

Self-Powered MEMS-Based Wireless Sensor Node

MEMS-basierter energieautonomer kabelloser Sensorknoten

Thomas Zimmermann¹, Alexander Frey², Matthias Schreiter³, Julian Seidel³ und Ingo Kühne³

¹Aalen University, Computer Science Dept., Aalen, Deutschland

²Hochschule Augsburg, Fakultät für Elektrotechnik, Augsburg, Deutschland

³Siemens AG, Corporate Research & Technologies, München, Deutschland

Abstract

This article presents the realization of a new, energy self-powered sensor node. The wireless node is supplied by $10\mu\text{Watt}$ of electrical power and is able to send three measured values in intervals of 80 seconds. The power supply is carried out with a MEMS-based piezoelectric vibration converter. A specially developed ASIC for this type of generator takes over the energy management. The wireless connection to a base station is established by a microcontroller predestinated for energy-autonomous applications in conjunction with a standard *IEEE 802.15.4* RF-frontend. The used *Route Under MAC* wireless protocol is specifically designed for energy-saving operations. The protocol supports the *IPv6/6LoWPAN* standard whereby multiple sensor nodes can be integrated in a wired network.

Kurzfassung

Der vorliegende Beitrag zeigt die Realisierung eines neuartigen, energieautarken Sensorknotens. Der kabellose Knoten arbeitet mit einer Leistung von $10\mu\text{Watt}$ und sendet dabei jeweils drei Messwerte in Intervallen von 80 Sekunden. Die Energieversorgung erfolgt hierbei mit einem MEMS-basierten, piezoelektrischen Schwingungswandler. Ein speziell für diesen Generatortyp entwickelter ASIC übernimmt das Energiemanagement. Die kabellose Anbindung zu einer Basisstation erfolgt mittels einem für energieautarke Anwendungen prädestinierten Mikrocontroller in Verbindung mit einem standardisierten *IEEE 802.15.4* RF-Frontend. Das eingesetzte *Route Under MAC* Funkprotokoll ist speziell für den energiesparenden Betrieb ausgelegt. Dieses unterstützt den *IPv6/6LoWPAN* Standard, wodurch der Sensorknoten auch in ein kabelgebundenes Netzwerk integriert werden kann.

1. Einführung

Kabellose Sensorknoten - deren Einsatz im Bereich des *Ubiquitous Computing* und der *Ambient Intelligence* liegen - werden zur Zeit noch weitestgehend durch Batterien und Akkumulatoren mit Energie versorgt. Die gespeicherte Energie in den zuvor genannten Speicherelementen ist limitiert und kann nur durch Austauschen bzw. durch regelmäßiges Aufladen aufgefrischt werden.

Infolge dessen ist der Einsatz eines solchen Sensorknotens zeitlich beschränkt und nicht für den dauerhaften Betrieb geeignet. Um diese zeitliche Limitierung aufzuheben und entsprechenden Wartungsaufwand zu minimieren, wird daher der energieautarke Betrieb der Sensorknoten angestrebt. Für den Ersatz der Batterien und Akkumulatoren bieten sich entsprechende Energiewandler an, die ihre Energie aus der Umgebung gewinnen.

Auf Grund von Nachhaltigkeitsaspekten und der beschränkten Speicherfähigkeit von fossilen und nuklearen Energiequellen liegt es nahe nur regenerative Energiequellen zu verwenden. Als mögliche nachhaltige Energiequellen werden insbesondere elektromagnetische Strahlungsquellen in Form von Licht- und Radiowellen, thermische Quellen, Schallquellen oder mechanische Quellen in Form von Wasser-, Windkraft und Vibrationen angesehen.

2. Anwendungen

Es gibt acht wichtige Anwendungsgebiete in

- Forschung: Medizin, Umwelt und Unterhaltungselektronik
- Entwicklung: Automobilbau, Industrie, Militär, Luft- und Raumfahrt
- Produktion: Gebäude- und Hausautomatisierung

in denen energieautarke Sensoren viele Vorteile

- Kostenreduktion
- Höhere Funktionalität und Flexibilität
- Steigerung der Umweltfreundlichkeit und Nachhaltigkeit
- Verlängerung der Wartungsintervalle

bieten [1].

Im Automobil ist der Einsatz in Reifendruckkontrollsystemen (RDKS, TPMS – Tire Pressure Monitoring System) denkbar [2, 3, 4]. Bisher wird die Energie für diese Sensoren üblicherweise durch eigene Batterien (z.B. Knopfzellen) zur Verfügung gestellt. Weiterhin ist auf Grund der Netzwerkunterstützung die Einbindung in ein *IP-based In-Car Network* denkbar [5].

