

## Machbarkeitsstudie zur Entwicklung von Sensoren zur Erfassung des strukturellen Straßenzustandes

FA 6.095

Forschungsstelle: Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik (IPM), Freiburg

Bearbeiter: Schumacher, I. / Wöllenstein, J.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn

Abschluss: Oktober 2012

### 1 Sensoren zur Erfassung des strukturellen Straßenzustandes

Im Folgenden werden die Rechercheergebnisse für Sensoren für unterschiedliche physikalische Größen, wie bspw. Temperatur, Feuchte, Beschleunigung oder Druck präsentiert. Es werden teilweise konkret Bauteile zum Messen der Parameter benannt, aber auch Sensorprinzipien oder neuartige Konzepte vorgestellt.

#### 1.1 Temperatursensor

Für die Messung der Temperatur wird ein Platindünnschichtsensor zum Einsatz kommen. Platindünnschichtwiderstände besitzen einen temperaturabhängigen, elektrischen Widerstand und benötigen keine Rekalibrierung. Platin-Temperatursensoren zeichnen sich durch eine näherungsweise lineare Kennlinie und höhere Genauigkeit gegenüber Silicium-basierten Temperatursensoren aus. Platinschichten auf Keramiksubstraten sind zudem sehr stabil und nicht anfällig für Korrosion.

#### 1.2 Bodenfeuchte und Salinität

Für die Erfassung der Bodenfeuchte sollen zwei unterschiedliche Messmethoden genutzt werden. Über den Einsatz von Interdigitalstrukturen für eine kapazitive Feuchtemessung [1] und das parallele Messen des Widerstands zwischen den Elektroden [2, 3] besteht die Möglichkeit den Salzgehalt, also die Salinität, berechnen zu können. Dabei wird ausgenutzt, dass die elektrische Leitfähigkeit von Wasser proportional zum Salzgehalt ist. Durch die Interdigitalkondensator-Anordnung ist es prinzipiell auch möglich den pH-Wert zu bestimmen. Führt man Wechselstrommessungen durch, erhält man Real- und Imaginärteil bzw. Betrag und Phase des von Spannung und Strom durchflossenen leitfähigen Mediums zwischen den Elektroden. Dazu ist es aber notwendig, dass in einem Prozessor ein geeignetes Modell (Ersatzschaltbild) abgelegt ist, auf welche die Messwerte "angefittet" werden, um die Ionen-Konzentration zu ermitteln.

Als Auswertechip für die Feuchtesensorstrukturen kann z. B. ein AD7746 zum Einsatz kommen. Der AD7746 ist ein 24-Bit Kapazität-zu-Digital-Wandler (Capacity to Digital Converter, CDC) der Firma Analog Devices mit einer Genauigkeit von 4 fF und einer Auflösung von 4 aF [4]. Es besteht die Möglichkeit, neben einem Feuchtesensor noch weitere kapazitive Sensoren, wie beispielsweise kapazitive Dehnungsmessstreifen (DMS),

anzuschließen und auszulesen. Der Energieverbrauch solcher Sensorsysteme beschränkt sich allein auf den Verbrauch des CDC-Chips, da die kapazitiven Strukturen an sich keinen Strom benötigen, es sich also um passive Sensoren handelt.

#### 1.3 Dehnung

Eine Möglichkeit der Druckmessung bieten Dehnungsmessstreifen. Unter anderem der Lehrstuhl für Aufbau- und Verbindungstechnik (Prof. Dr. Jürgen Wilde) am Institut für Mikrosystemtechnik der Universität Freiburg beschäftigt sich momentan mit der Entwicklung von kapazitiven Dehnungsmessstreifen [5]. Der Vorteil der kapazitiven Auslesung liegt in der Leistungsaufnahme, die sich auf den Verbrauch des Auswertechips begrenzt, wodurch sie sich speziell für Anwendungen auf RFID-Transpondern eignen.

#### 1.4 Druck

Für die Messung der Druckverteilung im Boden wird in einer Veröffentlichung von Makki und Pop-Iliev [6] ein sehr interessantes Verfahren vorgestellt. Zur Überwachung des Reifendrucks in Autoreifen kommt ein Drucksensor der Firma Honeywell zum Einsatz, welcher für den Einsatz in der Straße jedoch nicht geeignet ist. Dieser Sensor wird drahtlos über ein Lesegerät im Radkasten ausgelesen. Die Neuheit dieses Reifendrucksystems liegt in der Energieversorgung. Das System läuft ohne Batterie. Zusätzlich im Reifen angebrachte Piezoelemente versorgen die komplette integrierte Elektronik (Bild 1).

