

Strukturmonitoring mit passivem RFID-Dehnungssensor: Flexible Lösung für Industrie und Infrastruktur

*Thomas Frank¹, Stefan Hermann¹, André Grün¹, Manuel Kermann¹, Michael Hintz¹, Andrea Cyriax¹,
Klaus Ettrich¹, Peter Peitsch², Reinhard Jurisch², Sebastian Kahl²*

*¹CiS Forschungsinstitut für Mikrosensorik GmbH, Konrad-Zuse-Straße 14, 99099 Erfurt, Germany,
tfrank@cismst.de*

²Micro-Sensys GmbH, In der Hochstedter Ecke 2, 99098 Erfurt, Germany

Zusammenfassung

Die Zustandsüberwachung von Bauwerken und Anlagen erfordert zuverlässige Systeme zur Früherkennung struktureller Veränderungen. Der vorgestellte passive RFID-Dehnungssensor kombiniert hochempfindliche Silizium-Dehnungsmessstreifen (Si-DMS) mit einer Wheatstone'schen Messbrücke, einen Temperatursensor zur Kompensation sowie drahtlose Energieversorgung und Datenübertragung. Das System wird direkt auf Bauwerke montiert und ermöglicht kontaktlose Messungen ohne Batterie oder Verkabelung. Die Kalibrierung erfolgt mittels FEM-Simulation und experimenteller Prüfstandversuche. Die erreichte Empfindlichkeit beträgt $90 \mu\text{V}/(\text{V}\mu\epsilon)$. Die digitale Auflösung beträgt über 13 Bit. Derzeit ist noch eine Einzelkalibrierung erforderlich; angestrebt wird eine Messspannenvarianz von $\pm 1\%$ innerhalb einer Charge. Das wartungsarme System eignet sich besonders für vorausschauende Instandhaltung und Langzeitmonitoring schwer zugänglicher Strukturen.

Keywords: Strukturmonitoring, Dehnungssensor, RFID/NFC-Transponder, Si-DMS, Temperaturkompensation.

Einleitung

Die Zustandsüberwachung von Bauwerken, Maschinen und Anlagen ist ein wesentlicher Bestandteil moderner Instandhaltungs- und Sicherheitskonzepte. In Industrie und kritischer Infrastruktur steigt der Bedarf an zuverlässigen Verfahren, mit denen sich strukturelle Veränderungen frühzeitig erkennen lassen, bevor es zu Funktionsstörungen, Schäden oder ungeplanten Ausfällen kommt. Besonders bei tragenden Bauteilen ist es wichtig, mechanische Belastungen, Dehnungen und mögliche Veränderungen des Tragverhaltens kontinuierlich oder zumindest in definierten Intervallen zu erfassen. Auf diese Weise können Instandhaltungsmaßnahmen gezielt geplant und Risiken für Betrieb und Sicherheit reduziert werden.

Ein zentrales Ziel der Strukturüberwachung besteht darin, nicht nur offensichtliche Schäden wie Risse oder Brüche zu detektieren, sondern auch frühzeitige Vorstufen wie plastische Verformungen, lokale Überlastungen oder schleichende Materialermüdung zu erkennen. Gerade bei komplexen Bauwerken oder schwer zugänglichen Anlagen ist dies mit herkömmlichen visuellen Inspektionen nur

eingeschränkt möglich. Messbasierte Verfahren bieten hier einen entscheidenden Vorteil, da sie objektive und reproduzierbare Daten liefern und Entwicklungen über längere Zeiträume dokumentieren können.

Vor diesem Hintergrund gewinnen drahtlose Sensorsysteme zunehmend an Bedeutung. Sie ermöglichen eine direkte Erfassung mechanischer Größen an den relevanten Belastungspunkten, ohne dass aufwendige Verkabelungen oder regelmäßige manuelle Eingriffe erforderlich sind. Dies ist insbesondere dort von Vorteil, wo Nachrüstungen schwierig, Wartungszyklen teuer oder Umgebungsbedingungen rau sind. Ein robustes, wartungsarmes System zur Dehnungsmessung kann daher einen wichtigen Beitrag zur vorausschauenden Instandhaltung leisten und die Lebensdauer von Bauwerken und Anlagen verlängern.

