

# Betriebsführungsstrategien für Photovoltaik-Systeme

von Robert Kaiser,  
Georg Bopp und  
Jürgen Schmid

## Überblick

Die Betriebsführung hat einen erheblichen Einfluß auf die Funktion eines netzunabhängigen Photovoltaik-Systems, auf die Lebensdauer der Systemkomponenten und die Zufriedenheit der Nutzer. Die heute eingesetzten Betriebsführungssysteme werden den an sie gestellten Anforderungen noch nicht in dem gewünschten Umfang gerecht. Der Beitrag erläutert die Funktionsprinzipien konventioneller Regelungen und einer optimalen Betriebsführung und stellt Untersuchungen und neu entwickelte Verfahren vor, welche die Verbesserung der Betriebsführung zum Ziel haben.

Operations control has a significant influence on the performance of a stand-alone photovoltaic system, on the lifetime of the system components and on the users satisfaction. The control procedures implemented up to now do not yet meet the requirements to the desired degree. The article explains the operation principles of conventional and optimal control systems and presents investigations and procedures developed with the objective to improve the operation control of photovoltaic systems.

## 1. Einleitung

Die Funktion eines netzunabhängigen Photovoltaik-Systems (PV-Inselsystem) hängt nicht nur von der Qualität der einzelnen Systemkomponenten ab, sondern auch von deren Zusammenwirken im Gesamtsystem. Die Aufgabe des Betriebsführungssystems ist es, das Zusammenwirken der Systemkomponenten zu koordinieren und die Energieflüsse zwischen Energieerzeugern, Energiespeichern und den Verbrauchern zu steuern (Abbildung 1). Mit der Komplexität des Systems steigen die Anforderungen an die Betriebsführung. Die Bedeutung, die der Betriebsführung zukommt, liegt darin, daß sie Auswirkungen auf die Zuverlässigkeit der photovoltaischen Energieversorgung und die Lebensdauer der Komponenten (vor allem der Batterie und des Zusatzenergieerzeugers) hat; somit nimmt die Funktion der Betriebsführung auch Einfluß auf die Zufriedenheit der Nutzer. Die bisherigen Erfahrungen mit dem Betrieb von PV-Inselsystemen zeigen, daß einfache Regelungen, die lediglich die Einhaltung bestimmter Grenzwerte (z.B. der Batteriespannung) überwachen, insbe-

sondere bei komplexen Systemen einen optimalen Betrieb des Systems nicht gewährleisten und sogar zu einem vorzeitigen Ausfall von Komponenten führen können. In erster Linie ist davon die Batterie betroffen, die in vielen Systemen bereits nach wenigen Jahren ersetzt werden mußte, was über die Gesamtnutzungsdauer des Systems eine erhebliche Steigerung der Kosten zur Folge hat (Abbildung 2). Die Ursachen liegen im häufigen Auftreten von Betriebsituationen und -zuständen, die eine beschleunigte Alterung oder unmittelbare Schädigungen der Batterie zur Folge haben. Mit den bisher realisierten Steuerungen lassen sich solche ungünstigen Betriebsweisen der Batterie offensichtlich nicht vermeiden.

## 2. Von der konventionellen zur optimalen Betriebsführung

Die Funktion der in der Praxis realisierten Steuerungen und Betriebsführungssysteme besteht darin, daß Maßnahmen (z.B. das Abschalten der Verbraucher oder der Start des Zusatzenergieerzeugers) dann getroffen werden, wenn bestimmte Größen (Ladezustand, Spannung) ihre zulässigen Wertebereiche überschreiten (Abbildung 3). Die Weiterentwicklung und Verbesserung dieser „grenzwertorientierten“ Steuerungen hatte bisher zum Inhalt, Größen zu verwenden, die eindeutige Aussagen über den Systemzustand zulassen (z.B. den Ladezustand statt der Spannung), sowie auf der Basis der Erfahrungen mit realisierten Anlagen die zulässigen Wertebereiche dieser Größen besser anzupassen und weitere Maßnahmen wie z.B. eine regelmäßige Gasungsladung einzuführen.

Die Kopplung der Maßnahmen an Grenzwerte kann zwar im Mittel zu einem akzeptablen Betriebsverhalten führen, erlaubt es jedoch nicht, die in der jeweiligen Situation beste oder optimale Maßnahme zu ergreifen. So ist es beispielsweise günstig, den Zeitpunkt für das Einleiten einer Gasungsladung so festzulegen, daß die durch eine Säureschichtung möglichen Schädigungen noch vermieden werden, und daß zugleich der für die Vollaftung benötigte Zusatzenergiebedarf möglichst gering ist. Das Einleiten der Vollaftung nach festgelegten Zeitinter-

Dipl.-Phys. Robert Kaiser ist freier Mitarbeiter und Dipl.-Ing. Georg Bopp ist Leiter der Arbeitsgruppe Photovoltaische Inselanlagen in der Abteilung Abteilung Photovoltaische Systeme und Meßtechnik am Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (Fraunhofer ISE), Freiburg.

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schmid ist Vorstandsmitglied und verantwortlich für den Bereich Forschung und Entwicklung im Institut für Solare Energieversorgungssysteme (ISET), Kassel.

