

# **Innovative Leistungselektronik für photovoltaische Inselsysteme mit hybrider Blei-Lithium Batterie - lange Version -**

Michael Eberlin, Florian Reiners, Olivier Stalter  
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE  
Tel.:+49 761 45 88-50 69, Fax:+49 761 45 88-99 11  
Michael.Eberlin@ise.fraunhofer.de  
www.ise.fraunhofer.de

Weltweit leben etwa 1,6 Milliarden Menschen in geografisch abgelegenen Gebieten ohne Zugang zu Elektrizität [1]. In Europa sind laut Schätzungen der EU etwa 300 000 Haushalte ohne direkten Netzzugang. Diese Zahlen führen vor Augen, dass Bedarf an technischen Lösungen für die Elektrifizierung von geografisch abgelegenen Gebieten besteht. Jedoch lohnt sich aufgrund der großen Entfernung bei gleichzeitig geringem Energiebedarf der Endkunden meistens die Anbindung an ein bestehendes Netz nicht. Um dennoch in diesen Gebieten eine zeitgemäße und fortschrittliche Energieversorgung zu schaffen, kann es zum Aufbau eines autonomen Inselsystems kommen. Bei Planung und Betrieb solcher technisch anspruchsvoller Systeme stehen im Wesentlichen vier Faktoren im Mittelpunkt: Wirtschaftlichkeit, Versorgungssicherheit, Umweltverträglichkeit und Netzqualität [2]. Bis heute wird die Energie in den meisten Inselnetzen überwiegend aus klassischen Dieselgeneratoren erzeugt. Neben einem schlechten Umwandlungswirkungsgrad führt dies in die völlige Abhängigkeit von diesem Rohstoff. Dabei müssen neben drohenden Versorgungsengpässen aufgrund von internationalen Konflikten sowie Ressourcenknappheit auch steigende Brennstoffkosten berücksichtigt werden. Einen Ausweg liefert die Integration von erneuerbaren Energiequellen, da hier keine bzw. geringe Kosten für Brennstoffe entstehen. Allerdings unterliegen erneuerbare Energiequellen oft starken Erzeugungsflektuationen, weshalb das autarke Stromnetz i.d.R. mit einem Energiespeicher ausgestattet sein muss. Dank neuen Errungenschaften in der Batterieforschung konnten in den letzten Jahren Fortschritte in Bezug auf Leistungs- und Energiedichte sowie der Lebensdauer erzielt werden. Entsteht hier in Zukunft ein Massenmarkt, wie z.B. für Lithium-Ionen Batterien in Hybrid- bzw. Elektroautos, kann dies zu starken Preissenkungen führen. Dies wird die Wettbewerbsfähigkeit von Inselsystemen noch weiter stützen.

Darüber hinaus liegt ein für photovoltaisch basierte Inselsysteme zusätzlicher Vorteil in der geografischen Lage der bereits genannten abgelegenen Gebiete. Ein Großteil der potentiellen Kunden lebt in Äquatornähe, wo ganzjährlich eine hohe und vor allem kaum variierende solare Einstrahlung vorliegt (sog. Sonnengürtel). Gerade in diesen Regionen, wo teilweise über 2000 Vollaststunden erzielt werden können, lohnt es sich sehr bei der Stromerzeugung auf Photovoltaik (PV) zu setzen. Die

Wirtschaftlichkeit von PV-Systemen wird derzeit mit der weltweiten Überkapazität und dem äußerst starken Verfall der Modul- und Systempreise (ca. -30 % in 2012) noch weiter gesteigert.

Jedoch sind fast alle bisher auf dem Markt erhältlichen Gesamtsysteme für Off-Grid-Anwendungen nur im unteren Leistungsbereich angesiedelt. Batteriewechselrichter sowie PV-Batterieladegeräte mit einer Leistung von mehr als 10 kVA sind nur selten zu finden. Deshalb müssen für die Versorgung von größeren Energieabnehmern im Bereich von einigen 100 kVA viele kleine Wechselrichter, Batterien und Ladegeräte mit jeweils einigen kVA parallel geschaltet werden. Durch diese bisher gängige Methode fallen PV-Inselanlagen recht komplexer aus, sie werden anfälliger für Fehler sowie deutlich teurer.

