

# Energieautarke Mikrosysteme für automobiler Anwendungen Energy autonomous microsystems for automotive applications

Alexander Frey<sup>1\*</sup>, Xiaoming Li<sup>2</sup>, Thorsten Hehn<sup>3</sup>, Marcell Thewes<sup>4</sup>, Dieter Wagner<sup>5</sup>, Julian Seidel<sup>6</sup>,  
Meinrad Schienle<sup>1</sup>, Yiannos Manoli<sup>3</sup>, Gerd Scholl<sup>4</sup> und Ingo Kühne<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Siemens AG, Corporate Technology, München

<sup>2</sup> Daimler AG, Research & Development, Sindelfingen

<sup>3</sup> Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Lehrstuhl für Fritz Hüttinger Professur für Mikroelektronik, Freiburg

<sup>4</sup> Helmut-Schmidt-Universität, Lehrstuhl für Elektrische Messtechnik, Hamburg

<sup>5</sup> Continental Automotive GmbH, Regensburg

<sup>6</sup> Hochschule für angewandte Wissenschaften, München

\* Telefon: +49-89-636-46463, Fax: +49-89-636-48555, E-Mail: alex.frey@siemens.com

## Kurzfassung

Dieser Beitrag gibt eine Übersicht zur energieautarken Sensorik im Automobil. Neben den potentiellen Anwendungen werden die möglichen Energiequellen in diesem Umfeld diskutiert. Als ein prominentes Beispiel für ein energieautarkes Mikrosystem wird speziell auf die Schlüsselanwendung Reifendruck-Kontroll-System (RDKS) eingegangen.

## Abstract

This paper gives an overview of energy autonomous sensor systems for automotive applications. Potential applications are considered and possible sources of energy are discussed. Tire pressure monitoring systems (TPMS) are identified as a key application. Miniaturized system components of a power module are reported.

## 1 Einführung

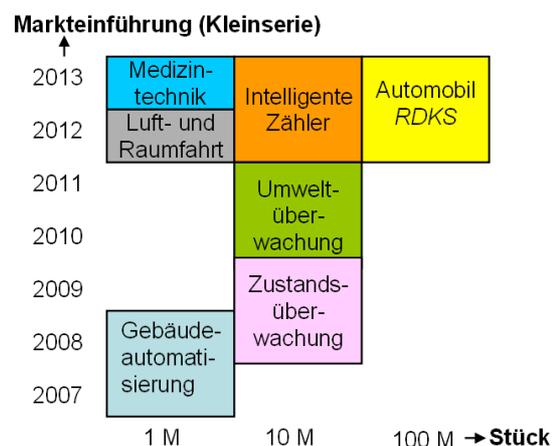
Die Grundidee zur Realisierung energieautarker Sensorik besteht in der Nutzung von Umgebungsenergie durch die Wandlung in elektrische Betriebsenergie. Es können verschiedene Energiequellen für unterschiedlichste Anwendungsszenarien genutzt werden [1, 2]. Hierbei lassen sich acht Hauptanwendungsfelder in drei Reifegrade hinsichtlich ihres Entwicklungsstandes kategorisieren [3]:

- Forschung: Umweltüberwachung, Medizintechnik, Unterhaltungselektronik
- Entwicklung/Kleinserien: Automobil, Industrie, Militär, Luft- und Raumfahrt
- Produktion: Gebäudeautomatisierung.

In Bild 1 sind, für die aus heutiger Sicht wichtigsten Anwendungen, der Zeitpunkt der Markteinführung und die Marktgröße dargestellt [3]. Im Automobilssektor zeichnet sich als eine Hauptanwendung das energieautarke Reifendruck-Kontroll-System (RDKS) insbesondere durch hohe Stückzahlen aus.

Energieautarke Systeme können basierend auf einem makroskopischen Ansatz oder mit Hilfe der Mikrosystemtechnik miniaturisiert realisiert werden. Die Wahl des Ansatzes für eine spezifische Anwendung wird durch technische und wirtschaftliche Randbedingungen bestimmt.