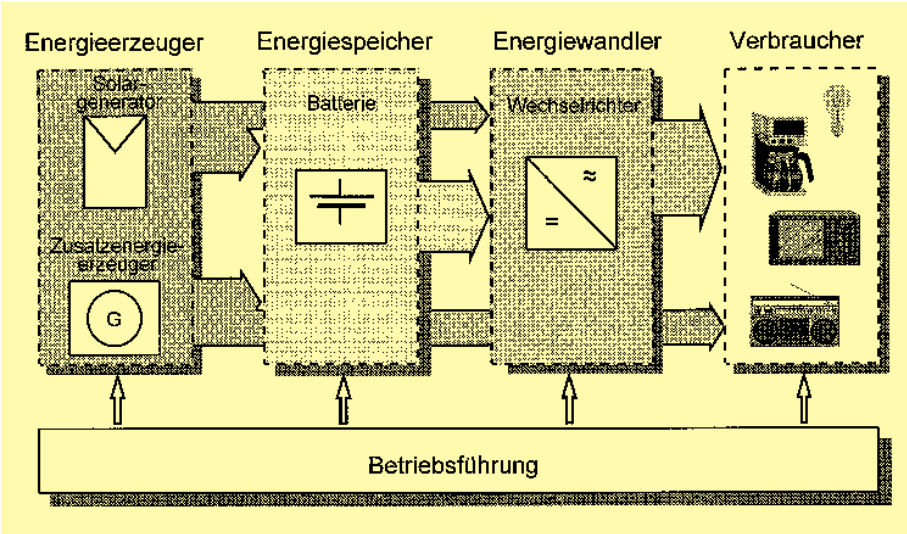
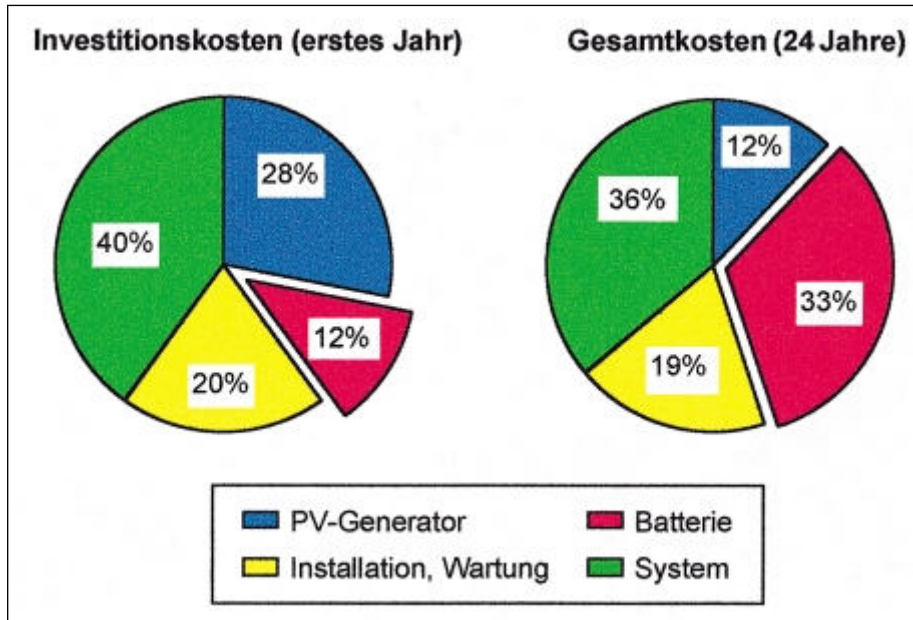


Abbildung 1: Zusammenwirken der Betriebsführung mit einem netzunabhängigen Photovoltaik-System mit Zusatzenergieerzeuger zur Versorgung von 230 V Verbrauchern

Abbildung 2: Anteile der Systemkomponenten an den Investitionskosten und an den Gesamtkosten, die während der Nutzungsdauer von 24 Jahren entstehen. Diese Kostenaufteilung ergibt sich bei einer Lebensdauer des Dieselgenerators von 12 Jahren und der Bleibatterie von 4 Jahren. Die Gesamtkosten betragen etwas mehr als das Zweifache der Investitionskosten.



vallen kann dagegen dazu führen, daß bereits eine Schädigung der Batterie aufgetreten ist (sie also zu spät kommt) oder eigentlich nicht erforderlich ist, wenn z.B. kurz vorher während einer Periode hoher Einstrahlung mit der solar erzeugten Energie eine ausreichende Volladung erfolgte.

Als optimal ist das Verhalten eines Betriebsführungssystems dann zu bezeichnen, wenn die zeitliche Abfolge der Maßnahmen, z.B. die Zeitpunkte

des Ein- und Ausschaltens des Zusatzenergieerzeugers (die „Strategie“) so festgelegt wird, daß die angestrebten Ziele (z.B. geringer Zusatzenergieverbrauch, optimale Nutzung der solar erzeugten Energie, schonender Batteriebetrieb, zufriedene Nutzer, usw.) möglichst weitgehend erreicht werden, der Nutzen der Strategie also möglichst groß ist. Ein Betriebsführungssystem, das auf dem Konzept einer solchen „nutzenorientierten“ Steuerung basiert (Abbildung 4), muß

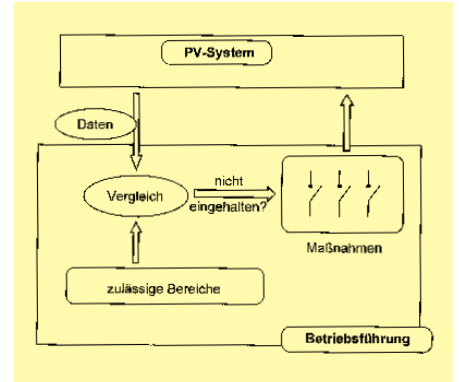


Abbildung 3: Funktionsschema einer grenzwertorientierten Steuerung

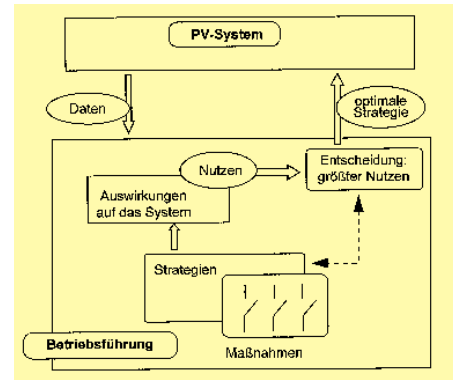
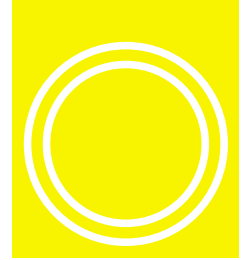


