

ABSCHLUSSBERICHT

Machbarkeitsstudie zur Entwicklung von Sensoren zur Erfassung des strukturellen Straßenzustands

Ina Schumacher

Prof. Dr. Jürgen Wöllenstein

Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik
in Freiburg

Berichtszeitraum: 01.11.2011 – 31.10.2012

Forschungsprogramm Straßenwesen
Fördernummer: FE 06.0095/2011/FRB

BAST Bundesanstalt für Straßenwesen
Herrn Michael Scherkenbach
Brüderstraße 53
51427 Bergisch Gladbach

Postfach 10 01 50
51401 Bergisch Gladbach

Freiburg, den 15. November 2012

Machbarkeitsstudie zur Entwicklung von Sensoren zur Erfassung des strukturellen Straßenzustands

Ziel der Studie ist eine Untersuchung extrem miniaturisierter autarker Mikrosysteme mit Sensoren, die, eingebaut in der Straße, Daten empfangen, verarbeiten, speichern und senden können. Der strukturelle Straßenzustand soll mit solchen Systemen erfasst werden. Die Kommunikation mit den Mikrosensorsystemen muss drahtlos und bidirektional über RFID-Technologie erfolgen. Da die Sensorgröße der Korngröße des Bodens entsprechen soll, ist im Vergleich zu heutigen Systemen eine völlig neue Dimensionierung der Miniaturisierung notwendig. Wichtige Parameter bei der Bewertung der Straße sind Empfindlichkeit, Langzeitstabilität, Selektivität, Einbaugröße, Schnittstelle und die Energieaufnahme.

Die in diesem Bericht erwähnten Sensoren erfassen die physikalischen Parameter Temperatur, Bodenfeuchte und Salinität sowie Dehnung, Druck und Beschleunigung. Sie eignen sich aufgrund ihres geringen Energieverbrauchs, oder durch äußerste Robustheit für ein solches Mikrosystem. Aus dem Messen der physikalischen Größen und der Umweltparameter soll eine Bewertung des strukturellen Straßenzustandes entstehen.

Die Energieversorgung des Sensorsystems ist ein wichtiger Teil der Studie. Dabei wird die Möglichkeit beschrieben, unter Verwendung von Piezogeneratoren, das Überfahren der eingebetteten Generatoren durch Fahrzeuge als Energielieferant zu nutzen und somit die Gesamtlaufzeit zu verlängern.

Des Weiteren werden die verschiedenen Frequenzbereiche der RFID-Technologie und unterschiedliche Techniken von RFID-Transpondern sowie RF-Transceivern erläutert. In diesem Zusammenhang werden die Ergebnisse eines Reichweitentests von in einer Teststraße eingebrachten Temperaturtranspondern gezeigt.

Abschließend werden die Ergebnisse zur Integration der Systembestandteile und das Einbringen des Systems in den Straßenbau aufgezeigt. Ein keramisches Gehäuse bietet ein hohes Potential und erweist sich für diese Anwendung durch seine große Robustheit gegen thermischen und mechanischen Stress am geeignetsten.

Inhalt

1	Einleitung.....	3
2	Ergebnisbericht	5
2.1	Sensoren zur Erfassung des strukturellen Straßenzustandes	5
2.1.1	Temperatursensor	5
2.1.2	Bodenfeuchte	6
2.1.3	Dehnung.....	8
2.1.4	Druck	11
2.1.5	Beschleunigung.....	12
2.1.6	Messwerterfassung	13
2.2	Bereitstellung der Energieversorgung auf kleinstem Raum.....	19
2.2.1	Piezogeneratoren	19
2.2.2	Abschätzung Systemlaufzeit.....	22
2.3	Sicherstellung der Kommunikation zwischen System und Außenwelt.....	24
2.3.1	Überblick Frequenzen	24
2.3.2	Ergebnisse Feldtest.....	27
2.4	Integration der einzelnen Systembestandteile und Einbringen des Sensorsystems in die Straßenbefestigung	33
3	Fazit.....	39
4	Anhang	41
4.1	Referenzen.....	41

1 Einleitung

Das stetig ansteigende Verkehrsaufkommen - besonders im Schwerverkehr - führt zu einer immer stärkeren Beanspruchung des Straßenverkehrsnetzes. Dies erfordert neue Strategien in der Erhaltungsplanung, um die Straßenqualität langfristig zu sichern. Bei kontinuierlicher Überprüfung der Straßenqualität kann die Erhaltungsplanung auf den aktuellen Zustand angepasst und somit optimiert werden. Eine Möglichkeit der Erfassung des strukturellen Straßenzustands, zusätzlich zur bereits etablierten Erfassung des Oberflächenzustandes, die alle 4 Jahre stattfindet, ist die Integration von Sensoren in den Straßenbelag sowohl in die gebundenen als auch in die ungebundenen Schichten, um damit die Umgebungsbedingungen wie z.B. Temperatur, Feuchte oder Druckbelastungen zu messen. Diese Sensoren werden dann in definierten Zeitintervallen drahtlos von Messfahrzeugen ausgelesen.

Gesamtziel der Studie ist die Untersuchung der Machbarkeit des Einsatzes extrem miniaturisierter autarker Mikrosysteme mit Sensoren, die Daten empfangen, verarbeiten, speichern und senden können. Ziel ist die Erfassung des strukturellen Straßenzustandes. Dazu sollen die Sensorsysteme in die Straßenbefestigung integriert werden. Die Kommunikation mit den Mikrosensorsystemen muss drahtlos bidirektional über elektromagnetische Wellen erfolgen. Da idealerweise die Sensorgröße der Korngröße entsprechen soll, ist im Vergleich zu heutigen Systemen eine völlig neue Dimensionierung der Miniaturisierung notwendig.

Ziel ist es, in der Straßenbefestigung Dehnung, Spannung, Temperatur, Feuchte, Salinität und Lage des Sensors zu erfassen. Es wird eine Literaturrecherche zu den einzelnen Sensorprinzipien und der Möglichkeit der Realisierung in Mikrosystemtechnik durchgeführt. Die erzielten Ergebnisse werden für die angestrebte Applikation bewertet und dokumentiert. Wichtige Parameter bei der Bewertung sind Empfindlichkeit, Langzeitstabilität, Selektivität, Einbaugröße, Schnittstelle und besonders die Energieaufnahme.

Der nachfolgende Bericht zeigt die Ergebnisse der Studie und enthält konkrete Vorschläge für die Entwicklung zukünftiger Mikrosysteme für die Straßenzustandserfassung.

Im Kapitel 2.1 „Sensoren zur Erfassung des strukturellen Straßenzustandes“ werden Sensoren für verschiedene Umgebungsparameter und mechanische Größen vorgestellt, die sich aufgrund ihres geringen Energieverbrauchs oder durch äußerste Robustheit für ein solches Mikrosystem eignen. Dabei handelt es sich sowohl um kommerziell erhältliche Sensoren, als auch um Sensoren und Messprinzipien als Ergebnis neuartiger Forschung.

Die in diesem Bericht erwähnten Sensoren erfassen die Umweltparameter Temperatur, Bodenfeuchte und Salinität sowie die mechanischen Größen Dehnung, Druck und Beschleunigung. Das Messen der physikalischen Größen ist für die Bewertung des strukturellen Straßenzustandes von größerer Bedeutung, da sich ein finaler Kennwert für die Beurteilung der Straße zu größten Teilen aus diesen Parametern ergeben soll. Die für diese Studie ausgewählten und vorgestellten kommerziellen Sensoren und aktuellen Forschungsergebnisse stellen nur einen Bruchteil der Rechercheergebnisse dar.

Der zweite Abschnitt beschäftigt sich mit der Energieversorgung von Sensorsystemen, die in die Straße eingebettet werden können. Dabei wird die Möglichkeit beschrieben, unter Verwendung von Piezogeneratoren das Überfahren der eingebetteten

Generatoren durch Fahrzeuge als Energielieferant zu nutzen und somit die Systemgesamtlaufzeit zu verlängern.

Des Weiteren werden die verschiedenen Frequenzbereiche der Radio-Frequenz-Identifikation-Technik (RFID) und unterschiedliche Techniken von RFID-Transpondern sowie RF-Transceivern erläutert. In diesem Zusammenhang werden die Ergebnisse des Reichweitentests gezeigt, welcher im Projektzeitraum durchgeführt wurde. Durch das Einbringen von HF- und UHF-Transpondern in eine Teststraße konnte mit unterschiedlichen Lesegeräten die Reichweite und Lesegeschwindigkeit aus dem Unterbau der Straße heraus untersucht werden.

Abschließend werden die Ergebnisse der Recherche zur Integration der einzelnen Systembestandteile und das Einbringen des Sensorsystems in den Straßenbau aufgezeigt. Ein keramisches Gehäuse bietet ein hohes Potential und erweist sich für diese Anwendung durch seine große Robustheit gegen thermischen und mechanischen Stress am besten geeignet.

2 Ergebnisbericht

2.1 Sensoren zur Erfassung des strukturellen Straßenzustandes

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

2.1.1 Temperatursensor

Für die Messung der Temperatur wird ein Platindünnschichtsensor zum Einsatz kommen. Platindünnschichtwiderstände sind hochgenaue Temperatursensoren aus Platin, die einen temperaturabhängigen, elektrischen Widerstand besitzen und keine Kalibrierung benötigen. Platin-Temperatursensoren zeichnen sich durch eine lineare Kennlinie und höhere Genauigkeit gegenüber Si-basierten Temperatursensoren aus. Je höher der Grundwiderstand bei Raumtemperatur ist (Pt100: 100 Ω bei 20°C; Pt1.000: 1000 Ω bei 20°C), desto weniger Leistung verbrauchen die Sensoren beim Auslesen [1]. Platinschichten auf Keramiksubstraten sind zudem sehr stabil und unanfällig für Korrosion.

In Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IPM entwickelte die Firma UST Umweltsensortechnik GmbH im Laufe eines Projektes Platindünnschichtwiderstände mit einem Grundwiderstand von 10.000 Ω (Abbildung 2-1). Besonderheiten des Pt10.000, wie die geringe Leistungsaufnahme und kleinste Bauformen (2 mm x 2,25 mm), spielen auf batteriebetriebenen RFID-Transpondern eine wichtige Rolle, um Platz auf der Platine einsparen zu können und eine lange Lebensdauer zu gewährleisten. Im Vergleich zu standardisierten Temperatursensoren liegt der Vorteil dieser hochresistiven Sensoren in ihrem geringen Energieverbrauch; die benötigte Energie bei einer Temperaturmessung durch einen Pt10.000 liegt bei nur 25 μ W. Hierfür wurden wichtige Parameter wie z.B. Substratrauigkeit, Strukturbreite, Chipdesign und Pt-Schichtdicke untersucht und optimiert [2].

Der Sensor wird im späteren Gesamtsystem in einer einfachen Vollbrücke integriert sein. Der Stromverbrauch der Temperaturschaltung beläuft sich so auf etwa 150 μ A. Durch einen zusätzlichen Transistor lässt sich die Schaltung abschalten, um den Energieverbrauch außerhalb des Messzeitraums zu verringern.

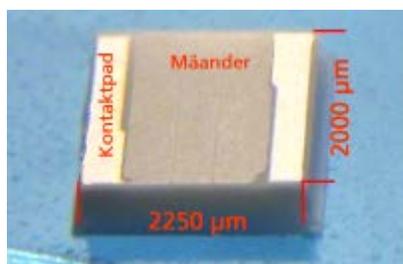


Abbildung 2-1
Platindünnschichtsensor in SMD-Bauweise (surface-mounted device) von UST Umweltsensortechnik GmbH.

Platindünnschichtsensoren werden durch die DIN EN 60751 klassifiziert. Sie können in sehr rauen und extremen Umgebungen eingesetzt werden. Der nach DIN-Norm klassifizierte Temperaturbereich wird zwischen -200°C und +1000°C angegeben. Der Einbau

solcher Temperaturfühler in die Straße ist grundsätzlich möglich, da sie den Einbautemperaturen von Asphalt bis zu 200°C standhalten.

2.1.2 Bodenfeuchte

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 Widerstandes zwischen den Elektroden besteht die Möglichkeit, den Salzgehalt, also die Salinität, zu berechnen. Dabei wird das Phänomen genutzt, 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 welches die Messwerte „angefittet“ werden, um die Ionen-Konzentration zu ermitteln. Aufgrund der hohen Komplexität und Nichtlinearität eines elektrochemischen Systems sind Ersatzschaltbilder aber immer nur eine Näherung, für viele Anwendungen bilden sie jedoch ein gutes Modell der Wirklichkeit. Das Messprinzip beruht darauf, dass Änderungen einer angelegten Spannung (bzw. Stroms) zu einer Veränderung der örtlichen Verteilung der Ionen führen, bis ein neuer stabiler Zustand erreicht worden ist. Die Reaktanden benötigen eine gewisse Zeit, bis sie einen neuen, stabilen Zustand erreicht haben. Dieses Phänomen wird bei der Impedanzspektroskopie genutzt, um die Ionenkonzentration und somit den pH-Wert zu ermitteln [3].

Die Integration eines handelsüblichen Sensors zur Messung des pH-Wertes (z.B. ISFET) in ein miniaturisiertes System zur Straßenzustandsbestimmung ist nicht möglich. Ein solcher Sensor bedarf einer Referenzelektrode oder Referenzkammer, die nicht realisierbar ist.