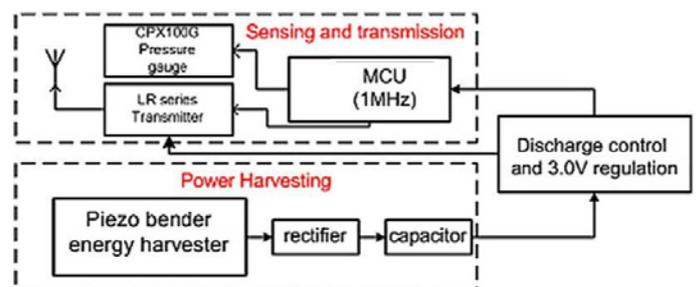


Bild 1: Blockschaltbild des energieautarken, drahtlos auslesbaren Reifendrucksensors aus [6]

Alternativ zur oben vorgestellten Schaltung zur Nutzung piezoelektrisch erzeugter Signale ist ein speziell für diese Anwendung entwickelter IC von Linear Technology, die kompaktere und passendere Lösung für den Einsatz in der Straße. Der LTC3588-1 vereint einen verlustarmen Vollwellen-Brückengleichrichter und einen wirkungsgradstarken Abwärtswandler in einem Bauteil [7]. Er kann in Verbindung mit piezoelektrischen Wandlern mechanische Vibrationsenergie aus der Umwelt in eine geregelte elektrische Ausgangsspannung umwandeln, mit der beispielsweise Mikrocontroller, Sensoren, Datenkonverter oder Sendermodule betrieben werden können.

Prinzipiell ist das hier vorgestellte System in dieser Konfiguration auch auf den Einbau in der Straße übertragbar. Die Überfahrten von Lkw dienen als Energielieferant. Außerdem können diese gezählt sowie deren Druckbelastung auf die Straße energieautark detektiert werden.

Als Alternative zum Drucksensor von Honeywell, der für eine Druckmessung in der Straße nicht geeignet ist, könnte ein piezoresistiver Drucksensor auf Keramikbasis der Firma Metalux Switzerland eingesetzt werden. Die hinter einer Keramikmembran sitzende Messbrücke wird bei diesem Sensor mittels Dickschicht-Technologie aufgebracht und kann in der Ausführung ME501 Drücken bis zu 5 bar ausgesetzt werden [8].

## 1.5 Beschleunigung

Der Markt an MEMS-Beschleunigungssensoren ist enorm groß. Unter anderem bieten Bosch Sensortec, Freescale oder STMicroelectronics MEMS-Sensoren an. Am besten geeignet scheint der LIS3DH, ein 3-Achsen-Beschleunigungssensor von STMicroelectronics [9]. Dieser IC benötigt eine Versorgungsspannung zwischen 1,7 und 3,6 V und misst Beschleunigungen bis  $\pm 16$  g. Im low-power Mode liegt der benötigte Strom bei 2  $\mu$ A. Über digitale Schnittstellen, wie I<sup>2</sup>C oder SPI, lässt er sich mit einem Mikrocontroller verbinden.

## 1.6 Messwerterfassung

Um den Verkehr beim Auslesen der Daten nicht zu behindern, muss die Geschwindigkeit des Messfahrzeugs während des Auslesens der Sensortransponder mindestens 80 km/h (= 22 m/s) betragen.

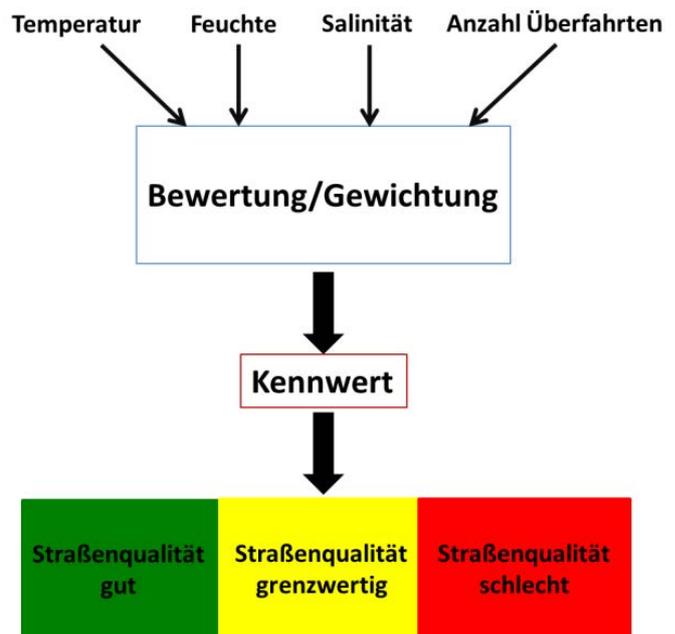
Geht man davon aus, dass im Messfahrzeug die Antenne des Lesegeräts den gesamten Unterbau eines Anhängers umschließt und dass dieser in etwa eine Länge von 5 m hat, so beträgt die Zeit zum Auslesen des Sensortransponders 227 ms.

