

# Elektrochemische Energiespeicher in autonomen Photovoltaikanlagen und Hybridsystemen

von Bernd Willer und Michael Wollny, Jürgen Garche und Johannes Mittermeier, Heinz Barthels, Wennemar Brocke und Jürgen Mergel, Georg Bopp und Dirk Uwe Sauer, Manfred Bächler und Peter Sprau

Dr.-Ing. Bernd Willer ist Leiter und Dipl.-Ing. Michael Wollny ist Mitarbeiter der Abteilung Energiespeichertechnik im Institut für Solare Energieversorgungstechnik (ISET), Kassel.

Prof. Dr. Jürgen Garche ist Leiter und Dipl.-Chem. Johannes Mittermeier ist Mitarbeiter des Geschäftsbereichs Energiespeicherung und Energiewandlung im Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW), Ulm.

Prof. Dr. Heinz Barthels ist Leiter und Dipl.-Ing. Jürgen Mergel ist wissenschaftlicher Mitarbeiter der Projektgruppe PHOEBUS und Dr.-Ing. Wennemar Brocke ist wissenschaftlicher Mitarbeiter des Zentrallabors für Elektronik im Forschungszentrum Jülich, Jülich.

Dipl.-Ing. Georg Bopp ist Leiter und Dipl.-Phy. Dirk Uwe Sauer ist Mitarbeiter der Gruppe Inselanlagen der Abteilung Photovoltaische Systeme und Meßtechnik im Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (Fraunhofer ISE), Freiburg.

Dipl.-Ing. Manfred Bächler und Dipl.-Ing. Dipl.-Wi.-Ing. Peter Sprau sind wissenschaftliche Mitarbeiter und Projektleiter der WIP, München.

## Überblick

Autonome Photovoltaikanlagen und Hybridsysteme benötigen zum Ausgleich von Energieangebot und Nachfrage als unverzichtbare Anlagenkomponente einen Energiespeicher. Hierfür kommen vorwiegend Batterien, insbesondere Bleibatterien, zum Einsatz. Als Langzeitspeicher bietet sich ein Wasserstoff/Sauerstoff-Speicher in Kombination mit einem Elektrolyseur und einer Brennstoffzelle an. Unterschiedliche Anlagenkonzepte autonomer Photovoltaikanlagen und Hybridsysteme werden dargestellt und Betriebserfahrungen mit unterschiedlichen elektrochemischen Energiespeichern in existierenden Anlagen erörtert und diskutiert. Mögliche Maßnahmen zur Verbesserung des Speicherverhaltens werden angesprochen.

For the compensation of energy supply and load variation an indispensable component of autonomous PV-plants and hybrid systems is an energy storage. Mainly lead-acid batteries are used for this task. A hydrogen/oxygen storage in combination with an electrolyzer and a fuel cell is suitable as a long-term storage. Different plant concepts of autonomous PV-plants and hybrid systems are presented and the operating experience gained from several electrochemical energy storages in existing plants will be discussed. Some steps for improving the storage reaction will be mentioned.

## 1. Einleitung

Der Einsatz der Photovoltaik ist unter den heute gegebenen wirtschaftlichen Randbedingungen am aussichtsreichsten in dezentralen, autonomen Anwendungsbereichen. Als eine unverzichtbare Anlagenkomponente werden in solchen Inseln Systemen Energiespeicher benötigt. Hierfür kommen als Tages- und Wochenspeicher Batterien, vorzugsweise Bleibatterien, zum Einsatz. Die Kosten von Bleibatterien sind gegenüber anderen elektrochemischen Speichern relativ gering, ihr Wirkungsgrad ist hoch und sie sind weltweit erhältlich.

Als Langzeitenergiespeicher sind Wasserstoff-/Sauerstoffspeicher in Kombination mit einem Elektrolyseur und einer Brennstoffzelle in der Erprobung. Neben dem Einsatz eines Energiespeichers erweist sich, wie in [Abbildung 1](#) dargestellt, die Einbindung eines Zu-

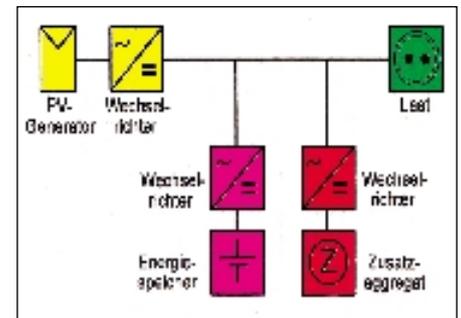


Abbildung 1: Blockschaltbild eines wechselstromgekoppelten Inselnetzes mit PV-Generator, Energiespeicher und Zusatzaggregat. Modulare Technologie beruht auf der Kopplung nach dem etablierten Wechselstromstandard.

satzaggregates häufig als sinnvoll oder notwendig. Im Leistungsbereich größer 10 kW stehen hierfür Dieselaggregate zur Verfügung. Im kleineren Leistungsbereich sind technische und wirtschaftliche Lösungen noch in der Entwicklung.

Im Rahmen eines von ZSW, ISE, WIP und ISET gemeinsam durchgeführten und vom BMBF geförderten Vorhabens werden für existierende, autonome Photovoltaikanlagen und Hybridsysteme mit Batteriespeicher die Randbedingungen, denen Batterien ausgesetzt sind nach einheitlichen Kriterien untersucht und analysiert [1] [2]. Ziel ist es Maßnahmen zu Verbesserung der Lebensdauer und Zuverlässigkeit von Batterien in PV-Anlagen aufzuzeigen [3] [4]. Den Einsatz eines Langzeitenergiespeichersystems bestehend aus einem Elektrolyseur, einer Gasspeicherung für Wasserstoff und Sauerstoff sowie einer Brennstoffzelle erprobt die KFA in der autarken Energieversorgung ihrer Zentralbibliothek. Eine Auswahl der betriebenen Anlagen und ihre erste Betriebserfahrungen werden im Folgenden dargestellt.

