

Energiemanagement für autonome Photovoltaik-Systeme

Jochen Benz

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE

Heidenhofstraße 2

D-79110 Freiburg

Telefon: 0761 / 4588-5221 Fax: 0761 / 4588-9221

Email: jochen.benz@ise.fhg.de

www.ise.fhg.de

1. Wieso Energiemanagement ?

Mit Ladereglern lassen sich zuverlässig Systeme betreiben, die aus Photovoltaik (PV) –Generator, Verbraucher und Batterie bestehen. Vielen Anwendungen ist damit einfach und kostengünstig genüge getan.

Versorgungssicherheit aber ist oftmals entscheidend für die Qualität autonomer PV-Anlagen. Beispiele dafür sind Stromversorgungen für Kommunikationseinrichtungen, die in abgelegenen Gebieten sicherheitskritische Aufgaben haben (z. B. ein Notruf-telefon).

Um eine zuverlässige Stromversorgung zu garantieren, ist eine vorausschauende Betriebsweise vonnöten und der Einsatz der kostbaren Energie muss an die momentane Energiesituation angepasst erfolgen. Bei komplexeren Systemen muss der Betrieb mehrerer Erzeuger und Verbraucher koordiniert werden.

Wird zudem ein möglichst kostengünstiger Betrieb verlangt, ergeben sich anspruchsvolle Fragestellungen an die Betriebsführung:

- Wie kann der aktuelle Ladezustand und die aktuell verfügbare Kapazität der Batterie bestimmt werden?
- Wie kann die Batterie möglichst schonend betrieben werden, um Alterungserscheinungen zu verzögern und Ausfällen vorzubeugen?

- Wie kann der wetter- und jahreszeitlich abhängige Energieertrag vorhergesehen werden?
- Wie kann unterschiedlichen Prioritäten mehrerer Verbraucher unter Berücksichtigung der Anforderungen an das Gesamtsystem Rechnung getragen werden?
- Wie können die beim Einsatz von Zusatzstromerzeugern anfallenden Betriebs- und Wartungskosten minimiert werden?
- Welche Selbstdiagnoseverfahren können entwickelt und implementiert werden, die eine hohe Systemzuverlässigkeit garantieren und eine effiziente Wartung ermöglichen?

Zuverlässige und ökonomisch arbeitende Stromversorgungssysteme erfordern die Erfüllung der genannten Aufgaben. Diese gehen über die Möglichkeiten von Laderegler hinaus und werden im Folgenden als »Energiemanagement« bezeichnet.

Drei Beispiele für realisierte Anlagen (PV-Beleuchtung, Multifunktionales Notruf- und Informationssystem, PV-Hybridsystem zur Versorgung einer Telekommunikations-einrichtung) werden am Ende des Beitrags vorgestellt.

2. Aufgaben und Möglichkeiten im Überblick

Wieviel Energie steht zur Verfügung oder wird benötigt? (Energiemanagement)

- Ladezustandsbestimmung (State Of Charge, SOC) angepasst an Batterietyp
- Last- und Verbrauchsprognosen (Hochrechnung)
- Ertrags- und Angebotsprognosen (Einstrahlung, Bedarf an Zusatzenergie)
- Kommunikation und Koordination mit benachbarten Systemen

Wie kann die verfügbare Energie optimal eingesetzt werden? (Lastmanagement)

- Zeitgesteuertes Schalten von Verbrauchern (z. B. Uhrzeit, Saison, Fahrplan)
- Sensorgesteuertes Schalten von Verbrauchern (z. B. Helligkeit, Temperatur)

- Prioritätsgesteuertes Schalten von Verbrauchern (z. B. Notruffunktion, Signalbeleuchtung, Werbebeleuchtung)
- Beeinflussung der Verbraucherleistung (z. B. Helligkeit, Reichweite)
- Sicherung einer Notfallreserve (z. B. für Notrufe bzw. Überbrückung bis zur Wartung)
- Steuerung von Zusatzstromerzeugern (z. B. Diesel- oder Gasgenerator, Thermo-elektrischer Wandler, Brennstoffzelle, Windkraftanlage)
- Realisierung eines Energiejahresspeichers (z. B. Wasserstoff)

Wie wird das System möglichst schonend und effizient betrieben, bei gleichzeitiger Gewährleistung der Systemaufgabe? (Betriebsmanagement)

- Ladeverfahren auf Batterietyp und -zustand abgestimmt, lebensdauererhaltende oder -verlängernde Betriebsstrategien (z. B. Gasungs- oder Vollladungen, Pflegezyklen)
- Berücksichtigung des Verhaltens von Verbrauchern (z. B. Zyklenzahl, nicht-elektrische Energiespeicherung wie durch Wasserförderung, Kälteerzeugung)
- Berücksichtigung des Startverhaltens von Zusatzstromerzeugern (z. B. Aufwärmzeit, Nachlaufzeit, Zyklenzahl)

Wie kann das System langfristig zuverlässig betrieben werden ? (Zustandsüberwachung)

- Kapazitätsbestimmung der Batterie (Alterungsgrad)
- Funktionskontrolle der Systemkomponenten (z. B. PV-Generator, Zusatzstromerzeuger)
- Erkennung von Defekten und Ermittlung von Füllständen (z. B. Diesel, Wasser, Wasserstoff)
- Zentrale Fernbedienungs und -überwachungsmöglichkeit von Individualsystemen (insbesondere bei großer Anzahl)
- Vorhersage und Koordination von Wartungsaufgaben (z. B. durch Leitstelle)