Abbildung 4: Funktionsschema einer nutzenorientierten Betriebsführung. Für die Bewertung der möglichen Strategien (z.B. der Zeitpunkte des Ein- und Ausschaltens des Zusatzenergieerzeugers) werden vom Betriebsführungssystem deren erwartete Auswirkungen (z.B. Treibstoffverbrauch, Verschleiß des Zusatzenergieerzeugers, Kapazitätsverlust der Batterie) bestimmt. Ausgewählt wird die Folge von Maßnahmen, die den größten Nutzen hat. Der Nutzen drückt die Bewertung der Auswirkungen einer Strategie aus und hängt beispielsweise davon ab, ob mehr Wert auf eine lange Batterielebensdauer oder einen geringen Treibstoffverbrauch gelegt wird (falls etwa der Transport des Treibstoffs mit hohen Kosten verbunden ist).

in der Lage sein, die Auswirkungen der verschiedenen möglichen Strategien auf das PV-System (z.B. den Zusatzenergiebedarf, die Alterung der Batterie) vorzuberechnen. Der Nutzen, der den einzelnen Strategien zugemessen wird, ergibt sich aus der Bewertung der erwarteten Auswirkungen im Hinblick auf die angestrebten



Ziele. Gewählt und in die realen Betriebsführungsmaßnahmen umgesetzt wird schließlich die Strategie mit dem größten Nutzen. Im Unterschied zu den bisher eingesetzten Steuerungen, die lediglich auf momentane Werte bestimmter Merkmale reagieren, zeigt ein solches nutzenorientiertes Betriebsführungssystem ein planendes Verhalten. In der Literatur wurden verschiedentlich Untersuchungen vorgestellt, um diesen Optimierungsansatz für die Weiterentwicklung von Betriebsführungssystemen nutzbar zu machen [1] [2] [3]. Allerdings wird aus diesen Arbeiten nicht ersichtlich, wie diese Verfahren in ein praxistaugliches Betriebsführungssystem umgesetzt werden können.

Die Möglichkeiten für Verbesserungen von Betriebsführungssystemen und speziell die Umsetzung des nutzenorientierten Konzepts in die Praxis hängen von bestimmten Voraussetzungen ab. Eine optimale Betriebsführung ist um so besser zu erreichen, je mehr Möglichkeiten für Eingriffe in den Betriebsablauf vorhanden sind. So ermöglicht beispielsweise die Reduzierung des Verbrauchs durch das Abschalten einzelner Verbraucher eine flexiblere Reaktion als ein kompletter Lastabwurf. Zum anderen hängt die Möglichkeit, den Nutzen einzelner Maßnahmen oder einer Strategie bestimmen zu können, vom Umfang und der Qualität der Informationen und Daten über den Zustand des Systems sowie über die Einstrahlung und den Verbrauch ab. Je genauer und vollständiger diese Informationen sind, desto besser können die Auswirkungen der Maßnahmen vorausgesehen und die Betriebsführung an die jeweilige Betriebssituation angepaßt werden (Beispiele für solche Informationen sind eine Vorhersage der Einstrahlung und Daten über den Alterungszustand der Batterie).

Unsere Arbeiten zur Weiterentwicklung der Betriebsführung, von denen im folgenden einige Untersuchungen vorgestellt werden, umfassen daher zwei Themenfelder. Gegenstand des ersten Bereichs ist die Analyse des Problems der Optimierung von Betriebsführungssystemen und die Suche nach neuen Konzepten für die Entwicklung und Realisierung leistungsfähiger Betriebsführungssysteme. Als Basis für

diese Untersuchungen wird das begriffliche Instrumentarium der Entscheidungstheorie herangezogen, die ihren Ursprung und ihre hauptsächlichste Anwendung in den Wirtschaftswissenschaften hat [4]. Die Entscheidungstheorie beschreibt Situationen, in denen Menschen zielbezogene Entscheidungen treffen. Ihr methodischer Ansatz besteht darin, das Entscheidungsproblem mit Hilfe eines Entscheidungsmodells zu beschreiben, zu strukturieren und anhand dieses Modells eine Lösung zu finden.

Die Betriebsführung von Photovoltaik-Systemen kann ebenfalls als eine solche Entscheidungssituation betrachtet werden, wobei an die Stelle der Entscheidung von Menschen die Entscheidung des Betriebsführungssystems tritt. Bei der Analyse mit dem Entscheidungsmodell rücken Fragen nach der Struktur der Entscheidungssituation, dem Zustandekommen einer Entscheidung und den Voraussetzungen für eine Optimierung in den Vordergrund. Diese Gesichtspunkte wurden bei den bisherigen Bemühungen um eine Verbesserung der Betriebsführung nicht thematisiert, ihre Berücksichtigung spielt jedoch für die Umsetzung des nutzenorientierten Konzepts in ein Betriebsführungsverfahren eine entscheidende Rolle.

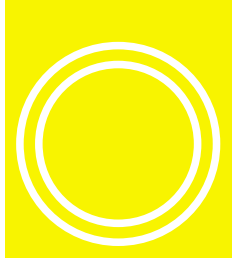
*Abbildung 5: Schädigung einer Bleibatterie durch die Korrosion der Ableiter, die die Elektroden der Batterie verbinden. Die Batterie wurde über einen Zeitraum von 4 Jahren in einem PV-Inselsystem betrieben.*



Inhalt des zweiten Themenbereichs sind Untersuchungen, um die Vorteile und Schwierigkeiten planender Betriebsführungssysteme zu ermitteln, und die Entwicklung von Verfahren, um die oben angesprochenen Voraussetzungen für die Optimierung von Betriebsführungsstrategien zu schaffen.

### 3. Ein Ansatz zur Berücksichtigung der betriebsbedingten Alterung der Bleibatterie

Die beschleunigte Alterung und der vorzeitige Ausfall der Bleibatterien in PV-Systemen ist eine wesentliche Motivation für die Weiterentwicklung von Betriebsführungssystemen (Abbildung 5). Eine Ursache für dieses Phänomen ist darin zu sehen, daß die üblicherweise als Regelungsgröße verwendete Batteriespannung nur eine sehr grobe Schätzung des Ladezustands erlaubt, was bei den in PV-Systemen üblichen kleinen Strömen häufig zur Tiefentladung der Batterie führt. Mit der Entwicklung von Verfahren für die Ladezustandsschätzung ist diese Problematik zwar entschärft [5]. Durch die genaue Kenntnis des momentanen Ladezustands lassen sich zwar unmittelbar kritische Zustände wie die Tiefentladung vermeiden, doch es läßt sich keine Aussage darüber machen, ob



sich die Batterie infolge des bisherigen Betriebsverlaufs bereits in einem kritischen Zustand befindet (z.B. starke Säureschichtung), der beispielsweise möglichst kurzfristig eine Gasungsladung erforderlich macht, oder ob noch keine zu Schädigungen führenden Situationen aufgetreten sind.