Das Konzept aus einer Veröffentlichung von Mirjana Maksimovic et al. [4], eines auf LTCC-Substrat (Low Temperature Cofired Ceramic) gefertigten, kapazitiven Sensors für die Messung der Feuchte in Baustoffen, zeigt die Möglichkeit eines direkt im Gehäuse integrierten Sensors (Abbildung 2-2). Die Übertragung in den Straßenunterbau ist mit dieser Technologie möglich, da das Material LTCC äußerst robust gegen thermischen und mechanischen Stress ist. Im Kapitel 2.4 „Integration der einzelnen Systembestandteile und Einbringen des Sensorsystems in die Straßenbefestigung“ wird genauer auf die Möglichkeit eingegangen, LTCC als Gehäusematerial einzusetzen. Das Verwenden von Interdigitalstrukturen ist eine einfache Methode, über die Kapazität auf den Feuchtegehalt des Bodens zu schließen. Die Sensorelektroden bilden die Platten eines Kondensators, das umgebende Medium das Dielektrikum. Trockener Boden besitzt eine Dielektrizitätskonstante Epsilon von etwa 4. Für Wasser gilt ein Epsilon von 81. Über einen Algorithmus ist somit direkt von der Kapazität auf den Feuchtegehalt des Bodens zu schließen. Ein weiterer Vorteil solcher Strukturen ist, dass sie direkt ins Gehäusematerial zu integrieren sind. Sowohl auf LTCC als auch auf leiterplattenbasiertem Substrat können die Interdigitalstrukturen direkt im Material gefertigt werden. Der Sensor ist somit in Kontakt mit dem umgebenden Medium, die Auswerteelektronik ist im Innern des Gehäuses untergebracht und über Durchführungen mit dem Sensor verbunden. Als Auswertechip für die Feuchtesensorstrukturen kommt der AD7746 zum Einsatz. Der AD7746 ist ein 24-Bit Kapazität-zu-Digital-Wandler (Capacitive to Digital Converter, CDC) der Firma Analog Devices mit einer Genauigkeit von 4 fF und einer Auflösung von 4 aF. Die zwei Messkanäle des ICs können sowohl einpolig als auch differentiell betrieben werden. Es besteht somit die Möglichkeit, neben einem Feuchtesensor noch weitere kapazitive Sensoren wie beispielsweise kapazitive Dehnungsmessstreifen (DMS) anzuschließen und auszulesen. Der Energieverbrauch solcher Sensoren

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. Die Leistung des AD7746 liegt im aktiven Mode bei etwa 2 mW [5]. Da die Feuchtemessung nur ein- bis zweimal am Tag erfolgen soll, bleibt der Energieverbrauch jedoch minimal.

Sensoren zur Erfassung des strukturellen Straßenzustandes

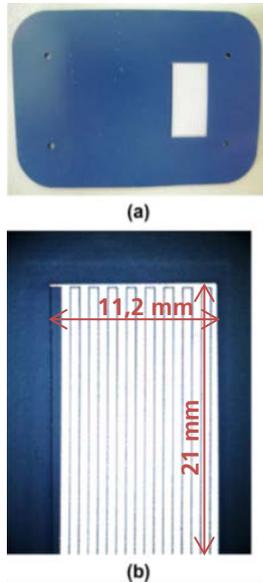
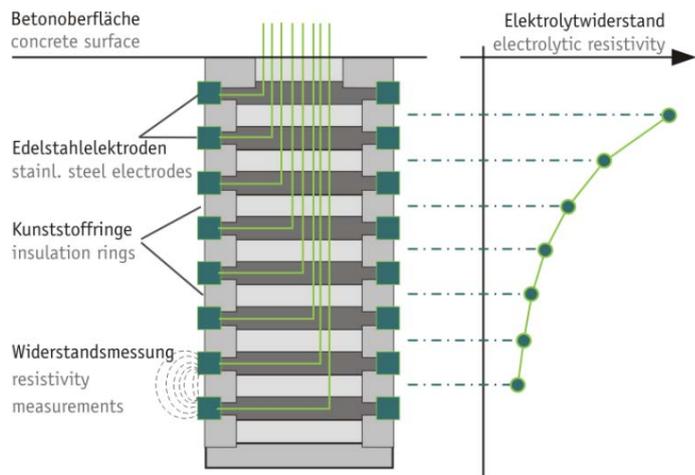


Abbildung 2-2
Abbildung a) zeigt den gefertigten Feuchtesensor auf LTCC-Substrat. In
Abbildung b) sind die Interdigitalstrukturen des Sensors im Zoom gezeigt [4].

Die Feuchtemessung über eine resistive Messmethode erfolgt unter Verwendung einer Multiringelektrode. Die Firma SENSORTEC GmbH beispielsweise fertigt Multiringelektroden aus 8 Edelstahlringen mit einer Dicke von 5 mm und einem Achsabstand von 5 mm mit zwischenliegender PE-Isolierung (Abbildung 2-3). Daraus ergibt sich eine Gesamtlänge der Elektrode von etwa 90 mm. Diese Maße sind für die Anwendung in dem hier angestrebten Prototyp zu groß. Eine Verringerung der Dicken von Edelstahl- und Kunststoffringen oder eine Verringerung der Anzahl der Ringe würde jedoch zur gewünschten Größe des Sensors führen. Durch Messung des Wechselstromwiderstands zwischen zwei benachbarten Ringen kann ein Widerstandsprofil über die Einbautiefe des Sensors aufgezeichnet werden, das unter Verwendung von Kalibrierkurven einem Feuchteprofil entspricht [6].

Die Messungen des Widerstandsprofils können beispielsweise von einem AD5933 von Analog Devices übernommen werden. Der IC ist ein 12-Bit Impedanz-Wandler und wird über eine I²C-Schnittstelle mit einem Mikrocontroller verbunden. Der Verbrauch im Power-Down-Mode beträgt lediglich 0,7 μ A. Im Normal-Mode erhöht er sich jedoch auf bis zu 15 mA bei einer Versorgungsspannung von 3,3 V. Da die Messung der Bodenfeuchte jedoch nur maximal zwei Mal am Tag erfolgen soll, könnte dies akzeptiert werden [7]. Dieser Feuchtesensor wird bereits bei der Bestimmung der Feuchteverteilung in Betonrandzonen eingesetzt.



Sensoren zur Erfassung des strukturellen Straßenzustandes

Abbildung 2-3
Multiringelektrode mit acht Edelstahlelektroden mit einem Achsabstand von 5 mm und zwischenliegender Kunststoffisolierung [6].

In einer Veröffentlichung von Brameshuber et al. [8] kommt ebenfalls eine Multiringelektrode zum Einsatz, die zur Überwachung von Betondeckungen eingesetzt wird. Bei dieser Multiringelektrode wurden die Maße der einzelnen Ringe auf 2,5 mm verringert, was die Gesamtlänge des Sensors auf ca. 42 mm verkürzt. Ein Messgerät für AC-Widerstandsmessungen erfasst die Widerstände und erzeugt digitale Ausgangssignale, welche mit einem anschließenden Multiplexer die Datenerfassung und Auswertung ergeben. Sowohl in der Multiringelektrode von SENSORTEC als auch in der Multiringelektrode aus [8] erfolgt das Messen der Temperatur über einen integrierten Pt1.000, um auf die Bodenfeuchte schließen zu können.

2.1.3 Dehnung

Eine Möglichkeit, Druckmessungen durchzuführen, bieten Dehnungsmessstreifen (DMS). Es existieren Dünnschicht-, Dickschicht- und Halbleiterdehnungsmessstreifen. Die Mehrzahl der kommerziell erhältlichen DMS arbeitet nach dem Prinzip der Änderung des elektrischen Widerstandes anhand einer mechanischen Verformung. Am häufigsten werden DMS in Halb- oder Vollbrücken geschaltet, um die Genauigkeit der Messung zu erhöhen.

Der Lehrstuhl für Aufbau- und Verbindungstechnik von Prof. Dr. Jürgen Wilde am Institut für Mikrosystemtechnik der Universität Freiburg beschäftigt sich seit vielen Jahren mit der Entwicklung und Herstellung sowohl von resistiven als auch von kapazitiven Dehnungsmessstreifen. Im Folgenden wird ein sich in der Entwicklung befindlicher Smart-DMS vorgestellt, der Sensorelement und -elektronik sowie ein Funkmodul vereint. Das Smart-DMS-System ist noch nicht kommerziell erhältlich. Des Weiteren wird ein kapazitiver DMS vorgestellt, der sich aufgrund seiner Realisierung auf einem flexiblen Substrat und seinem minimalen Energieverbrauch besonders für die Integration auf einem RFID-Sensorlabel eignet.

Der leistungsarme Smart-DMS vereint einen resistiven Dehnungsmessstreifen, Energiespeicherung, Signalverarbeitung, Datenspeicherung und eine drahtlose Datenübertragung über RFID (Abbildung 2-4). Die Realisierung des Prototyps erfolgt auf einer Standard-Leiterplatte. Der fertige Sensor soll auf einem biegsamen Foliensubstrat entstehen [9].

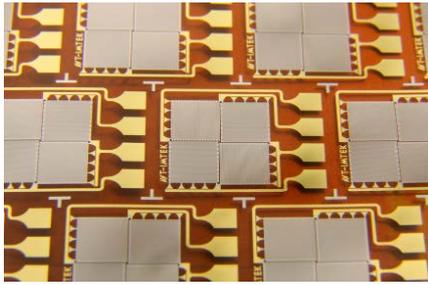


Abbildung 2-4
Oben: Auf Polyimid
prozessierte DMS-
Vollbrücke.



Unten: Smart-DMS-Prototyp
auf einem Platinensubstrat
gefertigt [9].

Dieses System eignet sich durch seine flexible Bauweise und den extrem niedrigen Energieverbrauch für den Einsatz als drahtlose Zustandsüberwachung etwa von schwer erreichbaren Maschinenbauteilen. Die auf Polyimidfolie prozessierten Dehnungsmessstreifen sind als Vollbrücke geschaltet. Mit Grundwiderständen zwischen 30 kΩ und 200 kΩ sind sie sehr hochohmig im Vergleich zu kommerziellen DMS, deren Nennwiderstand zwischen 100 Ω und 1 kΩ liegt. Die Leistungsaufnahme kann somit stark reduziert werden. Die Charakterisierung der Sensoren ergab einen K-Faktor von 2,1. Der K-Faktor ist ein Maß für die Dehnungsempfindlichkeit des Sensors (relative Widerstandsänderung pro Dehnung). Die vorgestellten Tests ergaben einen sehr geringen Temperatureinfluss auf die Messungen, was die angegebene Temperaturempfindlichkeit von -0,3 mV/V/100K bestätigt. Die dazu entworfene Elektronik wurde mit einem UHF-RFID-Frontend für 868 MHz erweitert. Durch die Auswahl geeigneter Niedrigenergie-Bauteile wird der Leistungsverbrauch des Gesamtsystems gezielt reduziert [9]. Der CC430 von Texas Instruments beispielweise ist eine monolithische Integration von Mikrocontroller und Funkchip. Im Standby-Modus ist ein Stromverbrauch von 2 μA angegeben, im Empfangsmodus sind es 15 mA [10]. Die Leistungsaufnahme des Gesamtsystems wurde dokumentiert und mit kommerziellen Dehnungsmessstreifen verglichen [10]. Tabelle 2-1 zeigt den Vergleich bei einer Versorgungsspannung von 2 V.

Variante	Kommerziell erhältliche DMS	Hochohmige Folien-DMS
Grundwiderstand	10 bis 1 kΩ	30 bis 200 kΩ
Leistung Elektronik	≤ 1 mW	≤ 1 mW
Leistung Sensor	≥ 4 mW	≤ 0,13 mW
Gesamtleistung	5 mW	1.1 mW

Tabelle 2-1
Leistungsaufnahme des Smart-DMS-Systems im Vergleich zu kommerziellen DMS [9].

Trotz des hohen Widerstandes des hier vorgestellten Dehnungsmessstreifens ist der Energieverbrauch für eine dauerhafte Anwendung in der Straße zu hoch. Aufgrund dessen ist eine weitere Arbeit des Lehrstuhls für Aufbau- und Verbindungstechnik von Prof. Jürgen Wilde weitaus interessanter. Der Lehrstuhl befasst sich momentan mit der Entwicklung von kapazitiven Dehnungsmessstreifen. Der Vorteil des kapazitiven Prinzips liegt in der Leistungsaufnahme. Der Sensor an sich benötigt keine Energie. Der Leitungsaufwand beschränkt sich auf den Verbrauch des Auswertechip, dem Kapazität-Digital-Wandler, welcher die Datenverarbeitung übernimmt. Speziell für Anwendungen

auf RFID-Transpondern spielt dieser Faktor die ausschlaggebende Rolle. Um die Lebensdauer eines batterieunterstützten, semi-aktiven Systems zu verlängern, muss das Energiemanagement optimiert werden. Zusätzlich ist der DMS als Halbbrücke geschaltet, um den Feuchteinfluss zu minimieren. Der eigentliche Sensor besteht aus Interdigitalstrukturen von 45 µm Breite in einem Abstand von 15 µm zueinander, womit eine maximale Dehnungsempfindlichkeit des Systems mit einem K-Faktor von -2,3 erreicht werden konnte. Als Trägermaterial wurden Polyimid und LCP (Flüssigkristall Polymer) untersucht, wobei sich LCP als Favorit herauskristallisiert (Abbildung 2-5). Die Verwendung von LCP sowohl als Träger als auch als Kapselmaterial konnte den Einfluss von Feuchte reduzieren.

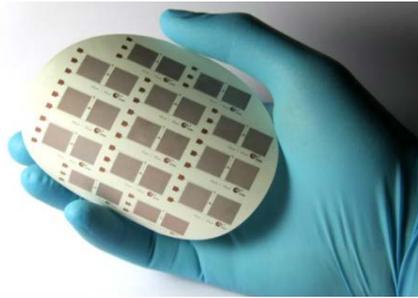


Abbildung 2-5
Prozessierte kapazitive Dehnungsmessstreifen auf LCP-Folie [11].

Die Halbbrückenschaltung minimiert den Einfluss der Umgebungstemperatur und liefert ein nahezu temperaturunabhängiges Ausgangssignal. LCP ist außerdem bis zu einer Temperatur von 300°C beständig [11].

Als Auswerte-IC kommt auch hier der AD7746 von Analog Devices zum Einsatz. Somit ergibt sich im Vergleich zum hochohmigen Dehnungsmessstreifen folgender Energieverbrauch (Tabelle 2-2).

Variante	Hochohmige Folien-DMS	Kapazitive DMS
Leistung Elektronik	≤ 1 mW	≤ 700 µW
Leistung Sensor	≤ 0,13 mW	0 mW
Gesamtleistung	1,1 mW	≤ 700 µW

Tabelle 2-2
Leistungsaufnahme des Smart-DMS-Systems im Vergleich zu kapazitiven DMS.

Um überhaupt mit einem DMS die Dehnung messen zu können, ist es zudem notwendig, den Zusammenhang zur Mechanik zu beachten. Der DMS muss auf einem flexiblen Untergrund befestigt werden, um die Bewegung im Boden detektieren zu können. Im fertigen System muss hierfür eine Art Brücke oder Steg im Gehäuse entstehen, welcher dann als Biegebalken für die Integration des DMS zur Verfügung steht. Leiterplattenbasiert kann durch einfaches Ausdünnen des FR4- Materials ein solcher Biegebalken entstehen.

LTCC ist mit einem E-Modul von < 100 GPa relativ steif. Im Herstellungsprozess, welcher in Kapitel 2.4 „Integration der einzelnen Systembestandteile und Einbringen des Sensorsystems in die Straßenbefestigung“ erläutert wird, können durch die Prozessschritte Stapeln und Laminieren verschieden strukturierter Keramikfolien die unterschiedlichsten Strukturen hergestellt werden. So können beispielsweise Biegebalken oder Membranen im Herstellungsprozess des Gehäuses direkt integriert werden. Diese Verformungskörper dienen dann als flexible Grundlage für den kapazitiven Dehnungsmessstreifen.

