand, geringerem Brennstoffverbrauch und zu längerer Lebensdauer.
- *PowerAssist* eignet sich nicht als Frequenzwandler. Maximale Flexibilität erhält man mit einem zusätzlichen Gleichrichter und entsprechender Anpassung des DC-Konzepts, wenn der Landstromanschluß benutzt werden soll.

13.5 Die Bordnetzatterie

- Die nutzbare Kapazität der Bordnetzatterie liegt bei höchstens bei 50% der Nennkapazität. Der Grund liegt darin, daß sie selten auf unter 30% entladen und oft auch nicht auf mehr als 80% geladen wird.
- Auf größeren Yachten mit Dieselgenerator und kräftiger Bordnetzatterie zur Gewährleistung generatorfreier Zeitintervalle kann mit einem kleinen und geräuscharmen Zusatzgenerator die Größe und das Gewicht der Bordnetzatterie deutlich verringert werden.

Bezeichnungen, Einheiten, Berechnungsformeln			
Bezeichnung	Kurzzeichen	Einheit	Symbol
Strom	I	Ampere	A
Spannung	U	Volt	V
Leistung	N	Watt; Kilowatt	W; kW
Widerstand	R	Ohm	Ω
Kapazität = gespeicherte Strommenge	C	Amperestunde	Ah
Verbrauch = entnommene Leistung pro Zeiteinheit	Wh; kWh	Watt/Kilowattstunde	Wh; kWh
Frequenz	ω	Herz	Hz
Drehzahl	n	Umdrehung/Minute	min^{-1}

$$\text{Leistung} = \text{Spannung} \times \text{Strom} = U \text{ (V)} \times I \text{ (A)} = N \text{ (W)}$$

$$\text{Verbrauch} = \text{Leistung} \times \text{Zeit} = N \text{ (W)} \times t \text{ (h)} = \text{Wh}$$

$$\text{Kapazität} = \text{Strom} \times \text{Zeit} = I \text{ (A)} \times t \text{ (h)} = \text{Ah}$$

$$\text{Energie} = \text{Kapazität} \times \text{Spannung} = C \text{ (Ah)} \times U \text{ (V)} = \text{Wh}$$

$$\text{Wirkungsgrad} = \text{entnommene Energie} / \text{zugeführte Energie} = \eta$$

$$\text{Batteriewirkungsgrad } \eta_{\text{Bat.}} = U_{\text{Bat.}} / U_{\text{Lad.}}$$

Peukert Gleichungen: $C_p = I^n \times T$ mit C_p = Peukert-Kapazität und n = Peukert Exponent.

$$C_p = I_1^n \times T_1 = I_2^n \times T_2$$

$$n = \log(T_1 / T_2) / \log(I_1 / I_2)$$

$$\text{Thermodynamische Leistungszahl } \varepsilon = \eta_r \times \eta_c = \eta_r \times T_u(T_h - T_u)$$

mit ε = Leistungszahl,

T_u = Verdampfertemperatur in Grad Kelvin ($^{\circ}\text{K} = ^{\circ}\text{C} + 273$),

T_h = Kondensatortemperatur in $^{\circ}\text{K}$,

η_r = Maschinenwirkungsgrad und

η_c = der theoretische Kühlwirkungsgrad