## 2. Charakterisierung der Anlagen mit Batteriespeicher

Eine Übersicht über die untersuchten Photovoltaikanlagen und Hybridsysteme mit Batteriespeicher zeigt [Tabelle 1](#). Die Anlagen besitzen PV-Generatoren mit Leistungen zwischen 0,1 – 42 kW<sub>p</sub> und Batterien mit einem Energieinhalt von unter 1 bis 500 kWh ([Abbildung 2](#)). Vereinzelt sind sie mit Windgeneratoren (1–75 kW) ausgestattet und häu-

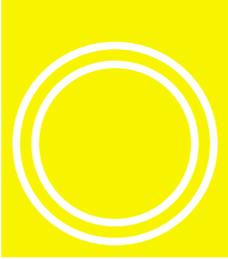


Tabelle 1: Untersuchte Photovoltaikanlagen und Hybridsysteme mit ihren elektrischen Komponenten. Das große Spektrum des Energieinhaltes der eingesetzten Batterie von unter 1 KWh bis über 500 KWh zeigt die unterschiedlichen Anwendungsmöglichkeiten der Photovoltaik. Es kommen in den untersuchten realen Anlagen ausschließlich Bleibatterien zum Einsatz. Neben Gitterplattentechnologie werden Panzerplattenelektroden eingesetzt.

PV-Anlage	PV	Wind	Batterie	Backup
Energieautarkes Solarhaus	•		•	
Solare Straßen- und Wegeleuchte	•		•	
Brunnenbach	•		•	•
Haus Langer	•		•	•
Rotwandhaus	•	•	•	•
Rappenecker Hof	•	•	•	•
Jurf El-Daraweesh	•	•	•	•
Evs Laichingen	•		•	•
Biohof Stein	•		•	•
Flanitzhütte	•		•	•
Unterkrummenhof	•		•	•
Cape Clear		•	•	•
Terschelling	•	•	•	•

Tabelle 2: Klassifizierung der Batterien nach Betriebsbedingungen. Mit zunehmender Klasse reduzieren sich die spezifischen Speichergrößen und die solaren Deckungsgrade, während Ströme, Zyklentiefen und Zyklenzahlen zunehmen.

	Klasse 1	Klasse 2	Klasse 3	Klasse 4
<b>Charakteristika</b>	kleine Ströme, wenig Zyklen, 1 Zyklus/Jahr	kleine Ströme, viele Teilzyklen	mittlere Ströme, viele Teilzyklen	hohe Ströme, sehr tiefe Zyklen, 0.5–1 Zyklus/Tag
<b>Solare Deckungsrate [%]</b>	100	70–90	ca. 50	<<50
<b>Speichergröße der Batterie [Tage]</b>	>10	3–5	1–3	1

Tabelle 3: Klassifizierung der Batterien nach Temperaturbereichen. Die unterschiedlichen möglichen Temperaturbereiche erfordern eine angepasste Ladetechnik. Batterieüberwachung und gegebenenfalls Temperierung des Batterieverbandes.

	Klasse A	Klasse B	Klasse C	Klasse D
<b>Charakteristika</b>	nahezu ungeschützt den äußeren Bedingungen ausgesetzt	leichte Abschirmung von den äußeren Bedingungen (z.B. Schuppen)	Aufstellung der Batterie im Gebäude (typischerweise Keller)	Aufstellung der Batterie in gut isolierten Räumen oder aktive Temperaturkontrolle
<b>Temperaturbereich [°C]</b>	-10... +45	+5... +30	+5... +20	+15... +25

fig ist ein Diesel als Back-up-System integriert (Abbildung 3).

Als Beispiel für eine reine PV/Batterieanlage dient die Wartehalle Bernburg (Abbildung 4) und als Beispiel für eine Hybridanlage die Anlage auf Terschelling (Abbildung 5) [5].

Zur Auswertung und Beurteilung des Batterieeinsatzes in den Anlagen wurden die Batteriedaten nach einheitlichen Kriterien ausgewertet und analysiert. Folgende Parameter, die auf der Basis von Stundenwerten ermittelt werden, dienen zum direkten Vergleich verschiedener Anlagen:

- Datenverfügbarkeit
- Monatliche Auswertungen
  - Lade/Entlademenge
  - Lade-/Entladeenergie
  - Ladefaktor und Wirkungsgrad
  - Batteriespannung (Max, Mittel, Min)
  - Lade/Entladestrom (Max, Mittel)
  - Batterietemperatur (Max, Mittel, Min)
- Jährliche Auswertungen
  - Strom als Funktion der Spannung
  - Ladung als Funktion der Spannung
  - Ladung als Funktion des Stromes
  - Häufigkeitsverteilung von Spannung, Strom und Batterietemperatur
  - Ladezustandsverläufe

Auf einige der Auswertungen wird im Folgenden näher eingegangen.

### 3. Betriebserfahrungen mit Batteriespeichern

Der Batteriebetrieb in den untersuchten PV-Anlagen kann in vier Klassen unterschiedlicher Betriebsbedingungen eingeteilt werden [6]. Außerdem kann eine Einteilung in Klassen unterschiedlicher Temperaturbedingungen, denen die Batterien ausgesetzt sind, vorgenommen werden. Die einzelnen Klassen mit den entsprechenden charakteristischen Kenngrößen sind in [Tabelle 2](#) und [Tabelle 3](#) zusammengefaßt.

Für ausgewählte Anlagen der vier Klassen zeigt [Abbildung 6](#) den Zusammenhang zwischen Batteriestrom und Batteriespannung für ein Jahr. Der Vergleich der Klassen läßt deutlich die zunehmende dynamische Belastung

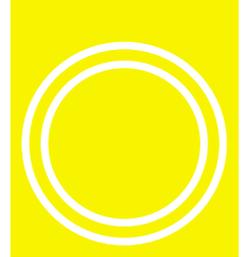


Abbildung 2: Unterschiedlichste Größen von Bleibatterien kommen in photovoltaischen Anlagen zum Einsatz. Neben kleinen Solarbatterien (12 V, 100 Ah) existieren größere Batterieverbände, die aus z.T. großen Einzelzellen (z.B. 2 V, 1500 Ah) aufgebaut sind.

Abbildung 3: Das Rotwandhaus des Deutsche Alpenvereins wird durch ein PV-Wind-Diesel-System mit elektrischer Energie versorgt.

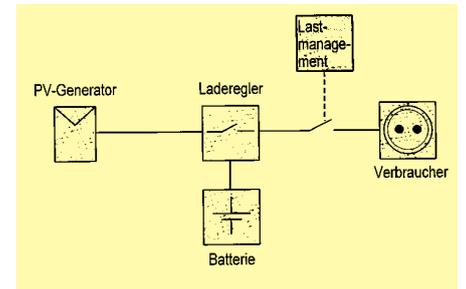


Abbildung 4: Prinzipieller Aufbau der Energieversorgung der Warte-halle Bernburg. Ein PV-Generator speist gleichspannungsseitig über einen Laderegler eine Batterie und eine Beleuchtung. Ein Lastmanagement optimiert den Betrieb.

von Klasse 1 zu Klasse 4 erkennen. Entlade- und Ladeströme werden deutlich größer und ebenso der Spannungsbereich. Es ist ein gutes Einhalten der unteren Spannungsgrenzen erkennbar und in den Klassen 2 – 4 ein gelegentliches Laden mit höheren Spannungen.