Die in diesem Artikel beschriebene Lösung basiert auf einem passiven, drahtlos auslesbaren Sensorsystem mit integrierter Dehnungsmessung. Es kombiniert die Vorteile einer präzisen mechanischen Messung mit einer kompakten, energieautarken und für den industriellen Einsatz geeigneten Transpondertechnik. Dadurch entsteht ein Ansatz, der sowohl für

die einmalige Zustandsbewertung als auch für das periodische Langzeitmonitoring genutzt werden kann.

Systemdesign

Das beschriebene Sensorsystem kombiniert die Vorteile objektiver Messdaten mit einer flexiblen und wartungsarmen drahtlosen Technik. Im Mittelpunkt stehen hochempfindliche Silizium-DMS-Dehnungssensoren (Si-DMS), die auf einem passiven, hermetisch verkapselten RFID/NFC-Transponder kombiniert sind. Der Transponder enthält neben dem piezoresistiven Sensor und Speicher für Mess- und Kalibrierdaten auch einen Temperatursensor zur Kompensation von Umgebungseinflüssen. Die Energie erhält die Messeinheit ausschließlich drahtlos vom Lesegerät; eine Batterie ist nicht notwendig.

Der Transponder wird direkt am Bauwerk installiert und kann durch Punktschweißen oder Kleben befestigt werden. Dadurch ist der Einbau einfach und auch bei schwer zugänglichen Konstruktionen möglich. Während der Inspektion liest das Lesegerät die gespeicherten Daten kontaktlos aus. Alternativ kann das System auch für periodisches Langzeitmonitoring eingesetzt werden.

Mechanische Struktur

Die mechanische Struktur des Sensors basiert auf einem Si-DMS, der als hochempfindliches Messelement in den mechanischen Aufbau integriert ist. Entscheidend ist dabei, dass die Dehnung der Trägerstruktur möglichst verlustarm auf den Sensor übertragen wird, damit ein reproduzierbares und empfindliches Messsignal entsteht. Die mechanische Kopplung zwischen Bauwerk, Montageträger und Si-DMS bestimmt wesentlich die Qualität der Messung. Die Si-DMS ermöglicht den Aufbau neuer leistungsfähigerer Messsysteme. Der Si-DMS beinhaltet 4 zu einer Wheatstone'schen Messbrücke kombinierte Messwiderstände. Dies hat den Vorteil, dass Störeinflüsse, die auf alle vier Messwiderstände gleichermaßen wirken, das Messergebnis nicht verfälschen. Voraussetzung dafür sind eine symmetrische Brückenschaltung sowie eine identische Einwirkung äußerer Einflüsse auf alle Messwiderstände.

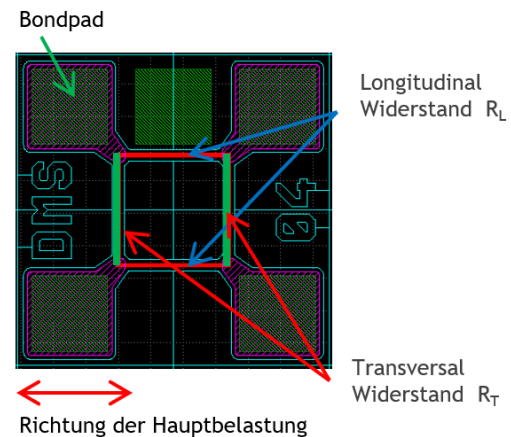


Abb. 1: Vollbrücke auf dem Si-DMS-Chip

In der Abb. 1 ist das Layout des Si-DMS mit integrierter Vollbrücke dargestellt. Basis ist n-Silizium mit implantierten Messwiderständen aus p-Silizium. Bei der dargestellten Hauptbelastung werden die roten Messwiderstände longitudinal und die grünen transversal belastet. Die Abb. 2 zeigt die resultierende Schaltung.