Um den Batteriezustand für die Betriebsführung berücksichtigen zu können, ist eine Größe erforderlich, die eine Information über die Prozesse, welche die beschleunigte Alterung verursachen, enthält oder die ein Maß für das momentane Gefährdungspotential der momentanen Betriebsituation ist. Im Prinzip ist eine solche Größe mit Hilfe eines mathematischen Modells, das die Alterung der Batterie in Abhängigkeit von der Entwicklung der Betriebsituation beschreibt, zu erhalten. Wegen des hohen Rechenaufwands, der zur Darstellung der für die Alterung verantwortlichen elektrochemischen Prozesse erforderlich ist, wird ein solches Alterungsmodell für ein Betriebsführungssystem jedoch nicht direkt verwendbar sein.

Andererseits wurden aufgrund der zahlreichen Erfahrungen mit dem Betrieb von netzunabhängigen PV-Systemen inzwischen Erkenntnisse über den Zusammenhang bestimmter Betriebsituationen und -zustände und den Alterungsprozessen erarbeitet, die zur Formulierung von Empfehlungen für die Betriebsführung der Batterie führten [6]. Das Anliegen, dieses Wissen mit einem vertretbaren mathematischen und numerischen Aufwand für die Betriebsführung zugänglich zu machen, führte zur Entwicklung eines Verfahrens, das eine Bewertung der Betriebsverlaufs hinsichtlich seiner Auswirkung auf die Alterung der Batterie vornimmt [7]. Da die Kenntnisse vorwiegend in Form qualitativer Beschreibungen der Zusammenhänge formuliert sind, wurde für die Umsetzung in einen Algorithmus die Theorie der unscharfen Mengen (Fuzzy-Logik) verwendet, die es ermöglicht, unscharfe und qualitative Beschreibungen und Größen quantitativ darzustellen und zu verarbeiten.

Das zentrale Funktionselement des Fuzzy-Betriebsbewertungsmoduls ist die Wissensbasis, die das Expertenwissen in Form von Regeln repräsentiert

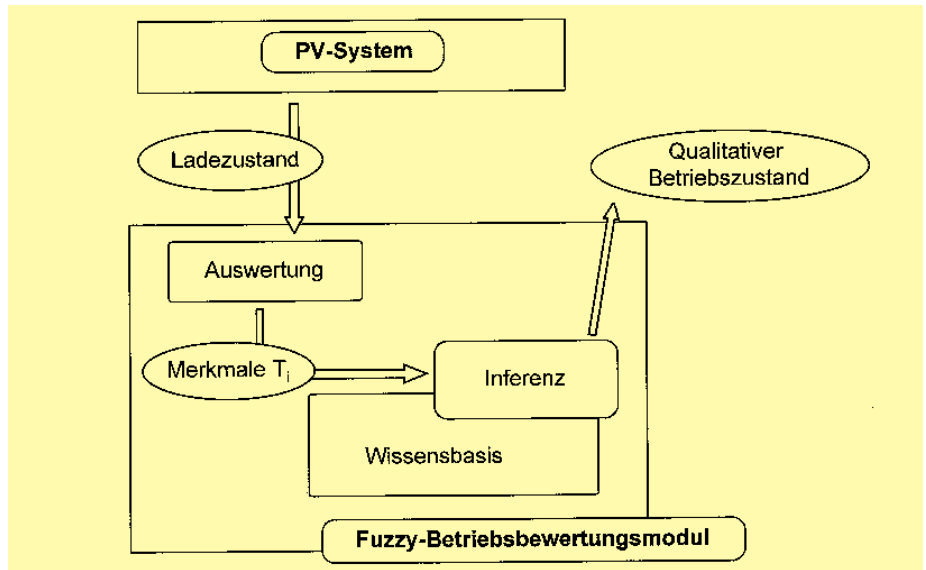


Abbildung 6: Struktur des Fuzzy-Betriebsbewertungsmoduls. Die Wissensbasis repräsentiert die von den Experten formulierten Zusammenhänge zwischen dem Betriebsverlauf und dessen Auswirkungen auf die Alterung der Batterie. Durch das Inferenzelement wird dieses Wissen mit den momentanen Werten der Merkmale, die den Betriebsverlauf charakterisieren, verknüpft und daraus der Wert des Qualitativen Betriebszustands abgeleitet.

(Abbildung 6). Diese Wissensbasis wurde auf der Basis einer Befragung von Mitarbeitern des Instituts zusammengestellt, die eine langjährige Erfahrung mit der Planung, dem Betrieb und der Wartung von PV-Systemen haben. Sie wurden gebeten zu formulieren, wie sich ihrer Einschätzung nach bestimmte Betriebsituationen auf die Alterung der Batterie auswirken. Als Bewertungsgröße, die diese Einschätzung wiedergibt und die ein Maß dafür ist, als wie gut oder kritisch der Zustand der Batterie anzusehen ist, wurde der "Qualitative Batteriezustand"  $\Theta$  definiert. Der Wertebereich von  $\Theta$  liegt zwischen 0 und 1, was der Bewertung "sehr kritisch" bzw. "sehr gut" entspricht.