### Übersicht: Systemkomponenten

In einem von BMU geförderten Projekt (Fördernummer: 0325121) mit dem Kurztitel *InnoSystem* wurde der Entwicklungsschwerpunkt auf die zentralen Systemkomponenten einer autarken PV basierten Dorfstromversorgung gelegt. Dazu zählen ein bidirektionaler und transformatorloser Inselwechselrichter, ein hochflexibles PV-Batterieladegerät, ein Batteriemanagementsystem (BMS), ein Energiemanagementsystem (EMS), sowie eine hybride Blei-Lithium Batterie mit hoher Gesamtspannung. Ein wesentliches Ziel des Projektes war, das neue System im Vergleich zu bisherigen Lösungen effizienter, zuverlässiger und kostengünstiger zu gestalten. Dabei lag ein Schwerpunkt auch immer auf der Realisierbarkeit als kommerzielles System.

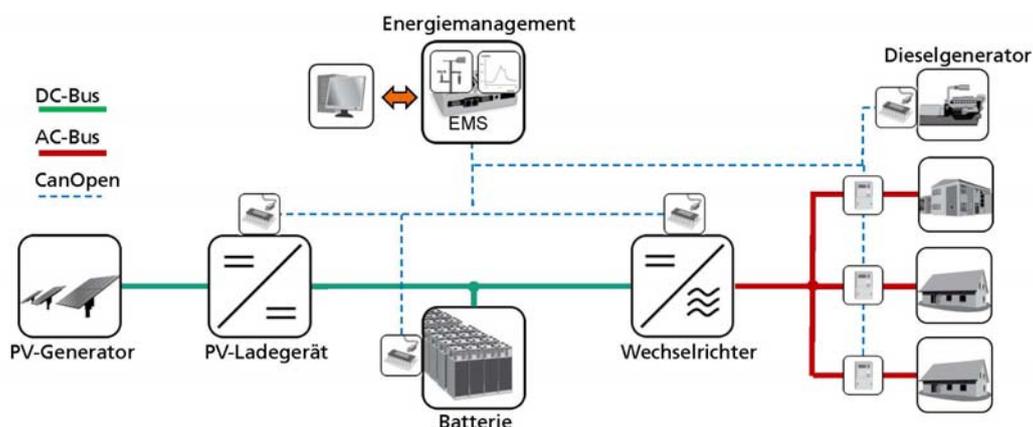


Abbildung 1: Schematische Übersicht der Dorfstromversorgung mit DC- und AC Bus.

Die bis zu 1000 V hohe Batteriespannung übertrifft die Arbeitsspannung bisheriger Batteriesysteme um ein Vielfaches und stellt eine der wesentlichen Innovationen des Gesamtsystems dar. Bei bisherigen Systemen lag die Batteriespannung, zu Gunsten eines möglichst einfachen Schutzkonzepts gegen elektrischen Schlag, selten höher als 48 V. Jedoch bringt diese niedrige Systemspannungen zwei gravierende

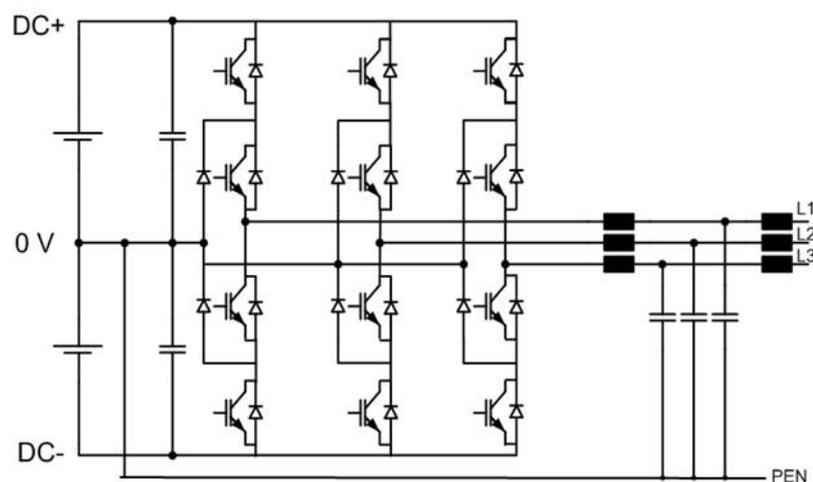
Nachteile mit sich: Erstens treten bei großer Ausgangsleistung sehr hohe Ströme auf und zweitens wird der Einsatz von zusätzlichen Hochsetzstellern oder Transformatoren zur Erzeugung der gängigen 115 V bzw. 230 V AC-Netzspannung unausweichlich. Beides verursacht Verluste und erklärt den niedrigen Systemwirkungsgrad bisheriger photovoltaisch basierter Off-Grid Systeme.