In der Industrie- und Gebäudeautomatisierung ist die Überwachung von Verbrennungsmotoren unterschiedlicher Leistungsklassen in Blockheizkraftwerken (BHKW) realisierbar. Ebenfalls vorstellbar ist die Überwachung von Verbrennungskraftmaschinen in Notstrom- und Netzersatzanlagen (NEA) sowie in der Schifffahrt. Gangbar ist auch die Kontrolle von Rüttelsieben und Förderanlagen, bei denen der Zugang zu Messsensoren meistens schwierig ist und dadurch die Wartungskosten und -ausfallzeiten nicht unerheblich sind.

Im Weiteren wird ein energieautarker, kabelloser Sensorknoten vorgestellt, der seine benötigte Energie aus Vibrationen gewinnt.

3. Sensorknoten

Abbildung 1 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines energieautarken Sensorknotens an Hand eines Blockdiagrammes.

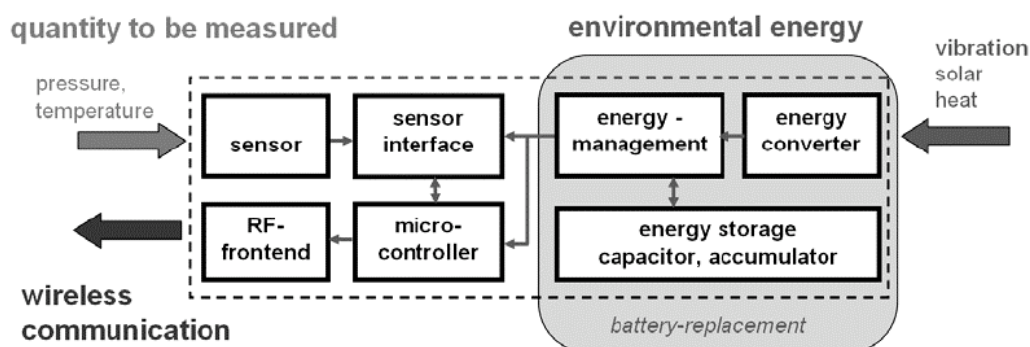


Abb. 1: Prinzipieller Aufbau eines energieautarken Sensorknotens [6].

Das energieautarke System besteht im Wesentlichen aus einem Mikrocontroller, einem Sensor mit Schnittstelle zum Controller, einer Funkeinheit und einem Batterieersatz. Letzterer besteht dabei aus einem Energiewandler, einem Energiemanagement und einem temporären Pufferspeicher.

Erste Prototypen der Sensorknoten wurden zur besseren Evaluierung modular aufgebaut. In einer ersten Projektphase wurde der Energiewandler und das Energiemanagement entwickelt und charakterisiert. In einer zweiten Phase erfolgte die Realisierung des Mikrocontrollers mit Sensor und Funkeinheit [7].

In einem weiteren Schritt wurden die Teilkomponenten auf einer Platine integriert. Hierbei konnte der Gesamtaufbau weiter miniaturisiert werden. Abbildung 2 zeigt die Vorder- und Rückansicht des energieautarken Sensorknotens.

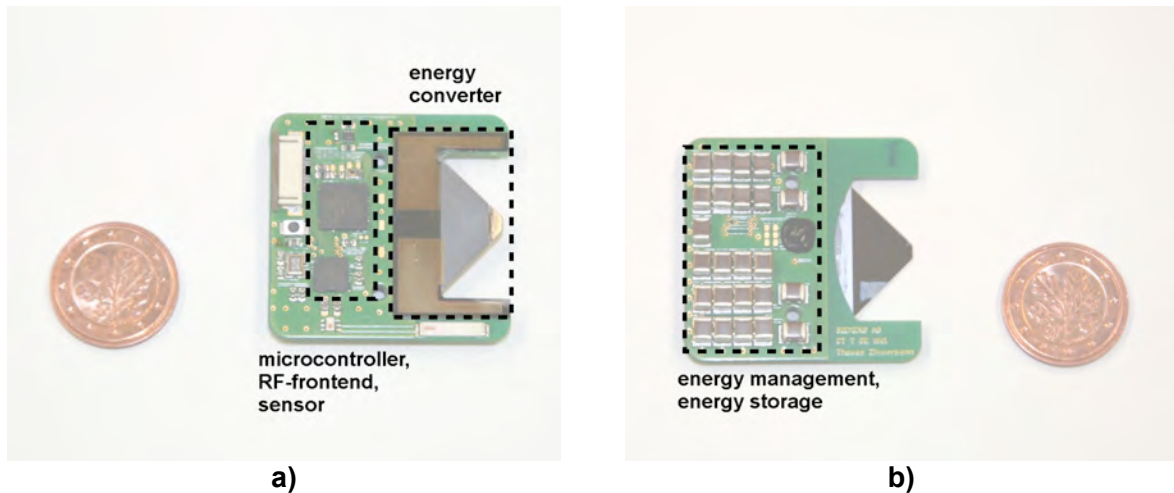


Abb. 2: Realisierter energieautarker Sensorknoten. a) Vorderansicht, b) Rückansicht.

