

Schlussbericht PV P+D, DIS 36407/77803, Dezember 2003

MobiCat

solar-elektrisches Passagierschiff

ausgearbeitet durch:

Rudolf Minder

Minder Energy Consulting

8917 Oberlunkhofen



Zusammenfassung

Mit dem MobiCat wurde ein solar-elektrisch angetriebenes, alltagstaugliches Passagierschiff für Binnengewässer realisiert. Mit einer Länge von 33 m und einer Breite von 11 m bietet es bis zu 150 Passagieren Platz. Das Schiff ist als Katamaran konstruiert und aus Stahl gebaut. Die Antriebsenergie wird von Solarmodulen mit einer Leistung von 20 kWp geliefert, welche auf dem Dach montiert sind. Im Sommerhalbjahr genügt die Einstrahlung im Durchschnitt für einen Betrieb von mehreren Stunden pro Tag bei einer Reisegeschwindigkeit um 10 km/h. In jedem Rumpf ist ein frequenzgesteuerter Elektromotor installiert, welcher je einen Propeller antreibt. Als Energiespeicher dienen zwei Blei-Batterien mit einer Spannung von 480 V und einer Kapazität von je 240 Ah.

Das Schiff wurde am 6. Juli 2001 in Biel eingeweiht und in Betrieb genommen. Inzwischen transportierte der MobiCat rund 14'000 Passagiere und legte eine Distanz von gegen 6'000 km zurück. Seit Betriebsbeginn werden die relevanten Parameter des Schiffs mit einem an Bord befindlichen Datenerfassungssystem gemessen und ausgewertet. Damit konnten detaillierte Informationen über das energetische Verhalten des Schiffs gewonnen und eine Energiebilanz erstellt werden.

Die Betriebserfahrungen mit dem MobiCat sind generell positiv. Besonders auffallend ist die grosse Attraktivität des Schiffs beim Publikum und bei den Medien, was dazu führte, dass der MobiCat heute das am meisten für Charterfahrten eingesetzte Schiff der Bielersee-Schiffahrts-Gesellschaft ist.

Die Finanzierung des rund CHF 3 Mio. teuren Projekts erfolgte grossenteils über Beiträge der Sponsoren Schweizerische Mobiliar Versicherungsgesellschaft, BKW FMB Energie AG und Certina Kurth Frères SA, sowie einen Beitrag des Bundesamtes für Energie. Die verbleibenden Kosten wurden von der Bielersee-Schiffahrts-Gesellschaft AG übernommen. Die Datenerfassung und -auswertung wurden von der Gesellschaft Mont-Soleil finanziert.

Die Hauptziele des Projekts - der Nachweis der Machbarkeit eines solar-elektrisch angetriebenen Passagierschiffs und das Aufzeigen von innovativen Lösungen für eine nachhaltige Mobilität auf Binnengewässern - wurden vollumfänglich erreicht.

Abstract

The project MobiCat includes engineering design, construction and operation of a solar-electric powered passenger ship for inland waterways. The ship named "MobiCat" is of the catamaran type and has a length of 33 m and a width of 11 m. The electric energy is produced by an array of 20 kWp of photovoltaic panels and stored in two lead-acid batteries of 480 V and 240 Ah each. The ship is powered by two 81 kW industrial AC drives. With a passenger capacity of 150 persons MobiCat is the largest solar-powered ship worldwide.

The ship was inaugurated and put into service on July 6, 2001 in Biel/Bienne, Switzerland. Since then the ship has transported about 14'000 passengers and achieved a total distance of nearly 6000 km. Since July 2001 the main characteristics of the ship are being measured and recorded by means of an onboard data collection system. The measured data were analysed in order to obtain detailed information of the energy-related behaviour of the ship. In particular, the energy balance of the 2002 summer season was calculated.

The operation experience is generally positive and the project has attracted wide interest both by the public and the media. Therefore the MobiCat has become the most popular charter ship on the lake of Biel/Bienne.

The project was financed largely by sponsors, mainly by the insurance company Schweizerische Mobiliar, the utility BKW-FMB Energie AG and the watch company Certina. The Swiss Federal Office of Energy is co-funding the project as a pilot and demonstration activity. The remaining costs are borne by the navigation company of the Lake of Biel/Bienne, BSG, the owner and operator of the ship. Data collection and evaluation is being sponsored by the Société Mont-Soleil.

The ultimate goals of the project - to demonstrate the feasibility of large solar-powered passenger ships and to present new solutions towards sustainable mobility on inland waterways - have been fully reached.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	2
Abstract	2
Inhaltsverzeichnis	3
1. Ausgangslage, Ziele	4
1.1 Ziele für das Gesamtprojekt	4
1.2 Ziele für den Betrieb	4
2. Anlagenbeschrieb	5
2.1 Konzept	5
2.2 Solar-, Elektro- und Antriebstechnik	7
3. Messungen und Resultate	11
3.1 Messsystem	11
3.2 Leistungscharakteristik des Schiffs	12
3.3 Leistungscharakteristik des Solargenerators	14
3.4 Energieproduktion und Energieverbrauch	14
3.5 Betriebserfahrungen	17
4. Projektablauf und –organisation, Kosten	18
4.1 Projektablauf und –organisation	18
4.2 Kosten	18
5. Schlussfolgerungen / Perspektiven	20
Referenzen	21
Publikationen, Literaturverzeichnis	21
Mit dem Projekt verbundene Websites	21

1. Ausgangslage, Ziele

1.1 Ziele für das Gesamtprojekt

Innovativer Einsatz moderner Technologie

Durch konsequente Anwendung der heute verfügbaren Technologien und eine sorgfältige Gesamtoptimierung wird ein Solar-Katamaran realisiert, der bezüglich Nutzung, Fahrleistungen, Kosten und Sicherheit mit konventionellen Binnenseeschiffen vergleichbar ist.

Rationelle Energienutzung und erneuerbare Energie

Das Projekt soll die Nutzung der Sonnenenergie auf eindruckliche Weise einem breiten Publikum demonstrieren und damit das Bewusstsein für die rationelle Energienutzung und den Einsatz erneuerbarer Energien fördern.

Umwelt

Ein solar-elektrisches Passagierschiff produziert keine nennenswerten Luft- und Wasserschadstoffe. Ebenfalls ist der Lärmpegel viel tiefer als bei konventionellen Binnenseeschiffen. Die auf geringen Wasserwiderstand optimierte Rumpfform erzeugt minimalen Wellenschlag, was die Ufererosion weitestgehend vermeidet. Das Projekt stellt damit ein eindruckliches Beispiel nachhaltiger Mobilität auf Binnengewässern dar.

Erlebnis

Die Fahrt auf dem MobiCat soll dem Fahrgast ein völlig neues Schifffahrtserlebnis vermitteln: Die Faszination modernster Technik in Verbindung mit überzeugender Ästhetik und umweltfreundlicher Mobilität. Damit ist MobiCat ein attraktiver, sympathischer Werbeträger für die beteiligten Sponsoren.

Industrie, Gewerbe

Der Hauptanteil am Bau des MobiCat wird durch einheimische Industrie- und Gewerbebetriebe geliefert. Für die Schifffahrt auf ökologisch sensiblen Binnengewässern wird sich in naher Zukunft für die beteiligten Unternehmen ein interessanter Markt entwickeln. Die Arbeitsgemeinschaft setzt sich zum Ziel, weitere ähnliche Projekte auch im benachbarten Ausland zu realisieren.

1.2 Ziele für den Betrieb

Nachdem das Schiff im Juli 2001 eingeweiht und anschliessend bereits intensiv eingesetzt wurde, konnten in der ersten Betriebssaison die wichtigsten Betriebsparameter messtechnisch erfasst und ausgewertet werden. Auf Grund der Messwerte sowie praktischer Betriebserfahrungen wurden verschiedene Optimierungen vorgenommen.

Für das Betriebsjahr 2002 - das Expo.02-Halbjahr - bestand das Hauptziel darin, einen möglichst störungsfreien Betrieb sicherzustellen. Im weiteren sollten die wichtigsten betrieblichen Kennwerte während einer vollen Saison erfasst und ausgewertet werden. Insbesondere interessierte dabei die Energiebilanz des Schiffs.

2. Anlagenbeschreibung

2.1 Konzept

Mit dem MobiCat wurde ein solar-elektrisch angetriebenes, alltagstaugliches Passagierschiff für Binnengewässer realisiert. Mit einer Länge von 33 m und einer Breite von 11 m bietet es bis zu 150 Passagieren Platz. Mit diesen Dimensionen wurde ein Entwicklungssprung zur kommerziellen Anwendung solar-elektrischer Wasserfahrzeuge vollzogen.

Das Schiff ist als Katamaran konstruiert und aus Stahl gebaut. Zwei Schwimmer sind durch Querträger verbunden. Darauf wird die Dachkonstruktion befestigt, welche die Solarmodule trägt. Die Konstruktion erlaubt eine grosse Flexibilität bezüglich der Nutzung (Raumaufteilung, Bestuhlung, Inneneinrichtung). Bild 1 zeigt einen Übersichtsplan des Schiffs. Die wichtigsten Daten sind in Tabelle 1 dargestellt.

Die Antriebsenergie wird von Solarmodulen mit einer Leistung von 20 kWp geliefert, welche auf dem Dach montiert sind. Im Sommerhalbjahr genügt die Einstrahlung im Durchschnitt für einen Betrieb von mehreren Stunden pro Tag bei einer Reisegeschwindigkeit im Bereich von 10 km/h. In jedem Rumpf ist ein frequenz-gesteuerter Elektromotor installiert, welcher je einen optimierten Propeller antreibt. Als Energiespeicher dienen hochwertige Blei-Batterien, welche genügend Kapazität für einen mehrstündigen Betrieb ohne Sonneneinstrahlung aufweisen. Der Betrieb des Schiffs soll möglichst energie-autonom erfolgen. Auf Grund der durch den Betreiber geschätzten Einsatzzeiten des Schiffs wurden Energiebilanzen berechnet und damit Batteriekapazität und Solargeneratorleistung optimiert. Bild 2 zeigt ein Blockschema der elektrotechnischen Baugruppen.

Bei intensiver Nutzung und/oder längeren Schlechtwetter-Perioden können die Batterien vom Landstrom-Anschluss aufgeladen werden. Aus Sicherheitsgründen wurde von der Zulassungsbehörde der Einbau eines Dieseldgenerators verlangt. Dieser erlaubt auch bei entladener Batterie eine sichere Rückkehr des Schiffs.