2.1.4 Druck

Für die Messung der Druckverteilung im Boden wird in einer Veröffentlichung von Makki und Pop-Iliev [12] ein sehr interessantes Projekt vorgestellt. Zur Überwachung des Drucks in Autoreifen kommt ein Drucksensor der Firma Honeywell zum Einsatz [13], 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 [14]. Neben dem Drucksensor müssen noch ein Mikrocontroller (MSP430, Texas Instruments) und ein Transmitter IC versorgt werden (Abbildung 2-6, Abbildung 2-7).

Sensoren zur Erfassung des strukturellen Straßenzustandes

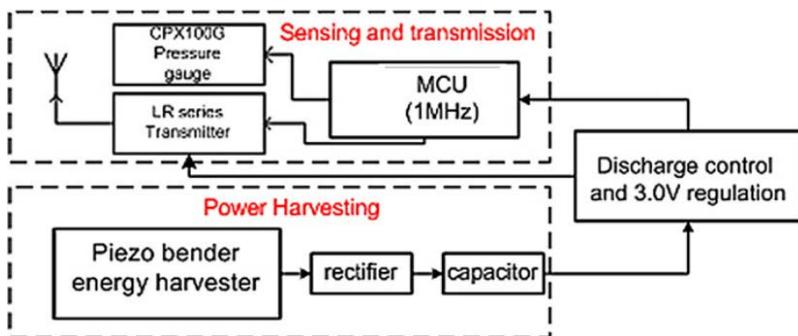


Abbildung 2-6
Blockschaltbild des energieautarken, drahtlos auslesbaren Reifendruckensors aus [12].

Die Anzahl der benötigten Überfahrten ist somit ebenfalls abhängig von der Größe der Speicherkapazität [12]. Die in diesem Projekt eingesetzten Piezoelemente haben einen Durchmesser von 44 mm, was für eine Druckdetektion im Straßenunterbau (Korngröße zwischen 22 mm und 32 mm) fast schon zu groß ist. Eine weitaus kompaktere Bauweise weisen die im späteren Bericht erwähnten PiezoEN-Wandler auf, an denen das Fraunhofer IIS arbeitet und welche unter anderem zur dauerhaften Strukturüberwachung an Brücken eingesetzt werden.

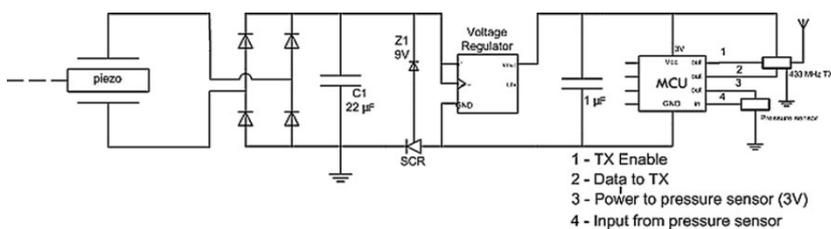


Abbildung 2-7
Schaltplan des Reifendruckensors aus [12].

Alternativ zur oben vorgestellten Schaltung zur Nutzung piezoelektrisch erzeugter Signale stellt ein speziell für diese Anwendung entwickelter IC von Linear Technology die kompaktere und passendere Lösung für den Einsatz in der Straße dar. Der LTC3588-1 vereint einen verlustarmen Vollwellen-Brückengleichrichter und einen wirkungsgradstarken Abwärtswandler in einem Bauteil [15]. 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. Seine Ausgangsspannung ist auf vier feste Werte programmierbar, der interne DC/DC-Abwärtswandler kann bis zu 100 mA Dauerausgangsstrom und noch höhere Pulsströme liefern. Im Schlafmodus zieht der IC einen vernachlässigbar kleinen Strom von 950 nA. Seine kleine Bauweise von 3 mm x 3 mm ist ein weiterer Vorteil für die Integration in der Straße [16].

Prinzipiell ist das hier vorgestellte System in dieser Konfiguration auch auf den Einbau in die Straße übertragbar. Die Überfahrvorgänge durch LKWs dienen als Energie-lieferant. Außerdem können diese Überfahrvorgänge gezählt werden. Da der Mikrocontroller eine gewisse Aufweckzeit benötigt, im Falle eines MSP430 von Texas Instruments ist die Aufweckzeit aus dem Standby Mode kleiner $1 \mu\text{s}$, könnte die erste Achse eines LKWs als „Aufweckimpuls“ dienen. Da das größte Gewicht auf der zweiten Achse eines LKWs liegt, ist das System somit schon aktiv und messbereit. Nach jeder Überfahrt „schläft“ das System und wird durch eine neue erste Achse wieder in den aktiven Modus versetzt. Idealerweise liegt der Schwellwert so, dass PKWs nicht detektiert werden und damit die Datenmenge auf relevante Belastungen reduziert wird. Durch das Programmieren dieser bestimmten Druckschwellgröße wird das Überfahren durch Autos zwar als Energiequelle genutzt, das System wird aufgrund ihres geringeren Gewichts jedoch nicht "aufgeweckt".

Als Alternative zum Drucksensor von Honeywell, der für eine Druckmessung in der Straße nicht geeignet ist, könnte ein piezoresistiver Drucksensor auf Keramikbasis der Firma Metallux 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 [17].

2.1.5 Beschleunigung

Der Markt an MEMS-Beschleunigungssensoren ist enorm groß. Unter anderem bieten Bosch Sensortec, Freescale oder STMicroelectronics MEMS-Sensoren an. Die Entscheidung fiel in diesem Fall auf den LIS3DH, einen 3-Achsen-Beschleunigungssensor von STMicroelectronics [18]. Dieser IC benötigt eine Versorgungsspannung zwischen 1,7 V und 3,6 V und misst Beschleunigungen bis $\pm 16 \text{ g}$. Im low-power Mode zieht er einen minimalen Strom von $2 \mu\text{A}$ (Abbildung 2-8). Über digitale Schnittstellen, wie I²C oder SPI, lässt er sich mit einem Mikrocontroller verbinden. Ein ereignisgesteuerter Interrupteingang erlaubt ein Aufwecken innerhalb von einer Millisekunde. Im aktiven Mode verbraucht er maximal $11 \mu\text{A}$. Die Ausgangsdatenrate bewegt sich zwischen 1 Hz und 5 kHz, was einer Systembandbreite von maximal 2,5 kHz entspricht. Der IC ist in LGA-16-Package mit den Maßen $3 \times 3 \times 1 \text{ mm}^3$ zu bekommen.

MEMS-Beschleunigungssensoren haben den Vorteil geringer Herstellungskosten, hoher Empfindlichkeit und hoher Zuverlässigkeit. Aufgrund der geringen Größe zeichnen sie sich zudem durch hohe Messgeschwindigkeiten aus. MEMS-Beschleunigungssensoren bieten ein hohes Potential zum Einbau in den Straßenbelag bzw. Unterbau.



Abbildung 2-8
3-Achsen-
Beschleunigungssensor
LIS3DH von STMicro-
electronics[19].
Die Leistungsauf-
nahme konnte im
Vergleich zu anderen
kommerziellen
Beschleunigungs-
sensoren von $250 \mu\text{A}$
auf $2 \mu\text{A}$ verringert
werden.

2.1.6 Messwerterfassung

Mikrocontroller

Der Mikrocontroller übernimmt im Gesamtsystem den verwaltungstechnischen Teil. Sämtliche Sensorwerte laufen hier zusammen, werden bewertet und verrechnet. Die Weitergabe an das RFID-Frontend erfolgt nach abgeschlossener Datenverarbeitung. Für drahtlose Anwendungen eignet sich besonders die MSP430-Reihe von Texas Instruments. In diesem Fall wurde ein Derivat der MSP430F2xx-Serie ausgesucht. Diese Bauteile verbrauchen äußerst wenig Strom und verfügen über eine sehr schnelle Aufweckzeit aus dem Standby in den aktiven Modus von kleiner eine Mikrosekunde. Besonders für das Messen der Überfahrungen durch LKWs ist diese schnelle Aufwachzeit von Vorteil. Die Derivate der 2er-Serie beinhalten außerdem bis zu 120KB + 256 Flash Memory [20].

Mögliche übertragbare Datenmenge

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

Geht man davon aus, dass im späteren Messfahrzeug die Antenne des Lesegerätes den gesamten Unterbau des Fahrzeuges umschließt und dass das Fahrzeug in etwa eine Länge von 5 m aufweist (entspricht ungefähr einem VW-Bus, Modell T5), so beträgt die Zeit, die das Lesegerät zum Auslesen des Sensortransponders zur Verfügung hat:

$$\frac{5 \text{ m}}{22 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 0,227 \text{ s}$$

Aus den später noch erwähnten Feldtests, durchgeführt durch die Firma Scemtec Transponder Technologies, ergibt sich für den 13,56 MHz-Bereich eine maximale Datenübertragungsrate des Lesegerätes von 1700 Bytes/s. In 227 ms sind somit 386 Byte übertragbar. 386 Byte entsprechen 3087 Bit, was eine maximale Anzahl von 308 Messwerten à 10 Bit in 227 ms ergibt.

Für die Realisierung des Prototyps ist es zunächst einfacher, Empfänger und Antenne in einem Anhänger zu integrieren. Mögliche elektromagnetische Störungen des Fahrzeugmotors können so umgangen werden. Bei einem einachsigen Anhänger ist eine Antennenlänge von 5 m ebenso realisierbar, da sie nach hinten über den Anhänger hinaus reichen könnte. Da die Maße der Antenne zur Seite hin durch die Reifen begrenzt ist, wird sie definitiv nicht mittig über der Rollspur fahren. Die Sensoren jedoch sollten für brauchbare Messergebnisse direkt in der Rollspur in etwa 30 cm Tiefe eingebettet sein, um die Belastungen auf die Straße messen zu können. Die Bodenhöhe eines PKW-Anhängers beträgt zwischen 200 mm und 400 mm. Die im nächsten Kapitel gezeigten Feldtests zu möglichen Reichweiten von in der Straße eingesetzten Transpondern zeigen, dass diese Leseabstände mit einem Long-Range-Lesegerät mit einer Ausgangsleistung bis 10 W möglich sind. Da keine gerichtete Antenne verwendet werden soll und sie somit in alle Richtungen sendet, stellt der versetzte Leseabstand zwischen Antenne und Sensor kein Problem dar. In Feldtests muss gezeigt werden, inwiefern sich das Metall der Achsen und des übrigen Anhängermaterials auf die Performance der Empfängerantenne auswirkt. Es sollen zunächst ein Empfänger und eine Antenne eingebaut und damit die maximal auszuweisende Datenmenge und Sensoranzahl ermittelt werden.

Aufgrund der geringen Anzahl von übertragbaren Messwerten bei 80 km/h ist die Menge an abgespeicherten Daten in Maßen zu halten. Es muss festgelegt werden, wie oft und wie genau die unterschiedlichen Sensorwerte auszulesen und abzuspeichern sind. Ausreichend wird es sein, die Umweltparameter Temperatur und Feuchte maximal zweimal am Tag zu erfassen und zu speichern.

Weitere Messdaten werden nur im Fall einer Schwellwertüber- bzw. -unterschreitung in den Speicher abgelegt. Die Messung von Dehnungs- oder Druckspannung sowie Beschleunigung erfolgt ereignisgesteuert, z.B. durch das Signal eines Piezogenerators beim Überfahren durch einen Kraftwagen. Die Zählstatistik für Autobahnen geht von täglich mehreren 1000 Überfahrten durch Fahrzeuge des Schwerlastverkehrs aus. Um nicht mehrmals täglich den Sensortransponder auslesen zu müssen, können hier vorerst nur die höchsten Belastungen gespeichert und übermittelt werden.

Das Erfassen von Salzgehalt erfolgt, wie oben bereits erwähnt, mit dem Messen der Bodenfeuchte. Das Abspeichern des Wertes kann dann nur im Falle einer Über- oder Unterschreitung eines bestimmten Grenzwertes erfolgen oder auch zu festen Zeitpunkten, wie dies im Falle von Temperatur und Feuchte gehandhabt wird. Tabelle 2-3 zeigt eine Übersicht über die vorgesehenen Messintervalle. Schwellwerte der einzelnen Messgrößen werden noch definiert.

Messgröße	Messintervall
Umgebungsparameter:	
Temperatur	Täglich
Feuchte	Täglich
Salinität	Täglich
Mechanische Größen:	
Dehnung	Ereignisgesteuert
Druckspannung	Ereignisgesteuert
Beschleunigung	Ereignisgesteuert

*Tabelle 2-3
 Übersicht der zu messenden physikalischen
 Parameter mit vorgesehenem Messintervall.*

Aus den oben genannten Messintervallen kann nun auf die Ausleseintervalle geschlossen werden. Die vorher berechnete Anzahl maximal auszulesender Messwerte bei 80 km/h lag bei 308 Werten. Geht man davon aus, Temperatur, Feuchte und Salinität zweimal am Tag abzuspeichern, bleiben 302 Messwerte pro Tag übrig, um Werte für Dehnung, Druckspannung und Beschleunigung abzuspeichern. Speichert man pro darüberfahrenden LKW alle drei Werte, so kann man pro Tag nur noch 100 LKWs erfassen, bevor das Fahrzeug mit Lesegerät zum Einsatz kommen müsste. Auch wenn nur die schwersten Belastungen abgespeichert würden, wäre trotz allem ein tägliches Auslesen von Nöten.

Kennwert

Die bereits erwähnte geringe Übertragungsrate für das Auslesen der Sensoren erfordert eine Zusammenfassung aller erfassten Daten. Ziel ist es, einen Kennwert zu schaffen, der die gemessenen Werte vereint. Diese Vorauswertung soll bereits im System erfolgen, so dass die zu übertragende Datenmenge minimiert wird. Durch experimentelle Ermittlungen soll herausgefunden werden, mit welcher Gewichtung die

einzelnen Parameter, wie Temperatur, Feuchte, Salinität, Dehnung, Druckspannung und Beschleunigung im Zusammenhang stehen.