Sonstiges

- Anpassungsfähigkeit an Umgebungs- und Randbedingungen durch flexible Software und modularen Hardwareaufbau
- Zusatznutzen durch Individualanforderung, Reaktion auf individuellen Bedarf von Nutzern
- Integration in bestehende Kommunikationsnetzwerke (z. B. Mobilfunk, Bündelfunk, Internet)

3. Struktur

Unabhängig von der Größe des Systems (eine aussagekräftige Kenngröße ist die Dauerleistungsabgabe) lassen sich Energiemanagementsysteme (im Folgenden mit EMS abgekürzt) modular aufbauen:

Es wird eine logische Trennung der Stromkreise, Sensorik und Leistungselektronik auf der einen Seite sowie der Informationsverarbeitung, Steuerung und Regelung auf der anderen Seite vorgenommen. Dagegen vereinen Laderegler sowohl die Elektronik als auch die Informationsverarbeitung und Steuerung in einer physikalischen Einheit. Dadurch ist die Flexibilität bezüglich unterschiedlicher Systemkonfigurationen stark eingeschränkt. Auch ist der Funktionsumfang typischerweise wesentlich geringer.

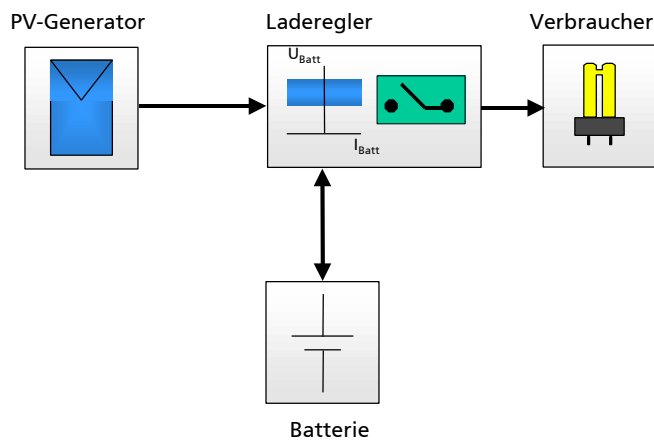


Abbildung 1: Struktur eines PV-Systems ohne Energiemanagement. Der Laderegler ist die zentrale Einheit die PV-Generator, Batterie und Verbraucher elektrisch verbindet und auch die Steuerung und Regelung übernimmt.

Bei Verwendung eines EMS werden die Funktionen des Ladereglers in Leistungselektronik und Regelalgorithmus geteilt, die Batterie erhält Sensoren zur Erfassung von Strom, Spannung und Temperatur und der Verbraucher wird über einen Lastschalter mit dem gemeinsamen Stromverteiler verbunden, an den wiederum Batterie und PV-Generator angekoppelt werden. Der Lastschalter kann von der Steuerzentrale betätigt werden, ebenso werden Messwerte von dort aufgenommen. Dieser Schritt ist von Abbildung 1 nach Abbildung 2 vollzogen.

Nun wird die Batterieladung nicht mehr länger direkt vom Laderegler kontrolliert, sondern von der Steuerzentrale, die parallel dazu auch andere Aufgaben ausführen kann.

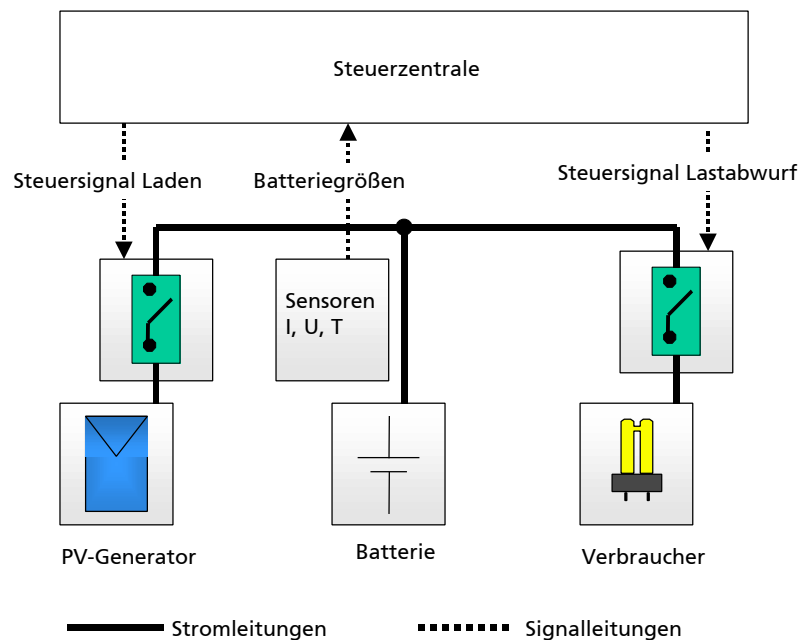


Abbildung 2: Struktur eines PV-Systems mit Energiemanagement. Die Komponenten sind elektrisch verbunden, die Kommunikation für Steuerung und Regelung findet über separate Verbindungen statt.