Für die Anlagen ‚Warte-halle Bernburg‘ (Klasse 1) und ‚Terschelling‘ (Klasse 4) sind ferner der monatliche Ladungs-transfer (Abbildung 7), die Häufigkeitsverteilung der Spannung über ein Jahr (Abbildung 8) und ein jährlicher Ladezustandsverlauf dargestellt (Abbildung 9).

Der Batteriespeicher der PV-Wind-Diesel-Anlage auf Terschelling ist im wesentlichen als Tagesspeicher eingesetzt, was sein hoher monatlicher Ladungstransfer verdeutlicht. Die Warte-halle Bernburg besitzt als PV-Batterie-Anlage ohne Hilfsgenerator einen relativ großen Speicher, der in den Wintermonaten als Wochen- und Monatspeicher dient. Die Häufigkeitsverteilung der Spannungen zeigt für die Warte-halle Bernburg häufiges Laden bei einer Ladespannung von 2,25 V/Zelle. Die relativ hohen Spannungen im Entladebereich deuten ferner auf sehr kleine Entladeströme hin. Dieses sind typische Einsatzbedingungen für Batterien in PV-Batterie-Anlagen ohne Hilfsgenerator. Für die Anlage auf Terschelling ist deutlich ein sehr dynamischer Betrieb unter Einhaltung erlaubter Spannungsgrenzen zu erkennen. Neben Ladungen mit 2,4 V/Zelle sind gelegentliche Ladungen bei höheren Spannungen zu sehen. Den jährlichen Betrieb der beiden Anlagen und die

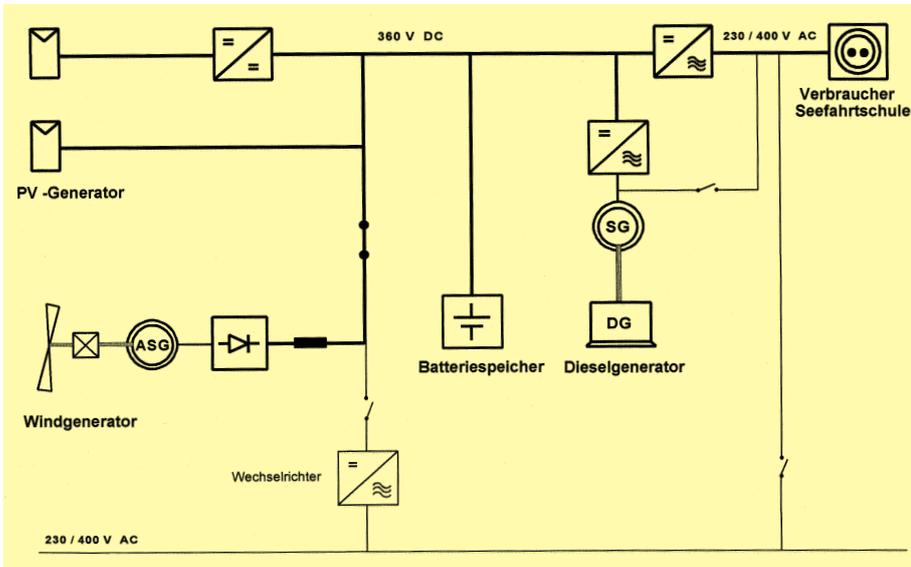
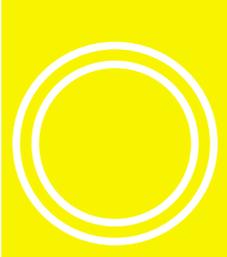
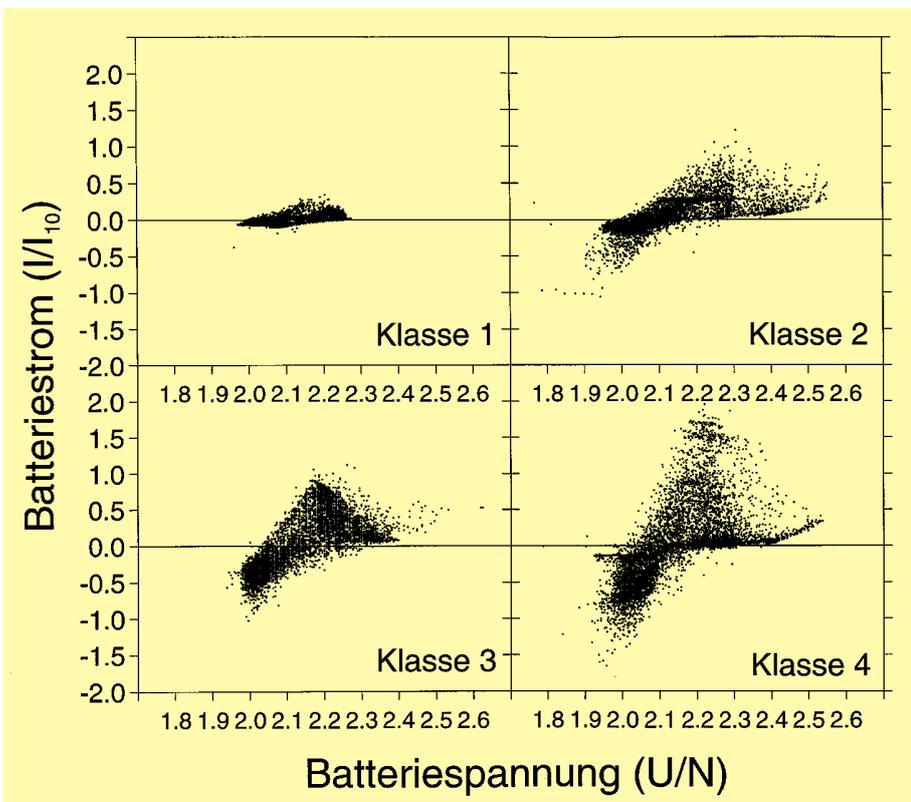


Abbildung 5: Prinzipieller Aufbau der Energieversorgung auf Terschelling. Die Hybridanlage auf Terschelling beinhaltet PV-Generatoren, einen Windgenerator, eine Batterie und ein Dieselaggregat zur Versorgung einer Seefahrt-Schule.

