

# Passive MEMS-Sensoren für das Condition Monitoring

Philip Schmitt<sup>1,2</sup>, Martin Hoffmann<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Mikrosystemtechnik

<sup>2</sup>mechIC GmbH, Bochum

[Martin.hoffmann-mst@rub.de](mailto:Martin.hoffmann-mst@rub.de)

## Kurzfassung

Die Überwachung von Zuständen von Bauteilen in komplexen Anlagen ist heute vor allem begrenzt durch den Aufwand, den die Energieversorgung einer lokaler Sensorik verursacht, weil bislang weitgehend elektrische Energie notwendig ist, um Parameter zu messen und zu speichern. Viele Prozesse oder Ereignisse bringen Energie mit, für die Erzeugung elektrischer Energie durch Harvesting reicht es oft aber nicht. Hier können mikromechanische Sensoren, die vollständig passiv Ereignisse in unterschiedlichen Domänen (thermisch, mechanisch, elektrische oder magnetische Felder) bewerten und speichern und die Information in einer später digital abrufen Form abspeichern, eine Alternative sein. Einige Konzepte hierzu werden vorgestellt.

## Abstract

The surveillance of complex systems is mainly limited by the energy supply. In almost all cases electrical energy is required for measuring and storage of data. While many processes inherently contain energy, energy harvesting is nonetheless still challenging. MEMS-bases fully passive sensor can record events in many domains (thermal, mechanical, electric or magnetic fields) and store the information in a digital format mechanically. Some concepts are reported here.

## 1 Die Idee passiver Sensoren

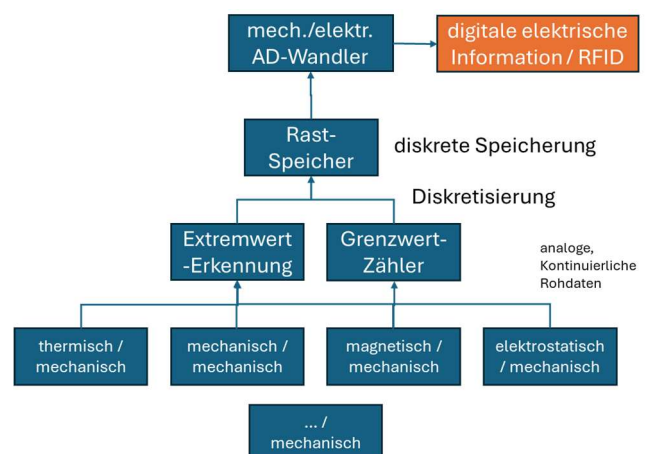
Die vorbeugende Instandhaltung profitiert von der frühzeitigen Information über entweder langsam ablaufende Alterungen oder über ungewöhnliche Belastungen im Alltagsbetrieb. Beide Informationen können mit Sensoren aus dem laufende Betrieb gewonnen werden. Allerdings fallen dabei große Datenmengen an, die keine Information enthalten, und die Extraktion relevanter Information erfordert permanent Energie.

Energy Harvesting aus der Umwelt für diese Hilfsenergie gelingt nur in manchen Fällen, während mit elektrisch vollständig passive Sensoren unter Nutzung der Mikromechanik eine Klasse neuer Sensorsysteme für die Maschinenüberwachung möglich wird: Sie misst, bewertet und speichert kontinuierlich und mechanisch, stellt das Ergebnis aber in digitaler elektrischer Form bereit, z.B. zur Auslesung mittels RFID Readern / Smartphones [1, 2].

## 2 Systemkonzept

In den letzten Jahren ist eine Toolbox entstanden, die durch Kombination einfacher MEMS Sensorknoten ermöglicht, die wahlweise Extremwerte erfassen oder die Anzahl von Grenzwert-Überschreitungen zählen. Das Kernstück dieser Sensorknoten ist ein mikromechanischer AD-Wandler, der die Verschiebung eines Balkens in einen binären Code überträgt und dessen Abtastung mittels einfacher Kontakte ermöglicht. Er ist verbunden mit einem Rast-Speicher, der primäre analoge Signale in diskrete Rastzustände übersetzt. Dies kann der jeweils größte / kleinste Wert einer Amplitude sein oder die inkrementelle Erhöhung eines

Zählers, wenn ein Grenzwert überschritten wird. Die Energie, die für den Speichervorgang benötigt wird, stammt aus der zu messenden, meist nicht-elektrischen Größe; elektrische Hilfsenergie im Sensor wird für all diese Vorgänge nicht benötigt. Ein wichtiges mechanisches Element in dieser Kette ist ein Hebelsystem zur „Impedanzanpassung“: der Speicher braucht einen minimalen Weg und eine minimale Kraft, um die Rasten zu schalten. Meist reicht die Energie, aber das Verhältnis aus Weg und Kraft passt nicht. Hier erlaubt der Hebel eine effiziente Anpassung.



