

Optische Energieversorgung für einen drahtlosen Sensorknoten

Optical Power Supply for a Wireless Sensor Node

Christoph von der Ahe
Ludger Overmeyer

Institut für Transport- und Automatisierungstechnik
Leibniz Universität Hannover

In diesem Beitrag wird die optische Energieversorgung für einen drahtlosen energieautarken Sensorknoten beschrieben. Ein Überblick über das System einschließlich Sensorknoten, Energieversorgung und Kommunikationstechnik wird gegeben. Die Funkübertragungsmethoden werden hinsichtlich des Stromverbrauchs untersucht, um Anforderungen an die Stromversorgung zu definieren. Basierend auf Charakterisierungsmessungen des Verhaltens verschiedener Arten von Solarzellen unter künstlichem Licht, werden zwei Designs von Sensorknotenprototypen vorgestellt. Die optische Energieversorgung und das Energy-Harvesting-System für die Demonstratoren werden detailliert dargestellt.

[Schlüsselwörter: Drahtloser Sensorknoten; Optische Energieversorgung; Energy Harvesting; Indoor Photovoltaic; 24 GHz RFID]

This article describes the optical power supply for a wireless, self-powered sensor node. An overview of the system including sensor nodes, power supply and communication technology is provided. The radio transmission methods are examined in terms of power consumption to define power supply requirements. Based on characterization measurements of the behavior of different types of solar cells under artificial light, two designs of sensor node prototypes are presented. The optical power supply and the energy harvesting system for the demonstrators will be presented in detail.

[Keywords: wireless sensor node; optical power supply; energy harvesting; indoor photovoltaics; 24 GHz RFID;]

1 EINLEITUNG

Wettbewerbsfähige Fertigungsprozesse, insbesondere vor dem Hintergrund von Industrie 4.0, erfordern eine optimale Auslastung von Maschinen und Werkzeugen sowie eine frühzeitige Fehlererkennung und Qualitätssicherung durch anwendungsspezifische Überwachungssysteme. Solche Systeme werden in Werkzeugmaschinen eingesetzt,

um rotierende und starre Werkzeuge beim Gewindeschneiden, Bohren oder Fräsen zu überwachen. Durch Integration von Sensoren mit Dehnungsmessstreifen (DMS) in die Werkzeugaufnahmen, lassen sich die auftretenden Prozesskräfte messen. Gegenwärtig verwenden diese Systeme induktive Kopplungen für drahtlose Daten- und Energieübertragung oder aktive Funksysteme (868 MHz oder 2,45 GHz) in Kombination mit einer wiederaufladbaren Batterie. Nachteilig ist dabei die Notwendigkeit der Installation eines Stators für die induktive Kopplung, welcher den Arbeitsraum der Werkzeugmaschine einschränkt. Batteriebetriebene Systeme bringen den Nachteil mit sich, dass regelmäßig das System aus der Werkzeugmaschine entnommen und aufgeladen werden muss. Es gibt derzeit keine Systeme auf dem Markt, die gleichzeitig alle industriellen Anforderungen erfüllen, wie kleine Abmessungen, hohe Datenrate (mindestens 128 kbit/s) und Übertragungreichweite (mindestens 0,5 m), Nutzungsdauer von mindestens 12 Stunden, weltweite Funkzulassung und robuste Integration.

Um die Laufzeitprobleme batteriebetriebener Systeme zu lösen und gleichzeitig die Datenübertragungsleistung zu verbessern, haben das Institut für Transport- und Automatisierungstechnik und das Institut für Hochfrequenztechnik und Funksysteme gemeinsam mit der MARPOSS Monitoring Solutions GmbH, einem weltweit führenden Unternehmen in der Prozessüberwachung für Werkzeugmaschinen eine Zusammenarbeit begonnen. Ziel der Arbeit ist es, das im Rahmen des SFB 653 entwickelte solarzellenbetriebene 24-GHz-Kommunikationssystem zum Einsatz in stationären Werkstücke [DAW17] für rotierenden Anwendungen wie Gewindeschneid- oder Bohrprozesse weiterzuentwickeln. Der Sensorknoten arbeitet im lizenzfreien Frequenz-ISM-Band (Industrial, Scientific and Medical) und verwendet eine Funkverbindung basierend auf der Rückstreuungsmodulation eines Signals von einem Leegerät, was den Energieverbrauch für die Datenübertragung auf der Sensorknotenseite minimiert. Mit Hilfe der integrierten Solarzellen in Verbindung mit einer externen Lichtquelle wird der Sensorknoten mit Energie versorgt. Mit fortschrittlichen Energy-Harvesting-Methoden und

