

# Schlussbericht

**über die erzielten Ergebnisse  
im Teilvorhaben der Daimler AG  
des Verbundvorhabens**

**„Autarke Mikrosysteme mit mechanischen  
Energiewandlern für mobile (Sicherheits-) Funktionen“**

**Akronym: ASYMOF**

Verbundprojekt-Nr. 16SV3338  
Berichtszeitraum 01.02.2009 – 31.07.2012



## Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung und Problemstellung des Verbundes .....</b>	<b>4</b>
<b>2 Ergebnisse des Verbundprojektes .....</b>	<b>4</b>
2.1 Batterieloser Reifendrucksensor.....	4
2.2 Autarke EDW Sensorik .....	6
2.2.1 Resonanzfrequenz beim Scheiben-Bruch.....	6
2.2.2 Konzept Entwicklung .....	6
2.2.2.1 Induktiver Mikro-Generator .....	8
2.2.2.2 Nicht-resonante Wandlerprinzipien .....	9
2.2.2.3 Piezoelektrische Folien.....	12
2.2.2.4 Ferroelectret – Elektroaktive Polymere .....	13
2.2.3 Validierung und Demonstratoraufbau.....	15
2.2.3.1 Big-Amplituden Shakers .....	16
2.2.3.1.2 Messdaten Auswertung .....	16
2.2.3.1.3 Auswertung PowerQb2 A001050 .....	16
2.2.3.1.4 Auswertung PowerQb2 A002050 .....	18
2.2.3.1.5 Fahrzeugsteuergerät / Gateway .....	19
2.2.3.2.1 Demonstratoraufbau .....	21
2.2.3.2.2 Demonstrator Inbetriebnahme.....	22
2.2.4 Fazit.....	24
<b>3 Veröffentlichungen.....</b>	<b>25</b>
<b>4 Literaturverzeichnis .....</b>	<b>25</b>

## 1 Einleitung und Problemstellung des Verbundes

Zukünftige mobile Anwendungen, insbesondere im Bereich der Überwachung und der Diagnostik, als auch weitere Dienstleistungen erfordern zunehmend energieautarke, kosteneffiziente Mikrosysteme. Die Aufgabe solcher Mikrosysteme besteht darin, den Zustand von Objekten oder Personen mit möglichst geringem Energieaufwand zu erfassen, die Daten zu verarbeiten und die so gewonnenen Informationen drahtlos weiterzuleiten.

Ein bedeutendes Anwendungsfeld energieautarker Mikrosysteme ist der potentielle Einsatz in Automobilen. Kennzeichen für diese Applikationen sind oft besonders harte Anforderungen an Zuverlässigkeit und Robustheit unter extremen Betriebsbedingungen (Temperatur, Druck, mechanische Belastung). Zur Validierung der zu entwickelnden energieautarken Systemplattform werden im Projekt die zwei Pilotanwendungen, batterieloser Reifendrucküberwachungssystem (TPMS) und batterieloses Sicherheitssystem (EDW), exemplarisch verfolgt. Die bei konventionellem Betrieb bestehenden Probleme könnten mit dem neuen energieautarken Systemansatz gelöst oder reduziert werden.

## 2 Ergebnisse des Verbundprojektes

Im Berichtszeitraum hat sich die Daimler AG entsprechend der Projektplanung an folgenden Arbeitspaketen beteiligt:

- AP 1: Definition von Anforderungen und Konzept
- AP 5: Entwicklung einer sicheren, robusten und energieeffizienten Datenübertragung
- AP 7: Anpassung Sensorik
- AP 8: Test und Charakterisierung
- AP 9: Systemintegration
- AP 10: Systemvalidierung, Feldtests, Transfer

Im Folgenden werden die Ergebnisse, welche durch Daimler AG im Laufe der Projektlaufzeit erzielt wurden, präsentiert.

### 2.1 Batterieloser Reifendrucksensor

In der Konzeptphase sind unter Leitung von Daimler und Continental die Spezifikationen in Bezug auf die Systemfunktionalität wie Temperatur-, Beschleunigungs- und Vibrationsprofile sowie die erforderlichen Energiemengen, die zum Betrieb der Sensorik sowie der Übertragungstechnologie notwendig sind, festgelegt worden. Die HW Anforderungen und Spezifikationen richten sich nach den aktuellen Industrienormen. Davon ausgehend wurden Spezifikationen für die Mikrogeneratoren erarbeitet.

Es werden drei Reifendrucksensor - Systeme betrachtet und im weiteren Projektverlauf von verschiedenen Partnern untersucht:

- Einbau auf der Felge, Piezo, makroskopisch (Conti)

- Einbau auf der Felge, induktiv, makroskopisch (Daimler und Imtek)
- Einbau im Reifenlatsch, Piezo, MEMS (Siemens und Conti)

Aus Simulationen der Continental AG wird ersichtlich, dass bei höherer Geschwindigkeit weniger mechanische Leistung zur Verfügung steht, da die Zentrifugalbeschleunigung quadratisch von der Fahrzeuggeschwindigkeit abhängt. Der resultierende Kraftvektor, abhängig von der Erd- und Zentrifugalbeschleunigung, wird von der Radialbeschleunigung stark dominiert und hemmt das Schwingungsverhalten der seismischen Masse. Da die Voraussetzungen für die Simulationen konstante Fahrgeschwindigkeit und minimaler Einfluss durch Unrauheiten der Straßenoberfläche waren, wurde ein felgenmontiertes Messsystem aufgebaut, mit dem am Fahrzeug die tatsächlichen Beschleunigungen erfasst werden können.

Abb.1 stellt die Struktur des Evaluationssystems dar. Dieses hat einen Sender, der mit einem Träger auf der Felge geklebt wird, sein 3-Achsen Schwingungssensor kann die felgennahen Vibrationen in Echtzeit aufnehmen und die gemessene Daten per Funkstrecke (2,4 GHz) dem Empfänger mitteilen. PCB-Layout des Senders stellt Abb.2 dar. Erste Messungen wurden in verschiedenen Fahrsituationen auf unterschiedlichen Straßen aufgenommen und ausgewertet werden.



Abb.1 Struktur des Evaluationssystems

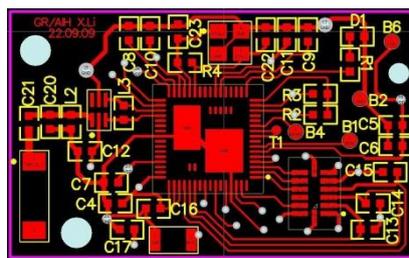


Abb. 2 Layout des Senders

Der Piezoelektrische Generator ist bei Projektpartner Siemens AG und Continental AG angefertigt und getestet worden. Die mittlere Leistung ist bei niedriger Geschwindigkeit sehr gering.

## 2.2 Autarke EDW Sensorik

### 2.2.1 Resonanzfrequenz beim Scheiben-Bruch

Der energieautarke Glasbruchsensor muss mit der Glasscheibe gut verbunden, d. h. im Glasmaterial integriert oder auf der Glasfläche aufgeklebt werden, um so den beim Einbruchversuch entstehenden Transversalschall zu detektieren. Zur Entwicklung von passiven Glasbruchsensoren ist es vor allem notwendig, die Schwingung der Glasoberfläche, die Resonanzfrequenz, sowie die Bruch-Energiemenge durch echte Einbruchversuche zu ermitteln (Abb.3).



Abb.3 Aufbau der Glasbruchmessung

Die Vibration der Heckscheibe beim Bruch liegt im Bereich  $\pm 60G$ , die Peak Frequenz bei 436Hz. Das Bruch-Geschehen läuft in ca. 10ms ab (Abb.4). Die Geräusch Peak -Frequenz liegt bei 155 kHz.

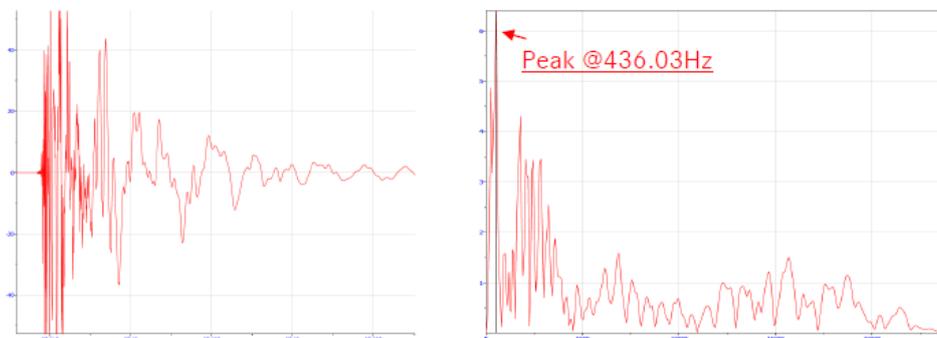


Abb.4 Messergebnis der Heckscheiben-Vibration

### 2.2.2 Konzept Entwicklung

In der Konzeptphase wurden unter Leitung von Daimler, HSU/HH und IMTEK bzgl. der autarken EDW Sensorik zwei mögliche Systemprinzipien festgelegt: das Prinzip mit kontinuierlich generierter Energie und das Prinzip, welches aus einem Bruchimpuls Energie erzeugt.

#### 2.2.2.1 Prinzip mit kontinuierlich generierter Energie

Bei diesem Prinzip (Abb.5) wird die Energie während der Fahrt bzw. der Bewegung des Fahrzeugs mittels einem induktiven Mikro-Generator generiert und muss in einem ausreichend groß dimensionierten Energiespeicher mit geringer Selbstentladung gespeichert werden. Im Vergleich mit der Spezifikation des Ultraschall-EDW-Systems soll die Überwachungsfunktion mindestens 6 Wochen in der Lage sein, einen Glasbruch zu detektieren. Die gespeicherte Energie soll auch regelmäßige

Sicherheitsfunktionen ermöglichen, z.B. die regelmäßige Abfrage alle 10 Sekunden, ob die an der Scheibe vorhandene Drahtschleife funktionstüchtig ist.

