

# **Elektronisches Management für dezentrale Energieversorgungssysteme am Beispiel von Segelyachten**

## **Diplomarbeit**

**zur Erlangung des akademischen Grades Diplomingenieur**

**eingereicht am Institut für Elektrotechnik der**



**Humboldt-Universität zu Berlin**

**von: Frank Reinecke**  
**Matrikel: F90**  
**geb.: 21.01.1966 in: Saalfeld**

**1. Gutachter:**

**2. Gutachter:**

**Registrier-Nr.:**

**eingereicht am:**

**verteidigt am:**

**September 1997**



# HUMBOLDT-UNIVERSITÄT ZU BERLIN

Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät II

Institut für Elektrotechnik

Lehrstuhl Elektronik

Unter den Linden 6, Sitz: Invalidenstraße 110, 10099 Berlin, Telefon: 20937905 Fax: 20937692

13.3.1997

## Aufgabenstellung für eine Diplomarbeit

**Thema:** Elektronisches Management für dezentrale Energieversorgungssysteme  
am Beispiel von Segelyachten

**Bearbeiter:** Frank Reinecke Matrikel F90


**Kurzthema:** Elektronisches Energiemanagement

### Schwerpunkte:

1. Literaturrecherche und Analysen zum Stand der Technik von dezentralen Energieversorgungssystemen
2. Analyse und Klassifikation der Eigenschaften und des Betriebsverhaltens einsetzbarer Quellen und Verbraucher
3. Simulationsrechnungen zur Energiebilanz
4. Ableitung der Aufgaben für ein Controllersystem zur Energieversorgung einer Segelyacht
5. Entwurf, Realisierung und Test der Controllerschaltung einschließlich der Peripherie
6. Darstellung von Testergebnissen, Dokumentation

**Betreuer:** Prof. Dr. H. Langer, HUB  
Dr. M. Günther, HUB

**Bearbeitungszeitraum:** 30.4.1997 bis 1.9.1997

  
Prof. Dr. H. Langer  
Geschäftsführender Institutsdirektor

## Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis .....	IV
Tabellenverzeichnis .....	V
Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen und Symbole .....	VI
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Energie auf Segelyachten .....</b>	<b>3</b>
<b>2.1 Die elektrische Anlage auf Segelyachten .....</b>	<b>3</b>
<b>2.2 Energiequellen auf Segelyachten .....</b>	<b>6</b>
<b>2.2.1 Solarmodul.....</b>	<b>6</b>
<b>2.2.1.1 Energiegewinn aus Sonnenenergie.....</b>	<b>7</b>
<b>2.2.1.2 Betrachtung eines ausgewählten Solarmoduls.....</b>	<b>11</b>
<b>2.2.2 Windgenerator.....</b>	<b>11</b>
<b>2.2.2.1 Energiegewinn aus dem Windgenerator .....</b>	<b>12</b>
<b>2.2.2.2 Betrachtung der ausgewählten Windgeneratoren.....</b>	<b>13</b>
<b>2.2.3 Drehstromgenerator am Dieselmotor .....</b>	<b>15</b>
<b>2.2.4 Der mobile Drehstromgenerator .....</b>	<b>16</b>
<b>2.2.5 Wellengenerator .....</b>	<b>16</b>
<b>2.2.6 Schleppgenerator.....</b>	<b>17</b>
<b>2.2.7 Landstromanschluß.....</b>	<b>17</b>
<b>2.3 Energiespeicher .....</b>	<b>18</b>
<b>2.3.1 Typenübersicht.....</b>	<b>19</b>
<b>2.3.2 Aufbau und Wirkungsweise einer Batterie .....</b>	<b>20</b>
<b>2.3.2.1 Entladevorgang .....</b>	<b>21</b>
<b>2.3.2.2 Ladevorgang .....</b>	<b>22</b>
<b>2.3.3 Zusammenschaltung von Batterien.....</b>	<b>23</b>
<b>2.3.4 Ladung eines Bleiakkumulators.....</b>	<b>25</b>
<b>2.3.4.1 Ladekennlinien .....</b>	<b>27</b>
<b>2.3.4.2 Spannungsbereiche der Batterien mit flüssigem Elektrolyten.....</b>	<b>29</b>
<b>2.3.4.3 Besonderheiten der Batterien mit festem Elektrolyten .....</b>	<b>30</b>
<b>3 Simulationsberechnungen zur Energiebilanz und Konsequenzen.....</b>	<b>31</b>
<b>3.1 Energiebilanz einer Segelyacht im Binnen- bzw. Küstenbereich .....</b>	<b>33</b>
<b>3.2 Energiebilanz einer Segelyacht auf großer Fahrt.....</b>	<b>35</b>
<b>3.3 Wahl der geeigneten Batterie .....</b>	<b>36</b>
<b>4 Elektronisches Controllersystem zur Energieversorgung einer Segelyacht .....</b>	<b>39</b>
<b>4.1 Ableitung der Aufgaben eines Controllersystems.....</b>	<b>39</b>
<b>4.1.1 Batterieüberwachung.....</b>	<b>40</b>
<b>4.1.2 Energieerzeugerüberwachung .....</b>	<b>41</b>
<b>4.1.3 Management der Ladung bzw. Entladung.....</b>	<b>42</b>
<b>4.2 Konzept des Energiemanagement.....</b>	<b>46</b>

---

4.3 Strukturmodell des Energiesystems.....	48
5 Entwurf des Controllers.....	51
5.1 Konstruktionsmerkmale für den Einsatz auf Segelyachten.....	52
5.2 Realisierung .....	53
5.2.1 Hardwareentwurf des Controllers.....	54
5.2.2 Bemessung der Peripherie am Beispiel des analogen Schalters .....	55
5.2.3 Anforderungen an die Programmierung des Mikrocontrollers .....	60
6 Ausblick .....	62
7 Zusammenfassung.....	63
<b>Anhang</b> .....	64
A Technische Daten des Solarex Solarmodul MSX-30L .....	64
B Technische Daten des Windseeker .....	65
C Technische Daten des Air Marine .....	66
D Technische Übersicht des Mikrocontrollers PIC14000 .....	67
E PIC14000 Blockschaltbild.....	68
F Pinbelegung PIC14000 .....	69
G Schaltungsbeispiel einer Ladereglung .....	70
H Übersicht von Leistungs - MOSFETs .....	71
9 Quellenverzeichnis.....	72

## Abbildungsverzeichnis

2.1	Übersicht der Energiequellen und Verbraucher auf einer Segelyacht .....	4
2.2	Anordnung der elektrischen Ausrüstung einer Segelyacht .....	5
2.3	Prinzipskizze und Ersatzschaltung einer Solarzelle .....	6
2.4	Ersatzschaltung eines Solarpanels, Parallelersatzschaltung der Solarpaneelen .....	7
2.5	grafische Darstellung der erzeugten Energie [Ah / Tag] durch zwei Solarmodule von jeweils 53 W bei einer Spannung von 12 V .....	8
2.6	Windportrait an der Ostsee, Nordsee und den Balearen .....	12
2.7	Foto von Windseeker 503 .....	14
2.8	Foto von Air Marine .....	14
2.9	Schrittdarstellung eines Akkumulators .....	20
2.10	Reihenschaltung von Bleiakkumulatoren .....	23
2.11	Parallelschaltung von Bleiakkumulatoren .....	24
2.12	Reihenparallelschaltung von Bleiakkumulatoren .....	24
2.13	Ungeregeltes Ladegerät .....	25
2.14	Sekundär geregeltes Ladegerät .....	25
2.15	Primär geregeltes (getaktetes) Ladegerät .....	26
2.16	Ladekennlinien .....	27
4.1	Zeitmodell des Managements .....	43
4.2	Einteilung der Verbrauchergruppen .....	47
4.3	Strukturübersicht des elektrischen Systems auf einer Segelyacht .....	49
5.1	Beschaltung des Mikrocontrollers .....	54
5.2	Prinzip einer Schaltsufe mit MOSFET .....	56
5.3	Prinzip einer N-Kanal - MOSFET Schaltstufe .....	58
5.4	Programmablaufplan des Mikrocontrollers nach Tabelle 4.2 .....	60

## Tabellenverzeichnis

2.1	durchschnittlich erzeugte elektrische Energie [Ah] durch zwei Solarmodule von jeweils 53 W bei einer Spannung von 12 V .....	8
2.2	Meßpunkte und Meßergebnisse .....	10
2.3	erzeugte Stromstärke in Abhängigkeit der Windstärke .....	13
2.4	Energieverteilung eines Schiffsdieselmotors mit einer Leistung von 50 PS) .....	15
3.1	Energiebilanz einer Segelyacht im Küsten- bzw. Binnenrevier .....	33
3.2	Energiebilanz einer Segelyacht auf hoher See .....	35
3.3	Batteriebedarfsermittlung .....	37
4.1	Phasenzustände für die Ladung mit IUoU - Kennlinie .....	44
4.2	Betriebszustände des Energiemanagements .....	50

## Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen und Symbole

### Formelzeichen:

I	=	elektrischer Strom
P	=	elektrische Leistung
U	=	elektrische Spannung
v	=	Geschwindigkeit
W	=	Energie

### Einheiten:

A	=	Ampere	für die Stromstärke
Ah	=	Amperestunde	für die Kapazität eines Akkus oder Ladungsmenge
h	=	Stunde	für die Zeit
m	=	Meter	für die Länge
min	=	Minute	für die Zeit
h	=	Stunde	für die Zeit
Hz	=	Hertz	für die Frequenz
km	=	Kilometer	für die Länge
kn	=	Knoten	für die Geschwindigkeit (1 kn = 1 sm/h)
PS	=	Pferdestärke	für die Motorleistung
sm	=	Seemeile	für die Länge (1 sm = 1852 m)
V	=	Volt	für die elektr. Spannung
W	=	Watt	für die elektr. Leistung
Wh	=	Wattstunde	für die elektr. Energiemenge
$\Omega$	=	Ohm	für den elektr. Widerstand
s	=	Sekunde	für die Zeit
$^{\circ}\text{C}$	=	Grad Celsius	für die Temperatur

### Abkürzungen:

CO <sub>2</sub>	=	Kohlendioxid
EEPROM	=	electrical EPROM
EPROM	=	erasable PROM
FET	=	Feldeffekttransistor
I/O	=	Input/Output
LCD	=	Liquid Crystal Display
MOS	=	Metal Oxide Semiconductor
PAP	=	Programmablaufplan
PC	=	Personal Computer
PROM	=	programmable ROM
ROM	=	read only memory
TTL	=	Transistor Transistor Logik
USA	=	Vereinigte Staaten von Amerika
UV	=	Ultravioletes Licht
VDD	=	positiver Eingang der Betriebsspannung
WWW	=	World Wide Web

## 1 Einleitung

Dezentrale Systeme mit hohem Energiebedarf gewinnen zunehmend an Bedeutung in unserem täglichen Leben. Dabei sind nicht die hohen Kosten der Versorgungsanbindung das Problem, sondern es besteht oft keine Möglichkeit, die Technik an das elektrische Versorgungsnetz anzuschließen. Als Beispiel sei an dieser Stelle ein Leuchtfeuer auf hoher See oder eine Raumstation im Weltall erwähnt. Für beide ist die eigenständige Versorgung mit Energie notwendig.

In der Diplomarbeit wird der Nachweis erbracht, daß es möglich ist, durch überlegten Einsatz und mittels einer intelligenten elektronischen Steuerung der Energieressourcen und der Energieverbraucher die Energie umweltschonend und preiswert zu erzeugen und wesentlich effektiver einzusetzen. Als Anwendungsbeispiel eines dezentrales Energieversorgungssystems wird eine Segelyacht betrachtet.

Vor einem halben Jahrhundert war es noch undenkbar, mit einer Segelyacht zum privaten Vergnügen um die Welt zu segeln. Zur Zeit befinden sich ca. 2500 Segelyachten unter deutscher Flagge auf den Weltmeeren. Für die Skipper sowie die Crewmitglieder gibt es erhebliche Probleme, die Energie für die Versorgung der notwendigen Verbraucher, aber auch der lebensverbessernden Maßnahmen in ausreichendem Umfang zu erzeugen. Dieses Problem läßt sich auch auf die Segler in den Binnenrevieren übertragen. Durch eine ständige Optimierung der kleineren Segelyachten wurde der Einbaudieselmotor durch einen Außenbordmotor ersetzt. Da Außenbordmotoren aufgrund ihrer Leistung nicht mit leistungsfähigen Drehstromgeneratoren ausgerüstet werden können, ergibt sich der Wegfall einer Energiequelle, des Drehstromgenerators auf kleinen Segelyachten. Bedenklich ist auch die Schädigung der Umwelt durch einen im Leerlauf betriebenen Dieselmotor.

Diese und noch viele weitere Argumente lassen es als sinnvoll erscheinen, vorwiegend alternative Energiequellen zur Erzeugung von elektrischer Energie auf einer Segelyacht einzusetzen.

Die Kopplung aller Energiequellen, Energiespeicher sowie Verbraucher durch einen zeitgetakteten Energiecontroller sowie der Einsatz einer leistungsfähigen Regelung sollen die Nut-



zung der umweltfreundlich erzeugten Energie effizienter gestalten. Dabei werden die bisher voneinander unabhängig arbeitenden Geräte von einem Modul zentral gesteuert. Ein wesentlicher Punkt des Energiemanagements ist der zeitlich abgestimmte Funktionsplan des Betriebes der Verbraucher sowie die zeitweise abgekoppelte elektrische Energieversorgung der Verbraucher von der Batterie.

Die Auswahl der einzelnen Verbraucher beginnt nach den Gesichtspunkten des Leistungsumsatzes. Viele wichtige elektronische Navigationsgeräte an Bord einer Segelyacht sind -was deren Energieverbrauch betrifft- bereits weitgehend optimiert. So kommt ein Empfänger des Globalen Positionsbestimmungs Systems (GPS) mit einer 9 Volt Blockbatterie lange Zeit aus. Geräte mit großem elektrischen Energiebedarf an Bord sind die Positionslampen, die Kühlbox, der Autopilot, eine eventuell elektrisch betriebene Ankerwinch und diverse Pumpen.

Das Ziel ist, eine ausgewogene und sichere Energieversorgung auf einer Segelyacht durch alternative Energiequellen unter Einbeziehung des Energiemanagements zu erreichen. Dadurch soll auch die Lebensdauer des verwendeten Akkumulators erhöht werden. Das Energiemanagement wacht darüber, den Strom an Bord einer Segelyacht umweltfreundlich zu gewinnen, diesen ökonomisch einzusetzen und dem Ereignis des Stromausfalls entgegenzuwirken.

## 2 Energie auf Segelyachten

Auf einer Segelyacht hat die Anschaffung eines elektrischen Gerätes immer Konsequenzen in Bezug auf den Energiehaushalt, da elektrische Energie nur begrenzt zur Verfügung steht. Die Einbeziehung von alternativen Energieressourcen ist auch unter dem Gesichtspunkt der eigenen Sicherheit auf hoher See erforderlich. Jeder Verbraucher auf einer Segelyacht muß im Hinblick auf die Dauer des Einsatzes genau untersucht werden. So ist es erforderlich, alle Navigationsinstrumente bei einem Segeltörn von 24 Stunden am Tag voll zu berücksichtigen, dazu kommt natürlich bei Dunkelheit noch die Beleuchtung dieser Geräte. In diesem Punkt wurden verschiedenen Veröffentlichungen sowie eigene Erfahrungen genutzt. Im Zweifelsfall wurde die Betriebszeit des Verbrauchers aufgerundet. Die Betrachtungen für die Energiebilanz gehen dabei immer vom ungünstigsten anzunehmenden Fall aus. Eine Segelyacht wird sich auf der Ostsee über Nacht in einem Hafen befinden, dort steht dann „Landstrom“ zur Verfügung. Ein Weltumsegler ist auch nicht immer unter Segel unterwegs. So kann man diese Fälle als elektrische Energiereserve betrachten. Bei der Berechnung der Energiebilanz wird nicht davon ausgegangen, daß eine Energiequelle ausfällt.

### 2.1 Die elektrische Anlage auf Segelyachten

In diesem Energiekonzept wird vorausgesetzt, daß zwei getrennte Stromkreise auf dem Schiff zur Verfügung stehen. Eine Starterbatterie soll nur für den Anlasser konzipiert sein und wird durch den Betrieb des Dieselmotors über eine einfache -meist serienmäßige- Laderegulierung am Drehstromgenerator wieder aufgeladen. Auf diesen Stromkreis soll nicht weiter eingegangen werden. Alle weiteren Betrachtungen beziehen sich auf den noch zu beschreibenden zweiten Stromkreis. Es wird von einer Betriebsspannung von 12 V ausgegangen. Die Möglichkeit einer anderen verwendeten Spannung, wie z.B. 24 V, soll in den nachfolgenden Betrachtungen unberücksichtigt bleiben. Auf das Kabelsystem einer Segelyacht soll an dieser Stelle ebenfalls nicht eingegangen werden, da es bereits Bestandteil der werftseitigen serienmäßigen Ausrüstung ist und eine Verbesserung unter dem Gesichtspunkt der vorliegenden Arbeit nicht als notwendig erscheint. Bei einer Erweiterung der elektrischen Anlage müssen die von der Werft vorgeschriebenen Leiterquerschnitte verwendet werden.

In Bild 2.1 wurden Verbraucher nach deren Anschlußparametern ausgewählt, die hinsichtlich des elektrischen Energieverbrauches für den Einsatz auf einer Segelyacht geeignet sind.

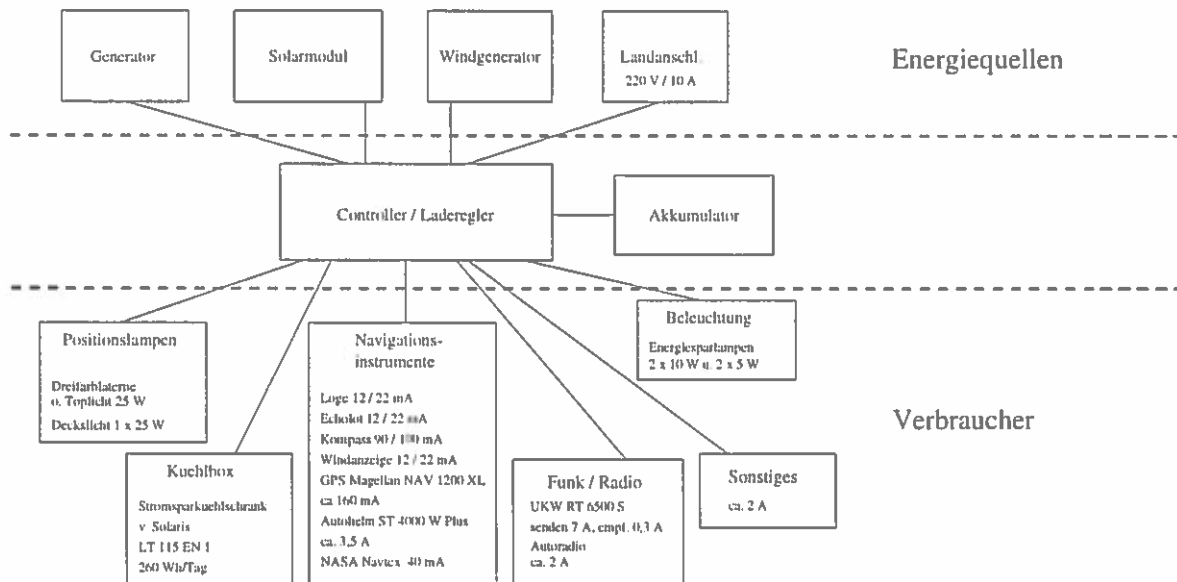


Bild 2.1: Übersicht der Energiequellen und Verbraucher auf einer Segelyacht

Die Segelyacht sollte auch für die Überquerung des Atlantiks ausgerüstet sein. Diverse Ausrüstungsgegenstände finden im Küsten- oder Binnenbereich ebenfalls Verwendung und gehen bei Nichtbenutzung positiv in die Energiebilanz ein. Die Länge des Schiffes soll zwischen 8 bis 12 m betragen. Die Möglichkeit, daß eine Segelyacht der ¼ Tonner - Klasse (ca. 8 m Länge) mit vier Personen eine Regatta segelt, ist realistisch; so ist es auch möglich, daß sich vier Personen eine 12 Meter lange Chartersyacht -Segelyachten die an befähigte Skipper vermietet werden- teilen. Sicher finden auf einer 12 Meter - Yacht mehr als 4 Personen Platz, und als Konsequenz ergibt sich ein höherer Energieverbrauch. Als Ausrüstung werden die Positionslampen, alle elektrischen Navigationsinstrumente, Kühlbox, Autopiloten, Funkgerät, Radio, Innenbeleuchtung und Sonstiges (z.B. Wasserpumpe, Bilgepumpe etc.) berücksichtigt.

Aus der folgenden Abbildung ist die realistische Anordnung der Stromerzeuger und der Verbraucher, wie an Bord einer Segelyacht eingebaut, erkennbar.

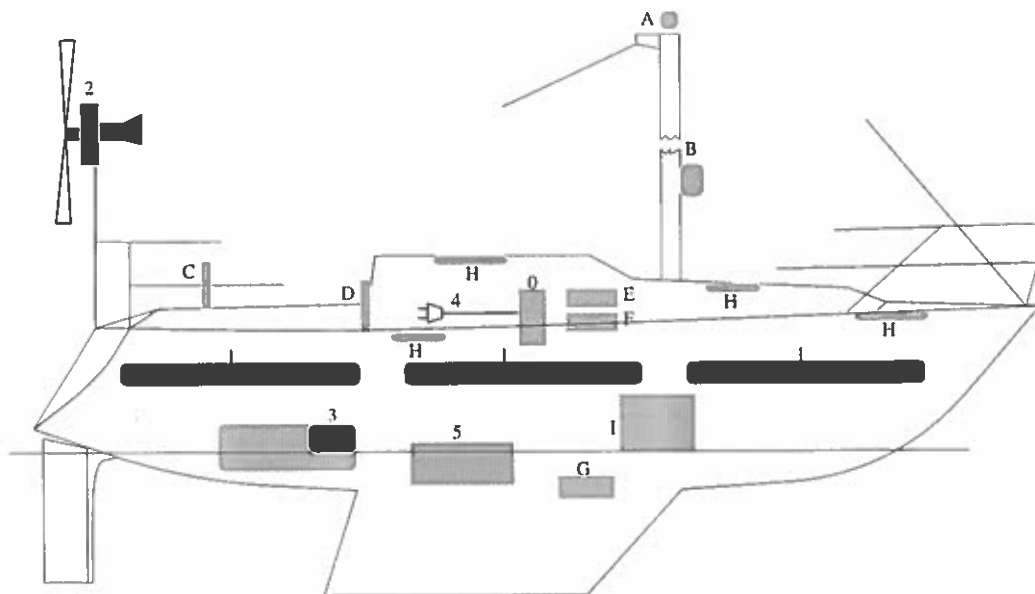


Bild 2.2: Anordnung der elektrischen Ausrüstung einer Segelyacht

Legende zu Bild 2.2: 0 ... Controller / Laderegler

1 ... Solarpaneele

2 ... Windgenerator

3 ... Drehstromgenerator am Dieselmotor

4 ... Netzanschluß an einer Steganlage (Landanschluß)

5 ... Akkumulator

A ... Dreifarbenlaterne

B ... Decklicht

C ... Autopilot

D ... Navigationsinstrumente

E ... Funkgerät

F ... Radio (Weltempfänger)

G ... Sonstiges (Pumpen)

H ... Kabinenbeleuchtung

I ... Kühlbox

## 2.2 Energiequellen auf Segelyachten

Der Hauptstromlieferant ist die Batterie, diese wird nicht in die Kategorie der Energiequellen eingeordnet, sondern unter dem Punkt Energiespeicher betrachtet. Die auf die jeweiligen Bedürfnisse erstellte Energiebilanz gibt Auskunft über die Dimensionierung der Batterie. Im folgenden sollen mögliche Energiequellen unter dem Gesichtspunkt der Nutzbarkeit auf einer Segelyacht beschrieben und ausführlicher diskutiert werden.

