



## Neue Betriebsführungsstrategien für Inselnetze

M. Rothert  
Institut für Solare Energieversorgungstechnik e.V.  
Königstor 59, 34119 Kassel  
Tel.: (0561) 7294-0, Fax: (0561) 7294-100  
e-mail: mrothert@iset.uni-kassel.de

M. Ibrahim  
Universität Gesamthochschule Kassel, FB 16  
FG Elektrische Energieversorgungssysteme  
Wilhelmshöher Alle 71, 34109 Kassel  
Tel.: (0561) 804-6312, Fax: (0561) 804-6521  
e-mail: mibrahim@iset.uni-kassel.de

### 1 Einleitung

Die Betriebsführung von Inselnetzen und Hybridsystemen hat die Aufgabe, das gesamte System stabil zu halten, die Betriebskosten zu minimieren und eine hohe Versorgungssicherheit zu gewährleisten. Um dieses Ziele zu erreichen, werden bis heute meistens spezielle, auf eine Anlage abgestimmte Lösungen eingesetzt. Bis heute konnte sich von den vielen verschiedenen Anlagenkonzepten keines eindeutig gegen ein anderes durchsetzen. Gleiches gilt für die häufig sehr unterschiedlichen Betriebsführungsansätze. Zukünftig wird sich aber das Konzept durchsetzen, welches sich an die Standards der großen Verbundnetze anlehnt sowie leicht erweiterbar ist, um auch einen in Zukunft wachsenden Bedarf abdecken zu können.

Bei der Entwicklung von Komponenten, die diese zukünftigen Anforderungen erfüllen, sind in den letzten Jahren am ISET große Fortschritte erzielt worden. Dies ist sowohl den vielen grundlegenden Arbeiten in den Projekten der Modulare Systemtechnik wie einigen Komponentenentwicklungen in enger Zusammenarbeit mit der Industrie zu verdanken. Diese vom ISET entwickelten Anlagenkonzepte sowie neu entwickelte Komponenten könnten schon in naher Zukunft zu einer deutlichen Vereinheitlichung führen.



Auf der Ebene der Betriebsführung sind ähnliche Konzepte notwendig. Sie müssen zur elektrischen Energieversorgung im Verbundnetz kompatibel, für unterschiedliche Versorgungsaufgaben und Anlagengrößen geeignet und auf Anlagenerweiterungen vorbereitet sein. Hierzu sollen im folgenden neue Ansätze, die im ISET und an der Universität Gesamthochschule Kassel (GhK) im Fachgebiet „Elektrische Energieversorgungssysteme“ und im Fachgebiet „Rationelle Energieverwendung“ entwickelt wurden, dargestellt werden.

## **2 Einteilung der Aufgaben von Betriebsführungssystemen**

### **2.1 Die drei Ebenen der Betriebsführung**

Die Aufgaben von Betriebsführungssystemen lassen sich in folgende drei Bereiche aufteilen /RAPTIS 2000/.

- Netzregelung,
- Betriebsoptimierung und
- Sicherung des Netzbetriebs.

Die Netzregelung übernimmt die Frequenz- sowie die Spannungsregelung und hält die Werte für Spannung und Frequenz innerhalb vorgegebener Toleranzgrenzen. Außerdem ist es die Aufgabe der Netzregelung, die Grenzwerte der einzelnen Komponenten zu überwachen und im zulässigen Bereich zu halten. Sämtliche Maßnahmen zur Aufrechterhaltung des Betriebes fallen damit in diese Kategorie. Die Netzregelung kann zentral oder auch dezentral erfolgen. Im Verbundnetz mit vielen an der Netzregelung beteiligten Kraftwerken wird die Netzregelung dezentral in jeder an der Netzregelung beteiligten Komponente eines Netzes durchgeführt. Eine zentrale Regelung würde sehr hohe Anforderungen an eine sichere Echtzeitkommunikation stellen.