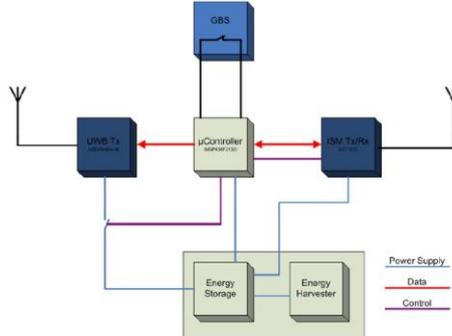


Abb.5 Prinzip mit kontinuierlich generierter Energie

Der geschätzte Energieverbrauch des autarken EDW-Sensors nach diesem Prinzip ist in Tab. 1 dargestellt. Um die Überwachungstauglichkeit erhalten zu können, muss der Energiespeicher mindestens die Menge  $E_{\text{Speicher}}$  beinhalten.

$$E_{\text{Speicher}} = P_{\text{Ges}} \cdot t_{\text{sleep}} + E_{\text{Tx}} = 2,3 \mu\text{W} \cdot (60 \cdot 60 \cdot 24 \cdot 7 \cdot 6) + 30 \mu\text{Ws} \cdot (6 \cdot 60 \cdot 24 \cdot 7 \cdot 6) = 19,2\text{J}$$

Der Entwicklungsprozess ist in Abb.6 dargestellt. Ein Demonstrator wurde aufgebaut.

Konfiguration 1 – SLEEP State			
	$U_{\text{Vers}}$ [V]	$I_{\text{Vers}}$ [ $\mu\text{A}$ ]	$P_{\text{Ges}}$ [ $\mu\text{W}$ ]
MSP430F2132	2,2	0,5	1,1
CC1101	3	0,4	1,2
UWB	0	0	0
Gesamt			2,3
Konfiguration 1 – Tx			
	Energiebedarf gesamt / Energiebedarf Tx		
ISM (MSP & CC1101)	12,2 $\mu\text{Ws}$ / 7,13 $\mu\text{Ws}$ ( $\approx 58,44\%$ )		
UWB (MSP & UWB)	30,025025 $\mu\text{Ws}$ / 30 $\mu\text{Ws}$ ( $\approx 99,91\%$ )		
ISM+UWB	42,2242 $\mu\text{Ws}$ / 37,13 $\mu\text{Ws}$ ( $\approx 87,93\%$ )		

Test Conditions: Länge Protokoll: 43 Bit;  $f_{\text{MSP, Tak}} = 1 \text{ MHz}$ ; Program execution in RAM; Datenrate CC1101: 500kbaud;  $P_{\text{OUT, CC}} = -6\text{dBm}$   
Datenrate UWB: 1 Mbit/s

Tab. 1 Energieverbrauch des Prinzips mit kontinuierlich generierter Energie (HSU/HH)

### 2.2.2.2 Prinzip mittels durch Bruchimpuls generierter Energie

Bei diesem Prinzip (Abb.7) wird die Energie durch den eigentlichen Einschlag an der Scheibe generiert. Es wird ein induktiv inertialer Generator eingesetzt oder aus der Deformation einer piezoelektrischen Folie Energie erzeugt, wobei die piezoelektrische Folie direkt an bzw. in der Scheibe verklebt wird.

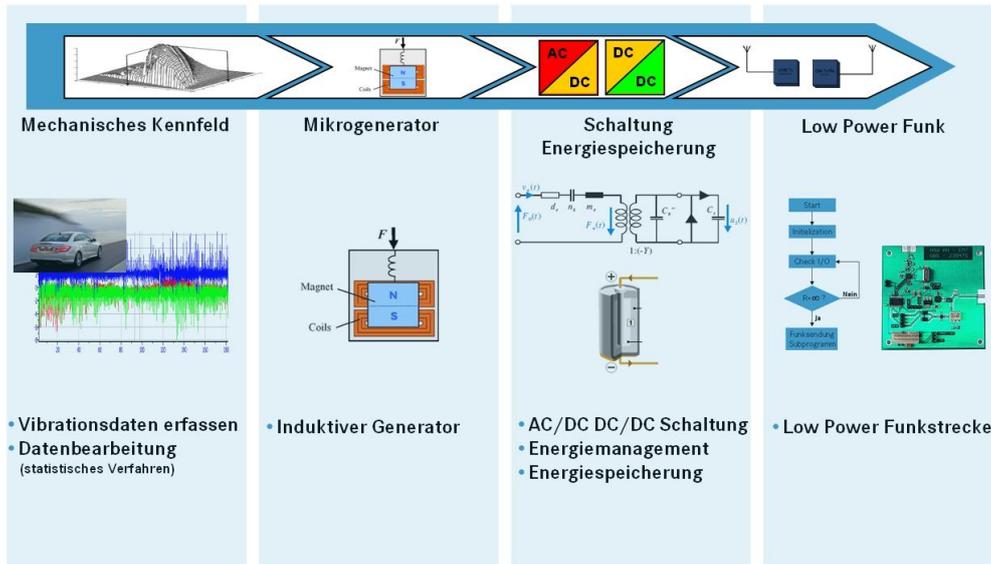


Abb.6 Entwicklungsplan des Prinzips mit kontinuierlich generierter Energie

### 2.2.2.2.1 Induktiver Mikro-Generator

Im zuletzt berichteten Projektzeitraum wurde das Vibrationsprofil der Impuls-Schwingung (Abb.8) durch die Zerstörung der Scheibe gemessen. Mit Hilfe eines Simulationsmodells des parameter-optimierten induktiven Generators von IMTEK (Abb. 9) ergab sich aufgrund der transienten Schwingung ein elektrischer Energiegewinn von ca.  $50\mu\text{J}/\text{cm}^3$  pro Einschlagsimpuls.

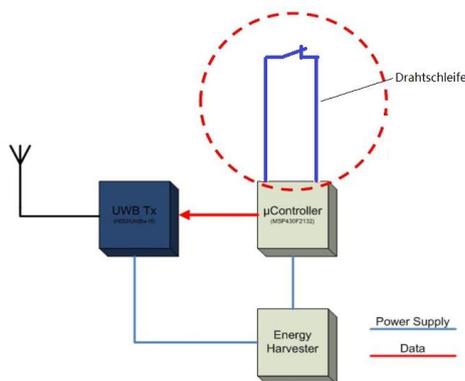


Abb.7 Prinzip mittels Bruchimpuls generierter Energie (HSU/HH)

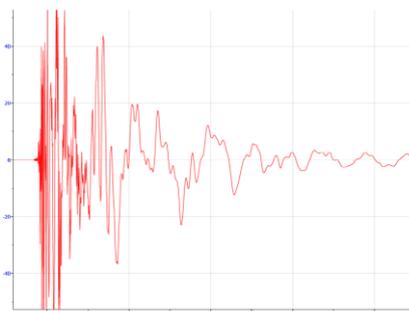


Abb.8 Vibrationsprofil der Einbruch-Schwingung

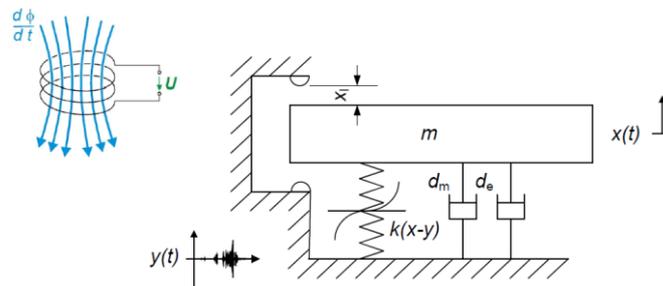


Abb.9 Simulationsmodell des induktiven Generators (IMTEK)

Um bei der Zerstörung der Glasscheibe ein Funksignal abzusetzen benötigt man deutlich mehr kinetische Energie als von dem Generator erzeugt wird. Der Grund hierfür ist, dass der inertielle Generator einen schlechten Wirkungsgrad bei impulsförmigen Anregungen aufweist.

#### 2.2.2.2 Nicht-resonante Wandlerprinzipien

Resonante Energiewandler beruhen auf elektromechanisch gekoppelten Feder-Masse-Systemen. Die erzielbare elektrische Leistung ist bei diesen Wandlern bei vibratorischer Anregung im Bereich der Eigenfrequenz maximal. Wenn der Generator nicht im Bereich der Resonanzfrequenz betrieben wird, sinkt die Ausgangsleistung stark ab. Resonante Energiewandler sind aufgrund ihrer Charakteristik deshalb auf sehr stabile Vibrationsspektren angewiesen, auf die sie speziell ausgelegt sein müssen, um eine ausreichende Wandlereffizienz zu garantieren. Diese Art von Vibrationen ist im Automobil jedoch nicht häufig anzutreffen, so dass der nicht-resonante Energiewandler eine deutlich flexiblere Alternative darstellt.

Die nicht-resonanten Wandlerprinzipien wurden untersucht, die im Automotivbereich ein breites Spektrum von Anwendungsmöglichkeiten bieten. Hier ist unter anderem der Einsatz in tragbaren Geräten denkbar.

Diese Art der Energiewandler weist kein resonantes Verhalten auf, so dass sie auf breitbandige, nicht-stationäre Vibrationen mit relativ gleichbleibender Wandlereffizienz reagieren. Im Bereich der Miniaturisierung dieser Wandlerklasse besteht jedoch noch weiterer Forschungsbedarf. Entsprechende mikromechanische bzw. MEMS-basierte Ansätze sind bis heute nicht realisiert.

Bei typischen menschlichen Bewegungsabläufen im täglichen Leben soll eine maximale Energieausbeute ermöglicht werden (Abb.10). Der Generator muss insbesondere bei den hier auftretenden niedrigen Frequenzen mit hohem Wirkungsgrad arbeiten.

