



# Tagungsbericht

## 4. HSN-Fachsymposium

**„Neue Technologien, intelligente Sensorik/Analytik, vernetzte Sensorsysteme und neue Anwendungsfelder“**

„New Technologies, Intelligent Sensors/Analytics, Cross-linked Sensor Systems and New Application Fields“

22. November 2017, KIT-IAI (CN)

Editoren: Hubert B. Keller, Rolf Seifert  
Karlsruher Institut für Technologie, IAI

**Hinweis:**

Sie können sich diesen Bericht auf der HSN-Homepage <http://hybridsensornet.org/> herunterladen.

# Vorwort

Das 4. Fachsymposium fand am 22. November 2017 am Institut für Angewandte Informatik des Karlsruher Instituts für Technologie statt. Das Thema war „Neue Technologien, intelligente Sensorik/Analytik, vernetzte Sensorsysteme und neue Anwendungsfelder“ bzw. „New Technologies, Intelligent Sensors/Analytics, Cross-linked Sensor Systems and New Application Fields“.

Intelligente Sensorsysteme der Zukunft sind erforderlich, um Informationen über potentielle Gefährdungen, Prozesse oder Situationen zu erfassen und auch Ressourcen effizienter zu verwenden. Die Realisierung dieser umfassenden Sensorik als innovativer künstlicher Sinn bedarf einer hoch interdisziplinären und diesbezüglich einer eng abgestimmten Vorgehensweise. An Ihre Erforschung, Entwicklung und Umsetzung werden enorme Anforderungen gestellt, denen keine Forschungseinrichtung und kein Unternehmen allein gewachsen sind. Nur die Vernetzung aller Beteiligten wird diesen Anforderungen gerecht.

HybridSensorNet e.V. wurde gegründet, um diesen hohen Anforderungen zu entsprechen und die Kompetenzen aller Fachgebiete aus Industrie, Forschung, Entwicklung und öffentlicher Hand so miteinander zu vernetzen, damit diese neuen Sensorsysteme und -netze und die zugrunde liegenden Sensortechnologien der Zukunft entwickelt werden können. HybridSensorNet e.V. ist anerkannt als Cluster-Initiative in Baden-Württemberg.

In einer langfristig angelegten Strategie erfolgt Forschung, Technologieentwicklung und die Umsetzung in Produkte in spezifisch organisierten Themenbereichen über alle und in allen Fachgebieten, die für hybride Sensoren der Zukunft erforderlich sind. So wird sichergestellt, dass Forschungs- und Technologieentwicklung zielgerichtet durchgeführt und die Ergebnisse ohne Zeitverlust in Innovationen überführt werden können. Im koordinierten Zusammenwirken von Forschung, Entwicklung, Vermarktung und Verwaltung werden Wissen, Know-How und regulatorische Maßnahmen gebündelt, gezielt eingesetzt und am Marktbedarf wirksam werden. Der Verein treibt Projekte und Forschungen zielgerichtet voran und unterstützt Klein- und Mittelständische Unternehmen in der Projektbeantragung und -durchführung bis zur Produktentwicklung.

Die Intension des Vereins ist, als gemeinnütziger und ideeller Träger die Vernetzung im Bereich Sensorik zu fördern und nachhaltige Synergieeffekte und Innovationen bei den Mitgliedern zu bewirken.

Experten aus Forschung, Wissenschaft und Industrie stellten im 4. Fachsymposium 2017 den Stand der Forschung und Entwicklung sowie die interdisziplinären Anforderungen innovativer Projekte und Entwicklungen dar. Gleichzeitig bot das Symposium die Plattform für Kooperationsgespräche, Diskussionen und zur Initiierung neuer Projekte.

Der Fokus lag auf Themen, die für die Entwicklung von Sensorsystemen zur Erkennung von chemischen oder biologischen Substanzen in Gas, Luft, Wasser, Lebensmitteln, von kritischen Zuständen sowie für eine effiziente, umwelt- und klimaschonende Ressourcenverwendung benötigt werden. Ebenso wurde die Erkennung von Gefährdungen etc. adressiert. Das Fachsymposium 2017 behandelte alle Themen aus Forschung, Entwicklung sowie möglicher Projekte.

Neben dem eingeladenen Hauptvortrag „Gassensoren in Mikrosystemtechnik“ von Prof. Dr. Jürgen Wöllenstein, Universität Freiburg, IMTEK, gab es die Vorstellung eines Mitgliedinstituts, Vorträge in der Session 1 über „Neuartige Sensoren“, in der Session 2 über „Spektroskopie Sensorik“, in der Session 3 über „Smarte Technologien“ sowie eine Poster Ausstellung. Die Mitgliederversammlung des HybridSensorNet e.V. fand am Vortag statt.

Die Veranstaltung richtet sich grundsätzlich an Unternehmen, Universitäten/Hochschulen, Forschungseinrichtungen sowie Verwaltungen und Gremien, die sich mit diesen Sensorthemen auseinandersetzen. Veranstaltet werden die Fachsymposien vom Verein HybridSensorNet e.V. in Kooperation mit dem Karlsruher Institut für Technologie.

Mein Dank im Namen des gesamten Vorstands geht an Frau Sabine Scheer, IAI, sowie an Rolf Seifert, IAI, für die Unterstützung bei der Organisation des Symposiums.

Hubert B. Keller, Vorsitzender

# Inhaltsverzeichnis:

<b>Vorwort Dr. Hubert B. Keller</b>	<b>Seite 3</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>Seite 5</b>
<b>Tagungsprogramm</b>	<b>Seite 7</b>
<b>Eingeladener Vortrag:</b>	<b>Seite 9</b>
<b>Gassensoren in Mikrosystemtechnik</b> (Prof. Dr. Jürgen Wöllenstein, Universität Freiburg IMTEK)	<b>Seite 9</b>
<b>Vorträge:</b>	<b>Seite 13</b>
<b>Miniaturized single chip arrangement of Wheatstone bridge based calorimetric sensor</b> (Dr. Navas Illyaskutty, Institut für Sensorik und Informationssysteme (ISIS), Hochschule Karlsruhe)	<b>Seite 13</b>
<b>Akustische Gas- und Biosensoren für die Lebensmittelanalytik</b> (Dr. Kerstin Länge, Institut für Mikrostrukturtechnik (IMT), Karlsruher Institut für Technologie (KIT))	<b>Seite 16</b>
<b>Reagenzienfreier elektrochemischer Online-Sensor zur Bestimmung des Phosphatgehaltes in Gewässern</b> (S. Geiger, Pfinztal1, P. Rabenecker1, M. Abert1, K. Pinkwart, Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie, ICT)	<b>Seite 19</b>
<b>Nicht-invasiver mikroakustischer Online-Sensor für die Biofilmdetektion</b> (Sandra Lasota, Institut für Sensor- und Aktortechnik, Hochschule für angewandte Wissenschaften Coburg)	<b>Seite 28</b>
<b>ISAT: Das Zusammenspiel von Oberflächenschallwellen, integrierter Optik und Mikrofluidik.</b> Maria Kufner, Klaus Stefan Drese, Institut für Sensor- und Aktortechnik, Hochschule für angewandte Wissenschaften Coburg)	<b>Seite 33</b>
<b>Optische Spektroskopie</b> <b>Entwicklungen der Sensortechnologie und Anwendungen im Lebensmittelbereich</b> (Julius Krause, Lehrstuhl für Interaktive Echtzeitsysteme, Karlsruher Institut für Technologie (KIT))	<b>Seite 35</b>
<b>NIR-Sensorik zur Qualitätsbestimmung neuer Zemente</b> (Jörg Matthes, Institut für Angewandte Informatik (IAI), Karlsruher Institut für Technologie (KIT))	<b>Seite 39</b>
<b>Smarte Sensorlösungen mit 3D-Multimaterialdruck und Energyharvesting</b> (Hanno Platz, GED Gesellschaft für Elektronik und Design mbH)	<b>Seite 41</b>

<b>Application of magneto-resistive sensors in neural bridge monitoring system</b> (Jakob Müller, Pötzl Ingenieure GmbH Coburg)	<b>Seite 44</b>
<b>Sensorsysteme für IoT-Anwendungen</b> (Matthias Geiger, Binder Elektronik, Sinsheim)	<b>Seite 55</b>
<b>Poster:</b>	<b>Seite 66</b>
<b>Atemluftüberwachung mit AGaMon und innovativen Kalibrier- und Auswerteverfahren</b> (Rolf Seifert, Institut für Angewandte Informatik (IAI), Karlsruher Institut für Technologie (KIT))	<b>Seite 64</b>
<b>Neuartiger faseroptischer Temperatursensor basierend auf thermoresponsiven Polymeren</b> (Stefan Kowarik, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin)	<b>Seite 69</b>
<b>Entwicklung eines optischen Echtzeit-Reinigungssensors zur bedarfsgerechten, geregelten Reinigung von Filtertüchern</b> (Richard-Sebastian Moeller, Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik, Karlsruher Institut für Technologie(KIT))	<b>Seite 71</b>
<b>Sender- und Sensorsystem für den Straßenverkehr auf Basis von langnachleuchtenden, NIR-Licht emittierenden Pigmenten</b> (Dr. Janet Arras, Institut für Anorganische Chemie, Karlsruher Institut für Technologie (KIT))	<b>Seite 74</b>
<b>Implementierung von Aptmamer-modifizierten Dickschichtelektroden zur elektrochemischen Detektion von Kokain</b> (Verena Diebold, <u>Norman Baltes</u> , Dominik Müller, Markus Menger, Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT)	<b>Seite 76</b>
<b>Sensorsystem zur TNT-Detektion im Meer</b> (Benjamin Bechtle, Sebastian Geiger, <u>Dominik Müller</u> , Peter Rabenecker, Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT)	<b>Seite 78</b>
<b>Classification of Attacks against Cyber-Physical Components</b> (Ghada El Bez, Institut für Angewandte Informatik (IAI), Karlsruher Institut für Technologie(KIT))	<b>Seite 83</b>
<b>Autorenliste</b>	<b>Seite 86</b>

# Tagungsprogramm

22.11.2017 4. Fachsymposium	
(KIT, Campus Nord, Bau 449, Hörsaal Raum 140 / SR 126)	
ab 08:30	Einlass und Registrierung
8:50-9:00	Begrüßung, Eröffnung & Ausblick, H. B. Keller, Vorstandsvorsitzender HybridSensorNet e.V., Karlsruhe
9:00-09.40	<b>Hauptvortrag (Chair: H. Kohler)</b> Gassensoren in Mikrosystemtechnik, Prof. Dr. Jürgen Wöllenstein, Universität Freiburg, IMTEK
9:40-10:00 Kaffeepause und Poster	
Session 1 – Neuartige Sensoren (Chair: D. Sommer)	
10:00-10.30	Miniaturized single chip arrangement of Wheat-stone bridge based calorimetric sensor, Navas Illyaskutty, Hochschule Karlsruhe
10:30-11:00	Akustische Gas- und Biosensoren für die Lebensmittelanalytik, Kerstin Länge, Karlsruher Institut für Technologie
11:00-11:30	Reagenzienfreier elektrochemischer Online-Sensor zur Bestimmung des Phosphatgehaltes in Gewässern Sebastian Geiger, Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie, Pfinztal
11:30–12:00	Nicht-invasiver mikroakustischer Online-Sensor für die Biofilmdetektion, Sandra Lasota, HS für angewandte Wissenschaften Coburg

12:00-13:20	Mittagspause und Posterrundgang
	Session 2 – Institutionen und Spektroskopie Sensorik (Chair: H. B. Keller.)
13:20-13:40	Vorstellung des Instituts für Sensor- und Aktortechnik, HS Coburg Klaus Stefan Drese, HS für angewandte Wissenschaften Coburg
13:40-14:10	Optische Spektroskopie - Entwicklungen der Sensortechnologie und Anwendungen im Lebensmittelbereich, Julius Krause, Karlsruher Institut für Technologie
14:10-14:40	NIR-Sensorik zur Qualitätsbestimmung neuer Zemente, Jörg Matthes, Karlsruher Institut für Technologie
14:40-15:20	Kaffeepause und Poster
	Session 3 – Smarte Technologien (Chair: P. Rabenecker)
15:20-15:50	Smarte Sensorlösungen mit 3D-Multimaterialdruck und Energyharvesting, Hanno Platz, GED Gesellschaft für Elektronik und Design mbH, Ruppichteroth
15:50-16:20	Application of magneto-resistive sensors in neural bridge monitoring system, Jakob Müller, Pötzl Ingenieure GmbH Coburg
16:20-16:50	Sensorsysteme für IoT-Anwendungen, Matthias Geiger, Binder Elektronik, Sinsheim
	Abschluss
16.50	Ausklang (Seminarraum 126)



# Abstracts

## Eingeladener Vortrag

### Gassensoren in Mikrosystemtechnik

**Katrin Schmitt<sup>1</sup>, Karina Tarantik<sup>1</sup>, Jürgen Wöllenstein<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> *Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM,  
Heidenhofstr. 8, 79110 Freiburg.*

<sup>2</sup> *Albert-Ludwigs-Universität Freiburg,  
Institut für Mikrosystemtechnik IMTEK, Georges-Koehler-Allee 102, 79110 Freiburg.  
Email: [juergen.woellenstein@ipm.fraunhofer.de](mailto:juergen.woellenstein@ipm.fraunhofer.de)*

Der Themenkomplex „Gassensorik“ eröffnet sowohl der Grundlagenforschung als auch der angewandten Forschung faszinierende Möglichkeiten. Für den Nachweis von Gasen werden die unterschiedlichsten Wechselwirkungsmechanismen und Transduktionsprinzipien verwendet. Das Ziel ist die möglichst selektive und empfindliche Umsetzung der chemischen Information in eine elektrische Information. Der Vortrag gibt anhand eigener Arbeiten einen Einblick in aktuelle Entwicklungen in der Gassensorik, wobei das Potential zur Miniaturisierung im Vordergrund steht. Ein besonderer Schwerpunkt liegt dabei auf den optischen Gassensoren. Vorgestellt wird ein smartes Mikrosystem, welches den photoakustischen Effekt für den Nachweis von CO<sub>2</sub> nutzt, sowie Ansätze aus dem Bereich der Farbumschlagssensoren. Der Vortrag wird mit einem kurzen Überblick über aktuelle Arbeiten aus dem Bereich Halbleitersensoren enden.

Der photoakustische Effekt wird seit den 1930er Jahren durch die Entwicklung des sogenannten Ultrarot-Absorptionsschreibers (URAS) durch die BASF technisch für den Nachweis von infrarotaktiven Gasen eingesetzt. Bis vor kurzem waren photoakustischen Messsysteme allerdings noch vergleichsweise groß und aufwendig. Die gegenwärtige Miniaturisierung von thermischen Infrarotquellen und Mikrofonen mit Hilfe der Silizium-basierten Mikrosystemtechnik ermöglicht es jedoch immer kompaktere photoakustische Messsysteme zu realisieren. Solche Systeme haben das Potential nach und nach die klassischen – nach dem dem Filterphotometerprinzip arbeitenden - Infrarot-Sensoren ablösen. Wir stellen die Entwicklung eines photoakustischen Sensors am Beispiel eines CO<sub>2</sub>-Sensors für den Einsatz im Automobil vor.

Die Einführung von CO<sub>2</sub> als Kühlmittel (R744) für Klima-Systeme im Automobilbereich erfordert einen zuverlässigen und kostengünstigen CO<sub>2</sub>-Sensor. Die Hauptaufgabe dieses Sensors ist die Überwachung des Kühlsystems und im Falle einer Leckage die Meldung eines Fehlers. Ein photoakustischer CO<sub>2</sub>-Sensor kann hier durch seinen

miniaturisierten und robusten Aufbau die technischen Voraussetzungen für den Einsatz im Automobil erfüllen. Als Lichtquelle kommt eine breitbandige IR-Quelle zum Einsatz. Das photoakustische Signal wird über ein MEMS-Mikrofon detektiert. Zudem kann der Sensor zur Bestimmung der Luftqualität im Fahrzeuginnenraum über die CO<sub>2</sub>-Konzentration eingesetzt werden.

Stand der Technik von optischen Sensoren für den CO<sub>2</sub>-Nachweis [1– 4] ist das Prinzip der Filterfotometrie. Veröffentlichungen über die Notwendigkeit der Luftqualitätsüberwachung in Innenräumen, schließen teilweise das Automobil ein [5], [6]. Für die Warnfunktion und die Bestimmung der Luftqualität im Automobil werden allerdings bei einem - auf dem Filterphotometerprinzip beruhenden Messsystem - zwei unterschiedliche Messbereiche benötigt. Diese können aber nur durch zwei unterschiedlich lange optische Absorptionsstrecken realisiert werden. Bei einem photoakustischen System ist dies nicht notwendig.

Das entwickelte System besteht aus einem thermischen Emitter und einer photoakustischen Detektionskammer. Die modulierbare thermische Strahlungsquelle (Hawkeye Technologies, IR50S) ist in Silizium-MEMS-Technologie gefertigt [7]. Solche thermischen MEMS-Strahler benötigen relativ wenig Energie und sind daher für kleine und kompakte Messsysteme besonders geeignet. Das breitbandige Emissionsspektrum sowie die Strahlungsintensität eines thermischen Strahlers in Abhängigkeit zur Temperatur entsprechen einem sogenannten Planckschen Strahler. Die von Fraunhofer IPM entwickelte miniaturisierte Detektionskammer enthält ein unter Zielgasatmosphäre verkapseltes Mikrofon SMM310 von Infineon Technologies, welches für „Smartphones“ entwickelt wurde. Das Mikrofon zeichnet sich besonders durch eine stabile Empfindlichkeit über einen weiten Spannungsversorgungsbereich von 1,5 bis 3,3 V, einen geringen Stromverbrauch von 80 µA, ein kompaktes SMD-Gehäuse und die Langzeitstabilität gegenüber Temperatureinflüssen aus. Ein integriertes ASIC verarbeitet das Mikrofonsignal intern und liefert rauscharmes Ausgangssignal. Aber die wichtigste Eigenschaft des SMM310 für den Einsatz als photoakustischer Detektor ist seine vergleichsweise niedrige untere Grenzfrequenz  $f_g$  von 4 Hz. Um eine hermetisch dichte Detektionskammer mit dem integrierten akustischen Detektor zu erhalten, wird das SMM310 mittels SMD-Technologie auf einen TO5-Sockel gelötet. Anschließend wird ein TO5-Gehäuse unter reinem CO<sub>2</sub> hermetisch dicht mit dem Sockel verlötet. Für die Entstehung eines photoakustischen Signals ist es fundamental, dass die modulierte Infrarotstrahlung in das TO5-Gehäuse gelangt. Daher ist das TO5-Gehäuse auf der Oberseite mit einem infrarotdurchlässigen CaF<sub>2</sub>-Fenster versehen. Das CaF<sub>2</sub>-Fenster ist ebenfalls hermetisch dicht mit dem TO5-Gehäuse verlötet und weist geringe Reflexionsverluste von 5 - 6% (bei 4 µm) auf. Die Selektivität auf das nachzuweisende Gas des optischen Messsystems ist hoch, da das Zielgas selbst als gaselektiver Filter fungiert. Die Funktion des Sensorsystems wurde durch Laboruntersuchungen und Messungen in einem Testfahrzeug gezeigt.

Der sichere Nachweis von Spuren des toxischen Gases Kohlenstoffmonoxid ist eine der wichtigsten Aufgaben der chemischen Gassensorik. CO entsteht durch die unvollständige Verbrennung kohlenstoffhaltiger Ausgangsmaterialien. Gefordert ist die frühestmögliche, sichere und langzeitstabile Erkennung von CO in einer Vielzahl von Anwendungen. Hier werden neben den weit verbreiteten klassischen elektrochemischen Sensoren auch Gasmelder basierend auf Metalloxidgassensoren an-

geboden, die zwar eine schnelle Reaktion aufweisen, aber wenig selektiv sind und vergleichsweise viel Energie benötigen. IR-Messsysteme ermöglichen zwar den optischen Nachweis von CO. Für den relevanten Messbereich sind bei diesem Verfahren zusätzlich vergleichsweise teure optische Komponenten erforderlich.

Als Alternative bieten sich sogenannte kolorimetrische Sensoren an, die mit einem Farbwechsel auf die Anwesenheit des Zielgases reagieren. Zum selektiven Nachweis von CO eignen sich beispielsweise binukleare Rhodiumkomplexe [8]. Diese Komplexe besitzen die Fähigkeit bei Anwesenheit von CO mittels eines Liganden-austauschs reversibel ihre Farbe zu ändern. Wir zeigen den Aufbau eines kolorimetrischen Messsystems mit einem integrierten optischen Wellenleiter zur Erhöhung der Empfindlichkeit des Sensors. Weitere Arbeiten betreffen die Erforschung einer geeigneten Matrix zur Einbettung des Farbstoffs. Mit den sich dafür ergebenden Anforderungen, wie zum Beispiel Gasdurchlässigkeit und Transparenz, haben wir mehrere Polymere und poröse transparente Siliziumdioxid-Schichten als Matrices untersucht. Gezeigt werden Ergebnisse der Charakterisierung verschiedener Rhodiumkomplexe, sowohl in Lösung charakterisiert als auch eingebettet in die Matrices. Es zeigte sich, dass die eingebetteten Rhodiumkomplexe langsamer reagieren als in Lösung, je nach Komplex unterscheiden sich die Ansprechzeiten und die Empfindlichkeit. Generell zeigten sich die Rhodiumkomplexe als geeignet, CO in geringen Konzentrationen schnell nachzuweisen.

Schwefelwasserstoff ( $H_2S$ ) ist ein bekanntes toxisches Gas, sehr reaktiv und schädlich für Mensch und Maschine gleichermaßen. Leider ist das Auftreten von  $H_2S$  schwer vermeidbar, denn es entsteht weitverbreitet dort, wo organisches Material unter Sauerstoffausschluss in anaeroben Gärprozessen zu gasförmigen Verbindungen umgesetzt wird, wie es in vielen Bereichen der Petrochemie oder in Biogasanlagen der Fall ist. In feuchter Umgebung wirkt  $H_2S$  stark korrodierend. Eine zuverlässige Detektion ist daher wesentlich für die Gewährleistung sicherer Arbeitsbedingungen und eines sicheren Betrieb vieler technischer Installationen. Aufgrund der rauen Bedingungen unter denen  $H_2S$  auftritt, basieren existierende Messkonzepte allerdings auf aufwendigen extraktiven Verfahren mit Sensoren die häufigen Austausch erfordern. Die vorgestellte Entwicklung beruht auf einem neuen Ansatz mit p-halbleitendem Kupferoxid ( $CuO$ ) als gassensitivem Material, eingesetzt in einem neuartigen Funktionsmodus. Es wird gezeigt, dass  $H_2S$  mittels  $CuO$  hochselektiv detektiert werden kann, auch in sauerstoffarmer Atmosphäre.

[1] M. Arndt and M. Sauer, "Spectroscopic carbon dioxide sensor for automotive applications," in *IEEE Sensors conference*, 2004, no. Figure 1, pp. 252–255.

[2] M. Sauer, M. Arndt, N. Ulbrich, and U. Schiller, "Ein spektroskopischer  $CO_2$ -Sensor für automobiler Anwendungen," in *Laser in der Elektronikproduktion & Feinwerktechnik*. Tagungsband: LEF 2007, 2007, pp. 61 – 80.

[3] R. Frodl and T. Tille, "An automotive Bi-Source spectroscopic carbon dioxide sensor with pressure compensation," *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 127, no. 1, pp. 82–88, Oct. 2007.

[4] R. Frodl and T. Tille, "A High-Precision NDIR  $CO_2$  Gas Sensor for Automotive Applications," *IEEE Sens. J.*, vol. 6, no. 6, pp. 1697–1705, 2006.

[5] S. H. Yi, Y. Park, S. Han, N. Min, E. Kim, and T. Ahn, "Novel NDIR  $CO_2$  sensor for indoor Air quality monitoring," in *The 13th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems*, 2005. Digest of Technical Papers. TRANSDUCERS'05., 2005, vol. 2, no. 1, pp. 1211–1214.

[6] J. Kwon, G. Ahn, G. Kim, J. C. Kim, and H. Kim, "A study on NDIR-based  $CO_2$  sensor to apply remote air quality monitoring system," in *ICCAS-SICE*, 2009, 2009, pp. 1683–1687.