Für den 13,56 MHz-Bereich liegt die maximale Datenübertragungsrate des Lesegeräts erfahrungsgemäß bei 1 700 Bytes/s. In 227 ms sind somit 386 Byte übertragbar. 386 Byte entsprechen 3 087 Bit, was eine maximale Anzahl von 308 Messwerten à 10 Bit in 227 ms ergibt.

Aufgrund dieser geringen Anzahl von übertragbaren Messwerten bei 80 km/h muss die Menge an zu speichernden Daten gering gehalten werden. Es muss festgelegt werden, wie oft und wie genau die Sensorwerte auszulesen und abzuspeichern sind. Ausreichend wird es sein, die Umweltparameter Temperatur und Feuchte maximal zweimal am Tag zu erfassen und zu speichern. Die Messung der mechanischen Größen wie Dehnung, Druckspannung und Beschleunigung sollen ereignisgesteuert gemessen werden. Trotz allem wird ein intelligentes Datenmanagement gefordert sein, um die hohe Anzahl an Messwerten sinnvoll zu kombinieren, um bei einem Auslesevorgang den Gesamteindruck der Straße zu erfassen.

## 1.6.1 Kennwert

Das ursprüngliche Ziel war es, die gemessenen Werte zu einem einzigen Kennwert zu vereinen. In einer der Messwerterfassung nachgeschalteten Prozessierung ist eine Bewertung der Daten ggf. schon unmittelbar im Sensor notwendig, um letztlich straßenzustandsbezogene Fragen nach Abnutzungsgrad, "gut"/"schlecht", Restlebensdauer oder notwendigen Eingriffsmaßnahmen wie Reparaturen zu beantworten und somit auch die auszulesende Datenmenge gering zu halten. Die Gewichtung der einzelnen Parameter, wie Temperatur, Feuchte, Salinität, Dehnung, Druckspannung und Beschleunigung zu einem einzelnen Kennwert ist eine große Herausforderung (Bild 2).



**Bild 2: Ermittlung des Kennwerts zur strukturellen Bewertung des Straßenzustands**

Aus diesem Grund sollen die sensorisch erfassten Parameter mit validierten Modellen in Verbindung gebracht werden, welche beispielsweise Schadensbilder wie Rissbildung mit der Salinität korrelieren. Solche Modelle verknüpfen nutzungsrelevante Merkmale der Straße mit physikalischen oder chemischen Indikatorgrößen, müssen aber zwingend auf der Basis entsprechender Untersuchungen als Kalibrationsgrößen vorliegen.

Aus dieser Kombination eines Ermüdungsmodells mit einem Schadensakkumulationsmodell kann ein Monitoring-Konzept für Lebensdauersensoren generiert werden. Der Sensor muss die relevanten Belastungen wie Achskraft und Temperatur messen und so aufzeichnen, dass damit jederzeit eine Ersatzgröße für den Abnutzungsgrad berechnet werden kann. Zur Analyse variabler Lasten existieren aus der Betriebsfestigkeitslehre effiziente Algorithmen wie die Rainflow- oder die Range-Pair-Methode [10, 11], auch für multivariate Belastungen. Derartige Zähler können auf heutigen, mikrocontrollerbasierten Sensoren implementiert werden und den Lastverlauf kontinuierlich verfolgen. Zugleich wird hierdurch die zu speichernde Datenmenge signifikant vermindert.

Zusammenfassend existieren also drei wesentliche Grundkonzepte zur Erfassung des strukturellen Straßenzustands:

1. Direkte Messung der Abnutzung
2. Indirekte Messung der Schädigung aus Ersatzgrößen
3. Prognostische Zustandserfassung durch Registrierung der Lashistorie

Wir schlagen eine Kombination dieser Konzepte vor, um unterschiedliche Schädigungsszenarien sicher zu erfassen. In [12] wird darauf hingewiesen, dass Kombinationen o. g. Verfahren die Erkennungssicherheit erhöhen.