In der Steuerzentrale werden die Messsignale der Sensoren erfasst, aufbereitet und einem Rechner oder Controller zugeführt. Der Rechner wiederum ist die Plattform für ein Betriebssystem, worauf verschiedene Steuer- und Regelalgorithmen ablaufen. Deren Ergebnisse sind Systemzustandsgrößen (z. B. SOC), die im Vergleich mit Grenzwerten oder in Regelstrategien zu Steuer- und Schalthandlungen führen. Über Steuersignale wirken diese auf Stromerzeuger und Verbraucher ein. Mit dem Einfluss auf das System schließt sich der Regelkreis.

Die Aufteilung dient auch dazu, komplexere Systeme strukturiert darzustellen. Ein Beispiel mit Zusatzstromerzeuger und unterschiedlich priorisierten Verbrauchern sowie Rückmeldungen über die Betriebszustände ist in Abbildung 3 gezeigt.

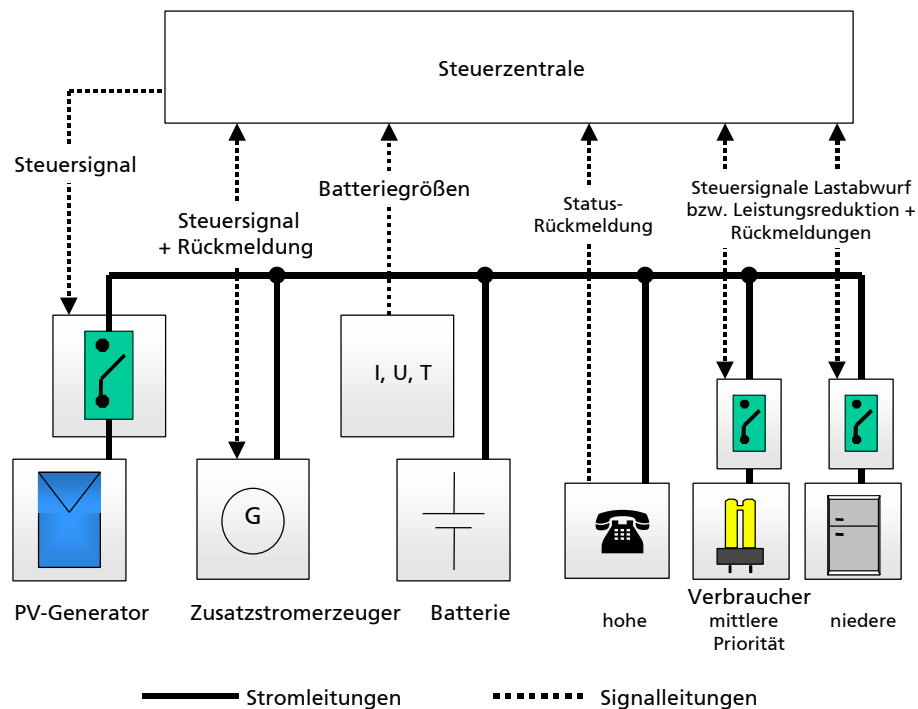


Abbildung 3: Komplexes PV-System mit Zusatzstromerzeuger und drei verschiedenen priorisierten Verbrauchern.

4. Realisierungshinweise für Hard- und Software

- Die Qualität der Betriebsführungsentscheidungen basiert zu einem großen Teil direkt oder indirekt auf Messwerten aus der Sensorik (Ströme, Spannungen, Temperaturen, usw.). Es ist auf angemessene Präzision bei der Erfassung der Messwerte zu achten. Mögliche Ungenauigkeiten können sich aus der Nichtbeachtung oder Fehldimensionierung von Bezugspotenzialen, Masseschleifen, Tiefpässen und AD-Wandler-Beschaltungen ergeben. Die Plausibilität der Messwerte ist durch die Software zu überprüfen, bevor eine Weiterverarbeitung erfolgt.
- Es greifen mehrere Algorithmen (z. B. Ladezustandsbestimmung, Lastabwurfssteuerung, Laderegulung) auf dieselben Messwerte zu. Dafür sind softwaretechnische Maßnahmen erforderlich, die Kollisionen und gegenseitiges Blockieren verhindern.