Sensoren zur Erfassung des strukturellen Straßenzustandes

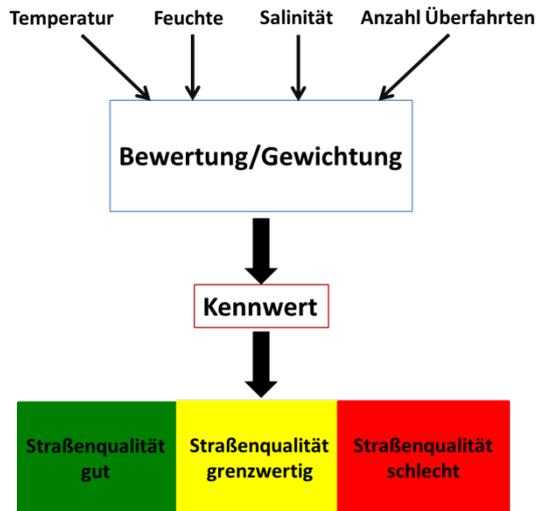


Abbildung 2-9
Ermittlung des Kennwertes zur strukturellen Bewertung des Straßenzustandes.

Typische Straßenschäden, wie beispielsweise Schlaglöcher, treten häufig in den Wintermonaten auf. Durch Risse in der Deckschicht dringt Wasser in die unteren Schichten ein. Bei Frosttemperaturen gefriert das Wasser, dehnt sich aus und bricht die Oberfläche noch weiter auf. Durch das Ansteigen der Temperaturen zum Ende des Winters schmilzt das eingedrungene Wasser, ein Hohlraum unter der Deckschicht entsteht. Dieser Hohlraum kann nun durch das Überfahren in sich zusammenbrechen, in der Folge entsteht ein Schlagloch. Die anfängliche Ursache eines solchen Schadens liegt wahrscheinlich in einem erhöhten Wassergehalt im Boden in Kombination mit tiefen Temperaturen. Das Auswölben der Straße ist sicherlich mit Dehnungsmessstreifen zu erkennen. Eine zur Bewertung erforderliche Grenzdehnung ist noch zu definieren und muss unter anderem in Feldtests ermittelt und ausgewertet werden. Weiterhin führt die Anzahl der LKW-Überfahrten zu einem Kennwert, der in die Bewertung des Straßenzustandes eingehen muss.

Modellbasierter Einsatz von Zustands-Sensorik für Straßen

In den vorherigen Kapiteln wurden im Wesentlichen die Sensoren behandelt, die zur Erfassung und Aufzeichnung des Ist-Zustands von Straßen geeignet sind. In einer der Messwerterfassung nachgeschalteten Prozessierung ist jedoch 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.

In der englischen Literatur werden die technischen Konzepte hierzu unter den Schlagworten „Condition Monitoring“ und „Prognostic Health Monitoring“ behandelt [21,22]. Obwohl derartige Konzepte in Luftfahrt, Maschinenbau, Mechatronik, Elektronik [23] und im Hochbau bereits sehr verbreitet sind, existieren nur relativ wenige Forschungsergebnisse und Literatur in Bezug auf den Straßenzustand [24].

Daher wird das Konzept auf Basis bisheriger Erfahrungen der Autoren kurz erläutert. Grundsätzlich sind dabei mehrere Herangehensweisen möglich, die am folgenden Wirkungsdiagramm noch einmal verdeutlicht werden: (Tabelle 2-4).

Belastungen	→	Abnutzungserscheinungen	→	Zustandsänderung
Globale Lasten <ul style="list-style-type: none"> ▪ Zahl der Fahrzeuge, Masse ▪ Klima ▪ Temperatur Spezifische Material-Beanspruchungen <ul style="list-style-type: none"> ▪ Mechanische Spannung ▪ Verformung ▪ etc. 	→	Abnutzungsmodell nutzt Belastungen, um Änderungen der Zustandsgrößen kinetisch im Sinne einer Reaktionsrate zu modellieren <ul style="list-style-type: none"> ▪ Alterung (Zeit, Temperatur, Chemie) ▪ Verformung (Mechanische Lasten, Temperatur) ▪ Ermüdung (Mechanische Lasten) ▪ Korrosion (H₂O, Ionen) ▪ Verschleiß (Mechanische Lasten) 	→	Direkte Zustandsindikatoren <ul style="list-style-type: none"> ▪ Chemischer Zustand ▪ Ionengehalt (NaCl, Salinität) ▪ Risslänge ▪ Dichte, Hohlraumanteil ▪ Wassergehalt, ▪ Festigkeit, Bruchdehnung Indirekte Indikatoren <ul style="list-style-type: none"> ▪ Elektrische Leitfähigkeit ▪ Dielektrisches Verhalten ▪ Schallgeschwindigkeit, ▪ Mechanische Nachgiebigkeit

Tabelle 2-4
Wirkungsdiagramm

Im Fall der Nutzung direkter Indikatoren für den Zustand werden diese Parameter sensorisch erfasst. Probleme kann jedoch die Erfassung selbst bereiten. Insbesondere die Aufnahme aussagefähiger mechanischer Kenngrößen ist eher in der makroskopischen Baustoffprüfung als in der Sensorik einzuordnen. Ein Vorteil ist jedoch, dass Abnutzungserscheinungen in der Regel graduell und relativ langsam verlaufen und daher nur mit sehr geringen Raten zu überwachen und zu registrieren sind.

Dieser Vorteil ist auch bei den indirekten Indikatoren für den Zustand nutzbar. Indirekte Merkmale sind leichter messbar als direkte Indikatoren. So kann die elektrische Leitfähigkeit summarisch Aussagen darüber erlauben, dass und möglicherweise wie viel Wasser vorhanden ist, dass dieses Ionen enthält (NaCl, CaCl, KCl) und dass offenbar auch Risse gegeben sind [24].

Andere Beispiele für indirekte Indikatoren sind die Änderung des dielektrischen Verhaltens durch chemische Alterung bzw. Oxidation organischer Bestandteile oder die Erhöhung der Nachgiebigkeit (Weg/Kraft) durch innere Defekte in Belag oder Unterbau. Hieraus abgeleitete Aussagen zum Zustand sind jedoch nur zulässig, wenn ein validiertes Modell existiert, das Schadensbilder wie beispielsweise Rissbildung mit der Leitfähigkeit korreliert [24]. Ein solches Indikatormodell verknüpft also nutzungsrelevante Merkmale der Straße mit physikalischen oder chemischen Indikatorgrößen. Solche Modelle müssen aber zwingend auf der Basis entsprechender Untersuchungen als Kalibrationsgrößen vorliegen. Der Einsatz der Sensorik muss sich auf dieses Vorwissen zum Modell stützen.

In vielen technischen Systemen ist jedoch die Zustandserfassung im oder am Material äußerst aufwändig. Man nutzt daher den Zusammenhang zwischen einer definierten Lebensdauer - bei der der Zustand defekt/unbrauchbar ist - und der Summe der originären Belastungen. Zur Umsetzung des Konzepts werden alle lebensdauerrelevanten Einwirkungen lückenlos sensorisch erfasst und aufgezeichnet. Auf Basis eines Prognosemodells wird anschließend berechnet, wie hoch der Lebensdauerverbrauch, also der Grad der Abnutzung durch das bisherige Belastungsprofil ist. Ein typisches Beispiel für ein solches Prognosemodell auf Basis der Belastungen ist die Wöhlerkurve, die die Zahl

der Belastungen bis zum Ausfall mit der Höhe der zyklischen mechanischen Spannung oder Dehnung verknüpft. Im Deutschen werden die beschriebenen Konzepte auch als „Lebensdauerzähler“ bezeichnet.

Das reine Zählen von Belastungsereignissen reicht in der Regel nicht aus, da ja die Lebensdauer nichtlinear und zumeist reziprok lastabhängig ist. Es ist also notwendig, die Höhe aller einzelnen Belastungen zu ermitteln und die Höhe der Belastungen zur Gewichtung der inkrementellen Abnutzung heranzuziehen. Diese Belastungen sind in der Regel zeitlich variabel und mehrdimensional. Bei einer Asphaltstraße kann man beispielsweise von den wesentlichen Einflussgrößen Achslast und Temperatur ausgehen.

Eine stark vereinfachtes Lebensdauermodell, bei dem die Zahl der Durchfahrten bis zum Ausfall progressiv direkt eingeht und bei dem hohe Temperatur zu stärkerer Verformung führt, könnte dann als Ermüdungsmodell wie folgt aussehen:

$$N_A = K * L^{-n} * e^{Q/RT}$$

Zumindest die drei Modellkoeffizienten – der kinetische Faktor K, der Ermüdungsexponent n und die Aktivierungsenergie Q – müssten dann als Grundlage für einen Lebensdauerzähler bekannt sein. N_A wäre dann die Lebensdauerergrenze, also die Zahl der Durchfahrten mit der konstanten Last L, bei der die Straße defekt ist.

Da aber im realen Fall transiente, unterschiedliche Lasten auftreten, ist die dargestellte Formel nicht ausreichend. Der Sensor muss alle Lastereignisse in einer Datei zusammen mit der dabei herrschenden Temperatur aufzeichnen. So könnten beispielsweise die Ereignisse in einer Last-Temperatur-Matrix gezählt werden. Die Registrierung kann individuell oder in gewichteter Form summarisch erfolgen.

Die Gewichtung der Ereignisse wird in komplexen technischen Systemen häufig auf Basis der bekannten Palmgreen-Miner-Regel vorgenommen, welche den Fall der linearen Schadensakkumulation modelliert [25, 26]. Dabei wird ein Lebensdauerverbrauch D_i („Damage“) durch jedes Abnutzungsereignis i zu Grunde gelegt, der sich aus dem Verhältnis der Zahl der Ereignisse N_i bei einer Temperatur T_i und Last L_i einerseits und der Zahl der jeweiligen Ereignisse, also Achsdurchgänge, bei den gleichen Bedingungen ergibt.

$$D = \sum_{i=1}^n D_i = \sum_{i=1}^n \frac{N_i(L_i, T_i)}{N_A(L_i, T_i)} \leq 1$$

Alle dieser abstrakten Schädigungen D_i werden zum Gesamtschaden oder Abnutzungsgrad D aufsummiert, der von 0 bis 1 in absoluten Einheiten oder von 0 % bis 100 % bemessen werden kann. Im Idealfall wäre das System Straße bei $D < 1$ noch nutzbar. Wenn das Kriterium $D = 1$ erreicht ist, kann das System per Definition als defekt betrachtet werden. Aus Sicherheitsgründen wird das Grenzkriterium jedoch oft kleiner als 1 gewählt.

Somit kann durch Kombination eines Ermüdungsmodells mit einem Schadensakkumulationsmodell das Monitoring-Konzept für Lebensdauersensoren generiert werden. Der Sensor muss die relevanten Belastungen wie Achskraft und Temperatur messen und so aufzeichnen, dass damit jederzeit eine „Damage“-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 [25, 26] auch für multivariante Belastungen. Derartige Zähler können auf heutigen, mikrocontrollerbasierten Sensoren implementiert werden und den Lastverlauf

kontinuierlich verfolgen. Zugleich wird hierdurch die zu speichernde Datenmenge signifikant vermindert.

Sensoren zur Erfassung des
strukturellen Straßenzustandes

Zusammenfassend existieren also drei wesentliche Grundkonzepte für das sensorische Condition Monitoring von Straßen:

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

Es wird jedoch vorgeschlagen, eine Kombination dieser Konzepte anzustreben, um unterschiedliche Schädigungsszenarien sicher zu erfassen. In [22] wird darauf hingewiesen, dass Kombinationen von CHM-Verfahren die Erkennungssicherheit erhöhen. Dies kann auch kombinatorisch belegt werden.

2.2

Bereitstellung der Energieversorgung auf kleinstem Raum

Bei der Entwicklung von fernabfragbarer Sensorik muss der Fokus auf semi-passiven Systemen liegen. Semi-passive, auch semi-aktive Transponder genannt, arbeiten mit einer zusätzlichen Batterie, die ausschließlich für die Versorgung der Sensorik gebraucht wird. Hiermit sind stetige 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 jedoch weiterhin passiv und benötigt keine zusätzliche Energie. Das ist ein wichtiger Vorgang, da besonders für die Kommunikation vergleichsweise viel Energie benötigt wird. Selbst Standard low-power RF-Transceiver, wie der CC1101 von Texas Instruments, benötigen im Empfangsmodus um die 15 mA und zum Senden von Daten bis zu 30 mA bei einer 3 V Spannungsversorgung [27].

Arbeitet ein Transponder ohne zusätzliche Batterie, so bezeichnet man ihn als passiven Transponder. Er bezieht seine Energie zum Senden und Empfangen von Daten rein aus dem elektromagnetischen Feld des Lesegerätes. Die kurzzeitige Messung der Temperatur kann nur in Anwesenheit eines Lesegerätes erfolgen. Für den Einsatz im Straßenbau, bei dem kontinuierliche Messungen durchgeführt werden sollen, kommt der rein passive Betrieb nicht in Frage. Weitaus größere Reichweiten sind mit rein aktiven Transpondern möglich. Diese benötigen auch für den Sende- und Empfangsvorgang die Versorgung durch eine Batterie. Im UHF-Bereich beispielsweise erweitert sich die Reichweite von etwa 3 m für einen passiven Transponder auf über 100 m für einen aktiv betriebenen. Da die sensorbasierten Transponder in die Substanz der Straße eingelassen werden sollen, kommt ein Batteriebedarf für die Kommunikation nicht in Frage. Eine Autobahn oder Bundesfernstraße wird mit einer "Lebenserwartung" von circa 30 Jahren gebaut, eine Auswechslung der Batterie, die in einem aktiv betriebenen System in diesem Zeitrahmen nötig wäre, ist somit unmöglich.

Um in einem semi-aktiven System eventuell doch einen Betrieb ohne Batterie ermöglichen zu können, wurden unterschiedliche Ansatzpunkte untersucht. Eine Möglichkeit, das Sensorsystem energieautark zu betreiben, ist, wie oben schon erwähnt, der Einsatz von Piezogeneratoren, die durch mechanische Verformung elektrische Energie erzeugen.

2.2.1 Piezogeneratoren

Grundlagen piezoelektrischer Effekt

Als piezoelektrischen Effekt bezeichnet man die Erzeugung eines elektrischen Feldes durch eine Ladungsverschiebung in einem kristallinen, nichtleitenden Halbleiter mit elektrischem Dipolmoment aufgrund mechanischer Verformung von außen. Umgekehrt bewirkt das Anlegen eines elektrischen Feldes an einen solchen Halbleiter eine mechanische Verformung, was als elektrostriktiver Effekt bezeichnet wird. 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 weitaus höheren piezoelektrischen Koeffizienten als das Standardmaterial Quarz ($d_{\text{PZT}} = 700 \cdot 10^{-12} \text{ As/N}$, $d_{\text{Quarz}} = 2,3 \cdot 10^{-12} \text{ As/N}$) [28].