## 2 Bereitstellung der Energieversorgung auf kleinstem Raum

Bei der Entwicklung fernabfragbarer Sensorik muss der Fokus auf semi-passiven Systemen liegen. Semi-passive, umgekehrt auch semi-aktive Transponder genannt, arbeiten mit einer zusätzlichen Batterie, die ausschließlich für die Versorgung der Sensorik gebraucht wird. Hiermit sind Messungen über einen langen Zeitraum möglich, da eine kontinuierliche Energieversorgung durch die Batterie gewährleistet ist. Der Energiebedarf von Mikrosensoren ist so gering, dass mit einer vergleichsweise kleinen Batterie eine lange Zeitdauer abgedeckt werden kann. Die Kommunikation zwischen Lesegerät und Transponder erfolgt passiv und benötigt keine zusätzliche Energie.

Um in einem semi-aktiven System eventuell doch einen Betrieb ohne Batterie ermöglichen zu können, wurden unterschiedliche Ansatzpunkte untersucht. Eine Möglichkeit des energieautarken Betriebs eines Sensorsystems ist der Einsatz von Piezogeneratoren, die durch mechanische Verformung elektrische Energie erzeugen.

### 2.1 Piezogeneratoren

#### Grundlagen piezoelektrischer Effekt

Als piezoelektrischen Effekt bezeichnet man die Erzeugung eines elektrischen Feldes durch eine Ladungsverschiebung in einem Festkörper mit elektrischem Dipolmoment aufgrund mechanischer Verformung von außen. Umgekehrt bewirkt das Anlegen eines elektrischen Feldes eine mechanische Verformung, was man als elektrostriktiven Effekt bezeichnet. Aufgrund dessen finden piezoelektrische Materialien einen großen Anwendungsbereich in der Kraft- und Druckmessung. Die Legierung Bleizirkontitanat (PZT), die häufig zur Herstellung piezoelektrischer Sensoren verwendet wird, ist ein Mischkristall mit einem ca. 300fach höheren piezoelektrischen Koeffizienten als das Standardmaterial Quarz [13].

Das Überfahren der eingebetteten Bauteile verursacht eine minimale Verformung der Straße, was einen kurzen elektrischen Impuls auslöst. Dieser kann zur Versorgung der übrigen Peripherie, wie Temperatur- und Feuchtesensoren, genutzt werden. Zusätzlich kann solch ein Sensor zum Zählen von Ereignissen genutzt werden. Jede Verformung wird registriert und ausgewertet. So kann beispielsweise die Anzahl der Achsen gezählt werden, die in einem gewissen Zeitraum den Sensor passiert haben. Das Erstellen einer Belastungshistorie mit der Anzahl an Lastwechseln, verursacht durch Lkw-Über-

fahrten, sowie minimale und maximale Ereignisse (durch Achsgewicht) können detektiert werden.

### 2.2 Abschätzung der Systemlaufzeit

Um die Systemlebensdauer abschätzen zu können, wurden unterschiedliche Szenarien zu der Anzahl von Messzyklen entwickelt. Die verwendeten Bauteile und Sensoren mit entsprechendem Stromverbrauch im Standby-Modus sowie im aktiven Modus sind in Tabelle 1 dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass für ein optimiertes Energiemanagement eines Prototyps noch ideale Messintervalle und Messprotokolle entwickelt werden müssen, um die Systemlaufzeit zu maximieren.

Der Einsatz von Piezoelementen zur Umwandlung der Vibrationsenergie im Unterboden in elektrische Energie für die Versorgung des Drucksensors und teilweise des Mikrocontrollers ist ein erster Schritt, um die Laufzeit des Gesamtsystems batterieunabhängig zu verlängern.

## 3 Sicherstellung der Kommunikation zwischen System und Außenwelt

### 3.1 Überblick Frequenzen

RFID-Anwendungen im niederfrequenten Bereich (Low Frequency, LF) arbeiten typischerweise bei einer Frequenz zwischen 125 und 135 kHz. Durch die Unempfindlichkeit dieser Technik gegenüber Feuchtigkeit und in einigen Fällen auch gegen Metall wird sie häufig für die Zugangskontrolle in Gebäude und zur Identifikation von Tieren und Objekten, in Form von Ohrmarken oder Tierchips, eingesetzt [14]. Solche Transponder arbeiten unidirektional, d.h., sie sind lesbar, können jedoch nicht mit Informationen beschrieben werden.

Im hochfrequenten Bereich (High Frequency, HF) kommunizieren RFID-Transponder bei einer Frequenz von 13,56 MHz. Diese Anwendung findet großen Einsatz bei sogenannten Smart Cards und immer häufiger in Bibliotheken als Diebstahlschutz oder Zugangskontrolle [15].