### 2.2.1 Solarmodul

Ein Solarmodul besteht aus mehreren Solarzellen, wobei vielfältige Varianten gebräuchlich sind. Eine Solarzelle ist ein großflächiges Photoelement, durch das die Strahlungsenergie der Sonne direkt in elektrische Energie umgewandelt wird. Die Basis für diese Umwandlung ist der photoelektrische Effekt durch Freisetzen von Elektronen im Inneren von Halbleiter-Materialien wie z.B. Silizium, Galliumarsenid oder Cadmiumtellurid.

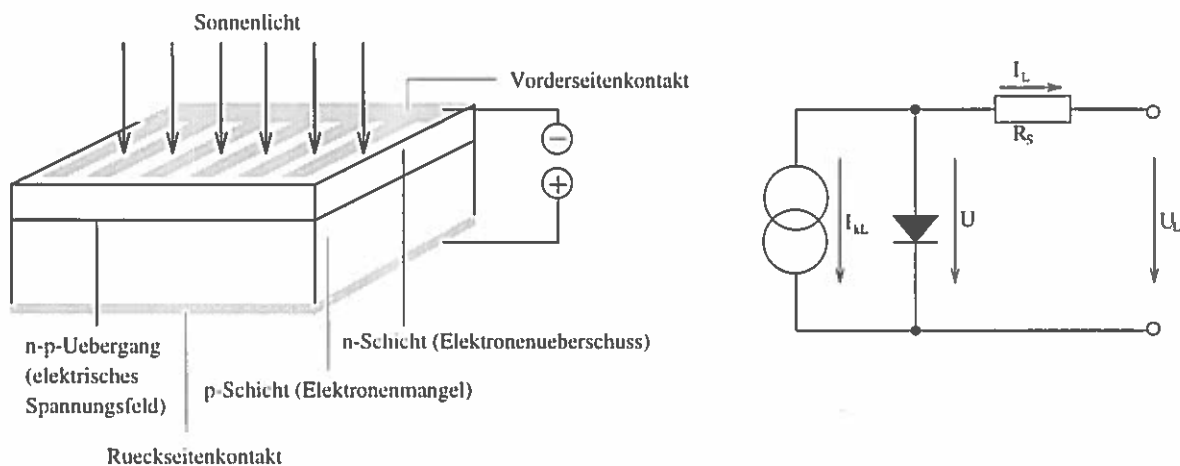


Bild 2.3: Prinzipskizze und Ersatzschaltung einer Solarzelle <sup>[1]</sup>

Ein Solarpaneel besteht aus mehreren Solarzellen, diese wiederum können parallel miteinander verschalten werden und ergeben ein Solarpaneel mit einer größeren Leistung. Da eine Solarzelle im Ersatzschaldbild eine Stromquelle darstellt, bleibt die erzeugte Spannung bei der Parallelschaltung der Paneele konstant. Die Ströme addieren sich.

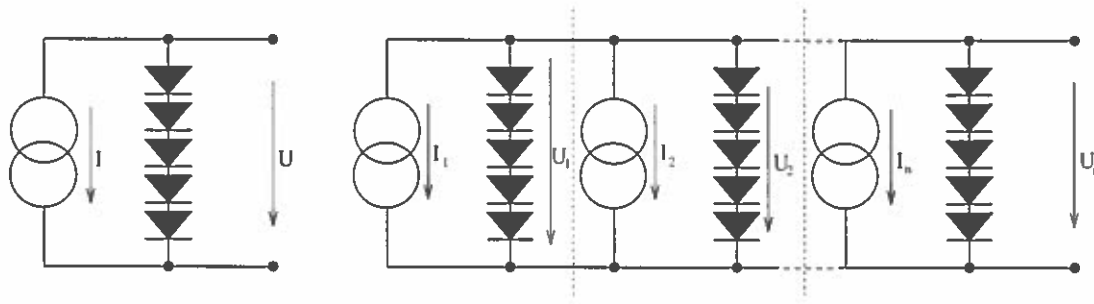


Bild 2.4: Ersatzschaltung eines Solarpanels, Parallelersatzschaltung der Solarpaneelen

Die Herstellungskosten von Solarzellen werden sich in den nächsten Jahren weiter verringern. Prognosen rechnen z.B. für das Jahr 2000 mit 2 DM pro Watt erzeugter Solarenergie. Solarzellen werden bereits heute wesentlich wirtschaftlicher als zum Beginn des Solarzeitalters gefertigt. So produziert eine Produktionsstätte in Fernost teilweise die Solarzellen aus gewonnener Energie der Solarmodule auf den Dächern der Anlage. Solarmodule werden aber die konventionelle Energieversorgung nicht ablösen, für das Jahr 2000 wird mit einem Solaranteil an der Primärenergieversorgung der EG-Staaten zwischen 5 und 10% gerechnet.<sup>[15]</sup>

In dem Konzept des Energiemanagements soll diese Form der Energiegewinnung einen erheblichen Anteil besitzen. Es ist eine technisch sehr günstige Art, Energie für dezentrale Systeme zu gewinnen.

### 2.2.1.1 Energiegewinn aus Sonnenenergie

Der Energiegewinn aus Solarmodulen ist in erster Linie vom geographischen Standort und der jeweiligen Sonnenscheindauer abhängig.

Die durchschnittlich erzeugte Energiemenge in Ah/Tag gemessen an zwei parallel geschalteten Solarmodulen von je 53 Watt mit festem Anstellwinkel von an der Nordsee  $40^\circ$ , auf den Balearen  $35^\circ$  sowie auf Barbados  $15^\circ$ , ist aus der folgenden Tabelle und Grafik ersichtlich [17].

<sup>[1]</sup> Ang; Lasnier, Photovoltaic Engineering Handbook

<sup>[15]</sup> „Solar - Server“ im Internet <http://emsolar.eeTU-Berlin.DE>

<sup>[17]</sup> VARTA, Bordnetzbuch

Monat	Nordsee Ah / Tag	Balearen Ah / Tag	Karibik Ah / Tag
Januar	6	18	35
Februar	13	23	33
März	20	33	39
April	32	37	33
Mai	35	44	32
Juni	39	42	31
Juli	37	44	32
August	34	41	35
September	23	38	38
Oktober	15	29	38
November	8	20	33
Dezember	6	18	33
Durchschnittswerte	22,33	32,25	34,33

Tabelle 2.1: durchschnittlich erzeugte elektrische Energie [Ah] durch zwei Solarmodule von jeweils 53 W bei einer Spannung von 12 V

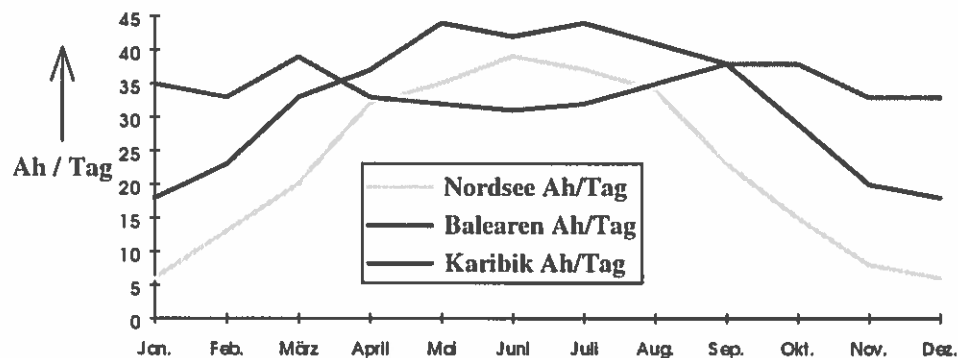


Bild 2.5: grafische Darstellung der erzeugten Energie [Ah / Tag] durch zwei Solarmodule von jeweils 53 W bei einer Spannung von 12 V <sup>[19]</sup>

Die Tabelle 2.1 zeigt, daß über das Jahr gesehen, von Solarmodulen ca. 50% mehr Energie im Mittelmeer und in der Karibik erwartet werden kann als im Nordseebereich. Wenn die gemessenen Werte an der Nordsee auch für die Betrachtung der Binnengewässer zugrunde gelegt werden, ergibt sich aus folgender Betrachtung der Mittelwert der erzeugten Energie. Die Segelsaison in unseren Binnen- und Küstenrevieren ist auf ca. 6 Monate im Jahr begrenzt; wenn diese von April bis einschließlich September angenommen wird, ergibt sich aus dem obigen Beispiel ein Mittelwert von 33,3 Ah / Tag. Sowohl im Gebiet der Balearen als auch in der Karibik kann das ganze Jahr gesegelt werden, so ergeben sich Mittelwerte von 32,25 Ah / Tag

<sup>[19]</sup> WWW Seiten im Internet: <http://www.uni-muenster.de/Energie/wind/>

und 34,33 Ah / Tag. Die Werte sind für die weiteren Berechnungen und Bilanzen wichtig und werden entsprechend berücksichtigt.

Für ein Schiff unter großer Fahrt ist es nicht so einfach, den Durchschnittswert des Energiegewinns zu ermitteln. Eine entscheidende Rolle spielt dabei die Position auf dem Breitengrad. Es wird vom ungünstigsten Fall ausgegangen und die gemessenen Werte aus <sup>[5]</sup> genutzt. Hier wurde ein 50-W-Panel zu Grunde gelegt, welches bei der Abfahrt auf den Kanarischen Inseln etwa 13 Ah und bei der Ankunft in der Karibik etwa 17 Ah lieferte. In <sup>[5]</sup> geht man bei einer Atlantiküberquerung davon aus, daß die Leistung des Paneels geteilt durch zwei die pro Tag gelieferten Amperestunden ergibt. Ein 50 W - Paneel liefert also um die 25 Ah pro Tag. Der Autor setzt aber voraus, daß das Paneel immer senkrecht zur Sonne ausgerichtet wird. Diese Ausrichtung des Solarpaneels wird vorgenommen, um den Wirkungsgrad zu erhöhen, dabei wird die höchste Effektivität dieser Energiequelle bei der Einstrahlung des Sonnenlichts im rechten Winkel zur Paneel-Fläche erreicht.<sup>[13]</sup>

Konstruktiv ist es zwar möglich, das Paneel am Heckkorb zu befestigen und auch nachzuführen. Als Alternative zu der dafür notwendigen Mechanik (Windlast) erscheint eher eine Anbringung von weiteren Modulen ohne Nachführung als sinnvoll. Die Nachführung zum Sonnenstand kann laut <sup>[1]</sup> 30% mehr Energieausbeute bewirken.

Eigene Messungen haben aber ergeben, daß die Effizienz der Solarmodule nicht erheblich beeinflußt wird, wenn man die Solarpaneelen nicht 180° zur Sonne ausrichtet, sondern die Bordwand einer Segelyacht nutzt, an der ausreichend Fläche zur Verfügung steht. Gemessen wurde auf einer von Wasser umgebenen Segelyacht im Monat August bei heiterem Wetter. Es wurde ein Meßgerät vom Typ Voltcraft 96 mit integrierter Statistikoption benutzt. Dieses Meßgerät ermittelt während der Messung die durchschnittliche Spannung. Als Solarpaneel wurde eine Testzelle vom Typ ETM 250-0,5V mit einer Fläche von (16 x 49) mm verwendet. Die Messungen wurden um 12.20 Uhr begonnen und auf jeder Fläche 5 min durchgeführt. So kann nach <sup>[14]</sup> die Erdrotation für diese Zeit vernachlässigt werden. In der Tabelle 2.2 sind die Meßpunkte sowie die Meßergebnisse dargestellt.

---

<sup>[5]</sup> Greiff, Energiemanagement auf Segeljachten

<sup>[13]</sup> Quaschnig; Hanitsch, Die Schattenseite der Sonnenenergie

<sup>[1]</sup> Ang; Lasnier, Photovoltaic Engineering Handbook

<sup>[14]</sup> Quaschnig; Hanitsch, Simulation der Abschattungsverluste bei Photovoltaikanlagen



Meßpunkt auf der Segelyacht	Spannung in [V]
Vorschiffsluke, waagrecht auf dem Deck aufgeklebt	0,51
Bordwand zur Sonne	0,50
Bordwand, von der Sonne abgewandt	0,44
auf dem Deck im rechten Winkel zur Sonne	0,52

Tabelle 2.2: Meßpunkte und Meßergebnisse

Diese Messungen sollen verdeutlichen, daß sowohl die Flächen auf dem Deck einer Segelyacht als auch die Bordwand grundsätzlich für die Anbringung von Solarpaneelen geeignet sind, wobei die Effizienz der Solarpaneele nicht wesentlich differiert. Die Anbringung auf dem Deck einer Segelyacht bringt den Nachteil mit sich, daß Abschattungen durch die Segel auftreten. An der Bordwand befestigte Solarpaneele werden immer nur von einer Seite effektiv von der Sonne angestrahlt. Hier ist eine Trennung der beiden Flächen über einen Regler notwendig.

Wenn mehrere Solarmodule miteinander verschaltet werden, sollten die Solarzellen nach Möglichkeit immer gleichmäßig von der Sonne beleuchtet werden. Auf dem Deck oder am Rumpf befindet sich auf jeder Segelyacht entsprechender Platz. Solarmodule gibt es auch in biegsamer sowie belastbarer Ausführung. Wie in <sup>[18]</sup> dargestellt ergibt sich, bei der Anbringung der Solarpaneele, daß unter dem Modul ein Hitzestau entstehen kann, der sich negativ auf die Leistung auswirkt. Diese Wirkung resultiert daraus, daß alle Halbleiter ihre Leitfähigkeit mit der Temperatur verändern. Der Strom bleibt nahezu konstant, die Solarspannung nimmt aber mit zunehmender Temperatur ab. Um Maximalleistung zu erreichen, ist bei der Anbringung des Solarmoduls auf eine ausreichende Wärmeableitung hinter den Solarzellen zu achten.

Ein wichtiger Gedanke ist die Einarbeitung von Solarmodulen in einen Schiffsrumpf. Darüber hat der Autor mit der Konstruktionsabteilung von einer deutschen Yachtwerften ein Meinungsaustausch durchgeführt. Die Idee ist, leistungsfähige Solarpaneele in den geometrischen Abmaßen des meist dunklen Zierstreifens am Rumpf im Überwasserbereich fertigen zu lassen, welche dann bei der Herstellung des Schiffsrumpfes einlaminiert werden. Diese Möglichkeit eignet sich aufgrund der zur Verfügung stehenden Fläche, der hohen Festigkeit sowie der gün-

<sup>[18]</sup> Wenham; Green; Watt, Applied Photovoltaics

stigen Lage der Solarmodule. Diese werden durch die gleichmäßigen Beleuchtungsstärke sowie der intensiven Reflexion der Strahlungsenergie im Wasser (siehe<sup>[4]</sup>), eine hohe Effektivität haben. Die Lebensdauer von Solarzellen beträgt nach heutigen Erkenntnissen ca. 30 Jahre, spätestens nach dieser Zeit sollte ein Schiffsrumpf aus glasfaserverstärktem Kunststoff einer Generalüberholung unterzogen werden. Eine werftseitige Realisierung wäre wünschenswert, um die Solarenergie von vornherein mit als Energiequelle einzubeziehen. Dies wäre eine Neuerung auf dem Markt und ein Wettbewerbsvorteil gegenüber anderen Werften.

### 2.2.1.2 Betrachtung eines ausgewählten Solarmoduls

Verschiedene Anbieter stellen Solarmodule mit hoher Leistung speziell für Yachten zur Verfügung. Die Betrachtung soll am Beispiel des Solarex Solarmoduls MSX-30L, welches in den USA hergestellt wird, erfolgen (technische Daten siehe Anhang A). Nach den Betrachtungen in Pkt. 2.1.1.1 wird von einer erzeugten Energiemenge von 12 Ah/Tag bzw. bei einer Bordspannung von 12 V von 144 Wh/Tag ausgegangen. Die Anzahl der benötigten Module richtet sich nun nach den folgenden Betrachtungen, der weiteren alternativen Energiegewinnung und der Energiebilanz.

### 2.2.2 Windgenerator

Die Entwicklung von Gleichstromwindgeneratoren ist sehr weit fortgeschritten. Aus ästhetischen Gesichtspunkten gibt es von der Seite der Blauwassersegler sicher keine Ablehnung, die bis zu einem Durchmesser von über 1,5 m großen Windräder auf der Segelyacht zu verwenden. Befestigungsmöglichkeiten für den Generator gibt es im Heckbereich (siehe Bild 2.2), wenn vorhanden, am Besanmast, oder der Generator kann auch leicht im Rigg befestigt werden.

---

<sup>[4]</sup> Gerthsen; Kneser; Vogel, Physik

Die Hauptkriterien für den Einsatz eines Windgenerators:

- hohe Stromausbeute,
- der Ladebeginn setzt schon bei wenig Wind ein,
- mechanisch hohe Festigkeit für das rauhe Seeklima.

Die Rotorblätter sind heutzutage im Windkanal getestet und weitestgehend optimiert. Modernste Erkenntnisse aus der Flugzeugindustrie werden bei der Entwicklung berücksichtigt. Die Rotorblätter sind an der Achse des Generators befestigt, welcher ebenfalls nach modernsten technologischen Gesichtspunkten entwickelt wurde. Bei den Recherchen <sup>[11]</sup>, <sup>[9]</sup> und <sup>[2]</sup> über Windgeneratoren haben sich zwei leistungsfähige Systeme (Windseeker 503 und Air Marine) herauskristallisiert. (siehe Pkt. 2.2.2.2)

### 2.2.2.1 Energiegewinn aus dem Windgenerator

In den folgenden Grafiken sind als Beispiel die mittleren Windgeschwindigkeiten für die Fahrtengebiete der Ostsee, Nordsee und die Balearen aufgezeigt.

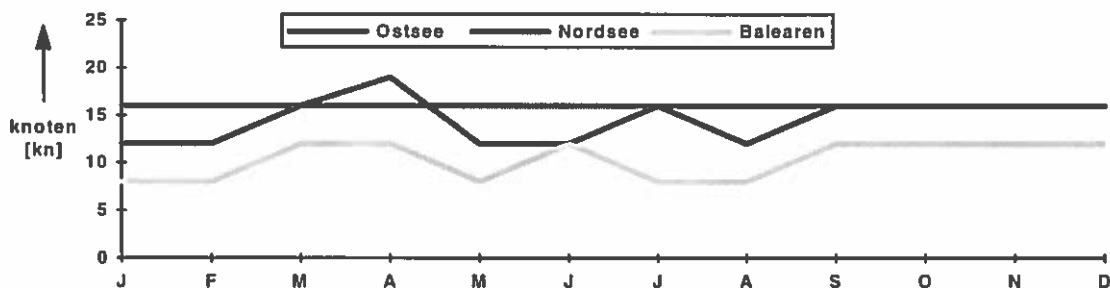


Bild 2.6: Windportrait an der Ostsee, Nordsee und den Balearen <sup>[19]</sup>

Für den Energiegewinn aus dem Windgenerator wird bei Betrachtung der Windverhältnisse, bei Berücksichtigung des Fahrtwindes, sowie der mittleren durchschnittlichen Windgeschwindigkeit in den unterschiedlichsten Fahrtengebieten, eine Windstärke von 10 Knoten

<sup>[11]</sup> Palstek, Technisches Wassersport-Journal Nr. 3/96

<sup>[9]</sup> Muhs, Yachtelektrik

<sup>[2]</sup> Blue Water, Fahrtensegler-Katalog

<sup>[19]</sup> WWW: <http://www.uni-muenster.de/Energie/wind/>

angesetzt. In der Zeit zwischen Sonnenauf- und Sonnenuntergang weht der Wind stärker als in der Nachtzeit. Der Windgenerator kann aber auf Grund seiner Laufruhe auch in der Nacht benutzt werden und muß nicht gebremst oder angehalten werden. Die wahre Windgeschwindigkeit während des Segelns wird auch von dem Gegenwind der Fahrt beeinflusst. Jeder Segler kann daraus sehr leicht den scheinbaren Wind bestimmen. Diese scheinbare Windstärke von 10 Knoten wird über die Zeit von einem Tag also 24 h gerechnet. Damit wird ein realistischer Betrag für die weitere Berechnung angesetzt, der sich mit Angaben der Fachliteratur (siehe <sup>[11]</sup>) deckt.

In Tabelle 2.3 wird die erzeugte Stromstärke der beiden Windgeneratoren Windseeker 503 und Air Marine dargestellt:

Wind- geschwindigkeit:	2,5 m/s 5 kn.	5 m/s 10 kn.	7,5 m/s 15 kn.	10,5 m/s 20 kn.	13 m/s 25 kn.	15,5 m/s 30 kn.	18 m/s 35 kn.	21 m/s 40 kn.
Air Marine	0	1,7 A	5,7 A	11,3 A	23,2 A	27,0 A	25,5 A	25,5 A
Windseeker 503	0	2,5 A	7,5 A	14,8 A	27,2 A	37,0 A	41,0 A	37,0 A

Tabelle 2.3: erzeugte Stromstärke in Abhängigkeit der Windstärke <sup>[2]</sup>

### 2.2.2.2 Betrachtung der ausgewählten Windgeneratoren

Der Windgenerator aus den USA mit dem Namen Windseeker 503, wird aus korrosionsfreien Materialien gefertigt. Es werden bei diesem Modell drei Rotorblätter verwendet, um die nötige Laufruhe zu gewährleisten und die Lager entsprechend zu schonen. Dieser Windgenerator dreht sich mit zunehmender Windstärke bis zu 90° aus dem Wind. Dadurch wird eine Selbsterstörung des Generators ausgeschlossen. Bei Sturmstärken und Neigung bringt der Windseeker noch 85% seiner Leistung. Ein integrierter Regler regelt die Spannung sowie auch die Drehzahl. Aufgrund seines großen Durchmessers soll an dieser Stelle noch auf den Windgenerator Air Marine hingewiesen werden (siehe technische Daten im Anhang B). Die ermittelte durchschnittliche Windgeschwindigkeit von 10 Knoten in 24 Stunden, bringt einen Energiemenge für den Windseeker 503 von 60 Ah/Tag, dies entspricht bei einer Bordspannung von

<sup>[11]</sup> Palstek, Technisches Wassersport-Journal, Nr. 5/96

12 V gleich 720 Wh. Dieses Gerät wird auf der Segelyacht auf großer Fahrt berücksichtigt werden.



Bild 2.7: Foto von Windseeker 503 <sup>[2]</sup>

Der zweite Windgenerator (Air Marine), der aufgrund seiner Parameter auf einer Segelyacht anwendbar ist, soll im folgenden vorgestellt werden.



Bild 2.8: Foto von Air Marine <sup>[2]</sup>

Bei 30 kn Windgeschwindigkeit regelt der integrierte Regler die Rotordrehzahl. Die leicht biegsamen mit Karbon verstärkten Rotorblätter werden durch den Druck bei Sturm leicht nach hinten gebogen und können auf Grund der dabei entstehenden Turbulenzen nicht schneller drehen. Diese Sturmsicherheitsfaktoren wirken einer Selbstzerstörung entgegen. Die Ausgangsspannung des Reglers kann zwischen 13,8 V und 17,8 V verstellt werden. Ein weiteres Sicherheitsmerkmal ist, daß der Air Marine aus jeder Windgeschwindigkeit -auch bei Sturm- heraus über einen Schalter zum Halten gebracht werden kann.

Bei durchschnittlicher Windstärke von 10 Knoten, berechnet am Air Marine, ergibt sich eine anzusetzenden Ladung von 40,8 Ah/Tag, dies entspricht bei einer Bordspannung von 12 V

---

<sup>[2]</sup> Blue Water, Fahrtensegler-Katalog

einer Energiemenge von 489,6 Wh. Dieses Gerät wird auf der Segelyacht im Küsten- sowie Binnenbereich berücksichtigt.