PiezoEN

Bereitstellung der Energie-
versorgung auf kleinstem Raum

Ein von 2008 bis 2011 vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördertes Projekt nennt sich "PiezoEN – Autarke Energieversorgung über intelligente Piezogenerator-Supercap-Lithium-Akkumulator Mikrosysteme". Unter anderem sind im Projektkonsortium mehrere Fraunhofer Institute (ISC, IIS, IZM, LBF), Bayer Material-Science, Varta und die Firma Wölfel, Beratende Ingenieure GmbH + Co. KG vertreten. Ziel des Projektes war es, einen mikrosystemtechnisch hergestellten, piezo-elektrischen Energiewandler mit zusätzlicher optimierte Energieaufbereitung und -speicherung zu entwickeln (Abbildung 2-10) [29]. Hier wurde ein Gesamtsystem durch monolithische Integration von Piezowandler, Elektronik und Speicher entwickelt und als piezo-elektrisches Material PZT eingesetzt. Der sehr flexible (Biegeradius 10 mm) und zudem sehr dünne (Dicke 100 μm) Wandler weist eine hohe Kapazität von 100 nF/cm² und eine Leistungsausbeute von etwa 50 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ bei 3 Hz Anregung auf [30]. Anwendung finden diese Piezogeneratoren unter anderem in Brücken, wo sie zur Versorgung energieautarker Sensorknoten eingesetzt werden. Diese Sensorknoten sind mit einem Beschleunigungssensor ausgestattet und dienen der dauerhaften Strukturüberwachung. Hier wird die Eigenschwingung der Brücke von ca. 3 Hz genutzt, um permanent Energie für die Versorgung der Sensoren zu erzeugen.

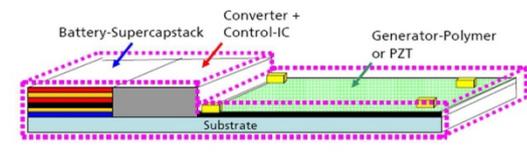


Abbildung 2-10

Neu entwickelter Piezogenerator aus dem Projekt PiezoEN. Der Piezowandler wurde auf PZT-Substrat gefertigt und hat neben einer Batterie und einem Akku auch Wandler- und Steuer-elektronik integriert. Insgesamt kommt das Bauteil auf eine Dicke von 100 μm [30].

Für den Einsatz im Straßenbau, in Autobahnen und Bundesfernstraßen kommen diese Sensoren ebenfalls infrage. 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 Zeitrahmen den Sensor passiert haben. Das Erstellen einer Belastungshistorie mit der Anzahl an Lastwechseln, verursacht durch LKW-Überfahrten sowie minimale und maximale Ereignisse (durch Achsengewicht) können detektiert werden.

Anhand des Lastmodells in Abbildung 2-11 ist zu erkennen, dass von unterschiedlichen Achslasten auf den LKW-Typ rückzuschließen ist.

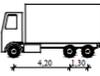
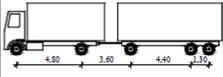
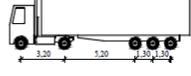
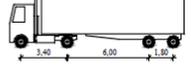
Lkw - Typ	Geometrie und Lastverteilung	Auftritts- wahr- schein- lichkeit [%]	Gesamtgewicht von Fahrzeug und Ladung	
			Mittelwert [kN]	Standardabw. [kN]
Lkw 1	 Fahrzeug Ladung	20,0	50 95	20 40
Lkw 2	 Fahrzeug Ladung	5,0	50 180	20 70
Lkw mit Anhänger	 Fahrzeug Ladung	10,0	135 200	50 70
Sattelzug 1	 Fahrzeug Ladung	40,0	135 230	50 80
Sattelzug 2	 Fahrzeug Ladung	25,0	110 180	40 70

Abbildung 2-11
 LKW-Lastmodell für den Lang-
 streckenverkehr. Hier werden
 unterschiedliche LKW-Typen
 anhand ihrer Geometrie und
 der entsprechenden Last-
 verteilungen aufgezeigt.
 Zusätzlich werden die Auf-
 trittswahrscheinlichkeiten auf
 deutschen Straßen aufgelistet
 [31].

2.2.2 Abschätzung Systemlaufzeit

Um die Systemlebensdauer abschätzen zu können, wurden unterschiedliche Szenarien zur Anzahl von Messzyklen durchdacht. Im Folgenden sind die verwendeten Bauteile und Sensoren in Tabelle 2-5 dargestellt, mit entsprechendem Stromverbrauch im Standby Mode und aktivem Mode.

Bauteil/Sensor	Verbrauch Standby Mode	Verbrauch aktiver Mode
MSP430 - Mikrocontroller	~0,5 μA	500 μA
LIS3DH - Beschleunigungssensor	2 μA	11 μA
AD7746 - CDC	1 μA	700 μA
LTC3588 – Piezoelectric Energy Harvesting Power Supply	950 nA	150 μA
Temperatursensor	0	150 μA
SL13A – HF-RFID-Frontend	0	0 (Energie aus Feld des Lesegerätes)
Feuchtesensor	0	0
Kapazitiver DMS	0	0
Gesamt	4,45 μA	1361 μA

Bereitstellung der Energieversorgung auf kleinstem Raum

Tabelle 2-5
Für den Prototyp ausgesuchte Bauteile mit entsprechendem Stromverbrauch für den Standby- und aktiven Mode.

Im Standby-Zustand des Systems, das mit einer Versorgungsspannung von 3 V auskommen soll, beträgt der Stromverbrauch ca. 4,5 μA . Als mögliche Batterie kommt eine Lithium-Knopfzelle der Firma Varta in Frage. Die CR2450 [32] ist eine 3 V Knopfzelle mit einer Kapazität von 560 mAh. Mit dieser Batterie als Energiequelle ergibt sich mit der Formel

$$t = \frac{Q}{I}$$

t: Zeit [h]
Q: Ladung [Ah]
I: Strom [A]
eine Laufzeit von

$$t = \frac{560 \text{ mAh}}{4,5 \mu\text{A}} = 124444 \text{ h} = 5185 \text{ Tage} = 14,2 \text{ Jahre}$$

Misst man beispielsweise nur zweimal am Tag Temperatur und Feuchte, bedeutet das, dass Temperatursensor, Feuchtesensor mit AD7746 und Mikrocontroller sich für zwei Sekunden pro Tag im aktiven Zustand befinden. Die Laufzeit des Systems verringert sich dadurch auf:

$$T[2s\ ON] = \frac{560\ mAh}{\frac{2}{86400} * 1350\ \mu A + \frac{86398}{86400} * 4,5\ \mu A}$$

$$T[2s\ ON] = 123589\ h = 5149\ Tage = 14,1\ Jahre$$

Bereitstellung der Energie-
versorgung auf kleinstem Raum

Die Laufzeit wird somit um 855 Stunden verkürzt, was bei einer Gesamtlaufzeit von über 14 Jahren kaum ins Gewicht fällt.

Ein dauerhafter ON-Zustand des Mikrocontrollers beispielsweise äußert sich jedoch in einer drastischen Verkürzung der Systemlebensdauer auf:

$$T[ON] = \frac{560\ mAh}{500\ \mu A} = 1120\ h = 46\ Tage$$

Anhand der Beispielsszenarien ist zu erkennen, dass in das Energiemanagement im späteren Prototyp noch einiges an Zeit investiert werden muss.

Es gibt weitaus größere Batterien als eine Standard-Knopfzelle. Varta hat unter anderem einen Lithium-Polymer-Akku im Sortiment, welcher über dreimal so viel Kapazität wie die hier erwähnte Knopfzelle CR2450 verfügt, besitzt jedoch weitaus größere Maße von 65,4 mm x 35 mm x 7,1 mm im Vergleich zu Ø 24,2 mm x 4,6 mm der Knopfzelle [33]. Der Einsatz von Piezoelementen zum „Ernten“ der Bewegungsenergie im Straßenbau und um diese für die Versorgung des Drucksensors und teilweise für die Versorgung des Mikrocontrollers zu nutzen, ist ein erster Schritt, die Laufzeit des Gesamtsystems batterie-unabhängig zu verlängern.

2.3

Sicherstellung der Kommunikation zwischen System und Außenwelt

2.3.1 Überblick Frequenzen

RFID-Anwendungen im niederfrequenten Bereich (Low Frequency, LF) arbeiten typischerweise bei einer Frequenz zwischen 125 kHz und 135 kHz. Durch die Unempfindlichkeit dieser Technik gegenüber Feuchtigkeit und in einigen Fällen auch gegen Metall wird sie häufig für die Zugangskontrolle in Gebäuden und, in Form von Ohrmarken oder Tierchips, zur Identifikation von Tieren und Objekten eingesetzt [34]. Solche Transponder arbeiten unidirektional, d.h. sie sind lesbar, können jedoch nicht mit Informationen beschrieben werden. Im Fall der Tieridentifikation wird mit einem Lesegerät lediglich eine Identifikationsnummer (ID) ausgelesen, welche eindeutig und einmalig einem Tier zugeordnet wird.

Im hochfrequenten Bereich (High Frequency, HF) kommunizieren RFID-Transponder bei einer Frequenz von 13,56 MHz. Diese Anwendung findet großen Einsatz bei sog. Smart Cards und immer häufiger in Bibliotheken als Diebstahlschutz oder für die Zugangskontrolle [35]. Nach der internationalen Standardisierung von RFID-Transpondern von 2001 stellen alle großen Hersteller Transponder in dieser Frequenz nach ISO 15693 her. Diese Norm besteht aus drei Teilen, in denen die physikalischen Parameter, das Signal-Interface sowie das Übertragungsprotokoll geregelt werden [36].

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 Temperatursensorik ausgestattet werden, um den Transport temperaturempfindlicher Güter zu kontrollieren. Denn nicht immer erhält der Empfänger einwandfreie Ware und so lässt sich feststellen, wo die Ursache für den Verderb liegt und wer für den Schaden verantwortlich ist. Das EPCglobal Protokoll gilt als Norm für den UHF-Bereich. Dieser Norm entsprechend vergibt die GS1 Germany (GS – Global Standards) für RFID-Standards eine eindeutige Identifikationsnummer für Güter jeglicher Art. Diese Nummer ist der sogenannte Elektronische Produkt Code (EPC) und entspricht dem Barcode im Strichcodestandard.

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 LKWs auf Autobahnen. Tabelle 2-6 zeigt eine Übersicht der hier vorgestellten gängigen Frequenzen für die RFID-Technologie.

	LF	HF	UHF	Mikrowelle
Frequenzbereich	< 135 kHz	13,56 MHz	868 MHz	2,45 GHz
Reichweite	bis 30 cm	bis 150 cm	bis 3,5 m	
Einfluss Feuchte	kein Einfluss	kein Einfluss	negativ	negativ
Einfluss Metall	gering	negativ	negativ	gering
Norm	ISO 11784/85 ISO 18000-1	ISO 15693 ISO 14443 ISO 18000-3	EPC GEN2 ISO18000-6	ISO 18000-4

Tabelle 2-6
Übersicht über die Frequenzen
der RFID-Technologie.

Induktive Kopplung

Sowohl LF- als auch HF-Systeme arbeiten im Nahfeld nach dem Prinzip der induktiven Kopplung (Abbildung 2-12). Diese Art der Energie- und Datenübertragung erfolgt rein passiv. Die jeweiligen Antennen von Transponder (L_2) und Lesegerät (L_1) dienen in diesem Fall als Spulen, die in einem bestimmten Abstand zueinander positioniert werden müssen. Ein vom Lesegerät erzeugtes Magnetfeld durchdringt die Antenne des Transponders und generiert an dieser zur Induktion eine Spannung, die vom Transponder gleichgerichtet und als Energieversorgung für die Datenübertragung genutzt wird. Ein Kondensator (C_r) parallel zur Antennenspule des Lesegerätes führt mit der Induktivität der Antennenspule zu einem Parallelschwingkreis, der exakt auf die Sendefrequenz ausgerichtet ist. Im Transponder existiert ebenfalls ein Parallelschwingkreis (C_1), ausgerichtet auf dieselbe Frequenz. Die Anwesenheit eines Transponders im Wechselfeld des Lesegerätes führt nun dazu, dass dem magnetischen Feld Energie entzogen wird. Diesen Effekt erkennt das Lesegerät als transformierte Impedanz. Müssen nun Daten übertragen werden, so erfolgt das über die sogenannte Lastmodulation. Ein im Transponder parallel zum Schwingkreis geschalteter Lastwiderstand (R_{mod}) wird an- und ausgeschaltet, um in der Antennenspule des Lesegerätes Spannungsänderungen hervorzurufen. Diese Änderung entspricht einer Amplitudenmodulation des Signals durch den Transponder [37].

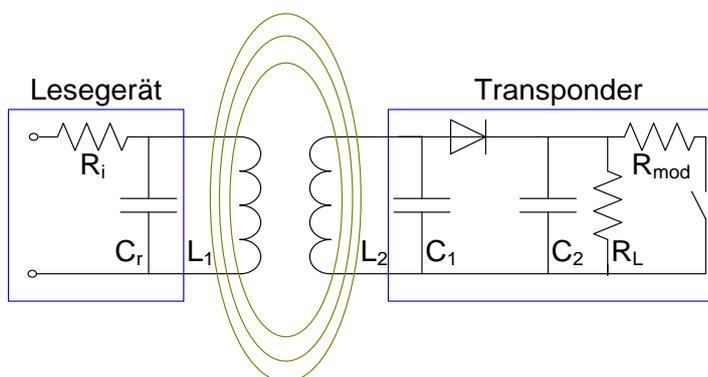


Abbildung 2-12
Prinzip der induktiven
Kopplung bei 125Khz
oder 13,56 MHz nach
[37].

Backscatter-Verfahren

Das EPC Class-1 Generation-2 Protokoll spezifiziert für den Frequenzbereich von 860 MHz bis 960 MHz die physikalischen und logischen Anforderung an ein passives UHF-RFID-System (Transponder und Lesegerät) [38]. Für diese Fernfeld-Systeme kommt ausschließlich das Backscatter-Verfahren zum Einsatz (Abbildung 2-13). Bei diesem Verfahren werden die vom Lesegerät ausgesendeten elektromagnetischen Wellen nicht moduliert zurückgesendet, sondern reflektiert. Bei den hier eingesetzten Antennen handelt es sich sowohl beim Lesegerät als auch beim Transponder um Dipolantennen, die die im Chip generierte Hochfrequenzspannung aussenden. Die ausgesandte Hochfrequenzspannung trifft nun auf den Transponder, der die Welle gleichrichtet und als Energieversorgung nutzt. Ein Teil der ankommenden Wellen wird nicht zur Versorgung genutzt, sondern reflektiert. Für eine Datenübertragung wird nun dieses reflektierte Signal durch das Zu- und Abschalten eines Lastwiderstandes moduliert. Wie bei der induktiven Kopplung wird das amplitudenmodulierte Signal vom Lesegerät aufgenommen und interpretiert [35].