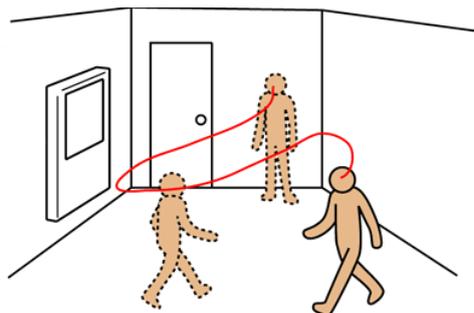


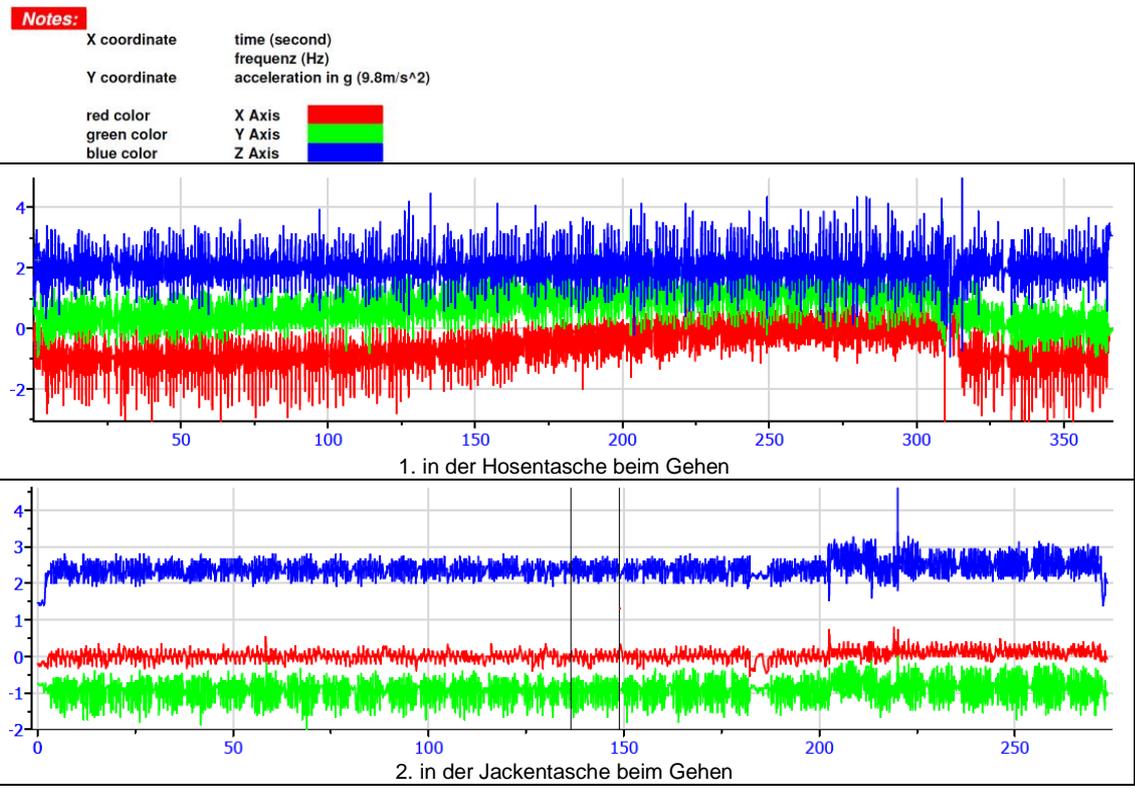
Abb.10 Statistische Bewegungen beim nicht-resonanten Generator

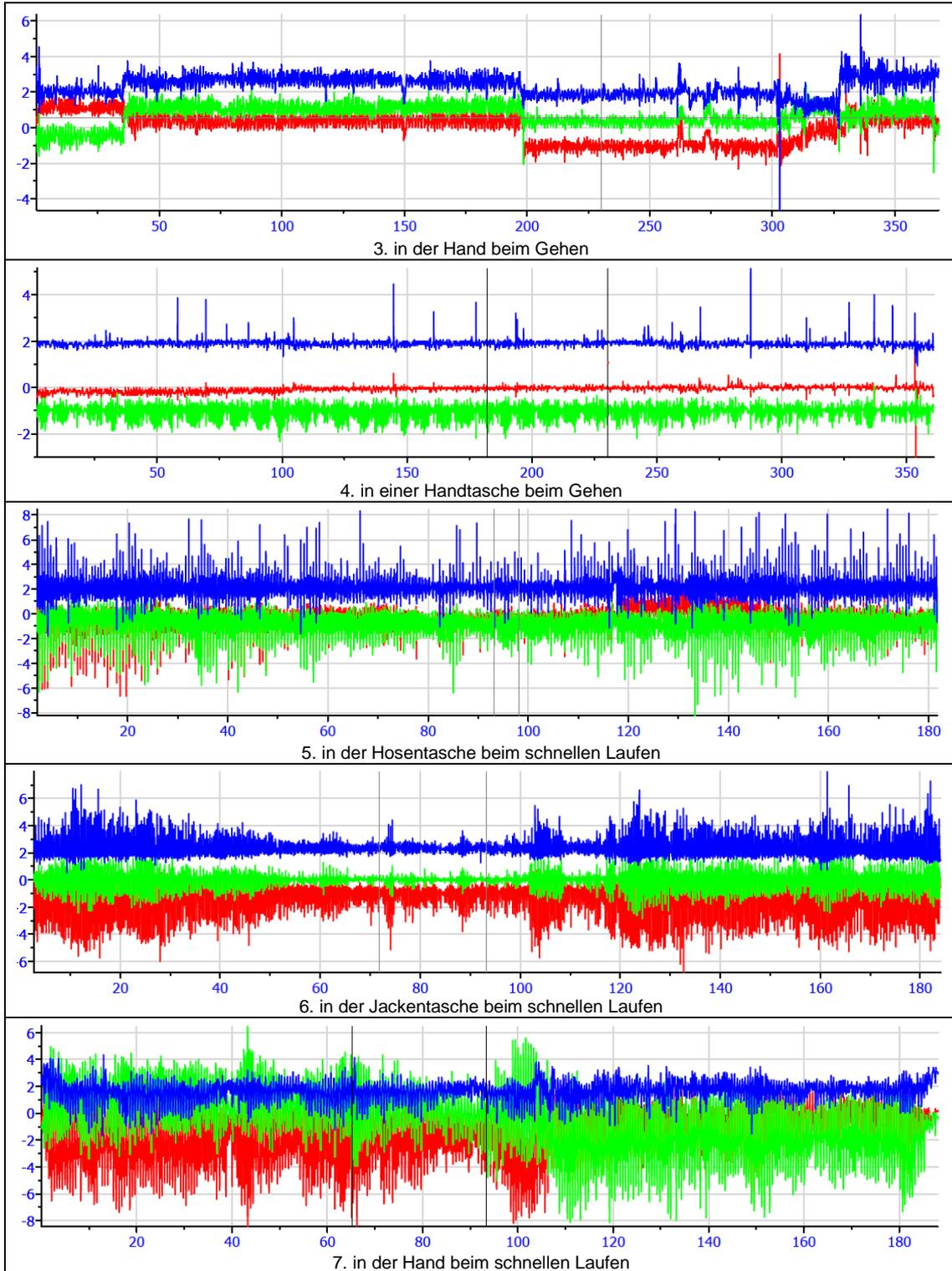
Die Eigenschaften von 10 typischen Bewegungsabläufen wurden statistisch ermittelt. Die Sensorik befand sich hierbei

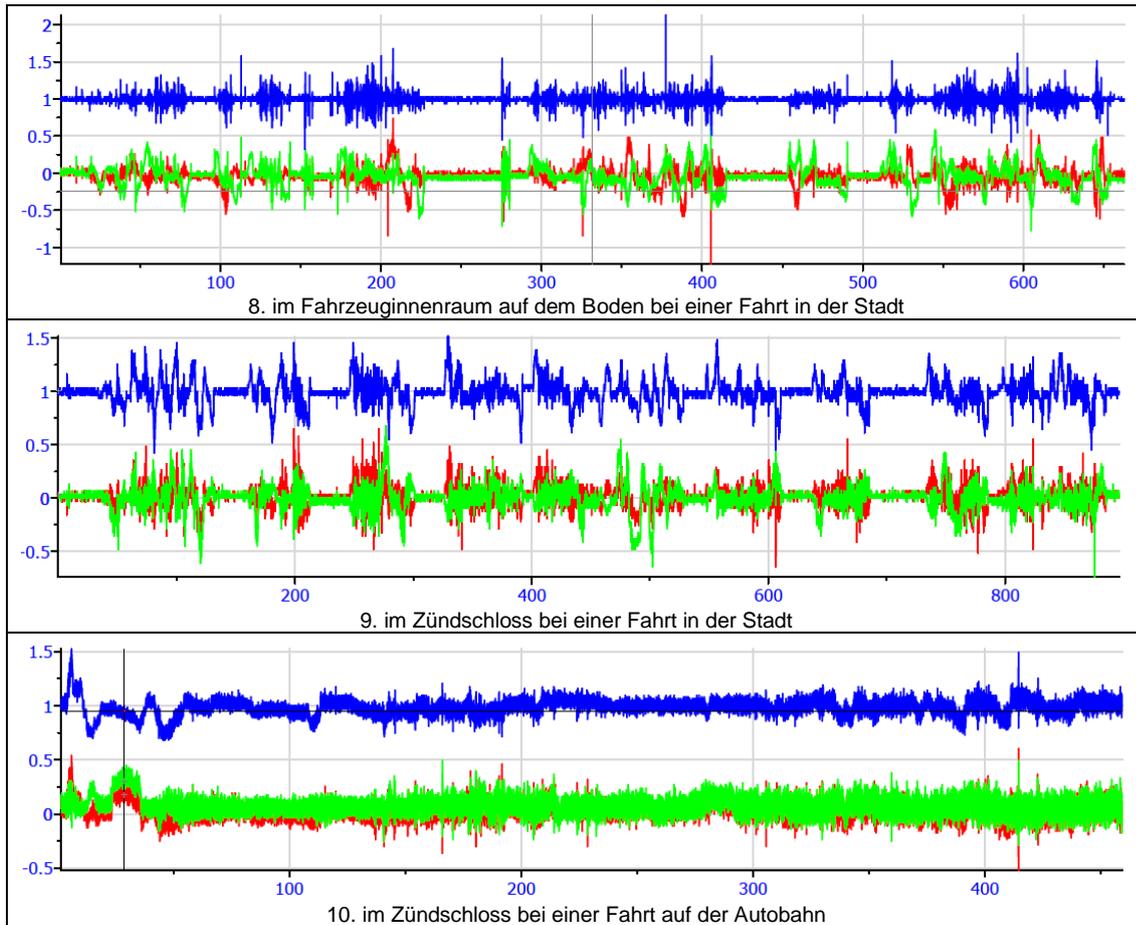
- in der Hosentasche beim Gehen
- in der Jackentasche beim Gehen
- in der Hand beim Gehen
- in einer Handtasche beim Gehen
- in der Hosentasche beim schnellen Laufen
- in der Jackentasche beim schnellen Laufen
- in der Hand beim schnellen Laufen
- im Fahrzeuginnenraum auf dem Boden bei einer Fahrt in der Stadt
- im Zündschloss bei einer Fahrt in der Stadt
- im Zündschloss bei einer Fahrt auf der Autobahn

Mit dem 3-Achsen Beschleunigungssensor MMA8450 von der Firma Freescale wurden die Vibrationsdaten erfasst, die in Tab. 2 dargestellt sind. Das mittels einer FFT ermittelte Frequenzspektrum liegt in einem Frequenzbereich von 0,2 ~ 6,0Hz (Tab. 3).

Im Weiteren sollen verschiedene nicht-resonante Wandler- Prinzipien hinsichtlich der erzeugten Energie bewertet werden, um das optimale System zu entwerfen.