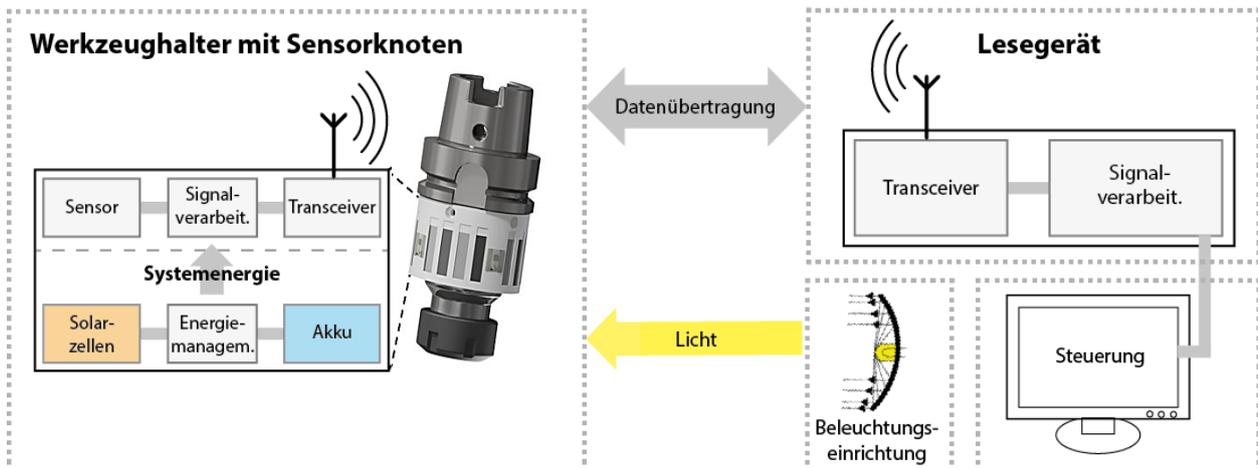


Abbildung 1. Funktionsprinzip des drahtlosen Sensorknotens mit optischer Energieversorgung

Low-Power-Komponenten soll der Sensorknoten eine autarke funkbasierte Prozessüberwachung ermöglichen. Um einen robusten Betrieb zu gewährleisten, werden ein industrielles Lesegerät und ein erweitertes Kommunikationsprotokoll benötigt, das den parallelen Betrieb von mindestens vier Sensorknoten ermöglicht. Das Funktionsprinzip des Systems ist in Abb.1 dargestellt.

2 ANALYSE DES ENERGIEBEDARFS

Um einen autonomen Betrieb des Sensorknotens zu erreichen, sind Untersuchungen zur Energiebilanz von grundlegender Bedeutung. Das von MARPOSS Monitoring Solutions GmbH angebotene System verwendet Wi-Fi für die drahtlose Kommunikation zwischen dem rotierenden Sensor und der Steuerung. Andere Elemente des Sensorknotensystems wie Dehnungssensoren und Mikrocontroller haben eine geringere Auswirkung auf den Energieverbrauch des Sensorknotens. Daher steht der Energieverbrauch des Kommunikationssystems im Fokus.