Abbildung 6: Batteriestrom in Abhängigkeit von der Batteriespannung im Jahre 1994 für die Anlagen Wartehalle Bernburg (Klasse 1), Energieautarkes Solarhaus



Batteriebelastung verdeutlichen sehr gut die Ladezustandsverläufe über ein Jahr [2], dargestellt in Abbildung 9.

Konsequenzen in Form von Anforderungen an die zu verwendende Batterie lassen sich in den Klassen 1 und 4 der Betriebsbedingungen klar definieren.

Während in der Klasse 1 eine möglichst geringe Selbstentladung und die Wartungsfreiheit der Batterie von Bedeutung ist, spielt in der Klasse 4 die Höhe der Selbstentladung keine entscheidende Rolle, während eine höhere Zyklenfestigkeit der Batterie gefordert werden muß.

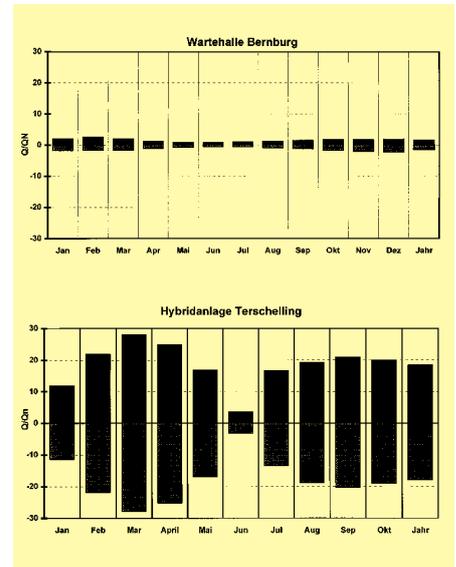
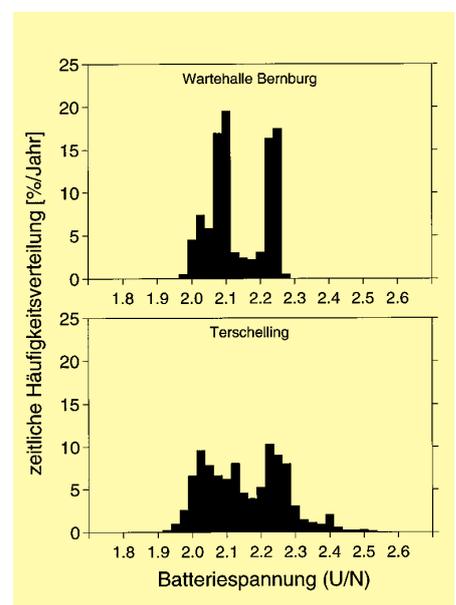


Abbildung 7: Monatlicher und mittlerer monatlicher Ladungsumsatz eines Jahres für Terschelling (360 V, 250 Ah) und Wartehalle Bernburg (12V, 56 Ah). Während die Batterie auf Terschelling im wesentlichen als Tagesspeicher eingesetzt wird, arbeitet die Batterie der Wartehalle Bernburg in den Wintermonaten als Wochen- und Monatspeicher.

Abbildung 8: Häufigkeitsverteilung der Spannungen eines Jahres für die Anlagen Wartehalle Bernburg und Terschelling. Die Spannungsverteilung liefert Informationen über die Betriebsbedingungen der Speicher und das Einhalten von vorgegebenen Spannungsgrenzen.



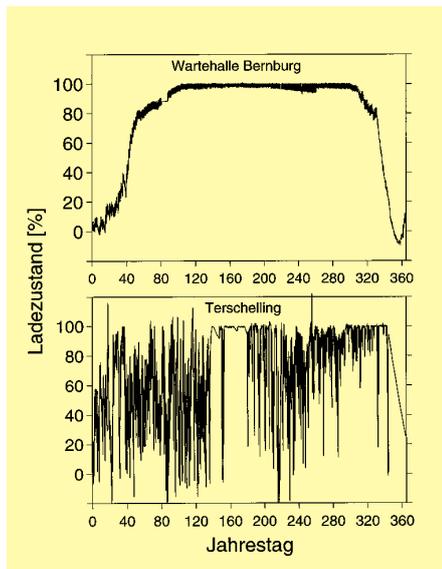
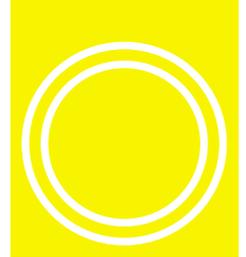


Abbildung 9: Ladezustandsverlauf über ein Jahr für die Anlagen Wartehalle Bernburg und Terschelling. Der Einsatz der Batterie der Wartehalle Bernburg als Wochen- und Monatspeicher gegenüber der von Terschelling als Tagesspeicher ist deutlich zu erkennen.

#### 4. Anlage mit Langzeitspeicherung

Die netzfreie Jahresversorgung der Zentralbibliothek des Forschungszentrums Jülich (Abbildung 10) wird erzielt mit Photovoltaik-Generatoren in Kombination mit einem Energiespeichersystem, bestehend aus einem Elektrolyseur, der Produktgasspeicherung für Wasserstoff und Sauerstoff und einer Brennstoffzelle. Übergeordnete Zielsetzung der Arbeiten des Forschungszentrums Jülich ist die Erprobung einer autonomen solar-elektrischen Energieversorgung eines größeren Gebäudes. Im Vordergrund steht der Nachweis der netzfreien elektrischen Versorgung unter realen solar- und verbrauchsspezifischen Bedingungen im Rahmen einer Demonstrationsanlage in automatischer Betriebsweise.