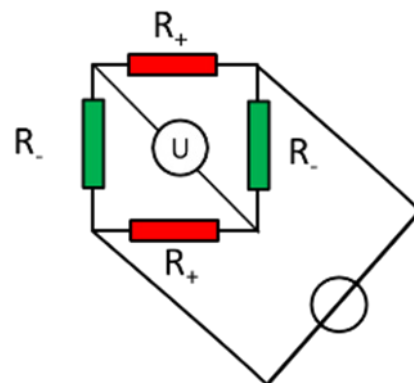
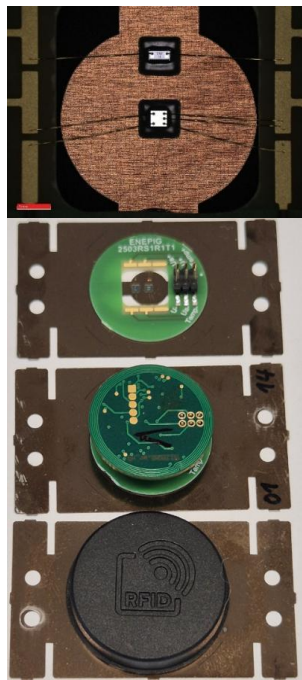


Abb. 2: Wheatstone'sche Messbrücke

Der Si-DMS ist auf einem Montageträger befestigt, der die auftretende Dehnung aufnimmt und an das Sensorelement weitergibt. Für das Fügen des Si-DMS wird eine Glasfritte verwendet, eine stabile Verbindungsart für dauerhafte und mechanisch belastbare Verbindung. In der Abb. 3 ist der Aufbau des Sensor-TAGs dargestellt. Die thermische Dehnung des Montageträgers ist an den Werkstoff des Bauelementes angepasst, Federstahl 1.4310, bzw. C-Stahl 1.1274.



Dehnungssensor, Si-DMS Träger: Si-DMS, Temperaturdiode auf einem flachen Stahlträger, Detail

Dehnungssensor, Si-DMS Träger mit Kontakt-PCB

RFID-Frontend Modul: HF- RFID- Frontend, Antenne, einen Mikrocontroller (μC), Powermanagement, und einer Messelektronik inkl. High End ADC

Si-DMS Sensormodul mit Gehäuse zum Einsatz am Bauwerk

Abb. 3: Aufbau des Sensor-TAGs

Kalibrierung des Sensor-TAGs

Die Abb. 4 zeigt den verwendeten Montageträger mit dem Si-DMS. Die Bohrungen sind die Kraftangriffspunkte für den Zugversuch in der Prüfmaschine.

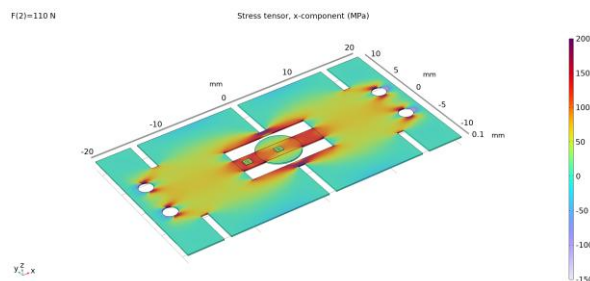


Abb. 4: FEM-Simulation des Montageträger mit gefügtem Si-DMS. Messkraft 10 N und 110 N
Signal Si-DMS = 40 mV/V
Dehnung = 455 $\mu\epsilon$
Stress σ_x = 92 MPa

In der Mitte des Montageträgers sind der Si-DMS und ein Temperatursensor platziert. Optional kann der Träger in der Mitte mit einem Steg versehen werden. Der Steg dient zur mechanischen Entkopplung von Längs- und Querdehnung. Er stellt sicher, dass vorwiegend die Dehnung in Hauptbelastungsrichtung auf den Si-DMS übertragen wird, während Querdehnungseffekte (Poisson-Effekt) unterdrückt werden. Dies erhöht die Messgenauigkeit bei einachsiger Belastung und reduziert Querempfindlichkeiten.