Die Frequenzen der UHF-Technologie (Ultra High Frequency, UHF) liegen bei 868 MHz in Europa bzw. bei 918 MHz in den USA. UHF-Transponder finden heutzutage großen Einsatz im Bereich Logistik, Tracking und Tracing. Zur Überwachung der Kühlkette beispielsweise können Transponder mit Temperatursensoren ausgestattet werden, um den Transport temperaturempfindlicher Güter zu kontrollieren.

Bei einem Frequenzbereich von 2,45 GHz spricht man von Mikrowellen. Transponder mit dieser Arbeitsfrequenz arbeiten hauptsächlich aktiv und zeichnen sich so durch eine sehr große Reichweite aus. Einsatz finden sie beispielsweise in Maut-Stationen zur Erfassung von Lkw auf Autobahnen.

Tabelle 1: Für den Prototyp ausgesuchte Bauteile mit entsprechendem Stromverbrauch für den Standby- und aktiven Modus

Bauteil/Sensor	Verbrauch Standby-Modus	Verbrauch aktiver Modus
MSP430 – Mikrocontroller	~0,5 $\mu$ A	500 $\mu$ A
LIS3DH – Beschleunigungssensor	2 $\mu$ A	11 $\mu$ A
AD7746 – CDC	1 $\mu$ A	700 $\mu$ A
LTC3588 – Piezoelectric Energy Harvesting Power Supply	950 nA	150 $\mu$ A
Temperatursensor	0	150 $\mu$ A
SL13A – HF-RFID-Frontend	0	0 (Energie aus Feld des Lesegeräts)
Feuchtesensor	0	0
Kapazitiver DMS	0	0
Gesamt	4,45 $\mu$ A	1 361 $\mu$ A

### 3.2 Ergebnisse Feldtest

Für den Feldtest wurden HF- und UHF-Transponder in die Straße eingebaut, um deren Reichweiten und Geschwindigkeiten der Datenübertragung zu ermitteln. Der Versuch wurde in einer Teststraße der BAST durchgeführt, sowohl in Asphalt als auch Beton.

Die Ergebnisse zeigten, dass Asphalt die Reichweiten der Transponder kaum beeinflusst. In Beton hingegen verschlechterte sich beispielweise die Reichweite der UHF-Transponder um über 40 cm. Die maximalen Übertragungsgeschwindigkeiten betragen bei HF 1 700 Byte/s, im UHF-Bereich nur 1 300 Byte/s.

Aufgrund der Ergebnisse der Reichweitenmessungen und Messungen der Datenübertragungsgeschwindigkeiten liegt die Nutzung des hochfrequenten Frequenzbereichs von 13,56 MHz nahe. Als RFID-Frontend auf den Scemtec-Transpondern wurde der SL13A der Firma IDS Microchip verwendet [16].

### 4 Integration der einzelnen Systembestandteile und Einbringen des Sensorsystems in die Straßenbefestigung

Das Sensorsystem soll direkt in die Substanz der Straße eingebracht werden. Dabei sollen sowohl Asphalt als auch Betonstraßen mit den Sensortranspondern ausgestattet werden. Asphaltdeckschicht und Asphaltbinderschicht werden nach einer gewissen Zeit abgefräst und erneuert. Die Asphalttragschicht bleibt über Jahrzehnte bestehen und ist das Grundgerüst der Straße. Das System wird in die Asphalttragschicht mit einer Korngröße zwischen 22 und 32 mm eingebaut, um dort Störungen, Risse, Schwachstellen zu erkennen. Auch bei Betonstraßen soll das System nicht in der Betondecke, sondern in unteren gebundenen Schichten eingebaut werden, um schon dort frühe Schäden zu detektieren. Durch die gegebene Korngröße der Tragschicht sind auch die Maße des Sensors bzw. Systems auf die gleiche Größenordnung festgelegt. Eine kleinere Bauweise wäre nicht in der Lage die Dehnungs- und

Druckspannungen der Schicht zu erfassen. Weitaus größere Bauformen würden die Messung ebenfalls verfälschen.

Im Fall von Asphaltstraßen erfolgt der Einbau des Systems mit dem Bau der Straße. Bei der Verwendung von Gussasphalt treten dabei Temperaturen von bis zu 230 °C auf, denen das System standhalten muss. Hier erfolgt keine Verdichtung durch Walzen. Asphaltbeton wird bei etwa 160 °C ausgelegt. Bei der anschließenden Verdichtung durch Walzen können Beschleunigungen bis zu 6 g auftreten. Diese harsche Umgebung erfordert ein verlässliches und robustes Gehäuse des Sensorsystems.