Die maximale Betriebsspannung des PV-Generators wurde bei dem neu entwickelten Inselssystem mit 1200 V bewusst auch sehr hoch gewählt. Dies folgt den Entwicklungen aus netzgebundenen Systemen und erlaubt größere Leistungen mit reduziertem Verdrahtungsaufwand und kleineren Strömen. Der Schutz gegen elektrischen Schlag wird durch ein in netzgekoppelten Systemen vielfach bewährtes Fehlerstromschutzkonzept sichergestellt.

Nun folgt eine detaillierte Beschreibung der wesentlichen Leistungselektronik innerhalb des InnoSystem-Projektes.

#### **A) Bidirektionaler & transformatorloser 120 kVA 3-Punkt-Inselwechselrichter:**

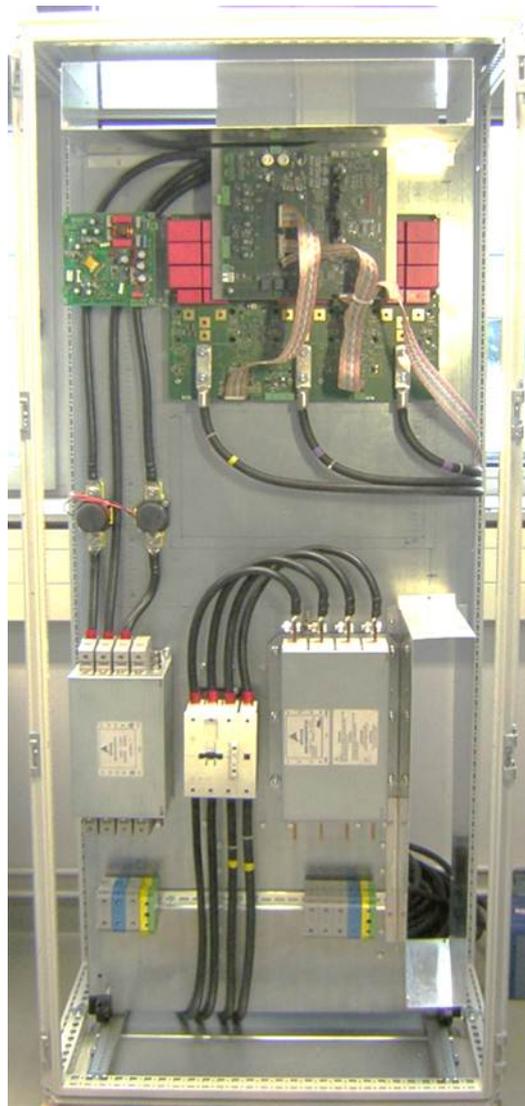
Das Herzstück der Dorfstromversorgung stellt ein bidirektionaler, dreiphasiger und transformatorloser 120 kVA Inselwechselrichter dar, der auf Basis einer hocheffizienten Drei-Punkt Topologie nach Abbildung 2 aufgebaut wurde. Das entwickelte EMS beruht auf dem standardisierten und offenen CIA454 Kommunikationsprotokoll. Dies ermöglicht eine Erweiterung des Off-Grid Systems durch verschiedene erneuerbare Energiequellen bzw. Lasten auf DC- oder AC-Seite.



**Abbildung 2: Schaltbild des bidirektionalen, dreiphasigen, 3-Punkt-Wechselrichters, der aus den symmetrischen Batterieteilen (DC+ und DC-) das Inselnetz erzeugt.**

Zusätzlich ist durch den bidirektionalen Aufbau des Inselwechselrichters das Laden der Batterie auch über im Netz integrierte AC-Generatoren gegeben. Auch soll durch weitere Entwicklungsschritte eine Erweiterung um mehrere Wechselrichter im gleichen AC-Stromnetz möglich werden. Somit werden Inselnetze mit einer Leistung bis in den MVA - Bereich realisiert werden können. Ein weiteres Hauptziel der