Als Merkmale, nach denen diese Einschätzung vorgenommen wurde, wurden von den Experten die Zeiten seit der letzten Vollladung  $T(F)$  gewählt, in denen die Batterie in vier verschiedenen Bereichen des Ladezustands ( $F_{sehr\ tief}$ ,  $F_{tief}$ ,  $F_{mittel}$ ,  $F_{hoch}$ ) betrieben wurde. Die Aussagen wurden als Regeln der Form

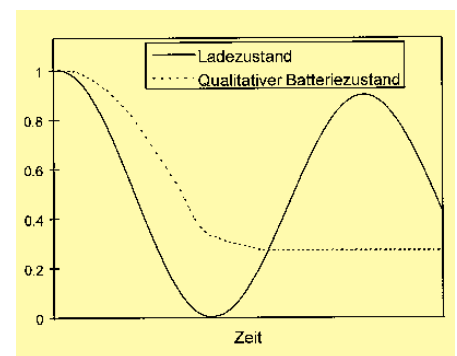
wenn  $T(F_{tief})$  kurz und  $T(F_{mittel})$  mittel und ... dann ist  $\Theta$  kritisch

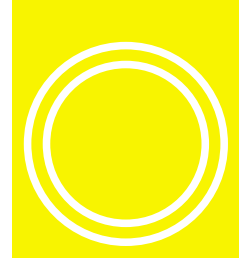
formuliert (Beispiel). Generelle Tendenz der Antworten war, daß der Bat-

teriezustand um so kritischer eingeschätzt wurde, je länger die Batterie im teilentladenen Zustand betrieben wurde und je tiefer die Entladung war. Die Regelbasis wurde mit einem kommerziellen Entwicklungssystem implementiert und kann als C-Programmcode in ein Simulationsprogramm oder in ein Betriebsführungssystem eingebunden werden.

Der Betrieb im teilentladenen Zustand hat eine stetige Abnahme des Wertes von  $\Theta$  zur Folge, eine unvollständige Ladung führt dagegen nicht zu einer Erholung des Batteriezustandes (Abbildung 7). Dies entspricht der Situation im realen Betrieb, da die infolge des

Abbildung 7: Beispiel für die Entwicklung des Qualitativen Batteriezustands bei einem sinusförmigen Verlauf des Ladezustands





Betriebsverlauf aufgetretenen Veränderungen (z.B. Sulfatierung und beginnende Säureschichtung) nur durch eine Vollladung wieder rückgängig gemacht werden können. Durch eine Vollladung nimmt  $\Theta$  den Wert 1 an, die Batterie wird also unabhängig von der Vorgeschichte in den optimalen Zustand gebracht. Langfristige Veränderungen, die in der Realität zu einer Verringerung der verfügbaren Kapazität führen, werden dadurch vom Fuzzy-Betriebsbewertungsmoduls nicht wiedergegeben, lassen sich prinzipiell jedoch mit einer Weiterentwicklung des Verfahrens berücksichtigen.

Der Einsatz des Fuzzy-Betriebsbewertungsmoduls in einem Betriebsführungssystem wurde mit Simulationsrechnungen für ein einfaches autonomes PV-System untersucht, das zur Versorgung einer Beleuchtungseinrichtung, die in den Abend- und Morgenstunden betrieben wird, dient. Der Qualitative Batteriezustand wird vom Betriebsführungssystem zur Steuerung des Lastabwurfs ausgewertet. Als Steuergröße dient der bewertete Ladezustand  $F_{\Theta}$ , der durch eine Gewichtung des Ladezustands mit  $\Theta$  berechnet wird. Der Wert von  $F$  stimmt für  $\Theta = 1$  mit dem tatsächlichen Ladezustand überein. Je kleiner  $\Theta$  ist, desto größer ist die Differenz  $F_{\text{real}} - F_{\Theta}$ . Der Lastabwurf erfolgt dann, wenn  $F_{\Theta}$  einen vorgegebenen Wert unterschreitet. Die effektiv nutzbare Kapazität hängt somit vom Wert des qualitativen Batteriezustands ab und wird im Laufe der Zeit immer kleiner, so daß der weitere Betrieb bei tiefen Ladezuständen vermieden wird.

Die Simulationsrechnungen wurden über den Zeitraum eines Jahres durchgeführt. Als Vergleich diente ein System, bei dem der Lastabwurf über den tatsächlichen Ladezustand gesteuert wird. Um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wurden die Steuerungsparameter so eingestellt, daß die jährliche solare Deckungsrate<sup>1</sup> bei beiden Systemen gleich war. Das Abschalten der Last erfolgt bei der konventionellen Regelung, wenn der mittlere Ladezustand innerhalb einer Stunde einen Wert von 40% unter-

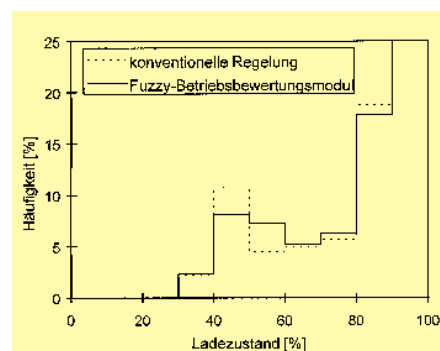
<sup>1</sup> Die Deckungsrate gibt den Anteil des Gesamtenergiebedarfs an, der von der Energie, die vom Solargenerator erzeugt wird, gedeckt wird.

schreitet. Für das System mit dem Fuzzy-Betriebsbewertungsmodul wurde der minimal zulässige Wert des bewerteten Ladezustands  $F_{\Theta}$  auf 30% eingestellt. Bei diesen Werten beträgt die Jahresdeckungsrate für beide System 92.5%.

Eine Bewertung der unterschiedlichen Arten der Betriebsführung erfordert strenggenommen die Berechnung der Lebensdauer der Batterie. Da die Entwicklung eines Alterungsmodells der Batterie zum Zeitpunkt dieser Untersuchung noch nicht abgeschlossen war [8] [9], konnte eine solche Bewertung nicht durchgeführt werden. Um dennoch eine Aussage darüber machen zu können, wie sich der Einsatz des Fuzzy-Betriebsbewertungsmoduls auswirkt, wurde die Häufigkeitsverteilung des Ladezustands berechnet. Die Häufigkeitsverteilung erlaubt gewisse die Rückschlüsse auf die Batterielebensdauer. Ein häufiger Betrieb bei hohen Ladezustand ist günstig, während der Betrieb bei niedrigen Ladezuständen die Alterung der Batterie beschleunigen kann. Das System mit dem Fuzzy-Betriebsbewertungsmodul zeigt trotz der gleich hohen Deckungsrate eine günstigere Verteilung der Ladezustände, die darauf zurückzuführen ist, daß die Batterie bei ungünstigen Betriebs-situationen (u.a. im Dezember) nicht so tief entladen wird (Abbildung 8).