Neben der Gewinnung von Know-how für Planung, Errichtung und Betrieb derartiger Anlagen ist der Test und die Weiterentwicklung der saisonalen Langzeitspeicherung solarelektrischer Energie mit dem System Elektrolyse-Wasserstoff-Brennstoffzelle eine zentrale Aufgabe. Zielsetzung ist es, eine hohe Betriebszuverlässigkeit, sowie eine Vereinfachung und Kosten-

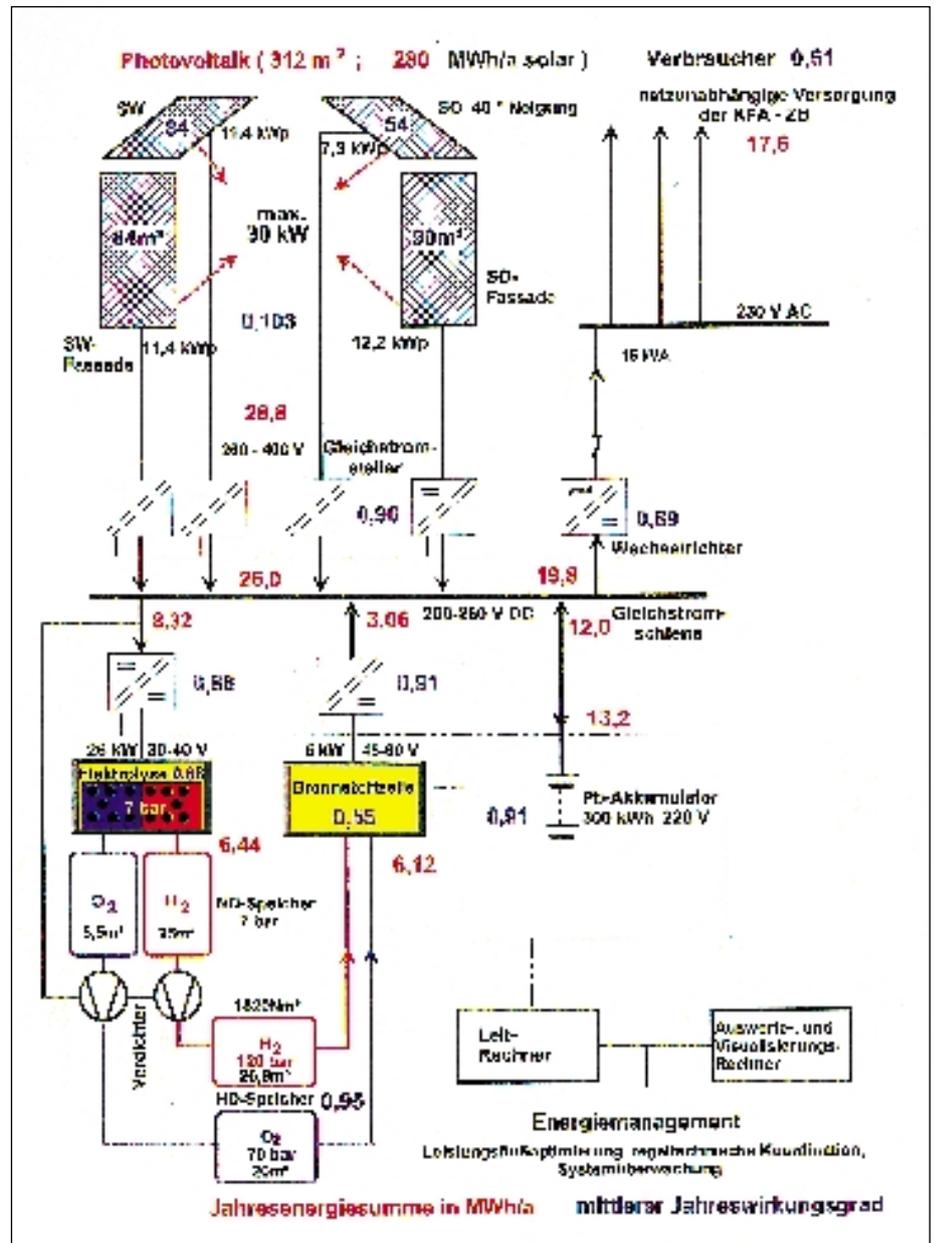


Abbildung 10: Die systemtechnische Konfiguration der PHOEBUS-Anlage mit den Jahresenergiesummen auf den einzelnen Pfaden und die mittleren Jahreswirkungsgrade der Energiewandlung in den einzelnen Komponenten.

reduzierung der Systemkomponenten mit einer großen Energieumwandlungseffizienz zu erreichen und den Nachweis der praktischen Handhabbarkeit dieser Wasserstofftechnologie zu führen. Die Entwicklung von Verfahren zur Anlagenregelung mit einem rechnergestützten Energiemanagement, die Optimierung von Regelungsstrukturen und die Qualifizierung der Leistungselektronik gehören mit zu den vordringlichen Aufgaben.

#### 4.1 Der Speicherbetrieb

War das Jahr 1994 noch gekennzeich-

net durch zahlreiche Ausfälle mit einer Verfügbarkeit der Anlage von 84 %, so lag diese für 1995 bei 99 %.

Die Abbildung 11 zeigt die gemessene Lade- und Entladestromverteilung der Batterie für 1995.

Der 26 kW Elektrolyseur, ausgerüstet mit hocheffizienten, im Forschungszentrums Jülich entwickelten Zellen, arbeitet seit über zwei Jahren, auch unter den schwankenden solarspezifischen Bedingungen, ohne Probleme. Es wurde bei einer mittleren Jahresleistung von 10 kW und bei einer middle-

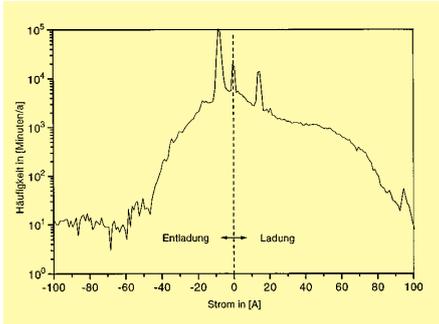
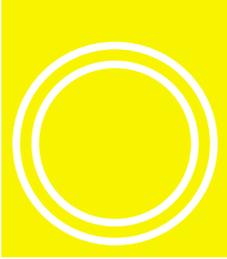


Abbildung 11: Die Häufigkeitsverteilung der Lade- und Entladeströme der Batterie für das Jahr 1995. Der mittlere Ladestrom von 20 A ist, bezogen auf die Nennkapazität von 1380 Ah, relativ gering. Der Entladungszeitraum unter 40 % betrug nur 300 h und mit einer Vollzyklenzahl von 44 ist eine hohe Lebensdauer zu erwarten.

ren Elektrolyttemperatur von 60° C ein Wirkungsgrad von 88 % erreicht [7].