Tab.2 Messungen bei typischen Bewegungsabläufen

*spectrum analysis (Unit: Hz)*

10 possible daily moving cases	X Axis			Y Axis			Z Axis		
1. walking in trousers pocket	0.78~6.13			2.23~6.06			0.8~1.5		
2. walking in jacke pocket	0.6~0.9			1.5~2.4			1.2~1.7		
3. walking in hand	0.2~0.7			0.7~1.2			0.6~1.2		
4. walking in handbag	0.4~0.8			0.9~1.4			0.6~1.7		
5. running in trousers pocket	1.5	3.2	4.6	1.5	3.1		1.6	3.1	4.6
6. running in jacke pocket	3.0	6.0		4.4	7.3		3.0	6.0	
7. running in hand	1.8	3.4		1.8	3.6		1.7	3.8	
8. driving in cabin in City	0.03	7.3		0.02	7.3		0.4		
9. driving in ignition lock City	6.7			6.7			0.1		
10. driving in ignition lock Highway	28.9			28.9			28.8		

Tab.3 Ergebnisse der FFT

Die Energie aus der direkten Deformation der piezoelektrischen Materialien ist denkbar und bereits untersucht.

**2.2.2.3 Piezoelektrische Folien**

Der piezoelektrische Glasbruchmelder FU3000W, wie in Abb.11 dargestellt, reagiert auf typische Glasbruchschwingungen im Bereich um 100 kHz, die bei der Zerstörung von Scheiben entstehen. Die erzeugte Spannung kann bis 600mV betragen (Abb.12). Hiermit kann ein Transistor geschaltet werden, wobei die Eingangsimpedanz der Schaltung 22kΩ beträgt und die hierbei von der

piezoelektrischen Folie erzeugte Energie lediglich ca. 1nJ beträgt. Mit dieser Energieausbeute ist keine Aussendung eines Funkprotokolls möglich.



Abb.11 piezoelektrische Glasbruchmelder

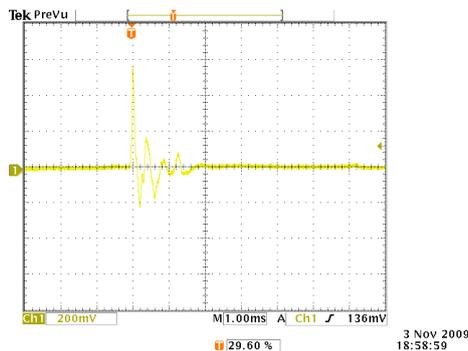


Abb.12 Piezoelektrischer Strom bei Reaktion der Glasbruchmelder

#### 2.2.2.2.4 Ferroelectret – Elektroaktive Polymere

Elektroaktive Polymere (EAP) sind Polymere, die durch das Anlegen einer elektrischen Spannung ihre Form ändern (Abb.13). Die EAP Materialien besitzen einen hohen  $d_{33}$  Wert, im Vergleich mit PVDF ist der  $d_{33}$  Wert 30 Mal höher, mit PZT vervierfacht er sich.

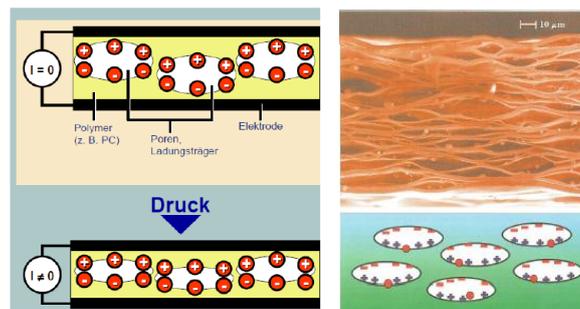


Abb.13 Elektroaktive Polymere (Quelle: Bayer)

Die Firma Bayer MaterialScience in Leverkusen hat den Prototyp F210 (Abb.14) an Daimler geliefert und vor Ort getestet. Die erzeugte Spannung durch einen mechanischen Impuls (Ball mit 110g Gewicht, freier Fall aus 5cm Höhe) variiert von 25V bis 30V, wie in Abb.15 und Abb.16 dargestellt ist. Das polymere Muster mit 20mm x 20mm Fläche kann maximal 150nJ elektrische Energie mit Open-Load erzeugen.

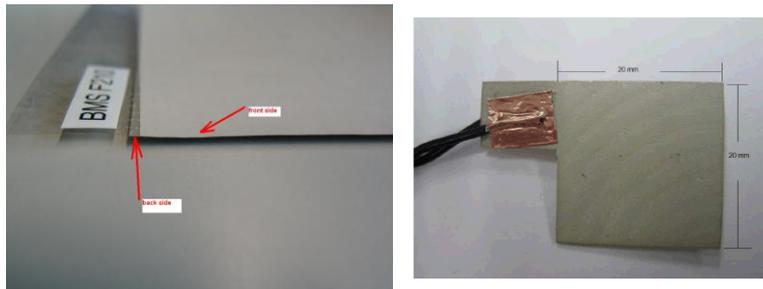


Abb.14 EAP Prototyp F210 von Fa. Bayer MaterialScience

Ein Generator verfügt über insgesamt 3 Schichten, wobei sich das elektroaktive Polymer zwischen zwei Silberschichten befindet, die als Elektroden genutzt werden. Die aktiven Polymere sind potentielle Materialien für Energy Harvesting Anwendungen. Durch die nicht vorhandene Transparenz des heutigen EAP Materials ist der Einsatz in einer Glasscheibe jedoch nicht denkbar.

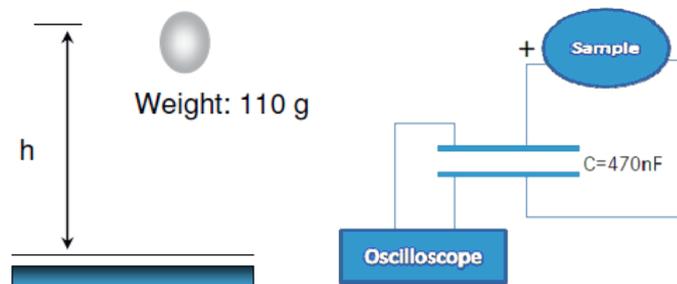


Abb.15 Messaufbau mit dem EAP Muster

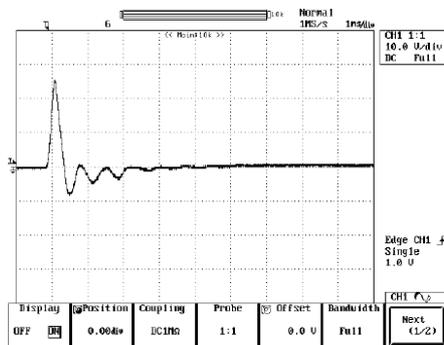


Abb.16 Spannungsverlauf während des Tests

Die Energieverbrauchsabschätzung in Tab.4 zeigt, dass theoretisch 30  $\mu$ J Energie benötigt werden würde, um das 43-Bit-Protokoll per UWB Funkkanal auszusenden. Außerdem berücksichtigt die Abschätzung noch nicht den Wirkungsgrad der Wandler-Schaltung einschließlich des Gleichrichters, DC/DC Konverters usw. Der momentane Stand der Technologie gewährleistet einen Wirkungsgrad der CMOS-Interfaceschaltung von etwa 50%. Das bedeutet, dass die generierte Energie aus dem Generator mindestens 60  $\mu$ J betragen müsste. Wegen der sicherheitsrelevanten Anwendung ist eine bidirektionale Kommunikation unverzichtbar. Deshalb wird das Prinzip mittels Bruchimpuls generierter Energie nicht mehr weiter verfolgt.

Konfiguration 2 – SLEEP State			
	U <sub>Vers</sub> [V]	I <sub>Vers</sub> [A]	P <sub>Ges</sub> [W]
MSP430F2132	0	0	0
UWB	0	0	0
Gesamt			0

Konfiguration 2 – Tx	
	Energiebedarf gesamt / Energiebedarf Tx
UWB (MSP & UWB Tx)	30,025026452 μWs / 30 μWs (±99,91%)

Tab.4 Energieverbrauch des Prinzips mittels Bruchimpuls generierter Energie (HSU/HH)

### 2.2.3 Validierung und Demonstratoraufbau

Das Energieautarke Mikrosysteme wird mit Hilfe eines Schwingprüfsystem im Labor nach einwandfreier Funktion überprüft. In Abb.17 ist der Messaufbau dargestellt. Beim ersten Messaufbau wird das Schwingprüfsystem Big-Amplitude Shaker verwendet. Mit Hilfe eines Big Amplituden Shaker werden die Vibration, die im Fahrzeuginnenraum entstehen, simuliert. Der Big Amplituden Shaker setzt das energieautarke Mikrosystem unter den Einfluss von mechanischen Schwingungen, so dass der induktive Generator das Mikrosystem mit Energie versorgt.

Beim zweiten Messaufbau wird das Schwingprüfsystem TiraVib verwendet. Das Schwingprüfsystem TiraVib ist ein Hot Shaker.

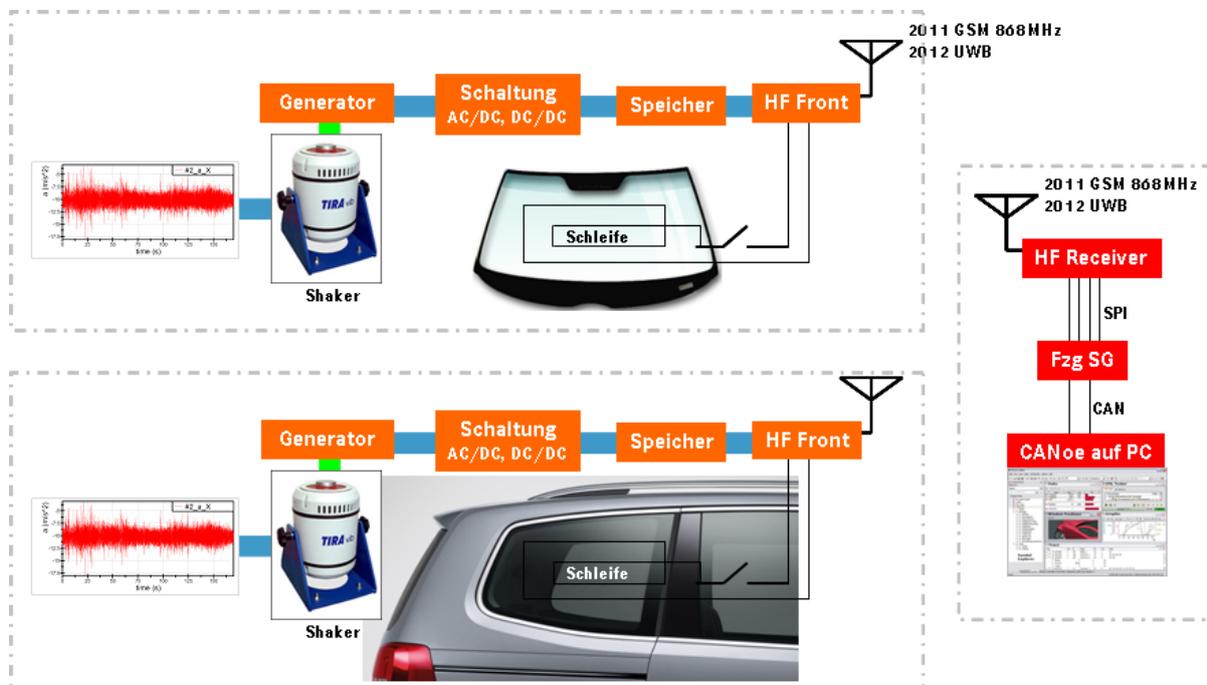


Abb.17 Demonstrator Aufbau

### 2.2.3.1 Validierung

#### 2.2.3.1.1 Big-Amplituden Shakers

Das Schwingprüfsystem Big-Amplituden Shaker versetzt Bauteile unter Einfluss von mechanischen Schwingung. Der Big-Amplituden Shaker erzeugt Vibrationen von der niedrigen Frequenz und relative hohen Amplituden. Während einer Autofahrt entstehen im Fahrzeuginnenraum niederfrequente Vibrationen mit relativen hohen Amplituden und im Labor wird mit Hilfe der Big-Amplituden Shaker diese niederfrequente Vibration simuliert. Der Big Amplituden Shaker erzeugt Vibration im Frequenzbereich von 2 bis 5,5 Hz.