### 2.2.3 Drehstromgenerator am Dieselmotor

Eine Form der elektrischen Energiegewinnung ist die Benutzung des Dieselmotors, an dem sich eine Lichtmaschine befindet. Wie in <sup>[11]</sup> dargestellt, trägt diese Möglichkeit die Züge einer vorsätzlichen Umweltverschmutzung, für die man an Land bestraft werden würde. Ganz selbstverständlich werden hier bei mehrtägigen Törns Dieselmotoren mit 30 und mehr kW Leistung mehrere Stunden am Tag betrieben, um einige Amperestunden elektrischer Energie in den Akku zu laden. Dies geschieht mit Hilfe einer Lichtmaschine, die durchschnittlich etwa 20 A liefert. Es werden bei einem z.B. 50-PS-Motor etwa 7 kW allein für den Leerlauf benötigt, um damit 0,28 kW Elektroenergie zu erzeugen. Dabei werden etwa 2,3 l Diesel je Stunde verbraucht, der Motor wird nicht richtig belastet und verschmutzt die Atmosphäre mit CO<sub>2</sub>.

Energieverteilung eines Dieselmotors in %	zugeführte Energie	abgegebene Energie
100	Diesel	
50		Kühlwassererwärmung
4		Wärmestrahlung
6		Abgas
30		Bewegung
6		Öl
4		Elektroenergie

Tabelle 2.4: Energieverteilung eines Schiffsdieselmotors mit einer Leistung von 50 PS)

Bei einem Wirkungsgrad von 4 % kann der mit einem Drehstrom gekoppelte Dieselmotor unter den heutigen Umweltaspekten keine Lösung zur Elektroenergiegewinnung auf Segelyachten darstellen. In einem Energiesystem mit getrennten Akkumulatoren, wo eine Starterbatterie nur dem Anlasser zur Verfügung steht, kann der Drehstromgenerator des Dieselmotors diese bei Betrieb wieder aufladen. Diese Variante der Trennung ist eine Grundvoraussetzung des Energiekonzeptes in dieser Diplomarbeit.

<sup>[2]</sup> Blue Water, Fahrtensegler-Katalog

<sup>[11]</sup> Palstek, Technisches Wassersport-Journal, Nr. 5/96

### 2.2.4 Der mobile Drehstromgenerator

Moderne Drehstromgeneratoren mit kleinen 2-Takt oder 4-Takt-Ottomotoren sind im Wirkungsgrad effizienter als der Generator am Dieselmotor, da diese nur für den Zweck der Elektroenergieerzeugung entwickelt wurden. Dieses Gerät findet vorwiegend Einsatz bei einem längeren Aufenthalt in einer einsamen Bucht oder als Notstromaggregat.

Im Energiekonzept wird der mobile Generator nur als Notstromaggregat berücksichtigt, da er einige entscheidende Nachteile hat. Zum einen wiegen diese Geräte ca. 20 kg, brauchen somit auch einen sicheren Stauraum an Bord, und zum anderen wird zum Betrieb Normalbenzin verwendet, welches zusätzliche Lagerkapazität benötigt.

### 2.2.5 Wellengenerator

Die Idee ist, die drehende Welle während des Segelns zum Antrieb eines speziell entwickelten Wellengenerators zu nutzen. Unter der Maschinenfahrt kann dieser Generator ebenfalls genutzt werden. Für viele Skipper, die aufgrund der Fahrtminderung eines herkömmlichen Propellers einen Faltpropeller benutzen, scheidet der Einsatz eines Wellengenerators aus. Weitere Nachteile sind starke Geräusche im Heckbereich sowie die Mehrbelastung der serienmäßigen Wellenanlage. Der Schiffspropeller ist für den Vortrieb konstruiert und nicht gut geeignet, einen Generator, wie eine Turbine anzutreiben.

Der Einsatz lohnt sich erst bei Schiffen mit einer Wasserlinienlänge von mehr als zehn Metern, da ab dieser Größe die nötige Rumpfgeschwindigkeit erreicht wird, die mit der dritten Potenz in die umgesetzte Leistung des angeströmten Propellers eingeht.<sup>[9]</sup> Die große Belastung auf die Propellerwelle, die ungeeignete Konstruktion des Propellers und somit schlechte Effizienz sprechen nicht für den Einsatz auf einer Segelyacht.

---

<sup>[9]</sup> Muhs, Yachtelektrik

### 2.2.6 Schleppgenerator

Eine mögliche Form der Elektroenergieerzeugung, die die Nachteile eines Wellengenerators zum größten Teil ausschließt, ist der Schleppgenerator. Die Effektivität des Generators wird in <sup>[2]</sup> als sehr gut eingeschätzt. Es wird im folgenden der AQUAIR - Schleppgenerator aus <sup>[2]</sup> betrachtet. Der erzeugte Strom liegt bei einer Fahrt von 5 Knoten bei 3,5 A, von 6 Knoten bereits bei 6 A. Die mögliche Ladung beträgt für eine kontinuierliche Langfahrt von 24 Stunden entsprechend 84 bzw. 144 Ah. Daher wird dieses Gerät auf längeren Überfahrten bei konstanten Bedingungen eingesetzt. Bei spektakulären Wetterverhältnissen wird man den Generator aus Furcht vor Verlust oder Beschädigung, lieber in der Backskiste (Stauraum auf einer Segelyacht) verstauen.

Der durch den Einsatz des Schleppgenerators eintretende Fahrtverlust liegt bei ca. 0,25 Knoten. Bei einer Atlantiküberquerung von ca. 25 Tagen und einem Tagesetmal (dem zurückgelegten Weg mit einer Segelyacht an einem Tag) von ca. 150 Meilen wird sich der Zeitverlust auf einen ganzen Tag summieren. Jeder Skipper sollte aus diesen Gründen selbst über den Einsatz entscheiden.

Aus folgenden Gründen wird der Schleppgenerator im Energiekonzept nicht berücksichtigt:

- der Einsatz ist beschränkt auf Langfahrten,
- beim Schlepp eines Beibootes besteht Beschädigungsgefahr,
- aufwendiges Ausbringen und Einholen des Schleppgenerators,
- Gefahr des Springens in der Welle bei hoher Geschwindigkeit.

### 2.2.7 Landstromanschluß

Eine weitere gebräuchliche Form zur Ladung des Akkumulators ist der sogenannte Landstrom, d.h. in der Regel ein Anschluß 220 V / 16 A über eine Euro-Kupplung. Da dieser ausschließlich in Yachthäfen zu beziehen ist, scheidet diese Möglichkeit bei mehrtägigen Etappen aus.

---

<sup>[2]</sup> Blue Water, Fahrtensegler-Katalog



Dieser Anschluß ist Bestandteil des Konzeptes und eignet sich besonders für Charteryachten und Segelyachten im Küsten- bzw. Binnenrevier.

Auf einer Segelyacht muß zur Gewährleistung der Sicherheit eine FI-Schutzeinrichtung installiert werden. Der 220 V - Anschluß wird an der Primärseite des Ladegerätes angeschlossen.

### 2.3 Energiespeicher

Die Batterie ist ein Oberbegriff für mehrere miteinander verbundene Zellen, die durch „freiwillig“ verlaufende innere chemische Reaktionen, Energie abgeben, wenn eine äußere elektrische Verbindung zwischen dem negativen und positiven Pol hergestellt wird. Man unterscheidet grundsätzlich zwischen wiederaufladbaren Systemen, den Akkumulatoren, und den nicht wiederaufladbaren Systemen. Im folgenden wird die für die Anwendung auf einer Segelyacht wichtigste Art, der wiederaufladbare Bleiakkumulator (Akku) betrachtet, für den auch weiterhin der Oberbegriff „Batterie“ verwendet werden soll. Die Lebensdauer dieses Akkumulators hängt entscheidend von seiner Abstimmung auf den Anwendungsbereich und der Einhaltung der Entlade- bzw. Ladebedingungen ab. Blei-Säure-Batterien mit Gitterplatten sind kostengünstige Energiespeicher, die sich in ihrer Anwendung auf Segelyachten durchgesetzt haben. Die Voraussetzung für die Stromlieferung einer Blei-Säure-Batterie ist die unmittelbare Berührung der positiven Masse -Bleiodioxid- sowie der negativen Masse -Blei- mit verdünnter Schwefelsäure.

Die Kapazitätsangabe [Ah] auf dem Typenschild einer Batterie bezieht sich auf eine bestimmte Entladezeit und bezeichnet die Ladungsmenge [Ah], die in einer bestimmten Zeit geliefert werden kann.

### 2.3.1 Typenübersicht

Die zur Zeit gebräuchlichen Sortimente von geschlossenen Bleiakkumulatoren lassen sich in folgende Kategorien unterteilen:

- **Starterbatterien**  
für das Starten von Motoren,
- **Heavy Duty Batterien**  
für Motorstart und gelegentliche Bordnetzversorgung,
- **Antriebs- und Beleuchtungsbatterien**  
für das Bordnetz, die Positionsbeleuchtung und den gelegentlichen Motorstart,
- **Solarbatterien**  
für den Einsatz als Speicher in der Photovoltaik,
- **Drymobil-Batterien**  
mit festen Elektrolyten.

Die Drymobil-Batterie zeichnet sich durch folgende Eigenschaften aus:

- Kipp- und auslaufsicher durch festgelegten Elektrolyten (Gel),
- Wartungsfrei durch inneren Gasverzehr,
- geringste Emission von Ladegasen, damit Entfall von Entgasungsleitungen und Minimierung des Belüftungsaufwandes,
- geringste Selbstentladerate (1-2 % / Monat), damit ausgezeichnete Lagerungseigenschaften,
- sehr gute Zyklenfestigkeit (bis zu 700 Zyklen bei 60 %iger Entladetiefe, damit gute Haltbarkeit bei Traktionseinsatz,
- gutes Hochstromverhalten, damit bedingt auch für Startaufgaben einsetzbar,
- gute Umwelteigenschaften aufgrund der geringen Ladegasemission und hohen Elektrolytfestigkeit.

Aufgrund ihrer Eigenschaften eignet sich diese Batterie besonders gut für den Einsatz auf dezentralen Energiesystemen wie z.B. einer Segelyacht.

### 2.3.2 Aufbau und Wirkungsweise einer Batterie

#### Aufbau einer Batterie

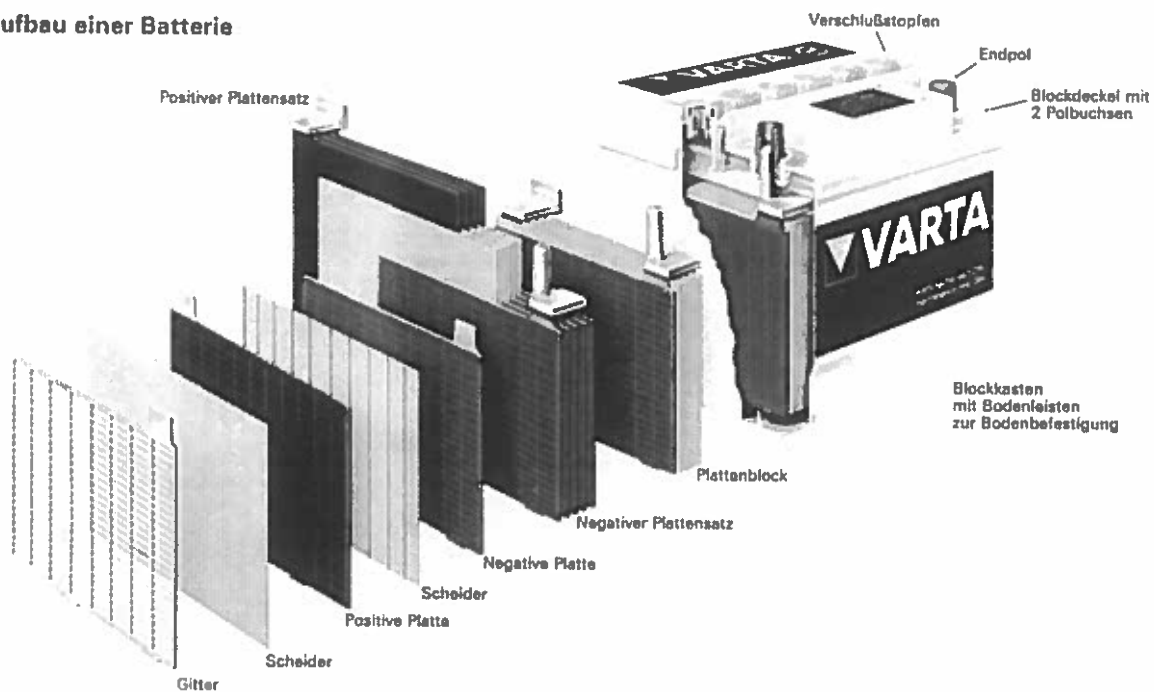


Bild 2.9: Schnittdarstellung eines Akkumulators <sup>[17]</sup>

Die kleinste Einheit einer Batterie ist eine Zelle. Diese besteht aus einem positiven und einem negativen Plattensatz. Die Plattensätze sind durch Isolatoren getrennt. Die Kapazität bzw. die Elektrizitätsmenge einer Zelle ist von deren Plattenvolumen abhängig. Die verdünnte Schwefelsäure dringt in das Innere der Zelle ein und benetzt die Platten, Isolatoren und füllt die Hohlräume. Somit stehen die Bleidioxid- und die Bleiteilchen in Berührung mit der Säure. Außerhalb der Platten befindliche Säure steht als Säurevorrat zur Verfügung <sup>[17]</sup>. Die Ruhespannung einer Bleizelle beträgt im geladenen Zustand bei einer Säuredichte von 1,28 kg/l ca. 2,12 Volt.

<sup>[17]</sup> VARTA, Bordnetzbuch

### 2.3.2.1 Entladevorgang



Durch Stromentnahme, bei Anschluß eines Verbrauchers, treten die Bleidioxid- bzw. Bleiteilchen mit der sie umgebenden Schwefelsäure in Wechselwirkung. Sie geben Elektrizität ab und bilden gleichzeitig Bleisulfat (Reaktionsprodukt des Bleidioxides bzw. Bleies mit Schwefelsäure)<sup>[17]</sup>. Nach einem Gesetz der Elektrochemie wird umso mehr Schwefelsäure pro Zeiteinheit verbraucht, je höher die Stromstärke ist, die der Batterie entnommen wird. Zunächst wird die in den Hohlräumen vorhandene Schwefelsäure verbraucht. Gleichzeitig setzt ein Vorgang ein, der den Nachschub an Schwefelsäure aus der die Platten umgebenden „äußeren“ Säure bewirkt. Man bezeichnet diesen als Diffusion. Hierdurch wird den Bleidioxid- bzw. Bleiteilchen, die noch kein Bleisulfat bilden konnten, wieder Schwefelsäure zugeführt, so daß auch diese Teilchen Bleisulfat bilden und Strom abgeben können.

Die Diffusion verläuft bei tieferen Temperaturen merklich langsamer. Es wird in der kalten Jahreszeit zu einer rascheren „Erschöpfung“ der Batterie kommen als im Sommer. Der Vorgang der Entladung läuft so lange ab, wie noch Bleidioxid- bzw. Bleiteilchen und die zugehörige Schwefelsäure vorhanden sind. In der Praxis darf keine zu weitgehende Entladung erfolgen. Die Gründe hierfür sind, daß das bei der Stromabgabe laufend gebildete Bleisulfat mehr Raum einnimmt als das Bleidioxid, aus dem es gebildet wurde. Der im Gitter der Platte für die Masse vorgesehene Raum würde also zu klein werden, die Masse kann „abschlammern“. Die Spannung der Zelle ist abhängig von der Konzentration der Schwefelsäure im Inneren der Platte. Ist die Schwefelsäure verbraucht, hat die Zelle keine Spannung mehr. Daraus folgt, daß tiefe Entladungen keine nennenswerte Leistung mehr bringen. Sie schaden der Batterie und können zu deren Zerstörung führen.

<sup>[17]</sup> VARTA, Bordnetzbuch

### 2.3.2.2 Ladevorgang



Wird der Zelle Gleichstrom zugeführt, laufen die Vorgänge unter 2.2.1.1 in umgekehrter Richtung ab <sup>[17]</sup>. Dieser Vorgang wird als Ladung der Batterie bezeichnet. Aus dem bei der Entladung gebildeten Bleisulfat entsteht wieder Bleidioxid, Blei und Schwefelsäure; unter Umsetzung der aufgenommenen Elektrizitätsmenge. Die Schwefelsäure entsteht in den Hohlräumen der Platte. Während beim Entladevorgang laufend Schwefelsäure von außen in das Platteninnere nachgeliefert werden muß, ist beim Ladevorgang das Gegenteil der Fall: Die laufend innerhalb der Platte entstehende Schwefelsäure muß nunmehr nach außen transportiert werden, um außerhalb der Platten wieder Säurevorrat zur Verfügung zu stehen. Führt man der Zelle solange Gleichstrom zu, bis alles Bleisulfat wieder in Bleidioxid, Blei und Schwefelsäure zurückverwandelt ist, hat man den Ausgangspunkt erreicht: In der positiven Platte liegen nur noch Bleidioxid-, in der negativen Platte Bleiteilchen vor. Hohlräume und Plattenumgebung sind wieder mit Schwefelsäure der ursprünglichen Konzentration gefüllt. Die Batterie ist geladen.

Während des Ladevorganges nimmt die Batteriespannung stetig zu: Erreicht diese den Wert von 2,4 V/Zelle, setzt in den Zellen eine lebhafte Gasentwicklung ein (Gasen der Batterie). Ein Teil des Ladestromes zersetzt Wasser in Sauerstoff und Wasserstoff. Dieses Gasgemisch ist leicht zündbar und wird Knallgas genannt. Durch die Zersetzung des Wassers wird Wasser verbraucht, die Konzentration der Schwefelsäure in der Batterie steigt weiter an. Außerdem entsteht in der Batterie Wärme, die ebenfalls zu einem Wasserverlust durch Verdunstung führt. Die Konzentration der Schwefelsäure wird in der Praxis über ihre Dichte mittels Hebesäuremesser gemessen. Der Anstieg der Säurekonzentration über den zulässigen Wert schädigt besonders die negativen Platten und kann schließlich zur merklichen Verkürzung der Batterielebensdauer führen. Das bei der Stromentnahme gebildete Bleisulfat fällt zunächst fein verteilt über die Oberfläche der Bleidioxid- bzw. Bleiteilchen an. Läßt man die Batterie über längere Zeit in diesem Zustand stehen, kommt es zur Ausbildung größerer Bleisulfatkri-

<sup>[17]</sup> VARTA, Bordnetzbuch

stalle, die der Ladestrom nur schwer oder überhaupt nicht mehr in Bleidioxid bzw. Blei umwandeln kann.

Zu beachten ist, daß geladene Akkumulatoren - ohne daß Verbraucher angeschlossen sind langsam Kapazität verlieren. Diesen Vorgang nennt man Selbstentladung. An der Grenzfläche negative Platte/Schwefelsäure fließt ständig ein sehr kleiner Strom, der - wie beim Entladevorgang - zur Bildung von Bleisulfat führt. Obwohl die Selbstentladung moderner Starterbatterien lediglich 0,1 bis 0,3 % Kapazitätsverlust pro Tag ausmacht, darf sie nicht unterschätzt werden: das hierbei gebildete Bleisulfat verändert sich und kann bei genügend langer Lagerzeit zum Ausfall der Batterie führen. Der Selbstentladung kann nur durch regelmäßige Nachladung mit kleinen Ladeströmen begegnet werden.

### 2.3.3 Zusammenschaltung von Batterien

Grundsätzlich gilt für die Zusammenschaltung von Batterien, daß nur solche gleichen Typs (Bauart und Kapazität [Ah]), gleichen Inbetriebnahmedatums und gleicher Säuredichte (am besten im völlig entladenen Zustand) zusammenschaltet werden sollen. Wichtig ist, daß die Leitungen hinsichtlich Querschnitt und Länge genau gleich sind, um Spannungsdifferenzen zwischen gleichnamigen Polen auszuschließen.

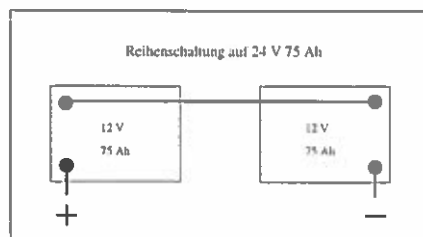


Bild 2.10: Reihenschaltung von Bleiakкумуляtoren

Zunächst wird die Reihenschaltung von 2 Bleiakкумуляtoren (siehe Bild 2.10) betrachtet. Die Spannung [V] der Einzelbatterien addieren sich zur Gesamtspannung [V], die Gesamtkapazität [Ah] ist gleich der Kapazität [Ah] der Einzelbatterien.

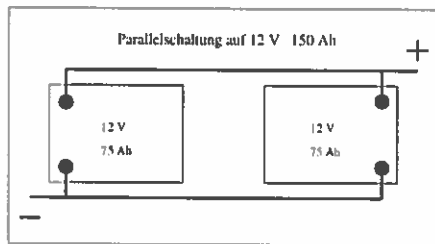


Bild 2.11: Parallelschaltung von Bleiakкумуляtoren

Im Gegensatz zur Reihenschaltung werden bei der Parallelschaltung (Bild 2.11) die Kapazitäten [Ah] der Einzelbatterien addiert; die Gesamtkapazität [Ah] ergibt sich aus der Summe der Kapazitäten aller Einzelbatterien. Die Gesamtspannung [V] ist gleich der Spannung der Einzelbatterien. In der Praxis ist für die Parallelschaltung zu beachten, daß geringfügig ungleiche Ladezustände zu Ausgleichsströmen zwischen den Batterien und zu ungleichmäßiger Belastung führen, was für die Lebensdauer nicht von Vorteil ist sowie die vorhandene Kapazität nicht optimal ausnutzt.

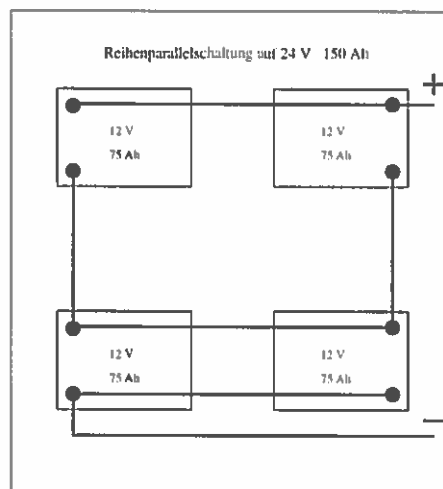


Bild 2.12: Reihenparallelschaltung von Bleiakкумуляtoren

Die Vorteile und Eigenschaften der beiden Schaltungsarten werden in der Reihenparallelschaltung kombiniert (Bild 2.12): durch die Parallelschaltung erhält man die benötigte Gesamtkapazität und durch die Reihenschaltung die gewünschte höhere Betriebsspannung der Batterieanlage.

### 2.3.4 Ladung eines Bleiakкумуляtors

An Bord einer Segelyacht steht in den meisten Fällen ein „Landanschluß“ zur Verfügung. Das bedeutet, ein möglicher Netzanschluß von 220 V / 16 A kann an einer Steganlage genutzt werden. Charterschiffe sollten solch ein Anschluß besitzen. Die Yachten werden regelmäßig - ein bis zwei Wochen - ihren Heimathafen anlaufen, somit kann die Batterie über das Netz aufgeladen werden. Es sollen nun mögliche Transformationsarten der Netzspannung an einem Ladegerät diskutiert werden.

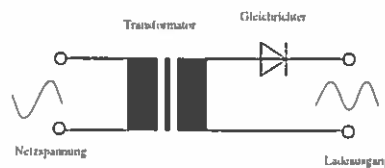


Bild 2.13: Ungeregeltes Ladegerät<sup>[12]</sup>

Bei dem unregulierten Ladegerät (siehe Bild 2.13) wird die Netzspannung mit einem Transformator auf eine Spannung transformiert, die im Leerlauf bei etwa 18 V liegt. Diese Wechselspannung wird mit einem einfachen Gleichrichter, der einen relativ hohen Innenwiderstand hat, gleichgerichtet. Bei abnehmendem Ladestrom und zunehmendem Ladezustand kann die Ladespannung so weit über die Gasungsspannung (siehe 2.2.4.2) ansteigen, daß die Batterie geschädigt wird, obwohl sie noch lange nicht voll ist.