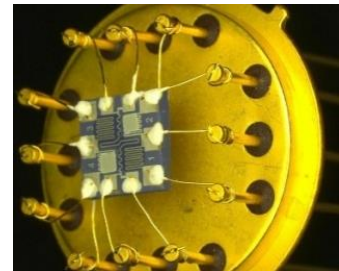
- [7] Hawkeye Technologies, "Infrared Source Series 6x." pp. 1–11, 2014.
- [8] Esteban, J., Ros-Lis, J. V., Martínez-Máñez, R., Marcos, M. D., Moragues, M., Soto, J., & Sancenón, F. (2010). Sensitive and selective chromogenic sensing of carbon monoxide by using binuclear rhodium complexes. *Angewandte Chemie International Edition*, 49(29), 4934-4937.
- [9] S Palzer, J Wöllenstein, J Kneer, *Investigating the Selective Behaviour of CuO in Gas Sensing Applications*, 2017 Advances in Science and Technology, Nummer: 99, Seiten: 33 – 39
- [10] J Kneer, J Wöllenstein, S Palzer, *Specific, trace gas induced phase transition in copper(II)oxide for highly selective gas sensing*, 2014 Appl Phys Lett, Band: 105, Nummer: 7

# Miniaturized single chip arrangement of Wheatstone bridge based calorimetric gas sensor

Navas Ilyaskutty, Onur Kansizoglu, Binayak Ojha, Jens Knoblauch and Heinz Kohler  
*Institute for Sensor and Information Systems (ISIS), Karlsruhe University of Applied  
Sciences, Karlsruhe, D-76133, Germany*  
Email: [heinz.kohler@hs-karlsruhe.de](mailto:heinz.kohler@hs-karlsruhe.de)

## Abstract

Design and fabrication of a new type of low power consuming single chip arrangement of a calorimetric type gas sensor integrated with self-heater and temperature sensor is presented. The preliminary results show that the concept has potential to use as a gas sensor, however, further optimization of layout and catalysts is necessary to further improve the sensor characteristics.



## Introduction

Calorimetric catalytic type gas sensors have been using since decades to monitor the presence of combustible gases [1, 2]. The common working principle of such sensors is based on a catalytically active layer where exothermic combustion of gases results in a temperature change. This change of temperature is reflected as a resistance change in an embedded Pt-wire or metallic meander micro-structured beneath. Typically, these sensors are always structured in pairs: an active catalyst element supplemented with an electrically matched catalytically passive reference element. These two elements together with two additional resistors constitute a Wheatstone bridge arrangement and the presence of combustible gases results in an imbalance in the bridge and the consequential output signal is in good approximation proportional to the concentration of the target gas. The response is mainly dependent on the operating temperature, the diffusion coefficient of the gas in the active reaction layer, the combustion enthalpy of the gas component and the activity of the catalyst [1, 3]. The present work is focused on realizing the Wheatstone bridge by bringing all four resistances (as thin film meanders) together on a miniaturized single chip which is temperature-controlled by means of a micro-structured heating element at the reverse side and a temperature sensor integrated at the front side.

## Experiment and Results

Low temperature co-fired ceramic (LTCC) substrates are used for preparing sensor chips because of their lower thermal conductivity [4]. The sensor chips (Fig. 1a) comprising four thin film Pt-meander structures ( $\approx 30\Omega$  at room temperature) and a thin film Pt resistive temperature sensor (metal line between the meanders) on one side and a thin film Pt-heater (Fig. 1b) on the reverse side were prepared by employing PVD, photolithography and plasma etching techniques. Two meander structures are selected

as 'active' and the other two as 'passive'. The active meanders (2 & 4, Fig. 1c) are covered with a catalyst (2% Pt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) to promote combustion of gases and the passive meanders (1 & 3) together with the temperature sensor are covered with glass in order to avoid gas reactions at these zones of the chip. During operation, the whole sensor chip was heated at 500°C.

The Wheatstone bridge arrangement (Fig. 1d) formed by this special fabrication is used for measuring the sensor signals  $U_x$ . Target gases combusted on the active areas generate heat at the active zones by exothermic reaction, cause a rise of the local temperature and, as a consequence, a rise of the meander resistance beneath. Hence, an imbalance in the bridge circuit will produce a change in the output voltage signal ( $U_x$ ).

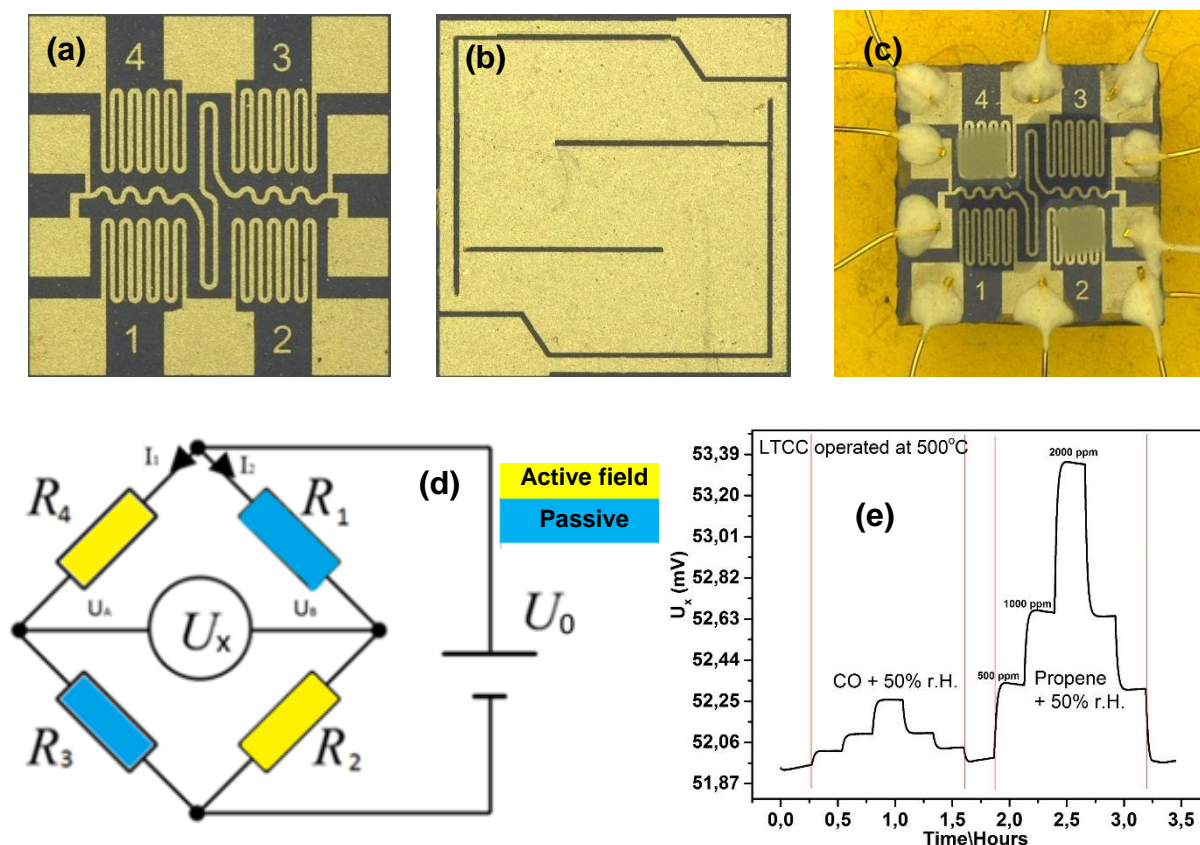


Fig.1: (a) Calorimetric sensor in single chip arrangement on LTCC substrate of 4x4 mm<sup>2</sup>, (b) Pt-heater structure at the reverse side, (c) Sensor chip with active layers microdispensed by 2% Pt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and passive meanders/temperature sensor covered by glass paste, (d) Wheatstone bridge construction of active and passive layers and (e) The response of the sensor when exposed to CO and propene at different concentrations under 50% r.H.

The response of the sensor (Fig. 1e) to CO and propene demonstrated that the signals are highly stable and reproducible at the repeated concentration steps by maintaining similar baselines. The distinction in responses are correlated with the different combustion enthalpies ( $\Delta_c H^\circ$ ) of CO (-283.0 kJ/mol) and propene (-2220 kJ/mol) and,

perhaps, with different diffusion properties of the gas molecules in the pores of the gas sensing layers and different reaction kinetics at the given temperature of the chip.

### **Conclusion and Outlook**

A new type of Wheatstone bridge based calorimetric type gas sensor has been realized in a single chip design and preliminary sensitivity studies with different model gases have been successfully carried out. However, the optimization of the chip-layout and catalyst is necessary to improve the sensor characteristics.

### **Reference**

- [1] T. Hübert, L. Boon-Brett, G. Black, U. Banach, *Sensors and Actuators B* 157 (2011) 329–352.
- [2] Matt Halsey, *SERVOTOUGH Flue gas exact (2700) Product Overview*, Servomex, 2016.
- [3] Alexander G Kazlov, *Sensors and Actuators B* 82 (2002) 24–33.
- [4] J. Kita, A. Engelbrecht, F. Schubert, A. Groß, F. Rettig, R. Moos, *Sensors and Actuators B* 213 (2015) 541–546.

# Akustische Gas- und Biosensoren für die Lebensmittelanalytik

Michael Rapp, Friederike J. Gruhl, Kerstin Länge

*Institut für Mikrostrukturtechnik (IMT), Karlsruher Institut für Technologie (KIT),  
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen, Deutschland.*

*Email: [kerstin.laenge@kit.edu](mailto:kerstin.laenge@kit.edu)*

## **Kurzfassung:**

Akustische Gas- und Biosensoren nutzen mechanische Wellen auf piezoelektrischen Substraten. Durch geeignete Beschichtung dieser Substrate werden Analytmoleküle auf der Oberfläche angereichert, wodurch sich u. a. die Frequenz der mechanischen Welle ändert, die als Signal ausgekoppelt werden kann. Damit ermöglichen akustische Gas- und Biosensoren den markierungsfreien und direkten Analytnachweis. Exemplarisch konnten diese Sensoren bereits für Aufgaben aus der Lebensmittelanalytik eingesetzt werden. Zudem sind viele der akustischen Bauteile kostengünstig herzustellen und zu betreiben, sowohl einzeln als auch zu mehreren im Sensorarray. Damit bieten akustische Gas- und Biosensoren vielversprechende Ansätze für eine Reihe von Anwendungen in der Lebensmittelanalytik.

## **Aufbau und Funktion von Gas- und Biosensoren mit akustischer Detektion**

Gassensoren kombinieren Signalwandler mit Beschichtungen, die mit Molekülen aus der Gasphase wechselwirken. Die Beschichtungsmaterialien umfassen anorganische und organische Materialien bis hin zu supramolekularen Strukturen und Polymeren. Allerdings reagieren diese Materialien in der Regel nur selektiv auf die einzelnen Stoffe, d. h. mehrere Verbindungen binden in unterschiedlichem Ausmaß. Abhilfe bieten hier z. B. Arrays mit unterschiedlich beschichteten Gassensoren, deren Signalmuster die Identifizierung einzelner Komponenten ermöglicht [1, 2].

Biosensoren kombinieren Signalwandler mit Fängermolekülen, wie z. B. Antikörper oder Enzyme, deren Bindungsstellen spezifisch an die Analytmoleküle binden („Schlüssel-Schloss-Prinzip“). Dabei muss für den direkten Analytnachweis sichergestellt sein, dass die Analytbindung an die Fängermoleküle das einzige Bindungsereignis auf der Oberfläche ist. Die unspezifische Anlagerung von Komponenten aus dem Probenhintergrund hingegen muss unterdrückt werden, da diese sonst zu falsch-positiven Signalen führen würde. Dies ist nicht zuletzt für Realproben aus der Lebensmittelanalytik von Bedeutung. Biosensoren werden in der Regel für flüssige Proben eingesetzt [3, 4].

Akustische Signalwandler nutzen mechanische Wellen, deren Frequenzen sich bei Anlagerung von Masse (z. B. des Analyten) auf der Oberfläche ändern. Auf diese Weise kann der Analytnachweis markierungsfrei und direkt und somit schnell, einfach und dennoch quantitativ erfolgen. Zu den heute am weitesten verbreiteten akustischen Bauteilen gehören die Schwingquarze (quartz crystal microbalance, QCM), die Dickenschwingungen nutzen (thickness shear mode, TSM), sowie Sensoren



basierend auf akustischen Oberflächenwellen (surface acoustic wave, SAW) (Abbildung 1). Die Schwingungsrichtung der mechanischen Wellen bei SAW-Sensoren können – bei Ausbreitungsrichtung entlang der Oberfläche – senkrecht zur Oberfläche sein (sog. Rayleigh-Wellen) oder parallel zur Oberfläche (s. Abbildung 1b), wie z. B. bei Love-Wellen oder transversalen Oberflächenwellen (surface transverse wave, STW) [3]. Während Rayleigh-SAW-Bauteile als Sensoren nur in der Gasphase eingesetzt werden können, können SAW-Sensoren mit Schwingungsrichtung parallel zur Oberfläche sowohl in der Gasphase als auch in flüssigen Medien eingesetzt werden. Letzteres gilt auch für die Schwingquarze.

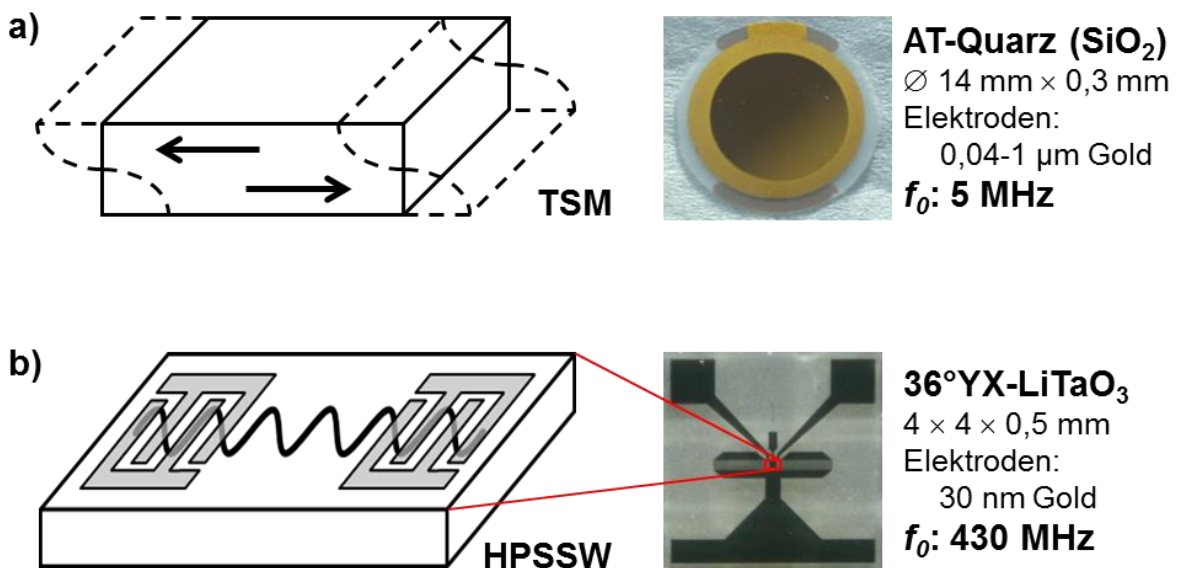


Abbildung 1: Schwingungsmoden und exemplarische Bauteile akustischer (Bio-)Sensoren. a) TSM (thickness shear mode) und Schwingquarz (QCM). b) HPSSW (horizontally polarised surface shear wave) und SAW (surface acoustic wave)-Bauteil.

Für den quantitativen Analytnachweis sind insbesondere SAW-Bauteile von Interesse. Sie reagieren aufgrund der hohen Bauteilfrequenzen (mehrere 100 MHz bis GHz, im Gegensatz zu QCM mit Frequenzen < 100 MHz) sehr empfindlich auf Änderungen an der Oberfläche. Zudem sind sie vergleichsweise kostengünstig herzustellen, zu betreiben sowie in Sensorarrays zu integrieren. Letzteres ermöglicht bei SAW-Gassensoren die Identifizierung einzelner Komponenten, auch in Mischungen, und bei SAW-Biosensoren den Nachweis mehrerer Analyte je Probe in einem Messdurchgang [1, 3, 4].

### Anwendungsbeispiele für akustische Gas- und Biosensoren in der Lebensmittelanalytik

Akustische Gassensoren wurden schon für eine Reihe von Anwendungen in der Lebensmittelanalytik eingesetzt, wie z. B. der Charakterisierung und Analyse verschiedener Speiseöle, der Klassifizierung von Honig und der Unterscheidung von

Weinen [1]. Neuere Arbeiten befassten sich mit der Analyse unterschiedlich lange gelagerten Kaffeepulvers. Hier konnte mit einem SAW-Sensorarray ein linearer Zusammenhang zwischen der Abnahme flüchtiger Verbindungen und der Lagerungsdauer nachgewiesen werden [5].

Mit akustischen Biosensoren wurde bereits eine Vielzahl verschiedener Analyte nachgewiesen, u. a. DNA, Proteine und Bakterien [3, 4]. Kleine, leichte Moleküle, wie z. B. Medikamentenrückstände, lassen sich mit akustischen Biosensoren jedoch in der Regel nicht direkt in den relevanten Konzentrationsbereichen nachweisen. Allerdings ermöglichte beispielsweise die Verwendung eines anderen Testformats (Bindungshemmtest) den Nachweis von Penicillin G ( $M_r$  334,4) in Milch mit SAW-Biosensoren, so dass Penicillin-Konzentrationen oberhalb und unterhalb des EU-Grenzwerts von 4 ng/ml (entspricht 4 ppb) unterschieden werden konnten [6].

## Literatur

- [1] A. Afzal, N. Iqbal, A. Mujahid, R. Schirhagl (2013) Advanced vapor recognition materials for selective and fast responsive surface acoustic wave sensors: A review. *Anal. Chim. Acta* 787:36-49.
- [2] J. Devkota, P.R. Ohodnicki, D.W. Greve (2017) SAW Sensors for Chemical Vapors and Gases. *Sensors* 17:801.
- [3] K. Länge, B.E. Rapp, M. Rapp (2008) Surface acoustic wave biosensors: a review. *Anal. Bioanal. Chem.* 391:1509-1519.
- [4] R. Fogel, J. Limson, A.A. Seshia (2016) Acoustic biosensors. *Essays Biochem.* 60:101-110.
- [5] N. Barié, M. Bücking, U. Stahl, M. Rapp (2015) Detection of coffee flavour ageing by solid-phase microextraction/surface acoustic wave sensor array technique (SPME/SAW). *Food Chem.* 176:212-218.
- [6] F.J. Gruhl, K. Länge (2014) Surface acoustic wave (SAW) biosensor for rapid and label-free detection of penicillin G in milk. *Food Anal. Methods* 7:430-437.

# Reagenzienfreier elektrochemischer Online-Sensor zur Bestimmung des Phosphatgehaltes in Gewässern

S. Geiger, Pfinztal<sup>1</sup>, P. Rabenecker<sup>1</sup>, M. Abert<sup>1</sup>, K. Pinkwart<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT, Joseph-von-Fraunhoferstraße 7,  
76327 Pfinztal/D

Email: [sebastian.geiger@ict.fraunhofer.de](mailto:sebastian.geiger@ict.fraunhofer.de)

## Einleitung und Motivation

Ein zentrales Problem der modernen Wasserwirtschaft stellt die übermäßige Belastung von Grund-, Fließ- und Standgewässern durch überschüssige Düngemittelrückstände in Form von Phosphaten und Nitraten dar <sup>[1]</sup>. Dieser Schadstoffeintrag stellt einen Widerspruch zur nachhaltigen Wasserbewirtschaftung im Rahmen der EU Wasserrahmenrichtlinie <sup>[2]</sup> dar. Gefährdete oder belastete Wässer müssen durch entsprechende – oft aufwändige und kostenintensive – Maßnahmen geschützt und / oder saniert werden.

Um die Überdüngung von Gewässern wirkungsvoll zu unterbinden stellt die kontinuierliche Kontrolle und Regulierung des Nährstoffeintrags an Ein- und Auslässen von kommunalen Kläranlagen ein wichtiges Werkzeug dar. Durch biologische Reinigung (organismengestützt, z.B. Belebtschlammbecken) und chemische Vorstufen (Zugabe von Fällungsmitteln wie Eisenchloride oder Aluminiumsulfate) kann die Nährstoffbelastung in Gewässern reduziert und reguliert werden. Hierbei spielen vor Allem der gesetzlich geregelte Gewässerschutz <sup>[3]</sup> sowie weitere entsprechende Umweltschutzgesetze <sup>[3,4]</sup> eine tragende Rolle.

Um den Eintrag dieser Stoffe weiter zu minimieren und frühzeitig Fehlfunktionen der Aufbereitungssysteme zu erkennen, sind entsprechende Sensorsysteme notwendig, welche die Nitrat- und/oder Phosphatbelastung quantitativ erfassen können. Die angeführten Gründe und die bisher zur Verfügung stehenden Analysensysteme zeigten, dass neue, innovative und rein elektrochemische Detektionsmethode zur Quantifizierung von Phosphaten in Gewässern einerseits über Vorteile bereits etablierter Analysemethoden verfügen und darüber hinaus gleichzeitig deren Nachteile – geringe Messpunktdichte, Einsatz von Chemikalien, Platzbedarf und geringe Autarkie, etc. – vermeiden.

## Stand der Technik

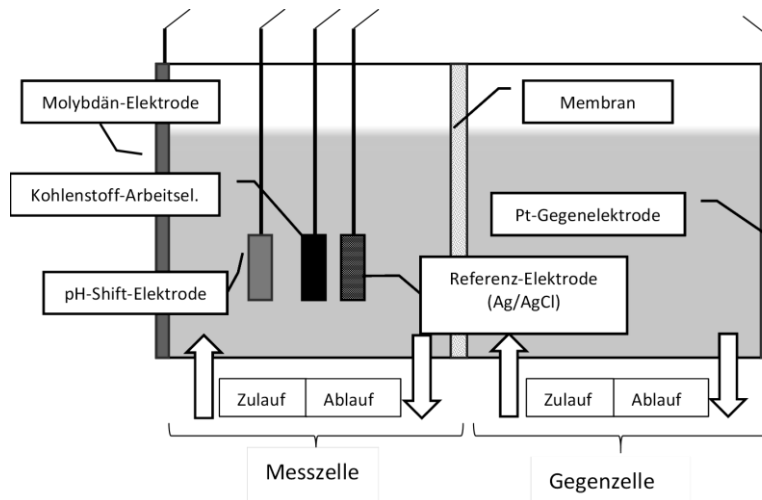
Bisherige kommerziell verfügbare Konzepte zur Bestimmung des Phosphatgehaltes in Gewässern basieren vorwiegend auf einer standardisierten kolorimetrischen

beziehungsweise nasschemischen Methode <sup>[5,6]</sup>: Die photometrische Bestimmung von Phosphat erfolgt durch Zugabe von Molybdaten– meist Ammoniummolybdat – in eine phosphathaltige Lösung. Hierbei bildet sich ein Phosphomolybdatkomplex. Nach anschließender Reduktion dieses Komplexes durch starke Reduktionsmittel wie beispielsweise Ascorbinsäure tritt eine bläuliche Färbung ein <sup>[6]</sup>. Die Intensität dieser Färbung (Absorptionsmaximum gemäß Literatur bei ca. 840 nm <sup>[6,7]</sup>, sog. »Molybdänblau«) ist proportional zur Stoffmengenkonzentration des vorhandenen, in Lösung befindlichen Phosphats der untersuchten Probe.

Mit diesem Detektionsverfahren - wie allen anderen bisher eingesetzten Methoden - ist eine in situ Detektion nicht möglich und damit inhärent eine fehlende zeitliche Auflösung sowie schlechte Automatisierbarkeit im Sinne einer Mess- und Regelkette gegeben. Zusätzlich sind nasschemische Detektionsmethoden mit hohem apparativem Aufwand verbunden und erfordern weiterhin regelmäßige, intensive Wartung sowie das Vorhalten von notwendigen Prozesschemikalien.

## Messkonzept

Das im Prozessablauf notwendige Molybdat-Reagenz wird durch anodische Oxidation einer Molybdän-Elektrode <sup>[8]</sup> (Generatorelektrode) bereitgestellt. Die folgende Komplexbildung zwischen Molybdat und Phosphat wird im zweiten Schritt durch elektrolytische Anpassung des pH-Wertes (pH-„Shift“) unterstützt. Zur Detektion des gelösten Phosphats wird im dritten Schritt auf die klassische nasschemische Umsetzung sowie den kolorimetrischen Nachweis verzichtet. Stattdessen wird die notwendige Komplex-Reduktion elektrochemisch an einer Arbeitselektrode durchgeführt (vgl. Abb.1).