Die Betriebsoptimierung hat die Aufgabe, einen nach wirtschaftlichen Kriterien optimalen Netzbetrieb zu gewährleisten. Dafür muss die Lastaufteilung in den verschiedenen Zeitbereichen geplant und ständig an die tatsächlichen Gegebenheiten angepasst werden. Auch die Aufteilung der für einen stabilen Netzbetrieb notwendigen Primär-, Sekundär- und Tertiärregelreserve auf die unterschiedlichen Einheiten gehört dazu.

Zur Sicherung des Netzbetriebs sind laufend Kurzschluss-, Stabilitäts- und Kontingenzanalysen durchzuführen. Diese dienen dazu, das Netz auch beim Ausfall einer Komponente (Kraftwerk, Leitung, Trafo) stabil zu halten und dadurch die Verfügbarkeit des Netzes und die Versorgungssicherheit zu erhöhen.



## 2.2 Die Netzregelung in Inselnetzen und Hybridsystemen

Die Netzregelung für Inselnetze ist die Grundvoraussetzung für die Funktionstüchtigkeit des Systems. Bei Inselnetzen wird im Gegensatz zum Verbundnetz die Netzregelung häufig nur von einer netzbildenden Komponente übernommen. Dies kann ein Batterie-stromrichter aber auch ein Motor-Generator (MG) sein. Die jeweils anderen ins Netz einspeisenden Erzeuger oder Speicher sind Stromquellen, die in ihrer Leistung von der netzbildenden Komponente gesteuert oder geregelt werden können.

Durch neue schnelle Regelungs- und Messwerterfassungsalgorithmen, die in den letzten Jahren am ISET entwickelt wurden, konnte im Labor erstmals auch der Parallelbetrieb von 2 Stromrichtern als Spannungsquellen gezeigt werden. Kommunikationslos erfolgt die Wirk- und Blindleistungsaufteilung über Frequenz- und Spannungsstatiken. Durch diese Arbeiten wird in Zukunft auch in kleinen Hybridsystemen die dezentrale Netzregelung möglich sein, wie sie in größeren Netzen mit Synchrongeneratoren Stand der Technik ist.

## 2.3 Aufgaben der Betriebsoptimierung

Die Vielfältigkeit der Aufgaben einer Betriebsoptimierung sind im folgenden Bild dargestellt.

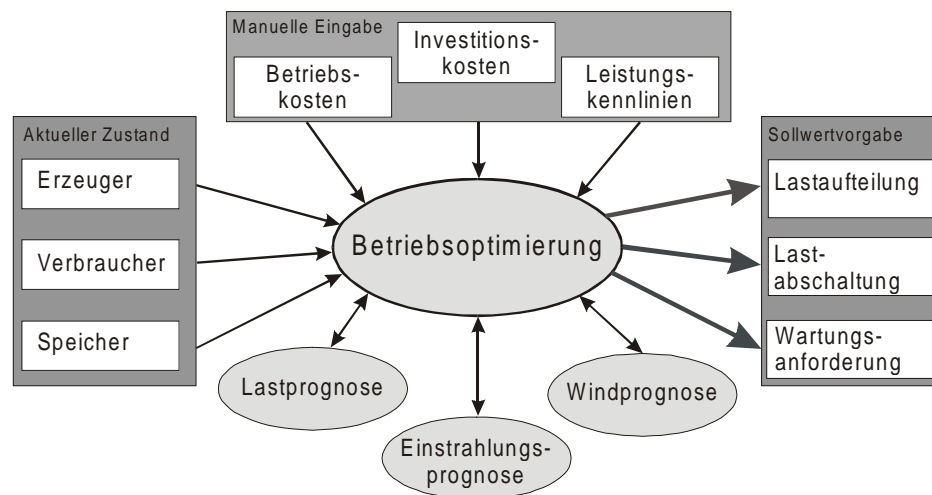


Abb. 1: Eingangs- und Ausgangsgrößen der Betriebsoptimierung

Die Betriebsoptimierung sollte den Zustand jedes Erzeugers, der wichtigsten Verbrauchergruppen sowie aller vorhandenen Speicher kennen. Ist dies nicht möglich, muss



