

Autarke Mikrosysteme – Anwendungen in der Energiewirtschaft Wireless Sensor Networks (WSN) – 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-Karsch 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

Autarke Mikrosysteme (Wireless Sensor Networks, WSN) für die Energiewirtschaft innerhalb der Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland (FMD)

1 Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland (FMD) – A Short Overview

2 **Relevanz von WSN**

- WSN sind seit Jahrzehnten ein **Kernthema der Mikrosystemtechnik** wegen ...
- Systemcharakter
- Einsatz in Vielzahl industrieller Sektoren
- Breite der Use Cases – vom LAN (z.B. Body-Area-Network) über regionale Wide Area Networks (Werkshallen, Energie-/Verkehrsinfrastrukturen) bis zu weltweit verteilten Wide Area Networks (Wetter-/Militär-Anwendungen)
- Aktuell **Bedeutungszuwachs** durch ...
- Leistungssprünge auf der Hardware-Komponentenebene, z.B. Aufbau- und Verbindungstechnik (SiP), der Konnektivität, der Energieversorgung oder der Rechenleistung im Sensorknoten
- Einsatz von KI zur Netzwerkoptimierung
- Systemaspekte (Vernetzung, Sicherheit, collaborative Strukturen)
- WSN sind **ideales Betätigungsfeld**
- für die **FMD** als standortübergreifende Forschungsinfrastruktur für Smart Systems
- für die **Energiewirtschaft**, weil durch die Energiewende die Anforderungen nach Vernetzung, Autarkie und systemische Optimierung gestiegen sind

3 **WSN-Gesamtsystem der FMD**

Funktionsgruppen

- Sensor-Aktor-Modul
- Konnektivitäts-Modul
- Energiespeicher
- Computing-Einheit, KI-Methoden
- Anwendungsspezifisches Packaging

Gesamtsystem

- Netzwerk-Topologie-/Design, Sicherheit
- Hochpräzise Lokalisierung
- Anwendungsspezifische Optimierung
- Installation, Wartung & Betrieb

Abbildung eines modularen Sensorknotensystems inkl. Hardware- und Softwarekomponenten und Abdeckung der potentiellen Fertigungskette durch FMD-Institute

4 **Anwendungsgebiete von WSN im Überblick**

Industrie	Transportation & Automotive
Industrie 4.0, Öl & Gas, Food	Züge, Schiffe, Hubschrauber, LKW/PKW (TPKS), Turbine/Engine Monitoring, Smart Streets, Bahngleis-überwachung
Smart City	Digitales Leben & Smart Health
Home Automation, Commercial Buildings (HVAC), Traffic Lights & Parkhausmanagement	Invasive Medizin, Blutdruck-überwachung, Wear-ables, Hear-ables, Entertainment Devices
Sicherheit	Logistik
Industrieanlagen-überwachung, Überwachung von Großveranstaltungen, Homeland Security, Einbruchs-erkennung	Tracking, Lagerhaltung, Gabelstapler
Energie & Umwelt	
Überwachung kritischer Versorgungsinfrastrukturen, Smart Metering, Umwelt-Monitoring (Gas/CO ₂ -Detektion)	Katastrophenschutz (z.B. Forest Fires & Flood Detection), Habitat exploration of animals, Precision Farming

WSN in der Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland

- Beim Thema WSN spielen in der FMD alle Systemkompetenzen synergetisch zusammen. Die **gebündelte Kompetenz** liefert Potential für Systemlösungen, z.B. durch die Entwicklung eines Gesamtsystems oder einer Branchenlösung mit Industrieverbänden (wie BDEW) durch die systematische Vermarktung der Produkte und Lösungen aller FMD-Institute.
- Alle **Kompetenzfelder** eines WSN-Systems werden abdeckt vom Sensor bis zur Cloud in Richtung einer gemeinsamen Fertigungskette. In der FMD decken wir nahezu alle Sensorprinzipien, Daten-Übertragungswege und Funkstandards ab (von LoRa bis 5G) plus ein breites Angebot an Sensoren, Harvestern, hardwarenaher Software-Kompetenz (Embedded IoT/KI) zur Signalverarbeitung, Heterointegrations-Know-how, Lokalisierungstechnologien usw. Ein großer Vorteil ist, dass die Systeme anwendungsspezifisch ausgelegt und optimiert werden. In der FMD werden Einzelkompetenzen und **Komplettsysteme zur Netzstatusüberwachung** entwickelt.