Aus der Simulation geht die Dehnung bei gegebener Belastung hervor. Diese Belastung, die zugehörige Dehnung und das Signal des Si-DMS werden für die Kalibrierung verwendet. Anschließend wird der Sensor-TAG auf einen Testkörper gefügt, um die Dehnungsübertragung vom Bauwerk auf den Sensor zu validieren. Es wird davon ausgegangen, dass die Dehnung vom Testkörper nur mit geringen Verlusten auf den Sensor-TAG übertragen wird. Zum Nachweis wird die FEM-Simulation in der Abb. 5 herangezogen.

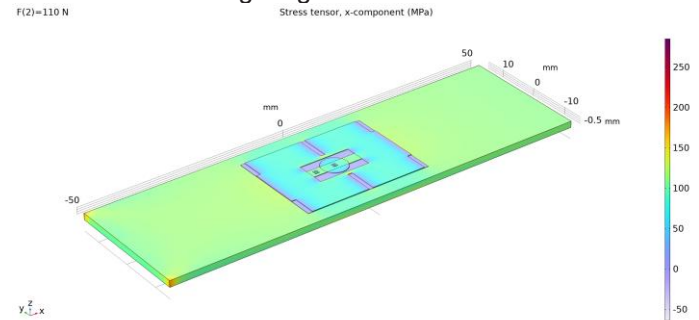


Abb. 5: Montageträger gefügt mit Epoxyklebstoff auf den Testkörper, Signal = 41 mV/V
Dehnung = 471 $\mu\epsilon$
Stress σ_x = 92 MPa

Vor dem Fügen wurden die Anschlussbohrungen für den Kraftangriff gekappt. Die Belastung wird so gewählt, dass der Stress an der betreffenden Stelle, Position des Si-DMS, des ungefügten Montageträgers gleich dem Stress im Testkörper ist.

Die Simulation zeigt, dass die Dehnung und das Signal vergleichbar sind. Dies ermöglicht die Aufnahme der Kraft-Signalkennlinie am Sensor-TAG und die Übertragung auf das zu untersuchende Bauwerk.

Evaluierung des Systems

Zur Evaluierung wurden zu Beginn die Montageträger analog zu Abb. 4 geprüft.

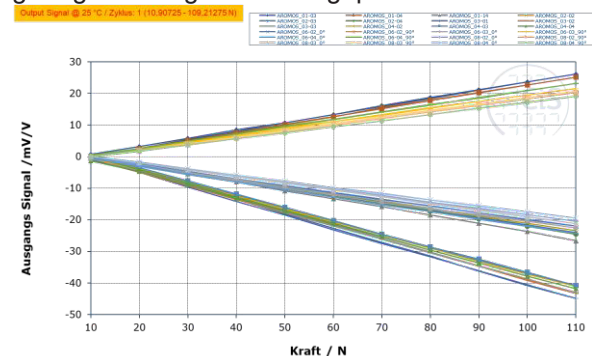


Abb. 6: Kraft-Signalkennlinie 3 verschiedener Sensor-TAGs

In der Abb. 6 sind die Kraft- Signalkennlinien 3 verschiedener Sensor-TAGs dargestellt. Die Streuung der verschiedenen Sensor-TAGs erfordert zurzeit noch eine Einzelkalibrierung. Angestrebt wird eine Variation der Messspanne von $\pm 1\%$ über die gesamte Charge, damit kann auf eine 100% Kalibrierung verzichtet werden.

Aus der Messung wird die Sensitivität S_0 der Sensor-TAGs bestimmt. Anschließend werden die Träger auf die Testkörper gefügt. Die Verfahren sind Verschraubung über die Kraftanriffspunkte, Kleben und Punktschweißen.

In diesem Zustand wird zuerst die Temperaturabhängigkeit des Nullpunktes, TKN, bestimmt, der TKN beträgt im Mittel:

- $TKN=50 \mu V/(V \cdot K)$

Die Ursache für die Temperaturabhängigkeit des Nullpunktes ist der Materialmix des Aufbaus am Bauwerk infolge der verschiedenen CTE (Coefficient of Thermal Expansion, Wärmeausdehnungskoeffizienten) der Materialien und diese Wirkung auf den Si-DMS.

Anschließend werden die Testkörper analog zu Abb. 5 geprüft. Das Klebeverfahren erreichte die beste Übereinstimmung der Dehnung im Montageträger zu der Dehnung im Testkörper. Weitere Tests wurden mit dem Klebeverfahren durchgeführt.