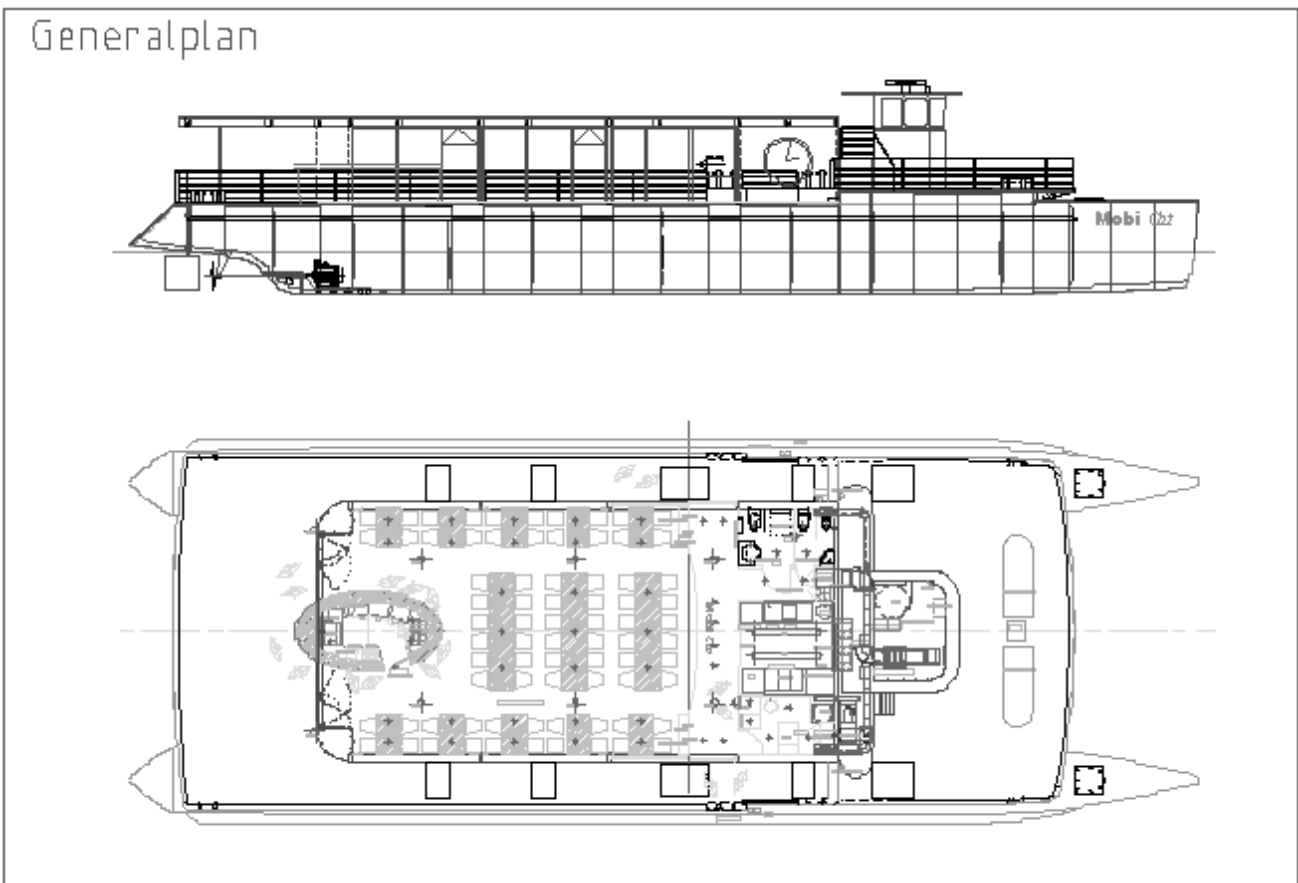


Bild 1: Übersichtsplan des MobiCat

Masse und Gewichte	Gesamtlänge	33 m
	Länge der Wasserlinie	31.3 m
	Gesamtbreite	11 m
	Max. Höhe über Wasser	5 m
	Tiefgang, max.	1.5 m
	Freibord, min.	1.2 m
	Benetzte Fläche	207 m ²
	Leergewicht, fahrbereit	115 t
	Nutzlast	15 t
Fahrleistungen, Kapazität	Reisegeschwindigkeit	10-14 km/h
	Maximale Passagierkapazität	150
	Innensitzplätze	76
	Besatzung	2
Energie- und Antriebssystem	Solarzellenfläche	180 m ²
	Leistung der Solarzellen (STC)	20 kWp
	Betriebsspannung	480 Volt
	Speicherbatterien: Nennkapazität und Typ	2 x 240 Ah
	Nutzbarer Energieinhalt der Speicherbatterien	2 x 90 kWh
	Gewicht der Batterien	2 x 4000 kg
	Motornennleistung	2 x 81 kW
	Antriebselektronik	90 kVA
	Hilfsdieselgenerator	75 kVA

Tabelle 1: Wichtigste technische Daten des MobiCat

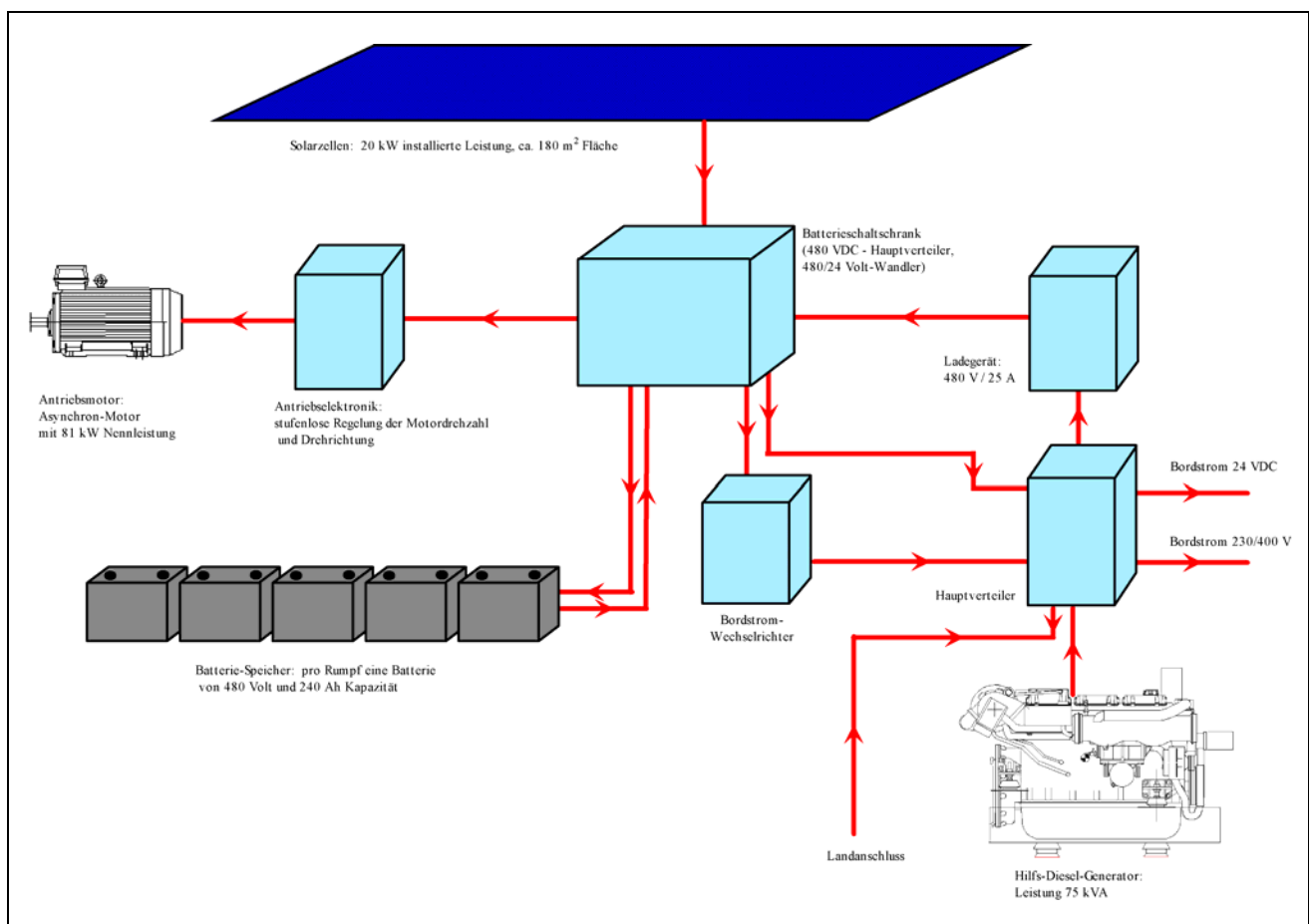


Bild 2: Blockschema der elektrotechnischen Baugruppen

2.2 Solar-, Elektro- und Antriebstechnik

Im folgenden soll auf die Solar-, Elektro- und Antriebstechnik etwas näher eingegangen werden. Bei der Auswahl der Komponenten wurden soweit möglich erprobte, standardmässig verfügbare Geräte vorgezogen, auch wenn dies teilweise Kompromisse bezüglich Wirkungsgrad erforderte. Das Ziel war, ein zuverlässiges Gesamtsystem zu konzipieren, welches möglichst geringe Anforderungen bezüglich Wartung stellt. Im weiteren war auch der Kostenrahmen einzuhalten, was teure Spezialgeräte ausschloss.

Solargenerator

Der Solargenerator des Schiffs ist auf zwei Teilfelder à 10 kWp aufgeteilt, welche je eine Batterie mit 480 V und 240 Ah speisen. Auf dem Hauptteil des Dachs sind Standard-Lamine vom Typ BP 580 montiert, welche auf Aluminium-Profile geschraubt sind. Die Überdachung der seitlichen Gangways dagegen besteht aus kundenspezifisch hergestellten transluziden Laminaten. In diesem Bereich ist somit die Photovoltaik-Anlage auch für den Passagier direkt sichtbar (Bild 3). Der Solargenerator speist die erzeugte Elektrizität ohne Lastanpassung (maximum power point tracking) mit direkter galvanischer Kopplung in das Batteriesystem ein. Aus der Batteriespannung ergibt sich die Anzahl der in Serie zuschaltenden Module. Auf Grund der Auswertung einer früheren PV-Anlage mit DC-Direkteinspeisung ergab sich ein Optimum von 35 Modulen à 36 Zellen pro Strang. Jede Dachhälfte umfasst 4 Stränge, wovon einer über dem Aussenbereich (seitliche Gangway) liegt. Diese Module wurden so ausgelegt, dass sie insgesamt etwa dieselbe Betriebsspannung wie die übrigen Stränge aufweisen.