mindestens die Summenleistung aller Verbraucher und nicht erfassbarer Erzeuger sowie der Zustand aller regelbaren Erzeuger und Speicher bekannt sein. Die Betriebsoptimierung hat dann die Aufgabe, Leistungssollwerte für die regelbaren Erzeuger und Speicher vorzugeben, Wind oder PV-Anlagen abzuregeln und Lastgruppen zu- oder abzuschalten. Um die Stromgestehungskosten zu minimieren, müssen zusätzlich die Betriebs- und Investitionskosten der regel- und steuerbaren Komponenten bekannt sein. Zur Vermeidung von Fehlentscheidungen durch die stark fluktuierende Erzeugung und große Laständerungen auf der Verbrauchsseite sollten Lastprognosen und Erzeugungsprognosen für die Einsatzplanung im Stunden- bis Tagesbereich genutzt werden. Eine vorausschauende Lastaufteilung wird so möglich, die aber ständig an die aktuellen Gegebenheiten angepasst werden muss.

Durch diese Maßnahmen ist es möglich, die Betriebskosten von Inselnetzen signifikant zu verringern. Vorteile der Betriebsoptimierung ergeben sich vor allem durch:

- einen geringeren Brennstoffverbrauch,
- geringere Emissionen,
- Minimierung der Wartungskosten und
- lange Lebensdauern der Komponenten.

Neben der Betriebsoptimierung hat die Anlagenauslegung einen großen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit. Fehler in der Planungsphase können durch eine Betriebsoptimierung nicht ausgeglichen werden. Optimierungstools für die Anlagenauslegung und die Betriebsführung sollten deshalb aufeinander abgestimmt sein.

## 2.4 Einteilung nach Systemklassen

Die im Kapitel 2.1 beschriebenen Ebenen der Betriebsführung gelten ganz allgemein für jedes System. Sie sind entstanden aus der Netz- und Kraftwerksoptimierung der Energieversorgungsunternehmen und ist am ISET und der GhK für kleine PV- Hybrid-systeme weiterentwickelt worden. Neben der Aufteilung in die drei Betriebsführungsebenen ist es vor allem für die Betriebsoptimierung wichtig, die Systeme auch in unterschiedliche Systemklassen aufzuteilen.

- PV- und/oder Wind-Speichersysteme,
- PV- und/oder Wind-Speichersysteme mit zusätzlichem Motor-Generatorsatz und
- Systeme mit mehreren parallelen Komponenten (mehrere Speicher , Motor-Generatorsätze, PV-Stromrichter).



Beim reinen PV- Speichersystem hat eine Betriebsoptimierung kaum Möglichkeiten, auf den Systemzustand zu reagieren. Der Speicher hat dort die Aufgabe, die Differenz zwischen Angebot und Nachfrage auszugleichen. Bei einem Überangebot an regenerativer Energie und einem vollen Speicher kann die Betriebsführung gegebenenfalls zusätzliche Verbraucher (z.B. Pumpen) zuschalten oder die Energiewandler abregeln. Ist das regenerative Energieangebot zu gering und der Speicher leer, kann die Betriebsführung Verbraucher abschalten. Reagiert der verwendete Speicher (z.B. Batterien) empfindlich auf gewisse Zustände, kann über die Zeitsteuerung der Zu- und Abschaltung von Verbrauchergruppen versucht werden, die Lebensdauer des Speichers zu optimieren.

Ist in der Anlage aber zusätzlich ein Motor-Generator vorhanden, erhöhen sich neben der Komplexität des Systems auch die Freiheitsgrade der Betriebsoptimierung. Eine Lastaufteilung zwischen Speicher und Motor-Generator ist möglich und sogar notwendig für einen sicheren Betrieb. In diesem System hat die Betriebsoptimierung bereits einen großen Einfluss auf die Betriebskosten der Anlage.