Entwicklung lag auf einem hohen Systemwirkungsgrad, verbunden mit geringen Fertigungs- und Materialkosten. Dieses Ziel ließ sich durch einen transformatorlosen Aufbau und einer fortgeschrittenen 3-Punkt Topologie erreichen. Dabei konnte auf zahlreiche Innovationen von netzgekoppelten Systemen zurückgegriffen werden, die nahezu revolutionär für Inselwechselrichter sind. Hinzu kommt, dass auf Grund der hohen Batteriespannung der Einsatz des bereits erwähnten zusätzlichen Hochsetzstellers bzw. Transformators entfällt. Messungen zeigen bei einer Auslastung des Wechselrichters von 40 % bis 60 % der Nennleistung einen Gesamtwirkungsgrad über 98 %. Obwohl ein noch leicht höherer Wirkungsgrad hätte erreicht werden können, wurde um Größe, Volumen und Gewicht klein zu halten, eine in dieser Leistungsklasse besonders hohe Taktfrequenz von 16 kHz gewählt. Nichts desto trotz ist der Wirkungsgrad deutlich höher als der von üblichen Off-Grid-Wechselrichtern. Gerade bei Inselwechselrichtern spielt ein hoher Wirkungsgrad über einem weiten Leistungsbereich eine entscheidende Rolle, da der Wechselrichter nur selten bei maximaler Leistung betrieben wird.



**Abbildung 3: Fertig aufgebauter Prototyp des 120 kVA Inselwechselrichters.**

Um die Herstellungskosten gering zu halten, gleichzeitig aber auch eine hohe Leistungsfähigkeit sowie Lebensdauer des Geräts sicher zu stellen, wurden alle leistungselektronischen Komponenten, sowie Gate-Treiber und Leistungsschalter, direkt auf einer Leiterkarte integriert. Dies wurde durch eine innovative Dickkupfertechnologie auf Platinenebene ermöglicht. Die speziell gefertigte Leistungsplatine hat eine Kupferstärke von bis zu 400  $\mu\text{m}$ , welche das Führen von AC-RMS-Strömen im Bereich von 180 A und sogar bis zu 230 A für kurze Zeiten ermöglicht.

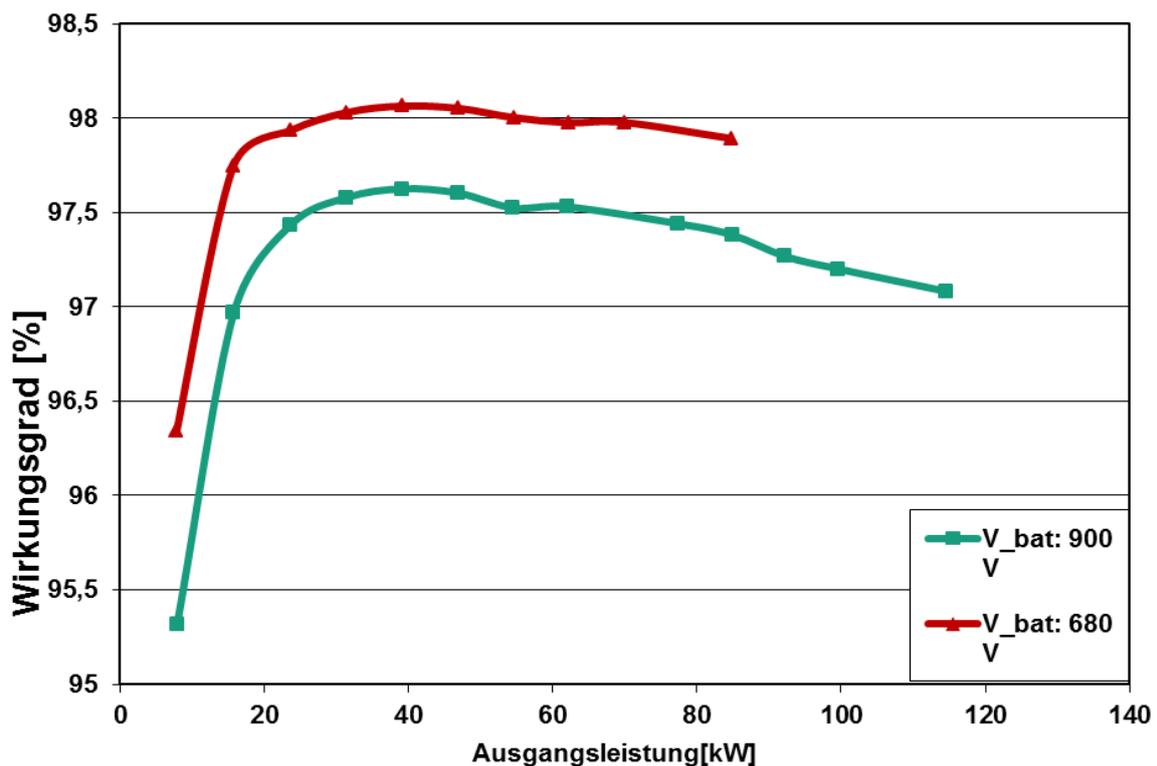
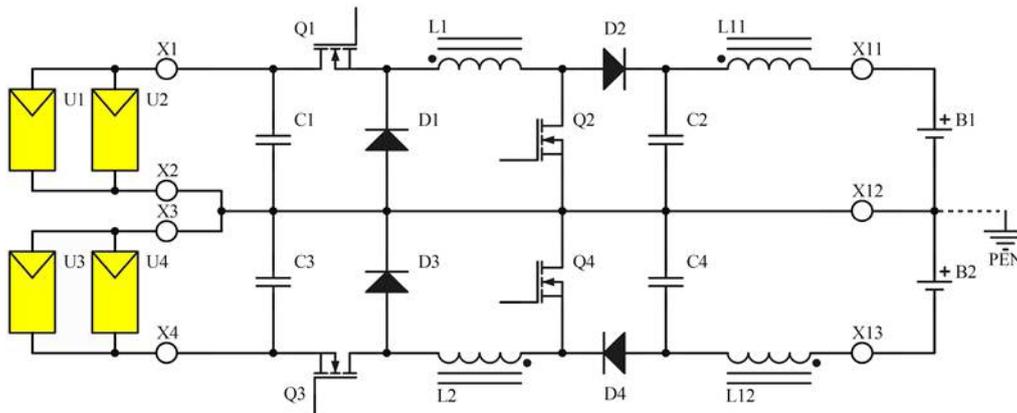