Die Einsatzmöglichkeiten einer solchen Bewertung des Batteriezustandes und die möglichen positiven Effekte sind größer, wenn ein Zusatzener-

Abbildung 8: Häufigkeitsverteilung des Ladezustands mit und ohne Berücksichtigung des Batteriezustands durch das Betriebsführungssystem (das Auftreten von Ladezuständen im Bereich von 30% bis 40% bei der konventionellen Regelung ist durch das Simulationsverfahren bedingt).



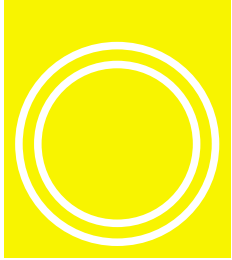
gieerzeuger vorhanden ist. In weiteren Untersuchungen soll das Fuzzy-Betriebsbewertungsmodul eingesetzt werden, um mit dem Zusatzenergieerzeuger eine Ausgleichsladung zu dem Zeitpunkt vorzunehmen, wenn sie aufgrund des Batteriezustandes erforderlich ist.

#### 4. Beeinflussung des Verbraucherverhaltens

Neben der Einstrahlung ist der Energieverbrauch die zweite Einflußgröße, die für die Betriebsführung eine Rolle spielt. Im Unterschied zur Einstrahlung kann der Verbrauch jedoch in vielen Fällen in gewissen Grenzen beeinflusst werden. Dies geschieht durch eine zeitliche Verschiebung des Betriebs von Verbrauchern, womit sich das Bedarfsprofil an das Energieangebot anpassen läßt, oder durch das Abschalten von Verbrauchern, was den Energiebedarf insgesamt reduziert. Mit der Kontrolle des Verbrauchs ist eine weitere Maßnahme für die Betriebsführung verfügbar, was die Flexibilität erhöht und das Optimierungspotential vergrößert. Ein Lastmanagement auf rein technischer Basis, das z.B. den Betrieb von Verbrauchern automatisch blockiert, kann beim Nutzer jedoch zur Unzufriedenheit und zu einer Minderung der Akzeptanz der photovoltaischen Energieversorgung führen, wenn die Maßnahmen nicht in den Betriebsablauf passen oder die Gründe für das Ein- und Ausschalten von Geräten nicht einsichtig werden.

Es ist daher anzustreben, eine Änderung des Verbrauchs nicht allein durch technische Maßnahmen zu erzwingen, sondern den Nutzer durch das Mitteilen von Informationen zu motivieren, sein Verhalten zu ändern. Eine Information, die vom Nutzer ohne Schwierigkeiten zu verstehen ist und deren Zusammenhang mit der Funktion des PV-Systems gut einsichtig zu machen ist, ist ein dynamischer Stromtarif. Der Strompreis, der auf einer Bewertung des Systemzustands basiert, wird vom Betriebsführungssystem laufend ermittelt, aktualisiert und dem Nutzer mitgeteilt.

Um die Akzeptanz und die möglichen Auswirkungen auf das Verbraucherverhalten zu untersuchen, wurde in Zusammenarbeit mit dem Deutschen



Alpenverein (DAV) im Mai 1995 auf dem Rotwandhaus ein dynamischer Stromtarif eingeführt [10]. Das Rotwandhaus ist eine ganzjährig bewirtschaftete Hütte in den bayrischen Alpen südöstlich von München und liegt auf einer Höhe von 1765 m (Abbildung 9 und 10). Das Energieversorgungssystem besteht aus einem 5 kW Solargenerator und einer 20 kW Windkraftanlage, dem Batteriespeicher sowie einem Dieselgenerator.

Die Ziele, die für die Berechnung des Strompreises maßgebend sind, sind die optimale Nutzung der regenerativen Energie, eine geringe Belastung der Batterie und ein schonender Betrieb des Dieselgenerators. Der aktuelle Strompreis wird über eine sogenannte Strompreisfunktion aus den momentan verfügbaren regenerativen Energieressourcen ermittelt, die anhand der momentanen Leistung des Solargenerators und der Windkraftanlage sowie dem Ladezustand der Batterie berechnet werden (Abbildung 11). Der Betrieb des Dieselgenerators führt zu einem hohen Strompreis, der bei niedrigem Ladezustand der Batterie 1,50 DM/kWh und bei ausreichendem Ladezustand 2,00 DM/kWh beträgt. Die regenerativen Energieressourcen werden dann nicht weiter berücksichtigt. Der Verlauf der Strompreisfunktion wurde auf der Basis der gemessenen Verbrauchsdaten eines Referenzjahres so festgelegt, daß der mittlere Strompreis 1,00 DM/kWh be-

trägt, wenn es durch die Information über den aktuellen Strompreis zu keiner Veränderung des Verbraucherverhaltens gegenüber dem Referenzjahr kommt [10].

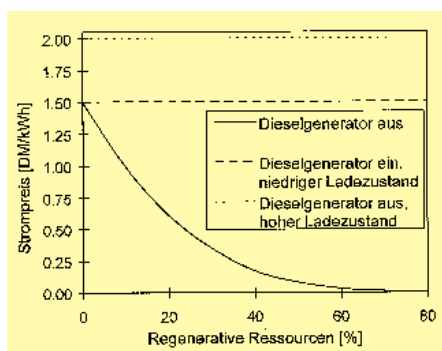


Abbildung 9: Rotwandhaus mit Solargenerator und Windkraftanlage

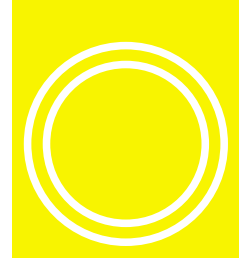
Abbildung 10: Blick auf die Strompreisanzeige an der Theke des Rotwandhauses



trägt, wenn es durch die Information über den aktuellen Strompreis zu keiner Veränderung des Verbraucherverhaltens gegenüber dem Referenzjahr kommt [10].