3.1 Energiewandler und Energiemanagement

Für die Energiewandlung wird ein MEMS-basierter Schwingungswandler zu Grunde gelegt. Als energetische Quelle dienen hierbei mechanische Vibrationen deren Frequenzspektrum im Bereich von 10Hz - 10kHz liegen, wie sie häufig in industriellen Umgebungen auftreten. Neben dieser kontinuierlichen Anregung ist auch eine impulsförmige Anregung denkbar. Eine Übersicht über miniaturisierte Wandler ist in [8] zu finden.

In dieser Arbeit wird ein piezoelektrischer MEMS-Wandler eingesetzt, der eine Leistung P_{Gen} von bis zu $10\mu\text{Watt}$ mit einer Spannungsamplitude $V_{\text{Gen,peak}}$ von 3V liefern kann. Abbildung 3 zeigt den MEMS-Wandler, der im Detail in [9] vorgestellt wurde.

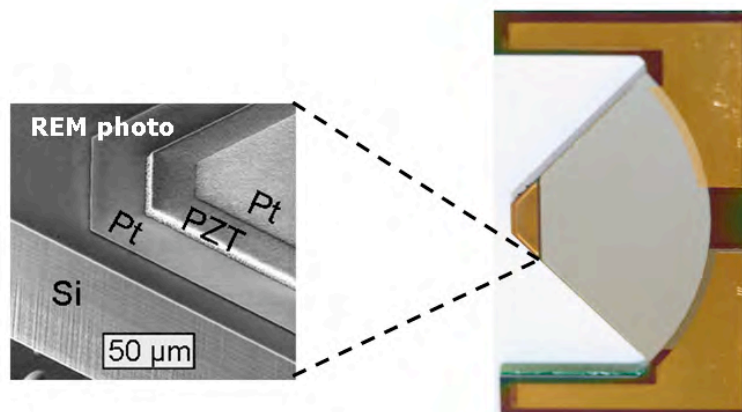


Abb. 3: Piezoelektrischer MEMS-basierter Schwingungswandler [9].

Für das Energiemanagement wurde eine anwendungsspezifische integrierte Schaltung (ASIC, Abbildung 4) in X-Fab CMOS 0,35µm Technologie entwickelt. Diese richtet die Generatorspannung gleich und transferiert die gelieferte Energie in den Pufferspeicher. Hat sich in dem Speicher genügend Energie angehäuft, wird der nachgeschaltete Mikrocontroller mit Sensor und Funkeinheit aktiviert.

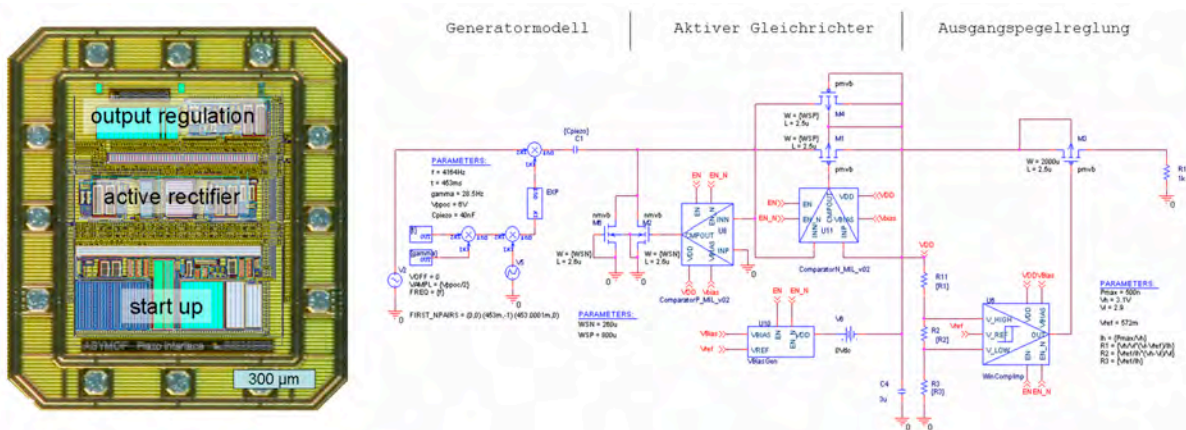


Abb. 4: Entwickelter Powermanagement ASIC [9].

Bei Inbetriebnahme bzw. in der Startphase ist der Pufferspeicher vollkommen ungeladen (Abbildung 5). Die Gleichrichtung erfolgt zu diesem Zeitpunkt rein passiv mittels Dioden. Alle nachgeschalteten Komponenten des ASIC sind zu diesem Zeitpunkt vollständig deaktiviert.

Übersteigt das Energieniveau im Pufferspeicher ein vorgegebenes Niveau (ca. 1,6V), so wird die passive Gleichrichtung von einem aktiven Gleichrichter übernommen. Die Energiegewinnung ist mit dem aktiven Gleichrichter deutlich effizienter, da der Energieverlust über die aktiven Schalter geringer ist als über die passiven Dioden. Dies ist in Abbildung 5 durch den steileren Anstieg des Spannungsniveau V_{St} im Pufferspeicher ersichtlich. Der nachgeschaltete Verbraucher bleibt weiterhin inaktiv, da noch nicht genügend Energie für den autarken Betrieb zur Verfügung steht.