In größeren Anlagen mit mehreren parallelen Motor-Generatorsätzen und gegebenenfalls mehreren parallelen Speichern erhöht sich zwar die Komplexität des Systems weiter, aber auch die Eingriffsmöglichkeiten der Betriebsoptimierung steigen. So kann in diesen Systemen z.B. nachts der meist sehr geringe elektrische Grundbedarf durch mehrere Motor-Generatorsätze parallel, durch nur einen Motor-Generator oder durch den Speicher gedeckt werden. Wird als Speicher eine Bleibatterie verwendet, kann in diesen Systemen die ab und zu notwendige Ausgleichladung nicht nur durch den Motorgenerator erfolgen sondern auch durch einen zweiten parallelen Speicher. In diesen Systemen ist eine gute Betriebsoptimierung Grundvoraussetzung für einen reibungslosen und kostengünstigen Betrieb der Anlage.

### **3 Stand der Technik für die Betriebsoptimierung**

Bislang gibt es hauptsächlich Systeme der ersten und zweiten Klasse. Sind diese aber modular aufgebaut, werden sie durch eine Erweiterung zu Systemen der dritten Klasse. Bislang ist dies die Ausnahme. Aufgrund vieler Vorteile werden sich solche Systeme in Zukunft aber stärker durchsetzen. Die Betriebsoptimierung spielt bislang in den meisten Anlagen nur eine sehr untergeordnete Rolle. Es wird dort versucht, den Betrieb durch sinnvoll festgelegte Grenzwerte zu steuern. Systeme mit einer ständigen Optimierung der Lastaufteilung sind kaum zu finden. Die jeweiligen Strategien sind sehr eng an die eingesetzten Komponenten gebunden und orientieren sich vornehmlich an dem Zustand der in fast allen Systemen eingesetzten Bleibatterien.



Die Batterie hat die Aufgabe, die Differenz zwischen Erzeugung und Verbrauch aufzunehmen oder abzudecken. Ziel der Betriebsführung ist der Schutz der Batterie, um eine lange Lebensdauer zu erreichen. Dies ist deshalb wichtig, weil einerseits die Batterie sehr empfindlich auf bestimmte Betriebszustände reagiert, andererseits die Kosten der Batterie über die Lebensdauer einer Hybridanlage die Gesamtkosten dominieren /KAISER 1997/ /BOPP 1999/.

Die Betriebsführung arbeitet dabei folgendermaßen: In Abhängigkeit vom Zustand der Batterie wird der Motor-Generator (MG) zu- oder abgeschaltet. Dabei werden ausschließlich feste Grenzwerte verwendet. Strategien, bei denen die Grenzwerte von der Betriebsoptimierung laufend an den Systemzustand angepasst werden, finden bis heute kaum Verwendung. Einen Überblick über die unterschiedlichen Strategien liefert die folgende Tabelle.

**Tab. 1: Stand der Technik für Strategien zur Betriebsoptimierung /BEVERUNGEN 2000/**

	Strategie	Schaltkriterium	Bemerkung
1.	feste Batteriespannungsgrenzwerte	MG start $U_{\text{batt}} < U_{\text{min}}$ MG stopp $U_{\text{batt}} > U_{\text{max}}$	typische Werte: $U_{\text{min}} = 1.96 \text{ V/Zelle}$ $U_{\text{max}} = 2.35 \text{ V/Zelle}$
2.	Temperaturkompensierte Ladespannung	MG start $U_{\text{batt}} < U_{\text{min}}$ MG stopp $U_{\text{batt}} > U_{\text{max}} (T_{\text{bat}})$	Temperaturkompensation –3 bis –5 mV / °C / Zelle
3.	Stromkompensierte Entladespannung	MG start $U_{\text{batt}} < U_{\text{min}} (I_{\text{bat}})$ MG stopp $U_{\text{batt}} > U_{\text{max}}$	Häufig wird Methode 2 und 3 kombiniert.
4.	Ladezustand (SOC)	MG start $\text{SOC} < \text{SOC}_{\text{min}}$ MG stopp $\text{SOC} > \text{SOC}_{\text{max}}$	Häufig werden aus Sicherheitsgründen Methode 4 mit der 1., 2. oder 3. kombiniert.
5.	Netzlast	MG start $P_{\text{Netz}} > P_{\text{Netz,max}}$ MG stopp $P_{\text{Netz}} < P_{\text{Netz,min}}$	Diese Methode muss mit einer der vorhergehenden Methoden kombiniert werden, um Über- und Tiefentladungen zu vermeiden.
6.	Batteriezustand (BAZ)	MG start $\text{BAZ} < \text{BAZ}_{\text{min}}$ MG stopp $\text{BAZ} > \text{BAZ}_{\text{max}}$	neue Methode, die erstmals im Sunny Island Verwendung findet.