Abbildung 4: Wirkungsgradkennlinie des Inselwechselrichterprototyps bei 680 V und 900 V Batteriespannung.

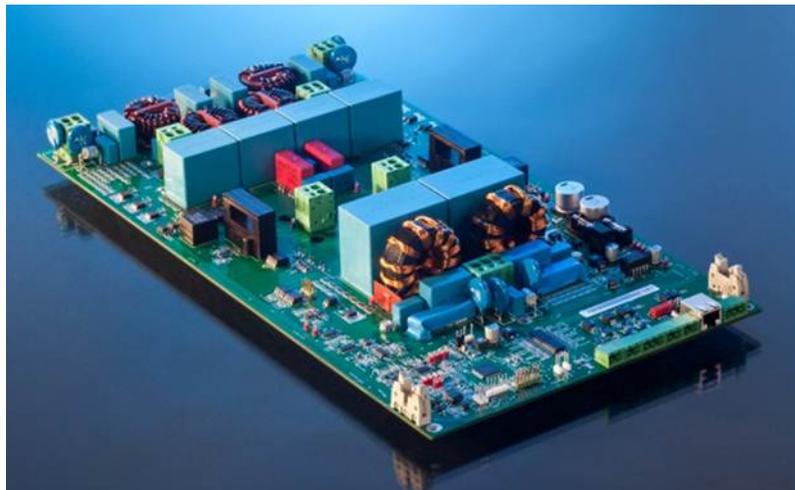
### B) Hocheffizientes multi-MPPT PV-Batterieladegerät:

Das im Rahmen des Forschungsprojektes entwickelte PV-Batterieladegerät ermöglicht eine getrennte Regelung von bis zu sechs verschiedenen PV-Generatoren auf ihrem jeweiligen Maximum Power Point (MPP). Durch die sechs unterschiedlichen MPPT-Eingänge besteht eine hohe Flexibilität bei der Auslegung der Solargeneratoren. Außerdem sind die, aufgrund von Parallelschaltungen, üblichen Anpassungsverluste von PV-Generatoren hier deutlich reduziert. Des Weiteren können problemlos mehrere parallele Ladegeräte mit einer gemeinsamen Batterie verbunden sein. Durch die gewählte Hochtiefsetzsteller-Topologie mit geerdetem Mittelpunkt, ergibt sich ein großer Eingangs- und Ausgangsspannungsbereich. Der PV-Spannungsbereich reicht von 350 V bis 1200 V während die Batteriespannung zwischen 650 V und 1000 V liegen darf.