Der Stromverbrauch eines typischen Wi-Fi-Moduls beim Senden einfacher UDP-Pakete mit zwei verschiedenen Wiederholungszeiten ist in Abb. 2 dargestellt. Unsere Untersuchungen zeigen, dass der Stromverbrauch stark von der Methode abhängt, wie der Wi-Fi-Standard für die Datenübertragung genutzt wird. Insbesondere haben die Paketgröße und die Wiederholungsrate einen Einfluss auf den durchschnittlichen Stromverbrauch. In der ersten Messung (blaue Kurve) werden 50 Byte Pakete mit einer Periode von 40 ms gesendet. Hier stellt sich bei einer Versorgungsspannung von 3,3 V ein mittlerer Stromverbrauch von 63,3 mA ein. Im Vergleich dazu wird eine Messung mit 1500 Byte Paketen und einer Periode von 80 ms durchgeführt. Der durchschnittliche Stromverbrauch ist in diesem Fall mit 18 mA zwar deutlich geringer, verglichen mit einer Rückstreuungs-Modulation jedoch noch sehr hoch. [ALO18]

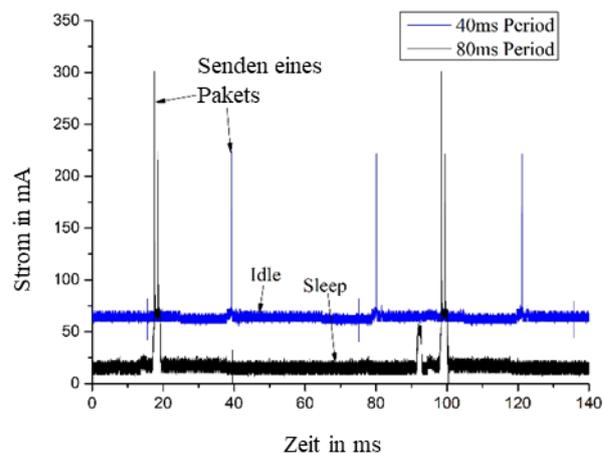


Abbildung 2. Stromverbrauch des Wi-Fi Moduls

Im Gegensatz zu der Wi-Fi-Lösung, die sensorseitig mit einem aktiven Funksender arbeitet, würde mit einem passiven Funkmodul am Sensorknoten, welches mit Rückstreuungs-Modulation kommuniziert, ein deutlich geringer Energieverbrauch erreicht. Während der Datenübertragung vom Sensor zur Steuerung sendet das Lesegerät eine unmodulierte Funkwelle an den Sensorknoten. Der Sensorknoten reflektiert das empfangene Signal unter Steuerung des Sensordatenstroms mittels eines einfachen Transistorschalters. Die vom Sensorknoten für die Rückstreuungs-Modulation benötigte Energie ist minimal. Abb. 3 zeigt den zeitveränderlichen Stromverbrauch (blaue Kurve) des 24 GHz Kommunikationssystems mit einer 2-V-Spannungsvorsorgung für eine komplette Sensorwertanforderung vom Lesegerät. [DLN16]

Hinsichtlich der Leistungsaufnahme verspricht die Rückstreuungs-Modulation große Vorteile. In Kombination mit den Dehnungsmesstreifen und dem Mikrocontroller für die Anwendung zur Prozessüberwachung in Werkzeugmaschinen wird ein maximaler durchschnittlicher

Energieverbrauch von ca. 10 mW erwartet, während Wi-Fi mit einer Senderleistung von bis zu 100 mW arbeitet. Die hohe Einsparung kann hauptsächlich aufgrund der Datenübertragungsoptimierung erreicht werden.