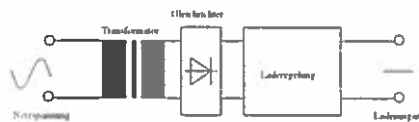


Bild 2.14: Sekundär geregeltes Ladegerät<sup>[12]</sup>

Bei sekundär geregelten Ladegeräten (siehe Bild 2.14) folgt auf den Trafo ein Siliziumgleichrichter mit anschließender Regelelektronik, die eine entsprechende Kennlinie (siehe 2.3.4.1) erstellt. Mit dieser Schaltung lassen sich sehr spannungs- und stromstabile Ladegeräte realisieren, wobei aber eine stabile Netzspannung vorausgesetzt wird. Nachteil dieser Variante sind die verhältnismäßig großen Abmaße und das hohe Gewicht.

<sup>[12]</sup> Palstek, Technisches Wassersport-Journal, Nr. 4/97



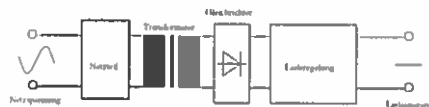


Bild 2.15: Primär geregeltes (getaktetes) Ladegerät<sup>[12]</sup>

Das primär geregelte Ladegerät (siehe Bild 2.15) arbeitet mit einem Netzteil auf der Primärseite des Transformators. In diesem wird die Netzspannung in eine getaktete höherfrequente Spannung umgewandelt, wodurch der Transformator erheblich kleiner ausfallen kann. Außerdem lassen sich mit einer Änderung der Impulslängen in der getakteten Spannung Schwankungen der Netzspannung weitgehend ausgleichen.

Auf einer Segelyacht ist der Einsatz eines primär geregelten Ladegerätes nach entsprechender Kennlinie (siehe 2.3.4.1) wichtig für den Schutz der teuren Batterien und bringt Vorteile bei den geometrischen Abmessungen und bei der Gewichtsbilanz.

Die Verbindungsleitungen vom Ladegerät zur Batterie müssen so kurz wie möglich sein und einen großen Leiterquerschnitt haben. Somit wird der Leitungswiderstand und die damit verbundenen Leitungsverluste minimiert.

Ladegeräte müssen in ihrer Leistung der Batteriekapazität angepaßt sein. Eine Regel besagt, daß der Ladestrom ungefähr 8 bis 10 % des Zahlenwertes der Batteriekapazität betragen soll. z.B. für die Ladung einer 100 Ah Batterie soll ein Ladestrom von 8 bis 10 A zur Verfügung stehen. Das Lade-Entladeverhalten der Batterie wird auch vom Entladestrom bestimmt. Ein Problem sind kleine, aber ständige Entladungsströme, die unbedingt erfaßt werden müssen. Ein kleiner kontinuierlicher Entladestrom im Milliamperebereich bewirkt, daß sich die Batterie nicht auf ihre volle Kapazität aufladen läßt. Die Lebensdauer von Bleibatterien hängt in erster Linie von der Entladetiefe ab. Wird eine Gel-Batterie (Dryfit) z.B. statt bis 20% nur bis 60% Restkapazität entladen, erhöht sich deren Lebensdauer von 400 auf ca. 1800 Lade- bzw. Entladezyklen<sup>[11]</sup>. Für den Ladevorgang einer Batterie werden vom Hersteller Strom-, Spannungswerte sowie eine Ladezeit vorgegeben, diese sollten im Interesse einer langen Lebensdauer berücksichtigt werden.

<sup>[12]</sup> Palstek, Technisches Wassersport-Journal, Nr. 4/97

<sup>[11]</sup> Palstek, Technisches Wassersport-Journal, Nr. 5/96

### 2.3.4.1 Ladekennlinien

Die Batterieladung kann durch verschiedene Methoden erfolgen, die sich durch den Verlauf des Ladestroms, seiner Kennlinie, unterscheiden. Die für eine Bordbatterie wichtigsten sind in Bild 2.16 schematisch dargestellt <sup>[9]</sup>.

Die Buchstaben bedeuten im einzelnen:

- W = Widerstandskennlinie,
- a = automatische Abschaltung,
- o = automatische Umschaltung auf einen anderen Kennlinienteil,
- U = konstante Ladespannung,
- I = konstanter Ladestrom.

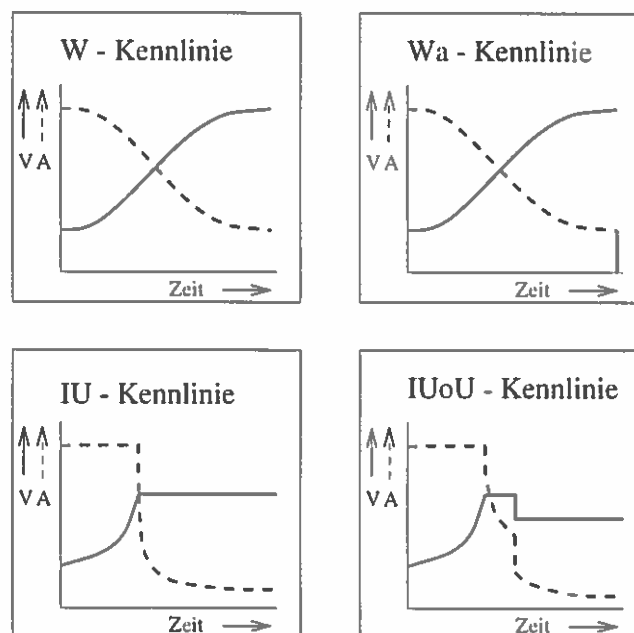


Bild 2.16: Ladekennlinien

Die **W - Kennlinie** gilt als Grundkennlinie einer Batterieladung. Der Ladestrom hängt vom Innenwiderstand der Batterie und erheblich von der Eingangsspannung am Ladegerät ab. Die Batterie wird bis in den Gasungszyklus geladen. Eine unbeaufsichtigte Ladung ist mit diesem Verfahren auf keinen Fall möglich.

<sup>[9]</sup> Muhs, Yachtelektrik

Die **Wa - Kennlinie** arbeitet nach dem gleichen Prinzip der **W - Kennlinie**. Durch eine elektronische Steuerung wird jedoch der Ladevorgang beim Erreichen der Gasungsspannung von ca. 14,3 - 14,5 Volt unterbrochen. Ein unbeaufsichtigtes Laden einer Batterie ist möglich, jedoch wird die volle Kapazität nicht erreicht.

Die **IU - Kennlinie** eignet sich für Bleibatterien besonders gut hinsichtlich ihrer Ladecharakteristik. Durch die konstant geregelte Spannung werden die Batterien voll geladen. Vor Erreichen der Gasungsspannung wird hier mit einem Konstantstrom geladen. Es können bei der Ladung größere Ströme verwendet werden, wodurch sich kürzere Ladezeiten ergeben. Diese Geräte können unbeaufsichtigt betrieben werden.

Die **IUoU - Kennlinie** ist eine Kombination von Konstantstrom- und Konstantspannungsladung mit zwei Spannungen. Die Ladung beginnt mit konstantem Strom bis zur Gasungsspannung (bei Batterien mit festem Elektrolyten ca. 14,1 V). In dieser Phase werden etwa 80 % der Kapazität in der Batterie erreicht. Mit dieser Spannung wird weitergeladen und damit die Vollladung des Akkus erreicht. Anschließend wird auf eine niedrigere Erhaltungsladungsspannung (bei Batterien mit festem Elektrolyten ca. 13,4 V) umgeschaltet. Der Umschaltzeitpunkt ist abhängig von einer vorgegebenen verstrichenen Zeit oder davon, daß der Ladestrom unter einen definierten Wert fällt.

Die abgesenkte Erhaltungsspannung muß dem jeweiligen Batterietyp entsprechen.

Mit dieser Kennlinie werden Bleibatterien optimal vollgeladen.

Mit kombinierten Kennlinien versucht man, die Vorteile der einzelnen Lademethoden zu koppeln, ohne deren Nachteile zu übernehmen. Die **IUoU - Charakteristik** hat sich weitgehend für Ladegeräte an Bord einer Segelyacht durchgesetzt. Das letztere Verfahren ist Bestandteil dieses Energiekonzepts und soll bei den weiteren Betrachtungen berücksichtigt werden. Jedoch wird aufgrund der ständigen Weiterentwicklung dieser Geräte in diesem Energiekonzept eine Anpassung an neue Technologien möglich sein. Wie in <sup>[12]</sup> dargestellt, existieren bereits Ladegeräte auf dem Markt, welche den Batteriezustand erkennen und danach das Ladeverhalten anpassen. Diese Geräte erkennen den Grad der Sulfatierung gealterter Batterien und versuchen beim ersten Laden einer sulfatierten Batterie, die Platten zu regenerieren. Durch den Einsatz

---

<sup>[12]</sup> Palstek, Technisches Wassersport-Journal, Nr. 4/97

modernster Elektronik werden auch selbstlernende Ladegeräte entwickelt, die nur mit den entsprechenden Ladekabeln an die Batterie angeschlossen werden müssen. Einige dieser Geräte sind mit Temperaturfühlern ausgerüstet, um den Ladevorgang mit einer Regelelektronik temperaturabhängig zu steuern. Somit wird die Ladespannung angepaßt und auch bei niedrigen Temperaturen die volle Ladekapazität erreicht. Durch dieses Verfahren kann auch ein Gasen bei höheren Temperaturen vermieden werden. Andere Geräte messen die Batteriespannung mit einem separaten Meßkabel. So kann der Spannungsabfall in den Ladekabeln oder Trenndioden erfaßt und durch die Regelelektronik kompensiert werden.

### **2.3.4.2 Spannungsbereiche der Batterien mit flüssigem Elektrolyten**

Wie unter Pkt. 2.2.1 erwähnt, besteht der Bleiakkumulator aus mehreren Zellen. Die Nennspannung einer Zelle beträgt 2 V.

Entscheidend für eine konkrete Aussage über den Ladezustand dieser an Bord eingesetzten Zellen, sind folgende Spannungswerte:

#### **Entladeschlußspannung**

Ist die Spannung, bis zu welcher eine Zelle entladen werden darf. Diese beträgt 1,75 V (bei Entladung mit dem 20stündigen Entladestrom).

#### **Gasungsspannung**

Ab einem Spannungswert von 2,40 bis 2,45 V je Zelle beginnt der Akku zu gasen.

#### **Ruhespannung**

Nach Beendigung des Lade- bzw. Entladevorgangs wird ein Beharrungswert der Spannung erreicht. Seine Höhe hängt von der Dichte des Elektrolyten, der Schwefelsäure ab. Bei einer Säuredichte von 1,28 kg/l beträgt der Zahlenwert 2,12 V bei einer geladenen Batterie.

#### **Ladeschlußspannung**

Diese Spannung stellt sich ein, wenn die Säuredichte sowie die Spannung nicht mehr steigt. Abhängig vom Batterietyp beträgt diese 2,45 bis 2,5 V je Zelle.

### **Ladespannung**

Die Ladespannung hängt vom Ladezustand der Batterie, vom Ladestrom und von der Temperatur der Schwefelsäure ab. Diese ist immer höher als die Ruhespannung.

#### **2.3.4.3 Besonderheiten der Batterien mit festem Elektrolyten**

Zur Erzielung der optimalen Batterielebensdauer sind für Akkus mit festem Elektrolyten spezielle Ladeverfahren erforderlich. Varta schreibt für die Drymobil-Batterien spannungsbegrenzte Ladeverfahren, wie:

IU, WU, IWU, WoU, IUoU, etc. vor.

Folgende Einstellwerte gelten:

$I = 8 - 40 \text{ A} / 100 \text{ Ah}$ ,

$U = 2,35 \text{ V pro Zelle}$ ,

$t = \text{max. } 20 \text{ h}$ .

Die Ladezeit sollte maximal 20 Stunden betragen, bei Betriebszeiten von 20 bis 48 Stunden sollte die Ladespannung auf 2,3 V pro Zelle reduziert werden und bei Betriebszeiten größer 48 Stunden auf 2,23 V pro Zelle.

## 3 Simulationsberechnungen zur Energiebilanz und Konsequenzen

Die verwendeten Verbraucher und vor allem deren Nutzung richten sich nach dem Einsatz einer Segelyacht. Es sollen zwei unterschiedliche Einsatzgebiete für Segelyachten betrachtet werden. Der Einsatz einer Yacht im Binnen- bzw. im Küstenbereich deckt auch Yachten bei kurzen Regatten sowie auch Charterschiffe, die 1 bis 2 Wochen unterwegs sind, ab. Bei einer Segelyacht auf großer Fahrt muß man für das Energiemanagement natürlich andere Gesichtspunkte heranziehen. Aus diesem Grund wird die „Wattinventur“ in zwei Bereiche klassifiziert. Das Schiff wurde im Pkt. 2.1 definiert, dieses soll im weiteren für die Betrachtung der Energiebilanz verwendet werden. Die Klassifizierung erfolgt in den beiden unterschiedlichen Einsatzgebieten nach den Einschaltzeiten der Verbraucher. So wird bei der Yacht mit einer Tagesfahrt von ca. 12 h gerechnet, in der restlichen Zeit wird davon ausgegangen, daß sich das Schiff in einer Bucht befindet und ankert. Die Segelyacht auf großer Fahrt segelt 24 h.

Wie aus Bild 2.1 hervorgeht, gibt es auf einer Segelyacht eine übliche Standardausrüstung an elektrischen Verbrauchern. Hinsichtlich der einzelnen Verbraucher ist zu bemerken, daß neueste Modelle von Navigationsgeräten bezüglich des Stromverbrauches berücksichtigt wurden. Die Leistung der Positionslampen ist durch den Gesetzgeber vorgeschrieben und kann nicht verringert werden. Einsparungen erzielt man demnach bei Verwendung einer 3-Farben-Laterne im Masttop (Top ist ein nautischer Begriff und bedeutet Spitze), anstatt drei einzelner Positionslampen. Diese Möglichkeit der Wahl läßt der Gesetzgeber offen. Der Autopilot und der Kühlschrank auf einer Segelyacht sind die Geräte mit dem größtem Energiebedarf von allen Langzeitverbrauchern. Aus diesem Grund wurde eine große Anzahl von Geräten hinsichtlich des Energieverbrauches miteinander verglichen. Die Wahl fiel bei der Kühlbox auf ein im Weltraum eingesetztes und bewährtes Gerät von der Hamburger Firma Solaris. (Typenbezeichnung in Bild 2.1) Vorteile dieses Energiesparmodells sind:

- gute Isolierung des Kühlraumes,
- zwangsbelüfteter Kondensator des Kompressors,
- eutektische Platte als Kältespeicher,
- Kompressorlaufzeit wird durch einen patentierten Thermostaten gesteuert.

Der elektrische Energiebedarf ist mit 192 Wh/Tag bei 32 °C angegeben und hat ein Kühlvolumen von 25 Litern.

Der Autopilot der Firma Autohelm hat sich nach Recherchen herauskristallisiert. Der Markt solcher Geräte ist nicht groß, so daß ein nahezu vollständiger Vergleich durchgeführt werden kann. Das berücksichtigte Modell hat sich in der Praxis als zuverlässig und tauglich für den Einsatz auf hoher See erwiesen.

Eine weitere Möglichkeit, die Segelyacht automatisch zu steuern, ist die reine Windfahnensteuerung, welche keine elektrische Energie benötigt. Der Einsatz dieses Windfahnen-Steuersystems würde zur Einsparung elektrischer Energie führen. Da der Autopilot sehr gern auf Chartersyachten und auch in Küsten- und Binnengewässern zum Einsatz kommt, wird dieser in der Energiebilanz berücksichtigt.

### 3.1 Energiebilanz einer Segelyacht im Binnen- bzw. Küstenbereich

Für den Binnen- oder Küstenbereich wird davon ausgegangen, daß die Yacht nur von Sonnenaufgang bis Sonnenuntergang gesegelt wird. Dies entspricht in der Praxis sowohl den Regeln der Vercharterer als auch den Interessen der Eigner von Segelyachten. So wurden in der Bilanz täglich 12 Stunden Fahrt unter Segel berücksichtigt.

	Strom [A]	Betriebszeit [h] pro Tag	Verbrauch [Ah]
<b>Verbraucher</b>			
<b>Positionslampen</b>			
3-Farben-Laterne oder Ankerlicht	2,1	10	21
Deckslicht	2,1	1	2,1
<b>Navigationsinstrumente</b>			
Loge	0,012	12	0,15
Echolot	0,012	12	0,15
Windanzeige	0,012	12	0,15
Kompaß	0,09	12	1,08
GPS	0,16	12	1,92
Navtex	0,04	24	0,96
<b>Kühlbox</b>	3,2	5	16
<b>Autopilot</b>	2	6	12
<b>Funkgerät</b>	0,3	4	1,9
<b>Radio</b>	2	4	8
<b>Beleuchtung</b>	2,5	4	10
<b>Sonstiges</b>	5	1	5
		<b>Summe:</b>	<b>80,41</b>
			<b>Verbrauch in Ah</b>
<b>Energiequellen</b>			
Solarmodule 4 x Solarex MSX 30L	8	6	48
Windgenerator Air Marine	1,7	24	40,8
Drehstromgenerator	80	0	0
		<b>Summe:</b>	<b>88,8</b>

Tabelle 3.1: Energiebilanz einer Segelyacht im Küsten- bzw. Binnenrevier

Es ergibt sich ein durchschnittlicher Energiebedarf von ca. 80 Ah pro Tag. Dieser muß mit einem Energieversorgungsaufwand von ca. 80 Ah + 10 % Wandlungsverlust erzeugt werden.



Hierbei wird die Auswahl bezüglich der Anzahl der Solarpaneele sowie des verwendeten Windgenerators getroffen. Aufgrund der geringeren Abmaße des Air Marine wurde dieser Generator für diesen Einsatzfall gewählt. Gemeinsam mit 4 Solarpaneelen des vorgestellten Typs, ergibt sich eine Deckung von verbrauchter und erzeugter elektrischer Energie sowie der angesetzten 10 % Verluste. Die genaue Kalkulation zum Energiegewinn der Quellen ist in Pkt. 2 beschrieben.

Da die alternativen Energieressourcen nicht ständig gleichmäßig zur Verfügung stehen, muß die Energie gespeichert werden. Auf die Kapazitätswahl des Akkus wird in Pkt. 3.3 eingegangen.

### 3.2 Energiebilanz einer Segelyacht auf großer Fahrt

Eine Segelyacht auf großer Fahrt befindet sich meist auf einer Weltumsegelung oder einem mehrwöchigen Törn. In dieser Kategorie wird davon ausgegangen, daß die Yacht 24 Stunden am Tag segelt. Der Fall eines Aufenthaltes in einer Bucht sowie die Fahrt unter Einsatz des Dieselmotor würde sich nicht negativ auf die Energiebilanz auswirken.

	Strom [A]	Betriebszeit [h] pro Tag	Verbrauch [Ah]
<b>Verbraucher</b>			
<b>Positionslampen</b>			
3-Farb-Laterne	2,1	10	21
Deckslicht	2,1	1	2,1
<b>Navigationsinstrumente</b>			
Loge / Instrumentenbeleuchtung	0,012 / 0,022	24 / 12	0,4
Echolot / Instrumentenbeleuchtung	0,012 / 0,022	24 / 12	0,4
Windanzeige / Instrumentenbeleuchtung	0,012 / 0,022	24 / 12	0,4
Kompaß / Instrumentenbeleuchtung	0,09 / 0,1	24 / 12	2,3
GPS	0,16	24	3,84
Navtex	0,04	24	0,96
<b>Kühlbox</b>	3,2	5	16
<b>Autopilot</b>	2	12	24
<b>Funkgerät</b>	0,3 / 7	4 / 0,1	1,9
<b>Radio</b>	2	4	8
<b>Beleuchtung</b>	2,5	4	10
<b>Sonstiges</b>	5	1	5
		<b>Summe:</b>	<b>97,82</b>
			<b>Erzeugung</b>
<b>Energiequellen</b>			
Solarmodule 4 x Solarex MSX 30L	8	6	48
Windgenerator Windseeker 503	2,5	24	60
Drehstromgenerator	80	0	0
		<b>Summe:</b>	<b>108</b>

Tabelle 3.2: Energiebilanz einer Segelyacht auf hoher See

Es ergibt sich ein durchschnittlicher Energiebedarf von ca. 98 Ah pro Tag. Dieser muß mit einem Energieversorgungsaufwand von ca. 98 Ah + 10 % Wandlungsverlust erzeugt werden.

Hierbei wird die Auswahl bezüglich der Anzahl der Solarpaneele sowie des verwendeten Windgenerators getroffen. Aufgrund der größeren Leistung des Windseeker 503 wurde dieser Generator für diesen Einsatzfall gewählt. Gemeinsam mit 4 Solarpaneelen des vorgestellten Typs, ergibt sich eine Deckung von verbrauchter und erzeugter elektrischer Energie sowie der angesetzten 10 % Verluste. Die genaue Kalkulation zum Energiegewinn der Quellen sind in Pkt. 2 beschrieben.

Da die alternativen Energiere Ressourcen nicht ständig gleichmäßig zur Verfügung stehen, muß die Energie gespeichert werden. Auf die Kapazitätswahl des Akkus wird in Pkt. 3.3 eingegangen.

### **3.3 Wahl der geeigneten Batterie**

Für den Einsatz auf einer Segelyacht eignet sich am besten ein Bleiakkumulator mit festem Elektrolyten, auch Gel-Batterien genannt. Auf die Vorteile dieser Batterie wurde bereits in Pkt. 2.3.1 eingegangen. Verschiedene Firmen wie Sonnenschein, Varta und andere haben diese Akkus im Programm. Für dieses Energiekonzept ist eine Batterie der Firma Varta vom Typ Drymobil am geeignetsten. Die Ausfallsicherheit ist hier selbst bei einem Kippwinkel von 180° gewährleistet <sup>[9]</sup>. Eine Blei-Säure-Batterie soll nie vollständig entladen werden - im Interesse einer hohen Lebensdauer; entnimmt man dagegen dieser Blei-Gel-Batterie die gesamte gespeicherte Energie (was manchmal vorkommt, wenn die Stromversorgung allein aus dem Bordakku erfolgt, eben beim Segeln), dann nimmt zumindest der Speicher keinen Schaden. Es reicht sogar aus, ihn erst nach vier Wochen wieder aufzuladen. Diese Eigenschaften prädestinieren den ausgewählten Akku, für einen Einsatz an Bord.

Die Wahl eines Produktes der Firma Varta bezieht sich auf das Preis-, Leistungsverhältnis sowie einige Eigenschaften des Akkus; das Gewicht ist beispielsweise im Vergleich mit Akkus gleicher Bauart und Leistung gering, die geometrische Abmessung ist bei der hohen Kapazität akzeptabel.

---

<sup>[9]</sup> Muhs, Yachtelektrik

Der genaue Typ mit einer definierten Kapazität [Ah] der verwendeten Batterie richtet sich nach dem Schiff und der Auswertung der Energiebilanz. Für beide Einsatzgebiete der Segelyachten muß die notwendige Kapazitätsreserve einer Bleibatterie berücksichtigt werden.

Die Batteriespannung muß mindestens 10,2 V am Entladeende betragen <sup>[17]</sup>. Die Kapazität von Varta - Batterien wird 20stündig angegeben. Das bedeutet bei einer von z.B. 220 Ah (Ah 20stündig), diese Batterie kann 20 Stunden [h] lang einen Strom von 11 Ampere [A] liefern.

$$\frac{220\text{Ah}}{20\text{h}} = 11\text{A}$$

**Aufstellung der gegenwärtig verfügbaren Drymobil-Batterien der Firma Varta:**

<b>Varta - Typ</b>	<b>83048</b>	<b>83060</b>	<b>83575</b>	<b>83185</b>	<b>83620</b>	<b>83645</b>	<b>83720</b>	<b>83201</b>
<b>Spannung [V]</b>	<b>12</b>	<b>12</b>	<b>12</b>	<b>12</b>	<b>12</b>	<b>12</b>	<b>12</b>	<b>6</b>
<b>Kapazität [Ah]</b>	<b>48</b>	<b>60</b>	<b>75</b>	<b>85</b>	<b>120</b>	<b>145</b>	<b>220</b>	<b>200</b>

Die Firma Varta schreibt in <sup>[17]</sup> zur Kapazitätsbedarfsbestimmung einen Sicherheitsfaktor von 1,7 = optimale Projektierung (Sicherheitsauslegung) und 1,3 = minimale Projektierung vor. Dieser Faktor soll mit dem Kapazitätsbedarf [Ah] multipliziert werden. Da in diesem Energiekonzept auch großer Wert auf die Sicherheit der ständigen Funktion der notwendigen Verbraucher gelegt wird, muß bei der folgenden Berechnung der Faktor von 1,7 für die optimale Projektierung verwendet werden.