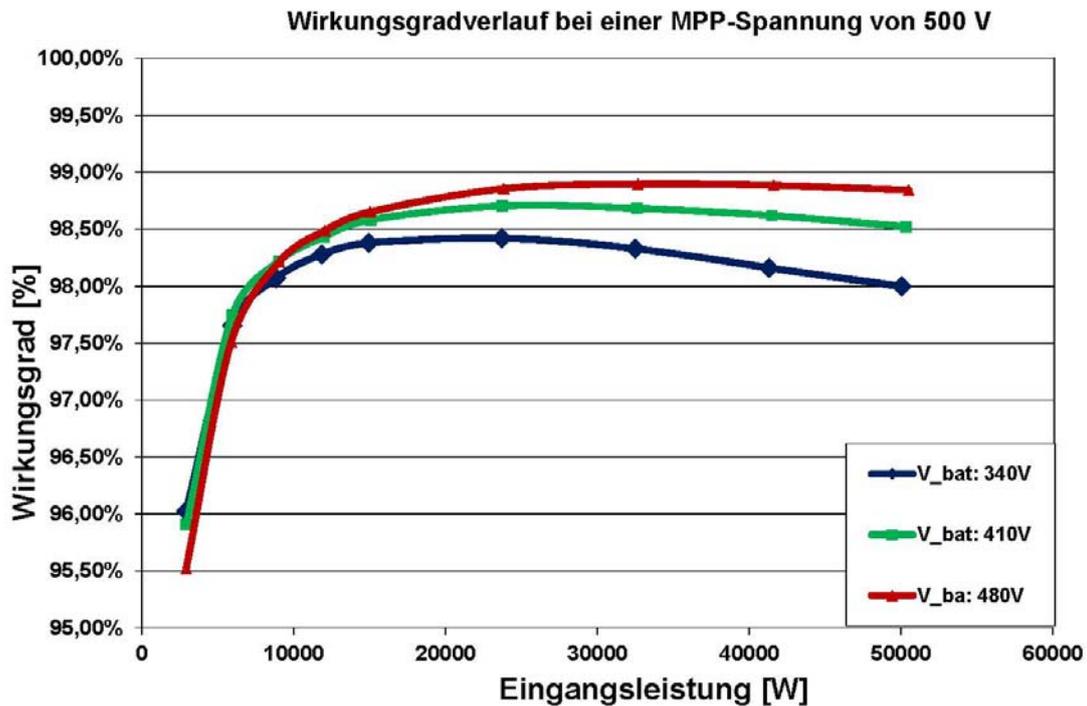
**Abbildung 5: Schaltbild des symmetrischen Hochtiefsetzstellermoduls mit eingangsseitig angeschlossenen PV-Generatoren und symmetrisch geteilter Batteriebank.**

Diese sehr großen und gleichzeitig sehr hohen Spannungsbereiche ermöglichen den Einsatz von fast jedem beliebigen PV-Generator. Auch diese Eigenschaft trägt zur hohen Flexibilität bei, wie sie von Inselssystemen erwartet wird.



**Abbildung 6: Ein Modul des Ladegeräts mit 17 kW Leistung. Ein Batterieladegerät besteht aus drei parallel arbeitenden Modulen.**

Wie auch beim Inselwechselrichter, wurde beim Aufbau auf einen Transformator verzichtet. Messungen zeigen einen Gerätewirkungsgrad von bis knapp 99 % (siehe Abbildung 7). Des Weiteren wurde wie beim Wechselrichter zu Gunsten von geringen Herstellungskosten auf eine hohe Integration der Bauteile auf der Leistungsplatine geachtet. Auch beim Ladegerät wurde bei der Integration der Schnittstelle auf das standardisierte und offene CIA454 EMS Kommunikationsprotokoll zurückgegriffen.