**Bild 1** Systemkonzept eines passiven Sensorknotens mit den Hierarchie-Ebenen vom primären analogen Messwert zur diskreten, gespeicherten Information. Oben links: realisiertes RFID-Sensortag mit Stoßsensor



**Bild 2** realisiertes RFID-Sensortag mit Stoßsensor

### 3 Mikromechanische Komponenten

Zur Realisierung einer mechanischen Messkette werden mechanische Komponenten benötigt, die Funktionen wie Verstärkung, Datenselektion, Speicherung und Digitalisierung ermöglichen. In diesem Zusammenhang dient die Kraft als Analogie zum elektrischen Strom, die statische Verschiebung entspricht dem elektrischen Potential.

#### 3.1 Energiequelle

Innerhalb der mechanischen Messkette kann die erforderliche Energie direkt aus der Messgröße entnommen und in mechanische Energie, also das Produkt aus Kraft und Weg, umgewandelt werden. Ein typischer MEMS-Energiewandler kann daher als lineare Kraftquelle betrachtet werden. Analog zu einer Stromquelle liefert die mechanische Quelle eine maximale Kraft, die von der angeschlossenen Last abhängt und durch die interne mechanische Impedanz begrenzt wird, welche im statischen Fall durch die interne Steifigkeit beschrieben wird. Ein mechanischer Kurzschluss der Quelle würde somit zu einer maximalen Auslenkung führen, die durch die interne Steifigkeit begrenzt ist.

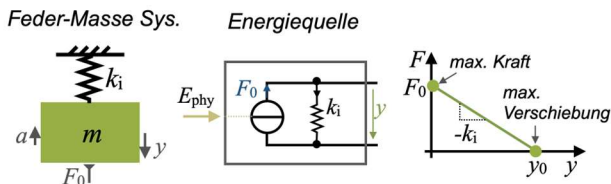


Bild 3 MEMS-Energiewandler als Quelle

Die folgende Tabelle 1 zeigt einige Beispiele für Energiewandler, die als äquivalente Quelle betrachtet werden können.

Tabelle 1: Energiewandler Übersicht

MEMS-Energiewandler	max. Kraft $F_0$	max. Verschiebung $y_0$	inter. Steifig. $k_i$
<p>Thermisch</p>	$A E \alpha_{th} \Delta T$	$L \cdot \alpha_{th} \Delta T$	$\frac{AE}{L}$
<p>Inertial</p>	$m a$	$\frac{1}{k_i} m a$	$k_i$
<p>Elektrostatisch</p>	$\epsilon_0 \frac{n b}{d} U^2$	$\frac{1}{k_i} \epsilon_0 \frac{n b}{d} U^2$	$k_i$

Auch indirekte MEMS-Energiewandler können mechanische Energie liefern. So ist etwa die Messung von Magnetfeldern oder elektrischer Ströme mit Hilfe von in Silicium integrierter Mikromagnete möglich. Hierzu lassen sich wie

in [6] gezeigt, Mikromagnete in Pulverform direkt in SOI-MEMS integrieren. Abb. 4 zeigt den konzeptionellen Ansatz. Während die Messergebnisse in Abbildung 5 zeigen, dass mittels der integrierten Magnete hohe Kräfte und Verschiebungen für MEMS-Anwendungen generierbar sind.