Die alkalische Brennstoffzelle vom Typ Siemens BZA 4-2 konnte erfolgreich in den Anlagenbetrieb eingebunden werden und erreichte ihre volle elektrische Leistung von 6,5 kW mit einem Wirkungsgrad von 50 % (bezogen auf den oberen Heizwert von H<sub>2</sub>), der bei Teillast auf 57 % ansteigt. (Abbildung 12). Leistung und Lastwechselverhalten entsprechen den Erwartungen.

Die Betriebserlaubnis zum Betreiben der Wasserstoff- und Sauerstoffspeicher wurde nach Erfüllung aller sicherheitstechnischer Auflagen am 1. 07. 1995 erteilt [9].

#### 4.2 Das Energiemanagement

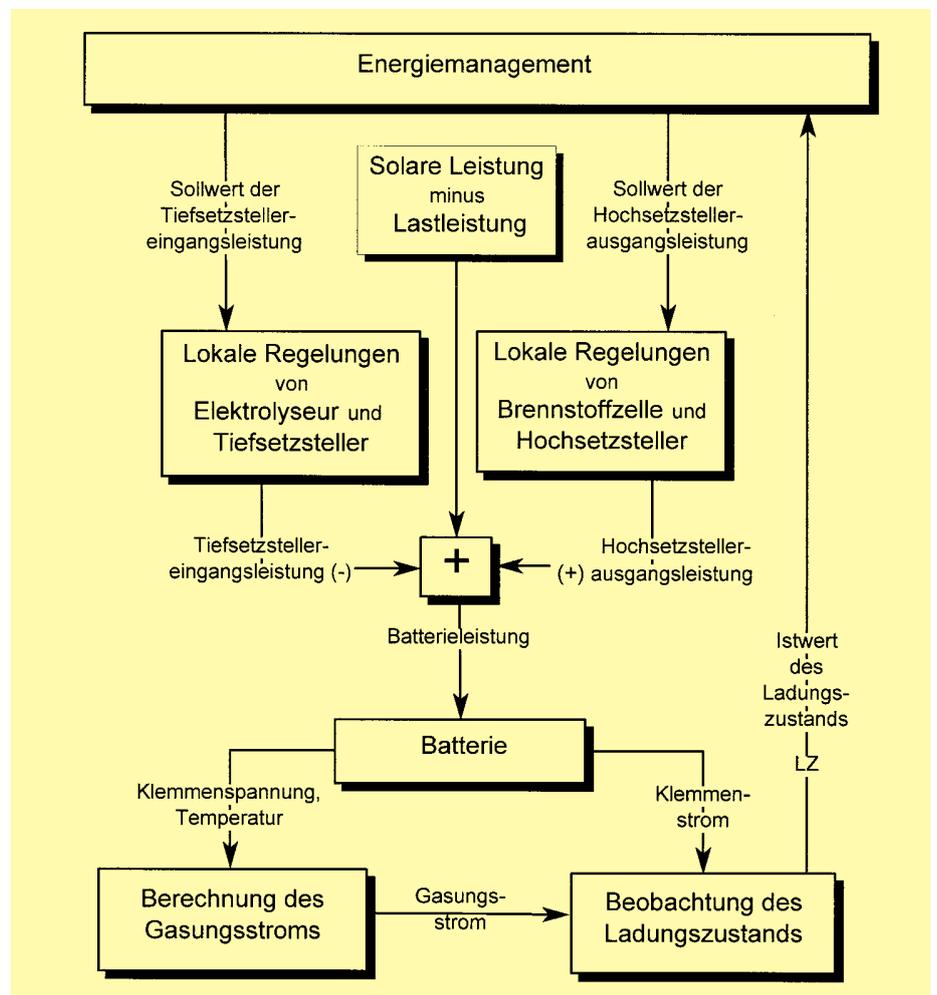
Für die optimale automatische Betriebsführung ist ein Energiemanagement (EM) zuständig (Abbildung 13). Es steht an der Spitze der regelungstechnischen Hierarchie der Anlage und wurde für die anlagenspezifischen Erfordernisse entwickelt und im praktischen Bereich erprobt.

Zu den Regelungsaufgaben gehört das Führen der Anlage nach vorgegebenen Optimierungskriterien, wie höchstmögliche Energieeffizienz in den Wandlern, Versorgungssicherheit, schonende Batterieladung mit Vermeidung von lebensdauerermindernden Ladungszuständen und Minimierung der Schaltzyklen der elektrochemischen Energiewandler (Abbildung 14). Die



Abbildung 12: Die 6,5 kW alkalische Brennstoffzelle vom Typ Siemens BZA 4-2 der PHOEBUS-Anlage

Abbildung 13: PHOEBUS-Regelkreis für den Ladungszustand. Nichtlineare Regler im Energiemanagement, Gleichstromsteller als ladungssteuernde Stellglieder, solare Leistung und Lastleistung als Störgrößen, implementiertes Modell zur Gasungsstromberechnung und numerische Integration des wahren Ladungsstromes.