Zusätzlich zu dem Zuschalten des Motor-Generators nach einem festen Grenzwert wird in vielen Anlagen über eine Zeitsteuerung (ca. alle 4 Wochen) eine Vollladung der Batterie durchgeführt. Dadurch wird eine Vergleichmäßigung der vielen in Reihe geschalteten Batteriezellen erreicht.



Eine neu am ISET entwickelte Methode ist es, den Motor-Generator anhand des Batteriezustands (BAZ) zu- oder abzuschalten /Schmitz 1999/. In die Bestimmung des Batteriezustandes geht dabei neben der Batteriespannung auch der Ladezustand ein sowie die Zeiten und der Energiedurchsatz seit der letzten Voll- oder Ausgleichladung. Unter bestimmten Umständen ist ein Zustandswechsel, der zu einer Abschaltung des Generators führt, nur nach Abschluss des sich an die Gegebenheiten anpassenden Ladeverfahrens möglich. Dadurch können Voll- oder Ausgleichladungen ohne gesonderte Anforderungen regelmäßig durchgeführt werden. Diese neue Methode der Betriebsführung über den Batteriezustand ist erstmals im Batteriestromrichter „Sunny Island“ integriert und wird somit die Betriebsführung aller Anlagen, die in nächster Zeit mit diesem Batteriestromrichter aufgebaut werden, bestimmen. Längere Praxiserfahrungen hiermit liegen zur Zeit aber noch nicht vor.

Auch einige neuere Laderegler verfügen bereits über eine Ladezustandserfassung und verschiedene adaptierende Ladeverfahren. Die reine Betriebsführung über die Spannung ist bei neu aufgebauten Anlagen nur noch selten anzutreffen.

Eine Betriebsoptimierung, die neben dem Zustand der Batterie auch den Zustand des Motor-Generators (z.B. momentane Betriebskosten) berücksichtigt und zusätzlich über Last- und Einstrahlungsprognosen eine optimierte Einsatzplanung durchführt, ist bislang nicht im Einsatz. Einige Ansätze hierzu gibt es aber in den verschiedenen Forschungsinstituten und Universitäten.

#### **4 Neue Ansätze und neue Grundlagen zur Betriebsführung im ISET und der Universität Gesamthochschule Kassel (GhK)**

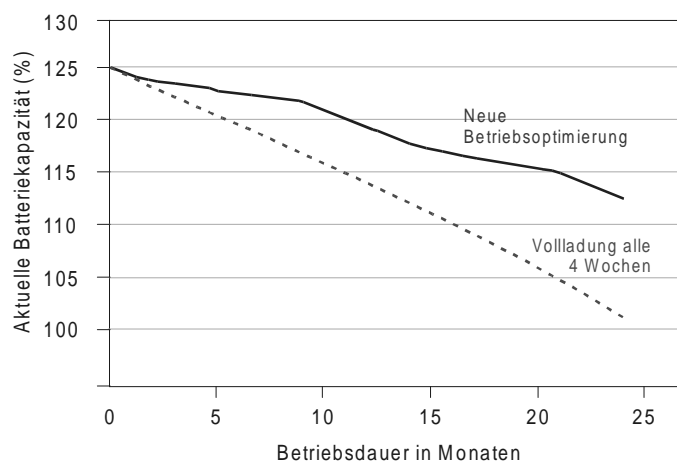
Aus Abbildung 1 ist ersichtlich, dass die Zustandsbestimmung der einzelnen Komponenten eine Grundvoraussetzung für die Optimierung ist. Hier wurden in den letzten Jahren am ISET deutliche Fortschritte erzielt. Es wurde ein neues Ladezustandsverfahren für Bleibatterien entwickelt, welches speziell in Hybridsystemen mit nur seltenen Volladungen eine hohe Genauigkeit erreicht sowie erstmals die insgesamt in der Batterie speicherbare Kapazität abschätzen kann. Der neue Algorithmus für die Bestimmung des Batteriezustandes baut auf diesem Verfahren auf. Er berücksichtigt neben dem Ladezustand noch weitere Batteriegrößen, die ebenfalls starken Einfluss auf die Batteriealterung haben.