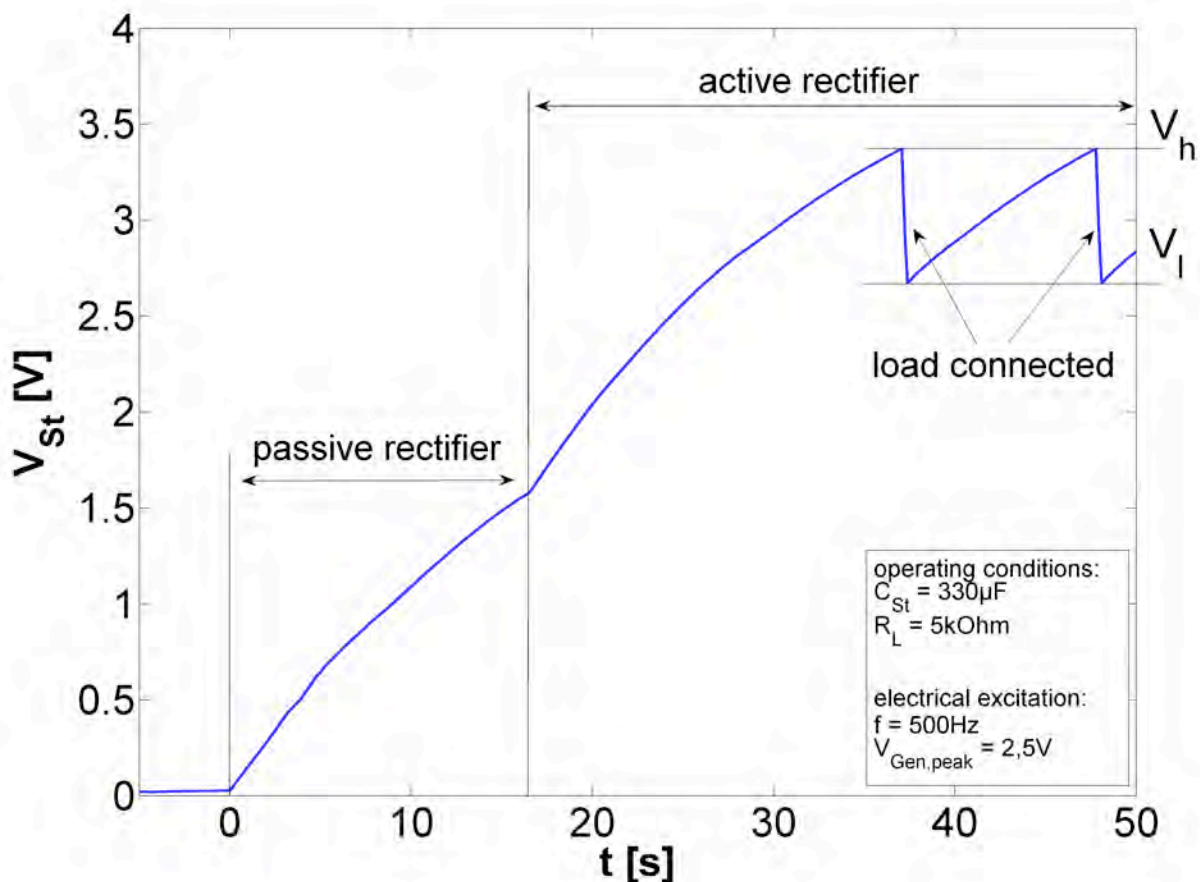


Abb. 5: Exemplarische Startphase des ASIC: passive Gleichrichtung ab $t = 0$ s bis $t = 17$ s, aktive Gleichrichtung und Lastfall ab $t = 17$ s.

Erreicht das Spannungsniveau V_{St} im Pufferspeicher eine obere Schwelle V_h , so wird die Energie auf die Verbraucher am Ausgang durchgeschaltet. Zu diesem Zeitpunkt wird dem Pufferkondensator Energie entnommen und das Spannungsniveau fällt wieder.

Unterschreitet das Spannungsniveau eine untere Schwelle V_l , so wird der Verbraucher am Ausgang vom Pufferspeicher abgetrennt. Ab diesem Zeitpunkt wird der Pufferkondensator wieder aufgeladen.

Die Wahl des Pufferkondensators und die Einstellung der Hystereseschwellen V_h und V_l können entsprechend der benötigten Energie des nachgeschalteten Verbrauchers durch externe Beschaltung frei gewählt werden.