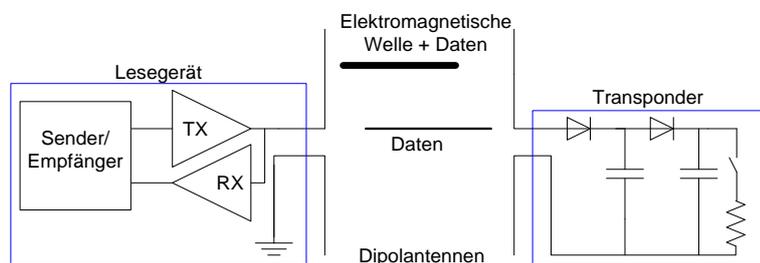


Abbildung 2-13
Prinzipschaltung des
Backscatter-Verfahrens,
wie es in der RFID-
Technik bei ultrahohen
Frequenzen von
868 MHz zum Einsatz
kommt.

Fraunhofer IPM hat bisher Erfahrung mit HF- und UHF-Frontend-Chips, die in einigen Projekten Anwendung gefunden haben. Dazu gehören unter anderem der im Folgenden vorgestellte SL13A von IDS Microchip und der MLX90129 der Firma Melexis.

Die IDS Microchip AG hat seit 2011 einen neuen UHF EPC Class3 Sensortag-Chip auf dem Markt. Der SL900A arbeitet bei Frequenzen von 860 MHz bis 960 MHz und ist somit in Europa und Amerika einsetzbar. Neben einer Echtzeituhr und einem On-Chip-Temperatursensor verfügt er über zwei weitere analoge Schnittstellen für externe Sensorik. Über eine SPI-Schnittstelle kann mit einem PC oder Mikrocontroller kommuniziert werden. Außerdem erfolgt hierüber die Initialisierung des Chips. Die maximale Datenrate liegt bei 640 kbit/s von Transponder zu Lesegerät und bei 160 kbit/s von Lesegerät zu Transponder. Es handelt sich hier um ein semi-passives System, da der Einsatz einer 1,5 V-Batterie Voraussetzung ist für den Einsatz von Sensoren in Kombination mit der RFID-Technik [39].

In einer Presseinformation von IDS [40] ist zu lesen, dass der Chip, eingebaut in einem Brückenstraßenbett, in der Lage ist, Feuchte im Beton sofort zu entdecken und dass dies durch einfaches Überfahren ausgelesen wird. Des Weiteren wird eine Applikation beschrieben, bei der der Chip die Auswirkung von Feuchte und Druck auf eine Metallstrebe in einer Betonplatte misst. Zu untersuchen wäre hier der Einsatz dieses Chips in den Reichweitenversuchen im Straßenbett.

Auch für den HF-Bereich verfügt IDS Microchip über einen ISO 15693-konformen Chip. Der SL13A ist ebenfalls batterieunterstützt, besitzt eine Echtzeituhr und einen integrierten Temperatursensor. Die Kommunikation zu einem Mikrocontroller erfolgt auch hier über die SPI-Schnittstelle. Der Chip wird sehr häufig für die Temperaturüberwachung in der Kühlkette eingesetzt, sowohl im Lebensmittel- als auch im Pharmabereich. Zusätzlich verfügt der IC über ein 8k bit EEPROM, welches in drei Bereiche – System-, Anwender- und Messbereich – unterteilt ist. Im Systembereich sind die Standardbefehle



Abbildung 2-15
Oben : Im ausgehobenen Bohrkern sind die einzelnen Schichten der Asphaltstraße zu erkennen
Unten: Bohrloch in Asphalt mit eingelassenem UHF- und HF-Transponder. Die Transponder sind aus Schutz vor Wasser in eine Plastiktüte gehüllt.

Anschließend wurden jeweils die maximal möglichen Leseabstände zwischen Lesegerät und Transponder für die unterschiedlich tiefen Bohrlöcher notiert. Zu Testzwecken wurden für den HF-Bereich zwei unterschiedliche Lesegeräte mit verschiedenen Leistungstärken untersucht (Abbildung 2-16). Der eingesetzte Mid Range Reader für den HF- Bereich ist der SIR-2720. Das Lesegerät arbeitet mit einer maximalen Ausgangsleistung von 1,6 W [43]. Der SIL-2125 ist ein Long Range Reader, mit dem aufgrund der größeren Ausgangsleistung von bis zu 10 W auch größere Reichweiten zu erwarten sind [44]. Für den UHF-Bereich von 868 MHz kam der SIR-900 zum Einsatz. Das Lesegerät ist ebenfalls ein Mid Range Reader mit einer Ausgangsleistung von 300 mW [45].

Für 13,56 MHz wurde eine 13,56 MHz Open Loop Antenne, SAT-A40-LR-O-13MHz, eingesetzt, mit der Reichweiten bis zu 100 cm möglich sind [46]. Für den UHF- Bereich von 868 MHz kam eine Panel Antenne zum Einsatz [47].



Abbildung 2-16
Während des Auslesens der
Transponder wurde die Reichweite
der Transponder mit unterschied-
lichen Lesegeräten bestimmt.
Oben: Reichweitenbestimmung
mit dem Mid Range Lesegerät SIR-
2720 für 13,56 MHz und Open
Loop Antenne. Unten: Reich-
weitenbestimmung mit dem Mid
Range Lesegerät SIR-900 für
868 MHz und einer Panel
Antenne.

Die Transponder wurden montags in die Straße eingebaut und gestartet. Auf den Transpondern sind Temperatursensoren integriert. Der UHF-Transponder loggte die Temperatur in einem Zeitintervall von 10 min, der HF-Transponder in einem Zeitintervall von 13 min. Nach 2 Tagen wurden die Transponder ausgelesen. Das Bohrloch in Asphalt mit der Tiefe von 34 cm wurde nach dem ersten Auslesen mit heißem Bitumen vergossen, sodass der Bohrspalt anschließend luftdicht verschlossen war. Die Transponder lagen danach noch weitere 4 Tage in den Bohrlöchern bis sie ein weiteres Mal ausgelesen wurden. In Abbildung 2-17 und Abbildung 2-18 sind die Temperaturwerte der gesamten 7 Tage aufgezeigt. Der Temperaturverlauf der Bohrloches HF A 34 und UHF A 34 zeigen beide eine kurze Temperaturerhöhung, welche durch das Vergießen des Bohrspaltes zu begründen ist.

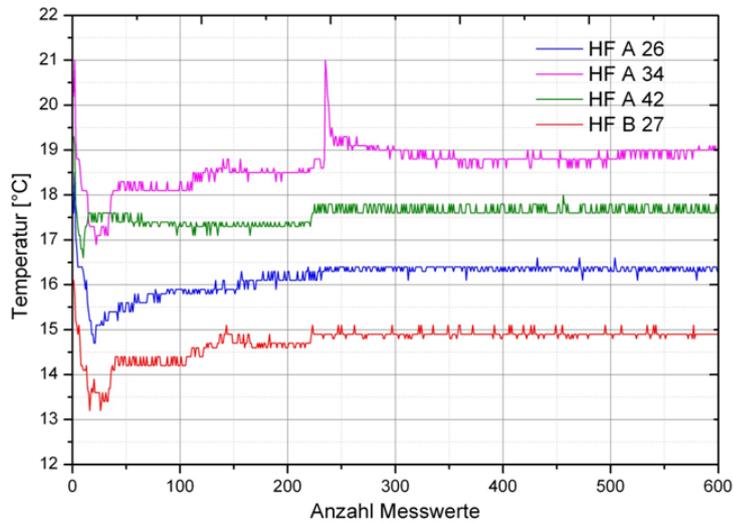


Abbildung 2-17
Temperaturverlauf der
vier HF-Transponder in
unterschiedlichen
Medien und Bohrtiefen.
(HF A 26 – 13,56 MHz-
Transponder, Asphalt,
26 cm Bohrlochtiefe;
HF B 27 - 13,56 MHz-
Transponder, Beton,
27 cm Bohrlochtiefe)

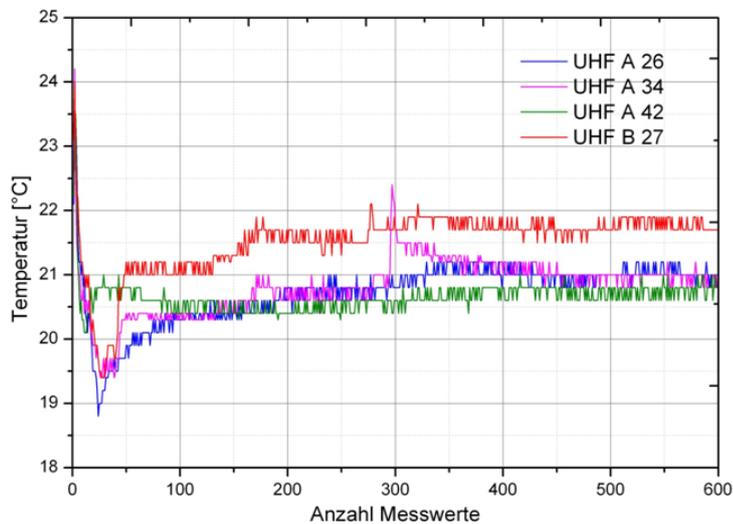


Abbildung 2-18
Temperaturverlauf der
vier UHF-Transponder in
unterschiedlichen
Medien und Bohrtiefen.
(UHF A 26 – 868 MHz-
Transponder, Asphalt,
26 cm Bohrlochtiefe;
UHF B 27 - 868 MHz-
Transponder, Beton,
27 cm Bohrlochtiefe)

Da die einzelnen Temperatursensoren auf den Transpondern nicht kalibriert wurden, ist vor allem bei den HF-Systemen eine Temperaturdifferenz von bis zu 4°C zwischen den einzelnen Transpondern zu erkennen.

Die Ergebnisse der Reichweitenmessungen mit den unterschiedlichen Lesegeräten sind in Tabelle 2-7 und Tabelle 2-8 dargestellt.

	Asphalt 26 cm		Asphalt 34 cm		Asphalt 45 cm		Beton 27 cm		Luft
	A-B	A-T	A-B	A-T	A-B	A-T	A-B	A-T	A-T
SIL-2125	53	79	45	80	35	80	50	77	80
SIR-2720	30	56	21	55	11	56	26	53	56

Tabelle 2-7

Ergebnisse der Reichweitentests der HF-Transponder. Es ist zu erkennen, dass die Reichweite des Transponders zum Lesegerät durch das Einsetzen des Bohrkerns nahezu nicht beeinflusst wurde. (A-B – Abstand Antenne-Bohrkern; A-T – Abstand Antenne-Transponder)

	Asphalt 26 cm		Asphalt 34 cm		Asphalt 45 cm		Beton 27 cm		Luft
	A-B	A-T	A-B	A-T	A-B	A-T	A-B	A-T	A-T
SIR-900	55	81	50	84	32	77	22	49	95

Tabelle 2-8

Ergebnisse der Reichweitentests der UHF-Transponder. In Asphalt hat der Bohrkern ebenfalls keinen Einfluss auf die Reichweite. In Beton verringert sich die Reichweite jedoch auf fast die Hälfte. (A-B – Abstand Antenne-Bohrkern; A-T – Abstand Antenne-Transponder)

Die Reichweitentests ergaben, dass im HF-Bereich kein Einfluss durch den wiedereingesetzten Bohrkern zu erkennen war. Die in Luft gemessene maximale Distanz von 80 cm beim Long Range und 56 cm beim Mid Range Reader wurden um maximal 3 cm verringert.

Im UHF-Bereich war der Einfluss des Bohrkerns weitaus größer. In Asphalt betrug die Differenz maximal 18 cm bei einer Bohrtiefe von 45 cm. In Beton hat sich die Reichweite von 95 cm auf 49 cm fast halbiert.

Im weiteren Verlauf der Feldtests wurden die Geschwindigkeiten der Datenübertragung sowohl für HF als auch für UHF während des Lesens der Daten in verschiedenen Blockgrößen messtechnisch ermittelt. Dabei wurden die Geräte genutzt, die auch für die Reichweitenmessungen verwendet wurden. Die maximalen Übertragungsgeschwindigkeiten betragen bei HF 1700 Byte/s, im UHF-Bereich nur 1300 Byte/s (Tabelle 2-9, Tabelle 2-10).

Blockgröße [Byte]	Übertragungsdauer [ms]	Übertragungsgeschwindigkeit [Byte/s]
64	60	1000
128	100	1200
256	150	1700

Tabelle 2-9

Übertragungs-geschwindigkeiten für den HF-Bereich.

Blockgröße [Byte]	Übertragungsdauer [ms]	Übertragungsgeschwindigkeit [Byte/s]
128	200	600
256	2700	900
512	370	1300

Tabelle 2-10

Übertragungs-geschwindigkeiten für den UHF-Bereich.

Aufgrund der Ergebnisse der Reichweitenmessungen und Messungen der Datenübertragungsgeschwindigkeiten fällt die Entscheidung auf die Technologie für den hochfrequenten Bereich von 13,56 MHz. Als RFID-Frontend auf den Scemtec Transpondern wurde der SL13A der Firma IDS Microchip verwendet.

Für eine Abschätzung der Antennengröße lässt sich sagen, dass die Maße für das spätere Sensorsystem in etwa denen der HF-Transponder von Scemtec entsprechen muss, um mit dem Feldtest vergleichbare Reichweiten zu erzielen. Das bedeutet für die Platine mit HF-Frontend und Mikrocontroller eine Größe von ca. $7 \times 3,5 \text{ cm}^2$ mit einer umgebenden PCB-Antenne. Im nächsten Kapitel ist ein eventueller Sensorsystemaufbau gezeigt, der diesen Anforderungen entspricht.

Eine Abschätzung des Software-Aufwands wird im Folgenden beschrieben.

Die Messwerte für Temperatur und Feuchte werden an zwei fest definierten Zeitpunkten pro Tag ermittelt und gespeichert. Eine Berechnung der Salinität aus den Feuchtwerten wird nicht vom Transponder übernommen und muss daher vom Lesegerät oder der PC-Anwendung geleistet werden. Die Messung von Dehnung, Druck und Beschleunigung wird durch einen Impuls an einem Interrupteingang des MSP430 ausgelöst. Es werden in einem zu definierenden Zeitfenster jeweils die Maxima der Messwerte ermittelt und gespeichert.