**Bedarfsermittlung:**

ermittelter Kapazitätsbedarf [Ah]		Sicherheitsfaktor		Batteriekapazität [Ah]	entspr. Varta - Typ
80,41	x	1,7	=	136,7	83645 / 145 Ah
97,82	x	1,7	=	166,3	83720 / 220 Ah

Tabelle 3.3: Batteriebedarfsermittlung

Jeder Eigner einer Segelyacht sollte individuell seinen Energiebedarf ermitteln und danach die Batteriegröße auswählen. Für die betrachtete Segelyacht in den beiden Einsatzfällen kommt jeweils eine Varta Dryfit Batterie mit einer Kapazität von 145 Ah bzw. 220 Ah zum Einsatz. Nach der ermittelten Batteriegröße muß auch die Leistung des Ladegerätes abgeleitet werden.

<sup>[17]</sup> VARTA, Bordnetzbuch

Nach Angaben des Herstellers sollte der Ladestrom zwischen 8 - 10 % der Batteriekapazität liegen. Das bedeutet bei einer Kapazität von 145 Ah ein Ladestrom von:

$$I_L = 11,6 \text{ A bis } 14,5 \text{ A}$$

und bei einer Kapazität von 220 Ah ein Ladestrom von:

$$I_L = 17,6 \text{ A bis } 22 \text{ A.}$$

Der Ladestrom bezieht sich laut Angaben des Herstellers auf eine 80 %ige Entladung der Batterie. Die Stromanforderungen könnte, wie aus den Energiebilanzen zu entnehmen ist, von den alternativen Energiequellen nicht erfüllt werden und muß auch nicht bereitgestellt werden, da die Batterie nicht so tief entladen wird. (siehe Pkt. 4.1.3)

## 4 Elektronisches Controllersystem zur Energieversorgung einer Segelyacht

### 4.1 Ableitung der Aufgaben eines Controllersystems

Bei einer elektrischen Anlage auf einer Segelyacht ist die zuverlässige Ladeüberwachung der Batterie, ein koordinierter Einsatz der Energieresourcen sowie der ökonomische Gebrauch aller elektrischen Geräte entscheidend für das Bordleben.

Zum einen kann der Ladezustand der Batterie unter den kritischen Werten absinken, wenn die Energieressourcen für längere Zeit (z.B. kein Wind und Bewölkung) nicht zur Verfügung stehen. Zum anderen soll bei einer „vollen“ Batterie die Energie direkt an die Verbraucher abgegeben werden. Unkalkulierbar groß ist der Schaden bei Energiemangel einer Segelyacht auf großer Fahrt oder unangenehm in einer schönen Ankerbucht. Energiemangel auf hoher See führte schon zu Schiffsverlusten. Durch eine ständige Überwachung des Energiesystems, soll der Skipper immer über sein Bordnetz und deren Kapazität informiert sein. Ein Absinken der Batteriekapazität gegen Null, soll durch die automatische Abschaltung von Verbrauchern realisiert werden.

Ziel ist es, die Lebensdauer der Batterie erheblich zu verlängern. Eine Grundvoraussetzung dafür, ist ein ausgewogenes Verhältnis zwischen der benötigten elektrischen Energie der Verbraucher sowie der gewonnenen elektrischen Energie der alternativen Energiequellen. Diese sollen die gesamte elektrische Versorgung auf einer Segelyacht realisieren.

Die Überwachung des Systems basiert auf Messungen von Strom, Spannung und der Temperatur. Der Strom wird über einen definierten Widerstand -Shunt- indirekt gemessen. An der Batterie muß ein Temperatursensor angebracht werden, welches für die Temperaturmessung der Batterie benötigt wird. Am Controller stehen für die Meßergebnisse Eingänge zur Verfügung. Die Meßergebnisse werden im Controller gespeichert und entsprechend verarbeitet.

### 4.1.1 Batterieüberwachung

Der Lade- sowie der Entladezustand [V] der Batterie wird ständig überwacht und kann auf einem dezentralem LCD - Display abgelesen werden.

Zur Batterie führen Überwachungskabel, diese verbinden den Plus- und den Minuspol mit dem Meßeingang des Controllers. An der Batterie wird der Lade- bzw. Entladestrom (Akkumulatorstrom)  $I_A$  [A] sowie die Lade- bzw. Entladespannung (Akkumulatorspannung)  $U_A$  [V] gemessen.

Der Stromkreis wird bei Stromspitzen, z.B. Kurzschluß eines Verbrauchers, durch die einzelne Absicherung mit entsprechend schnellen Feinsicherungen unterbrochen. Der Controller übernimmt keine Notabschaltungen im Kurzschlußfall, daher kann die Abtastung der Meßwerte mit einer Messung pro s erfolgen. Die Genauigkeit der Messung ist mit

$$U_{Mv} = \pm 0,05 \text{ V}$$

gewährleisten. Damit keine Leistungsverluste durch die Messung hervorgerufen werden, ist es notwendig einen niedrigen Meßwiderstand zu verwenden. Es wird ein Spannungsabfall über den Meßwiderstand von:

$$U_{RM} < 200 \text{ mV}$$

gefordert.

**Bemessung des Meßwiderstands:**  $R_M = U_{RM} : I_{Amax}$

$$R_M = 200 \text{ mV} : 20 \text{ A}$$

$$R_M = 0,01 \Omega$$

Die Meßspannung von:

$$U_{RMmax} = 200 \text{ mV}$$

muß mit einem Verstärkungsgrad von:

$$V = 100$$

verstärkt werden. Somit steht dem Controller eine verstärkte Meßspannung von:

$$U_{Mv} = 0 \text{ bis } 20 \text{ V}$$

zur Verfügung.

## 4.1.2 Energieerzeugerüberwachung

Der Strom aller Energiequellen soll im Controller ausgewertet werden. Am Ausgang der alternativen Energiequellen befindet sich jeweils eine spannungsstabilisierende Reglerschaltung. Diese wird auf eine konstante Spannung von:

$$U_{LS}=14,1 \text{ V}$$

eingestellt. Über einen definierten Widerstand von jeder Energiequelle zur Masse, wird indirekt der Strom gemessen (siehe Bild 4.2) und am Controller ausgewertet.

Sollte es zum Einsatz des Drehstromgenerators kommen, fließt der Strom über einen Regler, der die Spannung auf einen Wert von:

$$U_{LS}=14,1 \text{ V}$$

konstant hält. Der indirekt gemessene Strom liegt am Meßeingang des Controllers.

Der Landanschluß (230V/16A) wird durch ein Schaltnetzteil transformiert und gleichgerichtet. Die Ausgangsspannung des Netzteiles soll

$$U_{LS}=14,1 \text{ V}$$

betragen.

Die Regler bzw. das Schaltnetzteil an den Energiequellen dürfen keinen Rückstrom zulassen. Die Spannungsquellen müssen durch einem Spannungs-Stromwandler zu Stromquellen umgewandelt werden. Durch diese Regelung an den Energiequellen, kann der jeweilig erzeugte elektrische Strom, durch Addition summiert werden.

Die Messung ist in diesem Fall auch mit einer Genauigkeit von

$$U_{Mv} = \pm 0,05 \text{ V}$$

ausreichend und soll einmal in der Sekunde gemessen werden. Damit keine Leistungsverluste durch die Messung hervorgerufen werden, ist es notwendig einen niedrigen Meßwiderstand zu verwenden. Es wird ein Spannungsabfall über den Meßwiderstand von

$$U_{RM} < 200 \text{ mV}$$

gefordert.

Zur Bemessung des Meßwiderstands siehe Pkt. 4.1.1



### 4.1.3 Management der Ladung bzw. Entladung

Das Management wird in erster Linie vom Ladezustand der Batterie bestimmt. Der Controller wertet den Batteriezustand aus und schaltet den Laderegler. Dieser versorgt die Batterie je nach Zustand, mit einer Ladespannung und einem Ladestrom oder einer Erhaltungsladung.

Eine weitere Aufgabe ist, bei überschüssiger Energie der Ressourcen und voller Batterie die erzeugte elektrische Energie direkt an entsprechende Verbraucher abzugeben. Damit spart man Batteriezyklen und trägt zur längeren Lebensdauer der Batterie bei.

An dieser Stelle sollen folgende Spannungswerte definiert werden, die sich nach den Anforderungen des Batterieherstellers richten:

<b>Ladeschlußspannung [V]:</b>	<b><math>U_{LS} = 14,1 \text{ V}</math>,</b>
<b>Erhaltungsladungsspannung [V]:</b>	<b><math>U_{EL} = 13,4 \text{ V}</math>,</b>
<b>unkritische Entladeschlußspannung [V]:</b>	<b><math>U_{UK} = 12,0 \text{ V}</math>,</b>
<b>kritische Entladeschlußspannung [V]:</b>	<b><math>U_K = 11,0 \text{ V}</math>.</b>

Der Hersteller der betrachteten Batterietypen, gibt für die Spannungswerte keine Toleranzen an und verweist auf entsprechende Regelschaltungen die eine solche Stabilisierung realisieren.

Die Ladeschlußspannung wird vom Hersteller mit

$$U_{LS} = 14,1 \text{ V}$$

bei einer Umgebungstemperatur der Batterie von

$$T = 25 \text{ °C}$$

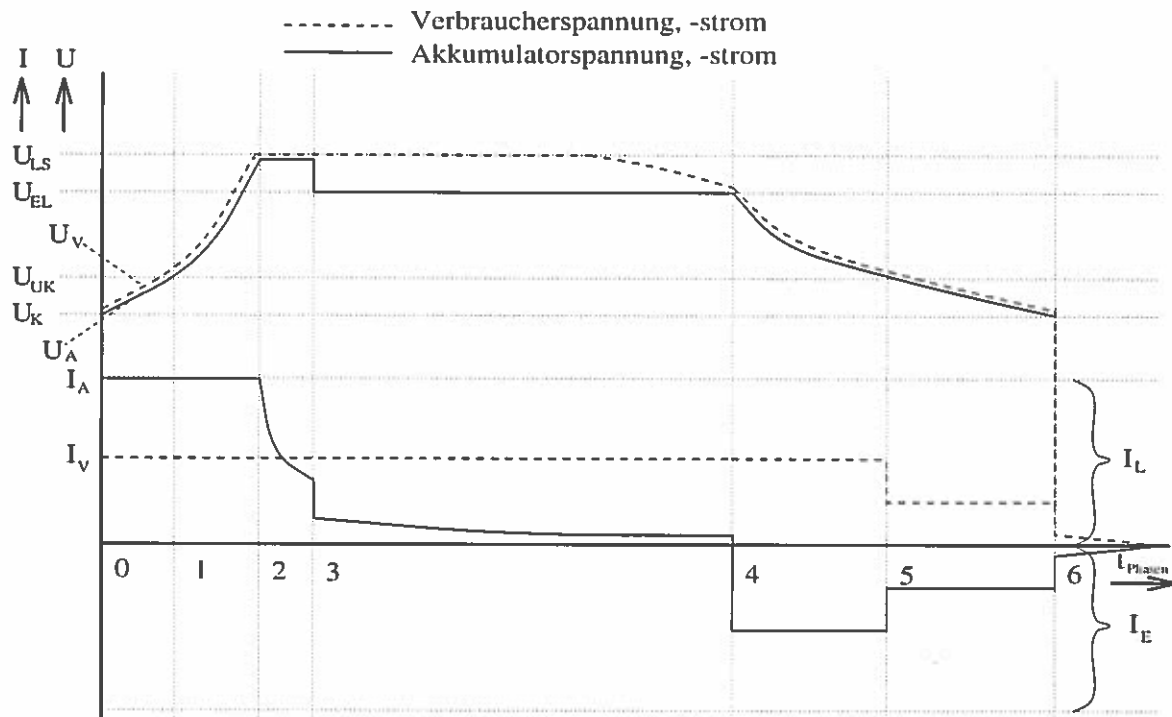
angegeben. Somit muß die Batterietemperatur überwacht werden und es ist notwendig, daß der Controller die Ladespannungen entsprechend der Vorgabe des Herstellers anpaßt. Die Temperaturkompensation beträgt bei 12V-Batterien:

$$T_k = - 25 \text{ mV} / 1 \text{ °C}.$$

Auf die temperaturabhängige Ladespannung kann aufgrund der unterschiedlichen Einsatzgebiete von Segelyachten nicht verzichtet werden. Leicht steigen die Temperaturen bei einer Segelyacht, welche „unter Segel“ wegen des Spritzwassers verschlossen ist, auf Werte von:

$$T > 50 \text{ °C an.}$$

Die Aufgabe des Controllers ist es, nach folgender Ladekennlinie die entsprechenden Schaltzustände zu realisieren.



$U_{LS}$ ...	Ladeschlußspannung [V];	$I_L$ ...	Ladestrom [A]
$U_{EL}$ ...	Erhaltungsladungsspannung [V];	$I_E$ ...	Entladestrom [A]
$U_{UK}$ ...	unkritische Entladeschlußspannung [V];	$I_A$ ...	Akkustrom [A]
$U_K$ ...	kritische Entladeschlußspannung [V];	$I_V$ ...	Verbraucherstrom [A]
$U_A$ ...	Akkuspannung [V];		
$U_V$ ...	Verbraucherspannung [V];		

Bild 4.1: Zeitmodell des Managements

Ein kompletter Ladezyklus wird entweder mit Phase 0 begonnen und mit der Phase 4 abgeschlossen, bzw. mit der Phase 1 begonnen und ebenfalls mit der Phase 4 beendet. Die Ladung der Batterie wird mit einer IUoU - Kennlinie vorgenommen.

Die Unterteilungen auf der Zeitachse in Bild 4.1, stellen verschiedene Phasen dar. Diese werden in der nachfolgenden Tabelle definiert.

Der Akkustrom  $I_A$  wird über den Meßwiderstand  $R_{Mess2}$  gemessen und der Verbraucherstrom  $I_V$  über  $R_{Mess3}$  (siehe Abbildung 4.3).

## Segelyacht im Binnen- bzw. Küstenbereich

Phase	Ladezeit [h]	Akkustrom [A]	Akkuspannung [V]
0 Die Ladephase folgt der Phase 6, der Drehstromgenerator des Dieselmotors muß in Betrieb genommen werden wenn kein Landstrom zur Verfügung steht.	Abhängig von dem Entladegrad des Akkumulators	konstant 20 A	steigt von 11 auf 14,1 V
1 Die Ladephase folgt der Phase 5 und wird mit der elektrischen Energie der alternativen Energie versorgt. Die Phase 1 wird bei einer Ladung durch die Phase 0 durchlaufen. Sollte $I_A < 9,7$ A sein, dann Umschaltung über Phase 6 auf 0.	Abhängig vom Entladegrad des Akkumulators	konstant 9,7 A	steigt von 12 auf 14,1 V
2 Nachladephase um eine Volladung der Batterie zu erreichen.	$I_L=5A$ , oder nach 1 h	Fällt von 9,7 A auf 5 A.	konstant 14,1 V
3 Die Standbyphase leitet die Erhaltungsladung ein. Der Controller schaltet die Verbraucher von der Batterie ab, wenn der elektrische Energiebedarf von den alternativen Energiequellen bzw. vom Landstrom gedeckt wird.	Abhängig vom elektrischen Energiebedarf der Verbraucher.	Fällt von 5 A auf 1,45 A	konstant 13,4 V
4 Diese Phase wird ausgelöst, wenn der benötigte Strom der Verbraucher nicht von den alternativen Energiequellen zur Verfügung gestellt werden kann. Die Verbraucher werden durch die Batterie versorgt. Dieser Zustand leitet die Entladephase der Batterie ein. Sinkt die Akkuspannung unter 12 V dann schaltet der Controller in die Phase 5. Sollte aber ausreichend Energie von den alternativen Quellen zur Verfügung stehen, dann schaltet der Controller zurück zur Phase 3.	Die Phase ist vom Strombedarf der Verbraucher abhängig.	Ladestrom schwankt von 1,45 A bis 5 A Entladestrom liegt zwischen -0,1 A bis -20 A	13,4 V bis 12 V
5 In dieser Phase kontrolliert der Controller die zur Verfügung gestellte elektrische Energie der alternativen Energiequellen. Wird ein Strom von 9,7 A zur Verfügung gestellt, schaltet der Controller in die Phase 1 um. Somit wird eine erneute Ladung vorgenommen.	Wird vom elektrischen Energiebedarf der Verbraucher bestimmt.	Ladestrom schwankt von 1,45 A bis 5 A Entladestrom liegt zwischen -0,1 A bis -10 A	12 V bis 11 V
6 Diese Phase wechselt in die Phase 0 und leitet eine Neuladung der Batterie ein. Durch den hohen Konstantstrombedarf wird entweder der Landanschluß bzw. der Drehstromgenerator als Stromlieferant benötigt.	Wird vom elektrischen Energiebedarf der Verbraucher bestimmt.	Kein Ladestrom Entladestrom liegt zwischen -0,1 A bis -1 A für den Notbetrieb	Spannung sinkt auf unter 11 V.

Tabelle 4.1: Phasenzustände für die Ladung mit IUoU - Kennlinie

Bei einer Segelyacht auf großer Fahrt muß ein entsprechend größerer Ladestrom in der Phase 1 gewählt werden, da eine Batterie mit einem Kapazitätswert von 220 Ah zum Einsatz kommt. Der von den alternativen Energiequellen zur Verfügung gestellte Ladestrom soll:

$$I_L = 10,5 \text{ A}$$

betragen. Der Akkumulatorstrom wird über eine indirekte Strommessung ermittelt (siehe Bild 4.3), aus diesem Grund wechselt nach dem Übergang in die Entladephase das Vorzeichen des Stromwertes. Das resultiert aus dem Ansatz der Knotenpunktgleichung:

$$0 = I_{Q_{ges}} + I_A + I_V.$$

Wobei  $I_{Q_{ges}}$  der gesamte Quellenstrom ist. Die Aufgaben des Controllers richten sich unter anderen nach den Vorgaben dieser Ladecharakteristik. Ziel ist es, die Batterie nur mit einer Erhaltungsladung, bzw. mit einer Ladung nach der IUoU - Kennlinie zu versorgen und dabei die Ressourcen der alternativen Energiequellen zu nutzen. Im Fall, daß diese nicht oder nicht ausreichend zur Verfügung stehen, muß auf den Drehstromgenerator oder den Landstrom zurückgegriffen werden. Der Ladestrom von 9,7 bzw. 10,5 A, der von den alternativen Energiequellen zur Verfügung gestellt wird, reicht aufgrund der Umschaltung bei der unkritischen Entladeschlussspannung von:

$$U_{UK} = 12 \text{ V}$$

auf Ladung aus, um die Batterie wieder aufzuladen.

Als ständige Verbraucher -Langzeitverbraucher- bezeichnet man die Navigationsinstrumente und den Autopiloten mit einer Betriebszeit von 12 bzw. 24 h. Im schlechtesten Fall, wenn alle Verbraucher gleichzeitig betrieben werden, wird ein Strom von:

$$I_V = 20 \text{ A}$$

benötigt. Da dieser Fall statistisch unwahrscheinlich ist, kann man einen Stromverbrauch von:

$$I_V = 10 \text{ A}$$

ansetzen. Man kann also davon ausgehen, daß der Stromverbrauch von den alternativen Energieressourcen abgedeckt werden kann. Sollten diese zum Teil oder nicht zur Verfügung stehen, wird die Batterie entladen. Eine Beispielrechnung soll die Entladekapazität der Batterie in solch einem Fall betrachten, um die Ladung der Batterie mit einer Erhaltungsladung, bzw. mit einer Ladung nach einer IUoU - Kennlinie sowie der Verwendung eines geringeren, als vom Hersteller geforderten Ladestromes bei 20 %iger Entladung.

**Annahme:**

- alternative Energiequellen stehen 10 Stunden nicht zur Verfügung,
- volle Batterie mit einer Kapazität von 220 Ah,
- 10 A werden 10 h aus der Batterie entnommen.

**Berechnung:**  $10 \text{ A} \cdot 10 \text{ h} = 100 \text{ Ah};$   $\frac{100 \text{ Ah}}{220 \text{ Ah}} = \frac{x}{100};$   $x = 45,45\%$

**Schlußfolgerung: Der Batterie wurde eine Energiemenge von ca. 45 % entnommen.  
Somit stehen noch ca. 55 % Ladekapazität zur Verfügung.**

Mit einer Stromstärke von 5A bei der Erhaltungsladung würde die Batterie nach ca. 20 Stunden wieder ihre volle Kapazität besitzen. Bei einer Annahme von 10 A erzeugtem Strom in dieser Zeit würden noch 5 A den Verbrauchern zur Verfügung stehen.

Nach den Energiebilanzen in Pkt. 3.1 ist ein ausgewogenes Verhältnis von verbrauchter und erzeugter elektrischer Energie abzuleiten. Bei vollgeladener Batterie und den angenommenen elektrischen Energieressourcen aus Wind- und Solarenergie wird die Batterie nur mit einer Erhaltungsladung versorgt. Die Verbraucher erhalten die elektrische Energie direkt von den alternativen Energiequellen oder bei höherem Strombedarf von der Batterie. Die Entladung der Batterie kann dann wieder durch die Erhaltungsladung ausgeglichen werden. Dadurch kann eine Ladung mit einem hohem Strombedarf von 9,7 bzw. 10,5 A ausgeschlossen werden. Diese Ladung wird nur erfolgen, wenn die Verbraucher einen Strombedarf haben, der in einer bestimmten Zeit von der Batterie abgedeckt werden muß und die Batterie soweit entlädt, daß eine Ladung nach der IUoU - Kennlinie notwendig wird. Diese kann aber aufgrund der geringen Batterieentladung in der Phase 5, aus den alternativen Energiequellen erfolgen. Die Einbeziehung des Drehstromgenerators oder des Landstromes, wird bei einer kritischen Entladespannung von:

$$U_K = 11 \text{ V}$$

notwendig, da die Batteriekapazität soweit abgesunken ist, daß an dieser Stelle die Vorgaben des Herstellers berücksichtigt werden müssen. Der konstante Ladestrom beträgt:

$$I_A = 20 \text{ A}$$

und lädt den Akku beginnend mit der Phase 0 auf.

## 4.2 Konzept des Energiemanagement

Die zur Verfügung stehenden Meßgrößen, werden im Controller ausgewertet und sollen Menügesteuert auf einem dezentralen Display sichtbar sein. Für das gesamte Energiemanagement müssen diese Meßwerte berücksichtigt werden. Die Abtastung der Meßgrößen erfolgt einmal in der Sekunde (siehe Pkt. 4.1.1).

Die Recherchen haben ergeben, daß bereits existierende Produkte die aufgeführten Bedingungen nicht konsequent berücksichtigen. Außerdem soll eine individuelle Anpassung verschiedener Energiekonzepte auf Segelyachten durch das Managementmodul ermöglicht werden. Durch die Erfassung von allen wichtigen Größen sowie deren Einbeziehung in das Energiemanagement soll eine optimale Steuerung des Systems erreicht werden. Der Controller muß in der Lage sein, mittels Relaisausgängen dieses System zu steuern. Wie in Pkt. 4.1.3 bereits erwähnt, wird der Controller die Laderegelung nach der IUoU - Kennlinie sowie die Umschaltung der Energiequellen auf die Verbraucher steuern. Am Eingang besteht die Möglichkeit, vier Energieressourcen zu erfassen, sollte ein Eingang nicht beschalten sein, so wird dieser nicht berücksichtigt. Sollten die Energieressourcen sowie die Batterie, für die Versorgung der benötigten Geräte nicht ausreichen, so werden nach Absinken der Batteriespannung unter den entsprechenden Werten, nacheinander die Verbraucher abgeschaltet (siehe: Tabelle 4.2). Dafür stehen drei Relais zur Verfügung, denen man drei Gruppen, je nach Wichtigkeit der Geräte zuordnen kann. Diese Relais werden vom Controller geschaltet. Dabei wird in den einzelnen Stufen ein visuelles und akustisches Signal gegeben. Die Relais sollen einen Strom bis 20 A und eine Spannung bis 20 V schalten.