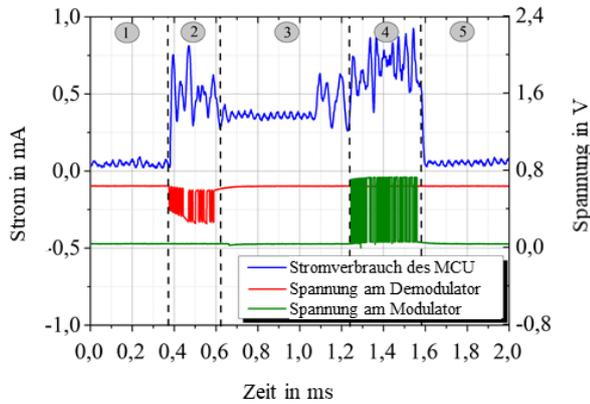


Abbildung 3. Stromverbrauch des 24 GHz Kommunikationssystems

3 OPTISCHE ENERGIEVERSORGUNG

Im industriellen Umfeld steht eine Vielzahl von potentiellen Energiequellen für das Energy Harvesting zur Verfügung. Untersuchungen haben gezeigt, dass Licht davon mit großem Abstand das größte Energiepotential liefert [KKH11]. Aktuell weist die photonische Energiewandlung zudem die höchste Energiedichte auf [RKH05]. Während Sonnenlicht bis zu 100 mW/cm² liefert, finden sich in Gebäuden unter künstlicher Beleuchtung jedoch nur 0,1 – 1 mW/cm² [MWW09]. Dies entspricht Beleuchtungsstärken zwischen 200 lx und 2000 lx. Solarzellen werden in erster Linie durch ihren Wirkungsgrad η charakterisiert. Der Wirkungsgrad wird in einem genormten Verfahren bestimmt, indem bei einer dem Sonnenspektrum entsprechenden Strahlungsleistungsdichte von 100 mW/cm² die erzeugte elektrische Leistung gemessen wird. Der Wirkungsgrad berechnet sich aus dem Verhältnis der einfallenden Strahlungsleistung $P_{Strahlung}$ und der Solarzellenleistung P_{SZel} [DEM11]:

$$\eta = \frac{P_{SZel}}{P_{Strahlung}}$$

Um die Solarzellen auszuwählen, die auf den prototypischen Sensorknoten verwendet werden sollen, wird eine intensive Marktstudie für Solarzellen durchgeführt. Proben aller verfügbaren Arten von Solarzellen werden beschafft, um ihre Leistung unter künstlichen Lichtbedingungen zu testen. Folgende Solarzellenmaterialien sind auf dem Markt erhältlich (vgl. [MER15]): Cadmium-Tellurit (CdTe), Kupfer-Indium-Gallium-Selenid (CIS), monokristallines Silizium (monoSi), polykristallines Silizium (polySi), mikrokristallines Silizium (μ Si) und amorphes Silizium, wobei ein Typ für den Innenbereich (aSi_In) und ein

anderer für den Außenbereich (aSi_Out) bestimmt ist. Getestet werden auch Triple-Junction-Zellen auf Germaniumsubstrat (triple). Die Solarzellenmodule unterscheiden sich sowohl im verwendeten Material und damit verbunden in ihrem Wirkungsgrad als auch in ihrer aktiven Fläche A . Die Eigenschaften der Solarmodule sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

Solarzelle	η	A
CdTe	10,69 %	0,75 cm ²
CIS	12,87 %	0,6 cm ²
MonoSi	22 %	1,33 cm ²
PolySi	14 %	2,2 cm ²
μ Si	8,05 %	0,84 cm ²
aSi_In	7 %	2 cm ²
aSi_Out	7,89 %	3,42 cm ²
Triple	40 %	1 cm ²

Während der Tests werden LED-Module mit einer Farbtemperatur zwischen 2700 K und 6000 K zur Beleuchtung verwendet. Die Entscheidung, LEDs einzusetzen, basiert auf der hohen Lichtausbeute sowie auf ihrer fortschreitend dominierenden Anwendung als Beleuchtung des Arbeitsraums von Werkzeugmaschinen. Die Abbildungen 4 und 5 zeigen die Ergebnisse für die Leistungsabgabe der aufgelisteten Solarzellentypen unter verschiedenen Beleuchtungsstärken von einem LED-Modul mit einer Farbtemperatur von 6000 K. Die Messungen werden mit einer Elektronischen Last Keysight B2902A durchgeführt. Aufgrund der unterschiedlichen Abmessungen der getesteten Zellen wird die Ausgangsleistung auf Mikrowatt pro Quadratcentimeter Solarzellenfläche (μ W / cm²) normiert. Die Beleuchtungsstärken, die in Abb. 4 gezeigt sind, können durch die eingebaute Beleuchtung der Werkzeugmaschine unter idealen Bedingungen realisiert werden.