Für den grundsätzlichen Aufbau des Sensorsystems erscheint es sinnvoll einen modularen Aufbau zu verfolgen, um je nach Anwendung und geplantem Einsatzort das System individuell aufbauen zu können. Ist an einer Straße nur das Messen der mechanischen Parameter wie Dehnung, Druckspannung und Beschleunigung interessant, so kann auf Sensoren für Temperatur und Feuchte einfach verzichtet werden. Ist der Gesamtzustand einer Straße von Interesse, so wird das System mit allen möglichen Sensoren bestückt. Ein modularer Aufbau könnte beispielsweise wie in Bild 3 gezeigt erfolgen.

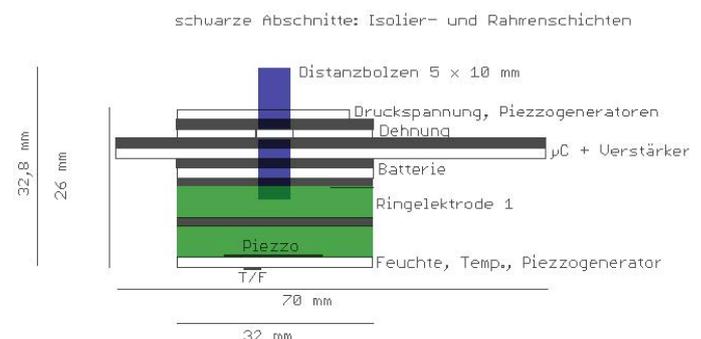


Bild 3: Möglicher modularer Aufbau des Sensorsystems für eine Überwachung des strukturellen Straßenzustands

4.1 LTCC

Die Realisierung eines Prototyps sollte aufgrund der geringen Stückzahl zunächst leiterplattenbasiert auf FR4-Material erfolgen. Zur Integration in die Straße benötigt die Platine eine zusätzlich Verkapselung, um den hohen Temperaturen und auch dem eventuellen Druck durch Verdichtung besser standzuhalten. Die Sensoren müssten durch den geforderten Kontakt nach außen auch dementsprechend außenliegend angebracht werden. Für eine spätere Produktion in Kleinserie könnte die Realisierung des RFID-Sensorsystems in einem LTCC-Gehäuse erfolgen. LTCC ist die Abkürzung für Low Temperature Cofired Ceramic und steht für glaskeramische Folien, welche unter anderem als Gehäuse für mikrosystemtechnisch produzierte Systeme eingesetzt werden. Diese Technologie bietet eine Möglichkeit, ein äußerst robustes und kostengünstiges Material herzustellen. Die Antenne des späteren 13,56 MHz-Systems lässt sich sowohl auf die Leiterplatte als auch auf LTCC direkt als Leiterbahn integrieren. Die Unterschiede zwischen auf FR4-Material gefertigten Systemen zu Systemen, welche mit dem LTCC-Verfahren hergestellt wurden, sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Eigenschaften von FR3-Material und LTCC-Material im Vergleich [17]

Technische Eigenschaften	PCB	LTCC
Lebensdauer	-	+
Isolationsfestigkeit	-	+
Hochtemperaturbeständigkeit	-	+
Beschleunigungsfestigkeit	+	+
Thermische Leitfähigkeit	-	+
Elektrische Leitfähigkeit	+	+-
Integrationsdichte	+-	+-
Integration passiver Komponenten	-	+
Wirtschaftliche Eigenschaften	PCB	LTCC
Kosten pro Verbindung	++	+-
Entwicklungs- und Werkzeugkosten	+++	+
Time to Market	++	+
Lieferanteninfrastruktur	++	-
Maschineninfrastruktur	++	-

5 Zusammenfassung

Durch das stetige höhere Verkehrsaufkommen – besonders im Schwerverkehr – kommt es zu einer immer stärkeren Beanspruchung des Straßenverkehrsnetzes. Dies erfordert neue Strategien in der Erhaltungsplanung, um die Straßenqualität langfristig zu sichern.

Somit war das Gesamtziel der Studie die Untersuchung der Machbarkeit des Einsatzes extrem miniaturisierter autarker

Mikrosysteme mit Sensoren, die Daten empfangen, verarbeiten, speichern und senden können.