Für die Regelung der Batterieladung durch die PV-Anlage konnte auf Grund der hohen Leerlaufspannung kein kommerzieller Laderegler eingesetzt werden. Die zunächst zu diesem Zweck eingesetzten MOSFET-Halbleiterrelais erwiesen sich als sehr empfindlich bezüglich Überspannungen. Auf der Basis von IGBT-Schaltelementen wurde deshalb ein Laderegler neu entwickelt. Dieser Regler ist auf eine Arbeitsspannung von 700 V und einen Strom von 25 A ausgelegt.



Bild 3

Seitengang mit Ansicht der transluziden Solarmodule

Batteriesystem

Auf Grund der technischen und wirtschaftlichen Anforderungen kamen nur Bleiakkumulatoren in Frage. Der gewählte Batterietyp besteht aus Industrie-Traktionselementen des Typs Oerlikon TLH 395/3 mit 240 Ah Nennkapazität. Die minimale Batteriespannung wurde durch die Spannungsanforderungen der Antriebswechselrichter vorgegeben. Die Nennspannung beträgt 480 V, sodass pro Rumpf insgesamt 240 Elemente benötigt werden. Jeweils 12 Elemente sind in Batterietrögen aus Kunststoff eingebaut. Diese sind mit berührungssicheren elektrischen Verbindungen versehen. Die Batterien sind mit einer Elektrolytumwälzung ausgerüstet. Diese verbessert Wirkungsgrad und Lebensdauer und reduziert die Gasentwicklung bei der Aufladung. Alle Batterieräume sind zwangsbelüftet. Nach erfolgtem Einbau müssen die Tröge bis Ablauf der Lebensdauer (8 – 12 Jahre) nicht mehr ausgebaut werden. Im Fall eines einzelnen Zellendefekts kann die defekte Zelle vor Ort ausgewechselt werden.

Batterie-Schaltschrank, Verkabelung

Der Batterie-Schaltschrank (Bild 4) ist im Batterieraum angeordnet und enthält die folgenden wesentlichen Elemente:

- Hauptschalter mit magnetischer und thermischer Auslösung sowie einer Unterspannungsauslösung.
- 480 VDC – Verteiler mit verschiedenen Abgängen und zugehörigen Leitungsschutzschaltern
- DC/DC-Umrichter für die 24VDC-Bordstromversorgung
- Messwandler für die wichtigsten Ströme und Spannungen

Gemäss den einschlägigen Vorschriften müssen sämtliche Kabel halogenfrei, flammwidrig und flexibel sein und eine erhöhte Temperaturbeständigkeit aufweisen. Aus diesem Grund wurden Radox-Kabel der Firma Huber+Suhner AG eingesetzt.

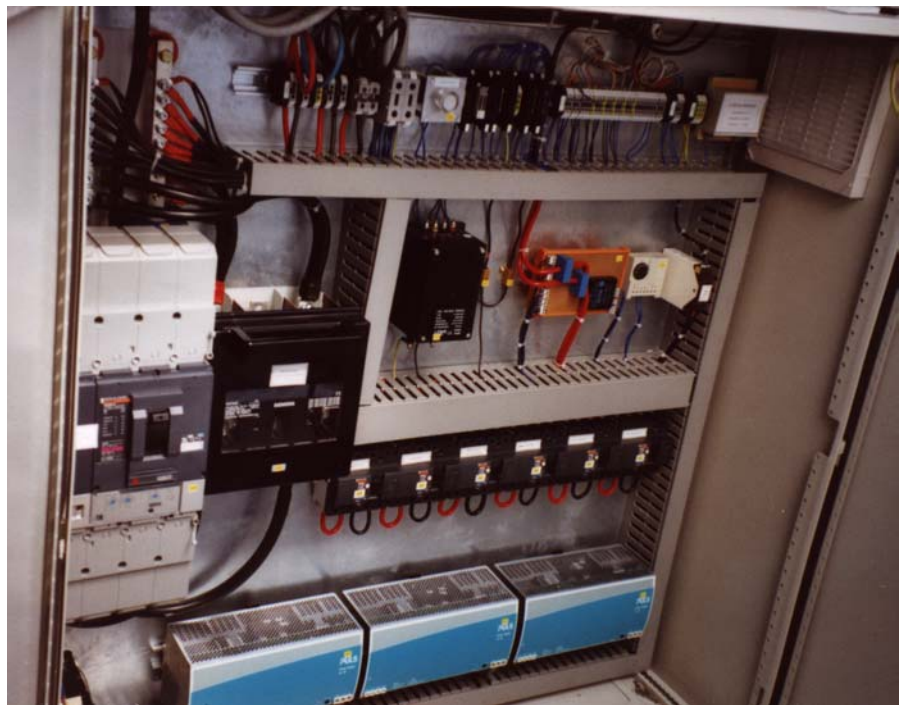


Bild 4

Batterie-Schaltschrank:
links der Hauptschalter, unten
die 480/24V-DC/DC-Wandler

Ladegeräte

Für jede Batterie ist ein Ladegerät vorhanden, welches drei Funktionen erfüllt:

- Voll- oder Nachladung der Batterien ab Landstrom bei entsprechendem Energiebedarf
- Versorgung des Antriebs mit Energie vom Dieselmotor im Notfall
- Periodische Vollladung der Batterien gemäss Vorschrift des Batterieherstellers

Die Ladegeräte liefern einen Nennstrom von 25 A. Ladecharakteristik: IU IA – Kennlinie mit 2,4 V/Z Ladespannung.

Motoren und Antriebswechselrichter

Für die Antriebe werden Komponenten aus der industriellen Antriebstechnik verwendet. Der Motor ist ein Kompakt-Asynchronmotor von Siemens. Die Nennleistung beträgt 81 kW bei 1150 U/min, das Bemessungsdrehmoment liegt bei 678 Nm. Der Motor ist direkt mit der Propellerwelle gekoppelt und ist im Heckbereich des Schiffs angeordnet; die Welle liegt horizontal (Bild 5). Der Motor ist luftgekühlt mit einer temperaturgesteuerten Fremdbelüftung.

Als Antriebswechselrichter wird der Typ Simovert Masterdrive Vector Control von Siemens eingesetzt, Typenleistung 90 kW (Bild 6). Der Wechselrichter ist luftgekühlt und in der Elektrosäule im hintern Teil des Passagierraums angeordnet.

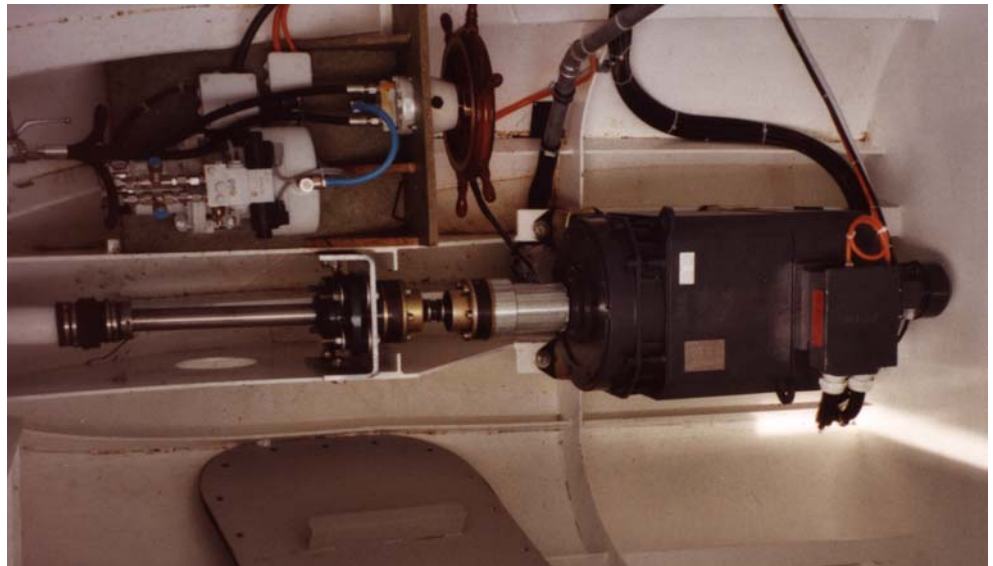


Bild 5

Antriebsmotor und
Propellerwelle, links oben
Ruderhydraulik

Bordstrom-Versorgung und Hilfsenergiesystem

Es sind zwei Bordstrom-Systeme vorhanden: 230/400 VAC und 24 VDC. Für die haustechnischen Installationen (ausser der Beleuchtung) sowie für einzelne Systeme, welche 230/400 VAC benötigen ist ein dreiphasiges 230/400 V Bordstromnetz vorhanden. Dieses weist drei Betriebszustände auf, welche manuell umgeschaltet werden:

- Versorgung ab Batterie über den Bordstrom-Wechselrichter
- Versorgung über den Bord-Dieselmotor
- Versorgung über den Landanschluss

Als Bordstrom-Wechselrichter wird ein Modul DNR35 der Fa. SMA Regeltechnik GmbH verwendet (Bild 7). Der Wechselrichter ist kurzschlussfest und schiefastfähig und speist einen 25 kVA-Drehstrom-Trenntransformator, welcher die Spannungsanpassung und die galvanische Trennung sicherstellt. Die Gleichstromanspeisung erfolgt über Entkopplungsdioden von beiden Batterien parallel. Damit wird automatisch eine gleichmässige Entladung beider Batterien sichergestellt.

Die für den Betrieb des Schiffs notwendigen Systeme, die nautischen Instrumente sowie die Beleuchtung werden durch ein 24 VDC – Bordnetz gespeist. Dieses erhält seine Energie über DC/DC-Wandler von der Hauptbatterie. Pro Batteriebank sind je drei sekundärseitig parallel geschaltete 40 A Wandler installiert. Diese sind kurzschlussfest und strombegrenzend. Die Aufteilung der Wandler auf beide Batterien gewährleistet die nötige Redundanz, sodass keine zusätzliche Notstromversorgung notwendig ist.