3.2 Mikrocontroller, Funkeinheit und Funkprotokoll

An den Mikrocontroller ist die Funkeinheit und der Sensor mit der Sensorschnittstelle angeschlossen. Bei dem Mikrocontroller handelt es sich um einen 8-Bit Controller aus der megaAVR-Serie der Firma Atmel. Dieser ist mit seiner geringen Stromaufnahme im Schlafmodus prädestiniert für den Einsatz in energieautarken Sensorsystemen.

Der Mikrocontroller hat die Aufgabe, die erfassten Sensordaten aus dem Sensor auszulesen und diese an eine Basisstation weiterzuleiten. Dies erfolgt drahtlos mittels der Funkeinheit, die auf dem Sensorknoten vorgesehen ist.

Der Sensorknoten ist Teil eines Funknetzwerkes, daher erfolgt die Kommunikation mit den anderen Netzwerkknoten über definierte Schnittstellen und Protokolle. Als Netzwerkprotokoll kommt das *Route Under MAC-Protokoll (RUM-Protokoll)* zum Einsatz. Hierbei handelt es sich um einen hoch flexiblen Protokollstack mit *IPv6/6LoWPAN* Unterstützung. Durch die Unterstützung des *IPv6/6LoWPAN* Standards besteht die Möglichkeit die energieautarken, kabellosen Sensorknoten in kabelgebundene Netzwerke zu integrieren.

Die Funkverbindung ist im *IEEE 802.15.4*-Standard festgelegt. Dieser definiert das Funkband, die Funkkanäle, das Zugriffs- und Übertragungsverfahren und die Softwareschnittstelle zu der Funkhardware. Auf dieser Softwareschnittstelle setzt das im vorherigen Abschnitt genannte *RUM-Protokoll* auf.

In dieser Arbeit wurde zu Demonstrationszwecken ein Temperatursensor vorgesehen. Hierfür kam der Baustein TMP112 der Firma TI zum Einsatz. Dieser beinhaltet sowohl das Messelement als auch die Messsignalaufbereitung. Der Baustein digitalisiert den Temperaturwert mittels eines integrierten Analog/Digital-Wandlers. Die Kommunikation zwischen Mikrocontroller und Sensor erfolgt daher digital.

An den Sensorknoten kann aber auch jeder andere beliebige Sensor angeschlossen werden. Der Mikrocontroller besitzt für die Aufbereitung analoger Sensorsignale einen integrierten Analog/Digital-Wandler.

Abbildung 6 zeigt den zeitlichen Verlauf der Spannung über dem Mikrocontroller, der Funkeinheit und dem Sensor. Die Anregung erfolgt mit einer Frequenz f_{Gen} von 500Hz und einer Amplitude $V_{Gen,peak}$ von 2,5V. Die Energiespeicherung erfolgt in einem Pufferspeicher mit einer Kapazität C_{St} von 2,35mF.

Etwa alle 80 Sekunden steht ausreichend Energie zur Verfügung, um den Verbraucher zu aktivieren. Daraufhin sendet der Sensorknoten im Abstand von etwa drei Sekunden einen Messwert an die Basisstation. Mit jeder Übertragung sinkt die gespeicherte Energie im Pufferspeicher. Dies ist in Abbildung 6 an dem abnehmenden Spannungsniveau zu erkennen. Zwischen den Übertragungen steigt das Energieniveau leicht an, da sich der Mikrocontroller mit Funkeinheit und Sensor für diese Zeit im Schlafmodus befindet und der Wandler weiterhin Energie nachliefert.