Für den Prototyp ist es zunächst nicht vorgesehen die Messwerte im Mikrocontroller zu verrechnen und zu bearbeiten. Die Berechnung aller Messwerte aus den AD-Wandlern in physikalische Größen muss vom Reader oder PC durchgeführt werden. Alle Messwerte werden im internen Speicher des Frontends SL13A abgelegt. Die Anzahl der maximal möglichen Messzyklen wird nach endgültiger Spezifikation u.a. der Messauflösung festgelegt.

Die Entwicklung umfasst die softwareseitige Anbindung der benötigten Peripherie, darunter die AD-Wandler (AD7745/6, AD5933) und das Frontend SL13A.

Der Aufwand vorbehaltlich endgültiger Spezifikation beträgt 15 Tage.

2.4

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 bestimmten Zeit abgefräst und erneuert. Die Asphalttragschicht bleibt über Jahrzehnte bestehen und ist das Grundgerüst der Straße (Abbildung 2-19). Das System wird in die Asphalttragschicht mit einer Korngröße zwischen 22 mm und 32 mm eingebaut, um dort Störungen, Risse und 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. Ein System kleinerer Bauweise wäre nicht in der Lage, die Dehnungs- und Druckspannungen der Schicht zu erfassen. Weitaus größere Bauformen würden die Messung ebenfalls verfälschen.

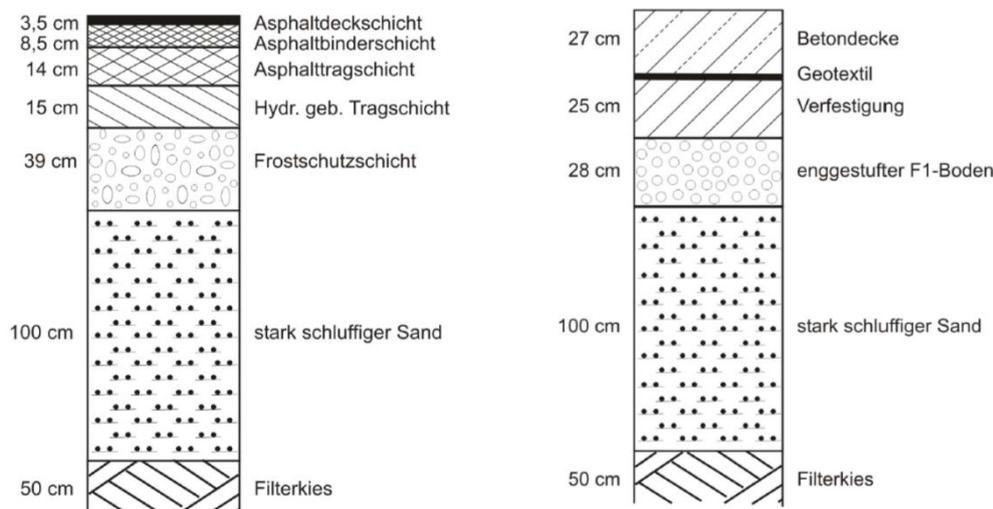


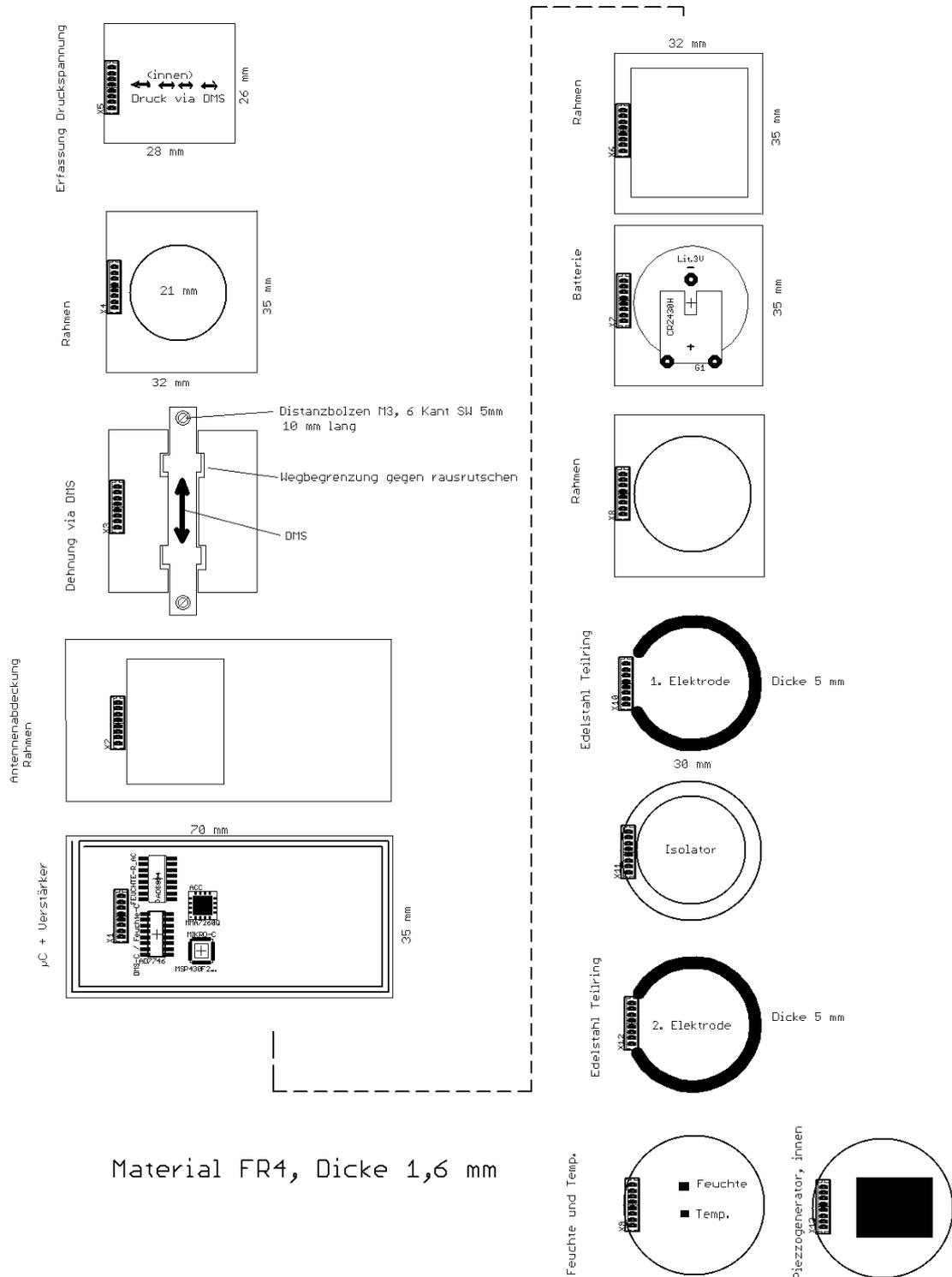
Abbildung 2-19
Schematische Darstellung des Schichtaufbaus einer Asphaltstraße (links) und einer Betonstraße (rechts).

Im Fall von Asphaltstraßen erfolgt der Einbau des Systems beim 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 das System je nach Anwendung und geplantem Einsatzort individuell gestalten 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 den

möglichen Sensoren bestückt. Ein modularer Aufbau könnte beispielsweise wie in Abbildung 2-20 gezeigt erfolgen. Abbildung 2-21 zeigt einen Querschnitt und eine 3-D-Ansicht des Systems.

Integration der einzelnen Systembestandteile



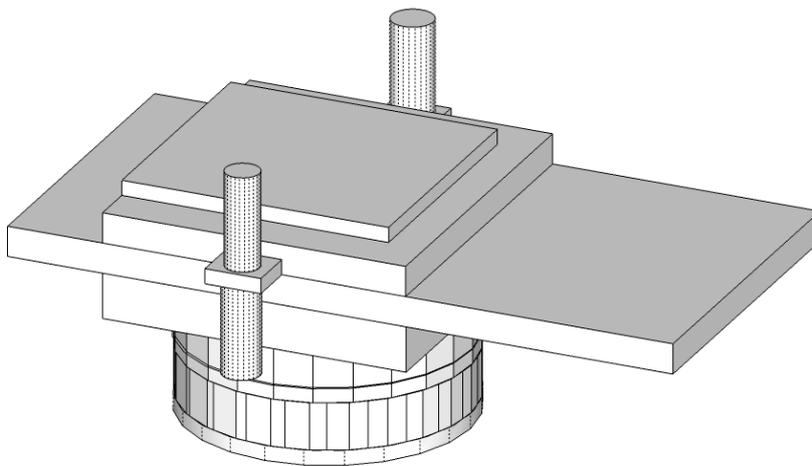
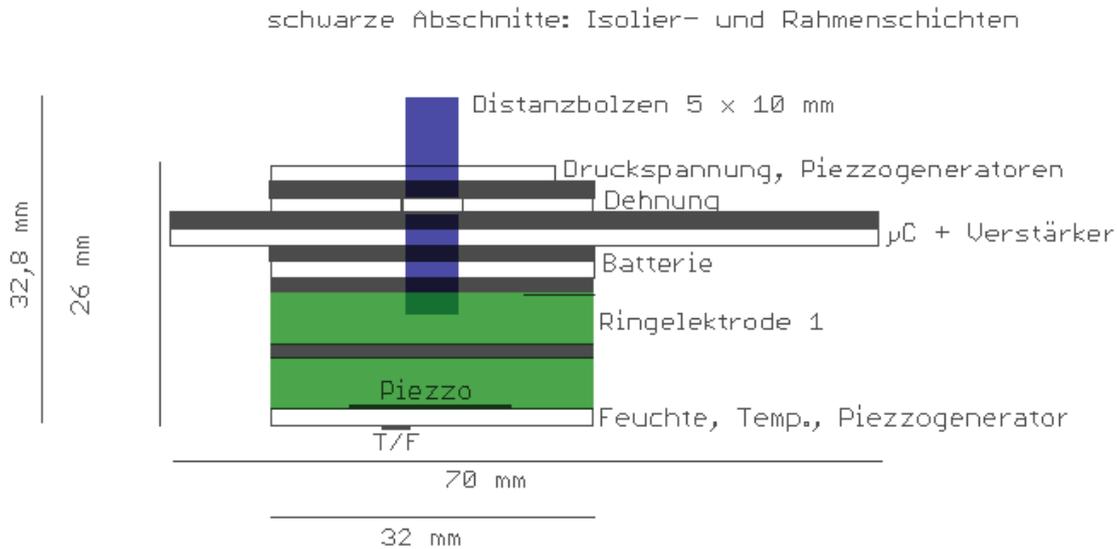


Abbildung 2-21
Querschnitt und 3D-
Modell des oben
beschriebenen
Systems.

LTCC oder PCB?

Die Realisierung eines Prototyps erfolgt aufgrund der geringen Stückzahl zunächst leiterplattenbasiert auf FR4-Material. Für die 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, soll die Realisierung des RFID-Sensorsystems in einem LTCC-Gehäuse erfolgen. LTCC steht für Low Temperature Cofired Ceramic und bezeichnet glaskeramische Folien, die unter anderem als Gehäuse für mikrosystemtechnisch produzierte Systeme eingesetzt werden. Diese Technologie bietet die 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, die mit dem LTCC-Verfahren hergestellt wurden, sind in Tabelle 2-11 dargestellt.

Integration der einzelnen Systembestandteile

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	++	-

Tabelle 2-11
Eigenschaften von FR4-Material und LTCC-Material im Vergleich [49]

Die Herstellungskosten eines Systems, wie es hier vorgestellt wurde, belaufen sich bei einer Stückzahl von 10.000 in etwa auf 5,- Euro/Stück. Bei einer Stückzahl von 100.000 verringert sich der Stückpreis auf unter 3,- Euro.

Herstellungsprozess LTCC

Die ungebrannte „grüne“ Keramik wird zunächst auf die gewünschten Maße zurechtgeschnitten. Mit einem Laser oder durch Stanzen besteht anschließend die Möglichkeit, Durchkontaktierungen, Positionierungslöcher, Kavitäten oder Ähnliches in die Keramik zu schneiden. Im Siebdruckverfahren werden diese Löcher mit Leiterbahnpaste gefüllt. Mit demselben Verfahren werden die Leiterbahnen an der Oberfläche gedruckt. Nach dem Bedrucken aller Einzelschichten und einer finalen optischen Kontrolle werden die Lagen aufeinander gestapelt und gepresst. Dieser Schritt des Laminierens erfolgt mit 3000 psi und bei 80°C. Anschließend durchlaufen die Presslinge im Ofen einen Sinterprozess mit definiertem Temperatur-Zeit-Profil. Beim Aufheizen auf 450°C entweichen alle organischen Lösungsmittel rückstandsfrei. Bei der weiteren Temperaturerhöhung auf 880°C setzt der Verglasungsprozess für 30 Minuten ein. Nach einer Haltezeit von

15 Minuten kühlt der Ofen langsam ab. Der sogenannte Co-firing-Prozess ist dann nach ca. drei Stunden abgeschlossen. Nachfolgend können weitere Leiterbahnen und Widerstände gedruckt oder Bauteile bestückt oder gebondet werden. Die Vorteile von LTCC liegen unter anderem in der direkten Integration von R-, L- und C-Komponenten sowie in der hohen Robustheit gegen mechanischen und thermischen Stress (Abbildung 2-22) [48].