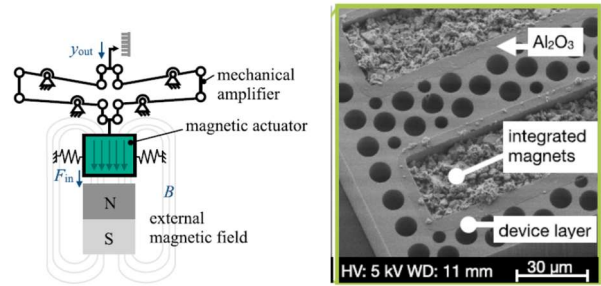


Bild 4 Magnetfeld-Sensor: Konzept u. Realisierung [5]

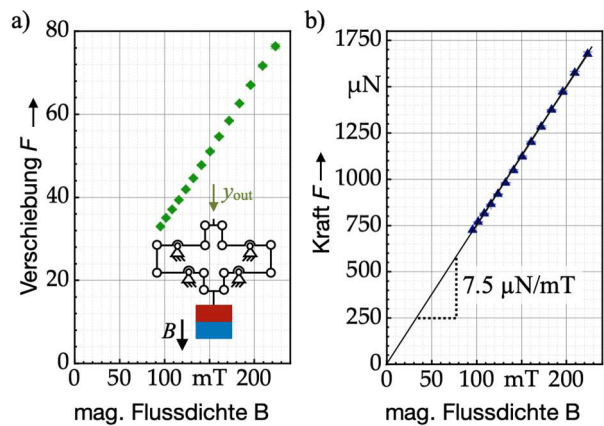


Bild 5 Exemplarische Messung der generierten Kraft und Verschiebung in Abhängigkeit der Flussdichte an einem MEMS-Magnetfeld Wandler

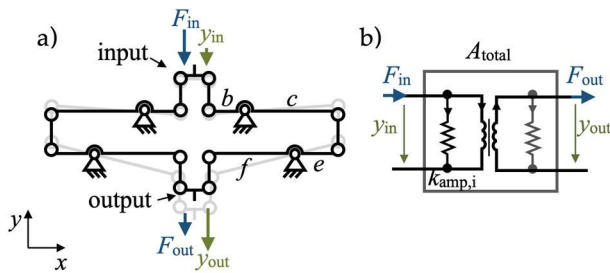
#### 3.2 Transformatoren

Abhängig vom verwendeten Wandler und dessen interner Steifigkeit wird das primäre physikalische Signal entweder in eine große Kraft bei kleiner Auslenkung oder umgekehrt in eine große Auslenkung bei kleiner Kraft umgesetzt. Analog zu elektrischen Netzwerken, in denen Spannungen gegenüber Strömen häufig die bevorzugten primären Analogsignale darstellen, ist in mechanischen Netzwerken die Verarbeitung von Verschiebungen meist praktikabler als die Verarbeitung von Kräften. Daher werden Kräfte mithilfe eines hebelbasierten mechanischen Transformator in Verschiebungen umgewandelt; dieser wirkt hier als mechanischer Impedanzwandler.

Das Funktionsprinzip sowie der zugehörige Vierpol sind in Abb. 4 dargestellt. Das Verstärkungsverhältnis ist definiert als Verhältnis der Ausgangsverschiebung zur Eingangsverschiebung. Durch geeignete Auslegung der Hebelsegmentlängen (vgl. Abb. 4) ergibt sich näherungsweise

$$A_{total} = \frac{y_{out}}{y_{in}} = \frac{F_{in}}{F_{out}} \approx \frac{c f}{b e} \quad (1)$$

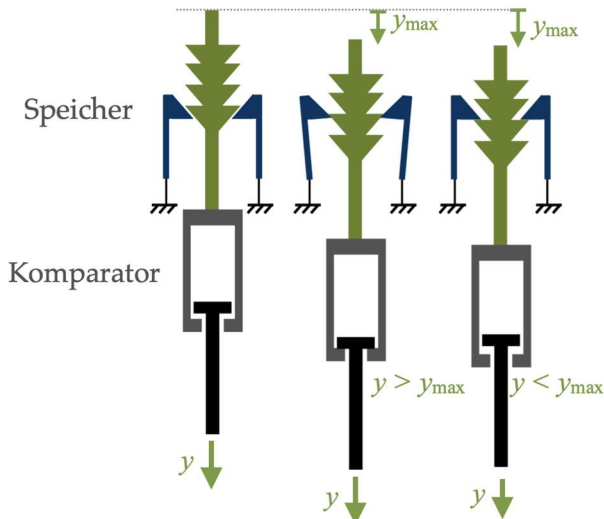
Es konnten bisher konstante Verstärkungsfaktoren von bis zu etwa 200 realisiert werden [3].