Ein Ansatz zur Betriebsoptimierung mit variablen Grenzen wird zur Zeit ebenfalls am ISET und der GhK entwickelt /IBRAHIM 2000/. Dabei ist eine der wichtigsten aber auch am schwersten abzuschätzende Größe der momentane Kapazitätsverlust der Batterie. Ist diese Größe aber bekannt, können die momentanen Kosten für die Batterie abge-



schätzt werden. Zusammen mit dem Kraftstoffverbrauch des Motor-Generators sowie den Wartungskosten ist dann die Bestimmung einer kostenoptimalen Lastaufteilung möglich.

Um dies zu erreichen, wurde ein Alterungsmodell für Bleibatterien entwickelt und mit Daten aus realen Anlagen abgeglichen. Simulationsrechnungen mit dieser Betriebsoptimierung zeigen, dass die Stromgestehungskosten in kleinen Hybridsystemen (PV-Anlage, Batterie, Motor-Generator) um bis zu 20 % gesenkt werden können. Die Kostenersparnisse ergeben sich dabei vor allem durch eine um bis zu 40 % längere Lebensdauer der Batterie bei einem nur um ca. 4 % höheren Kraftstoffverbrauch. Die Entwicklung der Batteriekapazität bei einer Simulationsrechnung ist der folgenden Abbildung zu entnehmen. Verglichen wird die neue Betriebsführungsoptimierung mit einer zur Zeit häufig eingesetzten Strategie. Bei dieser wird der Diesel anhand von festen Grenzwerten des Ladezustandes zu- und abgeschaltet und zusätzlich alle 4 Wochen eine Vollladung durchgeführt.



**Abb. 3: Entwicklung der Batteriekapazität bei unterschiedlicher Betriebsoptimierung**

An der Weiterentwicklung dieses Ansatzes zu einer Betriebsoptimierung mittels eines variablen Strompreises wird zur Zeit gearbeitet. Dadurch ist es einfach möglich, den Nutzer in die Betriebsoptimierung miteinzubeziehen. Ein günstiger Strompreis bei einem hohen Angebot an regenerativer Energie wird den Nutzer stärker motivieren, seinen Stromverbrauch der regenerativen Erzeugung möglichst gut anzupassen. Hierdurch ist eine weitere Senkung der Betriebskosten möglich, da der Energiedurchsatz durch den Speicher sowie die Erzeugung von Strom über den Motor-Generator minimiert wird.





Die Verknüpfung der unterschiedlichen Ansätze und die Tests zu den Betriebsstrategien sollen in Zukunft verstärkt bearbeitet werden.

## **5 Ausblick**

Durch viele grundlegende Arbeiten konnten die Aufgaben der Betriebsführung sehr gut strukturiert und eingeteilt werden. Es ist nun möglich, sehr allgemeingültige Betriebsführungsstrategien zu entwickeln, die auch zu bestehenden regionalen Inselnetzen und dem Verbundnetz kompatibel sind.