Gegenstand dieses Beitrages ist eine Übersicht zur energieautarken Sensorik im Automobil. Neben den potentiellen Anwendungen werden die möglichen Energiequellen in diesem Umfeld diskutiert. Als ein prominentes Beispiel für ein energieautarkes Mikrosystem wird speziell auf die Schlüsselanwendung RDKS eingegangen. Ein System basierend auf einem piezoelektrischen Wandlerprinzip wird betrachtet und realisierte Systemkomponenten werden vorgestellt.



**Bild 1** Markteinführung und Marktgröße [3].

## 2 Energieautarke Sensorik für automobile Anwendungen

Im Folgenden wird eine Übersicht zu potentiellen Anwendungen und möglichen Energiequellen im Automobil wiedergegeben [4].

### 2.1 Anwendungen

Eine detaillierte Darstellung und praxisnahes Hintergrundwissen von Sensoren und deren Messprinzipien in modernen Fahrzeugen ist in [5] zu finden. Ein Mittelklassewagen ist aktuell mit mehr als 60 verschiedenen Sensoren ausgestattet. Zukünftige Innovationen auf dem Gebiet der elektrischen Systeme im Automobil werden diese Zahl noch deutlich erhöhen. In [5] werden die Sensoren den drei Bereichen Antriebsstrang, Komfort und Sicherheit zugeordnet. Druck-, Beschleunigungs-, Drehraten-, Radar- und Ultraschallsensoren sind hierbei nur eine kleine Auswahl an verwendeter Sensorik im Kraftfahrzeug. Allen aktiven Sensoren ist gemein, dass sie in irgendeiner Form mit elektrischer Energie versorgt werden müssen. Heutzutage geschieht dies mittels Kabel zum einen zentral durch die Autobatterie bzw. die Lichtmaschine. Zum anderen gibt es auch Sensorsysteme, die nicht mittels Kabel zugänglich sind. Diese werden üblicherweise mittels einer eigenen Batterie (z.B. Knopfzelle) versorgt. Ein typischer Vertreter dieser Gattung ist das Reifendruckkontrollsystem (RDKS).

Neue Entwicklungen zielen darauf ab, die Sensoren möglichst energieautark zu betreiben. Energieautarke Sensorik bezieht die notwendige elektrische Energie nicht mehr zentral via Kabel oder mittels eigener Batterie, sondern die benötigte elektrische Energie wird direkt vor Ort aus der Umgebung gewonnen. Bild 2 zeigt eine Übersicht potentieller energieautarker Sensoren im Automobil.

Die Vorteile eines kabellosen Betriebs und einer deutlich flexibleren Einbaumöglichkeit (z.B. im Randbereich von Fensterscheiben) liegen hierbei auf der Hand.

Es gibt verschiedenste Motivationen, die die Entwicklung energieautarker Sensorik im Automobil begünstigen:

- Kostenreduktion
- Reduzierung von Kabelsatzvarianten
- Höhere Flexibilität
- Umweltfreundlichkeit (CO<sub>2</sub>-Optimierung)
- Geringere Nachrüstkosten beim Kunden
- Längere Wartungsintervalle
- Erweiterter Funktionsumfang

Die Machbarkeit energieautarker Sensorik im Kraftfahrzeug lässt sich sinnvollerweise zuerst im Bereich der Komfortsensoren demonstrieren. Als eine geeignete Pionieranwendung werden drahtlose Schalter und Bedienelemente gesehen. Bild 3 zeigt exemplarisch die Umsetzung einer energieautarken Haltewunschtaaste im Bus.



**Bild 2** Überblick potentieller energieautarker Sensorik im Automobil (Quelle: Daimler AG) [4].



**Bild 3** Energieautarke Haltewunschtaaste im Bus (Quelle: Daimler AG) [4].

Die Detektion eines Glasbruches im Automobil im Sinne einer Einbruch-Diebstahl-Warnung (EDW-Sensorik) ist ein wichtiges Merkmal. Die Substitution durch ein äquivalentes energieautarkes Sensorsystem könnte die Kosten deutlich senken. Im Rahmen des Förderprojektes ASY-MOF wurden bereits verschiedene Konzepte untersucht und miteinander verglichen [6].