Der Bordstrom-Hauptverteiler ist im Abstell-/Kassenraum auf Deck angeordnet. Er beinhaltet den 230/400 VAC – Verteiler mit Sicherungs- und Schaltelementen. Im gleichen Schaltschrank, jedoch durch Trennwände abgeteilt, ist auch der 24 VDC-Verteiler installiert.

Der Dieselmotor weist eine Leistung von ca. 60 kW / 75 kVA bei 3 x 230/400 V und 50 Hz auf. Er wird vom Führerstand aus bedient.



Bild 6
Antriebs-Wechselrichter

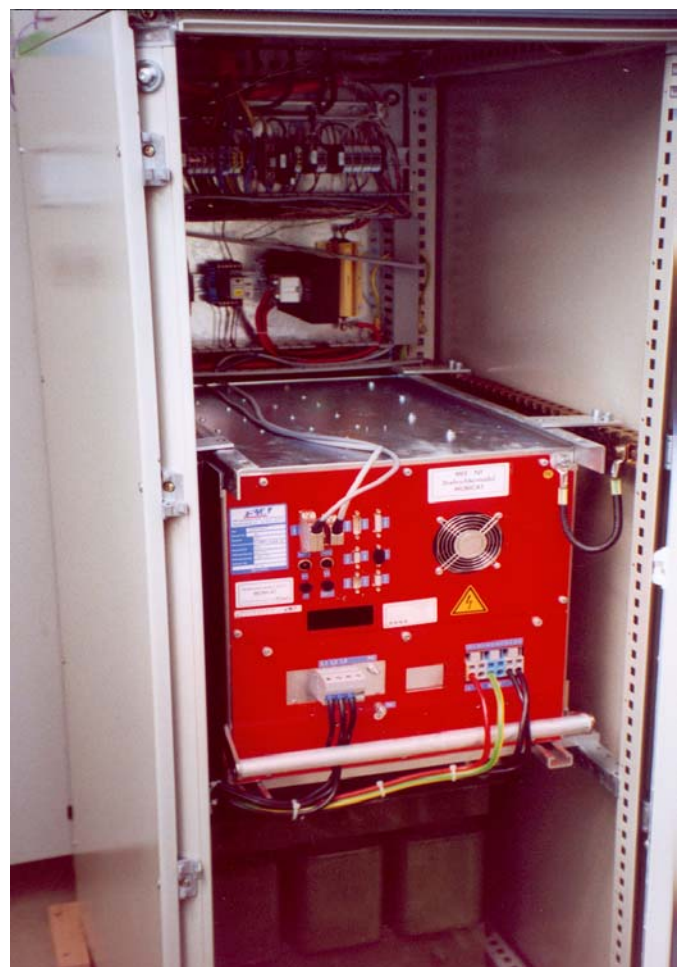


Bild 7
Bordstrom-Wechselrichter

3. Messungen und Resultate

3.1 Messsystem

Das Schiff ist mit einem Datenerfassungssystem versehen, das die wichtigsten Betriebsdaten registriert und speichert. Es besteht aus einem Campbell Datenlogger, welcher mit einem GSM-Modem verbunden ist. Damit können die aktuellen Betriebsdaten via PC und Modem abgefragt und die gespeicherten Daten heruntergeladen werden. Das System hat sich bereits während der Testphase als sehr hilfreich erwiesen.

Der Aufbau des Messsystems ist als Blockschaltbild in Bild 8 dargestellt. Bild 9 zeigt die Zuordnung der gemessenen Parameter zu den Messkanälen, Bild 10 die im Messschrank installierten Geräte.

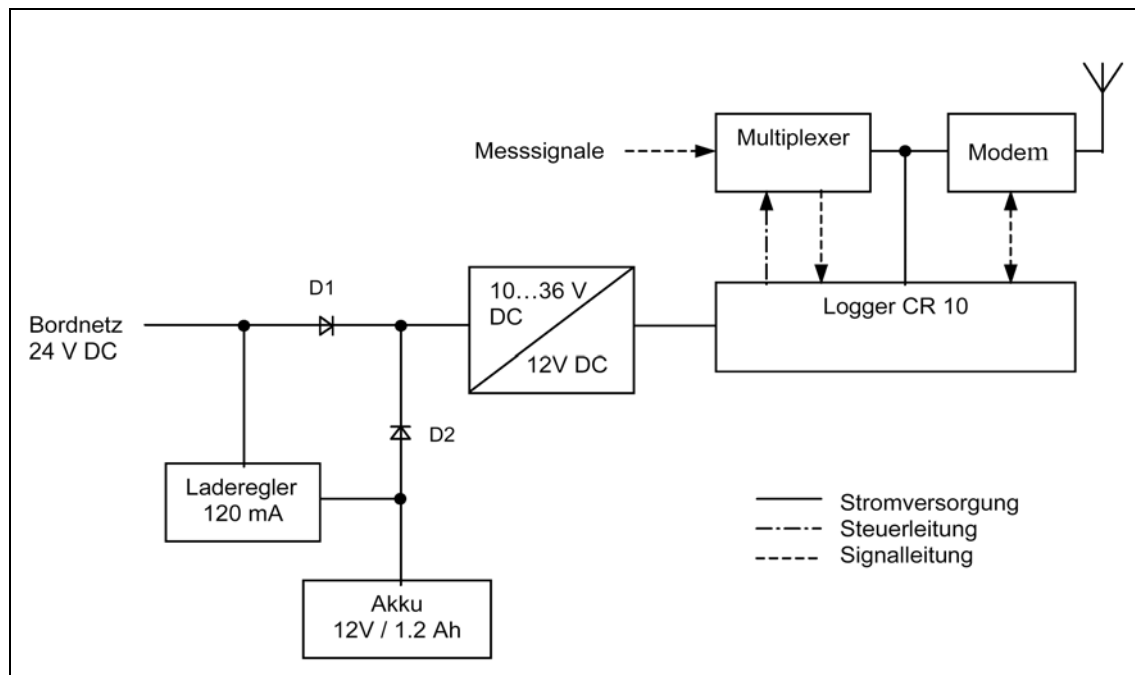


Bild 8: Aufbau des Messsystems

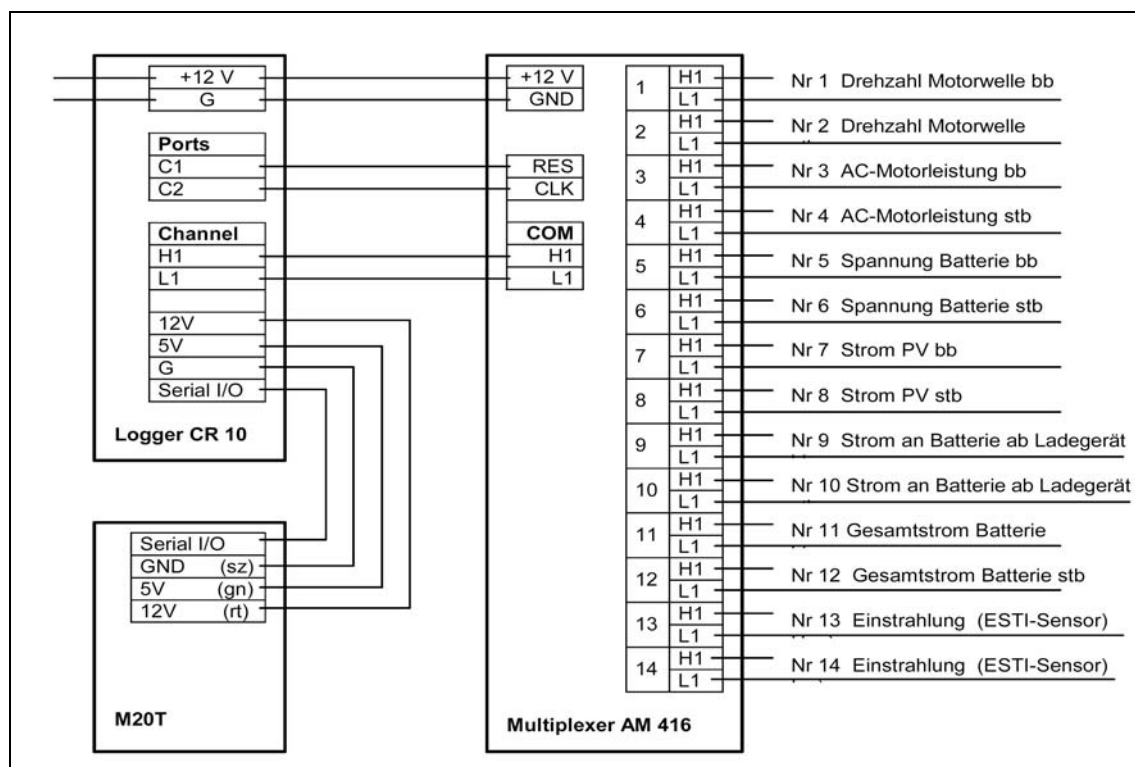


Bild 9: Zuordnung der gemessenen Parameter zu den Messkanälen

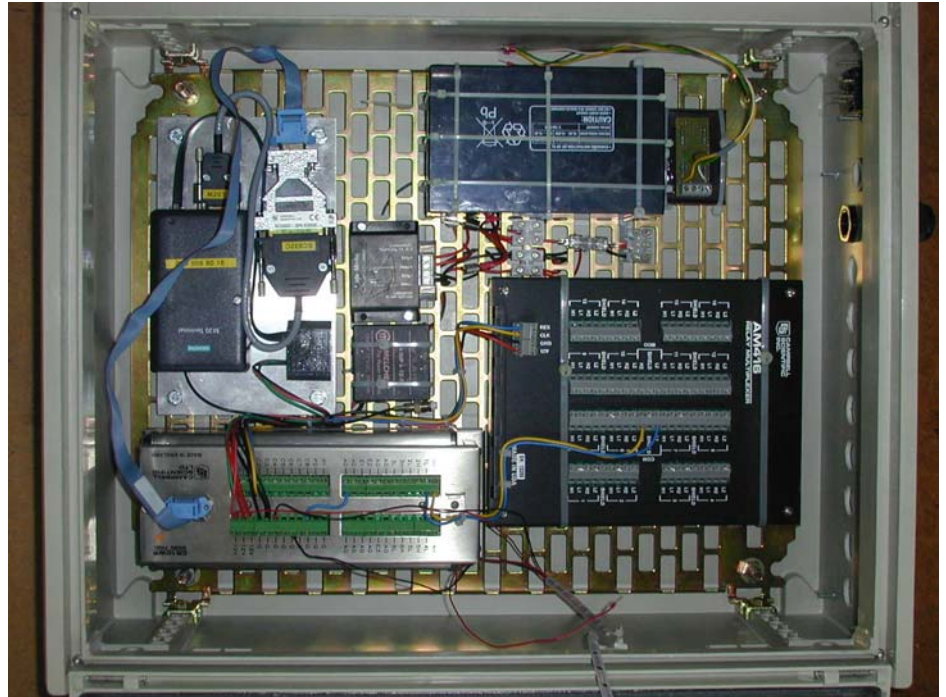


Bild 10

Ausrüstung des Messschrank

(links unten: Datenlogger,
rechts: Multiplexer,
rechts oben Stromversorgung und
Stützbatterie,
links GSM-Modem)

