

Autarke Mikrosysteme: Anwendungen in der Energiewirtschaft

Wireless Sensor Networks: Applications for Utilities

Dr. Dietmar Laß¹, Carsten Brockmann², Bernd Stube³, Prof. Klaus-Dieter Lang^{2,3}

¹ Fraunhofer Verbund Mikroelektronik, Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland (FMD),
Anna-Louisa-Karch Str. 2, 10178 Berlin, dietmar.lass@mikroelektronik.fraunhofer.de

² Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration IZM, Gustav-Meyer-Allee 25, 13355 Berlin

³ Technische Universität Berlin, Forschungsschwerpunkt Technologien der Mikroperipherik,
Gustav-Meyer-Allee 25, 13355 Berlin

Kurzfassung

Um volatile erneuerbare Energiequellen in das Energieversorgungssystem zu integrieren, bedarf es neuer Leitungen oder höherer Kapazitäten im bestehenden Stromnetz. Der Bedarf an Neubautrassen lässt sich massiv reduzieren, wenn vorhandene Freileitungen besser ausgelastet werden. Durch Freileitungsmonitoring der Energienetze auf Basis autarker Mikrosysteme ist es möglich, den Stromtransport deutlich zu erhöhen und so Netzausbau zu vermeiden. Die Sensornetzwerke der Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland (FMD) halten auch widrigen Umgebungsbedingungen stand (z.B. Eis im Gebirge) und übertragen kritische Daten zuverlässig drahtlos an die Leitwarte des Netzbetreibers.

Abstract

To integrate volatile renewable energy sources into the energy supply system, we need new power lines or higher capacities in the existing electricity grid. Building new lines can be prevented if existing overhead lines are better utilized. Through overhead line monitoring of energy grids based on self-sufficient microsystems it is possible to increase the power transport significantly compared to the standard and thus avoid grid expansion. The sensor networks of the Research Fab Microelectronics Germany (FMD) also withstands harsh environmental conditions (such as ice in the mountains) and reliably transmits critical data wirelessly to the grid operator's control center.

1 Einleitung

Autarke Mikrosysteme sind miniaturisierte vernetzte technische Systeme, die dank eigener Energieversorgung autonom agieren können. Ihre Aufgabe ist es, den Zustand von Objekten mit geringem Energieaufwand zu erfassen, Sensordaten zu verarbeiten und drahtlos weiterzuleiten. Sie erfreuen sich zunehmender Beliebtheit in vielen Anwendungsbereichen, z.B. in der Industrieautomatisierung oder der Überwachung kritischer Infrastrukturen. In diesem Beitrag wird ein Überblick über die Systemkomponenten autarker Mikrosysteme und deren Einsatzmöglichkeiten in der Energiewirtschaft gegeben.

2 Autarke Mikrosysteme

2.1 Systemkomponenten

Autarke Mikrosysteme bestehen aus einem Sensor-Aktor-Modul, einem Funk-Modul für die Konnektivität des Systems und einem Energie-Modul wie einem Energy Harvester oder einer Batterie (**Bild 1**).

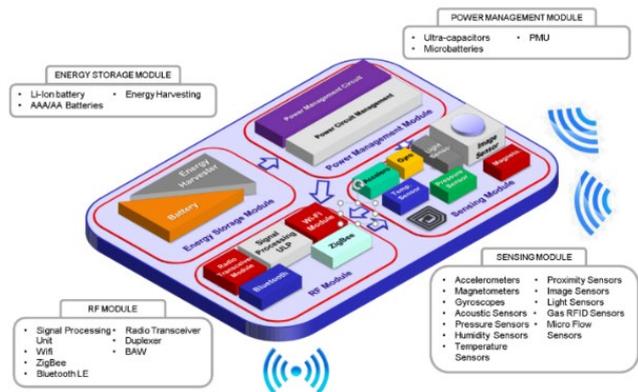


Bild 1 Systemkomponenten autarker Mikrosysteme (Yole)

Typisch für autarke Mikrosysteme ist, dass die Systeme anwendungsspezifisch auszulegen sind, z.B. eine Anpassung der Sensoren an applikationsspezifische Messgrößen oder eine individualisierte Auslegung der Harvester.

Insbesondere bei der Funkkommunikation gibt es durch diverse Störquellen Störeffekte bei der Ausbreitung im Raum einen starken Anpassungsbedarf.