**Abbildung 1:** Konstruktiver Aufbau des Sensorkopfes aus <sup>[9]</sup>

Der konstruktive Aufbau des Gesamtsensorsystems (Abb. 2) orientiert sich an einem praxisbezogenen Einsatzszenario. Durch die geringe Baugröße von maximal 15-20 cm inklusive Elektronik und Auswertelogik ist das Konzept gegenüber wesentlich größeren kommerziell verfügbaren, nasschemischen Detektionssystemen auch für mobile Systeme geeignet, bei denen hohe Messgenauigkeit bei gleichzeitig niedrigem Energie- sowie Platzbedarf priorisiert wird. Zudem kann durch den Einsatz von kommerziellen und preisgünstigen Dickschichtelektroden (Metrohm / DropSens, Spanien) jederzeit eine hohe Reproduzierbarkeit der Messergebnisse bei gleichzeitig niedrigen Kosten sichergestellt werden



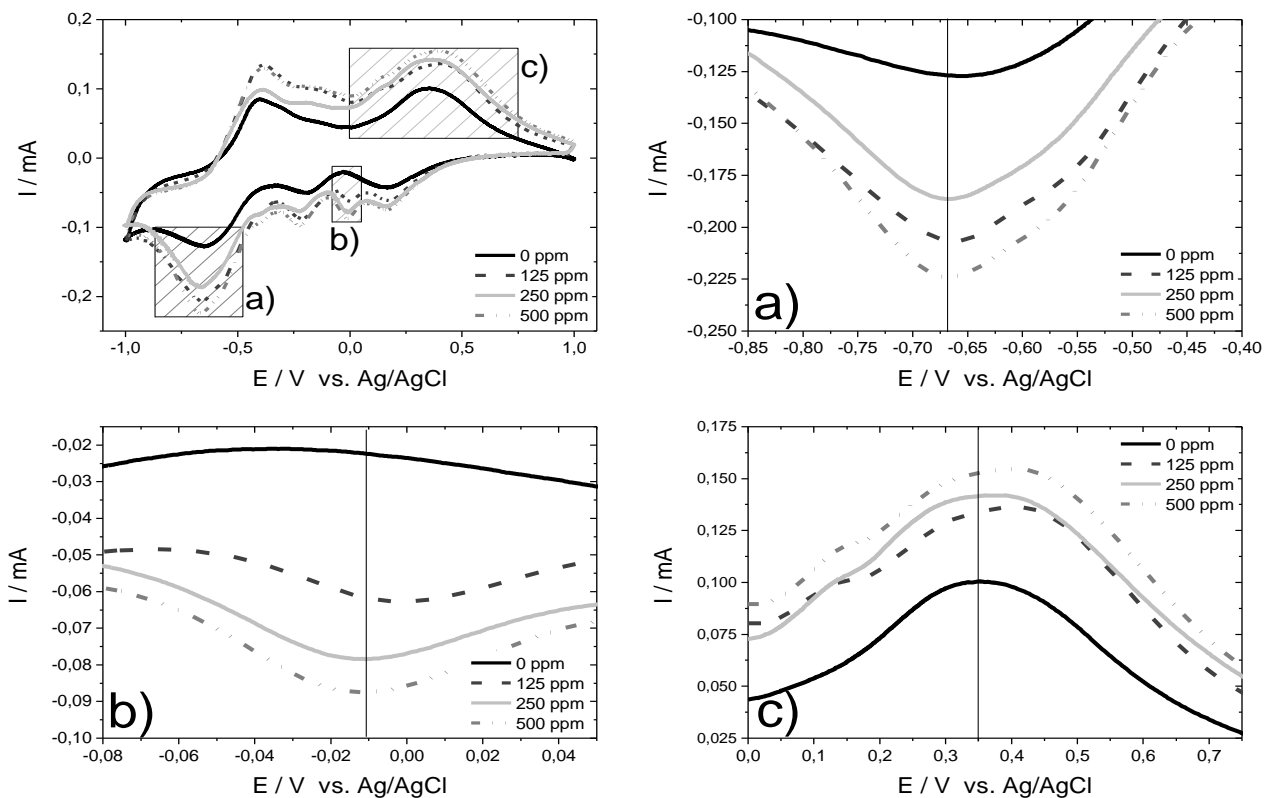
**Abbildung 2:** Darstellung der projektierten Messzelle. Aufgrund des mehrzelligen Aufbaus konnte der Sensorkopf exakt den Anforderungen des Systems angepasst werden. Größe des Sensorkopfes ~ 3 x 3 x 3 cm.

## Ergebnisse

Im ersten Teil der Ergebnisse (Teil A) soll eine generelle Aussage über die Funktionstüchtigkeit des Messsystems gegeben werden. In weiterführenden Versuchen (Teil B) werden weitere sensor-kritische Parameter wie Nachweisempfindlichkeit und Einfluss von Leitfähigkeit des Grundelektrolyten beleuchtet.

### Teil A: Grundlegende Experimente

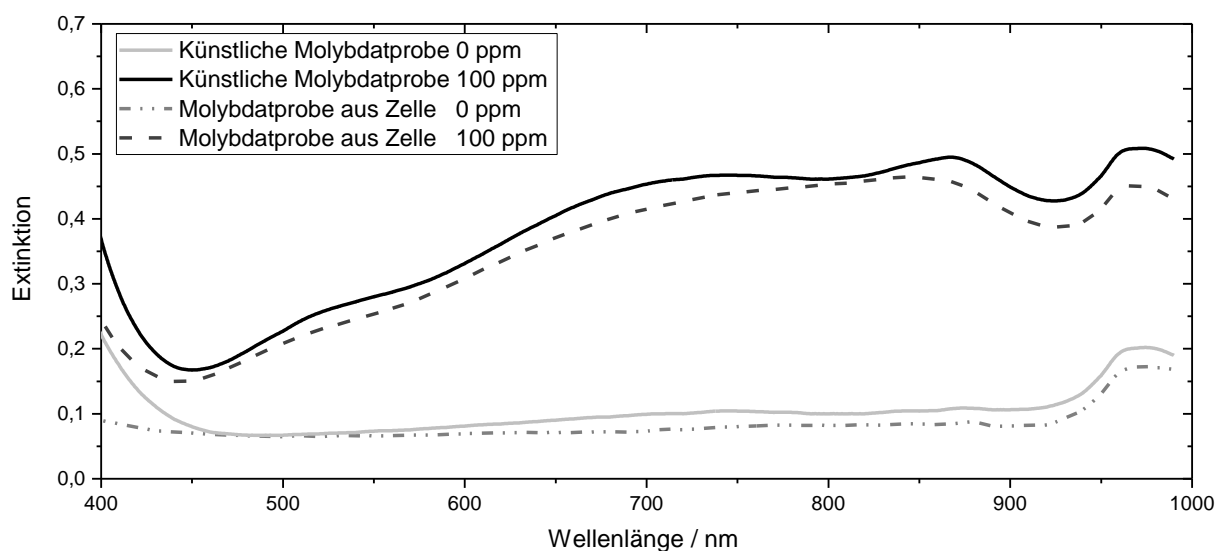
Abbildung 3 stellt die Stromantwort des Molybdat-Phosphat-Systems bei sehr hohen Konzentrationen (0, 125, 250, 500 ppm) über einen Spannungsbereich von -1,0 V bis +1,0 V gegen eine Ag/AgCl Referenzelektrode dar.



**Abbildung 3:** Zykelvoltammogramm der Phosphat-Konzentrationen 0, 125, 250, 500 ppm bei  $v=25$  mV/s. a), b) und c) stellen prägnante Charakteristika der Hauptkurve im Detail dar.

Hierbei wurde ein Phosphatstandard von 500 ppm in 0,1M KCl vorgelegt und sukzessive auf die entsprechenden Konzentrationsstufen verdünnt. Je Konzentrationsstufe wurde entsprechend dem bereits beschriebenen Messprotokoll verfahren. Um Verschleppungen zu vermeiden, wurde zusätzlich jeweils ein Spüldurchgang mit entionisiertem Wasser vorgenommen. Zur Kontrollmessung wurden

die entsprechenden Proben mit klassisch behandelten („Molybdänblau“-Methode) Proben derselben Konzentration verglichen. Die der Messzelle entnommenen Proben wurden ebenfalls durch die Zugabe von L-(+)-Ascorbinsäure nasschemisch reduziert und nachfolgend mittels photometrischer Messung verifiziert. Abbildung 4 zeigt, dass sowohl Proben mit in der Messzelle generiertem Molybdat als auch Proben mit extern zugegebenem Molybdat in ihrer Spektralanwort übereinstimmen. Dies lässt darauf schließen, dass die Anreicherung von Molybdat mittels anodischer Oxidation entsprechend dem vorgestellten Konzept eine externe Zugabe von Molybdationen funktionell ersetzen kann.

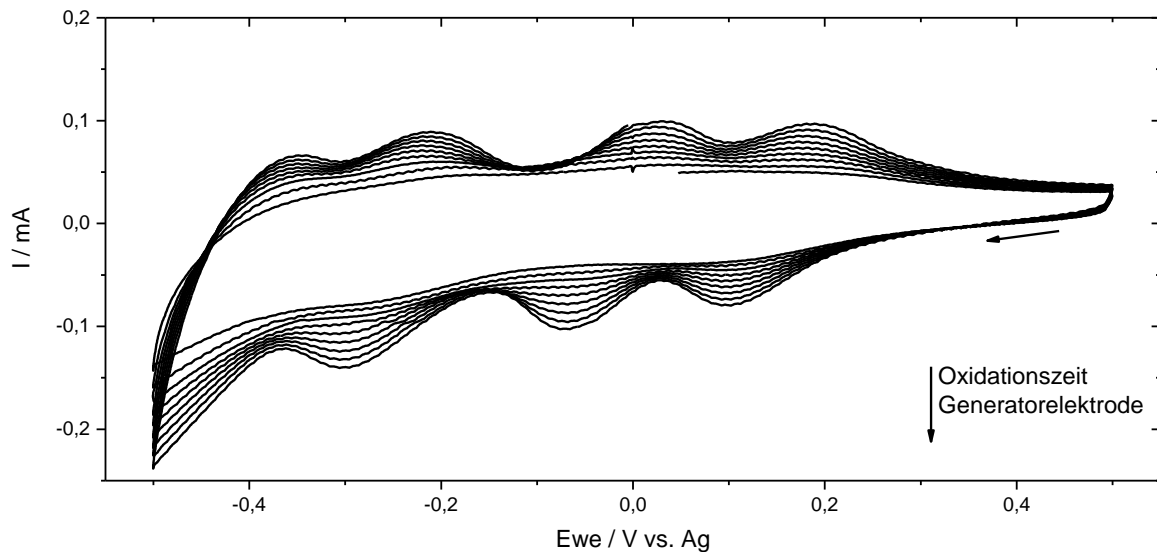


**Abbildung 4:** Extinktion über Wellenlänge mehrerer Proben. Die künstliche Probe aus Natriummolybdat bei pH=3 und die aus der Zelle extrahierte Probe werden bei 0 ppm (untere Kurven) sowie 100 ppm Phosphatgehalt dargestellt. Der Kurvenverlauf zeigt deutlich die Effektivität der Molybdatgenerierung durch anodische Oxidation von Molybdän.

## Teil B: Weiterführende Experimente

In weiteren Experimenten wurden tiefgehendere Untersuchungen im Hinblick auf die Funktionsweise – speziell zu Abhängigkeiten in Hinblick auf den Grundelektrolyten - durchgeführt.

Hierzu wurde erstmals die Signalveränderung abhängig von der Oxidationszeit der Generatorelektrode betrachtet, um zum einen eine Aussage über die Reaktionsgeschwindigkeit zu erhalten, und zum anderen, um zu ermitteln, zu welchem Zeitpunkt im Messablauf eine stabile Signalantwort erwartet werden kann. Das Verhalten des Systems soll beispielhaft an Abbildung 5 erklärt werden.



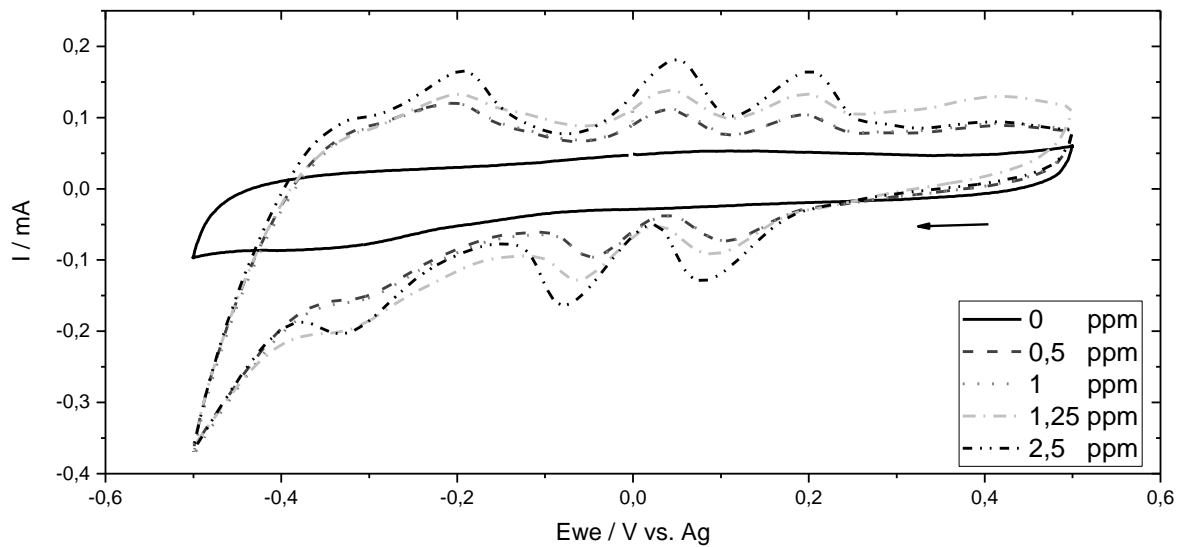
**Abbildung 5:** Zyklovoltammogramm von 100 ppm Phosphat in 0,1M KCl bei  $v=100$  mV/sec, dargestellt ist der Zyklenverlauf über die Oxidationsdauer der Generatorelektrode

Dargestellt ist ein Zyklovoltammogramm für eine Konzentration von 100 ppm Phosphoranteil in Grundelektrolyt mit 0,1M KCl. Gemessen wurde mit einem Tischpotentiostat der Marke BioLogic Typ SP-300 im synchronen Mehrkanalmodus. Hierbei konnte an einem Kanal der Oxidationsstrom über die Generatorelektrode geregelt und gemessen werden, während der zweite Kanal für die Generierung und Messung des Zyklovoltammogramms an der Messelektrode im Dreielektrodenbetrieb zuständig ist.

Für eine Vorschubgeschwindigkeit mit 100 mV/sec konnte für das Spannungsfenster von -0,5V bis +0,5V eine mittlere Zykluszeit von 20 sec pro Durchlauf festgelegt werden. Nach neun Zyklen, also nach ca. drei Minuten, ist eine deutliche Minimierung in der Signaländerung zu erkennen, nach 20 Zyklen (aufgrund der Übersichtlichkeit hier nicht dargestellt) konnte schließlich keine signifikante Veränderung mehr beobachtet werden. Somit kann davon ausgegangen werden, dass nach spätestens sechs Minuten eine vollständige Überführung aller Phosphatanteile in Lösung in den entsprechenden Phosphomolybdatkomplex stattgefunden hat und dass somit spätestens nach dieser Zeit eine stabile Messung möglich ist.

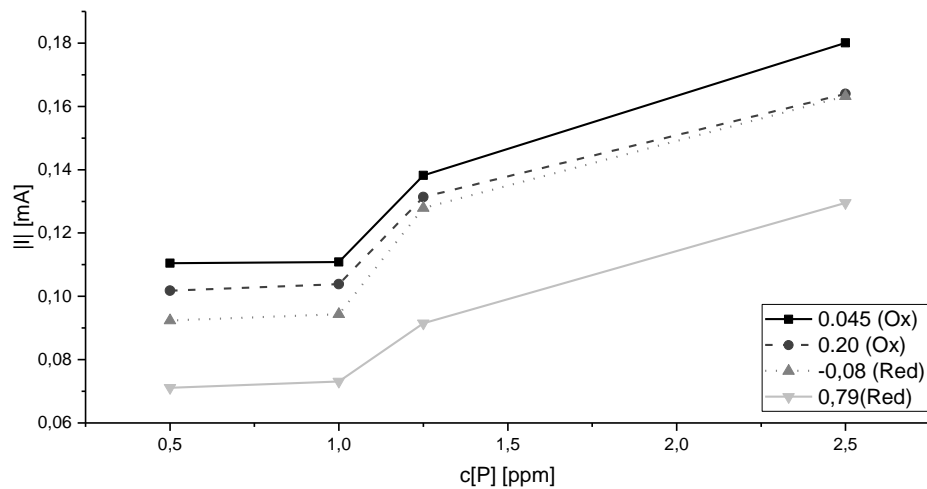
Um die Anforderungen des späteren Einsatzgebietes – also in erster Linie Fließ- und Seegewässer – und deren Einflüsse auf das Messsystem besser einschätzen zu können, müssen gegenüber bisherigen Versuchen Veränderungen in der Leitfähigkeit des Grundelektrolyten vorgenommen werden, sowie Konzentrationen in geringeren Bereichen (Zielgröße < 2 ppm) evaluiert werden. Daher wurde im ersten Schritt eine Minimierung der Phosphatlast im bekannten Elektrolytssystem – also 0,1M KCl – durchgeführt, um die untere Detektionsgrenze des vorgestellten Systems zu ermitteln. Dies ist nachfolgend in Abbildung 6 dargestellt.





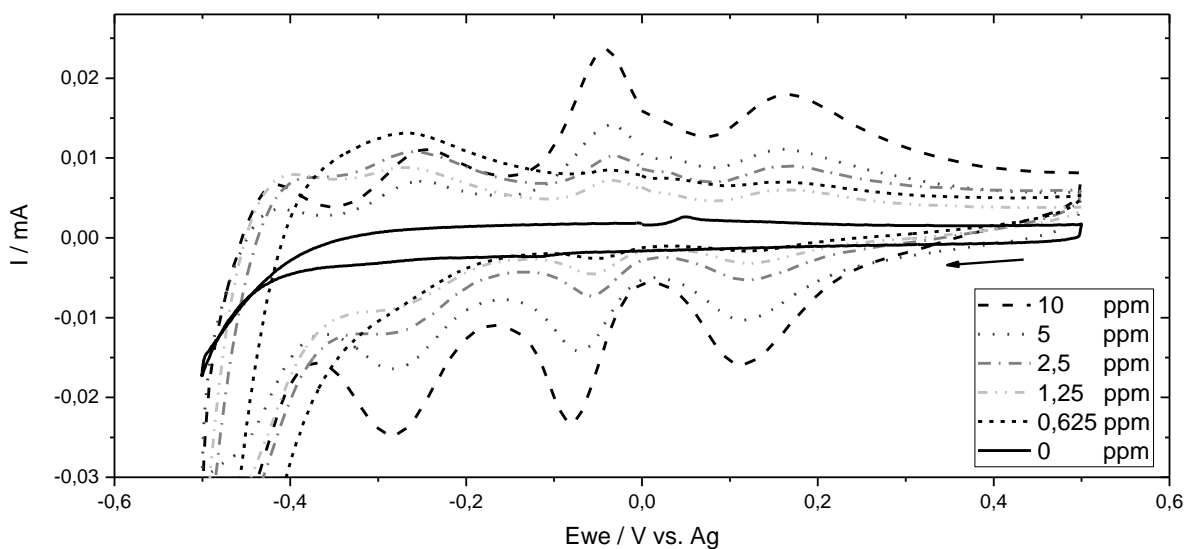
**Abbildung 6:** Zykelvoltammogramm der Phosphat-Konzentrationen 0, 0.5, 1, 1.25, 2.5 ppm in 0,1M KCl bei  $v=100\text{mV/s}$

Geprüft wurde ein Konzentrationsbereich zwischen 2,5 ppm und 0,5 ppm Phosphoranteil. Das Zykelvoltammogramm wurde entsprechend der bereits beschriebenen Methode im Mehrkanalmodus des Potentiostaten aufgenommen. Jeweils jeder 20te Zyklus wurde gegenübergestellt, um eine Vergleichbarkeit bei maximaler Signalstabilität zu gewährleisten. Es zeigt sich, dass das Messsystem keine Probleme hat, Konzentrationen im unteren ppm-Bereich und sogar Konzentrationen im Sub-ppm-Bereich zu detektieren. Weiterhin kann ebenfalls dargestellt werden, dass eine approximativ lineare Abhängigkeit in Hinblick auf die Konzentration des Phosphats in Lösung abgeleitet werden kann. Hierzu sind vor allem die Maxima bei 0,045V und 0,2V (Oxidation) respektive korrespondierende Minima bei -0,08V und 0,79V (Reduktion) anzuführen (Abb. 7).



**Abbildung 7:** Betragmäßige Auftragung der vier signifikanten Strom-Minima und -Maxima des Oxidations- und Reduktionslaufes zwischen 10 ppm und 0,5 ppm Phosphorkonzentration in 0,1M KCl.

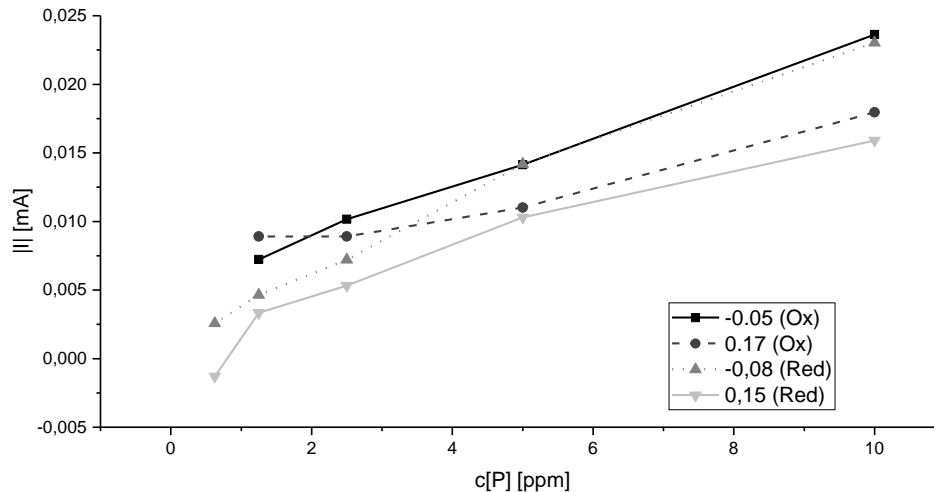
Im nachfolgenden Schritt wurde nun die Konzentration des Grundelektrolyten auf 0,01M KCl reduziert, um eventuelle Störeinflüsse hoher Leitfähigkeiten zu qualifizieren, bzw. um sich den Leitfähigkeiten realer Oberflächengewässer (< 1mS/cm) anzunähern. Das Ergebnis ist in Abbildung 8 dargestellt.



**Abbildung 8:** Zyklovoltammogramm der Phosphat-Konzentrationen 0, 0.625, 1.25, 2.5, 5, 10 ppm in 0,01M KCl bei  $v=100\text{mV/s}$

Es zeigt sich, dass eine Reduktion der Leitfähigkeit keine sichtbar negativen Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit des Systems hat. Weiterhin können niedrige

Konzentrationen im unteren ppm-Bereich sowohl qualifiziert als auch quantifiziert werden, eine Differenzierung der jeweiligen Konzentrationen ist mit bloßem Auge möglich. Auch hier kann eine noch deutlichere lineare Abhängigkeit im Bereich zwischen 1 ppm und 10 ppm festgestellt werden (vgl. Abb. 9).



Des Weiteren ist zu erwähnen, dass die Lage der signifikanten Maxima respektive Minima unabhängig von Leitfähigkeit und Analytkonzentration auf basis der vorhergehenden Zyklovoltammogramme als stabil angenommen werden kann.

## Ausblick

Selbstverständlich ist mit dem hier dargestellten Ansatz noch nicht das Optimum des technisch Machbaren erreicht. Erfahrungsgemäß kann durch weitere Verbesserung in Hinblick auf Messwerterfassung und Systemaufbau eine Steigerung in allen sensorisch relevanten Parametern erzielt werden. Es müssen weitere konzeptuelle Veränderungen durchgeführt und Überlegungen angestellt werden, um das System final in einem Umfeld außerhalb der Laborumgebung einzusetzen. Denkbar sind Verbesserungen hinsichtlich Elektrodengeometrie und –beschaffenheit, beispielsweise der Einsatz von einkristallinen Stiftelektrodenoberflächen oder aber Dünnschichtelektroden anstelle poröser Dickschichtelektroden. Weiterhin müssen bekannte Querempfindlichkeiten wie Arsenat oder Silikat quantifiziert werden und falls möglich durch entsprechende Vortrenntechniken wie Freiflusselektrophorese (FFE) oder sonstige chemische Verfahren eliminiert werden. Gleichzeitig kann im Fortgang der Forschungsarbeiten ebenfalls das vorliegende komplexchemische System untersucht werden.