3.2 Leistungscharakteristik des Schiffs

Die wichtigste messtechnische Untersuchung betraf die Ermittlung der Leistungscharakteristik des Schiffs, welche das gesamte energetische Verhalten bestimmt. Zu diesem Zweck wurden die elektrischen Kenngrößen zusammen mit den Propellerdrehzahlen und der aus GPS-Messungen bestimmten Fahrgeschwindigkeit während mehrerer Fahrten unter verschiedenen Wetterbedingungen gemessen. Die Auswertung der Messdaten ergab die in Bild 10 dargestellte Charakteristik, welche Leistungswerte und Geschwindigkeit in Funktion der Propellerdrehzahl zeigt. Bild 11 zeigt die Leistungsaufnahme der Antriebe in Funktion der Schiffsgeschwindigkeit. Die nahezu mit der dritten Potenz der Geschwindigkeit steigende Leistungskurve illustriert die Bedeutung der energieökonomischen Fahrweise bei Wasserfahrzeugen.

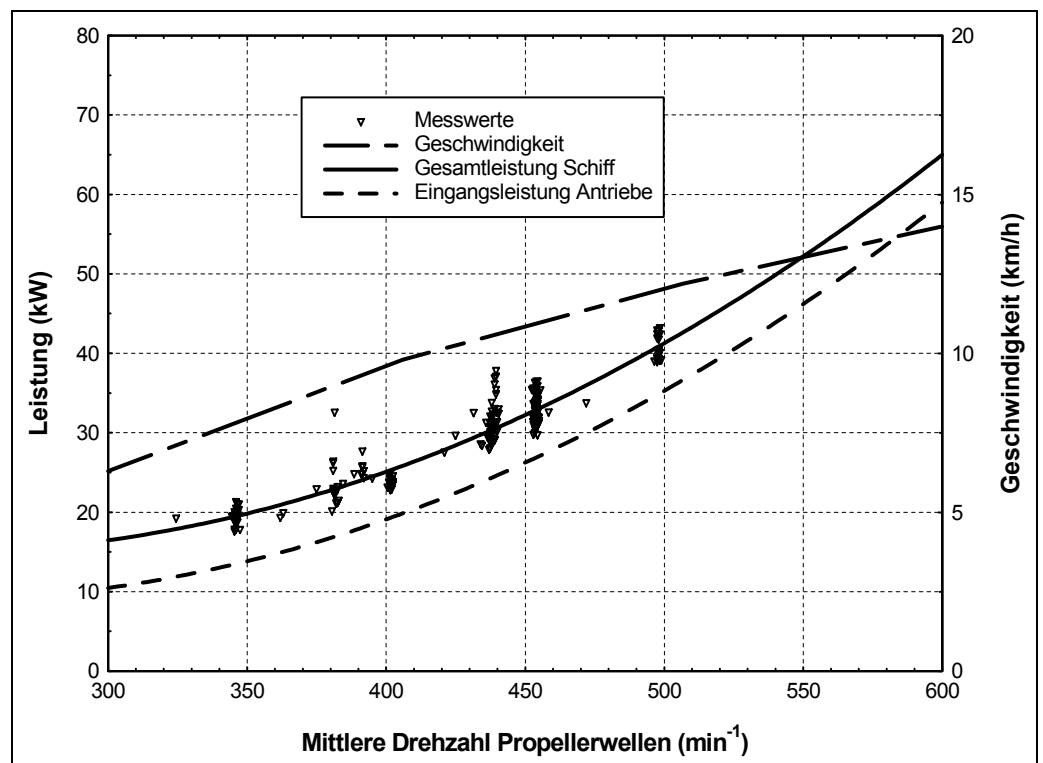
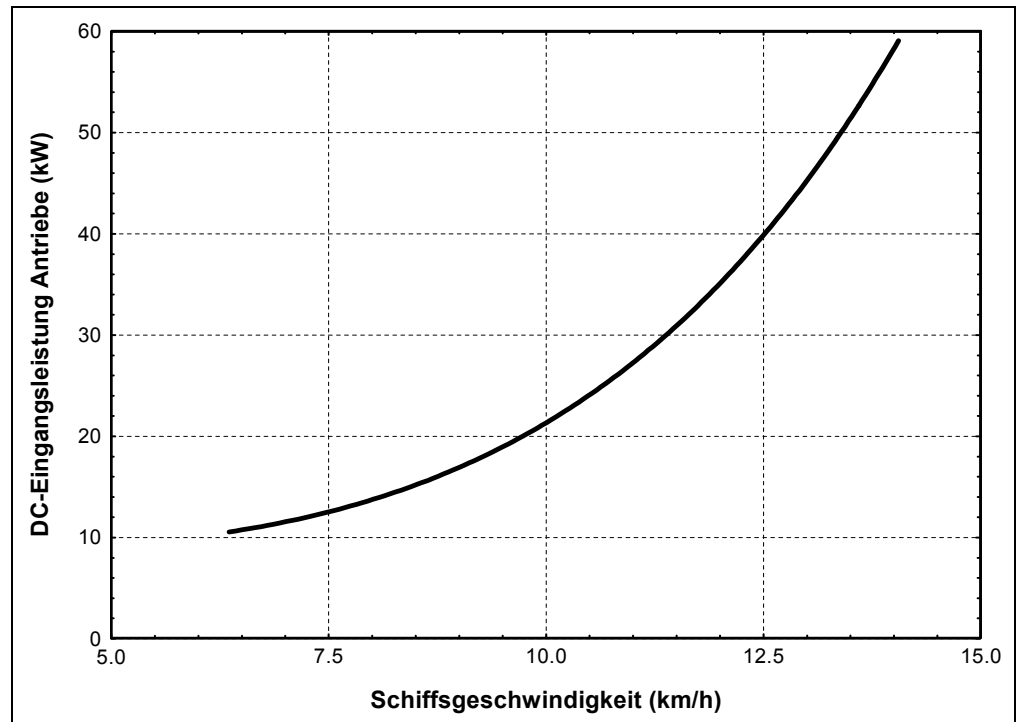


Bild 10

Leistungscharakteristik
des MobiCat

Bild 11

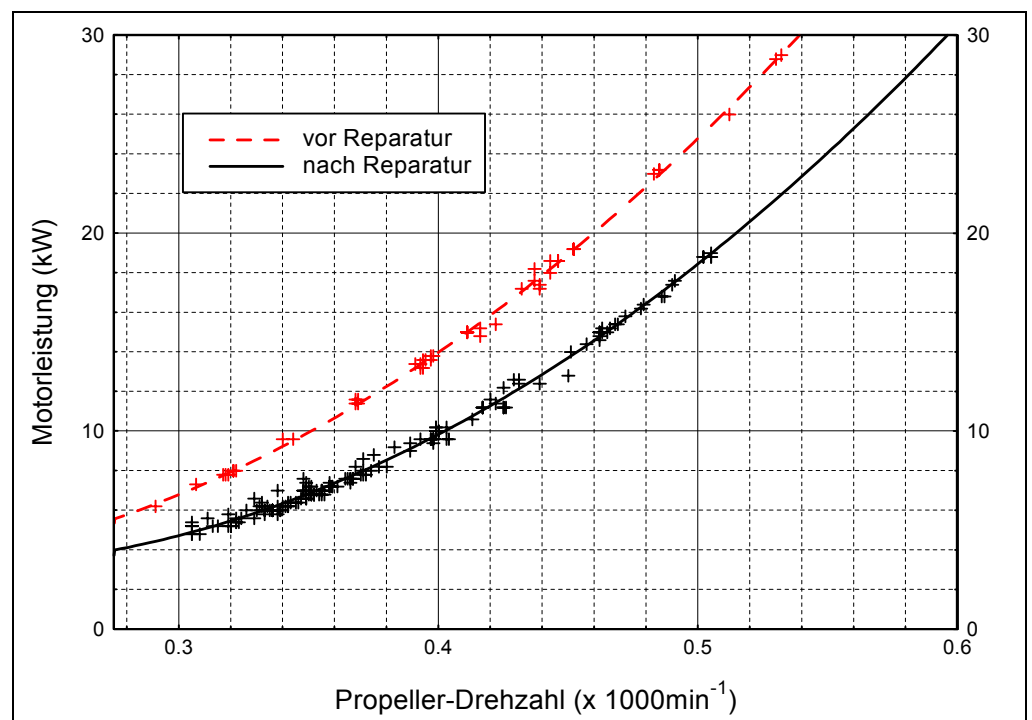
Leistungsbedarf der
Antriebe in Funktion der
Schiffsgeschwindigkeit



Die Leistungsmessung zeigt auch, dass die Energie-Effizienz des Schiffs nur dann optimal ist, wenn sich der Antriebsstrang in gutem Zustand befindet. Insbesondere die Qualität der Propeller haben einen grossen Einfluss auf den Energieverbrauch. Bild 12 zeigt die Leistungscharakteristik (Motorleistung vs. Propellerdrehzahl) nach einem durch einen schwimmenden Gegenstand verursachten leichten Propellerschaden im Vergleich zur Messung nach erfolgter Reparatur.

Bild 12

Leistungscharakteristik
vor und nach
Propeller-Reparatur



3.3 Leistungscharakteristik des Solargenerators

Eine weitere wichtige Messung betraf die Leistungscharakteristik des Solargenerators. Zu diesem Zweck wurde eine geeichte Messzelle (ESTI-Sensor) installiert und mit dem Datenerfassungssystem verbunden.