In Abb.18 ist der mechanische Aufbau des Big-Amplituden Shakers dargestellt. Durch eine Motordrehbewegung wirken auf den Prüfling mechanische Schwingungen. Die mechanischen Schwingungen simulieren die Vibrationen, die während einer Autofahrt im Fahrzeuginnenraum entstehen. Um die größtmögliche Leistung vom Generator PowerQb2 entnehmen zu können, arbeitet der Generator mit Leistungsanpassung. Der Lastwiderstand ist genauso groß, wie der Innenwiderstand des Generators.

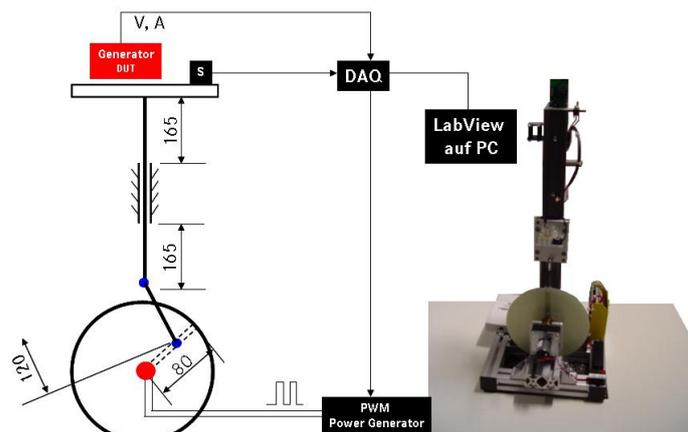


Abb.18 Mechanischer Aufbau des Shakers

#### 2.2.3.1.2 Messdaten Auswertung

Die beiden Generatoren wurden auf den VibTira Shaker mit zwei verschiedenen Messprogrammen getestet. Das erste Messprogramm ist ein Frequenzsweep. Es wird eine konstante Beschleunigung eingestellt (z.B. 0,2g), anschließend wird die Schwingfrequenz der Vibration schrittweise erhöht. Das zweite Programm ist ein Beschleunigungssweep. Hier wird eine konstante Vibrations-Schwingfrequenz eingestellt (z.B. 45 Hz) und die Beschleunigungsstärke wird schrittweise verändert.

#### 2.2.3.1.3 Auswertung PowerQb2 A001050

Der Generator PowerQb1 A001050 hat ein spannungsgleichgerichteten Ausgang (rote und blaue Anschlüsse) und ein Ausgang (weiße und schwarze Anschlüsse), bei dem die Wechselspannung an den Spulen abgegriffen werden kann. In den Rohdaten sind beide Spannungswerte abgespeichert, aber die folgenden Kennlinien Abb.19 und Abb.20 zeigen den spannungsgleichgerichteten Ausgang.

Die Frequenzsweep Kennlinie des PowerQb2 A001050 ist in der Abb.19 dargestellt. Bei dieser Messung wurde eine konstante Beschleunigung eingestellt und die Frequenz schrittweise um mit 1 Hz erhöht wird. Wie man aus der Kennlinie erkennt, erzeugt der Generator nur in einer sehr kleinen Frequenzbandbreite von 35 bis 46 eine brauchbare Leistung. Bei Frequenzen bis 35 Hz und über 46 Hz kann man die generierte Leistung vernachlässigen. Man erkennt auch, dass durch höhere Beschleunigung die Bandbreite ein wenig größer wird. Laut den Datenblatt PowerQb2 ist die Resonanzfrequenz bei 42,5 Hz, diese Angabe übereinstimmt mit der Kennlinie. Man erkennt auch, dass der Generator nicht mehr als 400  $\mu$ W Leistung erzeugt.

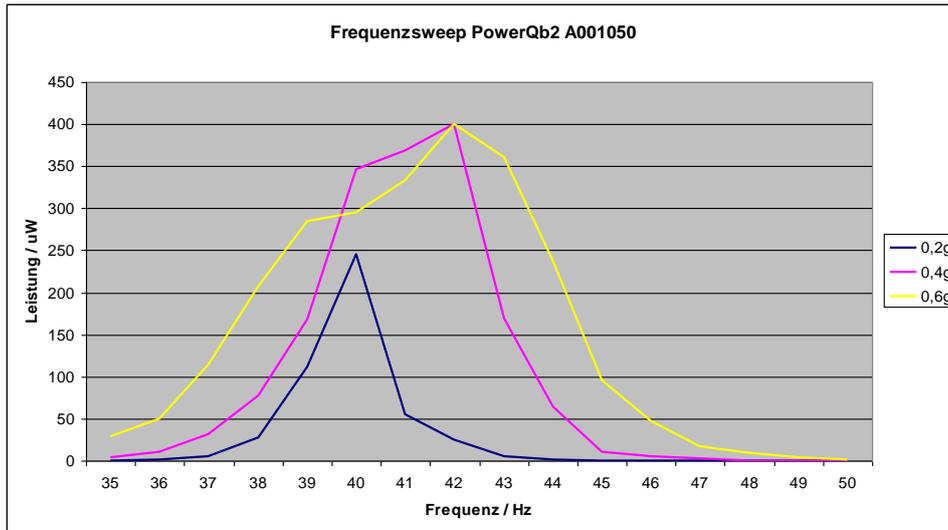


Abb.19 Frequenzsweep PowerQb2 A001050

Die Beschleunigungssweep Kennlinie des PowerQb2 A001050 ist in der Abb.20 dargestellt. Bei dieser Messung wurde eine konstante Frequenz eingestellt und die Beschleunigung schrittweise von 0,1g erhöht.

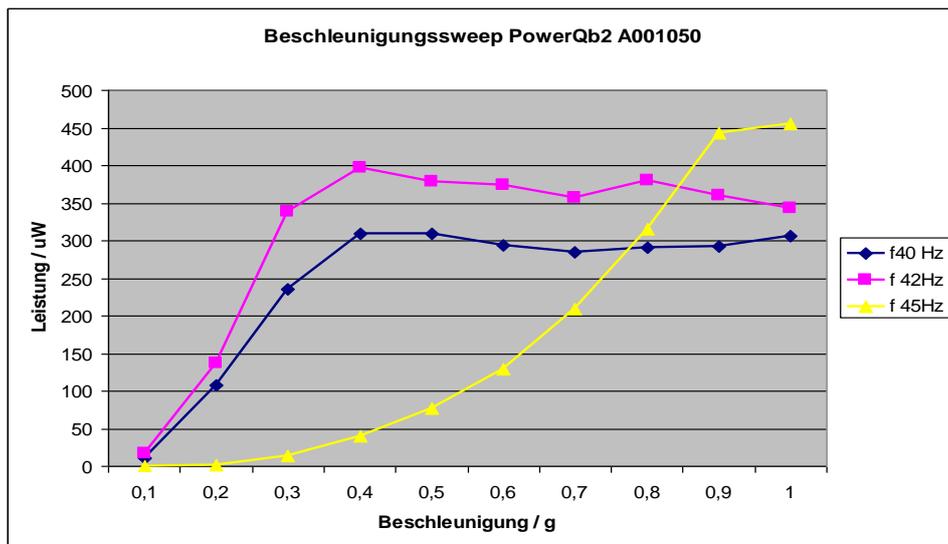


Abb.20 Beschleunigungssweep PowerQb2 A001050

#### 2.2.3.1.4 Auswertung PowerQb2 A002050

Der Generator PowerQb2 A002050 hat einen spannungsgleichgerichteten Ausgang und einen spannungsgeregelten Ausgang. Die folgende Kennlinien in Abb.21 und in Abb.22 zeigen den spannungsgleichgerichteten Ausgang. Im Leistungsanpassungsbetrieb erzeugt der geregelte Ausgang keine Spannung. Der Grund hierfür ist, dass im Leistungsanpassungsbetrieb die erzeugte Spannung zu gering ist.

Die Frequenzsweep Kennlinie ist in Abb.21 dargestellt. Bei dieser Messung wird eine konstante Beschleunigung eingestellt und die Schwingfrequenz schrittweise um 1 Hz erhöht wird. Wie man aus der Kennlinie erkennt, ist, je größer die Beschleunigung, die Resonanzfrequenz und die Bandbreite größer. Die erzeugte Leistung ist proportional zur Beschleunigung. Schon ab einer Beschleunigung von 0,2g generiert der Generator eine verwendbare Leistung. Hier erkennt man auch, dass die Bandbreite sehr gering ist und die Resonanzfrequenz hoch ist. Die Bandbreite ist, bei einer Beschleunigung von 0,6 g, ca. 10 Hz breit. Die Resonanzfrequenz liegt bei ca. 44 Hz. Die Leistungsspitze ist fast 1,6 mW.