5 **Use Cases und aktuelle Forschungsrichtungen bei WSN**

- Optimierung des einzelnen Sensorknotens**
 - Drahtloser Ultra Low Power-Sensorknoten (Energy Harvesting, energieeffiziente Funkprotokolle)
 - Tracking in der Logistik, Industrial IoT
- Steigerung der Intelligenz im Sensorknoten unter Einsatz von KI-Methoden**
 - Fälle mit großen Datenmengen und wo eine Vorverarbeitung im Knoten nötig ist
 - Nutzen: Erkennung von Unregelmäßigkeiten, Fehlzuständen in verteilten Systemen; Produktivitätssteigerung durch automatisierte Fehlererkennung, Vermeidung von Folgekosten durch Asset-/Maschinenausfall, Schädigungen im System, Reduktion von Maschinenwartungszeiten (predictive maintenance) bzw. Ausschuss (predictive quality)
 - Anwendungsfelder sind die Industrieautomatisierung in Verbindung mit Datenauswertung, Anomaliedetektion im Maschinenbau mittels Vibrationssensoren, Positionserkennung im Schienennetz, Fehlerdetektion in Energie-Infrastrukturen und Netzasset-Management oder im Gesundheitsbereich (Hörgeräte).
 - Forschungsfragen: z.B. Sensorfusion von Radar-, LiDAR, Kamera-Daten, Echtzeitprozessierung bei unterschiedlichen Datenquellen und Wellenlängen (zwischen IR, LiDAR und Radar -> Pixelregulierung)
- Steigerung der Intelligenz des Gesamtsystems**
 - Dritte WSN-Generation, große verteilte kooperative Sensornetze (WAN)
 - Typische Einsatzgebiete: Zivile Sicherheit (z.B. Sicherung öffentlicher Plätze, Industrieanlagenüberwachung), Klima-/Wetter-Anwendungen (Environmental Monitoring, Katastrophenschutz), Precision Farming (z.B. selbst-steuernde Ernteroboter, e-grains)
 - Forschungsfragen, z.B. Vertrauenswürdigkeit von Sensorinformationen, Vermeiden von Infektionen im WSN, Verteilung der Rechenleistung im WSN

6 **Anforderungen der Energiewirtschaft an WSN**

- Die **Energie-/Netzwirtschaft** weist aufgrund ihres Versorgungsauftrags eine **hohe gesellschaftliche Relevanz** auf.
- Die Energiebranche durchläuft aktuell einen fundamentalen Wandel hin zu einem **nachhaltigen, dezentral-verteilt und digital-vernetzten Energiesystem**.
- Im Mittelpunkt dieser als **Energiewende** bezeichneten Transformation stehen die **Energienetze**, die auf allen Spannungs-/Versorgungsebenen die **Balance** zwischen fluktuierender erneuerbarer Erzeugung und flexiblen Lasten halten.
- Insbesondere die **Verteilnetze** im ländlichen Raum, die 98% der Erzeugung durch erneuerbare Energien aufnehmen, müssen ertüchtigt werden.

- 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 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. Cybersecurity).
- 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.

7 **WSN-Systeme der FMD für die Energie-/Netzwirtschaft – ein Überblick**

- 3D-Tracking zur Automatischen Inspektion von Abwasserrohren**
 - Einsatz von Robotern, hochauflösenden 3D-Modellen und ML zur automatischen Schadens-Klassifizierung
 - Kunde: Berliner Wasserbetriebe (10.000 km Abwassernetz)
 - Entwicklung: **Fraunhofer HHI**
- Erdkabelüberwachungssystem**
 - Mittelspannungsebene
 - Entwicklung (TRL 5): **Fraunhofer ENAS**
- Ultra Low Power Wireless Sensor Nodes zum Monitoring von Abwasserrohrsystemen**
 - Messung pH-Messung und Leitfähigkeit, Energieversorgung mit thermischem Harvester
 - Intra-Ringbuskommunikation zwischen bis zu 5 Modulen, Schwellwertdetektion
 - Projekt MicroMole für Berliner Wasserbetriebe; **Entwicklung Fraunhofer IZM**
- Detektion/Inspektion v. Hochspannungsleitungen mit Millimeterwellenradar** von Drohne, SAR-Bildgebung
 - Hochauflösende Vermessung v. Hochspannungsleitungen mit **RADAR**, georeferenzierte Projektion der Radardaten
 - Technologien: Antennendesigns (Parabol, SAR), Kohärentes Breitband-Radar, HRA-Drohnen-Radarsystem
 - Entwicklung: **Fraunhofer FHR**
- Automatisierte Überwachung der Energietransportnetze** (OHL, Masten, Isolatoren, Vegetation) durch bildgebende Flugdrohnen und Einsatz KI-Methoden
 - Asset Management**/Prädiktive Wartung von Transformatoren, Umspannwerken, Leitwarten, Schaltreinrichtungen
 - Aufbau Zustands-/Fehlerdatenbank, Bilderkennung, Trainieren KI-Algorithmus zur Fehleridentifikation, DSS
 - Kunde: **Europäischer Übertragungsnetzbetreiber**
 - Konsortium: **FMD-Geschäftsstelle**, Fraunhofer IIS, HHI, IZM, IMS und weitere
- Überwachung kritischer Versorgungsinfrastrukturen (Strom, Wasser)**
 - Europäisches Konsortium e-balance, u.a. mit den Versorgern EDP aus Portugal und Alliander aus den Niederlanden
 - WSN mit **Sicherheitsfeatures**: Verschiedene Ansätze für Sicherheit und Resilienz, Verschlüsselung und anderen Kryptographische Mechanismen (µContoller, Cryptohardware, Schutz gegen Seitenkanalattacken)
 - Entwicklung: **Leibniz IHP**