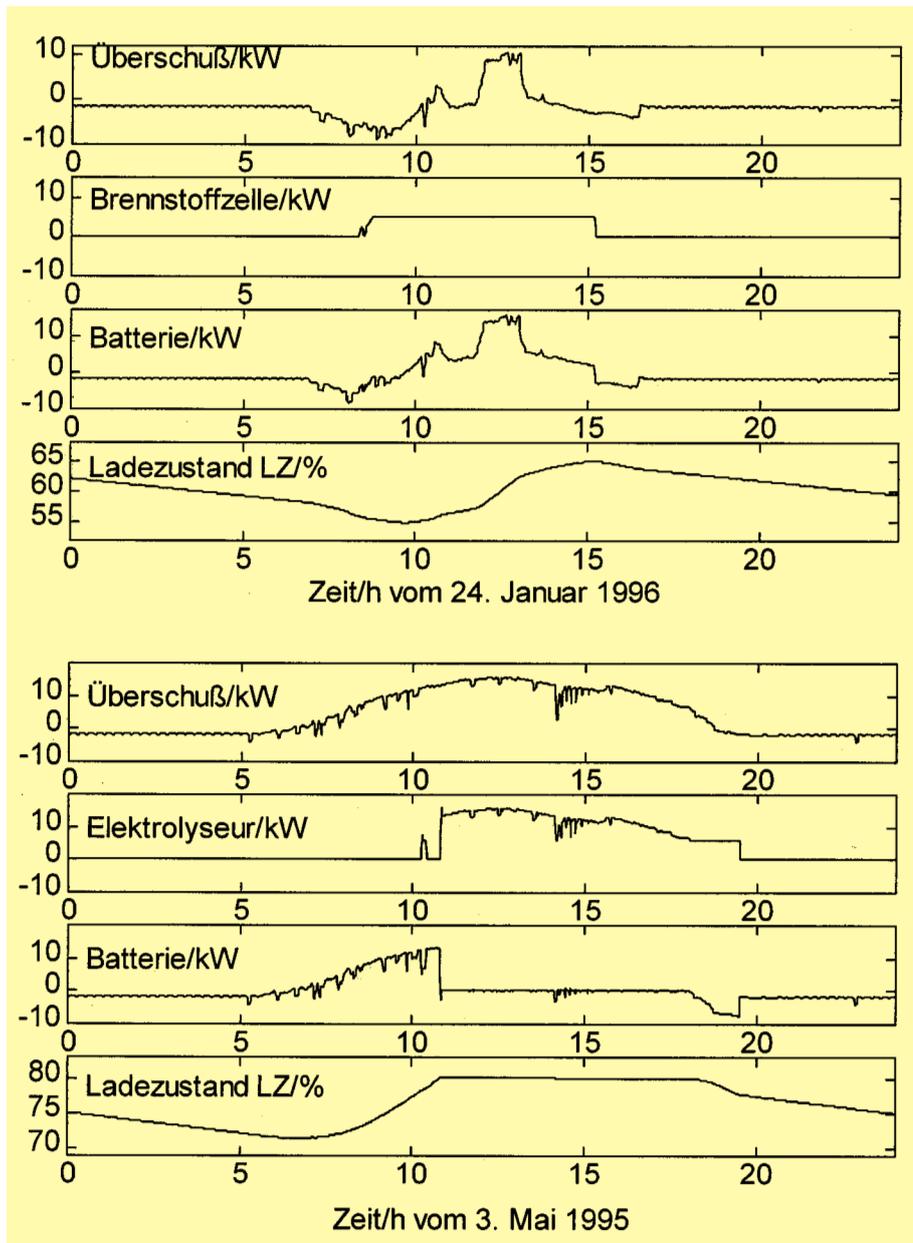
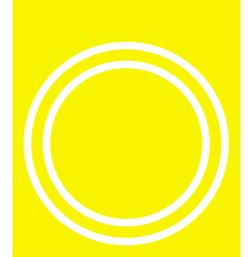


Abbildung 14: Regelungstätigkeit des optimierten PHOEBUS-Energiemanagements. Oben: Der Elektrolyseur wird aktiviert, wenn der Ladezustand der Batterie (LZ) 80% erreicht hat und wird gegen Abend, abhängig vom Sonnenuntergang, deaktiviert. Er übernimmt gerade den Energieüberschuß (Solar- minus Lastleistung) und schont damit die Batterie. Unten: Die Brennstoffzelle wird bei LZ = 55 % aktiviert und bei 65 % deaktiviert. Die Ladezeit wird zusätzlich von der Sonne verkürzt.

Optimierung der Einstellparameter der Regelungen erfolgte mit den Mitteln der Computersimulation [8] unter Vorgabe der energetischen Optimierungsziele und der Berücksichtigung der Charakteristiken der einzelnen Wandler.

#### 4.3 Gesamtbeurteilung

Nach den bisher gemachten Betriebserfahrungen dürften mehrere

Jahre erforderlich sein, um die Anlage betriebsmäßig zu optimieren und ihr Verhalten meßtechnisch zu analysieren.

#### Simulationstechnik

Die optimale Größe derartiger Anlagen wird von vielen Faktoren bestimmt (Kosten, Laststruktur, Speicherkonzept, Anlagenkonfiguration, Regelung, Standort etc.) und kann letzt-

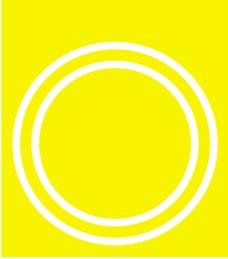
endlich nur mit praxiserprobten Mitteln der Simulationstechnik behandelt werden. Um das gesteckte Ziel einer allesumfassenden Simulationstechnik zu erreichen, müssen die bestehenden Programm-Module zusammengefaßt werden, um auch auf allgemeine, über den Rahmen der PHOEBUS-Anlage hinausgehende Fragestellungen wie

- optimale Konfiguration der PV-Felder in Verbindung mit der Laststruktur und der Minimierung der Speichergröße,
  - optimale elektrische Spannungsniveaus in den einzelnen Systemkomponenten zur Minimierung der Verluste und Reduzierung des Umfangs und der Kosten in der Stromstellertechnik,
  - Änderung der Regelungskonzepte (Optimierung durch Wetterprognosen, Teilautonomie),
  - Konzepte der Speichervarianten (Hybrid-System Windkraft und PV-Generator mit Verwendung der Energieüberschüsse, Backup-Lösungen für den Kurzzeitspeicher, Verdichtungs- und Speicherungsart der Produktgase  $H_2/O_2$ ), und
  - energiewirtschaftliche Einordnung und Kostenanalyse
- eine Antwort geben zu können.

#### Gas- und Speicherkonzept

Die Frage nach der optimalen Größe von dezentral ausgerichteten Anlagen wird nicht zuletzt durch das Gas-Speicherkonzept selbst bestimmt.

Hier bieten sich mehrere Möglichkeiten an, von der klassischen Druckgas bis zur Metallhydridspeicherung verbunden mit der Fragestellung nach der Art und der Effizienz der Produktgasverdichtung, die mechanisch, thermisch oder direkt durch Hochdruckelektrolyse erfolgen kann, oder ob der elektrolytische Sauerstoff für eine PEM-Brennstoffzelle besser durch den Luftsauerstoff ersetzt werden kann. Neben der eingesetzten mechanischen Verdichtung werden die beiden Konzepte der Hochdruckelektrolyse (120 bar) in Metallhydriden ohne anschließende Verdichtung und die solarthermische Verdichtung (120 bar) weiter entwickelt und sollten auch im Hinblick auf die allgemeine Wasserstofftechnologie wichtige Beiträge sein [10].



## Hybrid-Konzept

Auch das Hybrid-Konzept Wind-/Photovoltaik-Generator ist vielversprechend und wird weiter verfolgt, um belastbare standortabhängige Aussagen über die Erstellung solcher Anlagen unter autonomen Bedingungen zu erzielen.