**Abbildung 7: Wirkungsgradkennlinien bei einer PV-Spannung von 500 V für drei unterschiedliche Batteriespannungen: 340 V, 410 V und 480 V.**

### **C) Energiemanagementsystem (EMS):**

Die intelligente Steuerung der Energieflüsse wird über ein speziell für die autarke Dorfstromversorgung entwickeltes Energiemanagementsystem (EMS) bereitgestellt. Ziel der Steuerung stellt die optimale Ausnutzung der erneuerbaren Energiequellen bei möglichst geringem fossilem Energiebedarf dar. Dazu greift das EMS neben Wetterprognosen auch auf vergangene Tagesenergieverläufe als Erfahrungswerte zurück. Somit gelingt eine optimale Integration von erneuerbaren Energiequellen bei gleichzeitig schonender Nutzung der hybriden Blei-Lithium Batterie sowie Beschränkung von fossilen Brennstoffen auf ein Minimum. Durch konsequentes Weiterentwickeln des Konzepts kann dabei auch das Verhalten von Verbrauchern durch intelligente Stromzähler bzw. flexible, angebotsabhängige Stromtarife erweitert werden.

### **D) Hybride Blei-Lithium Batterie:**

Wie bereits im oberen Abschnitt beschrieben, werden durch niedrige Batteriespannungen wesentliche Verluste im Gesamtsystem verursacht. Aus diesem Grund wurde die Gesamtspannung der Batterie auf bis zu 1000 V festgelegt. Somit fließen geringe DC-Ströme und der zusätzliche Hochsetzsteller oder Transformator kann entfallen. Durch Anwenden von zwei unterschiedlichen Batterietechnologien, können die Preisvorteile der Blei-Säure Batterie mit der hohen Zyklenfestigkeit der Lithium-Ionen Batterie kombiniert werden. Die daraus entstandene Hybridbatterie setzt somit neue Maßstäbe im Hinblick auf Preis und Lebensdauer.

### **E) Das CANopen-Protokoll:**

Die leichte Integration von Systemkomponenten wird durch das offene CANopen-Protokoll bzw. dessen Applikationsprofil CiA454 „Energy Management Systems“ sichergestellt. Damit gelingt die Kommunikation zwischen allen Systemkomponenten und dem zentralen EMS des Inselsystems. Das ist ein sehr wichtiger Fortschritt für die einfache Integration von verschiedenen Komponenten im Gesamtsystem. Bei bisherigen Systemen kommen meist herstellerabhängige Standards zum Einsatz, weshalb durch diesen von Lizenzgebühr freien Standard neue Maßstäbe im Hinblick auf das Plug-and-Play Prinzip besteht.

### **Zusammenfassung:**

Im Rahmen des Forschungsprojekts InnoSystem wurde ein hocheffizientes und flexibles, photovoltaisch basiertes Dorfstromversorgungssystem der nächsten Generation entwickelt. Das hybride Inselnetz ist für einen hohen Leistungsbereich ausgelegt, der bisher hauptsächlich von Dieselgeneratoren abgedeckt wird. Außerdem agieren der Inselwechselrichter, das PV-Batterieladegerät, die hybride Blei-Lithium Hochvoltbatterie und das EMS nach einer auf Erfahrungswerten basierenden Lastregelung, mit dem Ziel, den Gesamtsystemwirkungsgrad zu maximieren. Die Zahl der einzelnen Bauteile im System konnte deutlich reduziert werden. Das entwickelte System stellt eine kostengünstige Alternative zu Dieselgeneratoren in Inselnetzen dar und ermöglicht den Aufbau photovoltaischer Dorfstromversorgungen mit mehreren 100 kVA Leistung. Alle Systemkomponenten sind konform zu internationalen Standards. Für die Feldtests laufen momentan die letzten Vorbereitungen.

### **Quellen:**

- [1] V. Modi, S. McDade, D. Lallement und J. Saghir: Energy services for the Millennium Development goals, 2005
- [2] J. Reekers, G. Cramer, P. Straus und W. Kleinkauf: Inselnetze mit hohem Anteil Erneuerbaren Energien auf der griechische Insel Kythnos, SMA Regelsysteme GmbH; ISET e.V. / Universität Kassel, 2000.

### **Zur Info:**

Das Projekt InnoSystem wurde am Fraunhofer ISE von zwei Abteilungen bearbeitet. Die Entwicklung der leistungselektronischen Komponenten erfolgte durch die Abteilung *Leistungselektronik* und die Arbeiten rund um die hybride Blei-Lithium Batterie wurde von der Abteilung *PV Inselsysteme und Batteriesystemtechnik* durchgeführt.