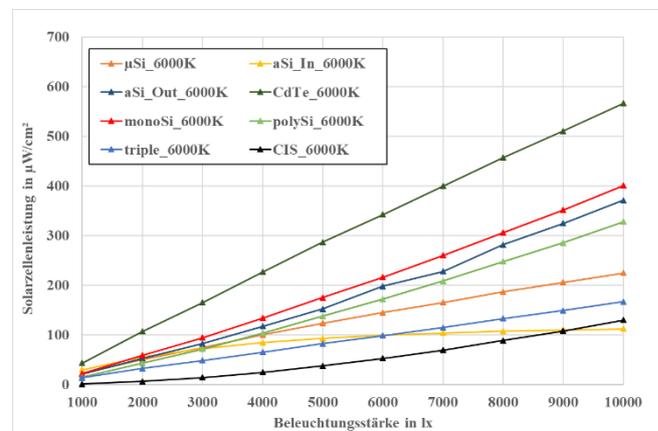


Abbildung 4. Erzeugte Solarzellenleistung für Beleuchtungsstärken von 1000 lx bis 10.000 lx

Aber selbst bei großen Solarzellenflächen ist die Ausgangsleistung zu niedrig, um 10 mW für den endgültigen Prototyp mit Rückstreuungs-Modulation zu erreichen, und erst Recht zu niedrig, um 100 mW für den aktuellen Prototyp mit Wi-Fi-Kommunikation zu erreichen.

Daher muss eine zusätzliche Lichtquelle für höhere Beleuchtungsstärken eingesetzt werden. Monokristalline Solarzellen erzeugen unter diesen Bedingungen die höchste Leistung (vgl. Abb. 5). Die im Charakterisierungstest untersuchten monokristallinen Solarzellen werden von der Firma IXYS (IXOLAR KXOB22-04X3) hergestellt [IXY11].

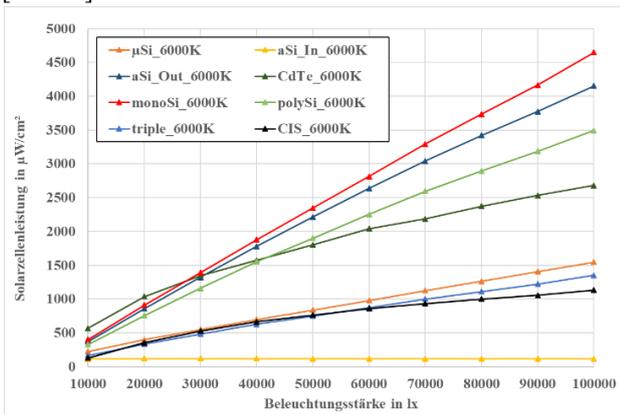


Abbildung 5. Erzeugte Solarzellenleistung für Beleuchtungsstärken von 10.000 lx bis 100.000 lx

Unter Berücksichtigung der Leistungsanforderungen der verschiedenen Kommunikationstechnologien wird die Größe der Solarzellenfläche, die zur Stromversorgung der geplanten Prototypen benötigt wird, anhand der Charakterisierungsergebnisse berechnet. Die WLAN-Lösung benötigt 110 cm² bei einer Beleuchtungsstärke von 20.000 lx und 26 cm² bei 80.000 lx, während die Rückstreuungsmodulation-Lösung nur 11 cm² bzw. 2,6 cm² benötigt.

4 KONZEPT FÜR EINEN SENSORKNOTEN ZUR PROZESSÜBERWACHUNG IN WERKZEUGMASCHINEN

Die Kommunikation soll mittels Rückstreuungs-Modulation realisiert werden. Die beschriebenen Untersuchungen zeigen, dass diese Kommunikationslösung verglichen mit der Wi-Fi-Lösung große Vorteile hinsichtlich des Energiebedarfs bietet. Die kleinen Antennenabmessungen der Rückstreu-Lösung erleichtern zudem die Integration in den Werkzeughalter.