2.2 Anwendungsgebiete

Autarke Mikrosysteme sind seit gut 20 Jahren Gegenstand der Forschung. Parallel dazu wurden mögliche Einsatzgebiete in der Industrie evaluiert, wobei das primäre Einsatzgebiet militärische Anwendungen waren (Homeland Security). Eine systematische Analyse verschiedener Applikationsfelder wurde von Fraunhofer und dem Borderstep Institut angestrengt.

Nach zwischenzeitlich nachlassendem Interesse rücken autarke Mikrosysteme wieder stärker in den Fokus der angewandten Forschung. Dies erklärt sich mit sprunghaften Performance-Verbesserungen bei vielen Systemkomponenten – sei es auf dem Gebiet der Aufbau- und Verbindungstechnik (SoC, SiP), der Konnektivität, der Energieversorgung oder der Rechenleistung im Sensorknoten.

Aktuelle **Forschungsfragen** betreffen verschiedene nachfolgend aufgeführte Themengebiete:

- Komponenten-Entwicklung (z.B. Antennendesign)
- Systemintegration (Netzwerktopologie, Synchronisierung)
- Miniaturisierung und Wireless Power (z.B. drahtloses Laden)
- Softwareentwicklung (z.B. verteiltes Daten- & dynamisches Lastmanagement im Sensornetzwerk, verteilte Rechenleistung)
- Sicherheitsaspekte (vertrauenswürdige Funkkommunikation, Verhinderung von Seitenkanalattacken und Knoteninfizierung).

Die Forschung geht entweder in Richtung Optimierung des Sensorknotens selbst (ultra low power, Intelligenz durch sensornahe KI) oder zielt auf die Erhöhung der Intelligenz des Gesamtsystems in großen verteilten kooperativen Sensornetzwerken (Wide Area Networks) ab.

3 Energie-Anwendungen

3.1 Überblick

Die Energie- und Netzwirtschaft weist aufgrund ihres Versorgungsauftrags eine hohe gesellschaftliche Relevanz auf. Die Energiebranche durchläuft aktuell einen fundamentalen Wandel hin zu einem nachhaltigen, dezentral-verteilten

und digital-vernetzten Energiesystem. Im Mittelpunkt dieser als *Energiewende* bezeichneten Transformation stehen die Energienetze, die auf allen Spannungs- und Versorgungsebenen die Balance zwischen fluktuierender erneuerbarer Erzeugung und flexiblen Lasten halten. Insbesondere die Verteilnetze im ländlichen Raum, die 95% der Erzeugung durch erneuerbare Energien aufnehmen, müssen ertüchtigt werden.

Im vorliegenden Beitrag wird nicht die gesamte Wertschöpfungskette der Energiewirtschaft (von der Erzeugung bis zum Verbraucher), sondern nur die *Netzebene* betrachtet.

3.2 Anforderungen der Energiewirtschaft an Autarke Mikrosysteme

Der Umbau des Versorgungssystems ist nicht zuletzt mit hohen Kosten des nicht genutzten Ökostroms sowie durch fehlende Transparenz in den Energienetzen und damit zusammenhängende Sicherheitsrisiken gekennzeichnet.

Kritische Infrastrukturen wie die Energie- und Netzwirtschaft sind daher ein zentrales Einsatzgebiet für autarke Mikrosysteme. Die Zustandsüberwachung von Energienetzen mittels verteilter Mikrosysteme erfolgt im Idealfall energieautark. Ziel des Monitorings ist eine bessere Betriebs- und Systemführung sowie eine Erhöhung der Sicherheit und Resilienz der Energienetze. Unter Resilienz versteht man die Widerstandsfähigkeit der Netze gegenüber äußeren Einflüssen oder Störungen (z.B. Eis und Stürme) sowie Angriffen (z.B. Cybersicherheit). Das dezentral-vernetzte Gesamtenergiesystem bedarf einer permanenten Zustandsüberwachung durch verteilte Sensoren auf allen Spannungsebenen auf dem langen, z.T. sehr verzweigten Weg von der Quelle zum Verbraucher.

3.3 Technologische Lösungen

Die Technologien für einen energiewendetauglichen Betrieb der Stromnetze sind vielfältig. Auf der Übertragungsebene sind es z.B. Erdkabel, Phasenschiebertransformatoren, WAMS, FACTS, HGÜs und Hochtemperaturleiterseile; auf der Verteilnetzebene z.B. RONTs, Einspeisenetze, Netz-Sensorik/-Automatisierung und HTS-Kabel.