- Für die gewünschten Erzeuger und Verbraucher sind Schnittstellen zu definieren und beim Schaltungsentwurf vorzusehen. Der Umfang der Schnittstellen kann dabei von sehr einfach (z. B. Lastabwurf) bis komplex (z. B. Steuerung einer Brennstoffzelleneinheit) reichen.
- Der Zugriff auf die Schnittstellen kann ebenfalls aus mehreren Algorithmen heraus erfolgen. Es muss ein Verriegelungsmechanismus (Software) eingeführt werden, um unerwünschte Schalthandlungen zu verhindern.
- In der Softwarearchitektur erweist es sich als vorteilhaft, die Algorithmen möglichst von der Hardware abzukapseln, d. h. eine Hardware unabhängige Programmierung durchzuführen. Dies ermöglicht den Einsatz derselben Funktionsbibliotheken in mehreren Anwendungen und auch den Zukauf von Code.
- Ein Schichtenaufbau ermöglicht die einfache Implementierung von Verriegelungsmechanismen und Plausibilitätsprüfung. Eine Abschirmung von der Hardware sorgt weiterhin für bessere Portierbarkeit des Codes und dessen übersichtlicher Darstellung. Dafür müssen Schnittstellen definiert werden.
- Als Rechner kommen übliche Mikrocontroller zum Einsatz (z. B. Hitachi H8, 8051-Derivate, TI MSP430). Zusammen mit den Peripheriegeräten muss die Leistungsaufnahme zu der des Gesamtsystems in einem angemessenen Verhältnis stehen (maximal 1-10 %). Zu beachten ist, dass u. U. erhebliche Ressourcen an Rechenleistung und Speicherplatz für Algorithmen wie die Ladezustands- und Kapazitätsbestimmung erforderlich sind (z. B. 1/3 der Rechenleistung eines 8-Bit-Controllers).
- Die Betriebsführungssoftware arbeitet kontinuierlich. Dies ist im Hinblick auf die Stabilität des Systems zu beachten. Für eine einwandfreie Stromversorgung, eine funktionsfähige Reset-Logik (z. B. bei Spannungseinbrüchen) und eine externe Funktionkontrolle der Software (Watchdog) ist zu sorgen. Schlaf- oder Energiesparmodi können genutzt werden.
- Für ein EMS muss eine große Anzahl von Parametern (beispielsweise Grenzwerte, Startbedingungen, Konfigurationsgrößen) einstellbar sein, um Flexibilität zu ermöglichen und das System optimal an das Einsatzgebiet

anzupassen. Weiterhin ergeben sich z. B. durch die integrativen Verfahren zur Ladezustandsbestimmung Systemgrößen im Betrieb, die verwaltet und laufend gesichert werden müssen.

- Die genannten Algorithmen sind teilweise selbstlernend und basieren deshalb auf Erfahrungswerten, die mit wachsender Betriebszeit das System immer besser charakterisieren. Diese dürfen auf keinen Fall verloren gehen. Entsprechende Maßnahmen müssen im Softwarekonzept durch eine Speicherverwaltung (flüchtig, nichtflüchtig, Backup) berücksichtigt werden. Mögliche abrupte Stromausfälle und das Verhalten nach einem Neustart sind einzuplanen.
- Schnittstellen zur Außenwelt dienen Wartungs- und Diagnoseaufgaben und dem Datenaustausch. Je nach Anforderungen ermöglichen diese die Weitergabe an eine zentrale Leitstelle. Entsprechende Protokolle sind zu implementieren.

5. Ladezustandsbestimmung

Eine zentrale Rolle im EMS spielt der Ladezustand der Batterie (State of Charge, SOC). Eine ganze Reihe von Entscheidungen der Betriebsführung hängen von dieser Größe ab, die nicht direkt von außen zugänglich ist. Aus diesem Grund werden hier die gebräuchlichsten Bestimmungsmethoden vorgestellt:

Messungen an den Reaktionspartnern (Elektrochemie)

Nur in großen geschlossenen Batterien überhaupt praktikabel (flüssiger Elektrolyt):

- Messung am Elektrolyten (Säuredichte, Brechungsindex, Leitfähigkeit)
- Messung an den Aktivmassen (Blei, Bleiverbindungen); nicht zerstörungsfrei

Messung von äußeren Größen (U, I, T, t)

Dazu gehören Verfahren, die den Ladezustand ausschließlich aus den momentanen Messgrößen der Batterie ermitteln. Diese sind aufgrund einfacher Schaltungstechnik die Basis vieler handelsüblicher Laderegler:

- Spannungsmessung
- Ruhespannungsmessung
- Stromkompensierte Spannungsmessung
- Impedanzmessung

Weiterhin gibt es Verfahren, die die Vorgeschichte (bzw. Vergangenheit) zur Ermittlung des momentanen Ladezustands mitberücksichtigen. Dazu sind Mikrocontroller-schaltungen erforderlich, die entsprechende Algorithmen regelmäßig abarbeiten:

- Integrative Verfahren (Strombilanzierung), mit oder ohne Verlustansatz; dort hohe Auflösung der Messdaten erforderlich!
- Adaptive Verfahren (selbstadaptierende Batteriemodell gestützte Verfahren, selbstadaptierende Verlustbestimmung in integrativen Verfahren)
- Nichtlineare Verfahren (z. B. Fuzzy-Logik, Neuronale Netze)
- Kombinationen aus den genannten Verfahren

Bei den im Folgenden vorgestellten Anlagen kommen integrative Verfahren für die PV-Beleuchtung und das Multifunktionale Notruf- und Informationssystem zum Einsatz, im PV-Hybridsystem zur Versorgung einer Telekommunikationseinrichtung wird der Ladezustand durch ein regelbasiertes adaptives Verfahren ermittelt.

6. Praxisbeispiele

6.1 PV-Beleuchtung

Vorteilhaft ist der Einsatz eines EMS in photovoltaisch versorgten Beleuchtungseinrichtungen. Hier ist es möglich, Einschaltzeit, Leuchtdauer und Beleuchtungsstärke hinsichtlich den Nutzeranforderungen und dem Energieangebot mit Hilfe eines EMS zu optimieren. Ein Beleuchtungssystem, z. B. zur Beleuchtung von Wegen, Parkplätzen oder Bushaltestellen, gewinnt dabei an Zuverlässigkeit.