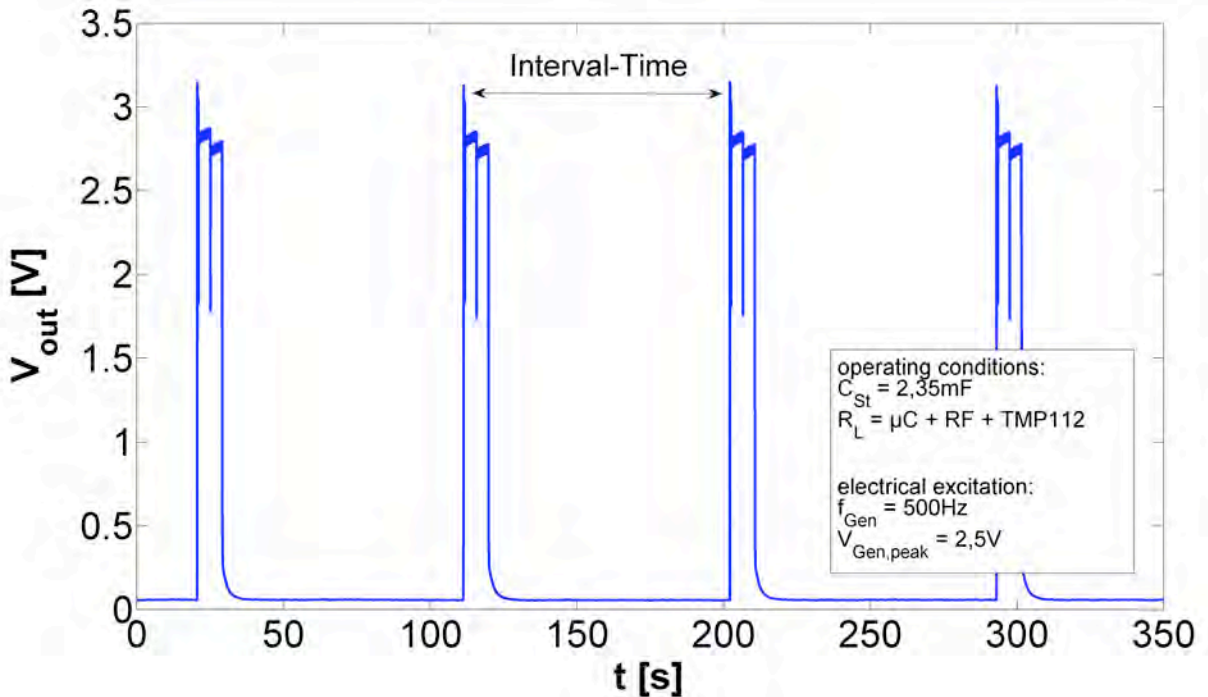


Abb. 6: Ausgangsspannung über dem Mikrocontroller, der Funkeinheit und dem Sensor.

Abbildung 7 zeigt die Dauer für die Startphase (StartUp-Time) sowie die Zeitspanne zwischen zwei aufeinanderfolgenden Sendeintervallen (Interval-Time) in Abhängigkeit von der Anregungsfrequenz f_{Gen} des Generators. Je höher die Frequenz umso schneller steht dem Sensorknoten die benötigte Energie zur Verfügung. Unterhalb von $f_{\text{Gen}} = 400\text{Hz}$ ist der Betrieb des Systems nicht mehr möglich. Da die Verluste des Powermanagements und des Energiespeichers die gewonnene Energie des Generators übersteigen.

Abbildung 8 zeigt die Dauer für die Startphase (StartUp-Time) sowie die Zeitspanne zwischen zwei aufeinanderfolgenden Sendeintervallen (Interval-Time) in Abhängigkeit der Generatoramplitude $V_{\text{Gen,peak}}$ bei konstanter Anregungsfrequenz. Je höher die Amplitude desto schneller erreicht der Pufferspeicher die obere Schaltschwelle V_h , wodurch der nachgeschaltete Verbraucher schneller aktiviert werden kann. Unterhalb von $V_{\text{Gen,peak}} = 2,3\text{V}$ kann der Pufferspeicher nicht auf die obere Schwelle V_h aufgeladen werden.

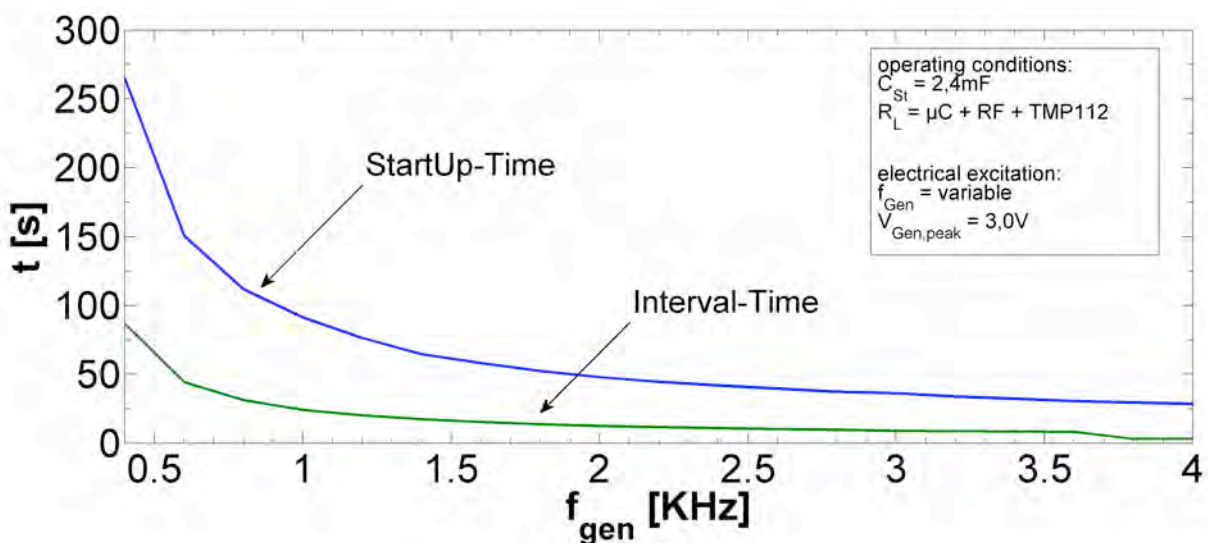


Abb. 7: Dauer der Startphase (StartUp-Time) sowie die Zeitspanne zwischen zwei aufeinanderfolgenden Sendeintervallen (Interval-Time) in Abhängigkeit von der Anregungsfrequenz f_{Gen} .