## Zusammenfassung

Abschließend kann jedoch ein sehr positives Resümee aus den dargestellten Ergebnissen gezogen werden. Konnten in der Vergangenheit bereits grundlegende Erfahrungen mit dieser Methode erfolgreich präsentiert werden, so stellen diese Ergebnisse einen weiteren wichtigen und großen Schritt in die richtige Richtung dar: Auf Basis der dargestellten Resultate kann nun erstmals davon ausgegangen werden,

dass das System entsprechenden Bedingungen in Hinblick auf das zukünftig denkbare Einsatzgebiet gerecht werden kann. Durch sukzessive Verbesserung des Gesamtsystems und Messaufbaus ist es gelungen, eine sehr gute Sensitivität für geringe Phosphatkonzentrationen im unteren ppm-Bereich zu erhalten. Weiterhin kann durch die Empfindlichkeit der elektrodynamischen Messmethode ebenfalls eine Diskriminierung und somit Quantifizierung dieser geringen Konzentrationen erfolgen. Auch lässt der geringe Einfluss der Leitfähigkeit auf die Messwerterfassung hoffen, dass das Sensorsystem im späteren Feldeinsatz für vielfältige Gewässertypen eingesetzt werden kann.

#### Referenzen:

- [1] K. Bieger, Universität Kiel, Kiel, **2003**.
- [2] *Richtlinie 2000/60/EG (Wasserrahmenrichtlinie)*. *Wasserrahmenrichtlinie*, **2000**.
- [3] *Strafgesetzbuch § 324a Bodenverunreinigung*. *StGB*.
- [4] *Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen (Düngeverordnung - DüV)*, **2006**.
- [5] International Organization for Standardization, *Water quality - Determination of phosphorus - Ammonium molybdate spectrometric method*, 13.060.50, **2004**, Schweiz.
- [6] E. A. Nagul, I. D. McKelvie, P. Worsfold, S. D. Kolev, *Analytica chimica acta* **2015**, 890, 60.
- [7] a) Z. He, C. W. Honeycutt, *Communications in Soil Science and Plant Analysis* **2005**, 36, 1373; b) S. Pradhan, M. R. Pokhrel, *Sci World* **2013**, 11.
- [8] M. deKay Thompson, A. L. Kaye, *Trans. Electrochem. Soc.* **1932**, 62, 255.

## Nicht-invasiver mikroakustischer Online-Sensor für die Biofilmdetektion

**Sandra Lasota<sup>1</sup>, Sabrina Tietze<sup>1</sup>, Sandra Ebert<sup>1</sup>, Katrin Schwuchow<sup>1</sup>, Prof. Dr. Maria Kufner<sup>1</sup> und Prof. Dr. Klaus Stefan Drese<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Institut für Sensor- und Aktortechnik, Hochschule für angewandte Wissenschaften Coburg, Am Hofbräuhaus 1b, Coburg, Deutschland.  
Email: [sandra.lasota@hs-coburg.de](mailto:sandra.lasota@hs-coburg.de)*

Biofilme bilden sich in wässrigen Systemen an der Grenzfläche zu einer festen Phase aus, welches auf dem physikalischen Prinzip der Grenzflächenhaftung beruht. Durch chemische Konditionierung der Oberfläche können sich Mikroorganismen anhaften und zu einer Biofilmgemeinschaft anwachsen, die in einer Matrix aus extrazellulären polymeren Substanzen eingeschlossen sind (Pedersen, 1990; Flemming et al., 2002). In der Verfahrensindustrie sowie in Wasserversorgungsanlagen verursachen Ablagerungen in Form von Biofilmen innerhalb von flüssigkeitsgefüllten Rohren erhebliche Verschlechterungen der Prozessleistung und sogar Gesundheitsprobleme. Im Allgemeinen führt die Biofilmentstehung in der Industrie beispielsweise bei Wärmetauschern zu einer Erhöhung des Gegendrucks und zu einer reduzierten Wärmeübertragung (Melo & Bott, 1997). Somit vermindert das Wachstum von Biofilmen die Durchsatzleistung von technischen Anlagen, erhöht die Energiekosten und führt dementsprechend auch zu sehr hohen wirtschaftlichen Verlusten (Wingender & Flemming, 2011; Flemming, 2011).

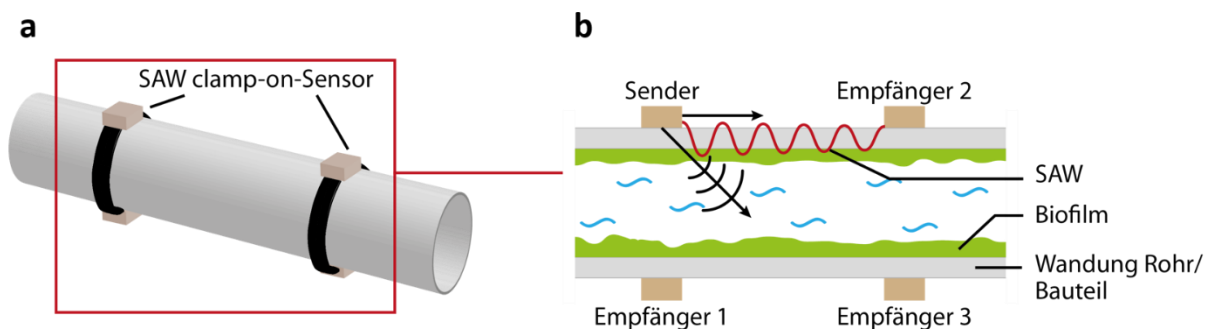
Es besteht daher ein unmittelbarer Bedarf an Sensoren zur Detektion der Biofilmbildung, um diese bereits in der Entstehungsphase entfernen zu können, bevor Störungen im industriellen Prozess auftreten können. Von den bereits im industriellen Einsatz befindlichen Sensoren detektieren die meisten Biofilme entweder thermisch über die Änderung des Wärmeübergangswiderstandes oder elektrochemisch. Optische Verfahren umfassen spektroskopische Methoden, welche beispielsweise via Fluoreszenzmessung spezifischer, mit der Biofilmbildung assoziierter Biomoleküle die Anwesenheit von Mikroorganismen erkennen. Daneben existieren faseroptische Messverfahren, welche die Änderung der Wellenlänge oder Intensität des rückgestreuten Lichtes detektieren. Alle auf dem Markt zur Verfügung stehenden Biofilmsensoren arbeiten invasiv, das heißt Teilkomponenten des Sensors (in der Regel die sensitive Fläche) oder der gesamte Sensor müssen mit dem Biofilm oder der Flüssigkeit im Inneren des Bauteils in direktem Kontakt stehen. Folglich müssen immer Ein- und/oder Umbauten an bestehenden Anlagen vorgenommen werden. In der Lebensmittelindustrie oder Medizintechnik besteht beim Einbau invasiver Sensoren zudem immer die Gefahr, dass Kontaminationen ins System eingebracht werden und die erforderliche Sterilität nicht mehr gewährleistet werden kann. Die meisten invasiven Sensoren müssen zudem regelmäßig ausgebaut, gewartet und gereinigt werden, um so die durch Biofilmbewuchs auf dem Sensor selbst bedingte Verringerung der Messempfindlichkeit und Sensorperformance aufzuheben. Auch sind invasive Sensoren häufigen Reinigungszyklen durch aggressive chemische Desinfektionsmittel ausgesetzt, wodurch sich die Lebensdauer des Produktes signifikant verringern kann.

Allerdings existiert kein kommerziell erhältliches, nicht-invasives und kostengünstiges Messverfahren zur Biofilmdetektion, welches eine einfach zu handhabenden Sensorik umfasst. Aus diesem Grund werden in dieser Arbeit spezielle Ultraschallsensoren erforscht, die das Potential besitzen, die Basis für kommerzielle Sensoriksysteme zur Biofilmdetektion zu bilden. Ultraschallsensoren sind hierfür besonders geeignet, da diese nicht-invasiv betrieben werden können.

Unter den verschiedenen Arten akustischer Wellen eignen sich insbesondere Lambwellen-Grundmoden zur Biofilmdetektion in flüssigkeitsgefüllten Rohren. Die  $A_0$ -Grundmode der Lambwelle ist eine geführte Plattenwelle, welche sich auf beiden Seiten einer Platte ausbreitet. Für diese Wellenmode gilt jedoch die Bedingung, dass die Hälfte der Plattendicke kleiner oder gleich der angeregten Wellenlänge sein muss (Viktorov, 1967). Diese können auf der Außenfläche von Rohren angeregt werden, da ihre Ausbreitung auch durch Ablagerungen auf der Innenfläche von Rohren beeinflusst wird. Die Lambwelle greift somit durch die komplette Wand hindurch, ohne dass Sensorkomponenten in das System eingebracht und in direktem Kontakt mit der Flüssigkeit stehen müssen.

Für die Detektion von Ablagerungen mittels Lambwellen eignen sich insbesondere zwei Vorgehensweisen. Zum einen werden nicht-auskoppelnde Lambwellen auf Platten und ähnliche nicht-auskoppelnde geführte Wellen auf Rohren verwendet (Lohr & Rose, 2003). Zum anderen kann die Modenkonzersion von auskoppelnden Lambwellen und die Führung von Schallwellen innerhalb flüssigkeitsgefüllter Rohre ausgenutzt werden (Schmitt et al., 2013). Angebrachte Klebebandschichten entlang der Übertragungstrecke der akustischen Impulse zwischen Sender und Empfänger führten mit steigender Schichtdicke zu einer Erhöhung der Schallgeschwindigkeit. Die Schallgeschwindigkeit der Übertragungstrecke durch das Fluid zu einem gegenüberliegenden Empfänger, wobei die Klebeschichten ausschließlich auf der Seite des Senders positioniert worden sind, wurde bei den untersuchten Geometrien unterschiedlich beeinflusst. Bei der Platten-Geometrie wurde eine längere Laufzeit mit steigenden Schichtdicken festgestellt wohingegen die Rohr-Geometrie eine monoton abnehmende Laufzeit aufwies (Schmitt et al., 2013).

Gegenüber bisherigen Arbeiten (Schmitt et al., 2013) wurden die piezoelektrischen Wandler für die Erzeugung und Detektion von Oberflächenwellen mittels einer Clamp-on-Vorrichtung kraftschlüssig an das jeweilige Bauteil angekoppelt, anstatt auf die Außenfläche der Rohrwand geklebt (Abbildung 10). Ein dritter Empfänger (in Abbildung 1b „Empfänger 1“) wurde hinzugefügt, welcher gegenüber zum Sender an der gleichen axialen Position angeordnet worden ist.



**Abbildung 10: Sensorkonzept. SAW = engl. surface acoustic wave, akustische Oberflächenwelle.**

Auf Grund der gewonnenen Erkenntnisse aus vorherigen Experimenten mit Ersatzschichten wie Klebeband, Gelatine sowie einer wässrigen Polymer-Lösung (Lindner et al., 2009) wurde hier Gelatine in Anlehnung an eine Biofilmschicht ausgewählt. Zwar erlaubte die Klebebandschicht eine grobe Abschätzung der Sensitivität der Messung, jedoch konnte diese nur partiell aufgebracht werden. Im Gegensatz dazu fungierten die weichen Schichtablagerungen in Form von Gelatine als Biofilm-Ersatzschicht, welche sich homogen über die Innenfläche des Rohres verteilen ließen.

Unterschiedliche Dicken der Beschichtung der Innenfläche des Rohres wurden durch unterschiedliche Mengen Gelatine erzielt. Anschließend wurde das Rohr mit Wasser befüllt und die Ausbreitungsgeschwindigkeit sowie die Signalamplitude wurden bei unterschiedlichen Mengen an Gelatine gemessen. Ein kommerziell erhältliches Edelstahlrohr mit einem Innendurchmesser von 42,9 mm wurde verwendet, womit der Wirksamkeitsnachweis bei industriell relevanten Einsatzbedingungen erzielt werden konnte.

Die durchgeführten Messungen mit der Aufbringungsmethode der Gelatine zeigten, dass Laufzeit- und Amplituden-Veränderung der Übertragungssignale bei unterschiedlichen Gelatine-Schichtdicken messbar waren. Dabei wurde die Wellengruppe der  $A_0$ -Mode näher betrachtet. Aus vorherigen Untersuchungen ist bekannt, dass sich insbesondere die  $A_0$ -Mode zur Messung der Schichtbelegung eignet. Die Laufzeitabnahme ergibt sich aus der Vergrößerung der Ausbreitungsgeschwindigkeit durch die Gelatine-Schicht. Somit führten zunehmende Schichtdicken zu einer Vergrößerung der Ausbreitungsgeschwindigkeit. Eine zusätzliche Gelatine-Schicht und deren schalldämpfender Charakter führen zu einer Dämpfung der sich ausbreitenden  $A_0$ -Mode. Demnach verringert sich auch die Amplitude mit zunehmender Gelatine-Schichtdicke.

Infolgedessen kann festgehalten werden, dass mit zunehmender Schichtdicke im flüssigkeitsgefüllten Rohr sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit und die Signalamplitude der nicht-auskoppelnden sowie auskoppelnden Lambwellen verändern. Beide Parameter erlauben Rückschlüsse über die Dicke der Schicht sowie deren elastischen Eigenschaften.

## Referenzen

- Pedersen, K. (1990). Biofilm development on stainless steel and PVC surfaces in drinking water. *Water Research*, 24(2), 239-243.
- Flemming, H. C., Percival, S. L., & Walker, J. T. (2002). Contamination potential of biofilms in water distribution systems. *Water science and technology: water supply*, 2(1), 271-280.
- Melo, L. F., & Bott, T. R. (1997). Biofouling in water systems. *Experimental thermal and fluid science*, 14(4), 375-381.
- Wingender, J., & Flemming, H. C. (2011). Biofilms in drinking water and their role as reservoir for pathogens. *International journal of hygiene and environmental health*, 214(6), 417-423.
- Flemming, H. C. (2011). Microbial biofouling: Unsolved problems, insufficient approaches, and possible solutions. In *Biofilm highlights* pp. 81-109. Springer, Berlin Heidelberg.

- Viktorov, I. A. (1967). *Rayleigh and Lamb Waves: Physical Theory Applications*. pp. 93. Plenum, New York.
- Lohr, K. R., & Rose, J. L. (2003). Ultrasonic guided wave and acoustic impact methods for pipe fouling detection. *Journal of food engineering*, 56(4), 315-324.
- Schmitt, M., Schmidt, K., Olfert, S., Rautenberg, J., Lindner, G., Henning, B., & Reindl, L. M. (2013). Detection of coatings within liquid-filled tubes and containers by mode conversion of leaky Lamb waves. *Journal of Sensors and Sensor Systems*, 2(1), 73-84.
- Lindner, G., Schmitt, M., Schmidt, K., Faustmann, H., Krempel, S., & Schubert, J. (2009). A1. 3-Detection of Coatings and Measurement of Coating Thickness on Technical Substrates using Surface Acoustic Waves in a Waveguide Configuration. *Proceedings SENSOR 2009, Volume I*, 36-40.



# **ISAT: Das Zusammenspiel von Oberflächenschallwellen, integrierter Optik und Mikrofluidik.**

**Maria Kufner<sup>1</sup>, Klaus Stefan Drese<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *ISAT - Institut für Sensor- und Aktortechnik  
Hochschule für angewandte Wissenschaften Coburg  
Am Hofbräuhaus 1b  
96450 Coburg, Germany.  
Email: [klaus.drese@hs-coburg.de](mailto:klaus.drese@hs-coburg.de)*

Das Institut- für Sensor- und Aktortechnik (ISAT) ist ein im Jahr 2006 gegründetes Institut der Hochschule Coburg, welches von Prof. Dr. Klaus Stefan Drese und Prof. Dr. Maria Kufner geleitet wird. Das ISAT versteht sich als anwendungsorientiertes Forschungsinstitut und Impulsgeber für technologische Innovationen. Im Vordergrund steht dabei der unmittelbare Bedarf von Kooperationspartnern aus den unterschiedlichsten industriellen Branchen (Automobilindustrie, Medizintechnik, Verfahrenstechnik, Sondermaschinenbau, etc.) an innovativen Produkten und Verfahren. Vor allem in der nordbayerischen Grenzregion, in welcher das ISAT angesiedelt ist, fungiert das Institut als nachgefragter Partner für messtechnische Problemstellungen und die anwendungsbezogene Sensorentwicklung. Das ISAT besitzt darüber hinaus allerdings auch eine Fülle an Kooperationspartnern außerhalb Oberfrankens sowie im europäischen Ausland. Das Portfolio des ISAT reicht von Sensorrecherchen für industrielle Anwendungen mit hohen spezifischen Anforderungen über die Sensor-Auswahl, -Optimierung und -Integration bis zur Entwicklung eigener spezifischer Sensorlösungen, die an die jeweiligen industriellen Anforderungen angepasst sind. Aus dem ISAT sind bereits zwei Ausgründungen hervorgegangen, die beide in der Stadt Coburg ansässig sind (SensAction AG; BestSens AG).

Das ISAT forscht aktuell in drei Themengebieten: Akustik, Optik und Mikrofluidik. Besondere Kompetenzen besitzt das ISAT auf dem Gebiet der mikroakustischen Sensorik und Aktorik. Hier betreibt das Institut seit vielen Jahren eigene Forschung und Entwicklung. Diese Kompetenz fließt maßgeblich in eine Vielzahl der im Institut durchgeführten Forschungsprojekte ein. Die im ISAT entwickelte Technologie basiert auf der gezielten Anregung sogenannter Oberflächenwellen - einer Sonderform des Ultraschalls - auf technischen Materialien. Durch die Nutzung spezifischer Schwingungsmoden ist es möglich, die Oberflächenwellen mittels piezoelektrischer Wandler z.B. auf der Außenseite von Komponenten und Bauteilen anzuregen, während die eigentliche Wechselwirkung der Oberflächenwellen mit dem zu messenden Medium im Inneren des Bauteils stattfindet. Anwendungsbeispiele dieser Technologie sind die Detektion von Biofilmen oder anderen Ablagerungen in flüssigkeitsgefüllten Rohren oder Schläuchen oder die Realisierung von Touch-Funktionen auf unterschiedlich geformten technischen Oberflächen. Auf dem Gebiet der akustischen Aktorik forscht das ISAT u.a. an der Beschleunigung elektrochemischer Grenzflächenreaktionen durch

Erzeugung akustischer Wirbelströmungen in Elektrodennähe umso z.B. zukünftig Akkumulatoren schneller aufzuladen.

Einen weiteren thematischen Schwerpunkt stellt die integrierte Optik dar. Aktivitäten umfassen hier die Überwachung kritischer Infrastruktur wie Brücken durch faseroptische Sensoren oder die Entwicklung von wellenleiterbasierter optischer Chips, für Fragestellungen aus der Telekommunikation oder der Automobilindustrie. Der dritte und jüngste Forschungsschwerpunkt des ISAT ist die Mikrofluidik. Hier sollen insbesondere analytische Fragestellung zur Überwachung von Industrieprozessen sowie die medizinische Vorort- und Labordiagnostik im Vordergrund stehen. Im ISAT entwickelte mikrofluidische Systeme sollen aber auch für Screening-Fragestellung und die Synthese von Chemikalien eingesetzt werden.

Die Kompetenzen aus den drei Forschungsschwerpunkten fließen in unterschiedlichen Aktivitäten zusammen, wie z.B. der Untersuchung oberflächennaher Materialveränderungen mit Hilfe eines Laser-Doppler-Vibrometers oder der Durchmischung und dem Transport von Flüssigkeiten über „Acoustic Streaming“. Auf allen Forschungsgebieten wird dabei zunehmend die Simulation bei der Auslegung von Systemen und als begleitendes Werkzeug zur Interpretation von Experimenten genutzt. Aktuell sind im ISAT 31 Mitarbeiter angestellt, welche durch 20 Studenten unterstützt werden. Das Mitarbeiterteam des ISAT setzt sich aus unterschiedlichen naturwissenschaftlichen und technischen Fachrichtungen (Biologie, Chemie, Maschinenbau, Elektrotechnik, Technische Physik, Informatik, Produktdesign) zusammen, um somit je nach industrieller Fragestellung projektbezogene Task-Forces für die Bearbeitung der unterschiedlichen Themenstellungen bilden zu können. Für das ISAT, das eng an der Praxis arbeitet, wird durch das heterogene Team und die enge Verzahnung der Fachdisziplinen mit ihrer unterschiedlichen Kompetenzschwerpunkten eine effiziente und industrienaher Bearbeitung der Projekte sichergestellt.

Das ISAT finanziert sich ausschließlich aus Drittmitteln, welche überwiegend aus der direkten Kooperation mit Unternehmen stammen. Im Jahr 2016 konnte das Institut aus öffentlichen Förderprogrammen und aus Kooperationen mit Industriepartnern Drittmittel im Umfang von ~2 Millionen Euro einwerben. Das Institut unterhält derzeit Forschungs- und Entwicklungs-Kooperationen mit etwa 50 Unternehmen, überwiegend aus dem Einzugsbereich der Hochschule Coburg. Über den Einzugsbereich hinaus kooperiert das ISAT deutschlandweit mit etwa 20 Industriepartnern im Rahmen von Förderprojekten und Forschungsaufträgen. Mit dem Umzug in das neue Institutsgebäude im Jahr 2013 konnte ein effektiver Laborbetrieb mit hochmodernen Geräten realisiert werden. Mit seinen hochtechnischen Laborflächen (z.B. Mikrobiologielabor; Chemielabor, Prototypenlabor, Laserlabor, Elektronikentwicklung), und Werkstätten verfügt das ISAT über eine Gesamtfläche von 1.200 m<sup>2</sup> für Forschungsmöglichkeiten. Außerdem verfügt das ISAT seit zwei Jahren über eine Dependence in Institutsnähe in dem ein Reinraum ist. Der Laborbetrieb in beiden Standorten arbeitet mit hochwertigen Geräteausstattungen, wie z.B. Fotolithografie, Sputteranlage, Laser-Doppler-Vibrometer, konfokales Laserscanningmikroskop, Highspeedkamera, Klimakammer, CNC-Fräsmaschine, Datenerfassungssysteme und diverse CAD und Software-Pakete.

# Optische Spektroskopie

## Entwicklungen der Sensortechnologie und Anwendungen im Lebensmittelbereich

Julius Krause<sup>1</sup>, Robin Gruna<sup>2</sup>, Thomas Längle<sup>2</sup>, Jürgen Beyerer<sup>2,1</sup>

<sup>1</sup> *Karlsruher Institut für Technologie KIT, Kaiserstraße 12,  
76131 Karlsruhe*

<sup>2</sup> *Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung IOSB,  
Fraunhoferstraße 1, 76131 Karlsruhe  
Email: [julius.krause@kit.edu](mailto:julius.krause@kit.edu)*

### Motivation

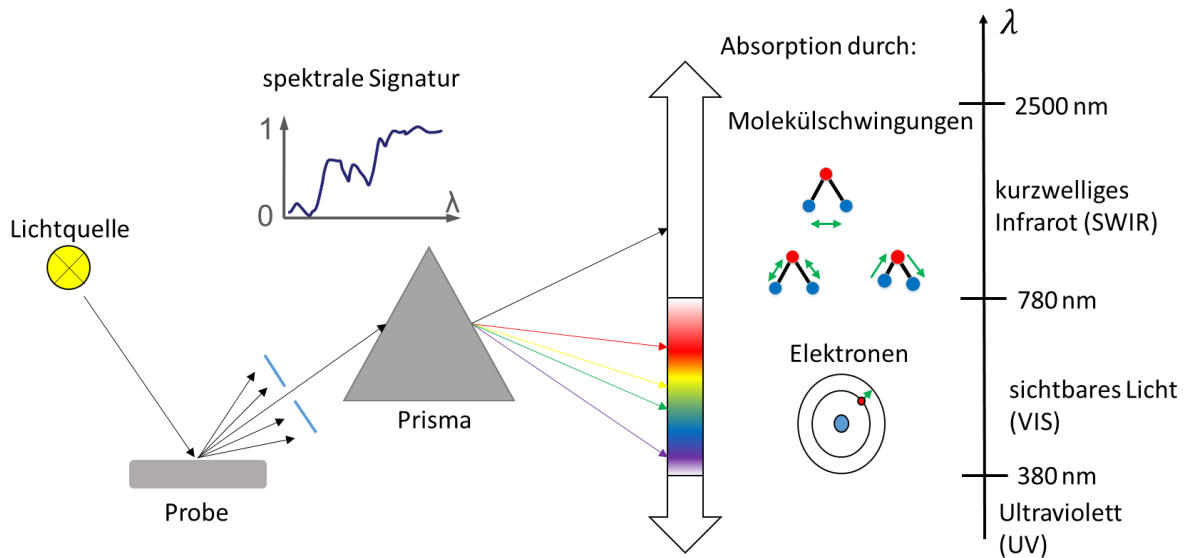
Um die hohen Ansprüche an die Qualität von Lebensmitteln zu gewährleisten, sind überwachende Messungen im gesamten Produktionsprozess bis hin zum Kunden erforderlich. Die optische Spektroskopie im sichtbaren und nahinfraroten Spektrum kann als zerstörungsfreie und berührungslose Messmethode an Lebensmitteln zur Qualitätsbestimmung eingesetzt werden. Das Ergebnis einer optischen Messung ist im Gegensatz zu Laboruntersuchungen unmittelbar verfügbar. Die Entwicklung kompakter und kostengünstiger Sensortechnik vereinfacht zukünftig die Verbreitung dieser Technologie.