Die in Bild 13 dargestellte gemessene Leistungskurve zeigt, dass die Anlage bei 1000 W/m² Einstrahlung eine Leistung von etwa 18,3 kW abgibt, entsprechend 91 % der STC-Leistung der installierten Module von 20 kWp. Unter Berücksichtigung der gegenüber STC-Bedingungen erhöhten Temperaturen sowie einer nicht ganz optimalen Lastanpassung sind die gemessenen Leistungen als sehr gut zu betrachten.

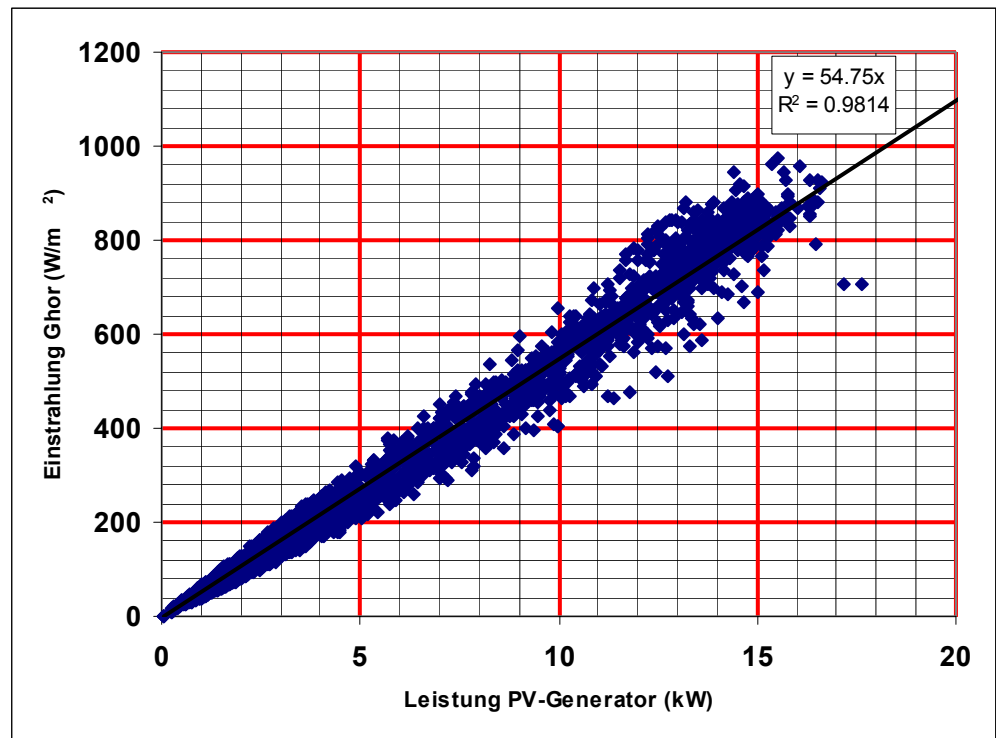


Bild 13

Leistungscharakteristik
des Solargenerators

3.4 Energieproduktion und Energieverbrauch

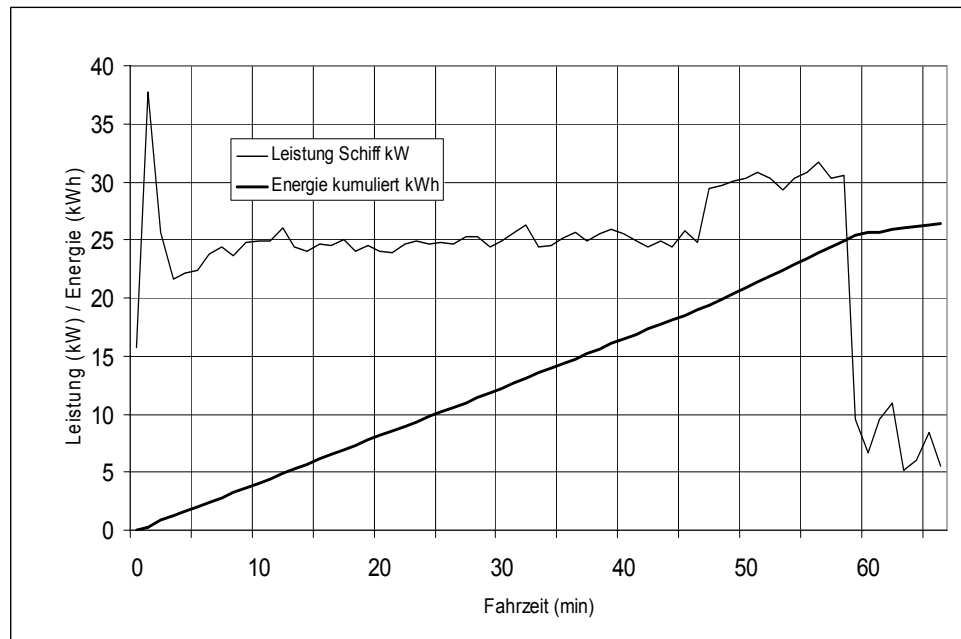
Bei der Planung des MobiCat wurde der mutmassliche Energiebedarf auf Grund technischer Eigenschaften des Schiffs sowie eines angenommenen Einsatzplans abgeschätzt. Da das Schiff weltweit das erste seiner Art ist, konnte kaum auf Erfahrungswerte zurückgegriffen werden. Das Ziel war, dass im längerfristigen Einsatz das Schiff den Grossteil seiner Energie von den auf dem Dach montierten Solarzellen bezieht und dass die Nachladung ab Netz oder der Betrieb ab Hilfsdiesel nur in Ausnahmefällen notwendig ist.

Im Sommerhalbjahr stand das Schiff wegen der EXPO 02 in intensivem Einsatz mit teilweise mehreren Fahrten pro Tag. In den kommenden Jahren muss damit gerechnet werden, dass die Häufigkeit der Einsätze sich auf einem niedrigeren Niveau einpendeln wird.

Bild 14 zeigt Leistungsbedarf und Energieverbrauch auf einer Messfahrt. Bei dieser Fahrt - im Rahmen der „BKW solar trophy“ mit 110 Passagieren an Bord - wurde ein spezifischer Energieverbrauch des Antriebssystems ab Batterie von 22,8 Wattstunden pro Personen-km ermittelt. Umgerechnet auf den Energieinhalt von Dieselöl entspricht dies etwa einem Schnapsglas Diesel pro Person für die Fahrt von 10 km!

Bild 14

Leistungs- und Energiemessung auf einer 10km-Testfahrt



Die zusammengefasste Energiebilanz des Schiffs für den Sommer 2002 ist in folgender Tabelle dargestellt. Die Energiebilanz in grafischer Darstellung zeigt Bild 15.

Energiebilanz	Absolut kWh	relativ %
1. Energieangebot		
1.1 Theoretisch nutzbare Sonnenenergie	12000	
1.2 Effektiv genutzte Sonnenenergie	6240	62
1.3 Energielieferung durch Ladegeräte	3770	38
1.4 Gelieferte Energie total (1.2 + 1.3)	10010	100
2. Energieverwendung (ohne Gas)		
2.1 Antriebe	4217	54
2.2 Übriger Verbrauch Navigation (*)	900	12
2.3 Übriger Verbrauch Haustechnik, Gastronomie (*)	2628	34
2.3 Verbrauch total	7745	100
3. Verluste		
3.1 Nicht genutzte Sonnenenergie (1.1 - 1.2)	5760	72
3.2 Verluste im Batteriesystem	2265	28
3.3 Verluste total	8025	100

(*): Aufteilung geschätzt

Tabelle 2: Energiebilanz MobiCat April-August 2002

Die Bilanz zeigt, dass das Schiff auch beim intensiven Einsatz im Expo-Sommer 2002 seinen elektrischen Energiebedarf überwiegend - zu 62 % - aus der Sonne bezog. Der Energiebedarf für den reinen Schiffsbetrieb (Antriebe und Verbrauch Navigation) wird durch die Sonnenenergie sogar vollständig abgedeckt, womit ein Hauptziel des Projekts erreicht wurde. Im Weiteren zeigt sich, dass das theoretische Sonnenenergie-Angebot grösser war als der gesamte Energiebedarf. Die Gründe weshalb trotzdem Energie aus der Steckdose bezogen werden musste, liegen vor allem beim unregelmässigen Einsatz und der beschränkten Speicherkapazität der Batterien. Es gab einerseits Perioden mit hohem Verbrauch aber wenig Sonne, aber auch Perioden mit viel Sonne und wenig Verbrauch. Bei vollgeladenen Batterien und geringem Bedarf kann die verfügbare Sonnenenergie nicht genutzt werden.

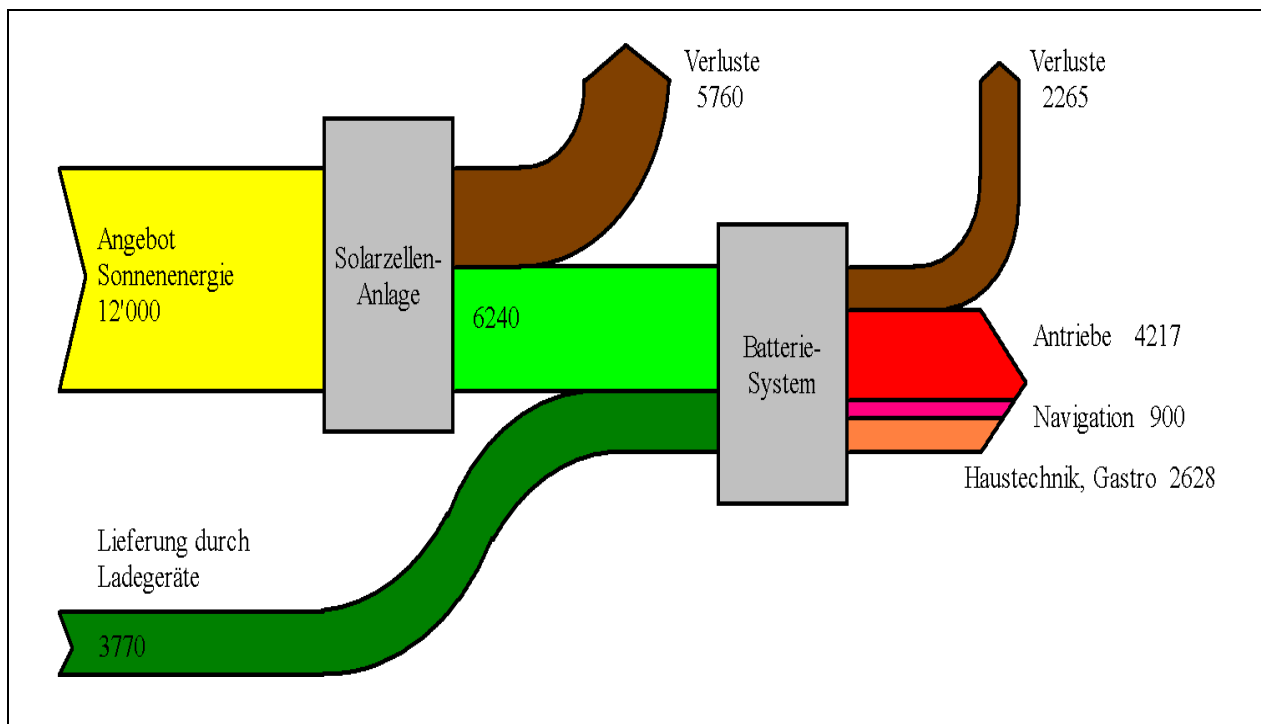


Bild 15: Energiebilanz MobiCat April-August 2002 (nur elektrische Energie)