Das hier vorgestellte System für die Erfassung des strukturellen Straßenzustands verfügt über Sensoren für die Überwachung der Umgebungsbedingungen wie Temperatur und Feuchte sowie über Sensoren zur Überwachung mechanischer Größen wie Dehnung, Druckspannung und Beschleunigung.

Für die Erfassung der Bodenfeuchte sollen zwei unterschiedliche Messmethoden genutzt werden. Über den Einsatz von Interdigitalstrukturen für eine kapazitive Feuchtemessung und das parallele Messen des Widerstands zwischen den Elektroden besteht die Möglichkeit den Salzgehalt, also die Salinität, berechnen zu können. Dabei wird ausgenutzt, dass die elektrische Leitfähigkeit von Wasser proportional zum Salzgehalt ist. Das Messen der Temperatur übernimmt ein verbrauchsarmer Platindünnschichtsensor.

Die mechanische Belastung auf die Straße kann durch neuartige kapazitive Dehnungsmessstreifen erfolgen, welche am Lehrstuhl für Verbindungstechnik von Prof. Wilde entwickelt werden. Der Energieverbrauch kapazitiver Sensoren beschränkt sich auf den Verbrauch des Auswertchips, einen Kapazität-Digital-Wandler-IC (CDC), da die kapazitiven Strukturen an sich für die Erfassung der Dehnung keine Energie benötigen. Über den Drucksensor ME501 wird die Druckbelastung im Unterbau aufgenommen. Der Einbau der Sensoren für Dehnung und Druck muss waagrecht im Unterbau erfolgen, da diese Messgrößen richtungsabhängig sind und nur in exakter Ausrichtung die Daten korrekt erfassen. Der vorgesehene Beschleunigungssensor misst zwar alle drei Achsen, die Einbau-richtung muss aber ebenso beachtet werden, um zur anschließenden Datenverarbeitung die Richtungen zuordnen zu können.

Da das System drahtlos über 13,56 MHz-RFID-Lesegeräte ausgelesen werden soll, spielt der Energieverbrauch eine wichtige Rolle. Das System arbeitet semi-aktiv. Das bedeutet, dass die Energie für den Schreib- und Lesevorgang rein über das Magnetfeld des Lesegeräts bereitgestellt wird. Auf eine Batterie kann aber dennoch nicht verzichtet werden, da die periphere Sensorik diese benötigt. Zusätzlich werden Piezogeneratoren am System installiert, um die Bewegungsenergie in der Straße zu nutzen. Die Verformung der Straße durch darüberfahrende Lastwagen soll dem System als "geerntete" Energie rückgeführt werden. Durch in der Projektlaufzeit durchgeführte Feldtests wurde bestätigt, dass in die Straße (sowohl Asphalt als auch Beton) eingebaute Transponder für den HF-Bereich von 13,56 MHz durchaus mit einem Long-Range-Lesegerät mit Reichweiten bis zu 80 cm auszulesen sind. Die Datenrate dieser RFID-Systeme liegt bei etwa 1 700 Byte/s. Voraussetzung für das Auslesen der Systeme in realer Umgebung war eine minimale Geschwindigkeit von 80 km/h auf der Autobahn, um den Verkehr nicht zu behindern. Beachtet man diese beiden Rahmenbedingungen, Datenrate und Geschwindigkeit des Messfahrzeugs, so liegt die Anzahl auszulesender Messwerte bei maximal 300 bei idealen Bedingungen. Daran sieht man, dass besonders im Datenmanagement ein hohes Entwicklungspotenzial steckt.

Der Aufbau des Systems erfolgt modular, damit die Ausstattung je nach Einsatzort und -bedingung individuell variiert werden

kann. Ein Prototyp sollte zunächst in FR4-Material, also leiterplattenbasiert, realisiert werden. Die geringe Stückzahl und geringe Herstellungskosten begründen diese Entscheidung. Für ein späteres Serienprodukt ist Low-Temperatur-Cofired-Ceramic-Material (LTCC) geeigneter. Eine hohe Robustheit gegen mechanischen und thermischen Stress sowie eine hohe Integrationsdichte und kleinere Bauweise als leiterplattenbasierte Systeme sind die Vorteile des keramischen Substrats.

Außerdem begünstigt ein modularer Aufbau einen flexiblen Einsatz der Messsysteme. Durch das Lesegerät soll jeder einzelne Sensor frei konfigurierbar sein. So kann beispielsweise ein komplett ausgestattetes System nur als Temperatur- und Feuchtesensor zum Einsatz kommen. Denkbar ist hierbei, dass zur Erfassung der Umweltparameter ein Sensortransponder im Standstreifen eingebaut wird, wo die abgespeicherte und auszulesende Datenmenge nicht durch die Geschwindigkeit von 80 km/h des Messfahrzeugs begrenzt ist. Vorteil hierbei ist es, dass das Fahrzeug mit Lesegerät auf dem Seitenstreifen der Autobahn mehrere Minuten über dem Sensor stehen bleiben könnte und somit Messdaten eines ganzen Jahres auslesen und sammeln könnte.