Eine sinnvolle Anordnung der Verbrauchergruppen kann man der Abbildung 4.2 entnehmen. Die Relais werden in der Reihenfolge 1. Gruppe, 2. Gruppe und 3. Gruppe abgeschaltet.

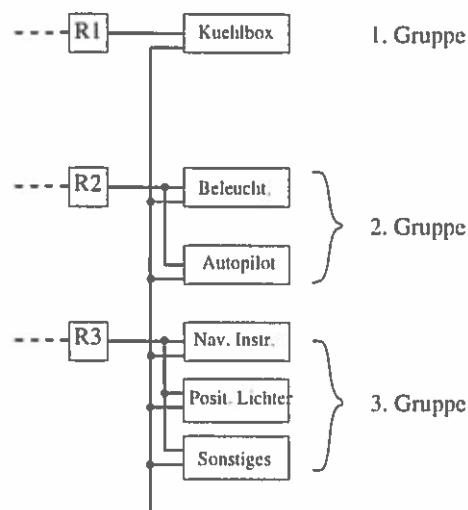


Bild 4.2: Einteilung der Verbrauchergruppen

Der Controller enthält einen Timer, der zur Steuerung zeitlich abhängiger Prozesse verwendet wird. So ist es für die Laderegelung notwendig, die Phase 2 nach einem festen Zeitschema arbeiten zu lassen. Weiterhin wird ein Relais mit dem Timer verbunden, um dieses je nach zeitlichen Bedarf zu steuern. So kann der Kühlschrank an festen Zeiten, zu der statistisch und erfahrungsgemäß die meiste alternativ erzeugte elektrische Energie in einem Tageszeitraum zur Verfügung steht, betrieben werden. In der Zeit von 10.00 - 15.00 Uhr ist wegen des Sonnenstandes die Effektivität der Solarzelle am größten. Der Controller muß jedoch in dieser Zeit beim Betrieb, z.B. des Kühlschranks gewährleisten, das keine Ladung der Batterie stattfindet, ausgenommen davon ist die Erhaltungsladung. Eine Ladung in der Phase 2 würde einen Ladestrom von 9,7 A benötigen. Bei der Nutzung der alternativen Energiequellen würde somit kein ausreichender Strom für den Betrieb der Kühlbox zur Verfügung stehen.

### 4.3 Strukturmodell des Energiesystems

In der Abbildung 2.2 ist die Anordnung des elektrischen Systems einer Segelyacht ersichtlich. In der folgenden Grafik wird die Struktur des elektrischen Schaltplanes auf dieser Segelyacht nachdem in der Diplomarbeit entwickelten Energiekonzepts abgebildet.

Kern des Schaltplanes bildet der als „Blackbox“ dargestellte Controller, Timer und Laderegler der in Pkt. 5 beschrieben wird. In der Praxis ist die Verkabelung auf einer Segelyacht zweiadrig ausgeführt, da es keinen durchgehenden gemeinsamen Massepunkt gibt, der verwendet werden könnte. Diese Vereinfachung wurde nur für die folgende Darstellung gewählt.

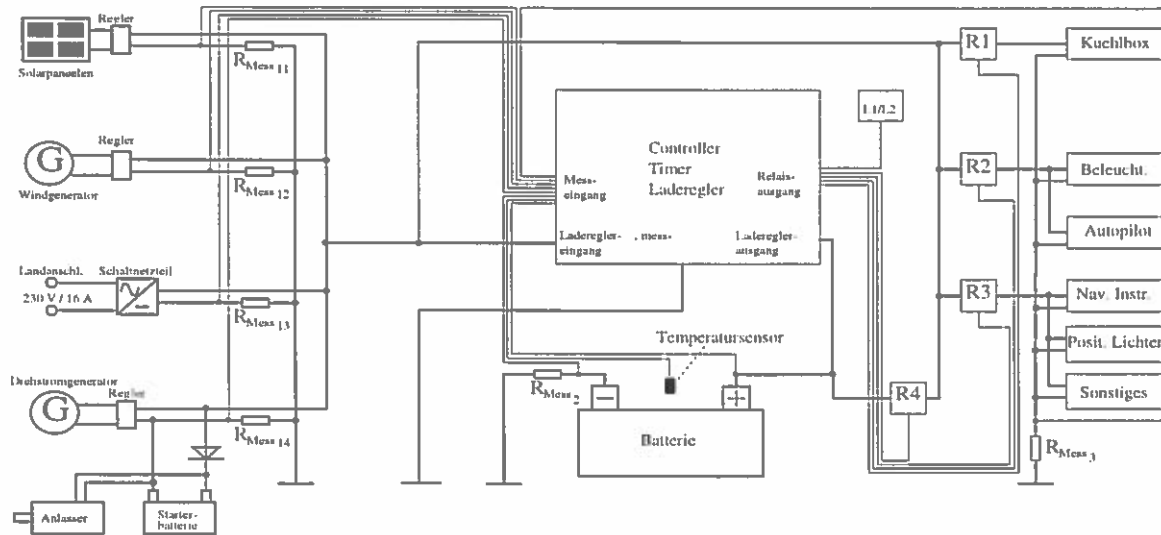


Bild 4.3: Strukturübersicht des elektrischen Systems auf einer Segelyacht

Die Energieressourcen sind parallel geschaltet. Aufgrund der einzelnen Spannungs-Strom-Wandlung und Spannungsstabilisierung durch eine Reglerschaltung beträgt die Spannung am Eingang des Ladereglers 14,1 V. Die einzelnen Ströme der Energiequellen addieren sich (siehe Pkt. 4.1.2).

Die erzeugte elektrische Energie steht den Verbrauchern zur Verfügung und versorgt je nach Bedarf den Laderegler. Die Relais R1 bis R3 übernehmen die Abschaltung der Verbraucher im Notbetrieb. R4 schaltet die Batterie an die Verbraucher und trennt diese Verbindung wieder auf.

In der folgenden Tabelle werden Bezugnehmend auf die Phasen aus Pkt. 4.1.3 die Betriebszustände und Ereignisse aufgeführt. Ein Programmablaufplan zu den Betriebszuständen und den möglichen Übergängen, befindet sich in Pkt. 5.2.3.



Phase	Ereignisse	Bedingungen
<p>3</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Standbyphase, Batterie geladen</li> <li>- alternative Quellen stehen zur Verfügung, <math>I_{Qges} &gt; I_V</math></li> <li>- alternative Quellen stehen nicht ausreichend zur Verfügung, <math>I_{Qges} &lt; I_V</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alle Verbrauchergruppen sind zugeschaltet,</li> <li>- Kühlschrank wird betrieben,</li> <li>- Erhaltungsladung wird durch den Laderegler der Batterie zur Verfügung gestellt,</li> <li>- Batterie und Verbraucher sind elektrisch getrennt,</li> <li>- Erhaltungsladungsstrom wird reduziert,</li> <li>- <math>U_A &lt; 13,4 \text{ V}</math>, dann Umschaltung auf Phase 4 sowie Batterie mit Verbraucher elektrisch verbinden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Uhrzeit zwischen 10.00 bis 15.00 Uhr,</li> <li>- die Verbraucher haben Priorität,</li> <li>- die Verbraucher haben Priorität,</li> </ul>
<p>4</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Entladephase der Batterie,</li> <li>- alternative Energie nicht ausreichend, <math>I_{Qges} &lt; I_V</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Verbraucher werden mit einem Hauptanteil aus der Batterie versorgt,</li> <li>- <math>U_{EL}</math> sinkt auf <math>U_K</math>, dann Umschaltung auf Phase 5 und Abschaltung Relais 2</li> <li>- <math>I_{Qges} &gt; I_V</math>; <math>U_A = 13,4 \text{ V}</math>, Umschaltung auf Phase 3</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- die Verbraucher haben Priorität,</li> <li>- optisches und akustisches Signal mit zeitverzögerter Abschaltung nach 10 min,</li> </ul>
<p>5</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>U_{UK}</math> erreicht,</li> <li>- alternative Energie steht zur Verfügung, <math>I_{Qges} &gt; I_V</math></li> <li>- alternative Energie steht nicht zur Verfügung, <math>I_{Qges} &lt; I_V</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Umschaltung in Phase 1, Ladung der Batterie beginnt,</li> <li>- Umschaltung in Phase 6 Verbrauchergruppe 3 wird abgeschaltet,</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- die Verbraucher haben Priorität</li> <li>- optisches und akustisches Signal mit zeitverzögerter Abschaltung nach 20 min,</li> </ul>
<p>1</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ladephase nach <math>I_{UoU}</math> - Kennlinie,</li> <li>- alternative Energie steht zur Verfügung, <math>I_{Qges} &gt; I_V</math></li> <li>- alternative Energie steht nicht ausreichend zur Verfügung <math>I_{Qges} &lt; 9,7 \text{ A}</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kühlschrank bleibt ausgeschaltet,</li> <li>- Ladung der Batterie beginnt mit Konstantstrom der alternativen Quellen,</li> <li>- <math>U_K</math> steigt auf <math>U_{LS}</math> an, dann Umschaltung in Phase 2,</li> <li>- Umschaltung über Phase 6 auf 0</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- die Verbraucher haben Priorität</li> <li>- optisches und akustisches Signal</li> </ul>
<p>2</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Nachladezeit für Vollladung</li> <li>- alternative Energiequellen stehen zur Verfügung,</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vollladung der Batterie,</li> <li>- <math>I_L</math> sinkt auf <math>I_B</math>, <math>I_A &lt; 5 \text{ A}</math> oder <math>t = 1 \text{ h}</math>, dann Umschaltung in Phase 3,</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- die Verbraucher haben Priorität,</li> <li>- Umschaltung in Phase 3 nach 1h vom Controller,</li> </ul>
<p>6</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>U_{UK}</math> erreicht,</li> <li>- Drehstromgenerator und Landanschluß stehen nicht zur Verfügung,</li> <li>- alternative Energie steht zur Verfügung</li> <li>- Drehstromgenerator oder Landanschluß stehen zur Verfügung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- entsprechende Maßnahmen müssen vom Skipper eingeleitet werden Phase 7 (Notprogramm)</li> <li>- Umschaltung in Phase 1</li> <li>- Umschaltung in die Phase 0,</li> </ul>	
<p>0</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ladephase beginnt unter Verwendung des Drehstromgenerators oder des Landanschlusses,</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kühlschrank und alle Verbraucher können betrieben werden,</li> <li>- <math>U_K</math> steigt auf <math>U_{EL}</math>, dann Umschaltung in Phase 2,</li> <li>- <math>I_A &lt; 20 \text{ A}</math>, Umschaltung auf Phase 1</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Controller beginnt mit der Phase 0 nach dem einschalten.</li> </ul>
<p>7 Notphase</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Controller schaltet aus</li> <li>- Controller schaltet ein</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- beginnt das Programm bei Phase 0</li> </ul>

Tabelle 4.2: Betriebszustände des Energiemanagements

## 5 Entwurf des Controllers

Für die speziellen Aufgaben die sich aus Pkt. 4 ergeben, gibt es mehrere Möglichkeiten der Realisierung des Energiemanagements. Es kann der Aufbau einer analogen Schaltung erfolgen, die den genannten Anforderungen entspricht. Eine weitere Variante ist die Realisierung über eine digitale Schaltung. Dabei ergeben sich viele Möglichkeiten der Umsetzung, die an dieser Stelle nicht weiter berücksichtigt werden sollen.

Neue Technologien im Bereich der Digitaltechnik ermöglichen eine einfache Umsetzung der Problematik mittels fertigen Hardwarekomponenten, die über einen Befehlssatz entsprechend programmiert werden müssen. Diese Einchipssysteme nennt man Mikrocontroller, die verschiedene Rechnerfunktionen sowie I/O - Komponenten miteinander vereinen. Mikrocontroller gibt es in unterschiedlichen Ausführungen mit festem Speicher und durch UV-Licht löschbare Speicher. Das individuell angepaßte Programm kann intern entweder auf einem PROM oder EPROM gespeichert werden.

Die Verwendung eines Mikrocontrollers für das Energiemanagement hat folgende Vorteile:

- durch den Einsatz des Controllers muß keine aufwendige Peripherie aufgebaut werden,
- geringer Eigenverbrauch an elektrischer Energie,
- kleine geometrische Abmaße sowie geringes Eigengewicht,
- transparente Nutzung für unterschiedliche Energiekonzepte.

Der Mikrocontroller muß für das Energiekonzept auf einer Segelyacht sowie für alle Anforderungen des Managements programmiert werden.

## 5.1 Konstruktionsmerkmale für den Einsatz auf Segelyachten

Bedingt durch den Einsatz des Controllers sowie der Peripherie auf einer Segelyacht, ergeben sich konstruktive Besonderheiten, die aus folgenden Anforderungen abgeleitet werden müssen:

- Temperaturbeständigkeit von 0 °C bis 70 °C,
- Feuchtigkeitsbeständigkeit bis 95 % Luftfeuchte,
- hohe Korrosionsbeständigkeit,
- hohe Erschütterungsfestigkeit,
- Lagebeständigkeit (Schräglage einer Segelyacht).

Die Anforderungen in Bezug auf die Temperatur und Luftfeuchtigkeit, wird von den Bauelementen, die auf dem Markt erhältlich sind, erfüllt.

Die Erschütterungsfestigkeit bezieht sich auf die Realisierung der Schaltung auf einer Platine. Bei der Bestückung der Leiterplatte müssen Bauelemente mit ausreichend großen Flächen auf die Platine geklebt werden. Das Anlöten an die Kupferbahnen ist nicht ausreichend hinsichtlich der Festigkeit. Bei den Bauelementen müssen nach der Bestückung und dem Löten die Anschlüsse bis zum unteren Drittel des Gehäuses mit Silikon eingeschäumt werden. Damit wird eine hohe Stabilität erreicht und die Metallteile werden gleichzeitig vor Rostbildungen geschützt.

Die Verwendung von mechanischen Relais wird auf einer Segelyacht nicht empfohlen. Die hohe Luftfeuchtigkeit und der hohe Salzgehalt der Luft z.B. in den Subtropischen Klimazonen, würde die Relaiskontakte sehr schnell beschädigen. Hier empfiehlt sich der Einsatz von Leistungs-MOS-Feldeffekttransistoren. <sup>[7]</sup> Auf dem Markt befindliche MOSFETs schalten einen Strom bis:  $I_D = 150 \text{ A}$  und eine Spannung bis:  $V_{DS} = 60 \text{ V}$ . Auf den Einsatz von elektronische Relais kann in diesem Fall verzichtet werden, da die Betriebsspannung an Bord der Segelyacht 12 V beträgt.

Auf dem Markt gibt es spezielles Zubehörmaterial für die Yachtelektronik bzw. -elektrik. Diese sollten in Bezug auf verwendete Schalter und Taster verwendet werden.

---

<sup>[7]</sup> Lichtberger, Praktische Digitaltechnik

Die Schräglage einer Segelyacht muß bei der Montage des Controllers sowie der Peripherie zu einem System beachtet werden. Die einzelnen Komponenten müssen hinsichtlich der Befestigung im Gehäuse stabil sein.

## 5.2 Realisierung

Wie in Pkt. 5 erwähnt, soll ein Mikrocontroller die gesamte Steuerung des Energiemanagements übernehmen. Bei Recherchen wurde ein Produkt der Firma Mikrochip Technology Inc. aus den USA gefunden. Hierbei handelt es sich um einen speziellen Mikrocontroller mit der Bezeichnung PIC14000 für folgende Applikationen:

- Batterieladung,
- Batteriekapazitätsanzeige,
- Energiemanagement Controller.

Aufgrund der hohen Spezialisierung vom Hersteller wurde dieser Controller hinsichtlich der Anforderungen des Energiekonzeptes untersucht. Eine Übersicht des PIC14000 befindet sich im Anhang D, ein Blockschaltbild im Anhang E sowie die Pinbelegung des programmierbaren Minicomputers befindet sich im Anhang F. Der Einsatz des Mikrocontrollers vom Typ PIC14000 ist grundsätzlich möglich. Da am Controller kein externes Thermoelement angeschlossen werden kann, empfiehlt es sich den internen Temperatursensor zur Messung der Umgebungstemperatur der Batterie zu verwenden. Das bedeutet, daß der Controller sich im Batterieraum befinden muß. Dieses Montagemerkmal hat Vorteile, hinsichtlich der kurzen Kabelwege zwischen dem Akkumulator und dem Controller.

Wie in Pkt. 4.3 dargestellt, werden 4 Relais zum schalten benötigt. Diese werden vom Controller angesteuert. In Pkt. 5.1 wird der Einsatz von Leistungs MOS-Feldeffekttransistoren in Erwägung gezogen. Dieses Bauelement zeichnet sich durch folgende Vorteile aus:

- kurze Ein- und Ausschaltzeiten durch verlustarmes Schalten,
- TTL-kompatibel, kann direkt durch ein TTL-Gatter angesteuert werden,
- Preisvorteil gegenüber elektronischen Relais,

## 5.2.1 Hardwareentwurf des Controllers

Nach den in Pkt. 4 angegebenen Anforderungen an den Controller und der Peripherie ergibt sich folgende Möglichkeit des Entwurfs.

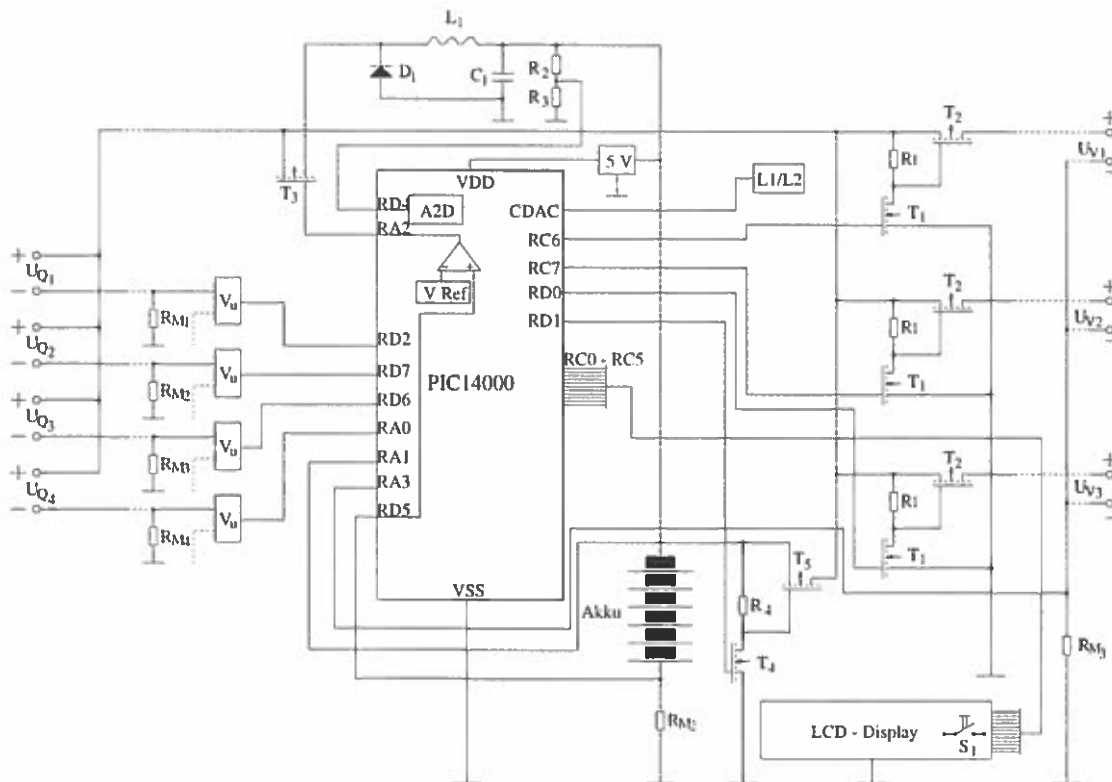


Bild 5.1: Beschaltung des Mikrocontrollers

Die Pinbelegung des Mikrocontroller PIC14000 gehen aus dem Anhang E und F hervor.

Die Betriebsspannung VDD wird von der Batterie über einen 5 V-Spannungsregler zur Verfügung gestellt. Die Abschaltung des Controllers erfolgt über den Hauptschalter an Bord der Segelyacht.

Für die Meßwerterfassung stehen analoge Eingänge zur Verfügung. Die Gate-Eingänge der MOSFETS T1 werden mit TTL-Signalen angesteuert. Für die Ladereglung nach der IUoU-Kennlinie wird von Microship Technology Inc. die Beschaltung und Dimensionierung des PIC14000 zur Verfügung gestellt. (siehe Anlagen). Programmmodule für die Ansteuerung des

LCD-Displays liegen ebenfalls vor (siehe <sup>[8]</sup>). Spezielle Anforderungen werden an das externe Display nicht gestellt. Am LCD-Display soll jeweils eine Information ablesbar sein. Dafür dient ein Taster  $S_1$ , mit dem nacheinander folgende Meßwerte abrufbar sind:

- Ladespannung,
- Entladespannung,
- Batteriekapazität (entsprechend der Akkuspannung),
- Strom der einzelnen Energieressourcen,
- Gesamtstrom aller Energieressourcen,
- Gesamtstrom der Verbraucher.

Diese Meßwerte werden durch den Mikrocontroller für das LCD-Display zur Verfügung gestellt und können durch die Betätigung der Taste am Display nacheinander in obengenannter Reihenfolge angezeigt werden.

Aufgrund des Umfangs der Beschaltung des Mikrocontrollers PIC14000 soll auf eine umfassende Dimensionierung der einzelnen Bauelemente in dieser Diplomarbeit verzichtet werden.

## 5.2.2 Bemessung der Peripherie am Beispiel des analogen Schalters

Als ein Detail aus der Gesamtschaltung wird die MOSFET - Stufe als elektronischer Schalter für die Verbraucher betrachtet.

Ein Analogschalter soll ein kontinuierliches Eingangssignal ein- und ausschalten. Wenn der Schalter eingeschaltet ist, soll die Ausgangsspannung möglichst genau gleich der Eingangsspannung werden; wenn er ausgeschaltet ist, soll sie gleich Null sein <sup>[16]</sup>. Der MOSFET eignet sich als Schalter besonders gut, da er sich bei kleinen Drain-Source-Spannungen  $U_{DS}$  wie ein ohmscher Widerstand verhält, der mit der Gate-Source-Spannung  $U_{GS}$  um mehrere Zehnerpotenzen verändert werden kann. Man kann einen N-Kanal-MOSFET dadurch leitend ma-

---

<sup>[8]</sup> Microship im Internet

<sup>[16]</sup> Tietze; Schenk, Halbleiterschaltungstechnik

chen, daß man eine Steuerspannung  $U_{St}$  anlegt, die positiver als die Schwellspannung ist, ohne daß dabei ein Gate-Kanal-Strom fließt.

Eine Übersicht von Leistungs-MOSFETs befindet sich im Anhang H. Dort aufgeführte Transistoren sind TTL-kompatibel, d.h. sie sind mit  $U_{GS}$  - Werten bis + 5 V einschaltbar.

In Bild 5.2 ist eine MOSFET - Schaltstufe dargestellt. Auf diese Schaltung soll im einzelnen eingegangen werden.