Diese Situation wird durch Bild 16 illustriert, welches den Vergleich zweier Tageskurven ohne und mit Schiffsbetrieb zeigt. Beide Tage weisen eine hohe Sonneneinstrahlung auf. Am ersten Tag wird am Morgen nur kurz die Batterie nachgeladen, anschliessend beschränkt sich die Leistung des Solargenerators auf die Versorgung der internen Verbraucher. Am zweiten Tag ist das Schiff im Einsatz (3 Fahrten), sodass die verfügbare Sonnenenergie vollumfänglich genutzt wird.

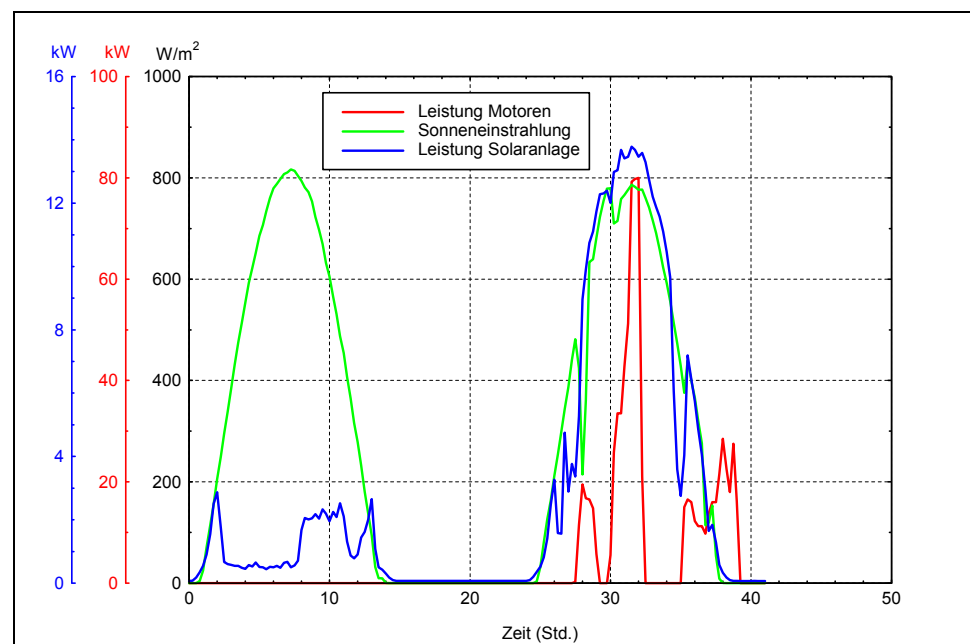


Bild 16

Vergleich zweier Tageskurven ohne und mit Schiffsbetrieb

Es wäre ökonomisch sicher wenig sinnvoll gewesen, den Batteriespeicher auf die intensive EXPO 02 - Saison zu dimensionieren. Ob die gewählte Speicherkapazität optimal ist, kann heute nicht abschliessend beurteilt werden. Es kann aber angenommen werden, dass die Auslegung für den längerfristigen Betrieb nicht weit weg vom wirtschaftlichen Optimum liegt.

Grundsätzlich würde die Möglichkeit bestehen, die während der Stillstandszeiten anfallende, nicht nutzbare Sonnenenergie über den Landanschluss in das Stromnetz zurückzuspeisen und damit die Energiebilanz des Schiffs zu verbessern. Eine Kosten-Nutzen-Rechnung hat jedoch gezeigt, dass die Investitionen pro gewinnbare Kilowattstunde grösser sind als bei einer separaten netzgekoppelten Photovoltaik-Anlage. Zudem ergäbe sich eine zusätzliche Komplizierung des Betriebs. Wenn längerfristige Betriebserfahrungen vorliegen, sollte diese Möglichkeit jedoch nochmals geprüft werden.

Die Auswertung der Messdaten ergab neben den Energiebilanzwerten viele weitere Ergebnisse, welche auch für zukünftige ähnliche Projekte wertvoll sind. Die Analyse der Messdaten zeigt u.a., dass der Speicherwirkungsgrad des Batteriesystems mit ca. 77 % gut den Planungsannahmen entspricht; er liegt sogar leicht über den Erwartungen. Die Verwendung von Batterien mit Elektrolytumwälzung trägt sicher zu diesem guten Wert bei.

Zusammengefasst kann gesagt werden, dass die Energiebilanz des MobiCat den Erwartungen für die Saison 2002 entspricht. Dieses erfreuliche Resultat ist nicht zuletzt auch der umsichtigen und vorausschauende Betriebsweise durch die Kapitäne der Bielersee-Schiffahrtsgesellschaft zu verdanken.

3.5 *Betriebserfahrungen*

Die Betriebserfahrungen zeigen, dass die wichtigsten Planungsvorgaben erfüllt werden. Das Schiff ist für Sonderfahrten konzipiert und verkehrt deshalb meist mit geringen Geschwindigkeiten. Bei Rundfahrten hat sich gezeigt dass eine Propellerdrehzahl von 400 – 450 U/min - entsprechend einer Geschwindigkeit von rund 10 – 11 km/h - meist genügt. In diesem Bereich ist der Energiebedarf der Antriebe so gering, dass sich eine genügend hohe Autonomie auch für mehrstündige Fahrten bei schlechtem Wetter oder abends ergibt.

Etwas höher als ursprünglich angenommen ist die nicht für den reinen Schiffsbetrieb verwendete elektrische Energie. Obwohl für die thermischen Anwendungen (Küche und Heizung) Flüssiggas verwendet wird, ist der Stromverbrauch relativ gross. Die Hauptgründe dürften häufige Abendfahrten mit Beleuchtung und Küchenbetrieb sein, sowie der Stand-by Verbrauch verschiedener Einrichtungen (Kühlgeräte, Bordelektronik).

Ein sehr positive Erfahrung ist die grosse Attraktivität des Schiffs beim Publikum und bei den Medien. Das nahezu geräuschlose Gleiten fasziniert die Passagiere und vermittelt ein völlig neues Schifffahrtserlebnis. Die Passagiere schätzen insbesondere den Fahrkomfort, das nahezu lautlose Gleiten, die grosszügigen Decksflächen und die helle, freundliche Atmosphäre des für Konferenzen, Präsentationen und Essen vielseitig verwendbaren Solarschiffes. Deshalb liegt der MobiCat auch hinsichtlich Anzahl Extrafahrten an der Spitze der internen Flottenrangliste der BSG. Da bei der Planung und dem Bau des Schiffes trotz einiger Einschränkungen grosser Wert auf eine adäquate Infrastruktur in der Gastronomie und im Gästebereich gelegt wurde, nimmt der MobiCat auch in der Publikumsgunst einen Spitzenplatz ein.

Die Passagierstatistik des MobiCat seit der Einweihung ist in Tabelle 3 angegeben.

Jahr	Anzahl beförderter Passagiere	Fahrdistanz total
2001	4000	1500
2002	6500	3000
2003	3100	1300

Tabelle 3: Passagierstatistik (gerundete Zahlen)

Auch aus der Sicht des Betriebspersonals sind die Reaktionen positiv. Das Energie-Management des MobiCat stellt für den Schiffsführer eine nicht ganz einfache Aufgabe dar, besonders weil zur Zeit noch nicht viel Erfahrung vorliegt. Bereits vor der geplanten Fahrt ist zu entscheiden, ob eine Batterieladung ab Landstrom erforderlich ist. Der Entscheid hängt vom Batterie-Ladezustand, dem mutmasslichen Verbrauch während des Einsatzes sowie der erwarteten Sonneneinstrahlung vor und während des Einsatzes ab.

4. Projektablauf und –organisation, Kosten

4.1 Projektablauf und –organisation

Wegen des knappen Zeitraums, der für die Realisierung zur Verfügung stand, mussten die Detailplanungsarbeiten weitgehend parallel zur Ausführung abgewickelt werden. Damit konnte das Projekt auch nicht an eine Werft als Generalunternehmung übergeben werden. Die Arbeiten mussten an verschiedene Lieferanten vergeben werden, was einen hohen Koordinationsaufwand bewirkte. Die Endmontage erfolgte auf der Slipanlage der Betreibergesellschaft, welche mit einem Zelt überdeckt wurde. Die meisten Lieferanten und Unternehmer waren Firmen aus der weiteren Region.

Während des Jahrs 1999 und der ersten Hälfte 2000 konzentrierten sich die Arbeiten auf die Sicherung der Finanzierung sowie gewisse zeitkritische technische Planungsarbeiten. Am 12. Juli 2000 konnte das Projekt und die Trägerschaft an einer Medienkonferenz der Öffentlichkeit vorgestellt werden. Im August 2000 konnten die ersten Verträge mit den Lieferanten abgeschlossen werden. Mitte Juni 2001 wurde das Schiff eingewassert und am 5. Juli 2001 offiziell eingeweiht und in Betrieb genommen.