Abbildung 4 zeigt den prinzipiellen Aufbau einer Photovoltaik-Leuchte. Das EMS vereint die Funktionen der Laderegulation und des optimierten Energieeinsatzes in sich. Die Steuerung des Systems erfolgt durch die Software, die in der Lage ist, die optimalen Ein- und Ausschaltzeiten der Leuchte in einem Lernprozess aus der Tages- und Nachtlänge zu ermitteln. Dadurch wird gewährleistet, dass die Leuchte sich dem jahreszeitlichen Rhythmus der Nachtlänge angleicht. Bei der Berechnung der Leuchtdauer wird der Zustand des Speichers berücksichtigt und damit den vorhandenen Energiereserven angepasst.

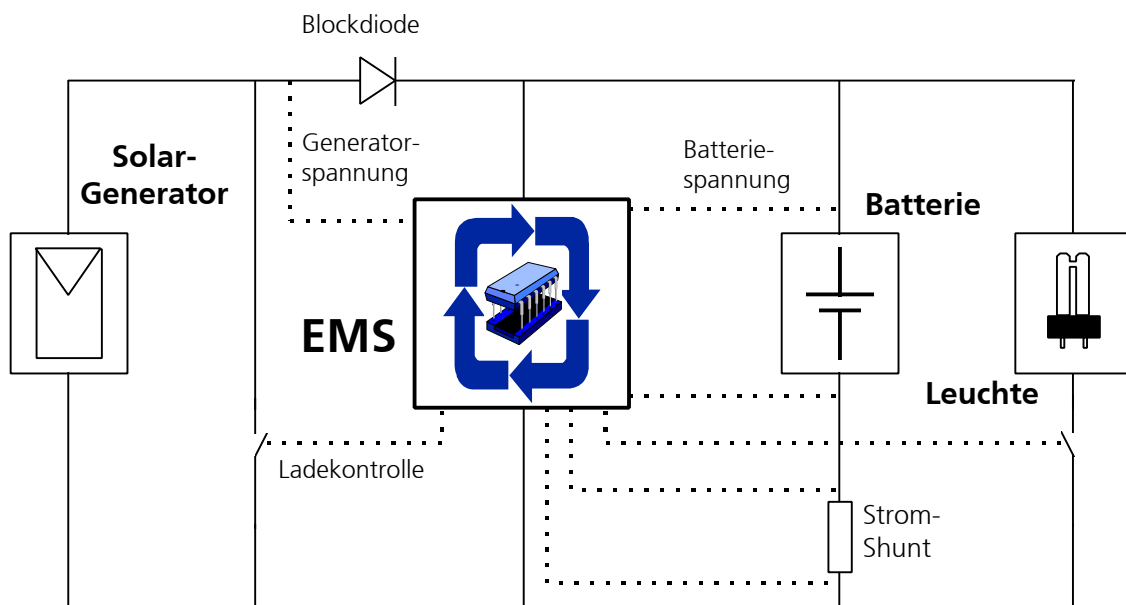


Abbildung 4: Prinzipieller Aufbau einer Photovoltaik-Leuchte mit Energiemanagementsystem.

Bei einer Photovoltaik-Leuchte ohne Energiemanagement wird im Normalfall eine feste Leuchtdauer eingestellt. Wenn diese z. B. auf 10 Stunden festgelegt wird, ergibt sich für einen typischen November-Monat ein Verlauf der täglichen Leuchtdauer wie in Abbildung 5 aufgezeigt. Dieses System verbraucht in den ersten Tagen (1.11. - 6.11.) die in der Batterie gespeicherte Energie ohne Rücksicht auf die Einstrahlungsverhältnisse in dieser Periode. Als Konsequenz der aufgebrauchten Reserven ist die tägliche Leuchtdauer ab dem 7.11. direkt von den Energieerträgen des Solargenerators abhängig. Dies führte an sehr einstrahlungsarmen Tagen (17.11. und 28.11.) zu Totalausfällen des Systems und insgesamt zu einer unstetigen und batterieschädigenden Betriebsweise.