### Optische Spektroskopie

Die messbare spektrale Signatur enthält die überlagerten Signale aus chemischer Zusammensetzung und geometrischen Eigenschaften einer Probe. Des Weiteren wird die spektrale Signatur mit Fremdlicht aus der Umgebung und einem Sensorspezifischen Rauschsignal überlagert.

Die chemische Zusammensetzung bestimmt die Absorption von Licht. Je nach Spektralbereich dominieren unterschiedliche Mechanismen. Im Nah- (780 nm – 1000 nm) und Kurzwelligen (1000 nm – 2500 nm) Infrarot werden Molekülschwingungen polarer Wasserstoffbindungen (CH, OH, NH, ...) angeregt. Höher energetisches Licht im sichtbaren (380 nm – 780 nm) und UV (240 nm - 380 nm) kann Elektronenzustände anregen, dabei kann zusätzlich Fluoreszenz entstehen.

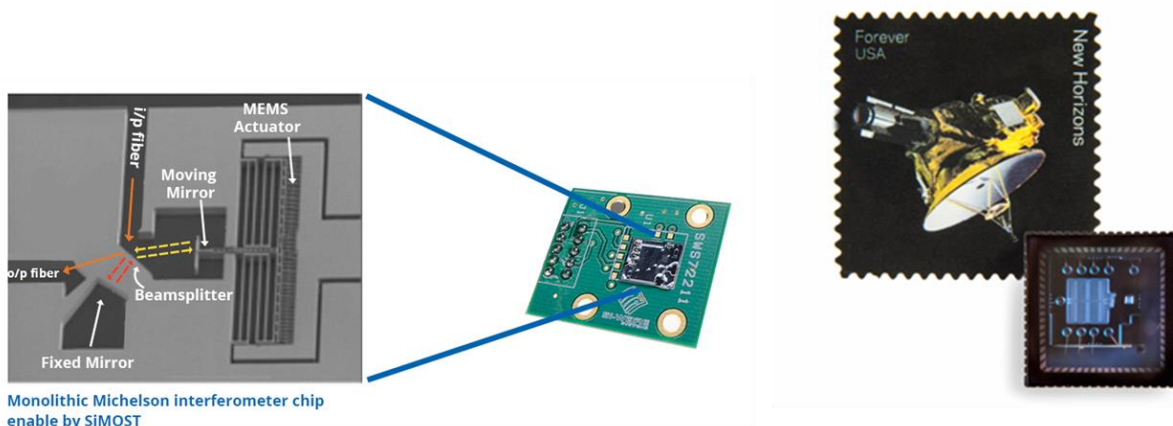
Die Streuung von Licht variiert je nach Probengeometrie. Zu diesen gehört unter anderem die Oberflächenbeschaffenheit, Mahlgrad eines Pulvers, Anordnung von Sensor und Lichtquelle. Durch auftretende Mie- oder Rayleigh- Streuung kann die spektrale Signatur entlang wellenlängenabhängige Basislinie verschoben werden. (Heinz W. Siesler, 2008).



**Abbildung 11: Licht einer bekannten Lichtquelle streut an einer Probe, ein Teil des Lichts wird durch Molekülschwingungen oder Elektronanregungen absorbiert. Die Analyse der spektralen Signatur ermöglicht Rückschlüsse über die Materialzusammensetzung.**

## Sensoren

Zur Messung der spektralen Signatur sind unterschiedlichste Messmethoden entstanden. Durch fortschreitende Entwicklungen in der Mikrosystemtechnik ist es gelungen verschiedene Messmethoden (Filter-, Fouriertransform-, Gitterspektrometer) in miniaturisierte Form als Sensor zu fertigen. Eine Serienproduktion zu Preisen von wenigen US-Dollar ist bereits angekündigt. Dies ermöglicht eine Integration dieser Sensoren in das *Internet of Things* (IoT) wodurch sich vielfältige Anwendungsfelder im Bereich der Qualitäts- und Prozesskontrolle eröffnen. Auf der Consumer Electronics Show (CES) in Las Vegas 2017 wurde bereit ein Smartphone mit integriertem Miniaturspektrometer vorgestellt.



**Abbildung 12. In der Abbildung ist ein FT-IR Spektrometer (1350 nm -2500 nm) der Firma Si-WARE. (Bild: www.neospectra.com)**

Miniaturisierte Spektrometer sind in spektralen Bereichen von 350 nm bis 2500 nm erhältlich. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick in bereits am Markt erhältliche Sensoren:

Hersteller	Herstellerbezeichnung	Messbereich in nm	Spektrale Auflösung in nm
Hamamatsu	C12880	340 – 850	15
Nanolambda	NSP32	350 – 1050	10 – 30
Viavi	SPM64 (NIR)	775 – 1054	1.5 – 4
Consumer Physics	SCiO	700 – 1100	-
Texas Instruments	DLP NIRscan Nano	900 – 1700	10
Spectral Engines	NIRONE 1.7	1350 – 1650	14 – 18
	NIRONE 2.0	1550 – 1950	16 – 22
	NIRONE 2.2	1750 – 2150	20 – 26
SI-Ware	Neospectra	1350 – 2500	8/16

**Tabelle 1: Herstellerangaben zu am Markt erhältlichen miniaturisierten spektroskopischen Sensoren.**

### **Anwendung optischer Spektroskopie im Lebensmittelbereich**

Optische Spektroskopie insbesondere im nahinfraroten Spektrum findet zunehmend Verbreitung in der quantitativen und qualitativen Analyse von Lebensmitteln. Inhaltsstoffe können in der Regel ab einer Detektionsschwelle von ca. 1%, teilweise sogar darunter, ermittelt werden. Die Herausforderung in der Analyse spektraler Signaturen entsteht durch die Überlagerung der Einzel Signale aus den verschiedenen, in Lebensmitteln enthaltenen, chemischen Komponenten. Für die Analyse spektraler Daten wurden in den letzten 50 Jahren unterschiedlichste Methoden entwickelt (Haiyan Cen, 2007).

An diesem Punkt befindet sich die Schnittstelle zu Disziplinen der Informatik. Spektrale Daten bilden einen hochdimensionalen Musterraum, zur Analyse können zahlreiche Methoden des Maschinellen Lernens eingesetzt werden. Die Vernetzung spektraler Sensoren über Webdienste mit Datenbanken ermöglicht eine zentrale Datenauswertung. Webdienste ermöglichen zusätzlich die Bereitstellung aktueller Analysemodelle für verschiedene Anwendungen und Produkte.

Erste Unternehmen bieten bereits mobile Spektrometer für Konsumenten an. Mit einer Smartphone App des Herstellers können Kunden die Daten zur Analyse an einen Webdienst senden. Im Ergebnis erhält der Kunde die Zusammensetzung des gemessenen Lebensmittels aufgeschlüsselt in die enthaltenen Hauptkomponenten (Fett, Zucker, Protein, ...). Für die Genauigkeit der Ergebnisse wurden im Rahmen eines Horizon 2020 Wettbewerbs bereits drei marktaugliche Systeme ausgezeichnet. (Horizon 2020 Food Scanner Price, 2017).

Zusammen mit weiteren Projektpartnern engagiert sich das Fraunhofer IOSB im Bündnis „Wir retten Lebensmittel!“, einer Initiative des Bayerischen Staatsministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten. Ziel des Forschungsprojektes ‚Foodscanner‘ ist die Entwicklung einer schnellen und zerstörungsfreien Messmethode zur Qualitätsbewertung und Haltbarkeitsabschätzung von ausgewählten Lebensmitteln. Gemeinsam mit dem Karlsruher Institut für Technologie hat das Fraunhofer IOSB das Karlsruher Zentrum für Materialsignaturen (KCM) gegründet. In einer gemeinsamen Datenbank werden spektrale Signaturen gespeichert und für Analysen bereitgestellt.

Zusätzlich entwickelt und betreibt das Fraunhofer IOSB eine Sensorplattform zur Erfassung und webbasierten Analyse spektraler Daten.

## **Zusammenfassung**

Im Bereich der Analyse und Qualitätskontrolle von Lebensmitteln und Agrarprodukten hat sich die optische Spektroskopie als eine schnelle und zerstörungsfreie Messmethode seit Jahrzehnten bewährt. Neue miniaturisierte Sensoren zu geringen Stückpreisen ermöglichen den Einsatz dieser Technologie außerhalb spezieller Labore. Methoden des Maschinellen Lernens profitieren von der Vernetzung kompakter Spektrometer, Messdaten können in Datenbanken zentral erfasst und ausgewertet werden. Analysemodelle können dem Anwender in Form von Webdiensten unmittelbar zur Verfügung gestellt werden.

## **1 Literaturverzeichnis**

Haiyan Cen, Y. H. (2007). Theory and application of near infrared reflectance spectroscopy in determination of food quality. *Trends in Food Science & Technology*.

Heinz W. Siesler, Y. O. (2008). *Near-Infrared Spectroscopy: Principles, Instruments, Applications*. Wiley.

*Horizon 2020 Food Scanner Prize*. (März 2017). Von European Commission Research & Innovation:  
<https://ec.europa.eu/research/horizonprize/index.cfm?prize=food-scanner> abgerufen

## NIR-Sensorik zur Qualitätsbestimmung neuer Zemente

**Jörg Matthes<sup>1</sup>, Carolin Lutz<sup>1</sup>, Patrick Waibelt<sup>1</sup>, Hubert B. Keller<sup>1</sup>, Ulrich Pecht<sup>2</sup>,  
Krassimir Garbev<sup>2</sup>, Günter Beuchle<sup>2</sup>, Uwe Schweike<sup>2</sup>, Peter Stemmermann<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Institut für Angewandte Informatik,  
Karlsruher Institut für Technologie, Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-  
Leopoldshafen, Deutschland.*

<sup>2</sup> *Institut für Technische Chemie,  
Karlsruher Institut für Technologie, Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-  
Leopoldshafen, Deutschland.  
Email: [joerg.matthes@kit.edu](mailto:joerg.matthes@kit.edu)*

### **Einführung**

Der Zementsektor ist eine der Branchen mit einem sehr hohen Energieverbrauch und einer jährlichen Kohlendioxidemission von rund 3,5 Milliarden Tonnen. Heutzutage hat die Zementproduktion einen Anteil von ca. 9,5-10% der weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen. Am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) wurde ein neues umweltfreundliches Verfahren zur Herstellung eines neuartigen hydraulischen Bindemittels (Celitement) entwickelt. Es ist vergleichbar mit herkömmlichem Portlandzement, besitzt jedoch ein hohes Einsparpotential beim Energieverbrauch und den Kohlendioxidemissionen bei der Herstellung. Bei einem geringeren Bedarf an Kalkstein und deutlich niedrigeren Temperaturen kann das neue Verfahren bis zu 50 Prozent Energie bei der Herstellung im Vergleich zu herkömmlichem Portlandzement einsparen.

### **Celitement-Herstellungsverfahren**

Celitement wird in einem mehrstufigen Verfahren aus Kalkstein und Sand hergestellt (vgl. Abbildung 1). Der erste wesentliche Schritt nach der Entsäuerung des Kalksteins ist eine hydrothermale Synthese in einem Autoklaven. Das dabei gebildete Zwischenprodukt ist aber noch nicht hydraulisch aktiv. Nach dem Trocknen wird das Zwischenprodukt durch ein spezielles Reaktionsmahlen in einer Kugelschwingmühle zu hydraulisch aktivem Calciumhydrosilikat aktiviert.

Bisher wird keine Online-Messung und Bewertung der Produktqualität im Herstellungsprozess durchgeführt. Nur komplexe oder zeitaufwändige Analysemethoden wie Röntgenbeugung (XRD), thermogravimetrische Analysen oder die Bestimmung der Druckfestigkeit nach Hydratation erlauben eine Quantifizierung der Produktqualität. Erschwerend kommt hinzu, dass Celitement einen hohen Anteil an amorphen Phasen besitzt, die von XRD nicht detektiert werden können.

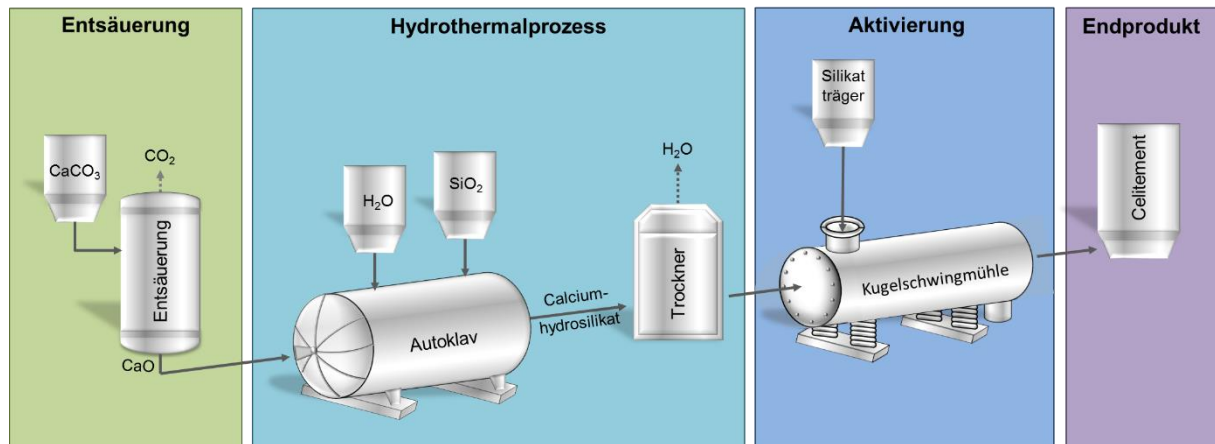


Abbildung 13 Verfahrensübersicht des Celitement-Prozesses

### Neues Messverfahren

Eine Online-NIR-Spektroskopie soll zukünftig eine zuverlässige Überwachung der Produktqualität vor und nach dem Reaktionsmahlen ermöglichen. Mit seiner Einfachheit in Bezug auf Leistung, Robustheit und Quantifizierung wurde die NIR-Spektroskopie als Online-Messsystem ausgewählt. Chemometrische Methoden sind bei der NIR-Spektroskopie gut etabliert und erlauben eine zuverlässige Quantifizierung eines breiten Spektrums an physikalischen und chemischen Parametern.

Um die Produktqualität von Celitement zu charakterisieren, müssen verschiedene charakteristische Parameter definiert werden. Das Zwischenprodukt wurde daher durch eine Reihe von Experimenten mit unterschiedlichen Trocknungstemperaturen und Mahldauern behandelt und das Produkt mittels XRD- und thermogravimetrischer Analysen zusammen mit der NIR-Spektroskopie analysiert, um die Abhängigkeit zwischen Trocknungs- und Mahlprozessen zu untersuchen.

### Inhalt des Vortrags

Im Vortrag wird ein kurzer Überblick über den Celitement-Prozess gegeben und die Aufgabe der Online-Messung und Bewertung der Produktqualität erläutert.

Anschließend wird ein Gesamtkonzept zur Online-Produktqualitätsüberwachung auf der Basis der NIR-Spektroskopie für den Celitement-Prozess gegeben.

Danach werden Methoden zur systematischen Entwicklung von Nahinfrarot-Kalibriermodellen und die Bestimmung des endgültigen Kalibriermodells vorgestellt. Die Anwendung auf die Versuchsreihe veranschaulicht die schnelle Messung ausgewählter Kenngrößen mit NIR-Spektroskopie und zeigt die Ergebnisse unterschiedlicher Mahldauern auf die Produktqualität und die per NIR-Spektroskopie bestimmten Qualitätskenngrößen.

Abschließend wird ein Konzept zur regelungstechnischen Einbindung der neuen Online-Qualitätskenngrößen in den Celitement-Produktionsprozess vorgestellt.



# Smarte Sensorlösungen mit 3D-Multimaterialdruck und Energy-Harvesting

Hanno Platz

GED Gesellschaft für Elektronik und Design mbH  
Pastoratsstraße 3, 53809 Ruppichteroth  
Email: h.platz@ged-pcb-mcm.de

## Bahnbrechende Entwicklungen für neue Lösungen und Produkte

Dramatische Weiterentwicklungen in den 3D-Drucktechnologien und wegweisende Forschungsergebnisse der Materialentwicklung haben ganz neue Lösungsmöglichkeiten in den Bereichen Sensorik, Robotik, Medizintechnik und wearable electronic eröffnet. Neuartige, einfache und werkzeuglose Herstellungsverfahren erlauben eine schnelle, preisgünstige und zugleich individuelle Produktion. Innovationen aus der Materialforschung wie leitende und halbleitende Nanomaterialien ermöglichen es, im Dispenser-Druck- oder Tintenstrahlverfahren hochgenau feine leitende Schichten und Strukturen zu applizieren.

Als Träger beziehungsweise Substratmaterialien stehen verschiedenste Folien, Thermoplasten und Duroplasten als Technopolymere zur Verfügung. Ein ganz neuer Bereich entsteht derzeit mit der sogenannten stretchable oder wearable Elektronik für Anwendungen in intelligenter Kleidung und in der Medizintechnik. Lowcost-Gewebe werden mit leitfähigen Eigenschaften oder Strukturen hergestellt, die hochdehnbar sind. Damit lassen sich funktionale Eigenschaften, wie etwa Sensoren, Aktoren oder auch Heizungen in die Kleidungsstücke integrieren.

Die Herstellung von „funktionalen Eigenschaften“ im 3D-Druckverfahren geht noch weiter. Durch den Druck von fünf verschiedenen Materialien lassen sich verschiedenfarbige LEDs drucktechnisch herstellen, sogenannte „Quantum-Dot-based Light-Emitting Diodes (QD-LEDs)“.

Ein wichtiger Vorteil der „additiven Herstellungsweise“ ist die Möglichkeit, Materialien wie transparent Substrate, Elektroden mit verschiedenen Leitwerten und Isolationsschichten aus organischen Polymeren per Multimaterialdruck in einem Prozess miteinander zu kombinieren. Mit neuesten Hightech-Nanotinten, die einen extrem hohen Leitwert aufweisen und mit denen sich Strukturen unterhalb von 100 µm erstellen lassen, werden auch aktive Bauteile oder 3D-Antennen herstellbar.

Die Funktionen in einem Sensorknoten oder in einer „funktionalen Elektronikeinheit“:

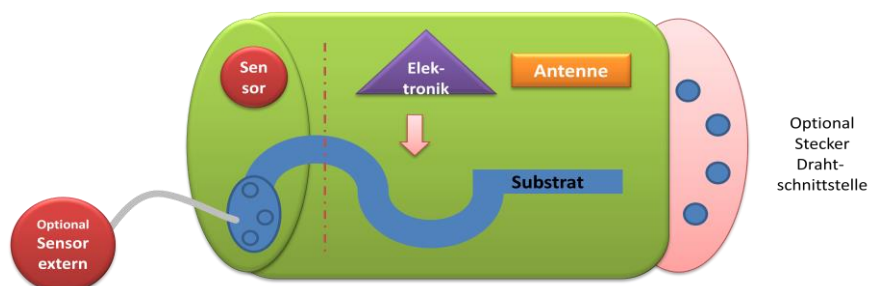


Bild 1: Funktionen im Sensorknoten, Grafik: GED

### **3D-Multimaterialdruck bei GED**

GED hat bereits im Herbst 2016 einen Multimaterialdrucker angeschafft, der Kunststoff und leitende Paste druckt. Ein Sensordemonstrator wurde entwickelt und mit dem Drucker hergestellt. Mit ihrer Hybridbauweise nutzt die Lösung eine Kombination verschiedener Technologien. Für die höher integrierte Elektronik kam eine herkömmliche Leiterplatte zum Einsatz, die dann in das gedruckte Gehäuse implementiert und mittels Silberpaste angeschlossen wurde. Auch Bauteile wie Stecker und Antenne sowie ein „kapazitiver Touch-Sensor“ entstanden im 3D-Print mittels Silberpastendruck.

Die Erfahrung zeigt, dass sich mit dieser Technik sehr individuell Lowcost-Sensoren herstellen lassen, die zukünftig gerade für Anwendungen im Bereich Industrie 4.0 (IoT) benötigt werden. Die Form des Sensorgehäuses ist durch den 3D-Druck in weiten Bereichen frei und so an die jeweilige Anwendung einfach anpassbar.

### **Herausforderung Energieversorgung**

Ein weiteres wichtiges Themengebiet der Sensorik stellt die Energieversorgung dar. Autarke Sensorsysteme, die ohne jegliche Kabel auskommen und vor allem möglichst wartungsarm funktionieren, benötigen eine optimierte Energiequelle. Rein batteriebetriebene Geräte sind in den meisten Fällen industrieller Anwendung unbrauchbar. Ein Batteriewechsel ist oft nur durch aufwändige Demontage möglich. Daher hat man in den letzten Jahren sogenannte „Energy-Harvesting-Techniken“ erforscht und entwickelt. Energiequellen im Umfeld wie Wärme, Bewegung oder Photovoltaik werden genutzt und in elektrischen Strom umgewandelt. Ein Nachteil dieser „Erntemethoden“ liegt allerdings darin, dass mit solchen Verfahren bislang nur einige wenige Mikroampere an Energie erzeugt werden konnten.

GED hat im Rahmen der BMBF-Förderinitiative KMU-innovativ „Freiform“-Energy-Harvesting-Lösungen weiterentwickelt, die verschiedenen Anwendungen und Einbauorten für Industrie 4.0-Anwendungen gerecht werden. Hier demonstriert wird ein Verfahren mit einer neuen Hochleistungs-Solarzelle, die mithilfe einer speziellen Beschaltung den komplett autarken Sensorbetrieb eines Kraft- und Temperatur-Sensorknotens in einer Drehmaschine ermöglicht. Ein anderes Beispiel zeigt die Energieversorgung per induktiver Kopplung für Sensorsysteme in drehenden Bearbeitungsmaschinen. Elementar für den energieeffizienten Betrieb der Sensorsysteme sind energieoptimierte Schaltungskonzepte, die sich an die Bedingungen flexibel anpassen können.

GED hat mit den Projektpartnern Fraunhofer IZM und TU Berlin Konzepte und Algorithmen entwickelt, die eine Skalierbarkeit des Messbetriebs ermöglichen und die eine eigene Intelligenz zur Energieoptimierung implementiert haben. Damit lassen sich etwa intelligente Servicesensoren (Maintenance Sensors) realisieren, die angepasst auf Grenzwerte oder Schwellwerte reagieren.

Für das Projekt „FreiForm“ haben die Projektpartner einen Sensor-Hardware- und Softwarebaukasten entwickelt, der auf drei Grundmodulen basiert:

1. AFE Analog Front End mit ADC und Controller für DMS-Signale
2.  $\mu$ Controller und Funk, mit Bluetooth-Low-Energy-Technik
3. Powering für verschiedene Energy-Harvesting-Methoden

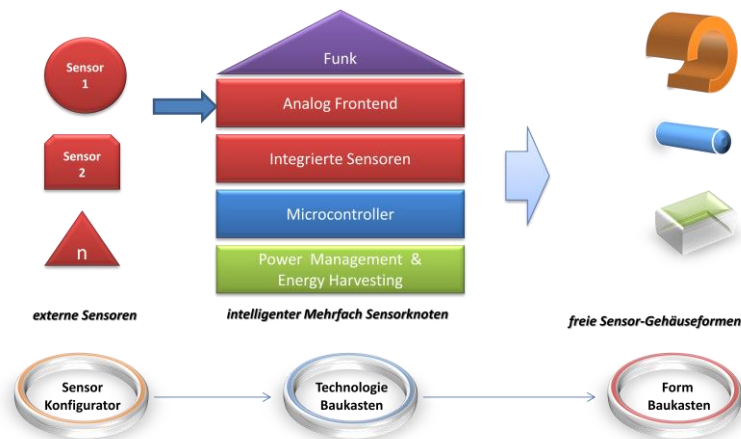


Bild 2: Konzept von GED

GED bietet ab Januar 2018 eine flexible Standardlösung für Kunden an, die angepasste Sensorknoten für Ihre IoT-Industrieanwendungen benötigen.

Das hochintegrierte Messsystem beinhaltet mehrere Sensoren, wie Temperatur und Luftfeuchtigkeit sowie den Anschluss von vier DMS-Sensoren und einem ARM3-Mikrocontroller mit Bluetooth-Funk (BLE), sowie dem Powering für eine 3D-Solarzelle in Größe einer LED. Die komplette Elektronik ist auf Fingernagelgröße (20 x17 mm) miniaturisiert.

Die Lösung zeigt: Durch Einsatz des 3D-Drucks lassen sich jetzt „smarte Multisensor-Lösungen“ in freier Formgebung realisieren. Dabei können Sensoren, Energy Harvesting – gegebenenfalls mit einem Akku zum Zwischenspeichern – inklusive der gesamten Elektronik und der Antenne in einem Gehäuse mit sehr kleinen Bauraumabmessungen integriert werden.