Der kommunikationslose Parallelbetrieb von Stromrichtern ist die Grundlage für neue Netzregelungsverfahren. Deutlich vereinfachte Systemkonfigurationen werden dadurch in Zukunft möglich sein. Die dezentrale Netzregelung durch den Parallelbetrieb ist auch schon in kleinen Hybridsystemen möglich. Die Kompatibilität zum Verbundnetz ist damit gegeben.

Neue Möglichkeiten des Batteriemangements einschließlich einer sehr genauen Ladezustandserfassung bilden die Grundlagen für neue Strategien zur Betriebsoptimierung. Sehr vielversprechend sind hier die Arbeiten zur Alterungsabschätzung von Bleibatterien. Simulationsrechnungen zeigen, dass zukünftig mittels einer Betriebsoptimierung deutlich längere Batteriebensdauern erreicht werden können. Hierdurch sind bis zu 20% geringere Stromgestehungskosten möglich.

Mit den zur Zeit in Bearbeitung befindlichen Ansätzen zum variablen Strompreis können deutlich einfachere und für den Anlagennutzer durchsichtigere Betriebsführungsstrategien umgesetzt werden. Die Einbindung des Nutzers in die Anlagenbetriebsführung ist dadurch einfach zu realisieren.

Die Fortschritte im Bereich der Betriebsführung sollten aber nicht den Blick verstellen auf den noch immer großen Arbeitsbedarf. Viele Verfahren befinden sich noch im Ideenstadium und müssen bis zum Einsatz noch in vielen Belangen verbessert werden. Der nun erstmals mögliche Parallelbetrieb von Stromrichtern wirft sowohl im Bereich der Netzregelung wie auch bei der Betriebsoptimierung neue Fragestellungen auf. Prognoseverfahren müssen in Zukunft genutzt werden, um die Betriebsoptimierung vorausschauender zu machen. Die Sicherung des Netzbetriebes wird bei größeren Systemen mit vielen parallelen Erzeugern und Speichern eine wichtige Rolle übernehmen. Hier gibt es bislang kaum Ansätze, die für Netze mit hohem Anteil regenerativer Energien genutzt werden können.



## 6 Dank

Die Arbeiten wurden mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie sowie mit finanzieller Unterstützung der EU durchgeführt.

## 7 Literatur

- /RAPTIS 2000/ F. Raptis: Betriebsführung von modularen erweiterbaren PV- und Hybridanlagen; 2. Zwischenbericht 1999 „Modulare PV- und Hybridsystemtechnik“ BMWi, Förderkennzeichen Nr. 0329833, S. 61-70, Kassel, April 2000
- /KAISER 1997/ R. Kaiser, G. Bopp, J. Schmid: Betriebsführungsstrategien für Photovoltaik-Systeme, Forschungsverbund Sonnenenergie „Themen 96/97“, S. 61-68, Köln, Februar 1997
- /IBRAHIM 2000/ M. Ibrahim, M. Rothert, P. Strauß, P. Zacharias: Advanced Operation Control Concept for Stand-Alone PV Hybrid Systems Considering Battery Ageing, 16<sup>th</sup> European PV Solar Energy Conference and Exhibition, Glasgow, May 2000
- /BEVERUNGEN 2000/ S. Beverungen: Review of Energy Management Strategies für Hybrid Energy Systems, Interner Bericht der Gh-Kassel, Fachgebiet Rationelle Energiewandlung, Kassel, August 2000
- /BOPP 2000/ G. Bopp, R. Kaiser: Einfluß der Betriebsführung auf die Batterielebensdauer und das Systemverhalten, Forschungsverbund Sonnenenergie, Workshop „Elektrochemische Speichersysteme für regenerative Energieversorgungsanlagen“ in Ulm 1999, Berlin, Dezember 1999
- /SCHMITZ 2000/ C. Schmitz, B. Willer: Batteriemanagement für Batteriestromrichter, Forschungsverbund Sonnenenergie, Workshop „Elektrochemische Speichersysteme für regenerative Energieversorgungsanlagen“ in Ulm 1999, Berlin, Dezember 1999