8 **Freileitungsmonitoringsystem der FMD für Energienetze**

- 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. Freileitungsmonitoring der Energienetze mit WSN erhöht den Stromtransport deutlich und vermeidet so Netzausbau
- Die **Sensornetze der FMD** halten auch widrigen Umgebungsbedingungen stand (z.B. Eis im Gebirge) und übertragen kritische Daten zuverlässig drahtlos an die Leitwarte des Netzbetreibers.

Astrose-System von Fraunhofer IZM und Fraunhofer ENAS

- Überwachung von AC OHL auf der Hoch- und Höchstspannungsebene (60 kV-420 kV), entwickelt & erprobt mit Partnern (Sensorhersteller, Leistungsbauer, Netzbetreiber)
- Detektions-Prinzip**: Verteilung der Sensorknoten als Kette auf der Trasse und Installation auf Leitersell: Messung von Neigung & Torsion des Seils und Stromstärke im Knoten, Ermittlung von Führungsgrößen wie Seiltemperatur, Durchhang oder aktueller Bodenabstand mittels mathematischer Modelle und Simulation; Verwendung der Energie aus der Umgebung (kapazitiver Harvester); Einspeisung der Daten aus Spannungsfeldern in Leitwarte, Datenhandlung
- Zahlreiche **Einsatzszenarien** von Astrose – je nach **Use Cases** der Energienetzbetreiber
 - Reduzierung Diagnose-/Wartungsaufwand, genaue Lokalisierung von Leiterbruch etc.
 - Erhöhung Stromtragfähigkeit (Ampacity) und dadurch verbesserte Auslastung existierender EEG-Anlagen in Abhängigkeit der Wetterbedingungen
 - Eislastmonitoring, Disaster Prevention/Gefahrdetektion (Erdschluss, Seilriss, Wischer)
 - Ökologisches Trassenmanagement
- Alleinstellungsmerkmale** ggü. US-Amerikanischen Systemen von Power-Donut (USI), TLM Conductor Monitor (Lindsey), FMC62 Intelligent Line Monitoring System (GE) und Europäischen Systemen von OTLM Device (Knill) und Ampacimon (elia)
 - kein Mindeststromfluss auf dem Leiterseil zur Energieversorgung des Systems nötig
 - Geringes Gewicht (ca. Faktor 2 ggü. Wettbewerbern)
 - Knoten-zu-Knoten-Funkverbindung

Sensorknoten zur Messung von Stromstärke (Rogowski-Spule), Leiterselneigung, Schwingung/Vibration, Leiterseltemperatur und Umgebungstemperatur, Kurzschlusserkennung mit sofortiger Alarmmeldung

- Funkübertragung der Messdaten über LoRa zu Basisstationen, dann über Mobilfunknetz in die Cloud
- System versorgt sich aus dem Strom und dem Magnetfeld um das Leiterseil (induktives Energy Harvesting)
- Einsatz in der **Mittelspannung** (22/66 kV) bei Norw. Netzbetreiber Heimdall Power bis 800 A Leiterstrom
- Entwicklung: **Fraunhofer IMS**

9 **FMD-Leistungsangebot für Utilities**

- Machbarkeitsstudien & Proof of Concepts**, z.B. lohnt sich Predictive Maintenance für Utilities?
- F&E-Projekte für Ausrüster, Energieversorger und Energienetzbetreiber**, z.B. innovative Sensorlösungen, Leistungselektronik, Einsatz neuer Technologien wie Roboter, Drohnen
- Datenmanagement & KI**: Aufbau von Datenbanken und Trainingsdatensätzen mit Neuronalen Netzwerken und Deep Learning-Algorithmen, Beratung zum Einsatz von KI
- Technologietransfer & Lizenzierung**
- Fertigung von Prototypen und Demonstratoren**
- Verbundprojekte** zur Energiewende & Digitalisierung

Beispiel

WSN zur Zustandsüberwachung von Energienetzen zur Optimierung der Betriebsführung, Betriebssicherheit und Resilienz der Netze