# Application of magneto-resistive sensors in neural bridge monitoring system

Oliver Schneider, Dr. Jacob Müller, Jia-Jing Tsai

*Pötzl Ingenieure GmbH Mohrenstraße 4 96450 Coburg*

[Oliver.Schneider@poetzl-ingenieure.de](mailto:Oliver.Schneider@poetzl-ingenieure.de), [Jacob.Mueller@poetzl-ingenieure.de](mailto:Jacob.Mueller@poetzl-ingenieure.de)

**Abstract:** The failures of some bridges in Europe have pushed the state of bridge inspections and maintenances work into media spot lights in recent years. The costs of such disasters; both human and economical, are mounting. There are many bridges within Europe that will be reaching their end-of-useful-life soon. The inspections and maintenances of these bridges become increasingly important as we are replacing or retrofitting these bridges to ensure the public safety. A project has been initiated to investigate the feasibility of a neural monitoring system. The use of various sensors was studied and it was concluded the use of magneto-resistive sensors provides the most promising results for vehicle detection. This paper provides further examples to demonstrate such use and concluded the application of magneto-resistive sensors in neural bridge monitoring system is viable.

## 1. Introduction

### 1.1. Background

In February 2015, the Schiersteiner motorway bridge between Wiesbaden and Mainz was closed in both directions indefinitely due to damages. This closure affected not only the commuters between the two federal states of Rhineland-Palatinate and Hesse but also thousands of foreign guests who were attending the Mainz Rosenmontag event which took place on the same day. The closure caused major traffic jam in the region as it was one of only two motorway bridges that connect the two cities. The damage was caused by a pillar that had leaned sideways during construction and the road surface slumped 30 centimeters as a result. This incidence is one of many examples where early damage detection of the structures would be beneficial in both economic and social aspects.

A much more tragic course took place in northern Italy on 28.10.2016. A segment of an overpass bridge collapsed while a truck was passing through it. The segment fell on the traffic below and buried a passenger vehicle beneath. One man lost his life and four people were injured. Tragically, there was a structural inspection of the bridge merely hours before the incidence and a closure of the bridge was requested by the inspector. In this case, although the damage was detected during a routine inspection, it was too late to prevent this tragic incident.



Fig. 1: Collapsed Bridge in Italy [NfS16], [MB16]

## 1.2. Situation in Germany

In order to avoid such tragic events, Germany is faced with the challenge of continuously maintaining and expanding the transport infrastructure as it is the most important Central European transit country.

The railway bridges and road bridges in Germany have average age of about 80 and 40 years respectively. Their preservation and replacement are associated with high costs. The traffic freight transport volume has increased more than five folds between 1980 and 2010. In addition to the volume increase, the weight of the freight vehicles has also increased due to the modern freight route optimization process. For the forecast year 2025, the Ministry of Transport, Building and Urban Development expects this increase factor to be eight folds. [BMV13]

The existing bridge maintenance inspection program is usually carried out at fixed time intervals and is independent from the usage of the bridges. The program is time consuming and costly. The inspection is almost exclusively performed by local specialists. This model has reached its limits under the forever increasing traffic volumes predicament and should be supplemented by continuous monitoring.

## 2. Research Project i.bridge

### 2.1. Project & Partners

During the Project i.bridge, a prototype of intelligent bridge monitoring system is being developed. The system employs various sensors to collect data and then evaluates them via a learning neural network. The sensors gather various types of data at multiple locations of the bridge as vehicles passing through the bridge, i.e. the information collected are not only multi-dimensional spatially, but also include time histories of data.

This approach makes it possible to consider interactions and correlation of the collected data which can-not be identified by standard methods without considerable effort. One example is the relationship between the temperature of asphalt/concrete and the vibration behavior of road and railway bridges.

The project is being developed in cooperation with three other partners; namely ci-Tech GmbH Karlsruhe, the University of Applied Sciences ISAT in Coburg and the Karlsruhe Institute of Technology KIT. The research project is funded by the German Aerospace Center (DLR) on behalf of the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF).

The aim of the project is to establish a system that can collect various measured data and analyzing them in a self-organizing neural network so that the state of the structure can be monitored in real-time with a high level of accuracy.

## 2.2. Test Bridge

The development of the system is based on mathematical models which are derived from finite element method and describe the mechanical behavior of bridges. In addition, laboratory tests performed at the Technical University of Kaiserslautern (TU-Kaiserslautern) are also part of the project.

A real road bridge is essential in order to develop the aforementioned system. The collection of data such as traffic volume, load condition and vibration behavior of the bridge are needed. In addition, the bridge also serves as a test object for the software and hardware components of the system. A 2-lanes bridge located between Breitengüßbach and Baunach on B279 was found to be suitable for this project. With approval from the State of Bavaria, the bridge was established to be the study object of this project.



Fig. 2: Test Bridge “BW70”, Baunach

The test bridge is equipped with numerous sensors for the detection of the concrete strains and accelerations. In addition to classical sensor technology, modern measurement technology based on glass fiber technology is also used.

## 2.3. Recognition of Events

The detection and classification of vehicle as they passing through the bridge are one of the crucial tasks for the monitoring system. The mechanical behavior of the structure recorded via sensors cannot be used for comparisons without knowing the current traffic situation on the bridge and thus estimate of damage by comparison and matching of pattern data cannot be made.

Various methods were investigated for the identifications of the vehicles as they pass through the bridge. Those methods are discussed briefly herein.

### Detection using 3D Laser Scanner:

The first method to identify the vehicle is through a laser scanner system. A 3D laser scanner recognition system developed by the Faculty of Mechanical Engineering / Vehicle Technology of HTW Dresden was tested.



Fig. 3: Laser Scanner, Screenshot Vehicle Detection Software

The laser scanner with evaluation software developed by HTW was successfully tested and the traffic situation on the bridge was recorded with high reliability. The system is able to detect the speed of the vehicles, as well as the type and the external dimensions, day and night. The system was placed on the south side of the bridge towards Breitengüßbach.

However, one disadvantage of this system is that it is unable to identify vehicles on the opposite lane when there was high volume of traffic on the nearside of the bridge and block the line of sight. The solution in this case would be the installation of a second laser scanner on the opposite side of the road. However, this solution may not be effective for multi-lanes bridges.

Another disadvantage of this scanning system is that it can only measure the vehicle speed as the vehicle either enters or leaves the bridge depending on the direction of the travel. However, the monitoring system requires both the entering and leaving time of the vehicles. Thus, the missing information must be calculated based on assumption of constant speed. It was realized during the research that this estimated speed is not sufficiently accurate for the monitoring system to conduct further assessments.

In summary, 3D laser scanning system can be used for the test bridge provided four systems are used and timeline between the four systems are synced. However, this system was excluded because of the high acquisition costs for the scanners and the complex evaluation algorithms it requires to operate. In addition, this system would be difficult to expand for multi-lanes bridges.

### Detection using Photo-Electric Proximity Sensors:

Photo-electric proximity sensors were also considered. The sensors were placed on either side of the bridge to detect vehicle travelling in each direction. However, the results showed a very high error rate as the reflection of the vehicles affects the measurements. In addition, the color of vehicles as well as surface of the vehicle also affects the measurement. Although the sensitivity of the sensor can be adjust and increase of the sensitivity did increase the reliability of the vehicle detection, it also

caused another issue of being too sensitive and was detecting cars traveling in the other direction which is not desirable.

Another issue with this type of sensor is the requirement for special weathering and mechanical protections as its functionality is vulnerable to severe weather conditions as well as roadside accidents. The sensor was ultimately deemed unsuitable.

Detection using Radar Sensors:

Use of radar sensors was considered initially but quickly ruled out as an option because these sensors must also be installed close to the dedicated lanes and thus difficult to maintain and protect from weathering and roadside accidents.

Detection using Magnetic Field Sensors:

The magnetic field sensors were ultimately determined to be suitable for identifying the traffic situation on the bridge. For the research project, Sensitec AFF755B magnetic field sensors mounted on S08 adapter boards; which are designed for the detection of weak magnetic fields; are used.

AMR magnetic field sensors have been chosen since these are particularly suitable for measuring low field strengths in the range from a few nT to mT with high resolutions. The achievable magnetic field sensitivity is significantly increased compared to other solid-state magnetic-field sensors, such as Hall sensors. It has substantially improved zero-point and temperature stability.

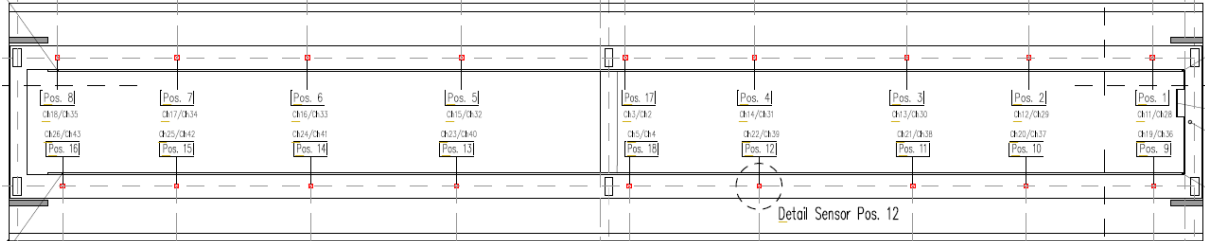


Fig. 4: Test Bridge Top View Magnetic Field Sensors M1 to M4, Strain-Gauge D11 and Accelerom. B1

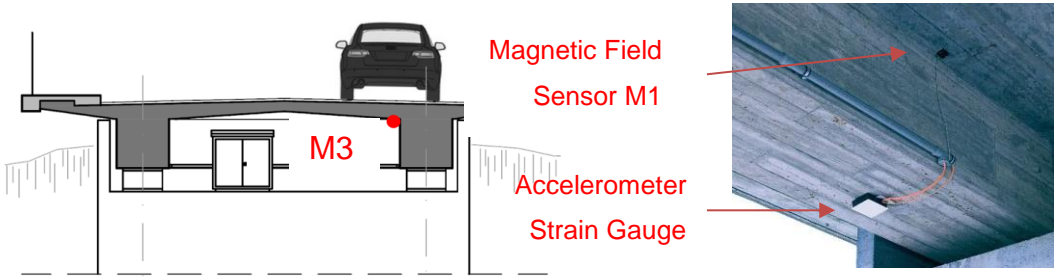


Fig. 5: Location Magnetic Field Sensors; left: Cross Section, right: Installed Sensors

The sensors can reliably detect the traffic situation on the bridge through 40 cm of concrete and 8 cm of asphalt even though it is installed on the underside of the bridge. Another advantage of these installation locations is that the sensors are sheltered from



weathering and roadside accidents. In addition, the sensors offer the advantage that individual lanes can be monitored in a targeted manner. Furthermore, sensors can be installed at the beginning and end of the bridge, so that the time points when a vehicle enters the bridge and when it leaves the bridge can be accurately recorded.

The integration of the magnetic field sensors into the measuring system can be easily implemented as the sensors can be connected to the existing measuring amplifiers such as a typical full Wheatstone Bridge Circuit. In addition, the sensors can also be operated without flip-coil. It is deemed a better and more economical solution for the problem as costs are much lower and its programming is less complicated compared to the 3D scanner system.



Fig. 6: left: Pinning of AFF755B [ST11] in SO8-housing; right: Amplifier and Data-Recorder

**2.5. Event A: Audi A6, Single Vehicle Event**

The first event is a single vehicle travelling towards Breitengüßbach (Fig. 7). In this figure, the vehicle was leaving the bridge and a magnetic sensor M3 was mounted just beneath the underside of the bridge at this location (Fig. 4).

The sensor recorded strong signals with a signal-to-noise ratio above 90 dB as the vehicle leaving the bridge (Fig. 8). As mentioned previously, a signal as the vehicle enters the bridge is also required to determine the average speed of the vehicle. Another sensor M4 was placed at the beginning of the bridge for this purpose (Fig. 4). Fig. 9 shows the signals as the vehicle enters the bridge (detected by M4) and leaving the bridge (detected by M3).

The strain sensor D11 provides information on the vertical deformation of the bridge as the vehicle passes through the bridge as shown in Fig. 10. The acceleration sensor (Fig. 11) measured the vertical acceleration of the bridge and offers supplemental information on the dynamic behavior of the bridge.



Fig. 7: Event A: Audi A6, Single Event

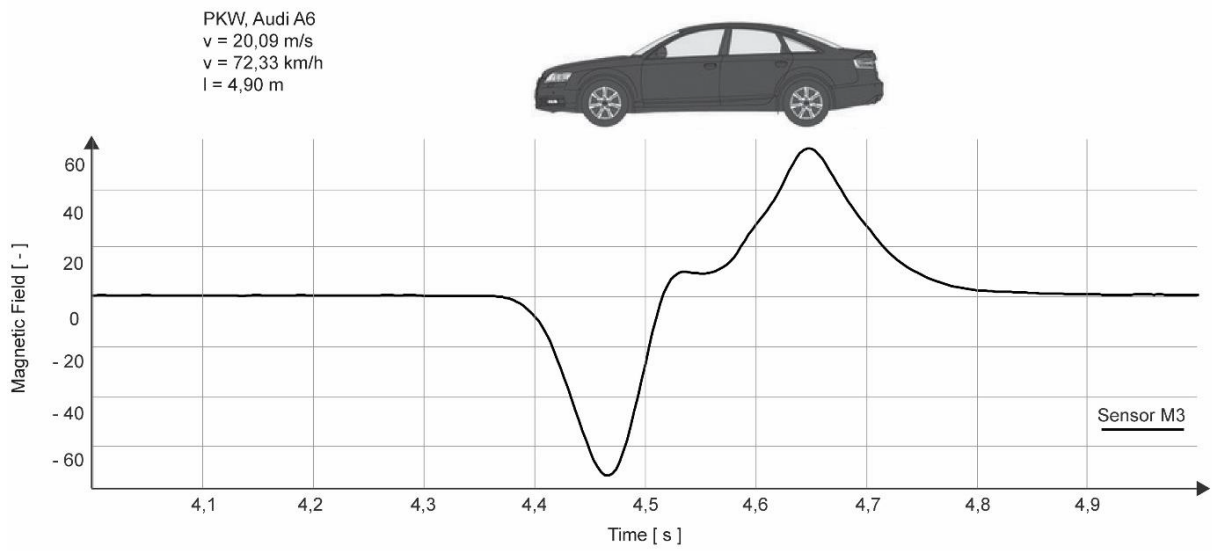


Fig. 8: Ex

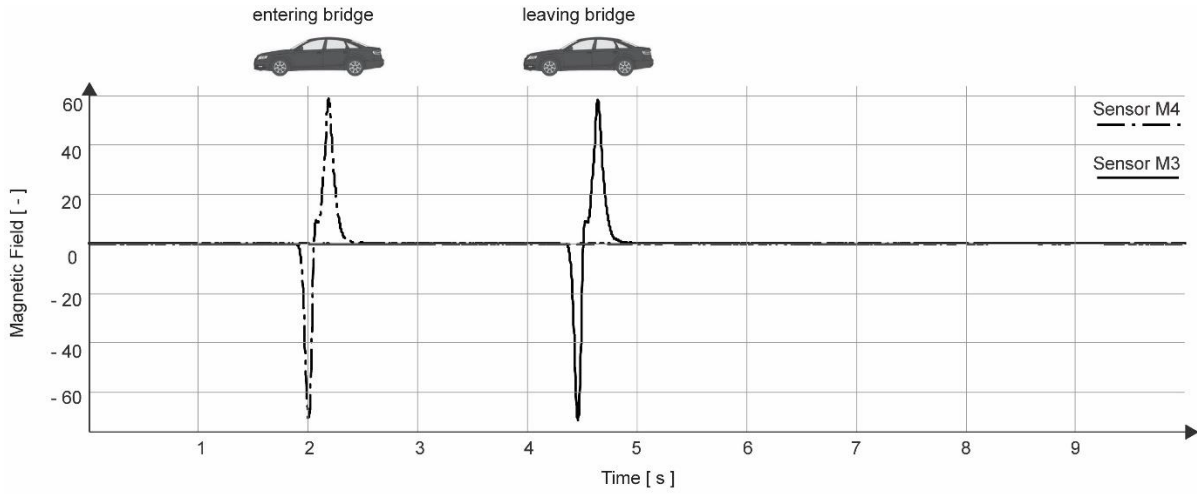


Fig. 9: Example Magnetic Field Sensor M3 (single vehicle event)

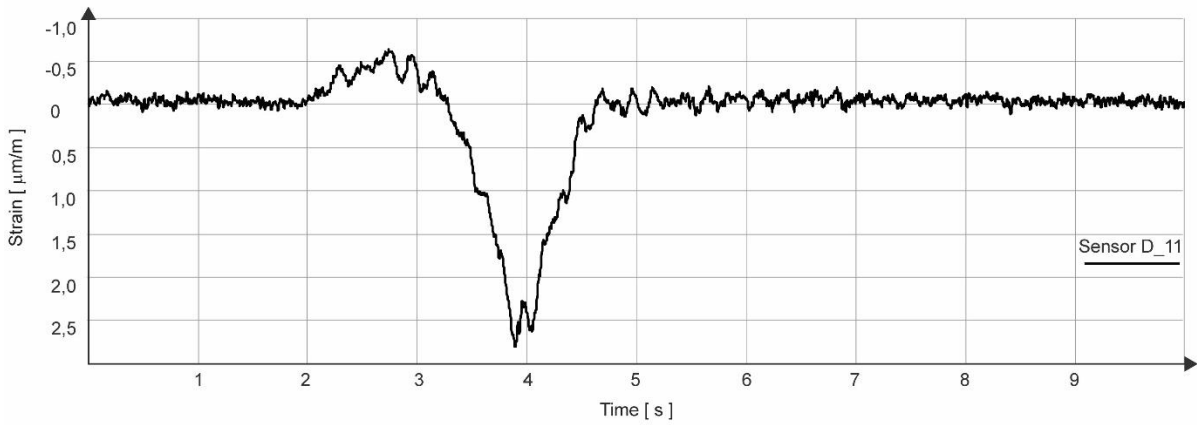


Fig. 10: Example: Strains Sensors D\_11 (single vehicle event)

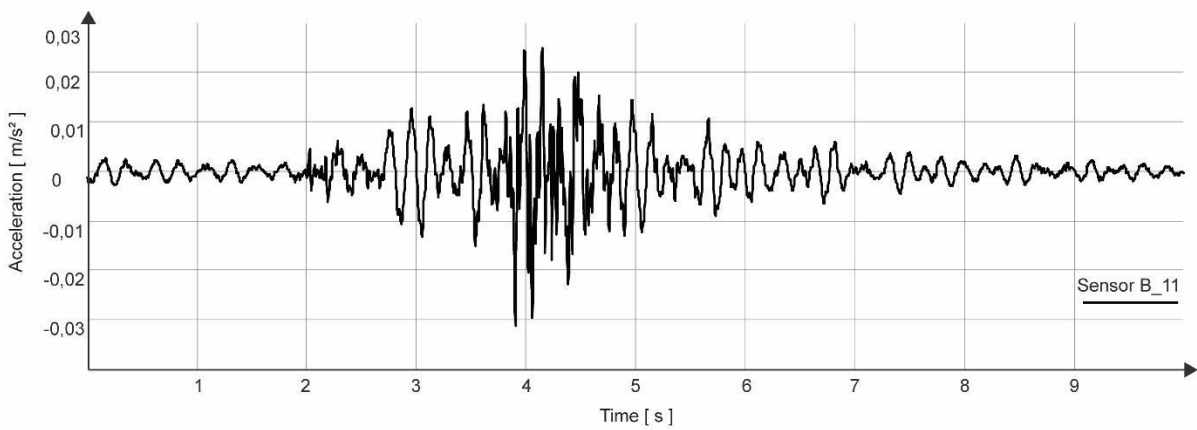


Fig. 11: Example: Accelerations Sensors B\_11 (single vehicle event)

## 2.6. Event A: Truck followed by Cars

The second event is a stream of vehicle with a truck leading the pack. One of the important observations for this event is that the magnetic field sensors can detect the truck and the car immediately behind it provided a sufficient time lapsed in between (Fig. 13). However, the strain gauge and acceleration sensors are unable to identify individual vehicles, thus are rendered inadequate (Fig. 15 & 16).



Fig. 12: Event A: Truck followed by a String of Cars

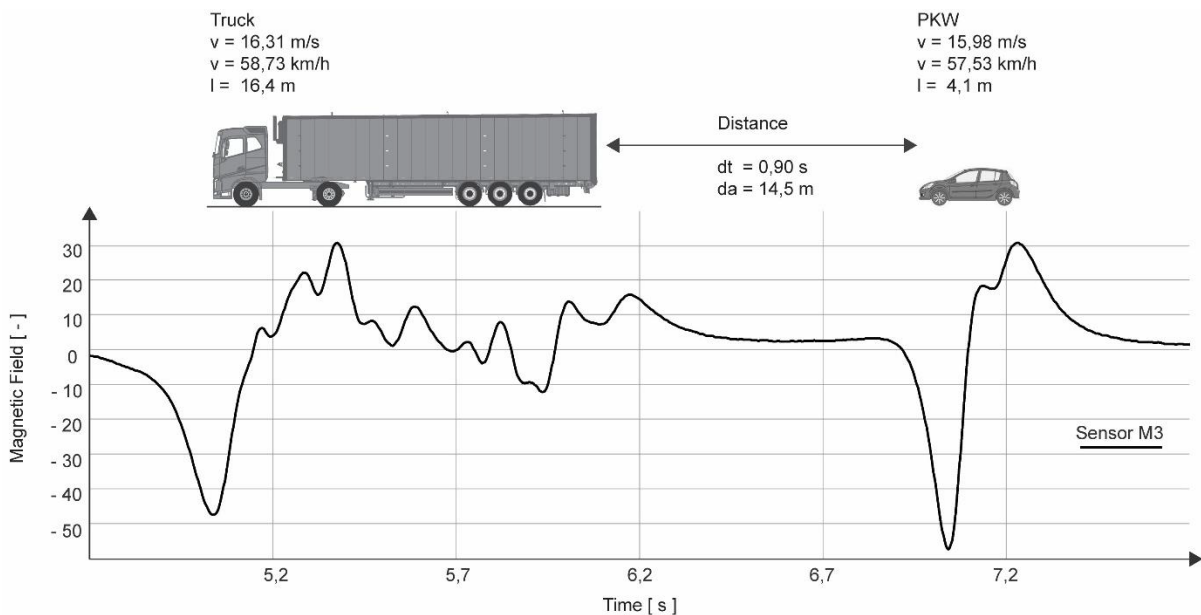


Fig. 13: Example: Magnetic Field Sensor M3 (Sequence Truck + Car)

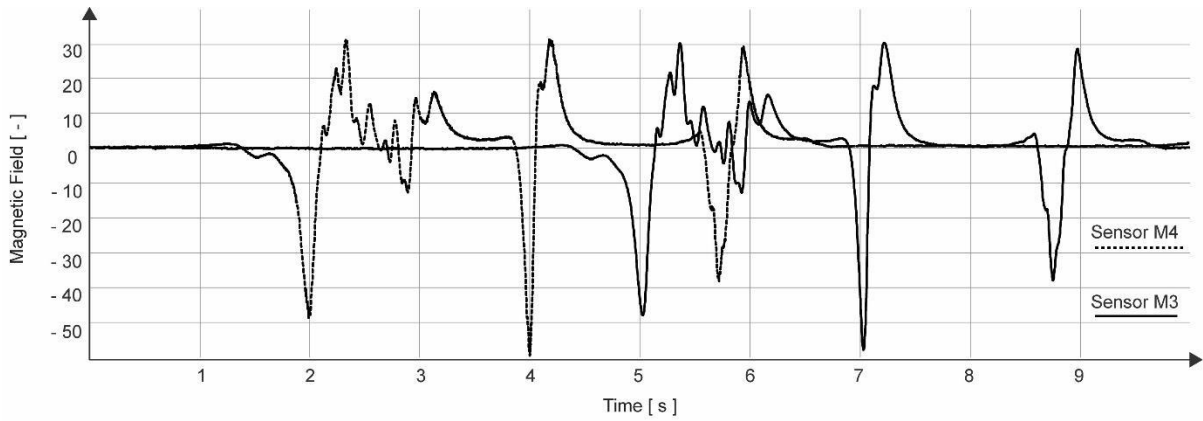


Fig. 14: Example: Magnetic Field Sensors M4 and M3 (Sequence Truck + Car + Car)

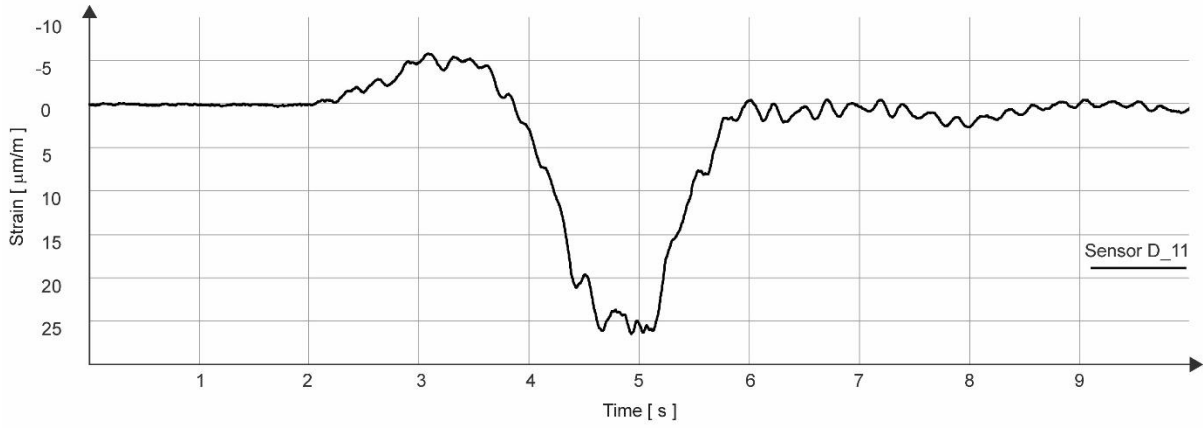


Fig. 15: Example: Strains Sensors D11 (Sequence Truck + Car + Car)

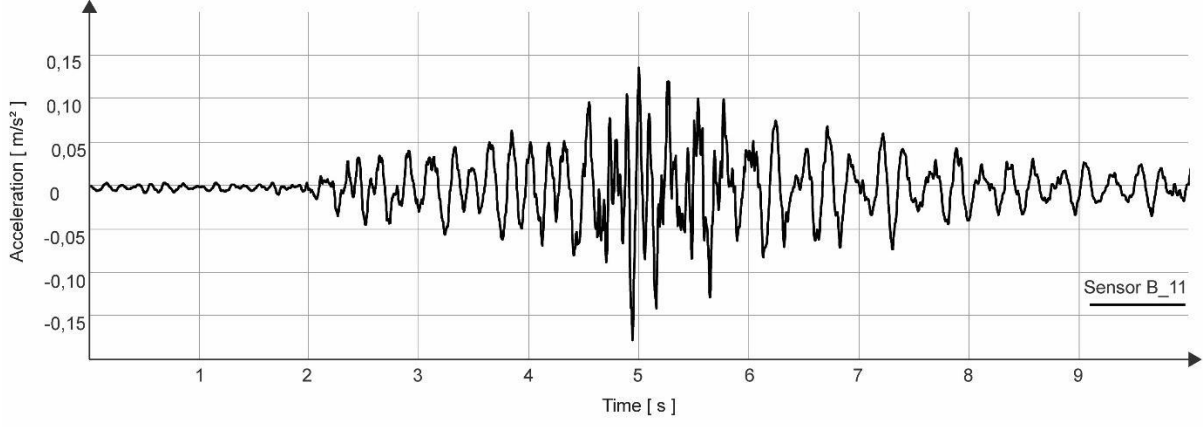


Fig. 16: Example: Accelerations Sensors B11 (Sequence Truck + Car + Car)

### 3. Conclusion and Summary

It is concluded that the AFF755B magnetic field sensors are able to reliably capture the traffic passing through the bridge and allow classifications; such as passenger cars, passenger cars with trailers, truck semitrailers or truck trailers etc.; after assembly and integrating the sensor into the monitoring system.