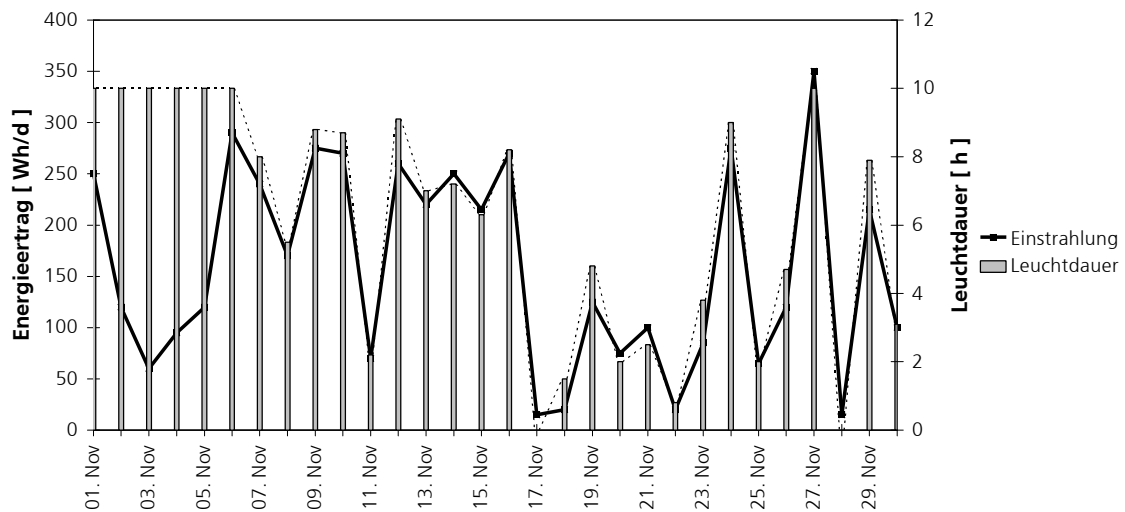


Abbildung 5: Verlauf der täglichen Leuchtdauer und des Energieertrages des Solar- generators einer Photovoltaik-Leuchte ohne Energiemanagementsystem für einen typischen November-Monat.

Im Vergleich dazu zeigt die Abbildung 6 die Leuchtdauer einer Photovoltaik-Leuchte mit Energiemanagementsystem auf. Am ersten Tag leuchtet hier die Lampe noch 10 Stunden (maximale Leuchtdauer).

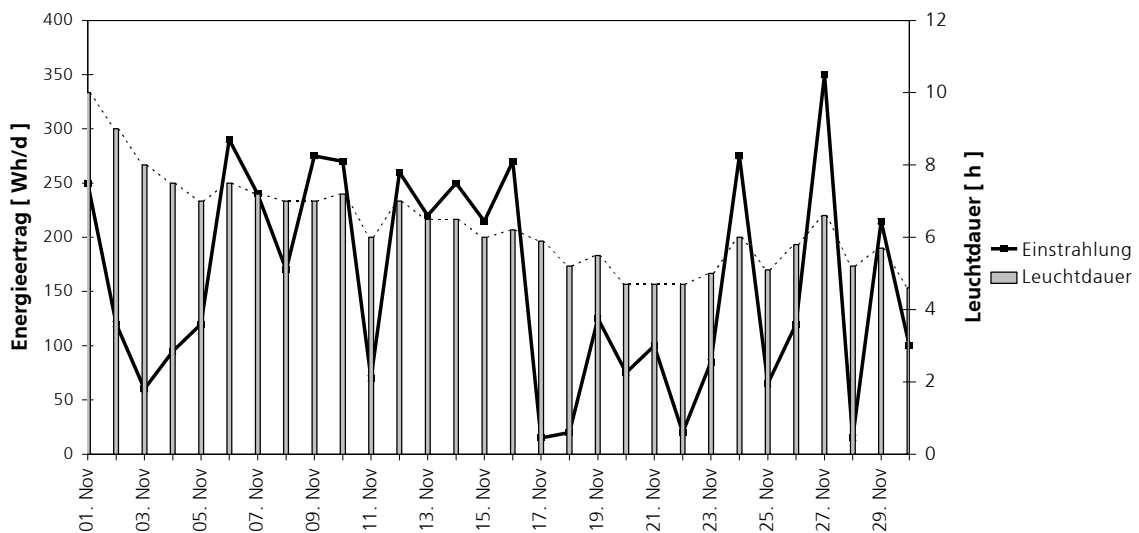


Abbildung 6: Verlauf der täglichen Leuchtdauer und des Energieertrages des Solar- generators einer Photovoltaik-Leuchte mit Energiemanagementsystem für einen typischen November-Monat.

Aufgrund der schlechten Einstrahlungsverhältnisse (2.11. - 5.11.) wird die Leuchtdauer sukzessiv reduziert und damit den Energiereserven in der Batterie Rechnung getragen. Insgesamt wird eine kontinuierliche und zuverlässige Betriebsweise des Systems erreicht.

Wird z. B. eine Buswartehalle mit einer Photovoltaik-Leuchte ausgerüstet die vorwiegend von Schülern benutzt wird, gilt es hauptsächlich die Leuchte in den Morgenstunden einzuschalten. Das EMS schätzt also am Abend ab, ob die zur Verfügung stehende Energie für den Abendzyklus z. B. von Beginn der Abenddämmerung bis ca. 2:00 Uhr und für den Morgenzyklus von ca. 5:00 Uhr bis zur Morgendämmerung zur Beleuchtung ausreicht. Wird das Energieangebot so gering, dass beide Zyklen nicht mehr erfüllt werden können, reduziert das EMS im Falle der Schulbus-Wartehalle die Leuchtdauer des Abendzyklus, um die Beleuchtung am Morgen bei der Hauptnutzung durch die Schüler zu gewährleisten.

Wie das Beispiel zeigt, hilft ein Energiemanagement Funktionen der Beleuchtung aufrechtzuerhalten, die im Falle einer starren Betriebsführung mit einem normalen Laderegler nicht mehr gegeben wären.