Die Projektträgerschaft setzt sich aus den folgenden Partnern zusammen:

Sponsoren/Investoren:

- Schweizerische Mobiliar Versicherungsgesellschaft, Bern
- BKW FMB Energie AG, Bern
- Certina Kurth Frères SA, Le Locle
- Gesellschaft Mont-Soleil, Bern
- Bielersee-Schiffahrtsgesellschaft AG, Biel
- Bundesamt für Energie

Bauherrschaft, Betreiberin:

- Bielersee-Schiffahrtsgesellschaft AG, Biel

Ingenieure und Planer:

- Rudolf Minder (Projektleitung, Solar- und Elektro- und Antriebstechnik)
Minder Energy Consulting, CH-8917 Oberlunkhofen
- Christian Bolinger (Design, Schiffsbau-Engineering, Bauleitung)
Naval Architecture Yacht Design, CH-6003 Luzern
- Clemens Dransfeld (Design und Strukturberechnungen)
dyne design engineering gmbh, CH-5702 Niederlenz
- Gschwend AG Gastrobau (Innenausbau), CH-3613 Steffisburg

Das an Bord befindliche Messsystem sowie die zugehörigen Planungs- und Auswertarbeiten wurden von der Gesellschaft Mont-Soleil finanziert.

4.2 Kosten

Die gesamten Baukosten des Projekts belaufen sich auf knapp 3 Mio. CHF (exkl. MWSt.). Verglichen mit einem konventionell angetriebenen Schiff (Dieselmotoren) liegen die Mehrkosten für den solarelektrischen Antrieb schätzungsweise bei 10 - 15 %. Von den Investitionen her ist also ein Solarschiff nicht sehr viel teurer als ein Dieselschiff. Die Mehrkosten sollten sich durch Einsparungen bei den Betriebskosten und die besonderen Marktmöglichkeiten rasch amortisieren lassen.

Die Kostenstruktur des Projekts ist in Bild 17 dargestellt.

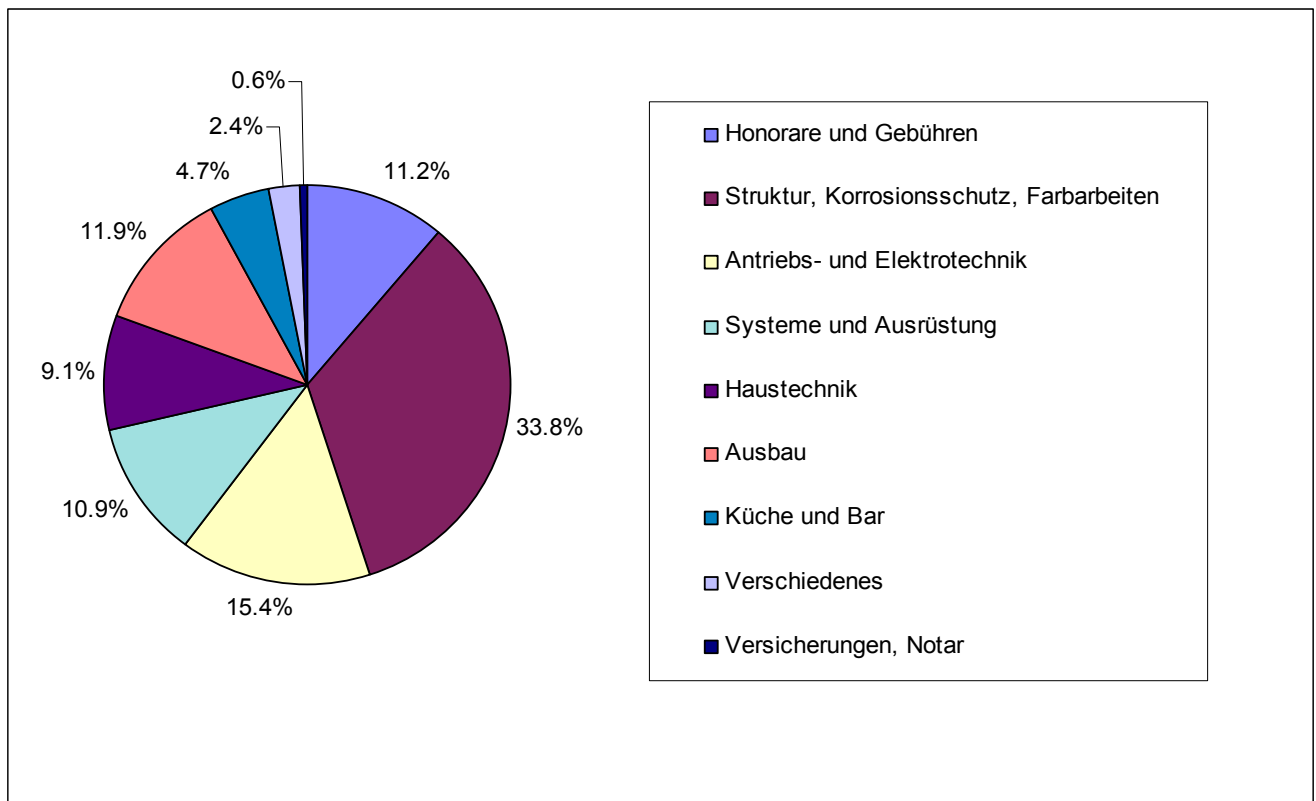


Bild 17: Kostenstruktur des MobiCat

5. Schlussfolgerungen / Perspektiven

Die Auswertung der Messungen der Betriebsparameter des MobiCat sowie auch die mit dem Schiff gewonnenen praktischen Erfahrungen haben gezeigt, dass die für die kommerzielle Nutzung des Schiffs relevanten Ziele erreicht wurden.

Im Rückblick auf die Projektgeschichte mussten verschiedene, teilweise recht einschneidende Änderungen des Konzepts vorgenommen werden, einerseits aus Kostengründen und andererseits wegen der Bedürfnisse der Betreibergesellschaft. Im Vorprojekt war ein Schiff in Komposit-Leichtbauweise vorgesehen, mit Dimensionen von 30m Länge und 10m Breite und einer Verdrängung von ca. 50 Tonnen. Aus Kostengründen musste dann eine Stahlbau-Lösung gewählt werden, wobei die Dimensionen auf 33m x 11m leicht vergrössert wurden. Diese Änderungen sowie die Erfordernis einer vollwertigen Ausrüstung im Gastronomie- und Haustechnik-Bereich ergab dann ein mehr als doppelt so grosses Leergewicht als ursprünglich vorgesehen.

Eine Konsequenz dieser Entwicklung war, dass bei den Fahrleistungen gegenüber der Anfangsvariante gewisse Abstriche gemacht werden mussten. Da das Schiff jedoch nur für den Charter-Einsatz verwendet wird und keine Fahrpläne einhalten muss, genügen sowohl Geschwindigkeit als auch Autonomie. Es hat sich auch gezeigt, dass die übrigen Eigenschaften des Schiffs - das nahezu lautlose Gleiten, das grosszügige Platzangebot auf Deck und die helle, freundliche Atmosphäre im Innenraum für das Wohlbefinden der Fahrgäste viel bedeutsamer sind als die Fahrgeschwindigkeit.

Auch im Bereich der Energietechnik mussten gewisse Kompromisse eingegangen werden. Um eine grösstmögliche Betriebssicherheit und Wartungsfreundlichkeit zu erreichen, wurden für nahezu alle Systemkomponenten Standardprodukte eingesetzt. Mit speziellen Lösungen hätten in verschiedenen Teilsystemen sicher eine bessere Energienutzung erreicht werden können. Im Hinblick auf den Einsatz des Schiffs sind jedoch die getroffenen Lösungen zweifellos zweckmässig.

Seit der Inbetriebnahme des MobiCat wurden die Planer und auch die Betreibergesellschaft von vielen Interessenten aus allen Teilen der Welt kontaktiert. Neben Anfragen aus europäischen Ländern meldeten sich Interessenten aus dem mittleren Osten, Asien und dem karibischen Raum. Bisher konnte erst ein potentiell Projekt in der Karibik etwas konkretisiert werden; ob es zu einer Realisierung führt, ist jedoch noch offen.

Unternehmen der europäischen Binnenschifffahrt sind zwar grundsätzlich an neuen Marktmöglichkeiten, die ein Solarschiff anbietet interessiert. Das generelle Problem der Branche ist jedoch die vielerorts mangelnde Finanzkraft. Neuinvestitionen werden nur selten getätigt, zumal die Lebensdauer von Fahrgastschiffen sehr gross ist.

Bezüglich technischer Perspektiven wäre eine Kombination eines solarelektrischen Antriebssystems mit Brennstoffzellen von grossem Interesse. Wenn auch eine solche Lösung nicht mehr rein auf der Basis erneuerbarer Energie arbeitet, könnten doch die ökologischen Vorteile des Solarschiffs wie Lärmfreiheit und minimale Schadstoff-Emissionen weitgehend beibehalten werden. Vor allem für Anwendungen mit langen Fahrdistanzen würde eine solche Lösung grosse Vorteile bringen.

Referenzen

Publikationen, Literaturverzeichnis

- [1] SolarCat - Solar-elektrisch angetriebenes Passagierschiff
Arbeitsgemeinschaft MobiCat c/o Minder Energy Consulting
Bericht über das Vorprojekt, Bundesamt für Energie, Schlussbericht Projekt-Nr. 32084
- [2] MobiCat - Solar-elektrisch angetriebenes Passagierschiff
R. Minder, Ch. Bolinger, C. Dransfeld
Nationale Photovoltaiktagung, Neuchâtel, 7.-8. November 2000
- [3] MobiCat - Solar-Passagierschiff im Härtetest während der Expo.02
Dr. Rudolf Minder
Fachtagung Erneuerbare Energien – Realität und Visionen
EMPA AKADEMIE / SSES, CH-8600 Dübendorf, 15. November 2002
- [4] Construction of the world largest solar powered catamaran
C. Bolinger et al.
HIPER'01 - 2. Int. Conf. on High-Performance Marine Vehicles, Hamburg, May 2001

Mit dem Projekt verbundene Websites

http://www.minder-energy.ch	(Projektleitung, Antriebs-, Solar- und Elektrotechnik)
http://www.yachtdesign.ch	(Naval architecture, Schiffskonstruktion, Bauleitung)
http://www.dyne.ch	(Design, Strukturberechnungen)
http://www.bielensee.ch	(Betreibergesellschaft BSG)
http://www.bkw-fmb.ch	(BKW FMB Energie AG, Bern)
http://www.mobiliar.ch	(Schweizerische Mobiliar Versicherungsgesellschaft, Bern)
http://www.certina.com	(Certina Kurth Frères SA, Le Locle)