



zur Energiebedarfsminimierung beitragenden Solar-Batterie-Lade-Verbraucher-Management. Demonstriert wurde das System für Module der Funk-Gebäudeinstallationsstechnik der Fa. INSTA sowie Wearable-Computing Anwendungen des Fraunhofer-Institut IZM.

## Ergebnisse / Technologien

Im Einzelnen wurden folgende Ziele verfolgt:

- Entwicklung eines autonomen Funksenders als Komplettsystem mit optimierten Komponenten
- Reduzierung der Betriebskosten durch Verlängerung des Wartungsintervalls (Batteriewechsel)
- Anpassungsentwicklungen von Solar-Modulen für die Energieversorgung in Innenräumen
- Optimierungen von Schaltungen für niedrigen Energiebedarf
- Vermeidung von Batterien
- Erschließung neuer Anwendungen für Solar-Kleinstmodule im Bereich portabler Elektronik durch eine mechanisch flexible Ausführung.

Kommerziell erhältliche Solarmodule in Kombination mit einer Batterie sind keine Lösung für Anwendungen in der Mikrosystemtechnik, da bei autonomen Mikrosystemen selten ausreichend Platz vorhanden ist. Um diesen mit vorhandenen Möglichkeiten nicht erreichbaren Leistungsbereich abzudecken, musste eine integrierte Systemlösung entwickelt werden, in der die Energieerzeugung und Energiespeicherung genau aufeinander abgestimmt, auf die speziellen Randbedingungen eines Mikrosystems zugeschnitten und durch ein intelligentes Energiemanagement in ihrem Zusammenspiel optimiert werden.

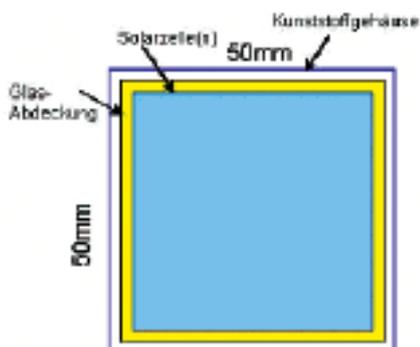


Abb. 2: Grundfläche eines 50x50-Moduls

Durch Verbrauchsminimierung sowie Entwicklung einer Mikropower-Schaltungstechnik und darauf abgestimmter Software konnte der Stromverbrauch der Bewegungsmelder / Präsenzmelder der Fa. INSTA bis auf 4...10  $\mu\text{A}$  abgesenkt werden. Dadurch wurde eine Solarversorgung mit Modulen der Größe 50 x 50 mm im Indoor-Bereich möglich. Die Ergebnisse zeigen, dass Anstrengungen zur Energieminimierung von elektronischen Schaltungen um den Faktor 1000 möglich und damit durchaus lohnenswert sind.

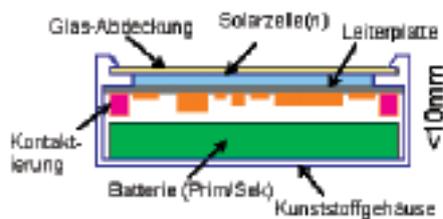


Abb. 3: Seitenansicht eines 50x50-Moduls

Eine an die Gehäuseabmessungen des Moduls angepasste Li-Polymerbatterie der Fa. Gaia konnte im Laufe des Projekts in allen relevanten Parametern soweit verbessert werden, dass ein langzeitstabiler Photovoltaikbetrieb sichergestellt ist.

Bei den am Institut ZSW (Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung) mit Hilfe eines speziellen Solar-Testprogramms durchgeführten Vergleichstests schneiden die Gaia-Akkus der dritten Generation überdurchschnittlich gut ab. Eine Lebensdauer über 600 Solarzyklen (entsprechen knapp 2 Jahren Einsatz) sowie über 1000 Vollzyklen ( $\sim 15$  Jahre Betrieb mit 20 %  $\text{dod}/\text{Tag}$ ) konnte nachgewiesen werden. Dabei zeigte sich, dass hierfür eine Optimierung der Ladeparameter notwendig ist. Insbesondere ist der Kontrolle der Ladeendspannung eine erhöhte Aufmerksamkeit zu widmen.