## Systemoptimierung

Ist schon die optimale Auslegung der Einzelkomponenten hinsichtlich Energieeffizienz, Lebensdauer und Kosten eine Aufgabe, die bisher noch nicht zufriedenstellend gelöst ist, so folgt aus dem Betrieb eines Energieversorgungssystems mit schwankendem Energieangebot und verbraucherbedingten Nachfrageänderungen zusätzlich die Notwendigkeit, das Gesamtsystem zu optimieren und zu vereinfachen. Energieeffizienz und Betriebszuverlässigkeit erfordern eine optimierte Betriebsführung.

## Systemkomponenten

Um bei photovoltaischen Versorgungsanlagen eine breite Anwendung zu erreichen, müssen die Kosten wesentlich gesenkt sowie die Einsatzdauer und Betriebszuverlässigkeit erhöht werden. Neben den Photovoltaik-Modulen und deren Gebäudeintegration werden die Gesamtkosten derartiger Anlagen annähernd zur Hälfte durch die Systemtechnik verursacht. Mit standardisierten systemtechnischen Lösungen und Regelungsstrukturen lassen sich die Anlagenkosten weiter verringern.

## 5. Zusammenfassung und Ausblick

Der Einsatz elektrochemischer Kurz- und Langzeitspeicher eröffnet der Photovoltaik vielfältige Einsatzmöglichkeiten zur autonomen Energieversorgung. Die Einsatzbedingungen der Energiespeicher sind sehr unterschiedlich bezüglich Speicherzeit, Leistungsdynamik und Einsatztemperatur.

Die Meßdaten aus existierenden Photovoltaikanlagen und Hybridsystemen wurden nach einheitlichen Auswertekriterien ausgewertet, die eine gute Beurteilung der Batteriebetriebsbedingungen erlauben. Insbesondere statistische Auswertungen und Ladezu-

standsverläufe beschreiben besonders gut die Einsatzgegebenheiten.

Im Bereich der Langzeitspeicherentwicklung ist die eingeleitete Entwicklung von PEM-Brennstoffzellen besonders vielversprechend und bietet die Möglichkeit, auch weitere Anwendungspotentiale in dezentralen, stationären Bereichen zu erschließen.

Weitere Entwicklungsarbeiten sind notwendig und geplant in den Bereichen:

- Ermittlung des Zusammenhangs von Alterungseffekten und Batteriebetriebsführung,
- Standardisierung von Anlagenkonzepten,
- Anpassung des Batteriemagements an unterschiedliche Anforderungen bezüglich
  - Energieinhalt
  - Dynamik und
  - Umgebungstemperatur,
- Weiterentwicklung der Betriebsführung und des Energiemanagements,
- Verstärkter Einsatz von Simulationstechniken,
- Verbesserung von Komponenten der elektrischen Energieaufbereitung.

Ziel ist es, zu standardisierten Systemlösungen zu kommen, die eine hohe Zuverlässigkeit und Lebensdauer der eingesetzten Speicher beinhalten. Wenn langfristig größere Versorgungsbeiträge aus erneuerbaren Energiequellen zu erbringen sind, müssen Konzepte der Energiespeicherung sowohl im Kurzzeit- wie im Langzeitbereich als wichtige Elemente einer regenerativen Energieversorgung erstellt werden und entsprechende Maßnahmen im Forschungsbereich schon heute eingeleitet werden.

## 6. Dank

Die Forschungsarbeiten werden vom Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF) und vom Landesministerium für Wissenschaft und Forschung NRW unterstützt.

## Literatur

- [1] B. Willer, M. Wollny, J. Garche, J. Mittermeier, H. Prinz, G. Bopp, D. U. Sauer, M. Bächler, H. P. Sprau

„Auswertekriterien für Batteriedaten aus PV-Anlagen“, 10. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Kloster Banz / Stafelstein (1995) 583

- [2] H. Gabler, M. Bächler, P. Sprau, G. Bopp, D.U. Sauer, A. Jossen, J. Mittermeier, W. Höhe, B. Willer, M. Wollny  
„A Systematic Effort to Define Evaluation and Performance Parameters and Criteria for Lead-Acid Batteries in PV-Systems“, 13th EU PV Solar Energy Conference, Nice (1995) 1763–1769
- [3] B. Willer, H. Schmidt  
„Batteriemangement und modulare Batterietechnik“, Themen 94/95, Forschungsvorbund Sonnenenergie (1995) 61–68
- [4] J. Garche, H. Döring, A. Jossen, F. Lang, D. Köstner, J. Konrad  
„Chemische und Physikochemische Analyse des inneren Zustandes von solar-spezifisch getesteten PV-Batterien und Zykluslebensdauer von PV-Batterien“, Abschlußbericht BMFT Förderkennzeichen: 0329554A (1994)
- [5] K. Burgess, T.C.J. van der Weiden, K.J. Hoekstra, M. Wollny, B. Willer  
„Hybrid PV-Wind-Diesel-Battery-System – Innovative System and Battery Management Control and Operational Experiences after One Year of Autonomous Operation“, 13th EU PV Solar Energy Conference, Nice (1995) 759–762
- [6] D. U. Sauer, M. Bächler, G. Bopp, W. Höhe, J. Mittermeier, P. Sprau, B. Willer, M. Wollny  
„What happens to Batteries in PV-Systems? Costs, Lifetimes, Strains“, LABAT '96, Varna/Bulgarien (1996)
- [7] J. Mergel, H. Barthels  
„Auslegung, Bau und Inbetriebnahme eines 26 kW-Wasserelektrolyseurs fortgeschrittener Technik für den Solarbetrieb“, 9. Intl. DGS Sonnenforum, Stuttgart (1994) 1699–1706
- [8] W.A. Brocke, H. Barthels  
„Zur Optimierung der Regelung der Photovoltaik-Wasserstoff-Brennstoffzellen Demonstrationsanlage Jülich“, 9. Intl. DGS Sonnenforum, Stuttgart (1994) 826–833
- [9] R. Bongartz, W. Jahn, J. Marx  
„Zuverlässigkeits- und Risikountersuchung der Photovoltaik-Wasserstoff-Brennstoffzellen-Anlage“ Interner Bericht, KFA-ISR-IB 15/94 (1994)
- [10] K. Bonhoff  
„Vergleichende Betrachtung der Prozeßgasverdichtung und -expansion sowie die Speichermöglichkeiten im Energiespeichersystem der Photovoltaik-Wasserstoff-Brennstoffzellen Anlage der KFA Jülich“, Diplomarbeit, KFA-IEV (1994)