Zusätzlich werden die Systeme mit einem bestückbaren Kabelanschluss (mögliche Varianten: RS422 oder RS484) versehen. Dieser spielt zumal für die Inbetriebnahme und Testphase eine wichtige Rolle. Außerdem können Systeme, welche im Unterbau eingesetzt werden sollen und somit die Reichweite zum Lesegerät über die im Feldtest erreichten 80 cm überschreiten, mit einem Kabel versehen werden, um die erfassten Daten auszulesen.

Die Studie zeigt, dass das vorgeschlagene Messsystem in der Lage ist, den strukturellen Zustand der Straße zu erfassen.

## 6 Literatur

- [1] Mirjana Maksimovic, Goran M. Stojanovic, Milan Radovanovic, Mirjana Malesev, Vlastimir Radonjanin, Goran Radosavljevic, Walter Smetana, "Application of a LTCC sensor for measuring moisture content of building materials", Construction and Building Materials, Volume 26, Issue 1, Januar 2012, Seite 327-333
- [2] Datenblatt, Feuchtesensor "Multiringelektrode", SENSOR-TEC GmbH, <http://www.sensortec.de/sensoren-sensors>, 18.07.12
- [3] Prof. Dr. Ing. W. Brameshuber, Prof. Dr.-Ing. M. Raupach, Dipl.-Ing. P. Schröder, Dipl.-Ing. C. Dauberschmidt, ibac, Institut of Building Materials Research of the Technical University of Aachen, Germany, "Non-destructiv Determination of the Water-Content in the Concrete Cover using the Multiring-Electrode, Part I: Aspects of the Concrete Technology", Prof. Dr.-Ing. Michael Raupach, Dipl.-Ing. Christoph Dauberschmidt, Part II: Measuring Technique, International Symposium, "Non-Destructive Testing in Civil Engineering", Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung E.V., 2003
- [4] Datenblatt, AD7745/AD7746, Analog Devices, Rev 0, 2005
- [5] R. Zeiser, T. Jörgen, T. Fellner, J. Wilde, Entwicklung von kapazitiven Dehnungsmessstreifen in Dünnschichttechnologie für drahtlose, intelligente Systeme, Mikrosystemtechnik Kongress, Darmstadt, Oktober 2011
- [6] Noaman Makki, Remon Pop-Iliev, Battery-and wire-less tire pressure measurement systems (TPMS) sensor, Microsystem Technologies, Volume 18, Issue 7-8, pp 1201-1212, Springer Verlag, 2012
- [7] Datenblatt, LTC3588-1 Piezoelectric Energy Harvesting Power Supply, 35881fa, LT 0910 Rev A, <http://cds.linear.com/docs/Datasheet/35881fa.pdf>, 31.07.2012
- [8] Datenblatt, ME501/505, Piezoresistiver Drucksensor, Metalux SA, 04/2009
- [9] Datenblatt, LIS3DH, STMicroelectronics, Doc ID 17530, Rev 1, Mai 2010
- [10] Haibach, Erwin: Betriebsfestigkeit. Springer-Verlag 2002, ISBN-10: 3-540-62185-7
- [11] Buxbaum, Otto: Betriebsfestigkeit. Verlag Stahleisen 1992, ISBN-10: 3-514-00437-4
- [12] B.K.N. Rao: Handbook of Condition Monitoring, Elsevier Science; 1st edition, 1996, ISBN-10: 1856172341
- [13] J. Niebuhr, G. Lindner (1994), Physikalische Messtechnik mit Sensoren, Oldenbourg Verlag, München, Wien
- [14] G.Tamm, C.Tribowski (2010), RFID, Informatik im Fokus, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg
- [15] Christian Kern (2011), RFID für Bibliotheken, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg
- [16] Datenblatt, SL13A\_SD, Smart Label Chip with Sensor, IDS Microchip, IDS-SL13A\_SD-05, Dezember 2008
- [17] Franz Bechthold, Anwendung von LTCC für Sensoren und Mikrosysteme, VIA electronic GmbH, Hermsdorf, Forschungs- und Technologieforum des FTVT, Ilmenau, Mai 2009