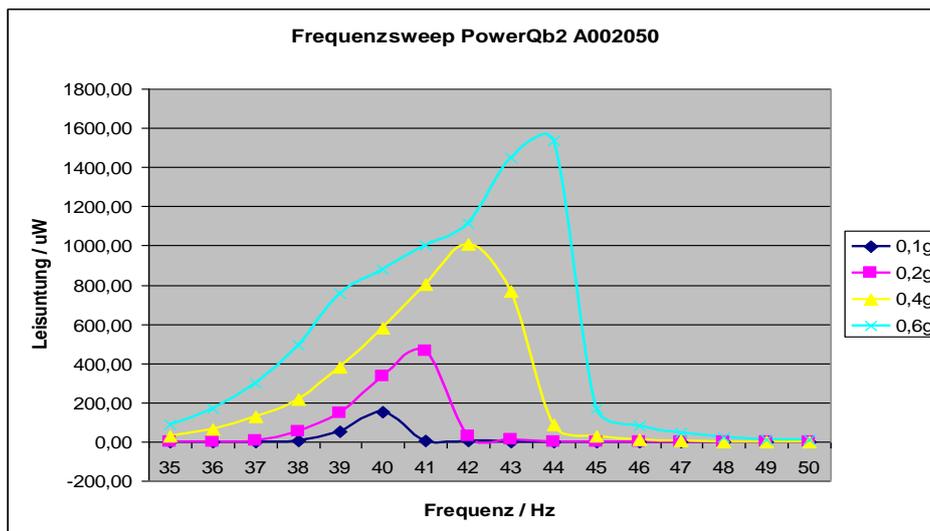


Abb.21 Frequenzsweep PowerQb2 A002050

Die Beschleunigungssweep Kennlinie des PowerQb2 A002050 ist in der Abb.22 dargestellt. Bei dieser Messung wird eine konstante Frequenz eingestellt und die Beschleunigung schrittweise um 0,1g erhöht.

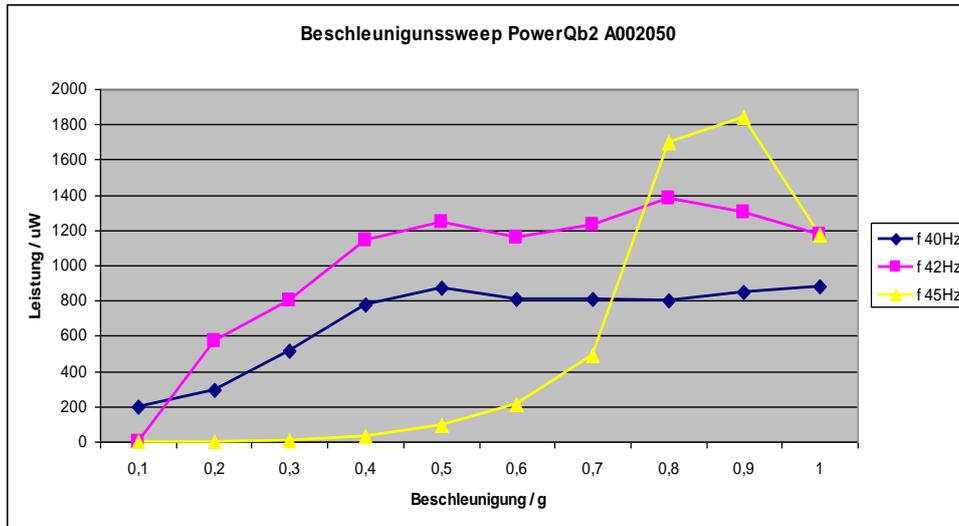


Abb.22 Beschleunigungssweep PowerQb2 A002050

Im Abb.23 ist die Spannungskennlinie der Generator-Ausgänge im Leerlauf dargestellt. Die blaue Kennlinie zeigt die unregulierte Spannung und die rote stellt die geregelte Spannung dar.

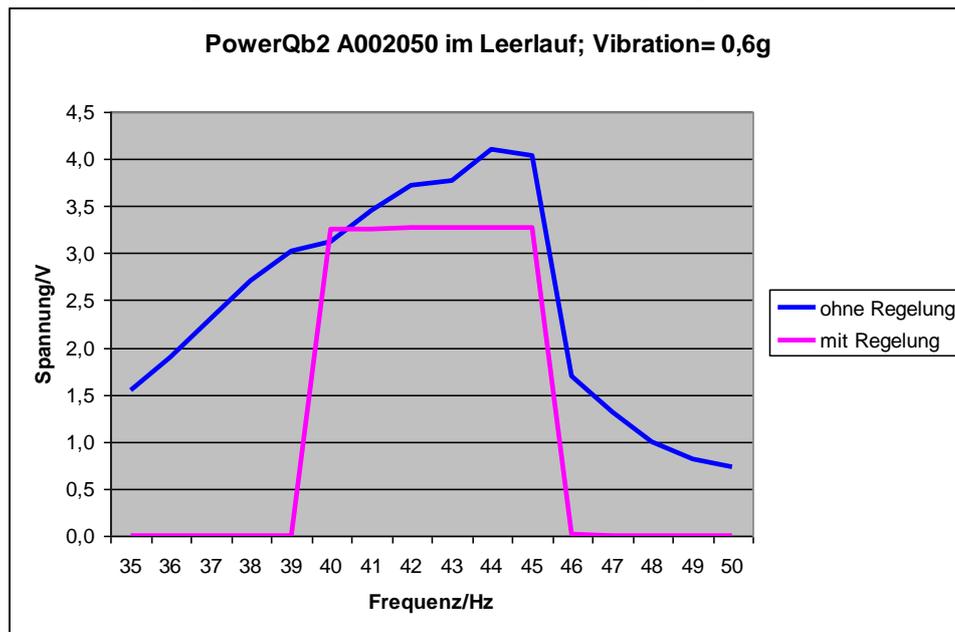


Abb.23 PowerQb2 A002050 im Leerlauf

### 2.2.3.1.5 Fahrzeugsteuergerät / Gateway

Ein Gateway erlaubt es Netzwerken, die auf völlig unterschiedlichen Protokollen basieren, miteinander zu kommunizieren. Das energieautarke Mikrosystem ASYMOF sendet über Funk die Information an den HF-Receiver CC1110. Der HF-Receiver hat eine SPI Schnittstelle und für die weitere Verarbeitung soll das SPI Paket in ein CAN-Objekt konvertiert werden. Das Fahrzeugsteuergerät / Gateway konvertiert das SPI Paket in ein CAN-Objekt. Es wird mit den Entwicklungsboard ChipS12 des Lieferanten „Elektronik Laden“ realisiert. Auf dem Modul ChipS12 kommt eine leistungsstarke freescale MCU vom Typ MC9S12C128 zum Einsatz. Im Fahrzeugsteuergerät ist nur die Konvertierungsrichtung von SPI zur CAN möglich. Der HF-Receiver sendet nur Daten und empfängt

keine, deswegen ist eine Kommunikationsrichtung ausreichend. Bei Bedarfsfall kann man die Konvertierungsrichtung CAN zur SPI hinzufügen, hierfür beinhalten die SPI und CAN Bibliotheken alle relevanten Funktionen. Das Fahrzeugsteuergerät wurde modular programmiert. In Abb.24 erkennt man die Modul Struktur.

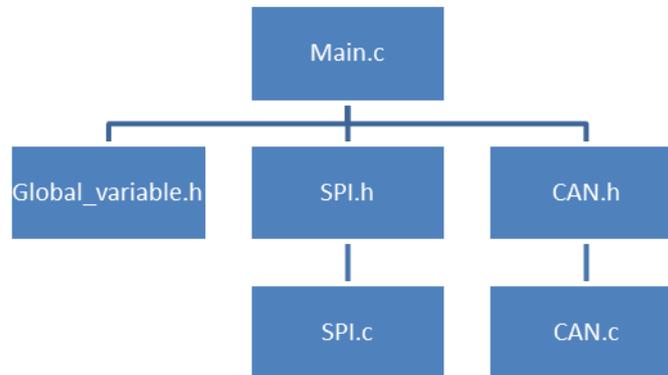


Abb.24 Modul-Überblick

Im Hauptprogramm wird gewartet bis ein SPI-Paket empfangen wird. Falls ein SPI Datenpaket empfangen wurde, werden diese Daten einer CAN Datenstruktur zugewiesen und anschließend an den Computer über den CAN-Bus weitergeleitet.

Der HF-Receiver sendet nur Daten und empfängt keine. Wenn das Fahrzeugsteuergerät ein CAN-Objekt empfängt, wird keine Aktion ausgelöst. Es ist nur die Konvertierungsrichtung von SPI nach CAN möglich. Wenn irgendwann mal die Konvertierungsrichtung von CAN zur SPI benötigt wird, könnte die Funktion sehr einfach upgedatet werden. Die CAN- und SPI-Bibliotheken beinhalten alle notwendigen Funktion für die Konvertierung von CAN zur SPI.

Das Fahrzeugsteuergerät und der HF-Receiver wurden in einem Gehäuse integriert (Abb.25). Im Gehäuse sind folgende drei Bauteile montiert: Fahrzeugsteuergerät, Festspannungsregler (FSR) und HF-Receiver. Das Fahrzeugsteuergerät benötigt eine 5 V Versorgungsspannung und der HF-Receiver eine Spannung von 3,3 V. Damit nur eine Spannungsquelle beiden Bauteile versorgt wird ein Festspannungsregler eingesetzt. Der Festspannungsregler ist ein DC-DC Wandler, der die Spannung von 5 V in 3,3 V umsetzt.

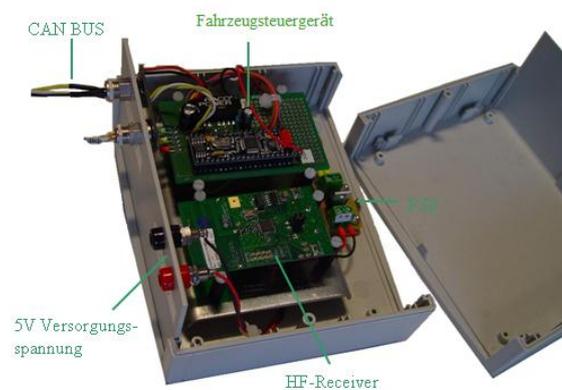


Abb.25 Prototyp Fahrzeugsteuergerät

## 2.2.3.2 Demonstrator

### 2.2.3.2.1 Demonstratoraufbau

Gemäß der Projektplanung hat Projektpartner IMTEK an der Universität Freiburg die Mikro-Energie-Generatoren und die entsprechende Spannung- und Stromregelungsschaltung für die Anwendungen im Projektrahmen als ASIC aufgebaut und Projektpartner HSU-HH hat ein Muster für das Ultra-Low-Power HF-Front System entwickelt. Die erstellten Musterteile für den Demonstrator wurden an Daimler geliefert.

Die Funktionalität der Mikro-Generatoren wurde verifiziert. Die frequenz-resonanten induktiven Mikrogeneratoren liefern a) beim einmaligen Einschlag der Scheibe und b) im kontinuierlichem Modus während der Fahrt zu wenig Energie um ein Funksignal abzusetzen.