6.2 Multifunktionales Notruf- und Informationssystem (MNI)

In vielen Fällen werden Informations- und Telekommunikationssysteme fernab vom öffentlichen Netz benötigt. Ein Netzanschluss ist oft nicht möglich oder sehr teuer. Zusammen mit der Nutzung von Funknetzen für Sprach- und Datenübertragung lassen sich Produkte entwickeln, die ohne Verkabelung auskommen. Das MNI wurde für den Einsatz an Straßen in ländlichen Gebieten aber auch in Städten, beispielsweise an Bushaltestellen, oder an Badeseen vorgesehen. Es ist ein Notruftelefon mit zusätzlicher Funktion als Informationsterminal beispielsweise für Verkehrs-, Wetter- und Umweltdaten.

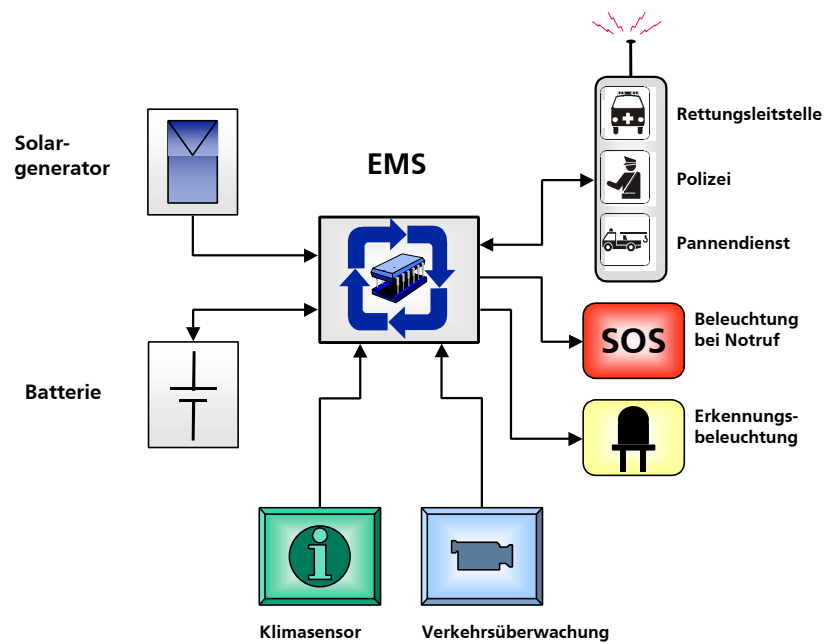


Abbildung 7: Komponenten des Notruf- und Informationssystems (MNI).

In Abbildung 7 sind die Komponenten des MNI dargestellt.

Falls das Energieangebot nicht ausreicht, können nachrangige Verbraucher in ihrer Leistungsaufnahme reduziert und abgeschaltet werden. Ziel ist es, den Betrieb des Notruftelefons dauerhaft zu gewährleisten.

In Abbildung 8 ist das MNI an einem Badensee zu sehen. Abbildung 9 zeigt schließlich den Hardwareaufbau des Energiemanagementsystems, der auch die Stromversorgung der Verbraucher auf verschiedenen Spannungsniveaus enthält. Diese ist durch mehrere DC/DC-Wandler realisiert.



Abbildung 8: Multifunktionales Notuf- und Informationssystem an einem Badesees.

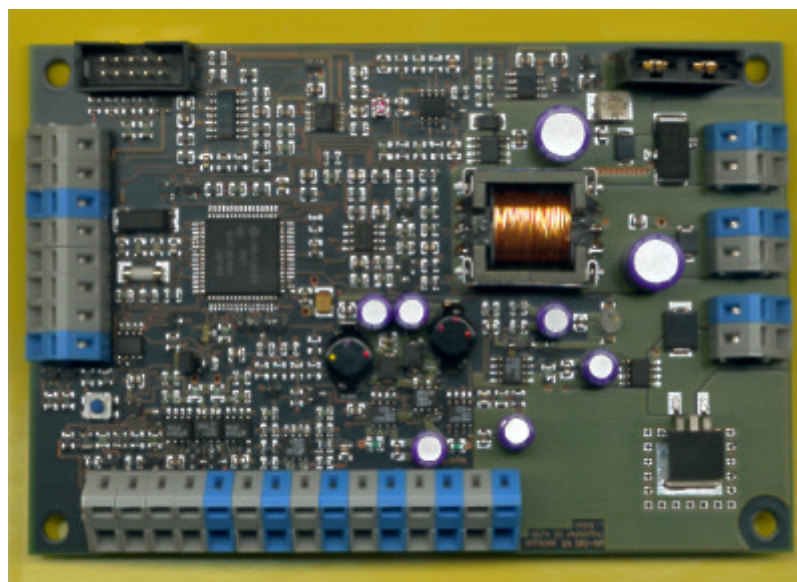


Abbildung 9: Hardware des Energiemanagementsystems für MNI mit Mikrocontroller.

6.3 PV-Hybridsystem zur Versorgung einer Telekommunikations-einrichtung

Zwischenverstärker in Richtfunkstrecken, Repeater in Mobilfunknetzen oder Sende- und Empfangsanlagen zum Aufbau von Festnetzen müssen oft in abgelegenen Gebieten aufgestellt werden. Ein Anschluss an ein entferntes öffentliches Stromnetz ist, wenn überhaupt realisierbar, teuer und aufwändig.