Seit der Einführung des dynamischen Stromtarifs ließen sich Veränderungen des Verbraucherverhaltens beobachten, die sich in erster Linie auf die Benutzung der Waschmaschine und den Betrieb der Wasserpumpe auswirkten. Eine abschließende Beurteilung ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch nicht möglich, da der Tarifversuch, der

eine tatsächliche Abrechnung der Stromkosten nach dem dynamischen Stromtarif beinhaltet, entgegen den ursprünglichen Planungen noch nicht begonnen hat und der angezeigte Strompreis nur eine unverbindliche Information darstellt. Die Gründe für diese Verzögerung liegen darin, daß hier zum ersten Mal auf einer Hütte des Deutschen Alpenvereins eine Abrechnung der Stromkosten eingeführt werden soll, eine vertragliche Vereinbarung zwischen dem Pächter und dem DAV aber noch nicht zustande kam.



### 5. Verwendung von Einstrahlungsprognosen für die Betriebsführung

Die Vorhersage der Einstrahlung und des Energieverbrauchs ist eine wesentliche Voraussetzung für die Optimierung eines Betriebsführungssystems. Da der Vorhersagezeitraum immer sehr kurz gegenüber dem Zeitraum sein wird, auf den sich die Ziele der Betriebsführung beziehen, ist zu prüfen, ob mit einer kurzfristigen Vorhersage überhaupt eine Verbesserung gegenüber einer gut angepaßten konventionellen Steuerung erzielt werden kann.

Zur Klärung dieser Frage wurden mit Simulationsrechnungen die Auswirkungen des Einsatzes eines planenden Betriebsführungssystems im Energieautarken Solarhaus (Abbildungen 12 und 13), in dem ein Solar-Wasserstoff-Hybridsystem installiert ist, untersucht [11]. Mit dem Wasserstoff als Langzeitspeicher ist es möglich, trotz der geringen Einstrahlung im Winterhalbjahr die ganzjährige Versorgung der Verbraucher mit elektrischer Energie ohne den Einsatz eines Zusatzenergieerzeugers sicherzustellen. Um den Einfluß der Einstrahlungsprognose zu ermitteln, wurde der Vorhersagezeitraum von 1-10 Tagen variiert. Als ein

Ziel der Optimierung wurde die möglichst effiziente Nutzung der vom Solargenerator erzeugten Energie vorgegeben. Für die Bestimmung des Nutzens, auf dem die Entscheidung über die Betriebsführungsstrategie basiert, wurden der Energieüberschuß, der bei voller Batterie entsteht, und die Energieverluste, die durch die Batterie und das Wasserstoffsystem verursacht werden, berücksichtigt. Ein weiteres Ziel war eine schonende Betriebsweise der Batterie, wobei tiefe Ladezustände zu vermeiden sind. Im Hinblick auf diese Ziele waren die optimalen Ein- und Ausschaltzeitpunkte des Elektrolyseurs und der Brennstoffzelle zu bestimmen. Als Nebenbedingungen waren vorgegeben, daß der Energiebedarf zu 100% gedeckt und für den Betrieb des Elektrolyseurs eine Mindestbetriebsdauer von 1 Stunde eingehalten werden mußte.

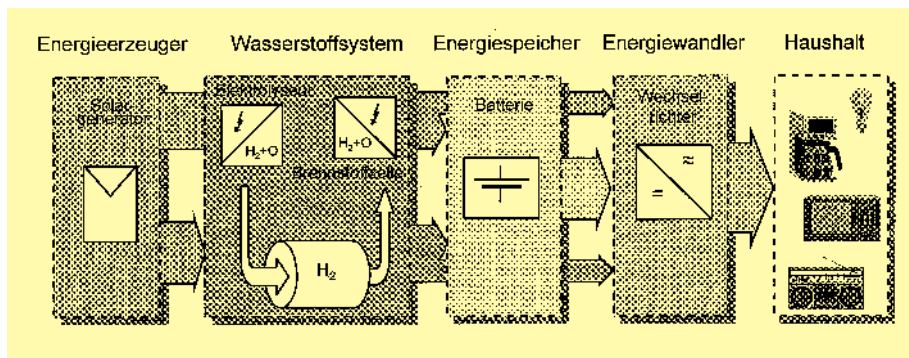


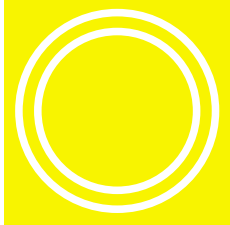
Abbildung 12: Schema des elektrischen Energieversorgungssystems des Energieautarken Solarhauses

Abbildung 13: Energieautarkes Solarhaus in Freiburg



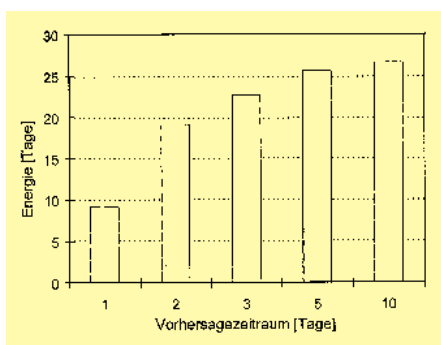
Die optimale Betriebsführungsstrategie für den Betrieb des Elektrolyseurs und der Brennstoffzelle wurde jeden Tag um 0 Uhr für den jeweils nächsten Vorhersagezeitraum berechnet. Als Prognosewerte dienten die Tagessummen der Einstrahlung, wobei die in der Realität immer vorhandene Unsicherheit der Vorhersage vernachlässigt wurde. Zum Vergleich wurden Simulationsrechnungen für dasselbe System, jedoch mit einer Betriebsführung ohne eine Einstrahlungsprognose, wie sie im Energieautarken Solarhaus realisiert ist, durchgeführt. Der Betrieb des Elektrolyseurs ist dabei nur zulässig, wenn der Ladezustand der Batterie einen vorgegebenen Wert überschreitet und die Einstrahlung größer als 200 W/m<sup>2</sup> ist. Da ein kurzzeitiger Betrieb des Elektrolyseurs vermieden werden soll, wird das Zuschalten nur dann erlaubt, wenn erwartet werden kann, daß die Einstrahlung über mehrere Stunden hoch sein wird. Als Kriterium für diese einfache Trendvorhersage dient die Zunahme der Einstrahlung am Beginn des Tages. Ist diese Zunahme größer als ein bestimmter Wert, wird dies als Hinweis auf einen sonnigen Tag gewertet und der Betrieb des Elektrolyseurs freigegeben. Das Ein- und Ausschalten der Brennstoffzelle erfolgt in Abhängigkeit vom Ladezustand der Batterie.