Um die Nachteile induktiv gespeister oder batteriebetriebener Systeme zu vermeiden, wird ein hybrides Energieversorgungskonzept auf mittels Solarzellen entwickelt und umgesetzt [MFG12]. Gemäß Abb. 1 werden Solarzellen zur Stromerzeugung in Verbindung mit einem Energiespeicher und einem Energiemanagementsystem verwendet. Kritische Auswahlkriterien für die Solarzellen sind die verfügbaren Dimensionen und Absorptionsspektren sowie

Wirkungsgrade und letztlich der Preis. Um eine maximale Energieausbeute zu erreichen, sollte die Rotoroberfläche im Werkzeughalter möglichst groß ausgenutzt werden. Aufgrund geometrischer Einschränkungen des Rotors (gekrümmte Fläche, Abmessungen) müssen mehrere Solarzellen auf den Rotor aufgebracht und durch schaltungstechnische Maßnahmen zu einem Solarmodul kombiniert werden. Eine externe Lichtquelle ermöglicht die Steuerung der Energieversorgung in allen Betriebszuständen vergleichsweise einfach. Aufgrund der Rotation des Sensorknotens oder anderer Abschattung besteht jedoch die Gefahr, dass das Solarmodul keine stabile Energieversorgung gewährleisten kann. Mit Hilfe von Energiespeichern können diese Zeiträume überbrückt werden; Superkondensatoren oder Akkumulatoren können für diesen Zweck verwendet werden.

Weiterhin ist ein Energiemanagementsystem zu integrieren, das die Leistungsanpassung, die Gleichspannungswandlung im richtigen Spannungsbereich, die Lade- und Entladekontrolle des Energiespeichers und die Steuerung (Ein/Aus) des Sensorknotens bei kritischer Spannung übernimmt. Moderne Energy-Harvesting-ICs umfassen die erforderlichen Funktionen wie MPPT (Maximum Power Point Tracking), niedriger Ruhestrom, DC-DC-Wandlung, niedriger Eingangsspannungsbereich sowie Batterieladung und -schutz.

5 DEMONSTRATOREN

Unter Berücksichtigung der zuvor genannten Überlegungen wird ein Prototyp des Sensormoduls erstellt. Abb. 6 zeigt das an einem HSK63-Werkzeughalter montierte Sensormodul. Das Modul besteht aus einem Gehäuse, das die Dehnungssensoren mit der entsprechenden Elektronik sowie die Kommunikations- und Energiemanagementschaltungen enthält. Die Außenseite des Gehäuses verfügt über vier Antennen, die symmetrisch um den Umfang verteilt sind. Eine symmetrische Verteilung sollte eine kontinuierliche Verbindung zwischen dem Sensormodul und dem Lesegerät auch während der Rotation des Systems bewirken. An der Außenseite des Gehäuses sind Solarzellen zur Energiegewinnung angebracht. Aufgrund des begrenzten Platzes auf dem Werkzeughalter und der typischerweise vorherrschenden Lichtverhältnisse innerhalb einer Werkzeugmaschine muss eine zusätzliche Lichtquelle installiert werden, um die Erzeugung von ausreichend Energie zu ermöglichen, um das Sensormodul mit Energie zu versorgen. Der in Abb. 6 dargestellte Prototyp weist auf seiner Außenseite 16 IXYS-Solarzellen auf. Mit Abmessungen von 22 mm x 6 mm für eine Zelle ergibt sich eine kombinierte Solarzellenfläche von 21 cm². Dieser Bereich erzeugt 19 mW für 20.000 lx und 72 mW für 80.000 lx bei gleichzeitiger Beleuchtung, was ausreichend ist, um die Lösung mit Rückstreuungs-Modulation zu versorgen.