Integration der einzelnen Systembestandteile

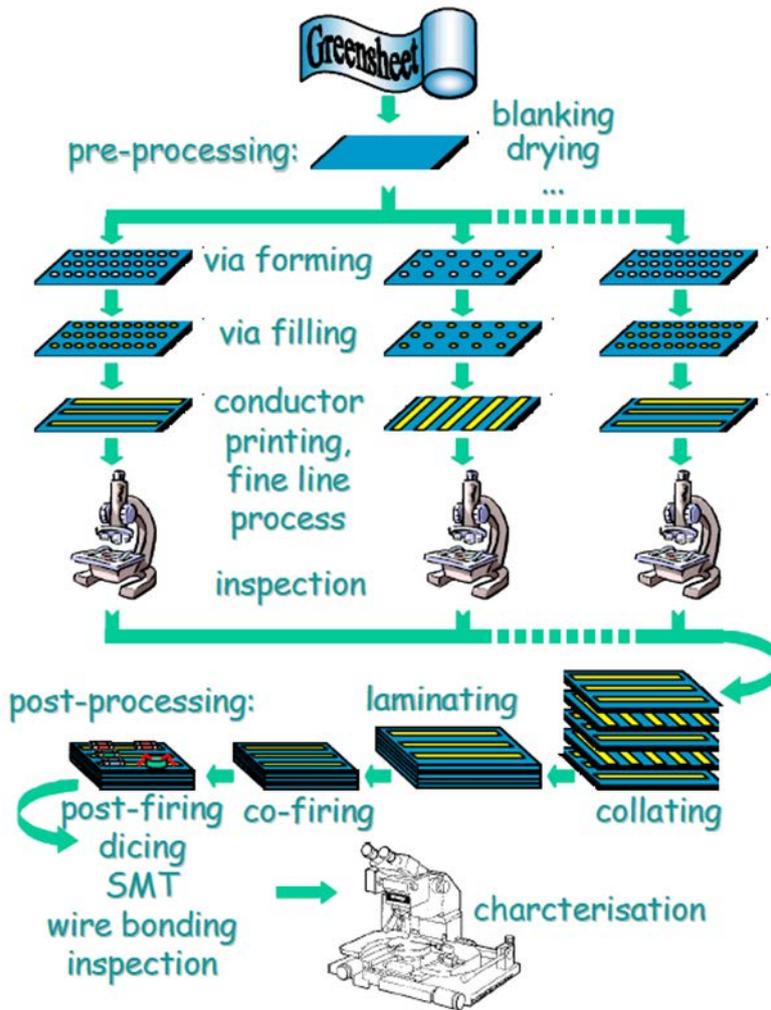


Abbildung 2-22
Produktions-
schritte im
LTCC-
Herstellungs-
prozess [48].

Ein weiterer Vorteil liegt in der direkten Integration von ungehäuseten ICs ins Gehäuse. Eine Verkapselung in LTCC gilt als hermetisch dicht. Abbildung 2-23 zeigt beispielsweise einen Drucksensor, der in einer Zwischenlage des LTCC-Gehäuses installiert und über entsprechende Leiterbahnen nach außen kontaktiert wurde.

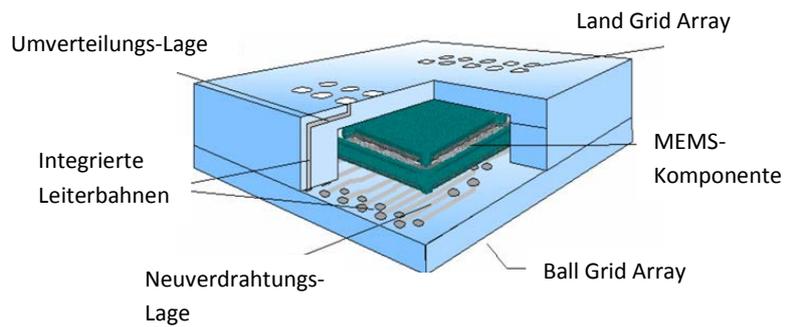


Abbildung 2-23
Beispiel eines im
LTCC-Gehäuse
integrierten
MEMS-Bauteils
anhand eines
Drucksensors
[49].

Abbildung 2.24 zeigt ein Beispiel eines LTCC-Gehäuses mit der typischen blauen Farbe. Auf der linken Seite ist die Vorderseite gezeigt, in die ein 16-Pin-IC oder beispielsweise ein Gassensor gebondet werden kann. Die Kontakte sind zur Unterseite (rechte Seite) hin durchkontaktiert. Mit der Unterseite mit weitaus größeren Kontaktpads kann das Bauteil problemlos auf die Zielplatine oder Ähnliches gelötet werden.

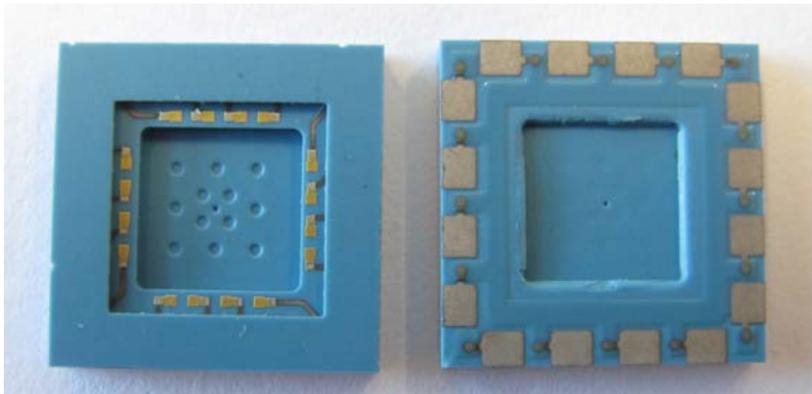


Abbildung 2-24
Foto eines typischen LTCC-Gehäuses mit charakteristischer blauer Färbung. Die linke Seite zeigt die Oberseite mit der Möglichkeit, einen Gassensor via Bonden zu befestigen. Die Unterseite auf der rechten Seite zeigt die durchkontaktierten großen Pads. Durch Löten kann das Gehäuse auf der Zielplatine befestigt werden.

3 Fazit

Durch das stetig 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 bestand das Gesamtziel der Studie darin, die Machbarkeit des Einsatzes extrem miniaturisierter autarker Mikrosysteme mit Sensoren, die Daten empfangen, verarbeiten, speichern und senden können, zu untersuchen.

Das hier vorgestellte System für die Erfassung des strukturellen Straßenzustandes 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 Widerstandes zwischen den Elektroden besteht die Möglichkeit, den Salzgehalt, also die Salinität, zu berechnen. Dabei wird der Tatsache genutzt, dass die elektrische Leitfähigkeit von Wasser proportional zum Salzgehalt ist. Die Temperaturmessung erfolgt mit Hilfe eines verbrauchsarmen Platindünnschichtensensors.

Die Erfassung der mechanischen Straßenbelastung kann durch neuartige kapazitive Dehnungsmessstreifen erfolgen, die am Lehrstuhl für Verbindungstechnik von Prof. Wilde entwickelt werden. Der Energieverbrauch kapazitiver Sensoren beschränkt sich auf den Verbrauch des Auswertchips, ein 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 die Daten nur in exakter Ausrichtung korrekt erfassen. Der vorgesehene Beschleunigungssensor misst zwar alle drei Achsen, die Einbaurichtung muss aber ebenso beachtet werden, damit bei der anschließenden Datenverarbeitung die Richtungen zugeordnet werden können.

Da das System drahtlos über 13.56MHz 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 Lesegerätes 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 1700Bytes/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 unter idealen Bedingungen bei maximal 300. Daran wird deutlich, dass besonders im Datenmanagement ein hohes Entwicklungspotential 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) besser geeignet. Die Vorteile des keramischen Substrats liegen in einer hohen Robustheit gegen mechanischen und thermischen Stress sowie in der im Vergleich zu leiterplattenbasierten Systemen hohen Integrationsdichte und kleineren Bauweise.

Fazit

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

4.1 Referenzen

- [1] <http://www.ist-ag.ch/eh/ist-ag/de/home.nsf/contentview/C2CF6A95E5F4967FC125782600315BD7>, 17.02.2012
- [2] Dr. O. Kieseewetter, „Miniaturized Platinum temperature sensor with high resistance for Smart Systems“, Proceedings of the Sensor + Test Conference 2009, 329-331
- [3] Macdonald, J.R.: Impedance Spectroscopy: Emphasizing Solid Materials and systems, John Wiley and Sons, New York, 1987
- [4] 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
- [5] Datenblatt, AD7745/AD7746, Analog Devices, Rev 0, 2005
- [6] Datenblatt, Feuchtesensor „Multiringelektrode“, SENSORTEC GmbH, <http://www.sensortec.de/sensoren-sensors>, 18.07.12
- [7] Datenblatt, 1MSPS, 12-Bit Impedance Converter, Network Analyzer, Analog Devices, Rev.D, 2005-2011
- [8] 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
- [9] T. Fellner, J. Wilde, R. Zeiser, T. Jörger, M. Törk, L. Reindl, Neuartige hochohmige Dünnschicht-Folien-DMS für Wireless Condition Monitoring, Mikrosystemtechnik Kongress, Darmstadt, Oktober 2011
- [10] Datenblatt, CC430F613x, MSP430TM SoC with RF-Core, Texas Instruments, SLAS554F, Mai 2009, Revised Dezember 2011
- [11] R. Zeiser, T. Jörger, T. Fellner, J. Wilde, Entwicklung von kapazitiven Dehnungsmessstreifen in Dünnschichttechnologie für drahtlose, intelligente Systeme, Mikrosystemtechnik Kongress, Darmstadt, Oktober 2011
- [12] 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

- [13] Datenblatt, CPX100G Pressure sensor, Honeywell, http://sensing.honeywell.com/index.php?ci_id=4128&la_id=1&Ntk=si_all_products&N=1235&Ntt=cpx100g, 31.07.2012
- [14] Datenblatt, CEB-44D06 piezo electric diaphragm, CUI Inc., 7/28/2006, <http://www.cui.com/Product/Resource/PDF/CEB-44D06.pdf>, 31.07.2012
- [15] Datenblatt, LTC3588-1 Piezoelectric Energy Harvesting Power Supply, 35881fa, LT0910 Rev A, <http://cds.linear.com/docs/Datasheet/35881fa.pdf>, 31.07.2012
- [16] Presse Info Linear Technology, Stromversorgung für piezoelektrische Energy Harvester, <http://www.linearnews.com/press/LTC3588-1/LTC3588-1-d.pdf>, 31.07.2012
- [17] Datenblatt, ME501/505, Piezoresistiver Drucksensor, Metallux SA, 04/2009
- [18] Datenblatt, LIS3DH, STMicroelectronics, Doc ID 17530, Rev 1, Mai 2010
- [19] <http://www.st.com>
- [20] Datenblatt, MSP430F261x, MSP430F241x, Texas Instruments, SLAS541J, Juni 2007, Revised Dezember 2011
- [21] Rolf Isermann: Fault-Diagnosis Applications: Model-Based Condition Monitoring: Actuators, Drives, Machinery, Plants, Sensors, and Fault-tolerant Systems, Springer; 1st Edition, 2011, ISBN-10: 3642127665
- [22] B.K.N. Rao: Handbook of Condition Monitoring, Elsevier Science; 1st edition, 1996, ISBN-10: 1856172341
- [23]: 6th European Workshop on Structural Health Monitoring 2012, Dresden 2012, DGZfP-Proceedings BB 135-CD, ISBN 978-3-940283-41-2
- [24] Andrew Dawson (Editor): Water in Road Structures: Movement, Drainage & Effects, Springer; 2009, 2010, ISBN-10: 9048179114
- [25] Haibach, Erwin: Betriebsfestigkeit. Springer-Verlag 2002, ISBN-10: 3-540-62185-7
- [26] Buxbaum, Otto: Betriebsfestigkeit. Verlag Stahleisen 1992, ISBN-10: 3-514-00437-4
- [27] Datenblatt, CC1101, Low-Cost Low-Power Sub-1GHz RF Transceiver, Texas Instruments, SWRS061B, Dallas 2007
- [28] J. Niebuhr, G. Lindner (1994), Physikalische Messtechnik mit Sensoren, Oldenbourg Verlag, München, Wien
- [29] http://www.mstonline.de/foerderung/projektliste/detail_html?vb_nr=V3EAS024, 17.02.2012
- [30] Vortrag Dr. Peter Spies (2012), „PiezoEN: Autarke Energieversorgung über intelligente Piezogenerator-Supercap-Lithium-Akkumulator Mikrosysteme“, Statusmeeting für energieautarke Mikrosysteme EAS, 06.+07.02.2012, Berlin

- [31] Dissertation Hans-Peter Günther, Ermüdungsverhalten von Stahlträgern mit schlanken Stegblechen im Brückenbau, Universität Stuttgart, Fakultät für Bauingenieur und Vermessungswesen, Dezember 2001
- [32] Datenblatt, CR 2450, Lithium Manganese Dioxide, 2004-12-16, http://www.varta-microbattery.com/applications/mb_data/documents/data_sheets/DS6450.pdf , 08.08.12
- [33] Datenblatt, LPP 686566 BE, Rechargeable Lithium-Polymer, Varta, 2008-09-01, http://www.varta-microbattery.com/applications/mb_data/documents/data_sheets/DS56432.pdf
- [34] G.Tamm, C.Tribowski (2010),RFID, Informatik im Fokus, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg
- [35] Christian Kern (2011), RFID für Bibliotheken, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg
- [36] www.transponder.de/khiso.htm, 16.02.2012
- [37] Finkenzeller K. (2002), RFID-Handbuch – Grundlagen und praktische Anwendungen induktiver Funkanlagen, Transponder und kontaktloser Chipkarten, Hanser, München
- [38] http://www.gs1-germany.de/standards/epc_rfid/epc_gen_2/index_ger.html, 16.02.2012
- [39] Datenblatt, SL900A, EPC Class 3 Chip with Sensor, IDS Microchip, SL900A_SD03, Dezember 2010
- [40] Presseinformation, http://www.ids.si/doc/pr/IDS-SL900A_de_07-04-10.pdf, 16.02.2012
- [41] Datenblatt, SL13A_SD, Smart Label Chip with Sensor, IDS Microchip, IDS-SL13A_SD-05, Dezember 2008
- [42] Datenblatt, MLX90129 13,56 MHz Sensor Tag/Datalogger IC, Melexis, 3901090129, Rev007, März 2011
- [43] Datenblatt, SIR-2720, 13,56 MHz Midrange Reader / Writer, 2010-05, <http://stt-rfid.de/stationaer>
- [44] Datenblatt, SIL-2125, 13,56 MHz Long Range Reader / Writer 2x5 Watt, 2010-05, <http://stt-rfid.de/stationaer>
- [45] Datenblatt, SIR-900 868 MHz Midrange Reader / Writer, 2010-05, <http://stt-rfid.de/stationaer>
- [46] Datenblatt, SAT-A40-LR-0-13MHz, 09/2008, <http://www.stt-rfid.de/antennen>
- [47] Datenblatt, SAT-A12/12-P-868MHz, 27/05/2011, <http://www.stt-rfid.de/antennen>
- [48] Reinhard Kulke, Matthias Rittweger, Peter Uhlig, Carsten Günner. LTCC-Mehrlagenkeramik für Funk- und Sensor-Anwendungen, Seite 2131 – 2136, Leuze Verlag, PLUS, Dezember 2001

[49] Franz Bechthold, Anwendung von LTCC für Sensoren und Mikrosysteme, VIA electronic GmbH, Hermsdorf, Forschungs- und Technologieforum des FTVT, Ilmenau, Mai 2009

Anhang