Die intensiven Untersuchungen im Institut ZSW zu den elektrochemischen Energiespeichervorgängen bei den Li-basierten Akkumulatoren haben ergeben, dass nur wenige Zehntel Volt geringere Ladeendspannung extrem die Lebensdauer positiv beeinflussen kann. Primär sollte sich der Anwender daher stärker an Strategien zum Erreichen einer hohen Anzahl von Lade-/Endladezyklen orientieren, als an dem Erreichen einer hohen (anfänglichen) Speicherdichte.



Abb. 4: Li-Polymerakku für 50 x 50-Insta-Module

Ein weiterer Schwerpunkt des Projekts war die Weiterentwicklung von CIS Dünnschicht-Solarzellen für den Indoor-Bereich. Module und Einzelzellen, die am Institut ZSW mit Wirkungsgraden bis über 16 % bei Standardtestbedingungen hergestellt werden, wurden für Schwachlichtanwendungen optimiert. Mit einem modifizierten Standardprozess konnten Zellenwirkungsgrade bis zu 8 % bei 1/1000 Sonne realisiert werden. Für die Ladung von Li-Polymerbatterien angepasste Kleinmodule ( $20\text{ cm}^2$ ) erreichten Wirkungsgrade bis 6,5 % bei 1/1000 Sonne sowie eine Ausgangsspannung von 4 Volt. Zudem konnte nachgewiesen werden, dass solche Module im industriellen Maßstab mit Wirkungsgraden zwischen 5 und 6,5 % bei guter Ausbeute gefertigt werden können.

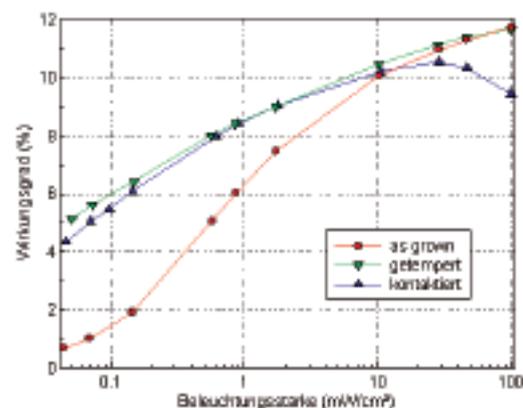


Abb. 5: Beleuchtungsabhängiger Wirkungsgrad eines CIS-Demonstrator Moduls ( $47 \times 47\text{ mm}^2$ ) vor der Verkapselung.

Für höhere Wirkungsgrade kann die am Fraunhofer-Institut IZM entwickelte Technologie verwendet werden. Mit aus der Elektronikfertigung adaptierten Chip on Board Technologien wurden Kleinmodule aus Si-Solarzellen kostengünstig gefertigt, die Wirkungsgrade bis 20 % ermöglichen.