Im Rahmen eines EU-Forschungsprojekts wird gegenwärtig ein PV-Brennstoffzellensystem entwickelt und aufgebaut, das zur Versorgung einer solchen Telekommunikationsanlage dient. Hauptaugenmerk ist die Zuverlässigkeit der Stromversorgung bei gleichzeitiger Minimierung der Kosten. Sowohl die Auslegung der Komponenten als auch die Zustandsüberwachung, Steuerung und Regelung in Form eines Energiemanagementsystems sind Teile des Projektbeitrags des Fraunhofer ISE.

Kenndaten:

- Komponenten: Sende- und Empfangsanlage zum Aufbau von Telefonnetzen in ländlichen, strukturschwachen Gebieten, Brennstoffzelle mit Wasserstoffspeicher als Zusatzstromerzeuger; zukünftig mit Elektrolyseur und Wasserstoffjahresspeicher
- Dauerleistung des Verbrauchers: 150 W (entspricht 3,6 kWh/Tag)
- Anzahl Datenerfassungskanäle des EMS: 16
- Schaltausgänge des EMS: 32
- Prozessor: 8051-Derivat; 128 k Programmspeicher, 32 k Arbeitsspeicher
- Besonderheiten: Realisierung der Brennstoffzellensteuerung

In Abbildung 10 ist ein schematisches Blockschaltbild des Systems zu sehen. Zur Verdeutlichung der Komplexität von Steuerung und Regelung dient Abbildung 11, die die interne Struktur des Energiemanagementsystems darstellt.

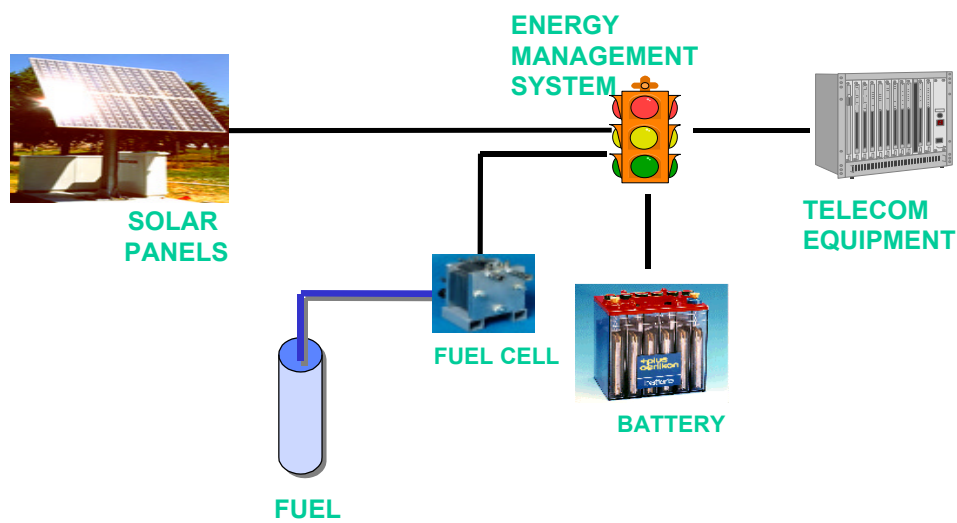


Abbildung 10: Blockschaltbild des Hybridsystems.

FIRST

Showcase 1+2

Internal
Hardware Structure
of the Energy
Management
System

13.02.01

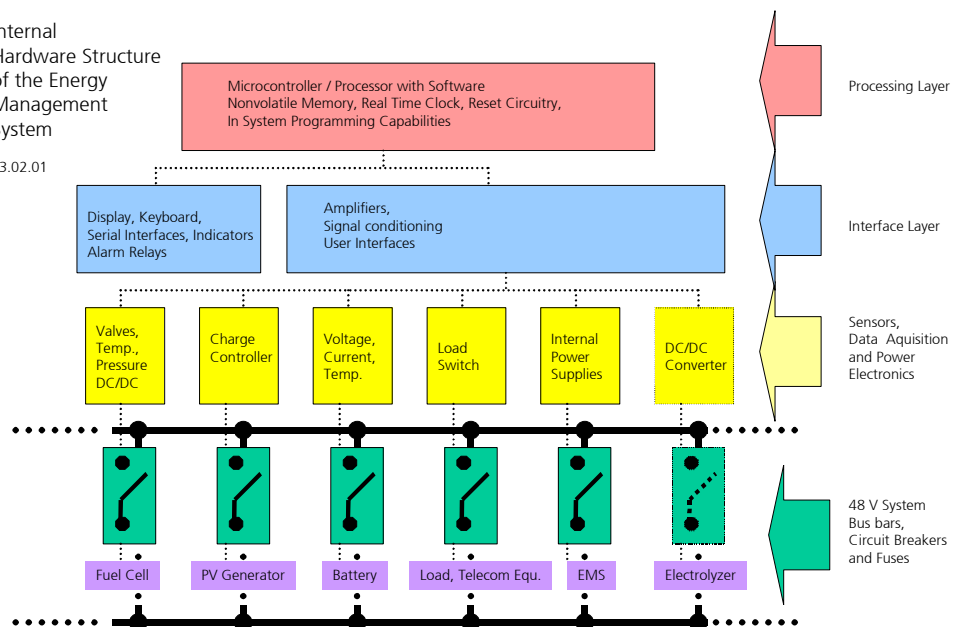


Abbildung 11: Interne Struktur des Energiemanagementsystems.