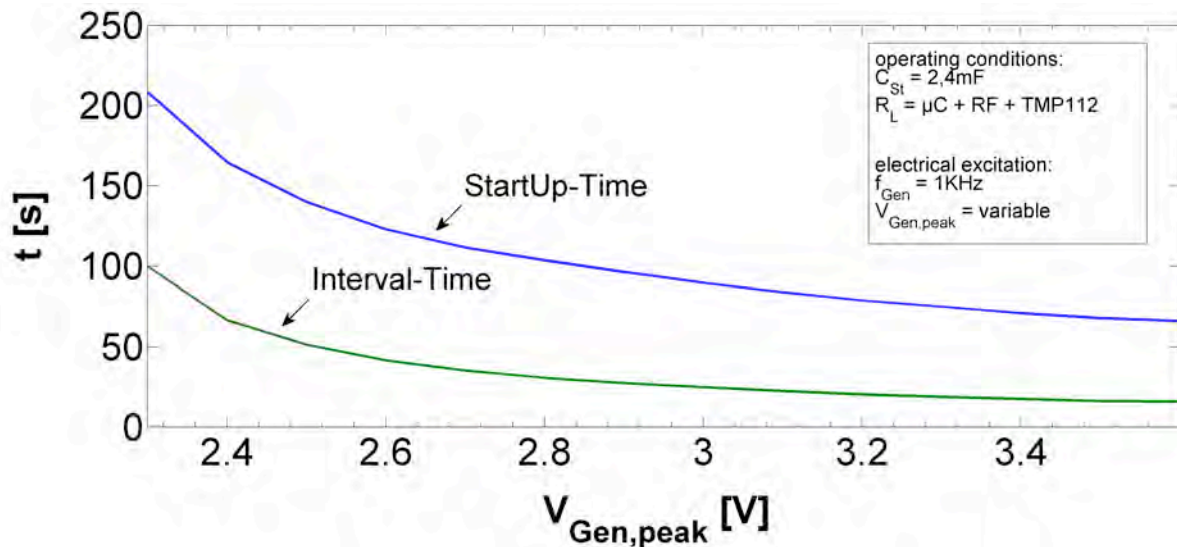


Abb. 8: Dauer der Startphase (StartUp-Time) sowie die Zeitspanne zwischen zwei aufeinanderfolgenden Sendeintervallen (Interval-Time) in Abhängigkeit von der Generatoramplitude $V_{\text{Gen,peak}}$.

Abbildung 9 zeigt eine Detailaufnahme einer Aufwach-, Mess- und Sendeperiode des Sensorknotens. Der Verlauf der Momentanleistung wurde aus 500 Einzelmessungen ermittelt.

Grau hinterlegt ist der Zeitraum, in dem der Mikrocontroller von dem Schlafmodus in den aktiven Modus wechselt und anschließend die Messung der Temperatur durchführt (Phase 1). Blau gekennzeichnet ist der Zeitraum der Datenübergabe vom Mikrocontroller an die Funkeinheit und das Versenden des Datenpakets einschließlich der Empfangsbestätigung des Datenpaketes durch die Basisstation (Phase 2). Rot markiert ist der Zeitraum, in dem der Sensorknoten standardmäßig auf eventuell vorhandene Datenpakete wartet, die die Basisstation während der Schlafphase zwischenspeichert (Phase 3). Anschließend wechselt der Sensorknoten wieder in den Schlafmodus.