Für den Prototypen sind die Werte für die Kalibrierung:

- Empfindlichkeit $S_0 = 90 \mu V/(V \cdot \mu\epsilon)$ bezogen auf Stahl
- $TKN=50 \mu V/(V \cdot K)$

Um die mechanischen Spannungen durch die Montage zu kompensieren wird nach der Montage, bei Start der Messung der Signalwert

- Sig_0 =Signal bei Start der Messung und für die Temperaturkompensation die Starttemperatur t_{Start} gespeichert

- t_{Start} = Temperatur bei Start der Messung

Berechnung der Temperaturkorrektur und des Messwertes:

- $Sig_{Korr} = (t_{Start} - t_{ist}) \cdot TKN$
- $Messwert = (Sig_{ist} - Sig_{Korr} - Sig_0) \cdot S_0$

Signalverarbeitung

Die Elektronikinheit besteht aus einem ADU mit Verstärker, einem Mikrocontroller, einem EEPROM dem RFID-Frontend sowie der RFID-Antenne, vgl. Abb. 7. Mittels dieser Komponenten werden die Sensoren angesteuert und die analogen Signale des Si-DMS und des Temperatursensors ausgelesen. Die Digitale Auflösung ist besser als 13 Bit. Die Reichweite beträgt maximal 50 mm. Zur Evaluierung wurden die Aufbauten mit einer Prüf-

maschine belastet und das Signal des Sensor-TAGs gemessen.

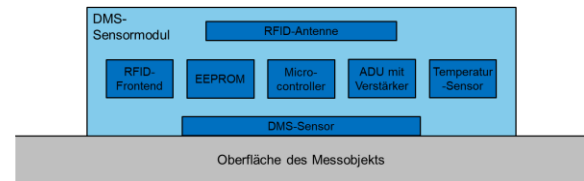


Abb. 7: Blockschaltbild des Sensorsystems

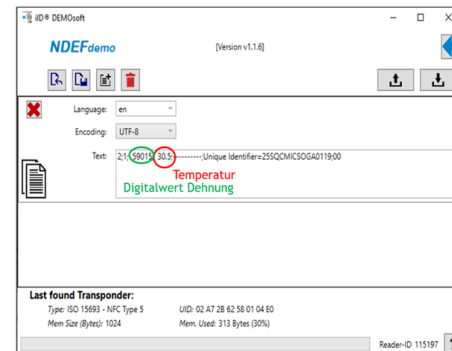


Abb. 8: Auswertung: Messwert in $\mu V/V$ und Temperatur in $^{\circ}C$

Die Abb. 8 zeigt das GUI der Testsoftware. Die Ergebnisse sind in der Abb. 9 dargestellt.

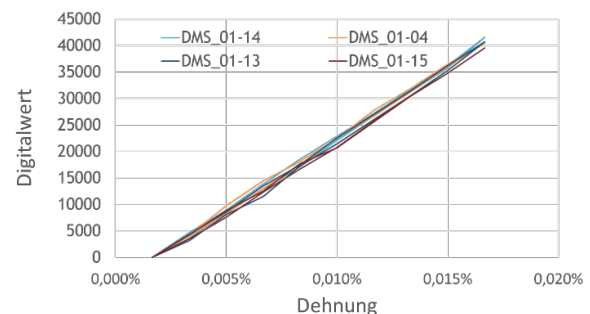


Abb. 9: Ergebnis der Evaluierung von 4 Sensor-TAGs

Literaturnachweis

- [1] Medienresistenter Absolutdrucksensor ohne Ölfüllung und Frontbündigem Medienkontakt, Thomas Frank, et al., 23. ITG/GMA-Fachtagung Sensoren und Messsysteme 2026

Danksagung

Diese Arbeit wurde im Rahmen des Forschungsprojekts AROMOS (Autarkes RF-basiertes Oberflächen-Montierbares-Dehnungsmesssystem) durchgeführt und vom BMW unter dem Förderkennzeichen KK5085709RH4 finanziell unterstützt.