Im Projekt wurde daher entschieden, dass die Darstellung des Gesamt-Systems nicht in einem Fahrzeug, sondern als Laboraufbau erfolgen soll. An Stelle der induktiven Mikrogeneratoren soll ein thermoelektrischer Generator (TEG) verwendet werden.

In Abb.26 ist die Topologie des Demonstrators zu erkennen. Die Temperaturdifferenz auf den beiden Seiten des thermoelektrischen Generators wird durch zwei Peltier Elemente erzeugt. Die Energiequellen der Peltier Elemente werden mittels einer Elektronik geregelt, um so die Temperatur-Differenz dem Bedarf anzupassen.

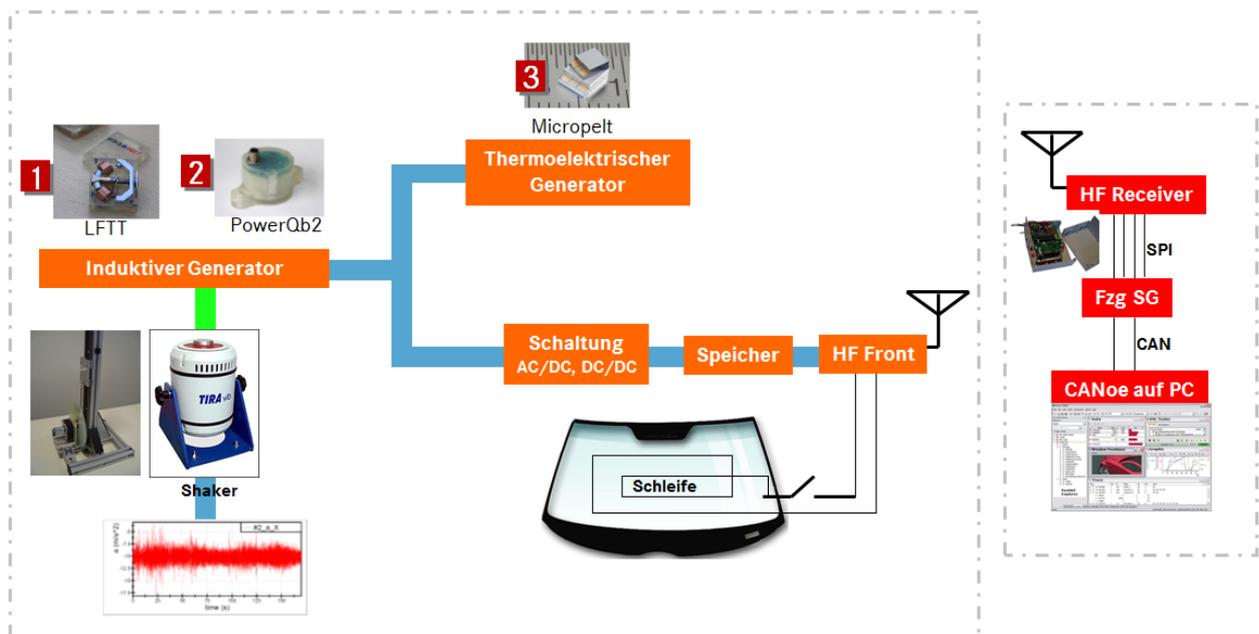


Abb.26 Demonstrator Topologie

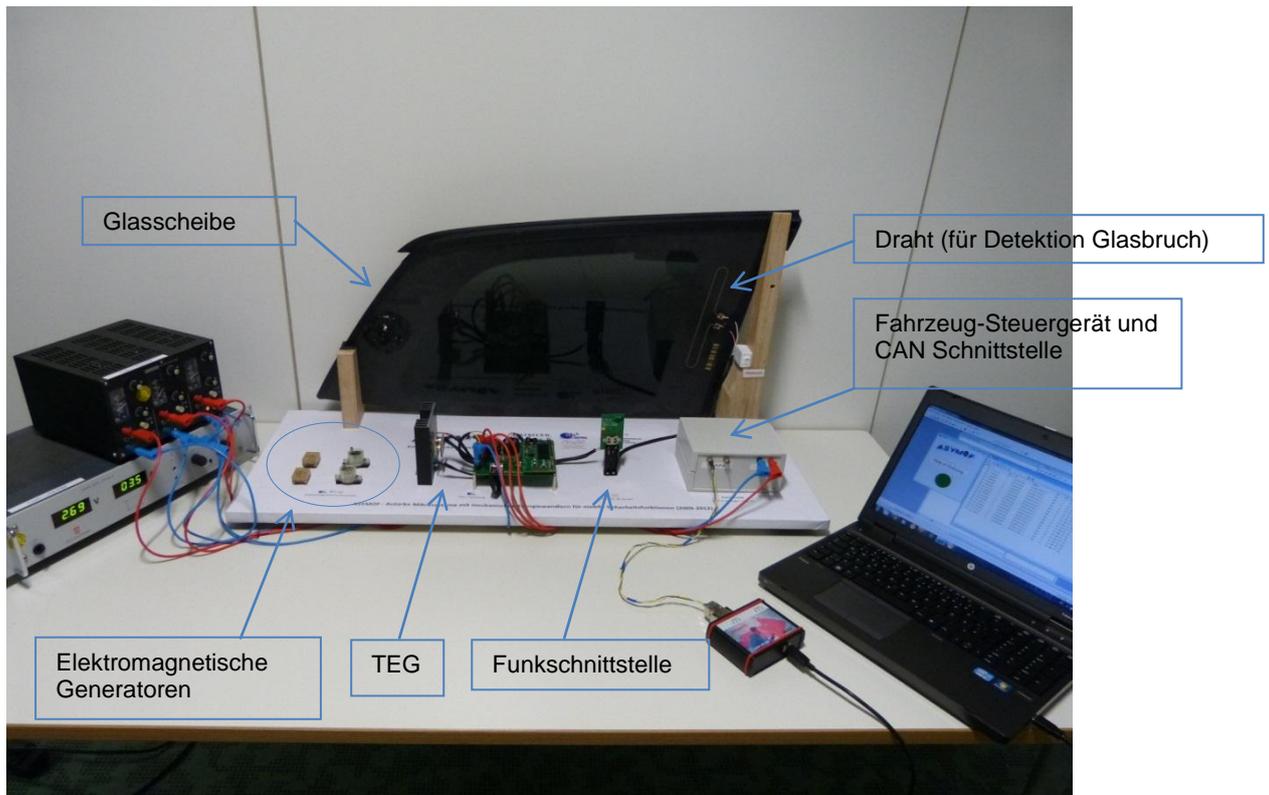


Abb.27 Demonstrator Aufbau

Die Spannung des thermoelektrischen Generators wird anschließend mit einem DC/DC Wandler in ein höheres Spannungsniveau umgewandelt. Mit dieser Gleichspannung wird der Energiespeicher aufgeladen. Als Energiespeicher dient ein Super-Cap Kondensator, der die Versorgungsspannung der HF-Front auf ca. 2,2V bringt. Die Temperaturdifferenz des TEG liegt bei ca. 8 Kelvin. Die HF-Front überprüft mit Hilfe einer Schleife, ob die Glasscheibe zerstört ist, im Demonstrator wird der Zustand der Schleife durch einen Schalter geändert, um so ein Glasbruch Szenario zu simulieren.

Bei einem Glasbruch sendet die HF-Front einen Alarm über Funk an den HF-Receiver. Der HF-Receiver leitet den Alarm über das Fahrzeugsteuergerät an das CANoe Programm weiter um schließlich den Fahrzeugalarm zu signalisieren.

Abb.27 zeigt den Demonstrator Aufbau. Die Glasscheibe ist eine hintere Seitenscheibe, in der eine Signalschleife integriert ist. Die Musterteile sind verkabelt und auf einer Holzplatte montiert.

#### 2.2.3.2.2 Demonstrator Inbetriebnahme

Abb.28 zeigt das TEG Modul.

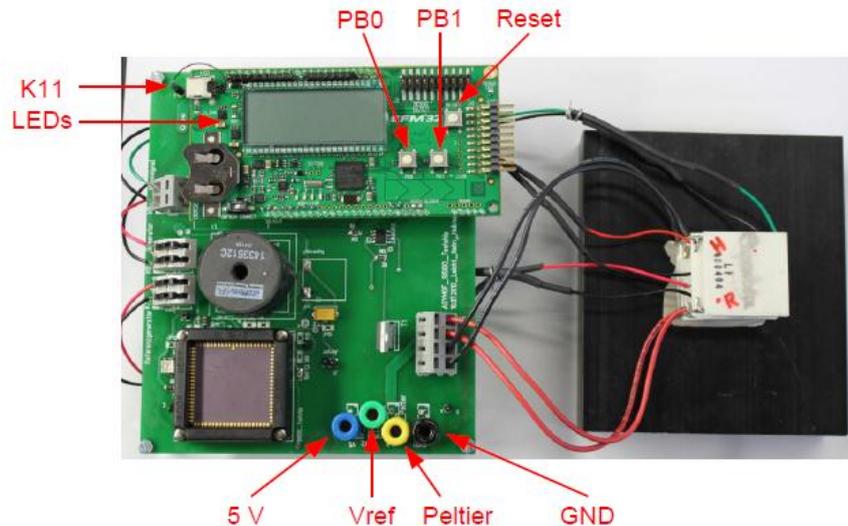


Abb.28 TEG Modul Anschlüsse (Quelle: IMTEK)

Bei der Inbetriebnahme ist folgende Reihenfolge beim Einschalten einzuhalten:

- 5V : Spannungsquelle mit 5V, 100mA Strombegrenzung
- Vref : Spannungsquelle mit 1V, 30mA Strombegrenzung
- Peltier : Spannungsquelle mit 6V, 3,6A Strombegrenzung

Weitere Hinweise zum Betrieb:

- 5V und GND: Spannungsversorgung und GND am Steuergerät
- K11 : Spannungsversorgung Mikrocontroller, muss mit der Platine verbunden sein
- LEDs : LEDs blinken wenn der Mikrocontroller aktiv ist (K11 und 5V angeschlossen)
- PB0 : Soll-Temperaturdifferenz der Regelung um 0.5 K Schritte erhöhen
- PB1 : Soll-Temperaturdifferenz der Regelung um 0.5 K Schritte verringern
- Reset: Reset für Mikrocontroller (nach Reset wird die Soll-Temperatur-Differenz auf 8.0 K eingestellt)
- Es muss der Jumper am Low Power RF Sender nachdem das Demoboard in Betrieb genommen wurde (kurz warten bis das Demoboard die Spannung bereitstellt), auf die Pins 1 und 2 am Jumper P1 gesteckt werden.
- CANoe starten

Weitere Anschlüsse des Demoboards mit dem Funksender und mögliche Messpunkte zeigen Abb.29.