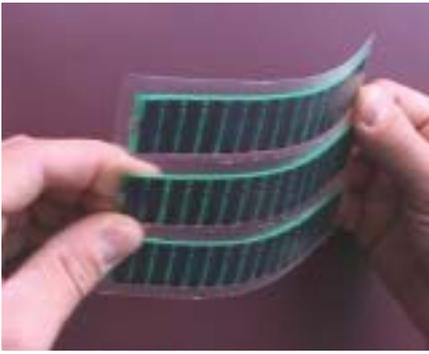


Abb. 6: Laminierte mechanisch flexible Solar Module

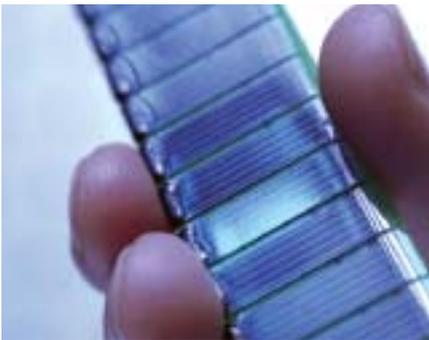


Abb. 7: Solar Modul mit einkristallinen Solarzellen

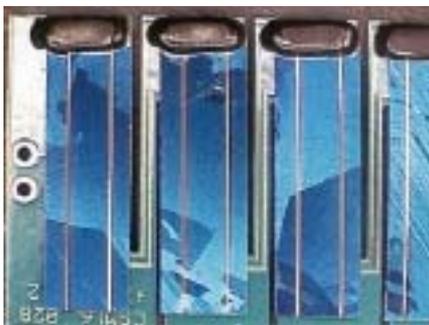


Abb. 8: Die-Bonden, Drahtbonden und Verkapseln der Flex-Demonstratoren

Durch eine patentierte Laminations- und Substrattechnologie können dabei auch gekrümmte oder mechanisch flexible Module hergestellt werden. Damit eröffnen sich beispielsweise auch Anwendungen zur Energieversorgung im Bereich Wearable Computing, Sport und Freizeit u. a. Mit einem speziellen Design-Programm können Solarmodule für gekrümmte Oberflächen als Funktion der Einstrahlungsbedingungen optimal ausgelegt werden.

## Zusammenfassung und Ausblick

Die Ergebnisse des Projekts können mittelfristig in neu zu entwickelnde Produkte im Bereich der funktions-technischen Vernetzung von Geräten der Gebäudesystemtechnik und im Bereich von autonomen und portablen Produkten der Mikroelektronik einfließen. Darüber hinaus lassen sich auch einzelne Teilaspekte des Projekts vielseitig nutzen. Beispielsweise können die erarbeiteten Verfahren der Mikro-Power-Schaltungstechnik nicht nur für solarbetriebene Geräte eingesetzt werden, sondern auch für Geräte, die sich beispielsweise aus einer Busspannung eines anderen Gerätes versorgen müssen. Selbstverständlich sind diese Kenntnisse auch Grundlage weiterführender Arbeiten, die sich mit anderen Formen energieautarker Sensoren mit Funkschnittstelle befassen. Die gewonnenen Kenntnisse aus dem Bereich der Solartechnik können nutzbringend in anderen Gebieten eingesetzt werden, wie zum Beispiel in Geräten, die Leuchtdioden für Beleuchtungszwecke einsetzen.

Die Gesamtheit der Batterieuntersuchungen zeigt, dass sich Li-Ionen Batterien hinsichtlich der meisten Parameter sehr gut für photovoltaische Anwendungen eignen, dass jedoch die Lebensdauer bei den meisten Zellen in Kombination mit ‚klassischen Ladeverfahren‘ nicht die Erwartungen erfüllt. Die in dem Vorhaben erarbeiteten Vorschläge sowie die gewonnenen Messergebnisse ermöglichen es aber, die vielen Vorteile von Li-Ionen Batterien in diesen Anwendungen zu nutzen.

Die Ergebnisse der Solarmoduleentwicklung eröffnen große Potenziale für den Einsatz von CIGS Modulen im Innenbereich und in Kleingeräten. Diese können in großen Stückzahlen angeboten und zu akzeptablen Preisen gefertigt werden.

Die am Fraunhofer-Institut IZM entwickelte Packagingtechnologie für miniaturisierte Solarmodule kann genutzt werden, um Solarprodukte für den Kleinleistungsbereich herzustellen. Die Technologie kann aber auch leicht an Unternehmen der Elektronikindustrie transferiert werden.

Die Konzeption der Ladezustandsbestimmungen und des Lademanagement der

Fa. Steca kann nicht nur autarke photovoltaische Anwendungen abdecken, sondern auch in netzversorgten oder netzgepufferten Systemen zur Anwendung kommen.