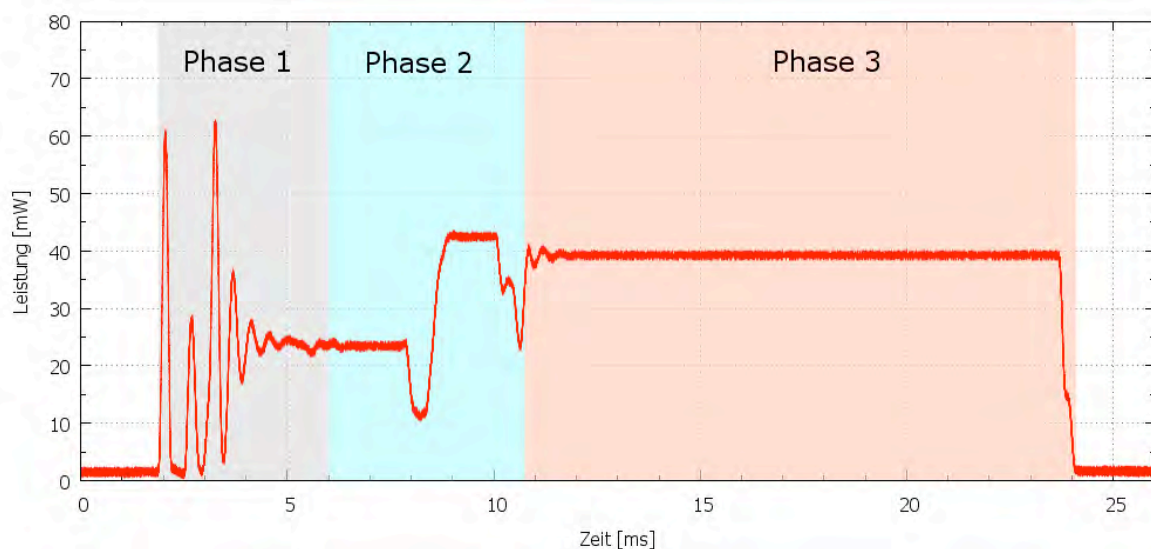


Abb. 9: Gemittelte Momentanleistung von 500 einzelnen Aufwach-, Mess- und Sendeperioden [7]. Die Aufwach- und Messphase ist grau hinterlegt. Blau hinterlegt ist die Sendephase. Rot hinterlegt ist der Zeitraum, in dem der Sensorknoten auf weitere Datenpakete wartet und anschließend wieder in den Schlafmodus wechselt.

Der Energiebedarf für die einzelnen Phasen kann Tabelle 1 entnommen werden [7].

Tabelle 1: Energiebedarf des Mikrocontrollers, der Funkeinheit und des Sensors.

	Phase 1	Phase 2	Phase 3
Energiebedarf [μJ]	88,97 μJ	138,69 μJ	514,42 μJ

4. Zusammenfassung und Ausblick

Im vorliegende Beitrag wurde die Realisierung eines neuartigen, energieautarken Sensorknotens prinzipiell gezeigt. Die Energiegewinnung erfolgt durch einen MEMS-basierten, piezoelektrischen Schwingungswandler. Ein für diesen Anwendungsfall entwickelter ASIC übernimmt das Energiemanagement. Die Datenübertragung erfolgt auf Basis des *IEEE 802.15.4*-Standards. Auf diesem setzt das speziell für den energiesparenden Betrieb ausgelegt *Route Under MAC*-Funkprotokoll auf. Der Sensorknoten kann auf Grund der *IPv6/6LoWPAN* Unterstützung in ein kabelgebundenes Netzwerk integriert werden.

Zukünftige Arbeiten beschäftigen sich mit der Optimierung der Software und dem Protokollstack. Alternative Chipsätze werden auf weitere Energieeinsparpotenziale untersucht.

Danksagung

Diese Arbeit wurde im Rahmen des Förderprojektes *ASYMOF – Autarke Mikrosysteme mit mechanischen Energiewandlern für mobile (Sicherheits-) Funktionen* durchgeführt und vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) unterstützt. Förderkennzeichen: 16SV3336.

Literatur

- [1] Yole Report: EmergingMEMS 2010, March 2010.
- [2] Kühne, I. et al.: Energieautarke Sensorik im Automobil, 6. GMM-Workshop - Energieautarke Sensorik, Hamburg, Seiten 91-95, Oktober 2010.
- [3] Frey, A. et al.: Energieautarke Mikrosysteme für automobiler Anwendungen, Mikrosystemtechnik Kongress 2011, Darmstadt, Seiten 297-300, Oktober 2011.
- [4] Kühne, I. et al.: Mikromechanische Energiewandler für energieautarke Mikrosysteme, 2. Landshuter Symposium Mikrosystemtechnik, Landshut, Seiten 233-242, Februar 2010.
- [5] Steffen, R. et al.: Design and Realization of an IP-based In-Car Network Architecture, The First Annual International Symposium on Vehicular Computing Systems, Dublin, Ireland, July 2008.
- [6] Frey, A. et al.: System design of a miniaturized piezoelectric energy harvesting module for power autonomous applications, 2. Landshuter Symposium Mikrosystemtechnik, Landshut, Seiten 171-180, Februar 2010.
- [7] Zimmermann, T.: Entwicklung, Aufbau und Charakterisierung eines kabellosen Sensornetzwerkes basierend auf IEEE 802.15.4-kompatibler Hardware, Bachelorthesis, Hochschule Aalen, Juli 2010.
- [8] Kühne, I.: Resonante mikromechanische Energiewandler, Dissertation, Shaker Verlag, Aachen, Juli 2009.
- [9] Kühne, I. et al.: Fluid-Structure Interaction Modeling for an Optimized Design of a Piezoelectric Energy Harvesting MEMS Generator, COMSOL Conference, Stuttgart, October 2011.

Kontakt

Thomas Zimmermann
 Aalen University
 Computer Science Dept.
 Beethovenstraße 1
 D-73430 Aalen
 Germany
 E-Mail: 27797@studmail.htw-aalen.de

Dr.-Ing. Ingo Kühne
 Siemens AG
 Corporate Technology
 Corp. Research and Technologies
 Otto-Hahn-Ring 6
 D-81739 Munich
 Germany
 E-Mail: kuehne.ingo@siemens.com