The time lapse while the vehicle is crossing the bridge can be determined from the time recorded when a vehicle is located over a magnetic field sensor while it enters and leaving the bridge. The system is also capable to identify recognize a string of traffic passing the bridge.

In addition, further information such as speed and vehicle length is calculated using various data collected from several sensors. This system can even recognized complex traffic situations such as overtaking during the bridge crossing.

The magnetic field sensors are currently being successfully installed in another bridge monitoring system. In that situation, the vehicles traffic is reliably detected through an 80 cm thick concrete bridge.

#### **4. References**

[NfS16] Nachrichten für Südtirol <http://www.stol.it/Artikel/Chronik-im-Ueberblick/Chronik/Bruecke-stuerzt-auf-Schnellstrasse-Ingenieure-im-Visier-der-Ermittler> Foto: LaPresse

[MB16] Berliner Morgenpost  
<http://www.morgenpost.de/vermishtes/article208611069/Ueberwachungskamera-filmt-Brueckeneinsturz-in-Italien.html> Foto: Fabrizio Cusa / dpa

[BMV13] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. 2013. Strategie zur Ertüchtigung der Straßenbrücken im Bestand der Bundesfernstraßen. Berlin: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, 2013. S. 6. Vorlage an den Ausschuss für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung des Deutschen Bundestages, Berlin, 22.05.2013.

[ST11] Datasheet AFF755B Sensitec GmbH, 09.08.2011

# Sensorsysteme für IoT-Anwendungen

Matthias Geiger<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Binder Elektronik GmbH, Hauptstraße 142, 74899 Sinsheim,*

*Abteilung FuE, Kreuzweg 6, 74746 Waldstetten*

*Email: [geiger@binder-elektronik.de](mailto:geiger@binder-elektronik.de)*

## Einleitung

Internet of Things, kurz IoT, ist der große Überbegriff für die immer weiter voranschreitende digitale Vernetzung von Gegenständen, Maschinen und Menschen. Ein zentrales Thema dabei ist, dass Gegenstände zusätzlich zur eigentlichen Funktion eine „digitale Intelligenz“ bekommen, durch die der Mensch im Hintergrund unterstützt wird.

Ermöglicht wird dies primär durch immer kleinere, leistungsfähigere und günstigere eingebettete Systeme (Cyber Physical Systems =CPS). Deren Aufgabe darin besteht, Informationen und Zustände aus der realen Welt möglichst breit zu erfassen und in die virtuelle Welt (Netzwerk / Internet) in Form von Daten zu übertragen.

Ein Teilgebiet dieses vielfältigen Themas sind intelligente Sensorknoten (Smart Systems), die ihre Messdaten auf einem Internet-Speicher (Cloud) bereitstellen, wodurch die Daten von überall aus für Mensch und Maschine zugänglich sind. Das IoT kann dann gewinnbringend genutzt werden, wenn die erfassten Daten analysiert, interpretiert und verglichen werden, um so die Effizienz von Mensch und Maschine zu steigern.

## Einsatzbereiche und Anwendungsfelder von Smart Systems

Die Anwendungsfelder für Smart Systems sind so vielfältig, dass hier nur einige wichtige genannt werden können.

So kann IoT zur Optimierung der Auslastung von Maschinen, Anlagen, der Fahrzeugflotten im Logistikbereich oder zur Automatisierung der Lieferketten dienen.

Datenlogging, Eventdetektion und Tracking von Produkten, Behältern und verderblichen Waren die nur unter bestimmten Bedingungen transportiert werden dürfen oder beispielsweise nur geringen Erschütterungen, nur unterhalb oder oberhalb bestimmter Umgebungstemperaturen, ohne Lichteinwirkung in verschlossenen Behältern zu transportieren sind, können überwacht werden. Verstöße gegen die Transportauflagen werden so sicher aufgedeckt

Im Bereich SmartHome können mit Hilfe intelligenter Sensoren die Beleuchtung in Räumen geschaltet oder gedimmt werden. Wenn beispielsweise die Anwesenden den Raum verlassen wird die Heizung zurück geregelt und andere Elektrogeräte bei Abwesenheit oder Nichtbenutzung ausgeschaltet. Auch die Steuerung von Belüftungs-,

Beleuchtungs- oder Bewässerungsanlagen in Gewächshäusern oder Pflanzbehältern ist denkbar.

Mögliche Szenarien aus dem Assisted Living Umfeld sind die Unterstützung von hilfebedürftigen Menschen, in dem sich Rollläden automatisch öffnen und die Heizung zu fest definierten Zeiten in Betrieb geht. Vorausschauend könnte eine Smarte Sensorik die Beleuchtung im Flur oder WC aktivieren, wenn nachts ein Bewohner auf dem Weg zur Toilette ist.

Mögliche Einsatzgebiete im Bereich Sicherheit können beispielsweise die Klima- und Raumüberwachung, die Warnung vor gefährlichen Situationen wie beispielsweise der zu lange Aufenthalt in gefährlicher UV-Strahlung oder Bewegungsmelder zur Beleuchtungssteuerung oder Haustierdetektion sein. Aber auch Anwesenheitserkennung und Präsenzmeldung, Einbruchschutz bzw. -erkennung und Zugangskontrollen können adressiert werden

Zukünftig werden ganze Städte über intelligente Sensorik zu vernetzten Smart Citys. Alltägliche Einrichtungen auf der Straße, darunter Services im Umfeld der Parkplatzbereitstellung, sogenanntes IoT-gestütztes automatisches Parken (Smart Parking) und die Steuerung der Straßenbeleuchtung über intelligente LED-Panels werden möglich. Ziel ist es, das Leben für die Bürger komfortabler zu gestalten und Stadtverwaltungen dabei zu unterstützen, öffentliche Dienstleistungen durch besseres Management und eine genaue Service-Planung beispielsweise bei der Abfallentsorgung effizienter zu machen. Auch können sie helfen die Gebührenerfassungssysteme transparenter und fairer zu gestalten. Zugleich schont eine intelligente Verkehrsführung Ressourcen und die Umwelt.

## **Anforderungen**

Bei der Konzeption, Auslegung und Realisierung von Smarten Sensorsystemen (Abbildung 14) werden unterschiedliche Anforderungen gestellt, die je nach Anwendungsfall unterschiedlich gewichtet sein können.

Die Hardware-Plattform muss über ausreichend Rechenleistung und Speicher verfügen. Im Idealfall sind diese skalierbar, so dass für jede Applikation die benötigten Ressourcen verfügbar sind, ohne jedes Mal die komplette Systemarchitektur ändern zu müssen. Dies kann geschehen, indem beispielsweise Mikrocontroller-Familien eingesetzt werden, die bei gleicher Bauform (Footprint) mehr oder weniger Speicher und Funktionalität besitzen. So lässt sich vermeiden, dass der Entwickler sich immer neu einarbeiten muss und es können bestehende erprobte und verifizierte Designblöcke wiederverwendet werden (Re-Use).





Abbildung 14: Blockdarstellung eines Smarten Sensors

Ein wesentlicher Aspekt ist die Energieeffizienz. Häufig steht keine kabelgebundene Energieversorgung zur Verfügung oder Sensoren sollen mobil eingesetzt werden. Auch ist es in bestimmten Fällen wünschenswert, ganz auf eine zusätzliche Energiequelle verzichten zu können. Dann muss der Sensor die Energie, die er zu Betrieb benötigt selbst aus der Umgebung gewinnen (Harvesting). Gängige Verfahren sind die Wandlung von Umgebungstemperaturdifferenzen mittels Thermo-Elektrischen-Generatoren (TEG), die Umwandlung von Licht mittels Solarzellen, die Gewinnung von elektrischer Energie aus Bewegung und Vibrationen oder die Energiegewinnung aus elektrischen bzw. magnetischen Feldern.

Dazu ist es essenziell, dass das Sensorsystem so wenig wie möglich Energie benötigt und Batterien möglichst lange genutzt werden können (10 bis 15 Jahre sind durchaus gängige Anforderungen). Dies kann unter anderem erreicht werden, indem energiesparende Bauteile (ULP =Ultra Low Power) eingesetzt werden, Schaltungsteile nur dann aktiviert werden, wenn sie auch benötigt werden, Prozessoren so lange wie möglich in den Sleep-Mode gesetzt werden oder ganz abgeschaltet werden, intelligente Powermanagement-Konzepte eingeführt werden, eine möglichst effiziente und laufzeitoptimierte Software entwickelt wird, sowie Datenübertragungen so selten wie möglich erfolgen und die Datenmengen durch entsprechende Vorauswertung auf dem Sensor möglichst gering gehalten werden.

Hierfür ist ein applikationsspezifisches Konzept zu erstellen, welches den Trade-Off zwischen Energiebedarf auf der einen Seite und Messgenauigkeit, Geschwindigkeit und Entwicklungsaufwand auf der anderen Seite definiert.

Oft sind kleinbauende Lösungen (Small-Form-Factor- (SFF-) Design) bei der Konzeption und Realisierung von Smarten Sensoren nötig. Beispielsweise wird das Einsparen von Bauraum und Volumen oder eine Gewichtsreduzierung gewünscht, um eine Nachrüstung von bestehenden Anlagen, bei beschränktem Bauraum zu ermöglichen oder um die Beeinflussung durch das Sensorsystem möglichst gering zu halten.

Eine weitere unumgängliche Anforderung für Smarte Sensorik ist die Vernetzbarkeit. Im Idealfall über standardisierte Schnittstellen oder für Spezialanwendungen auch über eigene proprietäre Schnittstellen.

Hierbei unterscheidet man in drahtgebundene Schnittstellen wie Feldbusse, Ethernet, CAN, USB und ähnliche.

Drahtlose also Wireless Schnittstellen wie Cellulare Networks (Mobilfunk) im Sub-GHz-Bereich (Sigfox, LoRa, 2G, 3G, NB-IoT usw.), Local Area Netzwerke (LAN) wie WLAN, BLE, Zigbee, 6LoWPAN, ...).

Ebenso können je nach Anwendung auch die Daten direkt auf dem Gerät gespeichert werden und nur durch physischen Kontakt (Anschließen eines Auslesegeräts oder Entnehmen einer Speicherkarte) bzw. Near-Field-Communication (NFC) durch Auflegen eines Auslesegeräts verfügbar gemacht werden.

Für eine Smarte Sensorik ist in der Regel ein funktionierendes Ökosystem nötig. Dieses muss dem Anwender durch einfache Programmierbar- und Erweiterbarkeit, durch einen Datenspeicher (Cloud) mit Datenanalyse, -interpretation, -vergleich und durch Langlebigkeit und Zuverlässigkeit von etablierten und verbreiteten Softwaretechnologien und Plattformen zugänglich sein.

Die Systemsicherheit muss auf allen Ebenen sichergestellt sein. Dazu gehören Hardwarearchitekturen, die je nach Anwendung die entsprechende Security und Safety gewährleisten. Die Verschlüsselung von Daten und Übertragungswegen sowie, die Datenintegrität und die Authentifizierung des Benutzers muss sichergestellt werden.

Letztendlich sind in fast allen Fällen die Kosten für den Erfolg eines Smarten Sensorsystems mit ausschlaggebend. Dies wird durch geringe Material- und Bauteilekosten, eine kostengünstige Fertigung (Standardbauteile und Prozesse) und ein effizientes Ressourcen-, Projektmanagement sowie geringe Betriebs- und Servicekosten erreicht.

## **Integrationsansätze**

Wird zusätzliche Funktionalität (bei gleicher Größe) oder eine Steigerung der elektronischen Performance bzw. die Integration von zusätzlichen Funktionsblöcken (z. B.: Energieversorgung, Harvesting) gewünscht, bietet die moderne Mikroelektronik hierzu mehrere Ansätze.

Die Nutzung von mechanischen Komponenten (z. B. für Medienzugänge oder als gedruckte Antenne auf dem Gehäuse, MID usw.) kann ebenfalls zur Miniaturisierung beitragen. Eine Verlagerung von Funktionalitäten in die Software kann in bestimmten Fällen Hardware einsparen.

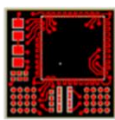
Der Einsatz von kleinbauenden Komponenten (Abbildung 15) wie SMD-Bauteile in 0201 (0,6 x 0,3mm) oder gar 01005 (ca. 0,4 x 0,2mm), kleinstbauenden LGA, QFN, Finepitch-BGAs oder CSP-Packages, deren Abmessungen nur geringfügig über der Größe des eigentlichen Halbleiters liegen oder die direkte Montage von Halbleitern in Drahtbondtechnologie (COB) und Flip-Chip sind möglich.

- Miniaturisierte SMD-Chip-Bauteile

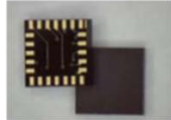
	01005 [0402]: 0,4 x 0,2 x 0,12 mm
	0201 [0603]: 0,6 x 0,3 x 0,23 mm
	0402 [1005]: 1,0 x 0,5 x 0,35 mm
	0603 [1608]: 1,6 x 0,8 x 0,45 mm
	0805 [2012]: 2,0 x 1,2 x 0,55 mm

- Advanced Packages

- LGA, QFN, FP-BGA, CSP



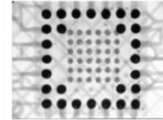
LGA (7x7mm / 24 IOs)



OC-BGA (17x17mm / 208 IOs)



CSP (WLCSP, X-Ray)

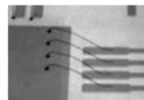


- COB, FC

- Direktmontage von Halbleitern



COB (montiert, X-Ray)



Flip-Chip (Bump, Seitenansicht, assembliert)

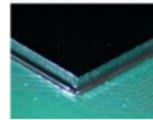


Abbildung 15: Übersicht hochintegrierte SMD-Bauteile

Auch schreitet die Funktionsintegration innerhalb eines Bauteils immer weiter voran, so lassen sich sogenannte System-in-Package (SiC) oder System-on-Package (SoC) realisieren auf denen mehrere Funktionen in einem Package untergebracht sind. Meist ist die Packagegröße dann gleich oder nur geringfügig größer wie bei einem Einzelsensor. Beispiele dafür sind Beschleunigungssensoren (3 DoF), Beschleunigungs-/Magnetfeldsensoren (6 DoF) und Beschleunigungs-/Magnetfeld-/Drehratensensoren (9 DoF) oder integrierte Umweltsensoren (Environmental Sensors) mit Temperatur, Luftdruck, Luftfeuchte und/oder zusätzlicher Gas (VOC)-Messfunktion oder die Integration von unterschiedlichen Halbleitertechnologien oder mehreren Halbleitern in einem Package, wie Mikrocontrollern mit zusätzlichem RF-Frontend für Bluetooth, WLAN, ....

Eine weitere Integrationsstufe stellt die vertikale Integration und somit die Nutzung der 3. Dimension (Z-Achse) dar, indem mehrere Schaltungsträger oder auf Halbleiterebene mehrere Chips übereinander positioniert und miteinander kontaktiert werden. Zunehmend findet auch das Embedding, also die Verlagerung von Komponenten in die Leiterplatte bzw. den Schaltungsträger Anwendung.

## Systemkonzept

Ein Smartes Sensorsystem besteht im Wesentlichen aus drei Komponenten (Abbildung 16):

- Einem oder mehreren Sensoren
- Einem Gateway
- Einer Datenanbindung zur Cloud (Webbasiert) oder einem Datenserver

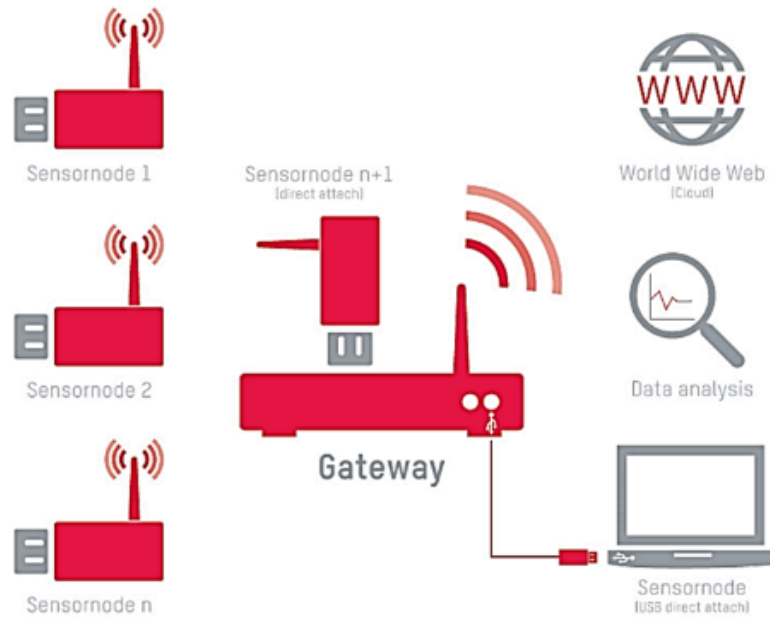


Abbildung 16: Systemkonzept IoT-Sensorplattform

Der **Sensor** besteht wiederum aus einzelnen Funktionsblöcken (Abbildung 14).

Grundsätzlich sind vorhanden:

- Energieversorgung
- Verarbeitung (MCU) und Datenspeicher
- Kommunikation
- Sensorik

Daneben können je nach Applikation noch weitere Funktionsblöcke vorhanden sein:

- User-Interface
- Schnittstellenanschlüsse
- Security-Komponenten
- Mechatronische Komponenten

Die Aufgabe des **Gateways** ist es die Kommunikation (bidirektional) zwischen den Sensoren und dem Netzwerk (Lokal, Server, Cloud) sicherzustellen. Dazu verfügt es in der Regel über eine oder mehrere drahtgebundene und drahtlose Schnittstellen und eine Internetanbindung. Da im Gateway die Daten von mehreren Sensoren zusammenlaufen, wird ihm oft auch die Aufgabe der Sensordatenfusion zukommen. Unter Sensordatenfusion versteht man im allgemein die Verknüpfung der Ausgabedaten mehrerer Sensoren miteinander. Ziel ist dabei die:

- Steigerung der Genauigkeit und Zuverlässigkeit
- Kombination der vorteilhaften Eigenschaften von Sensoren
- Kompensation von Sensorschwachpunkten

- Gleiche Messungen wie mit „energiehungrigen“ Sensoren
- Gewinnung neuer Informationen
- Reduktion der benötigten Rechenleistung auf dem Sensor
- Nutzung von Anwendungsbedingungen
- Effiziente Filter- und Algorithmen

Sofern der Sensor selbst über einen Low-Power-Wide-Area Network-Zugang (LPWAN) verfügt (wie z. B. 2G, NB-IoT, LoRa oder Sigfox) kann auch auf ein Gateway verzichtet werden, da der Sensor dann selbst eine Verbindung zur Cloud herstellen kann.

Dem **Cloud-Service** kommt dabei das Speichern und das Bereitstellen von Messdaten sowie deren Analyse für Mensch und Maschine zu. Um auf die Daten zugreifen zu können, ist ebenso wie beim Hochladen der Daten über das Gateway oder den Sensor ein Schlüssel erforderlich, der im Cloud-Dienst / Gateway und Sensor vorhanden sein muss bzw. bei Anmeldung / Registrierung vergeben wird, damit ist ein unberechtigter Zugriff auf Daten ausgeschlossen.

### Anwendungsszenarien

Generell unterscheidet man zwischen den folgenden Anwendungsszenarien:

- zeitgesteuertes Szenario mit definierter Abtastrate (Datenlogger)
- Eventgetriggertes Szenario (ereignisgesteuert)
- Fallgesteuerte Abtastrate (z.B. abhängig vom Batteriezustand)
- Streaming (ständige Datenaufnahme)
- oder Mischformen daraus!

Bei einem eventgetriggerten (ereignisgesteuert) Szenario geht es meist darum die in Abbildung 17 unter (1) bis (5) dargestellten Zustände zu erfassen:

Bei einer ständigen Datenerfassung (Streaming) sind Signalverläufe wie in Abbildung 17 unter (6) dargestellt von Bedeutung.

- Extremwerte (Minimal/Maximal)
  - Temperatur-/Feuchteüberschreitung
  - Stoß, Vibration, Kontamination
- Grenzwertüberschreitung
  - Anzahl Ereignisse (thermische Zyklen)
  - Anwesenheits-/Präsenzdetektion
- Integrale Größen
  - Beschleunigung
  - Licht-/Bestrahlungsdosis

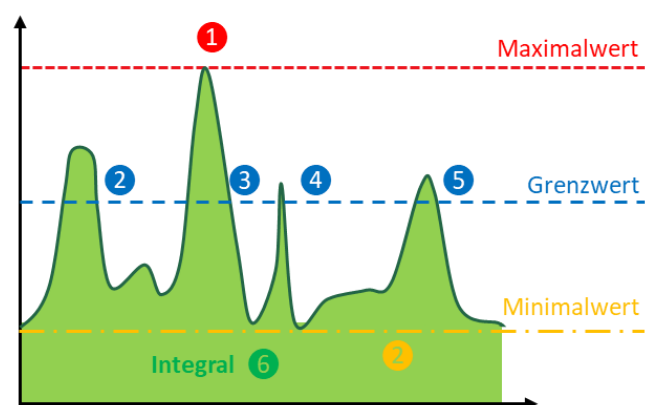


Abbildung 17: Eventgetriggertes (ereignisgesteuertes) Szenario

## Umsetzung/Realisierung

Zur Realisierung eines Smarten Sensorsystems werden vielfältige Anforderungen an das Entwicklungsteam gestellt. Neben der Erfassung der Anwendungs- und Einsatzbedingungen und -szenarien, werden hier im Folgenden einige weitere technisch zu lösende Anforderungen dargestellt.