Freileitungsmonitoring stellt eine probate Technologie auf beiden Spannungsebenen dar. Beispielsweise kann durch Freileitungsmonitoring auf der 110kV-Verteilnetzebene die Übertragungsleistung temporär um bis zu 50% gesteigert werden, was nicht zuletzt stark von den Witterungsbedingungen abhängt. Es hat in Regionen mit hoher Windenergie-Einspeisung (z.B. im Nordosten) einen besonderen Charme, da die hohe Strombelastung der Leitungen mit der bei starkem Wind hohen Transportkapazität günstig zusammenfallen und so eine kontrollierte und stärkere Auslastung der Leitungen ermöglicht und weniger Anlagen abgeregelt werden müssen. Auf mit Engpässen behafteten Leitungen des Höchstspannungsnetzes ist das Belastungssteigerungspotenzial aufgrund der deutlich längeren Leitungen ungleich geringer.

4 Autarke Mikrosysteme in der FMD für die Energiewirtschaft

4.1 Überblick

Autarke Mikrosysteme sind ein ideales Betätigungsfeld für die Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland (FMD) als standortübergreifende Forschungsinfrastruktur im Bereich Smart Systems. Bei autarken Mikrosystemen können innerhalb der Forschungsfabrik alle Systemkompetenzen synergetisch zusammenspielen: Ein breites Angebot an Sensoren, Harvestern, Übertragungsstandards (von LiFi, LoRa bis 5G), hardwarenahe Software-Kompetenz (Embedded IoT/KI) zur Signalvorverarbeitung, Heterointegration, Lokalisierung usw.

Die gebündelte Kompetenz liefert Potential für Systemlösungen, z.B. durch Entwicklung eines Gesamtsystems oder einer Branchenlösung mit Industrieverbänden (wie BDEW, dena) sowie durch die systematische Vermarktung der Produkte und Lösungen aller FMD-Institute.

In der FMD sind zahlreiche Einzelkompetenzen zu autarken Mikrosystemen vorhanden (z.B. Messwertermittlung, Datenübertragung zur Basisstation und Leitwarte der Versorger). Es wurden aber auch Komplettsysteme zur Netzstandsüberwachung entwickelt, die im Folgenden näher dargestellt werden.

4.2 Das ASTROSE®-System der FMD-Institute IZM und ENAS

Das ASTROSE®-System ist ein energieautarkes verteiltes Sensorsystem, mit dem verschiedene Herausforderungen der Energienetzebetreiber auf der Hoch- und Höchstspannungsebene adressiert werden können:

- Erhöhung Stromtragfähigkeit (Ampacity)
- Eislastmonitoring und Eiswarnung
- Gefahrendetektion (Erdschluss, Seilriss)
- Ökologisches Trassenmanagement

Das System besteht aus einem mittels kapazitiven Harvesters versorgten energieautarken Sensorknoten (**Bild 2**).

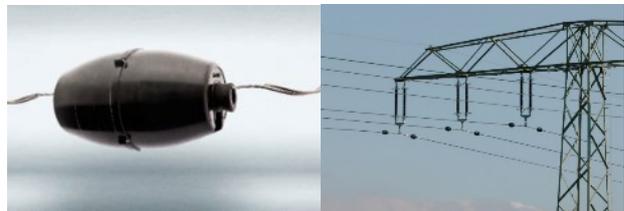


Bild 2 Der energieautarke Sensorknoten von ASTROSE®

Mehrere Sensorknoten werden als Kette auf der Trasse verteilt und direkt auf dem Leiterseil installiert (**Bild 3**).

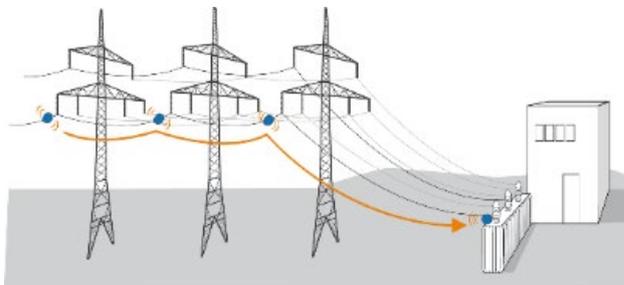


Bild 3 Das ASTROSE®-System zum Leiterseilmonitoring in Energieverteilnetzen auf der Hochspannungsebene

Die in nahezu Echtzeit ermittelten Sensordaten werden dann in einer Kette, bestehend aus einem Multihop-Netzwerk, zur Basisstation propagiert. Diese leitet die Daten an einen Industrie-PC weiter. Mittels Fernwirkprotokollen wie IEC60870-5-101/104 können sowohl die Messdaten als auch aggregierte Informationen der Leitetechnik direkt zur Verfügung gestellt werden. Die erfassten Messgrößen des Systems erlauben die spannungsfeldgenaue Berechnung der o.g. Optimierungsgrößen.