Messungen zeigen, dass ein Glasbruch unter Verwendung eines speziell ausgelegten induktiven Energiewandlers bereits genügend elektrische Energie liefern sollte, um ein entsprechendes Konzept zu verwirklichen.

Neben der Energiewandlung und dem effizienten Energiemanagement wird hier auch Wert auf die Entwicklung einer geeigneten Funktechnologie gelegt. Vor allem aus Sicherheitsaspekten in Verbindungen mit energetischen Gründen wird der UWB-Standard (Ultra-Wide-Band) favorisiert. Hierzu wurde bereits ein erster Prototyp eines entsprechenden UWB-Frontends entwickelt.

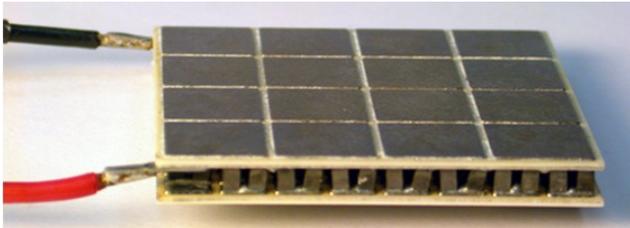
### 2.2 Energiequellen

Folgender Abschnitt stellt kurz die im Automobil vorhandenen Energieformen, die von energieautarken Sensoren „angezapt“ werden können, vor. Des Weiteren werden entsprechend geeignete Energiewandler präsentiert.

## 2.2.1 Thermische Energie

Thermische Energie fällt beim klassischen Automobil in großem Ausmaß an, da die Effizienz des Verbrennungsmotors bei lediglich 30% liegt und der Rest als Abwärme praktisch verlorengeht.

Im Bereich von Motor, Kühler und Abgasstrang könnten diese Energieform zur autarken Energieversorgung genutzt werden. Ein geeigneter Energiewandler ist hierbei ein thermoelektrischer Generator (TEG). Bild 4 zeigt exemplarisch einen miniaturisierten TEG.



**Bild 4** Miniaturisierter thermoelektrischer Generator (Quelle: Fraunhofer IPM) [4].

## 2.2.2 Strahlungsenergie

Unter Strahlungsenergie wird hier nicht die Wärmestrahlung des Autos (z.B. im Bereich des Abgasstranges) selbst verstanden, sondern vielmehr die Strahlung, die von außen auf die Oberfläche des Kraftfahrzeugs in Form von Sonnenlicht auftreten kann. Diese Energieform kann unter Ausnutzung von Solarzellen relativ leicht für elektrische Systeme nutzbar gemacht werden. Bild 5 zeigt ein Solardach eines Kraftfahrzeugs.

Diese Solarzellen werden heute bereits genutzt, um mittels energieautarker Lüfter das Innenraumklima im Stand zu regeln, was mittels Autobatterie nur sehr begrenzt möglich wäre. Für Sensoren, die vom Einsatzort eine solche Energieversorgung zulassen, wäre damit ebenso ein energieautarker Betrieb vorstellbar.



**Bild 5** Solardach eines Toyota-Prius (Quelle: Kyocera Fineceramics GmbH) [4].

## 2.2.3 Kinetische Energie

Kinetische Energie besitzt im Automobil typischerweise drei Ausprägungsformen:

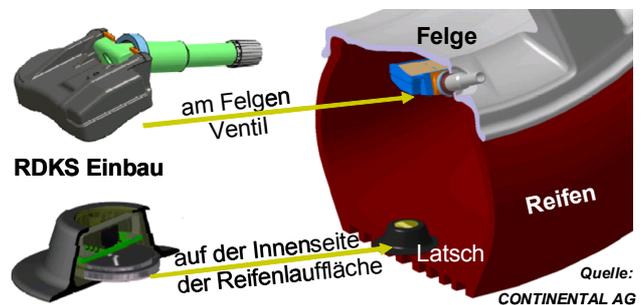
- Rotatorische Bewegungen
- Translatorische Bewegungen
- Strömungen von Flüssigkeiten bzw. Gasen

Rotatorische Bewegungen sind insbesondere im Bereich des Reifens oder auch am Antriebsstrang zu finden. Translatorische Bewegungen in Form von Vibrationen sind während der Fahrt praktisch überall anzutreffen. Strömungen von Fluiden sind insbesondere im Abgasstrang auszumachen.

## 3 Mikrosysteme

Herkömmliche RDKS werden von einer Batterie versorgt und werden wie in Bild 6 dargestellt auf der Felge montiert. Eine alternative Möglichkeit ist die Implementierung auf der Innenseite der Reifenlauffläche, was zum Konzept des intelligenten Reifens führt [7, 8]. Der innovative Ansatz erlaubt die Bestimmung von zusätzlichen Parametern. So können beispielsweise Informationen über Reifenabnutzung, Reibwert, Temperatur und Radlast genutzt werden um Fahrdynamik-Funktionen, Fahrsicherheit und Fahrkomfort zu verbessern.

Der Wechsel hinsichtlich der RDKS Implementierung von der Felge auf den Reifen erfordert aufgrund der drastisch veränderten Randbedingungen eine komplett neue Systemauslegung. Eine gravierende Einschränkung ergibt sich z.B. hinsichtlich der Systemmasse. Um die Fahrdynamik im Wesentlichen unverändert zu belassen, darf die Gesamtmasse einige Gramm nicht überschreiten. Batterien die eine Lebensdauer von mindestens 8 Jahren gewährleisten müssen, weisen allein schon Massen in dieser Größenordnung auf. Der Vorteil von energieautarken Lösungen, realisiert als hoch integrierte und miniaturisierte MST Bauelemente, ist in diesem Kontext offensichtlich.

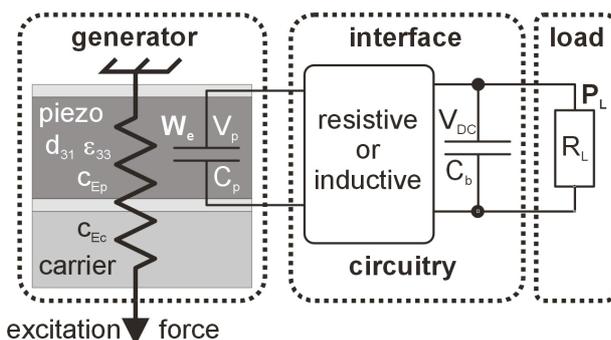


**Bild 6** Mögliche RDKS Implementierung auf Felge oder Reifen [9].

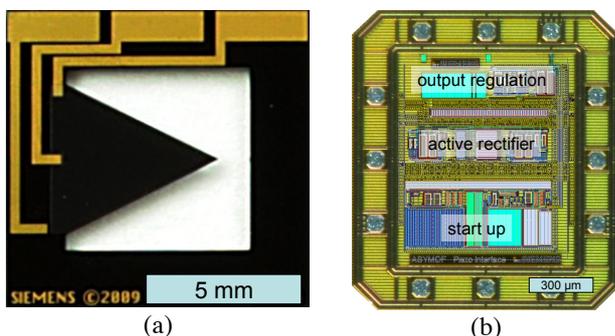
Die Systemkomponenten der autarken Energieversorgung sind in Bild 7 schematisch dargestellt. Der MST-Generator [9], besteht aus einem piezoelektrischen Dünnschicht auf einer Trägerschicht (s. Bild 8a). Ein konventioneller, makroskopischer Balkengeneratoransatz [10] mit einer seismischen Masse im Gramm-Bereich ist aufgrund der auftretenden Beschleunigungswerte im Reifen problematisch. Der im Förderprojekt ASYMOF verfolgte alternative, MST basierender Ansatz, ist ohne zusätzliches seismisches Element konzipiert. Aufgrund der geringen intrinsischen Masse der beweglichen Generatorteile im Bereich von einigen Mikrogramm, sind die hohen Beschleunigungswerte unkritisch.