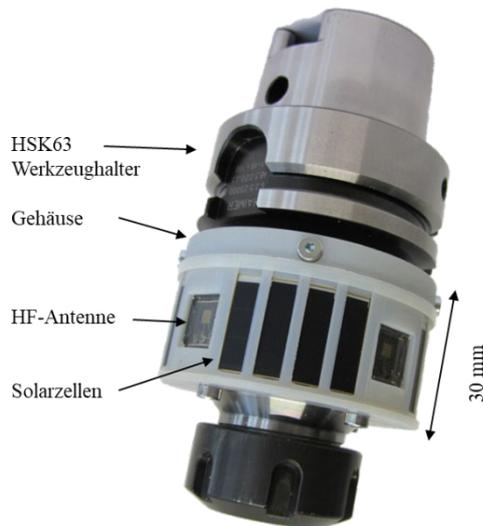


Abbildung 6. Demonstrator für rotierende Anwendungen mit 24 GHz Kommunikation

Für die Wi-Fi-basierte Lösung, die 100 mW benötigt, wird jedoch nicht genügend Energie erzeugt. Daher wird in der aktuellen Phase des Projektes ein zusätzlicher Demonstrator aufgebaut (vgl. Abb. 7). Es basiert auf einem von MARPOSS entwickelten stationären Sensormodul. 21 IXYS-Zellen mit einer Fläche von 27,7 cm² werden an die Oberfläche des Prototypengehäuses angebracht. Gemäß Abb. 5 erzeugen die monokristallinen Solarzellen 3,8 mW/cm² für 80.000 lx. Das bedeutet, dass 80.000 lx benötigt werden, damit die 21 Zellen 100 mW für die Stromversorgung des Prototyps mit Wi-Fi-Kommunikation erzeugen können.

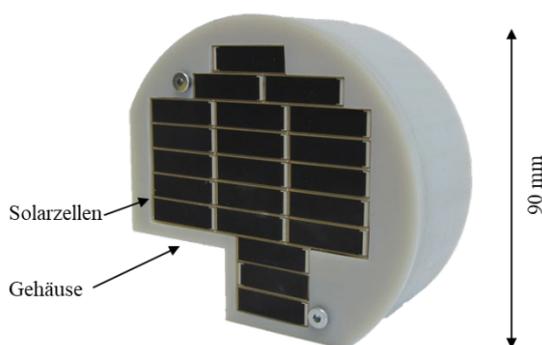


Abbildung 7. Demonstrator für statische Anwendungen mit Wi-Fi Kommunikation

6 ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Beitrag wurde das Konzept einer photovoltaischen Energieversorgung für einen energieautarken Sensorknoten zur funkgestützte Prozessüberwachung vorgestellt. Anhand einer Energiebedarfsanalyse wurden die Anforderungen an die Energieversorgung definiert.

Gleichzeitig wurde das große Einsparpotential durch den Einsatz eines Kommunikationssystems auf Basis der Rückstreuungsmodulation aufgezeigt.

Die Charakterisierung der verfügbaren Solarzellen hinsichtlich der Energieerzeugung unter künstlichem Licht lieferte Werte im einstelligen Milli wattbereich bei typischer Arbeitsraumausleuchtung einer Werkzeugmaschine. Eine zusätzliche Lichtquelle ist erforderlich, um ausreichende Beleuchtungsstärken für die Erzeugung von 10 bis 100 mW zu liefern, die für die Stromversorgung der geplanten Demonstratoren benötigt werden.

Die Entwürfe von zwei verschiedenen Demonstratoren wurden vorgestellt. Der beabsichtigte finale Prototyp, der mit der Rückstreuungs-Modulation arbeiten soll, wurde beschrieben. Für Untersuchungen am Energy-Harvesting-System wurde ein intermediärer Prototyp auf Basis eines existierenden Wi-Fi-Kommunikationssystems aufgebaut. Dieser enthält eine Solarzellen-Panel, ein Energiemanagement mit einem Energiespeicher und ein Wi-Fi-Modul für die drahtlose Datenübertragung. Mit einer Lichtquelle, die 80.000 lx liefert, konnte ausreichend Energie für einen konstanten Betrieb, selbst dieses Systems mit hohem Energiebedarf, erzeugt werden.