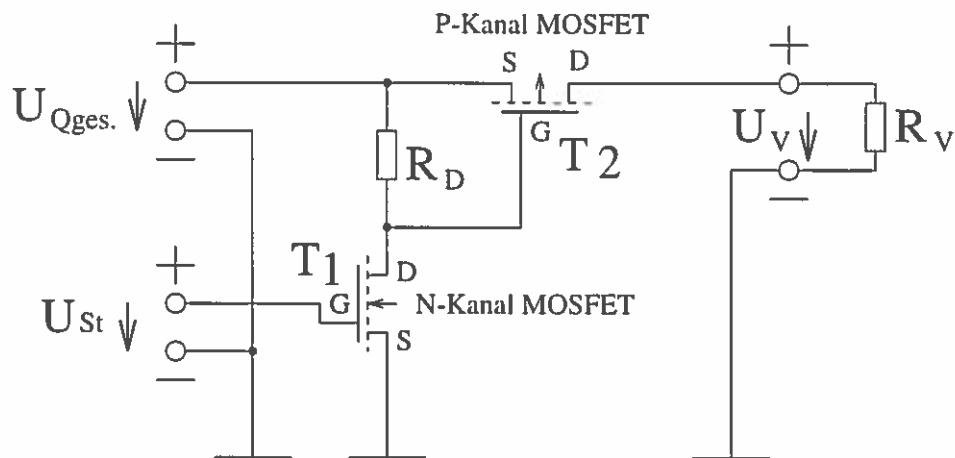


Bild 5.2: Prinzip eine Schaltstufe mit MOSFET

In Bild 5.2 wurde z.B. eine Stufe als Schalter der Spannung  $U_{Qges}$  an  $U_{V1}$  dargestellt. Die Dimensionierungsanforderungen an den Steuertransistor T1 werden durch den verwendeten Widerstand  $R_D$  bestimmt. Dieser wird mit  $R_D = 1 \text{ k}\Omega$  dimensioniert. Der maximale Drain - Strom  $I_D$  berechnet sich wie folgt:

$$U_{DS} = 14,1 \text{ V}; R_D = 1 \text{ k}\Omega$$

$$I_{Dmax} = U_{DS} / R_D$$

$$I_{Dmax} = U_{DS} / R_D$$

$$I_{Dmax} = 14,1 \text{ V} / 1 \text{ k}\Omega$$

$$I_{Dmax} = 14,1 \text{ mA}$$

Mit obigen Dimensionierung von  $R_D$  ist die Steuerung gegen Fehlerspannungen aus Fremdfeldern und Kriechströmen bei Feuchtigkeitseinfluß unempfindlich.

Aufgrund der positiven Gatespannung -TTL aus PIC14000- muß ein N-Kanal MOSFET verwendet werden. Liegt am Gate von T1 eine Spannung  $U_G > 3,5 \text{ V}$  an, so wird der N-Kanal leitend. Es fließt der Strom  $I_{Dmax}$  über  $R_D$  und am Gate von T2 liegt die negative Quellenspannung von  $U_{Qges} = -14,1 \text{ V}$  an. Somit ist T2 wie oben beschrieben leitend und die Verbraucher werden mit dem Quellenstrom versorgt. Ein MOSFET - Typ mit den Eigenschaften  $U_{DS} > 15 \text{ V}$ ,  $U_{St} = 3,5 \text{ V}$  und  $I_D > 20 \text{ mA}$ , ist der MPF910 (siehe Anhang).

Der Transistor T2 schaltet die positive Quellenspannung  $U_{Qges}$  an die Verbrauchergruppe. Dafür wird eine Maximalanforderung an den Drain-Strom des Transistors T2 von  $I_D = 20 \text{ A}$  und eine Drain-Source - Spannung von  $U_{DS} = 15 \text{ V}$  definiert, da der Gesamtstrom der Verbraucher maximal  $20 \text{ A}$  erreichen kann und die Betriebsspannung maximal  $14,1 \text{ V}$  beträgt. Für den Schaltfall der positiven Quellenspannung an die Verbrauchergruppe kommt für T2 nur ein P-Kanal Leistungs MOSFET in Frage. T2 wird leitend, wenn mit negativer Gatespannung der P-Kanal angereichert wird. In dem Fall liegt  $U_{Qges} \sim -13 \text{ V}$  am Gate von T2 an. T2 schließt den Source-Drain-Kanal, wenn die Spannung am Gate  $> -3,5 \text{ V}$  ist. Ein wichtiges Auswahlkriterium eines Leistungs-MOSFETs ist der Drain-Source-Widerstand  $R_{DS(on)}$ . Die umgesetzte Leistung des MOSFETs wird erheblich durch den Wert dieses Kanal-Widerstands bestimmt.

Die Leistung soll am Beispiel des verwendeten P-Kanal MOSFETs vom Typ RFP 30P05 (siehe Anhang) berechnet werden:

$$P_{DS(on)} = 0,065 \Omega; I_{DmaxT1} = 20 \text{ A} \quad (I_{Dmax} \dots \text{ ist der größte vorgesehene Verbraucherstrom})$$

$$P = (R_{DS(on)} \cdot I_{DmaxT1}) \cdot I_{DmaxT1}$$

$$P = (0,065 \Omega \cdot 20 \text{ A}) \cdot 20 \text{ A}$$

$$P = 26 \text{ W}$$

Bei einer maximalen Verlustleistung von  $P = 26 \text{ W}$  bei dem verwendeten MOSFET vom Typ RFP 30P05 und der in Pkt. 5.1 erwähnten Temperaturproblematik an Bord einer Segelyacht, wird die Verwendung eines Aufsteckkühlkörpers (für TO-220 Gehäuse,  $R_{th} = 18 \text{ K/W}$ ) emp-



fohlen. Beim Einsatz von anderen MOSFET Typen mit einem höherem Widerstand  $R_{DS(on)}$ , muß ein entsprechend dimensionierter Kühlkörper verwendet werden.

Eine weitere Möglichkeit des Einsatzes von Leistungs - MOSFETs soll an dieser Stelle betrachtet werden. Die Verwendung eines N-Kanal - MOSFETS ist aufgrund der verlustärmeren Parameter immer anzustreben. Diese Möglichkeit ergibt sich grundsätzlich, wenn die negative Betriebsspannung geschaltet wird. Am Beispiel der folgenden Schaltung soll diese Variante erläutert werden.

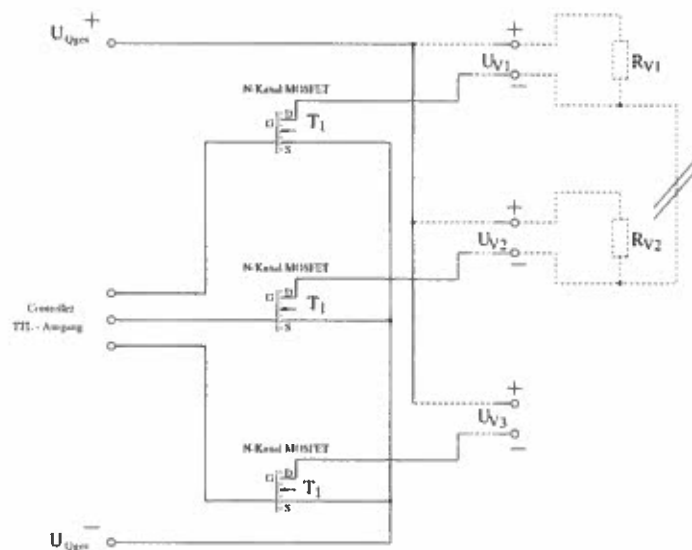


Bild 5.3: Prinzip einer N-Kanal - MOSFET Schaltstufe

Die Bemessung des verwendeten N-Kanal Leistungs MOSFETs richtet sich nach der Stromstärke  $I_D = 20 \text{ A}$  und der Spannung  $U_{DS} = 14,1 \text{ V}$ . Wie im Anhang ersichtlich, ist der Typ RFG75NOSE, vorallem wegen des geringen Drain - Source - Widerstandes geeignet. Die Verlustleistung soll am Beispiel des verwendeten N-Kanal MOSFETs vom Typ RFG75NOSE berechnet werden:

$$P_{DS(on)} = 0,010 \text{ } \Omega; I_{Dmax} = 20 \text{ A (} I_{Dmax} \dots \text{ ist der größte vorgesehene Verbraucherstrom)}$$

$$P = (R_{DS(on)} \cdot I_{Dmax}) \cdot I_{Dmax}$$

$$P = (0,010 \text{ } \Omega \cdot 20 \text{ A}) \cdot 20 \text{ A}$$

$$P = 4 \text{ W}$$

Bei einer maximalen umgesetzten Dauerleistung von  $P = 4 \text{ W}$  kann auf die Verwendung eines Kühlkörpers am Leistungs MOSFET verzichtet werden. Die Schaltfälle werden statisch mit hohen Zeitabständen erfolgen, so daß keine hohe Schaltfrequenz den Transistor zusätzlich belasten.

Die Wirkungsweise des MOSFETs als Schalter der negativen Betriebsspannung kann recht einfach dargestellt werden. Der Ausgang des PIC14000 schaltet eine positive TTL-Spannung von  $U_G > 3,5 \text{ V}$  auf das Gate von T1. Der mit negativen Ladungsträgern angereicherte Kanal bewirkt, daß der MOSFET zwischen Drain und Source leitet und somit das negative Potential der Quellenspannung  $U_{Qges}$  an den Verbrauchern anliegt.

Ein Nachteil dieser Schaltung im gesamten Energiekonzept ist, daß sich Verbraucher mit negativer Gehäusemasse aus unterschiedlichen Verbrauchergruppen nicht am leitenden Gehäuse berühren dürfen. Weil sonst eine Einschaltung über diesen Gehäuse-Nebenschluß trotz ausgeschalteten Schalttransistor möglich wäre. (siehe gestrichelt dargestellte Gehäuseverbindung durch den Nebenschluß in der Abbildung 5.3)

Der Vorteil dieser Schaltung liegt in der verlustarmen und einfachen Realisierung bei Verwendung von N-Kanal Leistungs MOSFETs.

### 5.2.3 Anforderungen an die Programmierung des Mikrocontrollers

Die Firma Microchip stellt auf ihren WWW-Seiten verschiedene Programmodule in Form eines Quelltextes in der Programmiersprache C zur Verfügung, z.B. für die Ansteuerung des PIC14000 als Laderegler mit einer IUoU Ladekennlinie.

Da das Energiemanagement, wie in der Tabelle 4.2 dargestellt, ein individuellen Ablauf hat und möglicherweise auf bestimmten Segelyachten mit besonderem Einsatzzweck noch angepasst werden muß, soll an dieser Stelle das Herangehen an die Programmierung des Mikrocontrollers beschrieben werden. Ein Schritt ist die Umsetzung der in der Tabelle 4.2 dargestellten Betriebszustände und Ereignisse in einem <sup>[6]</sup> Programmablaufplan (PAP).

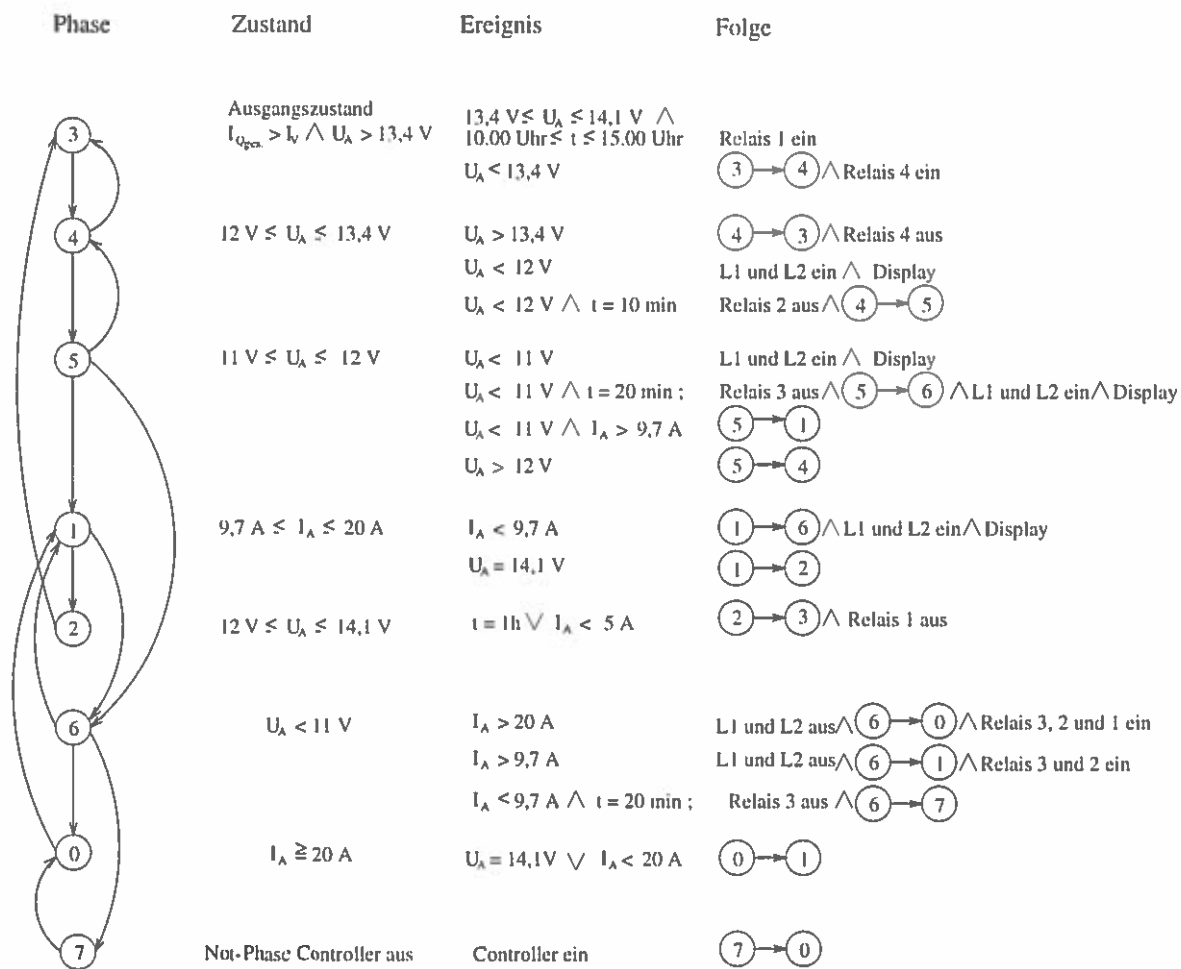


Bild 5.4: Programmablaufplan des Mikrocontrollers nach Tabelle 4.2

<sup>[6]</sup> Lauber, Prozeßautomatisierung

Bei der Inbetriebnahme des Controllers beginnt dieser immer in der Phase 0.

Wie in Bild 5.3 dargestellt, wertet der Controller den Strom  $I_A$  und die Spannung  $U_A$  aus und entscheidet über die nachfolgenden Ereignisse. Sollte die Batterie geladen sein, folgt die Umschaltung über Phase 1 und 2 in die Phase 3. Ist eine Ladung notwendig, so verbleibt der Controller in der Phase 0 und schaltet bei Erreichen der Spannung  $U_A = 14,1 \text{ V}$  in die Phase 1 und entsprechend des Programmablaufes in weitere Phasen. Somit ist ein definierter Resetzustand möglich, aus dem der Controller je nach Zustand und der Bedingungen des Energiekonzepts in die entsprechende Phase schaltet.

Der in Bild 5.3 festgelegte Programmablaufplan muß bei der Programmierung umgesetzt werden. Die Verwendung einer Programmiersprache wie C ist für diese Anwendung geeignet. Der Befehlssatz des Mikrocontrollers PIC14000 kann durch ein speziell für PIC Mikrocontroller kompiliertes C-Programm angesprochen werden. Somit kann der genaue Ablauf des Energiekonzeptes als Programm im EPROM des Controllers gespeichert werden. Die entsprechenden Module und I/O - Komponenten werden durch den internen Befehlssatz bedient und arbeiten entsprechend des Programmes die einzelnen Schritte nach Einbeziehung der Meßwerte ab.

## 6 Ausblick

Die alternativen Energiequellen erzeugen die gesamte elektrische Energie etwa zu gleichen Anteilen. Eine Verschiebung dieses Verhältnisses ist denkbar, da sich die Technologie der Solarzellen im Bezug auf die Effizienz sich ständig verbessert. Diese lautlose Form der Energiegewinnung wird zu gegebener Zeit die Hauptenergiequelle auf einer Segelyacht darstellen. Für die Zukunft wäre auch die Entwicklung eines „Sonnensegels“ möglich, welches gewisse Strömungseigenschaften zum Segeln besitzt und aus Solarzellen besteht. Als Vorsegel oder als Besan wäre diese Art von Energiesegel denkbar. Durch die große Fläche (ca. 15 - 35 m<sup>2</sup>) könnte man die gesamte Bordelektrik versorgen. Die Ästhetik eines weißen Segels sollte mit dieser neuen Möglichkeit nicht mehr im Vordergrund stehen. Der Einsatz eines solchen „Solarsegeltuches“ wäre aber auch für andere dezentrale Energiesysteme interessant, z.B. für ein Leuchtfeuer auf hoher See, somit würde man die Windlastigkeit der herkömmlichen Solarpaneele entschärfen. Für diesen Fall ist das Energiemanagement um so wichtiger, da die Strahlungsenergie der Sonne nicht 24 h am Tag zur Verfügung steht. Neue Entwicklungen in Bezug auf die Energiespeicher sind an dieser Stelle ebenso notwendig, da herkömmliche Bleiakkumulatoren noch zu groß und zu schwer sind.

Eine Möglichkeit der Erprobung des aufgestellten Energiekonzeptes ist die Überwachung der einzelnen Phasen in einer bestimmten Zeit. Somit können genaue Bemessungen der Quellen, der Batterie aber auch des Konzeptes vorgenommen werden. Diese Variante der Kontrolle wird durch den zur Verfügung gestellten Speicher im Mikrocontroller ermöglicht. Für eine eventuelle Ausrüstung von Charterschiffen in einem Revier kann diese Untersuchung von wirtschaftlicher Bedeutung sein.

Da ein programmierbarer Mikrocontroller Herzstück des elektronischen Energiemanagements ist, kann das Energiekonzept jederzeit für einen speziellen Einsatz der Segelyacht angepaßt werden und in Form eines neuen Programmes für den Controller zur Verfügung gestellt werden. Somit ist die Umsetzung verschiedenster Konzepte des Energiemanagements, nicht an die verwendete Hardware gebunden, diese kann transparent eingesetzt werden.

## 7 Zusammenfassung

Die Energiebilanzen mit der simulierten Segelyacht und den unterschiedlichen Einsatzgebieten, sind zwei Beispiele, eines ausgewogenen Energiehaushaltes auf einem dezentralem System. Das Energiekonzept soll die Möglichkeiten verdeutlichen, daß alternative und somit kostengünstige und umweltbewußt erzeugte Energie wiederum durch effizienten Einsatz eingespart werden kann. Man kann dieses Konzept auf beliebige dezentrale Systeme übertragen. Jedoch muß dazu immer eine Energiebedarfsanalyse und ein eigenes Energiekonzept für jeden spezifischen Anwendungsfall ermittelt werden. Die Ausgewogenheit der erzeugten- sowie der verbrauchten Energie ist auf einer Segelyacht aufgrund des Flächenpotentials für Solarpaneele in jedem Fall gegeben. Das Hauptproblem ist, die erzeugte Energie zu speichern um damit bei Ausfall der Energieressourcen weiterhin notwendige Verbraucher zu versorgen. Bei der Umsetzung des Konzeptes ist es wichtig die richtige Auswahl der Verbraucher zu treffen. Konzeptionell sind damit alle weiteren Schritte für ein erfolgreiches Energiemanagement verbunden.

Die Realisierung der unmittelbaren Kombination des Controllers und der Ladereglung durch einen Mikrocontroller ist aufgrund der neuen Technologie in der Digitaltechnik mit wenig Aufwand möglich. Ein großer Vorteil des Mikrocontrollers ist, daß durch individuelle Programmierung spezielle Anforderungen an des Energiekonzept einer Segelyacht für unterschiedliche Einsatzzwecke berücksichtigt werden können.

Für Charterschiffe eignet sich die in der Diplomarbeit beschriebene Konzeption sehr gut. Da die Ausrüstung der im Konzept entwickelten Elektronik von mehreren Charterschiffen wirtschaftlich vertretbar ist und die zyklische Rückkehr zum Crewwechsel in der Charterbasis gegeben ist, kann dort, falls notwendig eine Volladung der Batterie durch den Landstrom sowie eine Kontrolle des elektrischen Systems durch einen Fachmann erfolgen. Über den gesamten Charterzeitraum sollte die alternativ erzeugte Energie ausreichen, um die notwendigen Verbraucher zu versorgen. Dieser Gedanke weckt die Hoffnung, daß nach einem Segeltörn auf dem Ankerplatz in einer friedlichen Bucht der Motor aus bleibt und der Kühlschrank den Proviant trotzdem kühlt.

## Anhang

### A Technische Daten des Solarex Solarmodul MSX-30L

technische Daten:

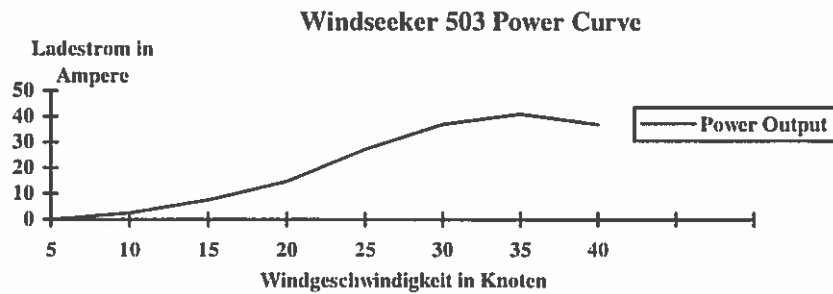
- Abmessungen 61,6 x 49,5 cm
- Gewicht 1,8 kg
- Nennleistung (Watt Pmax) 31 W
- Leerlaufspannung (Voc) 20,6 V
- Lastspannung (Vmax) 17,5 V

Eigenschaften:

- Verwitterungs-, seewasser- und hagelbeständiges Kunststofflaminat
- hohe Bruchstabilität
- dünne Bauweise von nur 0,35 cm Höhe
- 20 Jahre Lebenserwartung

## B Technische Daten des Windseeker

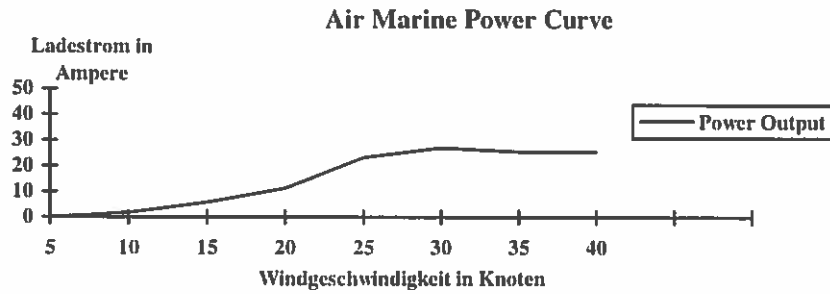
Gehäuse:	Aluminiumgehäuse
Motor:	Bürstenloser Generator mit Permanentmagneten
Ladebeginn:	bei ca. 5 Knoten Windstärke
Propellerdurchmesser:	1,52 m
Gewicht:	9 kg
Spannung (verstellbar):	bei 12 V eingestellt auf 14,8 V bei 24 V eingestellt auf 29,5 V





## C Technische Daten des Air Marine

Gehäuse:	pulverbeschichtetes Aluminium
Motor:	bürstenloser Generator mit Permanentmagneten
Ladebeginn:	bei ca. 5 Knoten Windstärke
Propellerdurchmesser:	1,14 m
Gewicht:	5,5 kg
Spannung:	12 V oder 24 V (regelbar)



## D Technische Übersicht des Mikrokontrollers PIC14000

### 28-Pin Programmable Mixed Signal Controller

#### High-Performance RISC CPU:

- Only 35 single word instructions to learn
- All single cycle instructions except for program branches which are two cycle
- Operating speed: DC - 20 MHz clock input
- 4096 x 14 on-chip EPROM program memory
- 192 x 8 general purpose registers (SRAM)
- 6 internal and 5 external interrupt sources
- 38 special function hardware registers
- Eight-level hardware stack

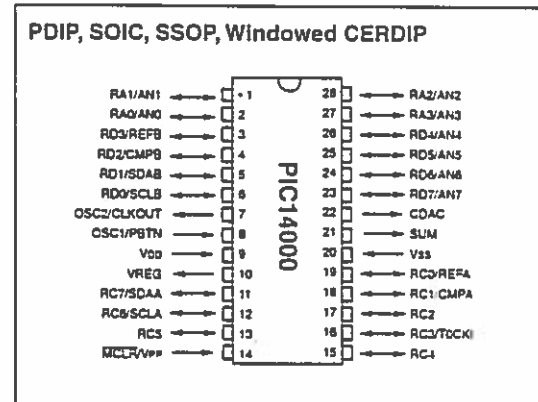
#### Analog Peripherals Features:

- Slope Analog-to-Digital (A/D) converter
  - Eight external input channels including two channels with selectable level shift inputs
  - Six internal input channels
  - 16-bit programmable timer with capture register
  - 16 ms maximum conversion time at maximum (16-bit) resolution and 4 MHz clock
  - 4-bit programmable current source
- Internal bandgap voltage reference
- Factory calibrated with calibration constants stored in EPROM
- On-chip temperature sensor
- Voltage regulator control output
- Two comparators with programmable references
- On-chip low voltage detector

#### Special Microcontroller Features:

- Power-on Reset (POR), Power-up Timer (PWRT) and Oscillator Start-up Timer (OST)
- Watchdog Timer (WDT) with its own on-chip RC oscillator for reliable operation
- Multi-segment programmable code-protection
- Selectable oscillator options
  - Internal 4 MHz oscillator
  - External crystal oscillator
- Serial in-system programming (via two pins)

#### Pin Diagram



#### Digital Peripherals Features:

- 22 I/O pins with individual direction control
- High current sink/source for direct LED drive
- TMR0: 8-bit timer/counter with 8-bit programmable prescaler
- 16-bit A/D timer: can be used as a general purpose timer
- I<sup>2</sup>C™ serial port compatible with System Management Bus

#### CMOS Technology:

- Low-power, high-speed CMOS EPROM technology
- Fully static design
- Wide-operating voltage range (2.7V to 6.0V)
- Commercial and Industrial Temperature Range
- Low power dissipation (typical)
  - < 3 mA @ 5V, 4 MHz operating mode
  - < 300  $\mu$ A @ 3V (Sleep mode: clocks stopped with analog circuits active)
  - < 5  $\mu$ A @ 3V (Hibernate mode: clocks stopped, analog inactive, and WDT disabled)

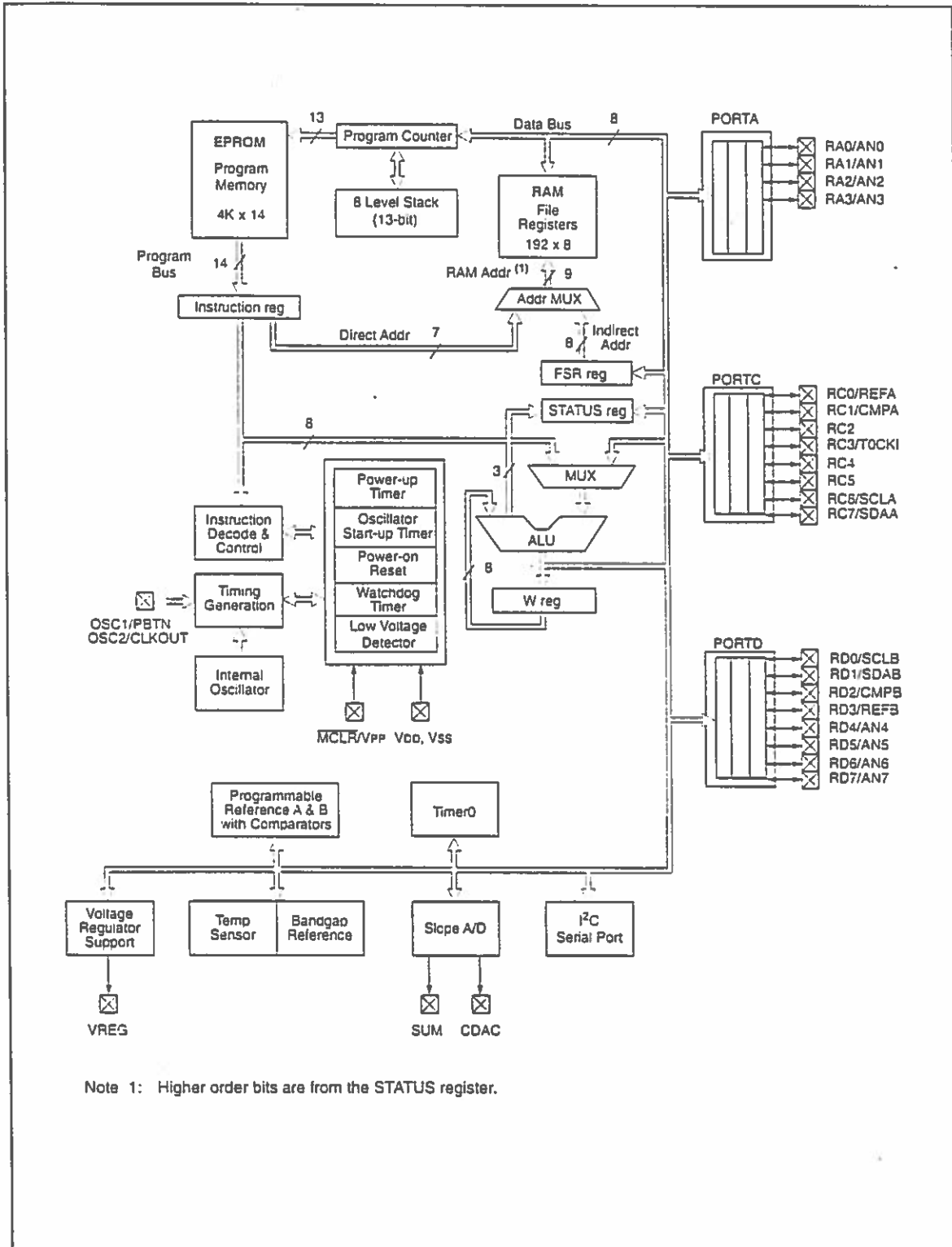
#### Applications:

- Battery Chargers
- Battery Capacity Monitoring
- Uninterruptable Power Supply Controllers
- Power Management Controllers
- HVAC Controllers
- Sensing and Data Acquisition

E PIC14000 Blockschaltbild

# PIC14000

FIGURE 3-1: PIC14000 BLOCK DIAGRAM



# F Pinbelegung PIC14000

Pin Name	Pin No.	I/O	Pin Type	Description
RD3/REFB	3	I/O-PU	AN-ST CMOS	General purpose I/O or programmable reference B output.
RD4/AN4	26	I/O	AN-ST CMOS	Analog input channel 4. This pin can also serve as a GPIO.
RD5/AN5	25	I/O	AN-ST CMOS	Analog input channel 5. This pin can connect to a level shift network. If enabled, a +0.5V offset is added to the input voltage. This pin can also serve as a GPIO.
RD6/AN6	24	I/O	AN-ST CMOS	Analog input channel 6. This pin can also serve as a GPIO.
RD7/AN7	23	I/O	AN-ST CMOS	Analog input channel 7. This pin can also serve as a GPIO.
VREG	10	O	— AN	This pin is an output to control the gate of an external N-FET for voltage regulation.
OSC1/PB1N	8	I-PU	ST	IN Mode: Input with weak pull-up resistor, can be used to generate an interrupt. HS Mode: External oscillator input.
OSC2/CLKOUT	7	O	— CMOS	IN Mode: General purpose output. HS Mode: External oscillator/clock output.
MCLR/VPP	14	I/PWR	ST	Master clear (reset) input / programming voltage input. This pin is an active low reset to the device.
VDD	9	PWR		Positive supply connection
VSS	20	GND		Return supply connection

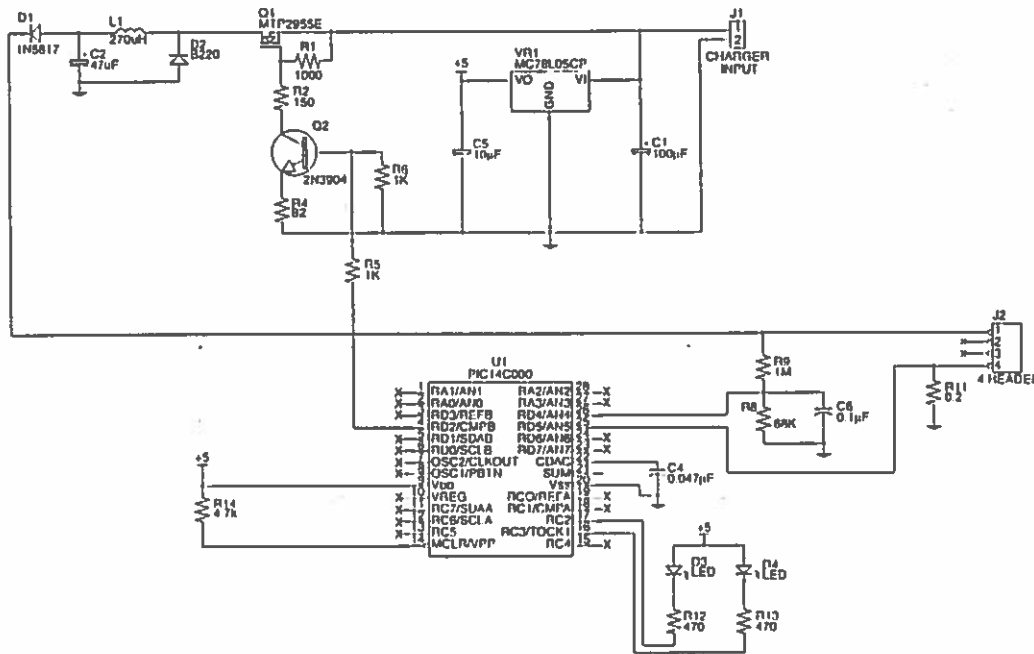
### Legend:

Type:  
TTL  
CMOS  
ST  
SM  
OD  
NPU  
PU  
No-P diode  
AN

Definition:  
TTL-compatible input  
CMOS-compatible input or output  
Schmitt Trigger input, with CMOS levels  
SMBus compatible input  
Open-drain output. An external pull-up resistor is required if this pin is used as an output.  
N-channel pull-up. This pin with pull-up to approximately VDD - 1.0V when outputting a logical '1'.  
Weak internal pull-up (10K-50K ohms)  
No P-diode to VDD. This pin may be pulled above the supply rail (to 6.0V maximum).  
Analog input or output

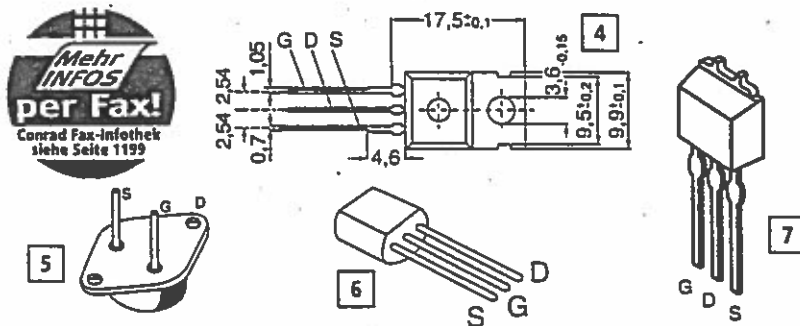
Pin Name	Pin No.	I/O	Pin Type	Description
CDAC	22	O	— AN	A/D ramp current source output. Normally connected to external capacitor to generate a linear voltage ramp.
RA0/AN0	2	I/O	AN-ST CMOS	Analog input channel 0. This pin can also serve as a general-purpose I/O.
RA1/AN1	1	I/O	AN-ST CMOS	Analog input channel 1. This pin can connect to a level shift network. If enabled, a +0.5V offset is added to the input voltage. This pin can also serve as a general-purpose I/O.
RA2/AN2	28	I/O	AN-ST CMOS	Analog input channel 2. This pin can also serve as a general-purpose digital I/O.
RA3/AN3	27	I/O	AN-ST CMOS	Analog input channel 3. This pin can also serve as a general-purpose digital I/O.
SUM	21	O	— AN	ANI summing junction output. This pin can be connected to an external capacitor for averaging small duration pulses.
RC0/REFA	19	I/O-PU	ST CMOS	LED direct-drive output or programmable reference A output. This pin can also serve as a GPIO. If enabled, this pin has a weak internal pull-up to VDD.
RC1/CMPA	18	I/O-PU	ST CMOS	LED direct-drive output or comparator A output. This pin can also serve as a GPIO. If enabled, this pin has a weak internal pull-up to VDD.
RC2	17	I/O-PU	ST CMOS	LED direct-drive output. This pin can also serve as a GPIO. If enabled, this pin has a weak internal pull-up to VDD.
RC3/T0CKI	16	I/O-PU	ST CMOS	LED direct-drive output. This pin can also serve as a GPIO, or an external clock input for Timer0. If enabled, this pin has a weak internal pull-up to VDD.
RC4	15	I/O-PU	ST CMOS	LED direct-drive output. This pin can also serve as a GPIO. If enabled, a change on this pin can cause a CPU interrupt. If enabled, this pin has a weak internal pull-up to VDD.
RC5	13	I/O-PU	ST CMOS	LED direct-drive output. This pin can also serve as a GPIO. If enabled, a change on this pin can cause a CPU interrupt. If enabled, this pin has a weak internal pull-up to VDD.
RC6/SCLA	12	I/O	ST/SM NPU/OD (No P-diode)	General purpose I/O. If enabled, is multiplexed as synchronous serial clock for I <sup>2</sup> C interface. Also is the serial programming clock. If enabled, a change on this pin can cause a CPU interrupt. This pin has an N-channel pull-up device which is disabled in I <sup>2</sup> C mode.
RC7/SDAA	11	I/O	ST/SM NPU/OD (No P-diode)	General purpose I/O. If enabled, is multiplexed as synchronous serial data I/O for I <sup>2</sup> C interface. Also is the serial programming data line. If enabled, a change on this pin can cause a CPU interrupt. This pin has an N-channel pull-up device which is disabled in I <sup>2</sup> C mode.
RD0/SCLB	6	I/O	ST/SM NPU/OD (No P-diode)	General purpose I/O. If enabled, is multiplexed as synchronous serial clock for I <sup>2</sup> C interface. This pin has an N-channel pull-up device which is disabled in I <sup>2</sup> C mode.
RD1/SDAB	5	I/O	ST/SM NPU/OD (No P-diode)	General purpose I/O. If enabled, is multiplexed as synchronous serial data I/O for I <sup>2</sup> C interface. This pin has an N-channel pull-up device which is disabled in I <sup>2</sup> C mode.
RD2/CMPB	4	I/O-PU	AN-ST CMOS	General purpose I/O or comparator B output.

## G Schaltungsbeispiel einer Ladereglung



C1	100 $\mu$ F	
C2	47 $\mu$ F	
Q1	MTP2955E	
Q2	2N3904	
C4	0.047 $\mu$ F	
C5	10 $\mu$ F	
C6	0.1 $\mu$ F	
D1	B220	
D2	1N5817	
D3	Green LED	
D4	Red LED	
J1	Connector appropriate to power supply.	
J2	Connector appropriate to battery.	
L1	270 $\mu$ H	
R1, R5, R6	1K	All Resistors 0.25W unless otherwise specified
R2	150	
R4	82	
R8	68K	
R9	1M	
R11	0.2 Ohm, 1W, wire wound	
R12, R13	470	
R14	4.7K	
U1	PIC14C000	
VR1	7805 Voltage Regulator	

# H Übersicht von Leistungs - MOSFETs

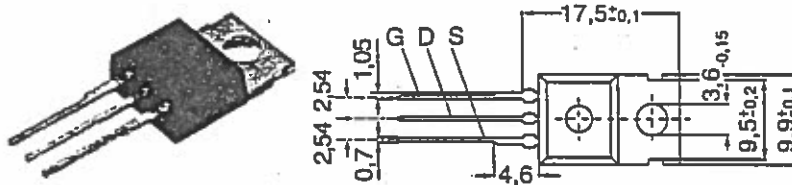


## Power MOSFET, N-Kanal

MOSFET-Transistoren sind spannungsgesteuerte Bauelemente und können direkt an hochohmige Quellen angeschlossen werden. Dies bedeutet eine wesentlich einfachere Eingangsbeschaltung. Eine Schaltung kann daher mit weniger Bauelementen einfacher und zuverlässiger aufgebaut werden. Sie eignen sich daher für den Einsatz als Schalter oder Analogverstärker. Diese Transistoren sind MC-, TTL- und CMOS-kompatibel.

Best.-Nr.	Typ	$I_b$ (A)	$V_{DS}$ (V)	$P_D$ (W)	$R_{DS(on)}$ ( $\Omega$ )	Abb.	Stück	ab 3 à
15 75 03-44	BTS131	6,5A	50	-	60 m $\Omega$		6,95	6,20
15 97 94-44	BUZ10	19	50	75	0,1	4	2,95	2,65
15 94 41-44	BUZ11=IRFZ34N	30	50	75	0,04	4	2,95	2,65
15 97 27-44	BUZ20=MTP12N10	12	100	75	0,20	4	3,95	3,55
15 97 35-44	BUZ23=IRF130	10	100	78	0,20	5	7,95	7,15
15 97 43-44	BUZ24=IRF150	32	100	125	0,06	5	9,95	8,95
15 97 86-44	BUZ71	12	50	40	0,12	4	2,95	2,65
16 32 36-44	GEP50N05	50	50	110	0,022	4	9,95	8,95
15 99 48-44	IRFZ10=IRFZ14	7,2	50	20	0,2	4	2,45	1,95
15 99 05-44	IRFZ22	14	50	40	0,12	4	3,85	3,45
15 98 32-44	IRFZ30	30	50	75	0,05	4	3,95	3,55
15 99 56-44	IRFZ40=44N	35	60	150	0,024	4	4,95	4,45
14 04 49-44	RFD15N05 SMD = RFD 16N05 = IRF 4024	15	50	25	0,047	7	1,95	1,65
15 98 40-44	RFP12N10	12,0	100	60	0,2	4	1,95	1,75
15 99 21-44	RFP12P08	12	80	75	0,3	4	2,95	2,75
15 98 24-44	RFP15N05	15	50	60	0,14	4	2,95	2,65
15 99 30-44	RFP15N0SL	15	50	60	0,14	4	3,95	3,55
16 32 28-44	MTP3055RLE	12	60	40	0,15	4	2,95	2,75
15 98 83-44	MPF910	0,5	60	1,0	-	6	1,95	1,75
16 79 08-44	MTP 3N 50*	3	500	75	-	4	3,95	3,55
17 78 65-44	RFG75NOSE =IRFP064	75	50	240	0,010	4	14,95	12,50

\* mit Stromsensor



## Power MOSFET, P-Kanal

Best.-Nr.	Typ	$I_b$ (A)	$V_{DS}$ (V)	$P_D$ (W)	$R_{DS(on)}$ ( $\Omega$ )	Stück	ab 3 à
15 74 90-44	BTS 100	1,5	50	-	0,3	5,60	4,95
15 96 46-44	BUZ 271	22	50	125	0,15	5,95	5,35
16 00 08-44	IRF 9513	2,5	60	20	1,6	2,95	2,65
15 96 62-44	IRF 9530U	12	100	75	0,3	3,95	3,55
15 97 78-44	IRF 9533	10	60	75	0,4	4,95	4,45
15 97 51-44	IRF 9543	15	60	125	0,3	6,75	6,05
16 00 75-44	IRF 9620	3,5	200	40	1,5	5,95	5,50
16 00 83-44	IRF 9640	11	200	125	0,5	6,95	6,50
15 96 03-44	RFP 30POS	30	50	120	0,065	9,95	8,95

## 9 Quellenverzeichnis

- [1] Ang, T.G.; Lasnier, F.: Photovoltaic Engineering Handbook. Adam Hilger, Bristol and New York 1990.
- [2] Blue Water: Fahrtensegler-Katalog. Stand Nr.6/1997, Blue Water GmbH, Hamburg 1997.
- [3] Feddern, J.: Theorie und Praxis der Bordelektrik. 1. Auflage, Delius Klasing, Bielefeld 1995.
- [4] Gerthsen, Kneser, Vogel: Physik. Springer Verlag, Berlin 1977.
- [5] Greiff, W.: Energiemanagement auf Segeljachten. 1. Auflage, Paul Pietsch Verlage GmbH + Co, Stuttgart 1996.
- [6] Lauber, R.: Prozeßautomatisierung. 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin 1989.
- [7] Lichtberger, B.: Praktische Digitaltechnik. Dr. Alfred Hüthig Verlag GmbH, Heidelberg 1987.
- [8] Microship im Internet: <http://www.microship2.com>
- [9] Muhs, J.F.: Yachtelektrik. 3. überarbeitete Auflage, Klasing & Co. GmbH, Bielefeld 1993.
- [10] Palstek, Technisches Wassersport-Journal. Nr. 3/96, S. 80 - 87, Der Palstek Verlag GmbH, Hamburg 1996.
- [11] Palstek, Technisches Wassersport-Journal. Nr. 5/96, S. 74 - 83, Der Palstek Verlag GmbH, Hamburg 1996.
- [12] Palstek, Technisches Wassersport-Journal. Nr. 4/97, S. 78 - 87, Der Palstek Verlag GmbH, Hamburg 1997.
- [13] Quaschnig, V.; Hanitsch, R.: Die Schattenseite der Sonnenenergie. SSES-Sonnenenergie, Schweiz, Heft 1/1995, S.12-15.
- [14] Quaschnig, V.; Hanitsch, R.: Simulation der Abschattungsverluste bei Photovoltaikanlagen. 12. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Staffelstein 1997.
- [15] „Solar-Server“ im Internet: <http://emsolar.eeTU-Berlin.DE>
- [16] Tietze, Schenk: Halbleiterschaltungstechnik, Springer Verlag, Berlin 1990.
- [17] VARTA, Bordnetzbuch. Stand 1/96, VARTA Autobatterien GmbH, Hannover 1996.
- [18] Wenham, S.R. Green, M.A., Watt, M.E.: Applied Photovoltaics. Center of Photovoltaic Systems and Devices, University of New South Wales, Sydney, Australia 1994.
- [19] WWW Seiten im Internet: <http://www.uni-muenster.de/Energie/wind/>

## Selbständigkeitserklärung

Ich erkläre, diese Diplomarbeit selbständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt zu haben.

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'FR' followed by a stylized flourish.

Frank Reinecke



## Thesen zur Diplomarbeit

1. Der Bedarf an elektrischer Energie auf dezentralen Systemen wächst ständig. So gehören an Bord einer Segelyacht Langzeitverbraucher mit hoher Leistungsaufnahme zur Standardausrüstung.
2. Der alleinige Betrieb des Drehstromgenerators am Dieselmotor ist eine verbreitete Methode auf einer Segelyacht elektrische Energie zu erzeugen. Diese Form der Energiegewinnung ist aus Umweltgründen nicht akzeptabel.
3. Aufgrund der Energiebilanz läßt sich der elektrische Energiebedarf, der mit alternativen Quellen abgedeckt werden muß, ableiten. Neue Technologien ermöglichen den effizienten Einsatz von alternativen Energieresourcen und leistungsfähigen Speichern.
4. Die Erzeugung der elektrischen Energie mit einem Windgenerator und vor allem mit Solarzellen, wird in Zukunft nicht nur auf dezentralen Systemen an Bedeutung gewinnen. Ein wichtiger Punkt ist die Speicherung der elektrischen Energie, da die Erzeuger nicht kontinuierlich zur Verfügung stehen.
5. Ein Energiemanagement, welches die Bereitstellung, den Verbrauch und die Speicherung kontrolliert, ist auf einer Segelyacht mit alternativen Energiequellen notwendig. Das Management soll die effiziente Nutzung der elektrischen Energie, die Erhöhung der Lebensdauer des Akkumulators, sowie vorbeugende Maßnahmen eines Stromausfalls realisieren.
7. Der Entwurf für die Hardware ist auch für den Einsatz unter extremen Bedingungen konzipiert und die Anforderungen des Energiekonzepts wurden berücksichtigt.
8. Eine Anpassung an individuelle Energiekonzepte für Segelyachten, ist aufgrund der Verwendung eines Microcontrollers und seiner einsatzspezifischen Programmierung jederzeit möglich.