Eine externe Anregungskraft wird genutzt, um Energie in den Generator einzukoppeln. Die so verursachte mechanische Spannung innerhalb der piezoelektrischen Schicht entspricht einer elektrischen Spannung  $V_p$  und einer damit gekoppelten elektrischen Energie  $W_p$ .

Die primäre elektrische Energie wird von einer Schnittstellenschaltung ASIC (Bild 8b) aufbereitet. Insbesondere findet eine Spannungsgleichrichtung statt und der Pegel wird auf den am Verbraucher benötigten Wert  $V_{DC}$  eingestellt. Schließlich kann die in der Kapazität  $C_b$  gespeicherte Energie vom Verbraucher  $R_L$  genutzt werden.



**Bild 7** Schematische Darstellung der Systemkomponenten eines miniaturisierten energieautarken Versorgungsmoduls [9].



**Bild 8** Realisierte MST-Systemkomponenten: (a) piezoelektrischer MST Generator (b) Schnittstellenschaltung ASIC

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

Energieautarke Sensorik im Automobil besitzt ein hohes Potential. Diese Entwicklung wird durch vielfältige Motivationen, wie z.B. Kostenreduktion, Umweltfreundlichkeit aber auch erweiterter Funktionsumfang, vorangetrieben. Im Rahmen des Förderprojektes ASYMOF werden intensiv zwei energieautarke Anwendungen – Reifendruckkontrollsystem und EDW-Sensorik – erforscht bzw. entwickelt. Konzepte zur EDW-Sensorik wurden etabliert. Systemkomponenten für ein miniaturisiertes energieautarkes Versorgungsmodul für reifenbasiertes RDKS wurden umgesetzt und mit Erfolg im Labor getestet.

## 5 Danksagung

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

## 6 Literatur

- [1] S. Roundy et al.: Power Sources for Wireless Sensor Networks, *Proceedings of EWSN - 1st IEEE European Workshop on Wireless Sensor Networks*, Band 2920, S. 1-17, 2004.
- [2] I. Kuehne et al.: Energieautarke Sensorik im Automobil, 6. GMM-Workshop - Energieautarke Sensorik, S. 91-95, 2010.
- [3] Yole Report: EmergingMEMS 2010, March 2010.
- [4] Sterken, T. et al.: *Power Extraction from Ambient Vibration*, in Proc. of SeSens, Veldhoven, Netherlands, S. 680-683, November 2002.
- [5] Reif, K.: *Sensoren im Kraftfahrzeug*, Bosch Fachinformation Automobil, Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden, 2010.
- [6] X. Li, et al.: *Energieautarker EDW-Sensor im Fahrzeug*, angenommener Beitrag MST Kongress, 2011.
- [7] Haas, T. et al.: *Intelligenter Reifen: energie-autarke Mikroelektronik*, 4. GMM-Workshop - Mikrosensorik mit autarker Energieversorgung und drahtloser Signalübertragung, Karlsruhe, pp. 91-98, 2006.
- [8] D. Wagner: Enabling Energy Harvesting Powered Sensors for Intelligent Tire Monitoring, *Energy Harvesting For Wireless Automation, Germany*, 2010.
- [9] Frey, A. et al.: *Systementwurf eines MST basierten piezoelektrischen Versorgungsmoduls für energieautarke Anwendungen*, 6. GMM-Workshop - Energieautarke Sensorik, 2010.
- [10] E. Just et al.: Elektromechanischer  $\mu$ -Generator basierend auf der Piezo-Polymer-Komposit Technologie, *GMM-Fachbericht Bd. 51*, S. 21-24, 2006.