Als Maß für die Auswirkungen auf das Betriebsverhalten, die sich bei dem



Einsatz des planenden Betriebsführungssystems gegenüber der konventionellen Steuerung einstellen, wurde der Unterschied des Wasserstoff-Volumens am Beginn und Ende eines Jahres ausgewertet. In [Abbildung 14](#) ist für verschiedene Vorhersagezeiträume dargestellt, wieviel Tage der elektrische Energiebedarf des Energieautarken Solarhauses mit dem zusätzlichen Wasserstoffvorrat, der sich durch den Einsatz des planenden Betriebsführungssystems ergibt, gedeckt werden könnte. Die Verbesserung gegenüber der konventionellen Steuerung ist bei Vorhersagezeiträumen von 1 bis 3 Tagen besonders ausgeprägt, während längerfristige Prognosen nur noch in einem geringen zusätzlichen Mehrertrag resultieren. Da Wetterprognosen im Bereich von wenigen Tagen heute mit einer guten Genauigkeit erstellt werden können, verspricht der Einsatz eines planenden Betriebsführungssystems in PV-Systemen mit Langzeitspeichern vorteilhaft zu sein.

*Abbildung 14: Durch den Einsatz eines planenden Betriebsführungssystems gegenüber der konventionellen Regelung zusätzlich verfügbare Energie bei verschiedenen Vorhersagezeiträumen (in Einheiten des durchschnittlichen täglichen Energieverbrauchs von ca. 5,5 kWh)*



## 6. Zusammenfassung und Ausblick

Die bisher verwendeten grenzwertorientierten Betriebsführungskonzepte bieten für die Optimierung nur eingeschränkte Möglichkeiten. Das langfristige Ziel ist die Realisierung eines planenden Betriebsführungssystems, das auf dem nutzenorientierten Funktionsprinzip basiert und sich darin von den herkömmlichen Regelungen unterscheidet. Wie die Untersuchung zur Verwendung von Einstrahlungspro-

gnosen zeigt, können durch den Einsatz eines planenden Betriebsführungssystems deutliche Verbesserungen des Betriebsverhaltens erreicht werden. Da mit einer perfekten Vorhersage allerdings Bedingungen zugrundegelegt waren, die in der Realität nicht gegeben sind, zeigen die Ergebnisse das maximal mögliche Optimierungspotential auf. Um die prinzipiellen Vorteile planender Betriebsführungssysteme für die Praxis nutzbar zu machen, ist die Entwicklung von Konzepten und Verfahren erforderlich, die es ermöglichen, auch mit unsicheren und unscharfen Informationen eine für die jeweilige Betriebsituation optimale Strategie zu bestimmen. Da Informationen über den Systemzustand und dessen erwartete Entwicklung zu den Voraussetzungen für eine Optimierung der Betriebsführungsstrategie gehören, werden die Entwicklung von Verfahren zur Vorhersage der Einstrahlung und des Verbrauchs und zur Berücksichtigung der betriebsbedingten Alterung der Batterie Schwerpunkte der weiteren Arbeiten sein.

## Dank

Die vorgestellten Arbeiten wurden mit Mitteln des BMBF gefördert. Wir bedanken uns beim Deutschen Alpenverein für die Zusammenarbeit bei der Einführung des dynamischen Stromtarifs auf dem Rotwandhaus, bei Prof. Andreas Wagner (Universität Karlsruhe) sowie bei unseren Kollegen Alfons Armbruster, Markus Rehm und Joachim Zuckschwerdt.

## Literatur

- [1] D. Heinemann  
„Zur Steuerung regenerativer Energieversorgungssysteme unter Verwendung von Energiewettervorhersagen“, Dissertation, Universität Oldenburg (1990)
- [2] M. Hancock, H.R. Outhred, R.J. Kaye  
„A new Method for Optimising the Operation of Stand-alone PV Hybrid Power Systems“, 1st World Conf. on Photovoltaic Energy Conversion, Hawaii (1994), 1188-1191
- [3] G.C. Seeling: „Optimisation of PV-hybrid Energy System Design and System Operation Control Using Genetic Algorithms“, 13th EU Solar Energy Conf., Nice (1995), 995-998
- [4] G. Bamberg, A.G. Coenberg  
„Betriebswirtschaftliche Entscheidungslehre“, München (1989)
- [5] G. Bopp, T. Hauser, W. Heydenreich  
„Ladezustandsanzeige für Bleibatterien. Wunsch, Methoden, Wirklichkeit“, Zehntes Symp. Photovoltaische Solarenergie, Kloster Banz / Staffelstein (1995), 319-324
- [6] G. Bopp, M. Stoll  
„Ursachen von Batterieänderungen und Konsequenzen für die Betriebsführung in regenerativen autonomen Energieversorgungssystemen“, 1. Workshop FORSCHUNGSVERBUND SONNENENERGIE, Ulm (1993) 108
- [7] J. Zuckschwerdt  
„Test eines Fuzzy-Regelungsverfahrens für die Betriebsführung von Photovoltaik-Systemen“, Diplomarbeit, Universität Freiburg (1996)
- [8] H.-G. Puls, D.U. Sauer  
„Optimisation of Stand-alone PV System Design and Control Strategy“, Proc. EuroSun '96, Freiburg (1996), in Druck
- [9] T. Seng, D.U. Sauer  
„Detailed Modelling of Lead-Acid Batteries Under Solartypical Operation Conditions“, Proc. EuroSun '96, Freiburg (1996), in Druck
- [10] M. Rehm, G. Bopp, E. Rössler  
„Erste Erfahrungen mit dynamischen Stromtarifen in autonomen PV-Wind-Diesel-Systemen“, Elfte Symp. Photovoltaische Solarenergie, Kloster Banz / Staffelstein (1995) 357-361
- [11] A. Armbruster  
„Modellbildung komplexer regenerativer Energieversorgungssysteme: Optimierung von Regelstrategien“, Diplomarbeit, Universität Freiburg (1996)