LITERATUR

- [ALO18] von der Ahe, C., Lüers, B., Overmeyer, L., Geck, B., Fürtjes, T., *Low power sensor node with photovoltaic power supply for radio-based process monitoring*, in: *Procedia Manufacturing Volume 24*, Pages 203-209, 2018
- [DAW17] Q. H. Dao, C. von der Ahe, P. von Witzendorff, L. Overmeyer, B. Geck, *Optoelectronic integration of radio frequency communication systems in metal components*, In: B. Denkena, T. Mörke: *Cyber-Physical and Gentelligent Systems in Manufacturing and Life Cycle*, 1st Edition, Elsevier, 2017, pp. 225-245 ISBN: 978-0-12-811939-6
- [DEM11] Dembowski, K., *Energy Harvesting für die Mikroelektronik*, VDE Verlag, Berlin, 2011
- [DLN16] Q. H. Dao, B. Lüers, T. T. Ngo, B. Geck, *An Optically Transparent Analog Frontend for a Solar Powered 24 GHz RFID Transponder*, International Microwave Symposium (IMS 2016), San Francisco, California, USA, May 22-27, 2016, DOI: 10.1109/MWSYM.2016.7539991

- [IXY11] IXYS Corporation, Datasheet IXOLAR KXOB22-04X3, Rev. Aug. 2011
- [KKH11] Kamagaew, Andreas; Kirks, Thomas; ten Hompel, Michael: *Energy potential detection for autarkic Smart Object design in facility logistics*. In: Control System, Computing and Engineering (ICCSCE), 2011 IEEE International Conference on, S. 285–290, 2011
- [MER15] Mertens, K., *Photovoltaik*, 3.Auflage, München, Hanser Verlag, 2015
- [MFG12] J. Meyer, S. Franke, B. Geck, L. Overmeyer, An Optically Powered Communication Structure for Integration in Metallic Objects, 1st Joint Symposium on System-integrated Intelligence (Sysint), Hannover, Germany, June 27-29, 2012
- [MWW09] Müller, M., Wienold, J., Walker, W.D., Reindl, *Characterization of indoor photovoltaic devices and light*, in: PVSC, IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 34, 2009
- [RKH05] V. Raghunathan, A. Kansai, J. Hse, J. Friedman, M. Srivastava, *Design considerations for solar energy harvesting wireless embedded systems*, in: Proceedings of the IPSN, 457–462, 2005.

division manager and head of research and development at Mühlbauer AG in Roding. Since 2001 Ludger Overmeyer is Professor at the Institute of Transport and Automation Technology of Leibniz University Hannover.

Address: Leibniz University Hannover, Institute of Transport and Automation Technology, An der Universität 2, 30823 Garbsen, Germany
Phone: +49 511 762-3524, Fax. +49 511 762-4007
E-Mail: ludger.overmeyer@ita.uni-hannover.de

Christoph von der Ahe, M.Sc., Research Assistant at the Institute of Transport and Automation Technology of Leibniz University Hannover.

Christoph von der Ahe was born 1985 in Paderborn, Germany. Between 2006 and 2013, he studied Mechatronics at PHWT Oldenburg and at Leibniz University Hannover. Since 2013 he is working at the Institute of Transport and Automation Technology of Leibniz University Hannover.

Address: Leibniz University Hannover, Institute of Transport and Automation Technology, An der Universität 2, 30823 Garbsen, Germany
Phone: +49 511 762-3843, Fax. +49 511 762-4007
E-Mail: christoph.vonderahe@ita.uni-hannover.de

Prof. Dr.-Ing. Ludger Overmeyer, Head of the the Institute of Transport and Automation Technology of Leibniz University Hannover.

Ludger Overmeyer was born 1964 in Recke, Germany. Between 1984 and 1991, he studied electrical engineering at the University of Hannover. In 1996 he finished his doctorate in mechanical engineering at the University of Hannover. From 1997 to 2001 he worked as project manager,