Dazu werden im Sensorknoten Parameter wie Neigung und Torsion des Seils sowie die Stromstärke gemessen. Auf Basis dieser Größen werden mittels mathematischer Modelle und Simulation Führungsgrößen wie Seiltemperatur, Durchhang oder aktueller Bodenabstand ermittelt. ASTROSE® ermöglicht eine zuverlässige und sichere Kommunikation der Messdaten durch Verwendung proprietärer Funktechnologie selbst bei geringsten Leitungsströmen.

Der praxistaugliche Einsatz ist in mehreren Pilotanwendungen bei großen Verteilnetzbetreibern in Deutschland nachgewiesen. Das Interesse der Branche am FMD-Sensorsystem ist nach zahlreichen Messdemonstrationen und konkreten Kundengesprächen sehr hoch. Das Projekt wurde zusammen mit Partnern aus der Industrie entwickelt.

Das ASTROSE® -System weist ggü. alternativen Systemen im internationalen Vergleich folgende **Alleinstellungsmerkmale** auf:

- kein Mindeststromfluss auf dem Leiterseil zur Energieversorgung des Systems nötig
- Geringes Gewicht (ca. Faktor 2 ggü. Wettbewerbern)
- Knoten-zu-Knoten-Funkverbindung

4.3 Das Freileitungs-Sensorsystem vom Fraunhofer IMS

Ein alternatives System, das für die Mittelspannungsebene konzipiert ist, stammt vom Fraunhofer IMS, ebenfalls FMD-Institut.

Aktuell gibt es Pilotinstallationen in Norwegen (66 kV). Das Freileitungs-Sensorsystem versorgt sich selbst aus dem Magnetfeld um das Leiterseil.

Gemessen werden Stromstärke mit einer Rogowski-Spule sowie Leiterseilneigung/-temperatur, Schwingung und Umgebungstemperatur. Die Messdaten werden über LoRa zu einer Basisstation (multi point-to-point communication) und von dort über das Mobilfunknetz in die Cloud übertragen. Der Sensor ist mit einer Alarmfunktion zur sofortigen Kurzschlusserkennung und -meldung ausgestattet.

4.4 Ausblick

Die verschiedenen autarken Mikrosysteme der FMD-Institute werden separat weiterentwickelt, aber auch unter dem Dach der FMD systematisch bei Energieversorgern vermarktet.

Geplant ist beispielsweise die Skalierung bei Verteil- und Übertragungsnetzbetreibern und die Lizenzierung mit Partnern. Die Weiterentwicklung wird durch Förder- und Industrieprojekte vorangetrieben und betrifft z.B. die zusätzliche Nutzung von Kameras. Auch die Übertragung auf Erdkabel wird geprüft.

Ein weiteres Feld ist die zusätzliche Optimierung der Stromnetze durch Modellbildung und Simulation. Modellierungen und KI-basierte Algorithmen, die weitere Parameter an kritischen Spannungsfeldern berücksichtigen (z.B. Windgeschwindigkeit, Vegetation), liefern exaktere Strombelastungsprognosen zur Kapazitätssteigerung der Energienetze.

5 Literatur

- [1] Schischke, K., Beucker, S.; Clausen, J., Niedermayer, M., Innovations- und Technikanalyse Autonomer Verteilter Mikrosysteme, 2009.
- [2] Girardin, G., Bonnabel, A., Mounier, E., Sensors & Technologies for The Internet of Things, 2014.
- [3] BMBF, <https://www.elektronikforschung.de/service/aktuelles/forschungsfabrik-mikroelektronik-deutschland-gestartet>, 2018.
- [4] Voigt, S., Pfeiffer, M., Heibutzki, B., Brockmann, C., Großer, V., Kurth, S., Geßner, T., Practical experience and results of an extensive pilot test of the ASTROSE® sensor network for high voltage power line monitoring, Smart Systems Integration 2015: 9th International Conference and Exhibition on Integration Issues of Miniaturized Systems, Copenhagen, Denmark, March 11-12, 2015.
- [5] Cluster Energietechnik Berlin-Brandenburg: Fachstudie zur Umsetzung der Energiewende in der 50Hertz-Regelzone, 2015.
- [6] Reinhard Grünwald, Moderne Stromnetze als Schlüsselement einer nachhaltigen Energieversorgung, TAB Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag, 2014