Die vom Fraunhofer-Institut ISE (Institut für Solare Energiesysteme) im Rahmen dieses Verbundprojektes erarbeiteten Ergebnisse zur Schaltungsentwicklung und Verbrauchsreduzierung können unmittelbar in verschiedensten solarversorgten Produkten einfließen. Unabhängig von der Art der Versorgung können die entwickelten Low-Power-Schaltungen ebenfalls in konventionelle Produkte übernommen werden, wodurch sich letztlich ebenfalls eine Produktverbesserung und eine Einsparung an Primär-Batterien ergibt.

Für autonome Sensoren und Mikrosysteme, die jahrelang völlig wartungsfrei arbeiten sollen, ist die Energieversorgung über Solarzellen die zurzeit effektivste Methode, Energie aus der Umwelt zu gewinnen. Es gibt aber eine Reihe von Anwendungen, wo entweder keine ausreichende Lichteinstrahlung zur Verfügung steht, oder die nutzbare Fläche zu klein ist. Hier wird an Alternativen gearbeitet, andere, am Einsatzort vorhandene Energieformen in Elektrizität umzuwandeln. Als Beispiel sei dafür die mechanische Energie genannt, die beispielsweise durch Wasser- und Luftströmungen, Schwingungen an Maschinenteilen, Fahrzeugen oder auch Gebäuden zur Verfügung steht, welche mittels Piezowandlern oder induktiven Wandlern genutzt werden kann.



Abb. 9: Solararmband zur Versorgung eines GPS-Handgerätes

Diese Entwicklungen befinden sich zurzeit im Anfangsstadium. Für Anwendungen, die wesentlich mehr Energie verbrauchen (portable Elektronikgeräte, Multimedia-

terminals 3G-Mobiltelefone) kann das Solarladegerät allenfalls eine Zusatzoption für die netzferne Nutzung sein. Hier zielen alle Anstrengungen darauf ab, Energiespeicher mit gegenüber Batterien wesentlich höherer Energie einzusetzen.

International sind viele F&E-Aktivitäten besonders auf Mikrobrennstoffzellen (Direktmethanol-Brennstoffzellen) gerichtet, die gegenüber Sekundärbatterien eine 3 bis 5-fach höhere Energiedichte versprechen.

## Literatur

- 1) Andreas Jossen, Vojtech Svoboda, Jürgen Garche, The use of Li-batteries for photovoltaic applications, **1. Int. Conf. On Polymer Batteries and Fuel Cells**, Jeju Islns, Korea, 1-6. Juni 2003 (Poster-presentation)
- 2) Margret Wohlfahrt-Mehrens, Christian Vogler, Jürgen Garche, Aging mechanisms of lithium cathode materials, **J. Power Sources**, in press (2004).
- 3) Virtuani, E. Lotter, M. Powalla, „Performance of Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> solar cells under low irradiance“, **Thin Solid Films** 431-432 (2003) 443.
- 4) Virtuani, E. Lotter; M. Powalla, U. Rau, and J. Werner, “Highly resistive Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> absorbers for improved low-irradiance performance of thin-film solar cells“, to be published in **Thin Solid Films**.
- 5) R. Hahn, S. Wagner, M. Krumm, K. Marquardt, Bahman Garjani, Holger Gerasch, Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. Eh. H. Reichl, Entwicklung alternativer Energiequellen für Chipkarten und Folienprodukte, **9. Entwicklerforum Batterien, Ladekonzepte & Stromversorgungsdesign**, München, 21.03.2002, S. 71-80
- 6) R. Hahn, K. Marquardt, S. Wagner, H. Gerasch, Prof. H. Reichl, Autarke Systeme mit Piezogeneratoren und Mikrosolarmodulen **2. GMM-Workshop** „Energieautarke Sensorik“ 06./07. Juni 2002, Dresden
- 7) R. Hahn, Integrierte Batterien, Piezo-Generatoren und Mikrobrennstoffzellen, **1. Workshop** „Integrierte Energieversorgung für portable Elektronik, Batterien, und alternative Energiequellen“, 7. März 2002, Berlin,
- 8) K. Marquardt, B. Garjani Charakterisierung von Li-Polymerbatterien, **1. Workshop** „Integrierte Energieversorgung für portable Elektronik, Batterien, und alternative Energiequellen“, 7. März 2002, Berlin, Fraunhofer IZM
- 9) K.-D. Lang, Petra Meier, Peter Semionyk, R. Hahn „Technologien für starre und flexible Solarmodule“, **3. Workshop** Integrierte Energieversorgung für Mikrosysteme, Berlin 28. April 2004
- 10) Deutsches Patent Nr. DE 102 49 695 B3 „**Strahlungssensor mit reduzierter Störfähigkeit**“, Tag der Erteilung: 19.05.2004
- 11) R. Hahn, S. Wagner, A. Schmitz, H. Reichl, Development of planar micro fuel cells with thin film and micro patterning technologies, **Journal of Power Sources** **131** (2004) pp. 73-78
- 12) Marco Voigt, Ines Freesen, Dr. Christopher Hebling, **European Portable Fuel Cell Study**, 2004, VDI/VDE-IT