**Bild 6** a) Mechanischer Transformator und b) Vierpol-Ersetzschaltbild

### 3.3 Speicher

Um ausgewählte Grenzwerte zu speichern, erfordert es einen mikromechanischen Speicher, der etwa den erreichten Maximalwert fixiert. Rastzahnspeicher eignen sich hierfür besonders gut. Ein Verschiebungssignal, das vom Transformator bereitgestellt wird, soll über Rastzähne fixiert werden. Jedoch besteht die Herausforderung darin, dass die Fixierung des Läufers keinen Einfluss auf die folgenden Messungen haben soll. Von daher eignet sich die Entkopplung zwischen Transformator und Speicher über eine Kupplung. Dies entspricht dabei etwa der Funktion einer Diode, Verschiebungen werden nur in eine Richtung zugelassen. Die Kombination aus Kupplung und Speicher, wie in Abb. 7 gezeigt, ermöglicht es, dass jeweils nur der nächste größere Maximalwert gespeichert wird.

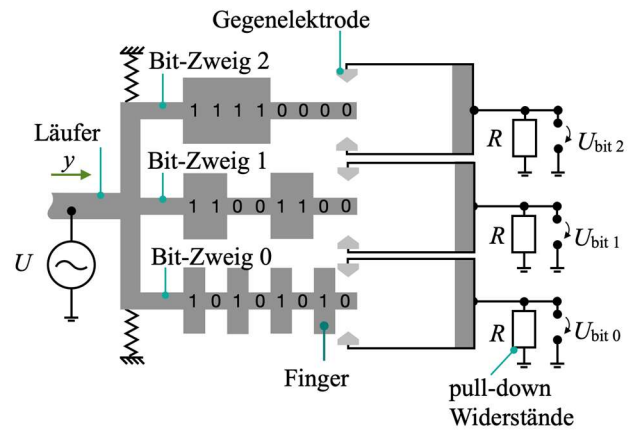


**Bild 7** Maximalwertspeicher

### 3.4 Analog-Digital Wandler

Um den mechanischen Speicherzustand digital auszulesen, wird ein mechanischer A/D-Wandler (mechADC) verwendet. Der mechADC arbeitet als Positionsenocoder, der die

gespeicherte Verschiebung aus dem mechanischen Speicher in einen binären Dual- oder Gray-Code umwandelt. Der Encoder umfasst parallele Bit-Zweige mit Fingerelektroden, die den Binärcode geometrisch festlegen. Diese Bit-Zweige sind mit dem Speicherausgang verbunden und können in y-Richtung verschoben werden. Gegenelektroden, die fest am Rahmen angebracht sind, werden parallel zu den beweglichen Bit-Zweigen angeordnet, sodass sie beim Verschieben Kontakt mit den Fingerelektroden herstellen. Finger- und Gegenelektroden wirken zusammen als elektrische Schalter und ermöglichen eine binäre Positionskodierung.