- Das Funkmodul, das den Glasbruch detektiert, wird an die geregelte Ausgangsspannung mit 2,2V und an GND angeschlossen.
- Die LCD-Anzeige zeigt die aktuelle Temperaturdifferenz (Ist-Temperaturdifferenz) an. Diese wird wie folgt dargestellt: 10.00[I]
- Die Soll-Temperaturdifferenz wird nach betätigen des Tasters PB0 oder PB1 sichtbar. Diese wird dann so dargestellt: 10.00[S]

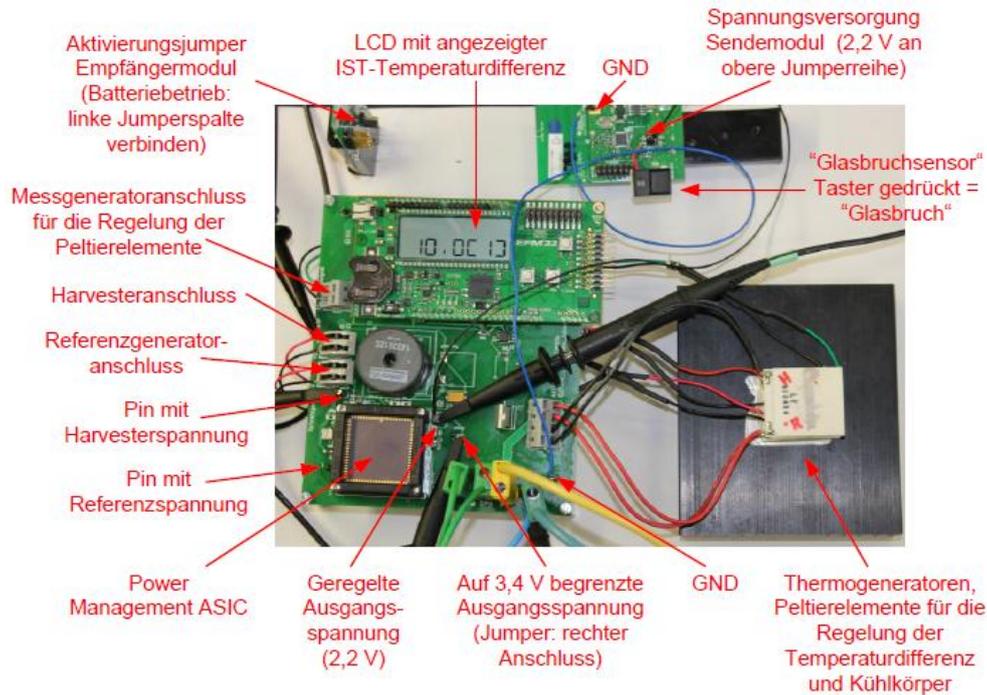


Abb.29 Anschlüssen des TEG Moduls mit Funkmodul (Quelle: IMTEK)

## 2.2.4 Fazit

Im Teilprojekt autarke EDW-Sensorik (Einbruchs- und Diebstahlwarnung) wurden frequenzresonante, induktive Mikrogeneratoren hinsichtlich ihrer Eignung als Generator im Fahrzeug untersucht. Sie lieferten für die Beispielanwendung a) beim einmaligen Einschlag der Scheibe und b) im kontinuierlichem Modus während der Fahrt zu wenig Energie um ein Signal zu erzeugen und über eine Funkstrecke abzusetzen. Deshalb wurde kein Versuchsfahrzeug aufgebaut, sondern an Hand eines Laboraufbaus mit einem thermoelektrischen Generator, der an Stelle der induktiven Generatoren eingesetzt wurde, die Wirkungskette des Systems demonstriert.

### 3 Veröffentlichungen

- [1] I. Kühne, X. Li, T. Hehn, M. Thewes, D. Wagner, Y. Manoli, G. Scholl und A. Frey, Energieautarke Sensorik im Automobil, *VDE/VDI - 6 GMM Energieautarke Sensorik Workshops, Hamburg, 2010*
- [2] X. Li, D. Spreemann, T. Hehn, M. Thewes, I. Kühne, A. Frey, D. Wagner, G. Scholl und Y. Manoli, Energieautarker EDW-Sensor im Fahrzeug, *VDE/VDI Mikrosystemtechnik Kongress, Darmstadt, 2011*
- [3] A. Frey, X. Li, T. Hehn, M. Thewes und I. Kühne, Energieautarke Mikrosysteme für automobiler Anwendungen, *VDE/VDI Mikrosystemtechnik Kongress, Darmstadt, 2011*
- [4] M. Thewes, X. Li und G. Scholl, Wireless Energy Autonomous Sensor Networks for Automobile Safety Systems, *9th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices, 2011*

### 4 Literaturverzeichnis

- [1] B. J. Bowers and D. P. Arnold, "Spherical, rolling magnet generators for passive energy harvesting from human motion", *J. Micromech. Microeng.*, vol. 19, pp. 094008, 2009.
- [2] C.R. Saha, T. O'Donnell, N. Wang, and P. McCloskey, "Electromagnetic generator for harvesting energy from human motion", *Sens. Actuat. A: Physical*, vol. 147, pp. 248-253, 2008.
- [3] D. Spreemann, B. Folkmer, and Y. Manoli, "Comparative Study of Electromagnetic Coupling Architectures for Vibration Energy Harvesting Devices", *Technical Digest PowerMEMS 2008 (Sendai, Japan, 9-12 November 2008)*, pp. 257-260.
- [4] D. Spreemann, A. Willmann, B. Folkmer and Y. Manoli, "Optimization and Comparison of Back Iron Based Coupling Architectures for Electromagnetic Vibration Transducers using Evolution Strategy", *Technical Digest PowerMEMS 2009 (Washington D.C., USA, 1-4 December 2009)*, pp. 372-375.
- [5] J. Leicht, D. Maurath and Y. Manoli, "Autonomous and self-starting efficient micro energy harvesting interface with adaptive MPPT, buffer monitoring, and voltage stabilization", *Proc. IEEE 38th European Solid-State Circuits Conf. (ESSCIRC), Bordeaux, France, 2012*, pp. 101-104.
- [6] T. Hehn, D. Maurath, F. Hagedorn, D. Marinkovic, I. Kuehne, A. Frey, and Y. Manoli, "A fully autonomous pulsed synchronous charge extractor for high-voltage piezoelectric harvesters", *Proc. IEEE 37th European Solid-State Circuits Conf. (ESSCIRC), Helsinki, Finland, 2011*, pp. 371-374.
- [7] T. Hehn, D. Maurath, F. Hagedorn, D. Marinkovic, I. Kuehne, A. Frey, and Y. Manoli, "A Fully Autonomous Integrated Interface Circuit for Piezoelectric Harvesters", *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 47, 2012, pp. 2185-2198

## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart Schlussbericht		
3a. Titel des Berichts Schlussbericht über die erzielten Ergebnisse im Teilvorhaben der Daimler AG des Verbundvorhabens „Autarke Mikrosysteme mit mechanischen Energiewandlern für mobile (Sicherheits-) Funktionen“			
3b. Titel der Publikation			
4a. Autoren des Berichts (Name, Vorname(n)) Li, Xiaoming		5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.07.2012	
		6. Veröffentlichungsdatum	
4b. Autoren der Publikation (Name, Vorname(n))		7. Form der Publikation	
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)  Daimler AG 059-X830 71059 Sindelfingen		9. Ber.Nr. Durchführende Insitution	
		10. Förderkennzeichen *) 16SV3338	
		11a. Seitenzahl Bericht 25	
		11b. Seitenzahl Publikation	
13. Fördernde Institution (Name, Adresse)  Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)  53170 Bonn		12. Literaturangaben	
		14. Tabellen 4	
		15. Abbildungen 29	
16. Zusätzliche Angaben			
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Öffentliches Statusmeeting VDI/VDE/IT am 18.-19.02.2013 Quadriga-Forum, Berlin			
18. Kurzfassung  Im Teilprojekt Energieautarke EDW-Sensorik (Einbruchs- und Diebstahlwarnung) wurden frequenzresonante, induktive Mikrogeneratoren hinsichtlich ihrer Eignung als Generator im Fahrzeug untersucht. Sie lieferten für die Beispielanwendung a) beim einmaligen Einschlag der Scheibe und b) im kontinuierlichem Modus während der Fahrt zu wenig Energie um ein Signal zu erzeugen und über eine Funkstrecke abzusetzen. Deshalb wurde kein Versuchsfahrzeug aufgebaut, sondern an Hand eines Laboraufbaus mit einem thermoelektrischen Generator, der an Stelle der induktiven Generatoren eingesetzt wurde, die Wirkungskette des Systems demonstriert.			
19. Schlagwörter energieautarkes Mikrosystem, frequenzresonante, induktive Mikrogeneratoren			
20. Verlag		21. Preis	

\*) Auf das Förderkennzeichen des BMBF soll auch in der Veröffentlichung hingewiesen werden.

## Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. Type of Report Final Report
3a. Report Title Schlussbericht über die erzielten Ergebnisse im Teilvorhaben der Daimler AG des Verbundvorhabens „Autarke Mikrosysteme mit mechanischen Energiewandlern für mobile (Sicherheits-) Funktionen“	
3b. Title of Publication	
4a. Author(s) of the Report (Family Name, First Name(s)) Li, Xiaoming	5. End of Project 2012-07-31
4b. Author(s) of the Publication (Family Name, First Name(s))	6. Publication Date
8. Performing Organization(s) (Name, Address)  Daimler AG 059-X830 71059 Sindelfingen	7. Form of Publication
13. Sponsoring Agency (Name, Address)  Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)  53170 Bonn	9. Originator's Report No.
	10. Reference No. 16SV3338
	11a. No. of Pages Report 25
	11b. No. of Pages Publication
	12. No. of References
	14. No. of Tables 4
	15. No. of Figures 29
16. Supplementary Notes	
17. Presented at (Title, Place, Date) Public Status Meeting VDI/VDE/IT 2013-02-18 Quadriga-Forum, Berlin	
18. Abstract  In the subproject Energy Autonomous EDW Sensors (Break- and Theft Alarm) the frequency-resonant, inductive micro-generators were investigated for the application in the car. The generators in scenarios a) one impact on the windshield and b) harvest energy continuously during vehicle-driving produce not enough energy to send out an effective radio signal. Therefore no verified prototype-car was built up, but on the laboratory setup with a thermoelectric generator, which replaces the inductive generator, demonstrates the overall system functions.	
19. Keywords energy autonomous microsystem, frequency resonant, inductive micro-generator	
20. Publisher	21. Price