## Förderung des Projektes:

**Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)**

Heinemannstraße 2, 53175 Bonn

## Projektanmeldung im Auftrag des BMBF: VDI/VDE Innovation + Technik GmbH (VDI/VDE-IT)

Herr Lutz-Günter John  
Rheinstraße 10B, 14513 Teltow,  
Tel.: 03328 435-158, Fax: 03328 435-256  
E-Mail: john@vdivde-it.de

## Projektkoordination:

**Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration (FhG-IZM)**

Herr Dr. Robert Hahn  
Gustav-Meyer-Allee 25, 13355 Berlin  
Tel.: 030 31472-833, Fax: 030 31472-835  
E-Mail: robert.hahn@izm.fraunhofer.de

## Projektpartner:

**Insta Elektro GmbH,**

Herr Dirk Umbach  
Talstraße 104, 58515 Lüdenscheid, Tel.:  
02351 936-4850, Fax: 02351 936-4900  
E-Mail: d.umbach@insta.de

**GAIA Akkumulatorenwerke GmbH**

Herr Tim Schäfer  
Montaniastraße 17, 99734 Nordhausen  
Tel.: 03631 616725, Fax: 03631 616728  
E-Mail: TimS@gaia-akku.com

**Steca Batterieladesysteme und Präzisionselektronik GmbH**

Herr Ralf Griepentrog  
Mammostraße 1, 87700 Memmingen  
Tel.: 08331 8558-0, Fax: 08331 8558-11  
E-Mail: Ralf.Griepentrog@steca.de

**ZSW Geschäftsbereich 1: Photovoltaik**

Herr Dr. Erwin Lotter  
Industriestraße 6, 70565 Stuttgart  
Tel.: 0711 7870-261, Fax: 0711 7870-230, E-Mail: erwin.lotter@zsw-bw.de

**ZSW Geschäftsbereich 3: Elektrochemische Energiewandlung und -speicherung**

Herr Dr. Andreas Jossen  
Helmholtzstr. 8, 89081 Ulm  
Tel.: 0731 9530823, Fax: 0731 9530666  
E-Mail: andreas.jossen@zsw-bw.de

**Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (FhG-ISE)**

Herr Dr. Heribert Schmidt  
Heidenhofstraße 2, 79110 Freiburg  
Tel.: 0761 4588-5226, Fax: 0761 4588-9320  
E-Mail: heribert.Schmidt@ise.fraunhofer.de

**Laufzeit: 2000-2003**

**Projektkosten: 3,5 Mio. EUR**

**Förderungssumme: 1,8 Mio. EUR**

In der Informationsreihe MST Infobörse werden aktuelle Entwicklungsergebnisse und Anwendungsmöglichkeiten von FuE-Projekten aus der Mikrosystemtechnik vorgestellt. Die einzelnen Ausgaben können kostenlos bei der VDI/VDE-IT angefordert werden. Alle bisher erschienenen Ausgaben sind auch im Internet abrufbar: [www.mst-innovationen.de](http://www.mst-innovationen.de)