**Bild 8** Prinzip des mechanischen A/D Wandlers

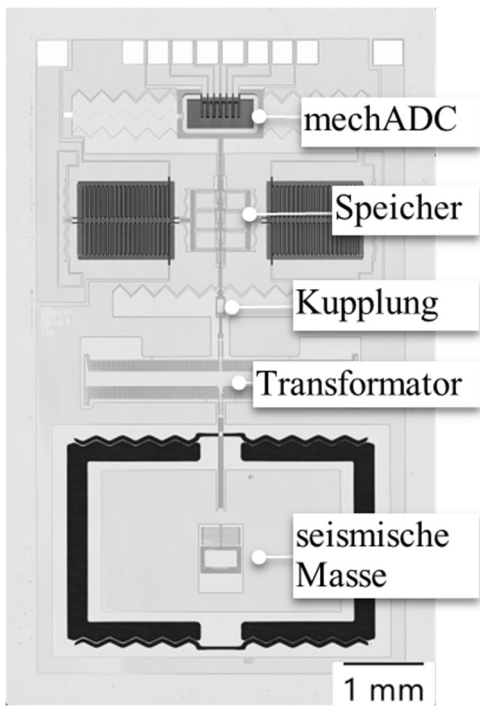
## 4 Beispiele für realisierte Systeme

### 4.1 Kraft- bzw. Stoßsensor

Die einfachste Grundkonfiguration ist eine federgelagerte Masse, die bei einer Einwirkung einer Beschleunigung oder eines Stoßes über eine Kupplung die maximale Auslenkung entsprechend der maximal erzeugten Kraft auf den Rastmechanismus überträgt: ist die aktuelle Kraft größer als ein zuvor erreichter Wert, wird der Rastmechanismus weiter ausgelenkt und der neue Wert wird festgehalten [4]. Von großer Bedeutung ist hier eine hochselektive Lagerung der Masse, so dass die Messung nur in der gewünschten Richtung erfolgt. Zu diesem Zweck wurden hochselektive Federmechanismen entworfen, deren Kennlinie in einem weiten Bereich einstellbar ist.

### 4.2 Rücksetzbare Sensoren

Da mechanische Rastmechanismen nur in eine Richtung Vorgänge erfassen, nach z. B. einem Auslesen im Rahmen einer Inspektion aber der Sensor auch rücksetzbar sein soll, können elektrostatische Aktoren integriert werden, die mittels RFID-Befehl den Rastmechanismus kurzzeitig lösen und damit die gespeicherten Werte löschen. Die notwendige Spannung kann problemlos aus der Reader-Feldenergie gewonnen werden. Die Zuverlässigkeit der Rastmechanismen wie der AD-Wandler wurde bislang bereits für viele tausend Schaltzyklen erprobt. [1, 2]



**Bild 9** Stoß-/Kraftsensor mit Hebelmechanismus und mikromechanischem digitalem Encoder sowie elektrostatischem Aktor für das Rücksetzen

- [4] P. Schmitt, M. Hoffmann, A passive acceleration sensor with mechanical 6 bit memory and mechanical analog-to-digital converter, *Micro and Nano Engineering*, 2022, 100142, DOI: [10.1016/j.mne.2022.100142](https://doi.org/10.1016/j.mne.2022.100142).
- [5] P. Schmitt, M. Hoffmann, Direct Binary Encoding of Displacements on the Nano-Scale, 2020 IEEE 33rd Int. Conf. on Micro Electro Mechanical Systems, DOI: 10.1109/MEMS46641.2020.9056116.
- [6] P.Schmitt, B. Gojdka, T. Lisek, M. Kroll, M.Hoffmann: SOI Integrated Micromagnets for mechanical Magnetic Field Detection *IEEE Sensors Letters*, 2023 DOI: 10.1109/LSENS.2023.3308125.

Diese Forschungsarbeiten wurden vom BMBF im Rahmen des ForMikro-Projektes UpFUSE gefördert.

## 5 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wird eine Toolbox für die vorbeugende Instandhaltung vorgestellt. Basierend auf den hier gezeigten Ideen hat sich das Start-Up mechIC (mechIC.de) ausgegründet, das ein erstes Sensorkonzept derzeit für die kommerzielle Nutzung umsetzt.

In der Zukunft ist geplant, die Toolbox um weitere Elemente zu erweitern und gemeinsam mit Nutzern konkrete Anwendungsszenarien zu erschließen. Die dafür notwendige Basistechnologie entspricht der für heute in Großserie verwendete MEMS-Sensoren und die Kopplung kann an bereits verfügbare RFID-Sensoren erfolgen.

## 6 Literatur

- [1] M. Hoffmann, et al., Storing MEMS Interfaces Without Electrical Auxiliary Energy for Long-Time Monitoring, 2023 IEEE 36th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), pp. 522-525 DOI: [10.1109/MEMS49605.2023.10052634](https://doi.org/10.1109/MEMS49605.2023.10052634)
- [2] P. Schmitt, M. Hoffmann, Sensors at the Edge: Towards Micromechanical in-Memory Computing, 2023 IEEE International Conference on Omni-layer Intelligent Systems (COINS), Berlin, Germany, 2023, pp. 1-5, DOI: 10.1109/COINS57856.2023.10189322
- [3] P. Schmitt, M. Hoffmann, Engineering a compliant mechanical amplifier for MEMS-Sensor Applications, *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2020. 29(2): S. 214-227 DOI: 10.1109/JMEMS.2020.2965260