Der Designer muss über Fähigkeiten im Bereich Schaltungseingabe und -simulation verfügen. Ein 3D-ECAD System mit Kollisionskontrolle, Editierfunktionalität im 3D-Mode, Flex- und Embedding-Unterstützung muss vorhanden sein. Schnittstellen zu MCAD-Systemen (z.B. Datenaustausch in STEP) und Kenntnisse in EMV-, HF- und High-Speed-Designs, Mechatronik und Thermoelektrik sind nötig um nur einige zu nennen.

Auf Grund der Komplexität und der Miniaturisierung von Smarten Sensoren, steigen insbesondere die Anforderungen an das PCB-Design (Abbildung 18) und den Schaltungsträger.

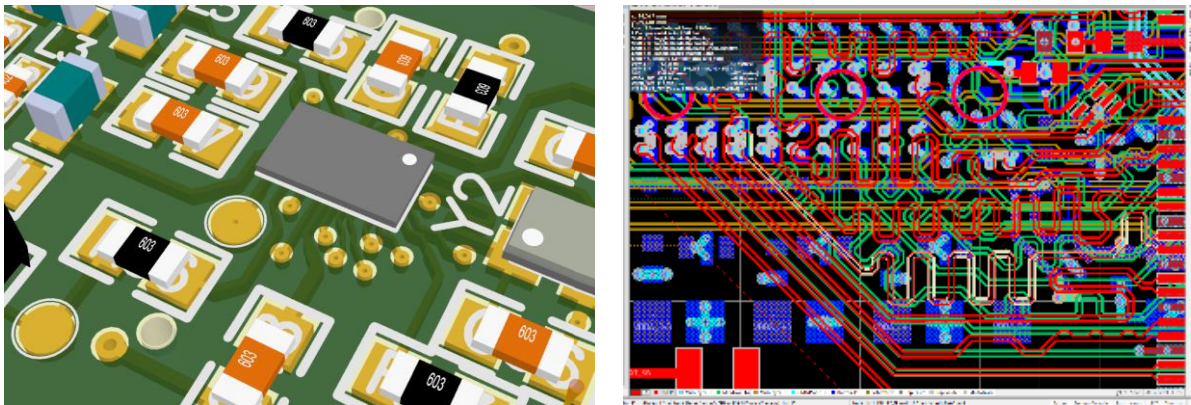


Abbildung 18: Ausschnitt aus dem PCB-Design eines komplexen Sensors

- Die Komplexität der Leiterplatte bzw. des Interposers steigt.
- Abstände und Leiterbahnbreiten (Line / Spaces  $\leq 75 \mu\text{m}$ ) sinken.
- Die Lagenanzahl nimmt zu ( $\geq 4$ -lagen Multilayer).
- Toleranzen werden kleiner ( $\leq 50 \mu\text{m}$ ).
- Der Einsatz von Blind-Vias / gestackten Vias / Buried-Vias, HF-, High-Speed und SI-Strukturen ist oft auf Grund der kleinen Bauteileabmessungen und der hohen Verarbeitungsgeschwindigkeiten nötig.
- Flexible-Schaltungsträgerbereiche und das Einbringen von Kavitäten für vergrabenen Bauteile (Embedding) muss unterstützt werden.

Erhöhte Anforderungen an die Produktion und Fertigung bestehen beispielsweise bei der Verarbeitung von kleinsten Bauelementen, dem Handling kleiner und flexibler Baugruppen, der Optimierung von Bestück- und Lötprozessen, der Integration nicht SMD-kompatibler Prozesse (COB, FC), der Kontrolle von verdeckten Kontakten (X-Ray, US) sind nötig, da eine Nacharbeit neben zusätzlichen Kosten oft schwierig bis unmöglich ist.

## Anwendungsbeispiel Binder IoT-Plattform

Die von Binder Elektronik entwickelte IoT-Plattform schließt die Lücke zwischen leistungsfähigen und energieintensiven IoT-Systemen hin zu kleinen energieoptimierten und einfach handhabbaren Sensorsystemen.

Sie besteht aus einer flexiblen, modularen und erweiterbaren Plattform mit mehreren Sensor-Sticks und einem passenden Gateway, die es dem Anwender ermöglicht, einfach und unkompliziert unterschiedlichste Messwerte zu erfassen und lokal auf einem PC oder Tablet bzw. in einen Cloud-Dienst zu speichern.

Verwendung von Standardkomponenten, kann die Energieversorgung über am Markt verfügbaren Lösungen wie USB-Power-Banks, Akkus, Batterien oder Netzteile erfolgen. Auch ein Betrieb direkt am PC, Notebooks oder Tablets ist möglich.

Die Übermittlung der Messdaten erfolgt als BLE-Beacon an ein Bluetooth-kompatibles Empfangsgerät (Gateway). Dabei verfügt das von Binder Elektronik entwickelte Gateway (Abbildung 19) als zentraler Bestandteil über eine leistungsfähigem ARM-Cortex-M4F-Prozessor. Dieser kann sowohl die BLE-Daten empfangen als auch über USB bzw. WLAN mit einem PC oder einer Cloud-Anwendung kommunizieren. Über WLAN ist eine Datenübertragung nach 802.11 b/g/n/e/i mit Sicherheitsfeatures wie WPA/WPA2 möglich.

Die Anpassung an beliebige Cloud-Dienste ist unter Verwendung von MQTT oder OPC/UA-Protokollen möglich, ebenso die Implementierung von anwendungsspezifischen Auswertalgorithmen und Funktionalitäten.

Ein Arduino-Uno kompatibler Formfaktor stellt eine nicht zu unterschätzende Erweiterungsmöglichkeit dar, so dass gängige Arduino-Shields verwendet werden können.

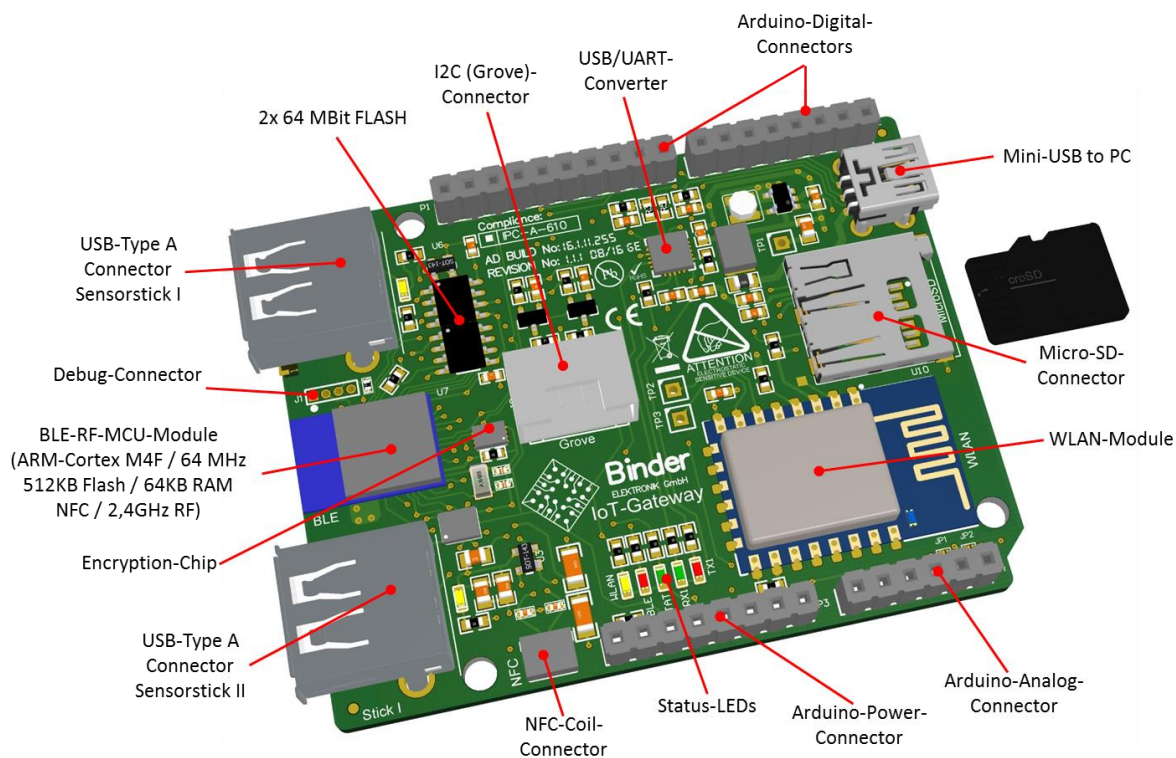


Abbildung 19: Binder-IoT-Gateway (Abmessungen: 68,8 x 53,7 mm)

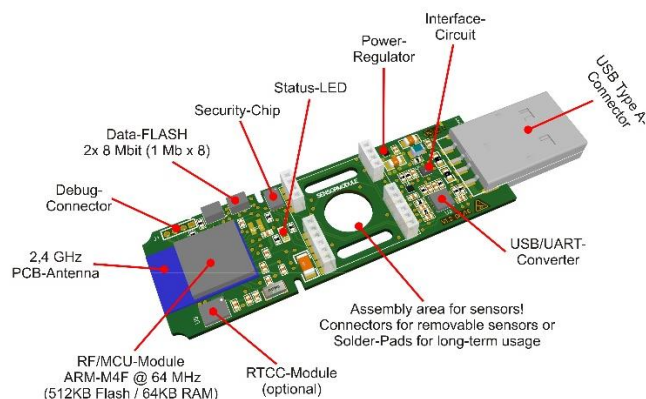
Beide Seiten, also der Sensor-Stick sowie das Gateway verfügen über zusätzlichen nichtvolatilen Speicher um Daten zu loggen oder falls die Übertragung nicht möglich bzw. nicht gewünscht wird diese zwischen zu speichern. Am Gateway besteht auch die Möglichkeit den Datenspeicher durch eine Micro-SD-Karte in fast beliebiger Größe zu erweitern. Über den integrierten Security-Chip ist eine sichere Datenverschlüsselung und -übertragung möglich, so dass Dritte aus abgefangenen Daten keinen Nutzen ziehen oder diese manipulieren können.

Die Sensor-Sticks haben die Form von USB-Speichersticks und können ihre Messdaten drahtgebunden, als auch drahtlos übertragen. Die Abmessungen der Sensor-Sticks betragen 18 x 55 mm. Sie können auch in ein Kunststoff-Gehäuse eingebaut werden (Abbildung 20). Jeder Sensor-Stick verfügt über Energiemanagement, ein USB- und BLE-kompatibles Funk-Interface sowie eine Sensor-Schnittstelle.

Dabei werden die unterschiedlichen Sensoren auf einem nur 15 x 18 mm kleinem Sensor-Modul bestückt das über I2C, SPI, analoge Eingänge oder digitale IOs kommuniziert (Abbildung 21). Die Besonderheit ist dabei, dass weder Hardwarevarianten und auch keine Firmwareänderungen nötig werden. Jedes Sensor-Modul bringt dazu ein elektronisches Datenblatt mit, welches die Sensorparameter und das Messzenario beinhalten, so dass ein Plug&Play Betrieb ermöglicht wird.



**Abbildung 20: Sensor-Stick mit Gehäuse**



**Abbildung 21: Binder Iot-Sensor-Stick**

Je nach Anwendung können die Sensor-Module direkt aufgelötet oder über Steckverbinder ausgetauscht werden, so dass eine stabile, sichere und einfache Kontaktierung für Versuchs und Testzwecke als auch für den dauerhaften Einsatz bei hoher Zuverlässigkeit gegeben ist. Durch den einheitlichen Formfaktor und das einheitliche elektrische Interface ist eine anwendungs- oder kundenspezifische Erweiterung leicht möglich. Aktuell sind drei Sensor-Module verfügbar (Abbildung 22).



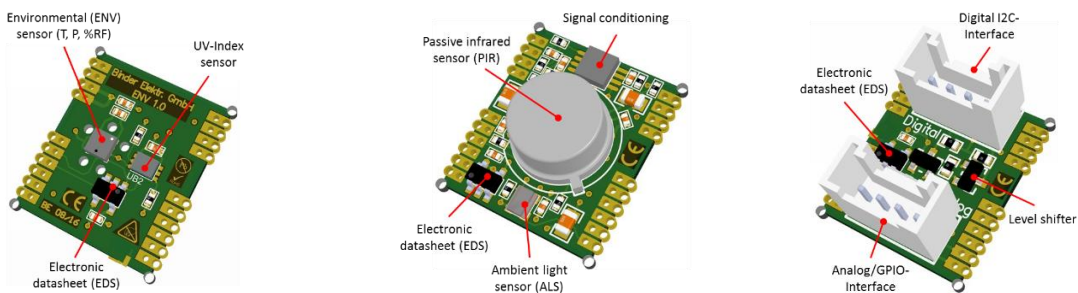


Abbildung 22: 3D-Darstellung einiger Sensor-Module

Das ENV-Sensormodul (Abbildung 22, links) verfügt über einen MEMS-Sensor zur Messung von Temperatur, Luftfeuchte und -druck. Zusätzlich ist ein UV-Index-Sensor vorhanden.

Das PIR-Sensormodul (Abbildung 22, Mitte) besteht aus einem analogen Infrarot-Bewegungsmelder (PIR) und einem Beleuchtungssensor (ALS).

Das Grove-Modul (Abbildung 22, rechts) besteht aus Steckverbindern für analoge und digitale Sensoren und Aktoren. Über diese Schnittstellen lassen sich Erweiterungsmodule nach dem Grove-Standard anschließen.

Die Sensordaten werden vom Gateway gesammelt, falls nötig fusioniert oder komprimiert, an einen Cloud-Dienst übertragen und dort auf Abruf bereitstellt. Alternativ können die Messwerte auch lokal an einen PC gesendet werden. Um die Sensormodule an einem PC verwenden zu können, wurde eine Visualisierung mit der graphischen Programmierumgebung LabVIEW® erstellt.

Über diese können die angeschlossenen Sensor-Sticks auch konfiguriert, Sicherheitseinstellungen und ein Pairing von Gateway und Sensor-Sticks vorgenommen werden.

### Zusammenfassung

Ein Smartes IoT-Sensor System besteht aus Gateway, einem oder mehreren Sensorkonten = Smart Systems = Cyber Physical System (CPS) und einem Datendienst (Cloud) mit Analyse und Auswertung.

Die Nutzung von standardisierten Übertragungsmedien und -protokollen ohne aufwändigen Parametrisierung, die einfache Integration von zusätzlicher Sensorik (kunden-/ applikationsspezifisch) in das CPS und die Anpassung an alternative Cloud-Dienste soll einfach möglich sein.

Die Sensordatenfusion und Reduktion dient zur Gewinnung zusätzlicher Informationen und erfolgt entweder im CPS und/oder Gateway

Um eine möglichst lange Einsatzzeit sicherzustellen, ist der Energieverbrauch entscheidend. Dieser ist abhängig von den eingesetzten Technologien, Komponenten, dem Betriebsmodus und den Anwendungsszenarien. Ein durchgängiges Sicherheitskonzept ist obligatorisch.

# Poster

## Atemluftüberwachung mit AGaMon und innovativen Kalibrier- und Auswerteverfahren

**Rolf Seifert<sup>1</sup>, Thorsten Conrad<sup>2</sup>, Jens Peter<sup>2</sup>, Hubert Keller<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Institut für Angewandte Informatik (IAI), Karlsruher Institut für Technologie, Hermann-von-Helmholtz-Platz D-76344 Eggenstein-Leopoldshafen, Deutschland*

<sup>2</sup> *3S GmbH, Mainzer Str. 148, D-66121 Saarbrücken.*

Email: [rolf.seifert@kit.edu](mailto:rolf.seifert@kit.edu)

### 1. Einleitung

Die menschliche Atemluft beinhaltet viele Informationen. So können zum Beispiel Alkoholkontrollen durchgeführt werden, sie liefert aber auch zahlreiche Hinweise auf verschiedene Erkrankungen. Während bei Alkoholkontrollen Ethanol die maßgebliche Komponente ist, so ist Aceton die bestimmende Größe für Diabetes, NO für Asthma, H<sub>2</sub> für Verdauungsstörungen und Nahrungsmittelunverträglichkeit und H<sub>2</sub>S für Mundgeruch.

In diesem Bericht wird zunächst ein mobiles Sensorsystem AGaMon zur Überwachung der Atemluft vorgestellt. In den nachfolgenden Abschnitten werden Analyseergebnisse für die Alkoholüberwachung sowie eine simultane Untersuchung präsentiert.

### 2. Atemgasanalysestystem AGaMon

Zur Überwachung der Atemluft wurde ein innovatives Atemgasanalysestystem AGaMon entwickelt, das via Bluetooth mit einem Smartphone verbunden werden kann und so eine mobile Erfassung der Atemluft ermöglicht. Abbildung 1 zeigt eine pre-release Version des mobilen Sensor Systems

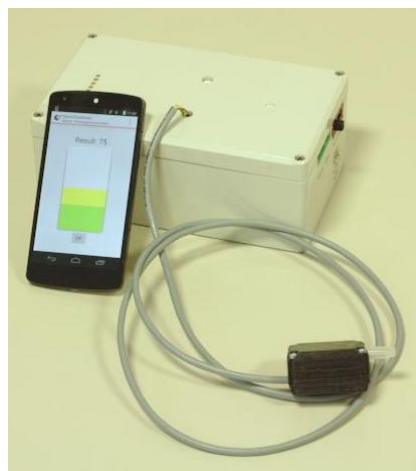


Abbildung 1: Pre-release Version des mobilen Sensor Systems

Das Sensor System kann mit einer Vielzahl kommerziell erhältlicher Metalloxid Sensoren bestückt werden. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurde der Sensor MLV von Applied Sensors verwendet. Durch die thermo-zyklische Betriebsweise des Sensor Systems erhält man Leitwert-Zeit-Profile, die einen „Fingerabdruck“ des zu analysierenden Stoffgemisches darstellen und somit sowohl eine Stoffidentifikation als auch eine Konzentrationsbestimmung ermöglichen.

### **3. Alkoholüberwachung**

Wie schon oben erwähnt ist bei der Alkoholüberwachung Ethanol die maßgebliche Komponente. Da aber in der Atemluft auch andere Komponenten vorhanden sein können und diese die Analyse beeinflussen, wurde ein 3-Stoff-Gemisch Ethanol-H<sub>2</sub>-Aceton untersucht. Für die numerische Auswertung wurde ein Kalibrier- und Auswerteverfahren ProSens3.0 entwickelt, das eine Weiterentwicklung des Verfahrens ProSens ist. ProSens3.0 ist speziell für 3-Stoff-Gemische konzipiert und in AGaMon integriert. Das Verfahren besteht aus einem Kalibrier- und einem Auswerteteil. Im Kalibrierteil wird basierend auf Kalibriermessungen das parametrisierte mathematische Kalibriermodell berechnet. Die gewonnenen Parameter werden danach dem Auswerteteil zur Analyse unbekannter Stoffproben zur Verfügung gestellt.

Bemerkenswert ist, dass in dieser Untersuchung nur 27 dosierte 3-Stoff-Gemische für Kalibriermessungen benötigt wurden, um das mathematische Kalibriermodell zu erstellen. Dies ist deshalb von Bedeutung, da Kalibriermessungen sehr zeitaufwändig und kostspielig sind.

Zum Nachweis der Leistungsfähigkeit des Systems und des Verfahrens wurden insgesamt 36 ternäre Ethanol-H<sub>2</sub>-Aceton Gemische und ein Fremdstoff untersucht. ProSens3.0 konnte alle Proben exakt identifizieren und auch den Fremdstoff als solchen erkennen.

Auch die Konzentrationsbestimmung lieferte sehr gute Ergebnisse. In allen betrachteten Fällen war der relative Analysefehler zwischen dosierten Konzentrationen und berechneten Konzentrationen kleiner als 9%.

### **4. Simultane Analyse mehrerer Stoffe**

Ziel dieser Untersuchung ist es, mehrere Stoffe in der Atemluft simultan zu erkennen. Simultan heißt hier, dass mit nur einer Messung des Sensorsystems AGaMon und nur einem Kalibrier- und Auswerteverfahren mehrere Zielstoffe unabhängig voneinander analysiert werden können. Dazu wurde das Verfahren SimPlus entwickelt, das im Gegensatz zu ProSens3.0 mehrere Stoffgemische simultan analysieren kann. Auch SimPlus besteht aus einem Kalibrier- und Auswerteteil. In seinem Kalibrierteil berechnet SimPlus jedoch für jedes Stoffgemisch ein eigenes mathematisches Kalibriermodell.

Um auch hier die Leistungsfähigkeit des Verfahrens zu demonstrieren, wurden verschiedene Stoffe mit dem Sensor System AGaMon gemessen. Es handelte sich hierbei um Ethanol, H<sub>2</sub> und Aceton sowie um ein binäres Ethanol-H<sub>2</sub> Gemisch.

Auch bei dieser Untersuchung konnte gezeigt werden, dass das Verfahren SimPlus alle Stoffe exakt identifizieren und Fremdstoffe als solche erkennen konnte. Die Konzentrationsbestimmung zeigte auch bei dieser Untersuchung wieder sehr gute Ergebnisse. Der relative Analysefehler zwischen dosierter Konzentration und berechneter Konzentration war in allen betrachteten Fällen kleiner als 10%.

## **5. Fazit**

Das Sensor System AGaMon mit dem integrierten Kalibrier- und Auswerteverfahren ProSens3.0 kann bei der Alkoholüberwachung sehr gut die maßgebliche Komponente Ethanol identifizieren und gute Konzentrationsbestimmungen liefern, auch bei Anwesenheit von weiteren Stoffkomponenten. Mit Hilfe des Verfahrens SimPlus kann auch eine simultane Analyse mehrerer Zielstoffe durch führt werden.

# Neuartiger faseroptischer Temperatursensor basierend auf thermoresponsiven Polymeren

**Stefan Kowarik<sup>1</sup>, Marcus Schukar<sup>1</sup>, Erik Wischerhoff<sup>2</sup>, Katerina Krebber<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Unter den Eichen 87, 12205 Berlin, Germany.

<sup>2</sup> Fraunhofer Institute for Applied Polymer Research IAP, Geiselbergstrasse 69, 14476 Potsdam-Golm, Germany.

Email: [stefan.kowarik@bam.de](mailto:stefan.kowarik@bam.de)

## Funktionsweise

Wir präsentieren Ergebnisse zu einem neuartigen, faseroptischen Temperatursensor auf Basis thermoresponsiver Polymerlösungen. Die Polymerlösung entmischt spinodal in einem durch die Polymerzusammensetzung wählbaren Temperaturbereich und trübt sich dadurch ein. Über die Messung der temperaturabhängigen Lichtdurchlässigkeit ist damit eine absolute Temperaturmessung möglich. Insbesondere eignen sich Polymere, die eine untere kritische Mischungstemperatur (engl. Lower Critical Solution Temperature, LCST) aufweisen und keine Wasserstoffbrückendonoren tragen, und dadurch geringe Hysterese im Temperaturverhalten zeigen. Mittels dieser temperaturabhängigen Lichtstreuung wurde ein LCST-Sensor mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,1$  °C demonstriert, was die Technik für eine praktische Anwendung in Kombination mit faseroptischen Elementen interessant macht. In einem Testaufbau mit Polymerlösung in einer fasergekoppelten Messzelle konnte über eine faseroptische Intensitätsmessung sowohl die Reproduzierbarkeit der Messwerte als auch die Vermeidung von Hysterese-Effekten demonstriert werden.

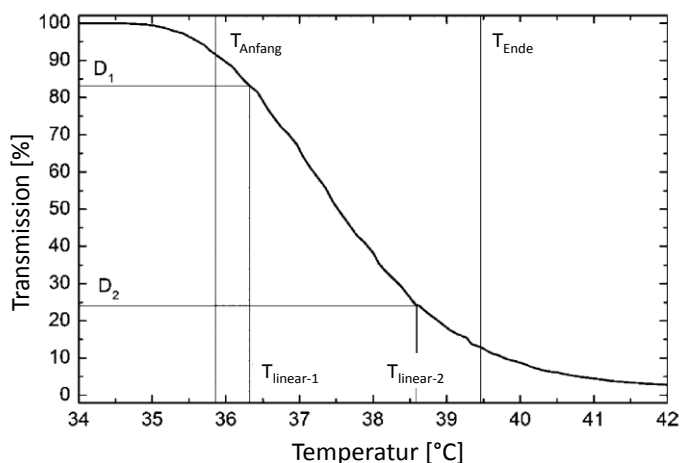


Abbildung 1: Die Transmission durch eine Polymerlösung mit unterer kritischer Mischungstemperatur nimmt über einen festen Temperaturbereich ab, da Polymer und Lösungsmittel spinodal entmischen. Innerhalb des linearen Bereichs ist hiermit eine Temperaturmessung mit einer Genauigkeit von 0.1 °C möglich.

### **Vorteile gegenüber dem Stand der Technik**

Der Stand der Technik in der Temperatursensorik ist durch temperaturabhängige Widerstandsmessungen (Platin-Widerstand Pt100, Heiß- / Kaltleiter) bzw. Kontaktspannungsmessungen in Thermoelementen gegeben. Diese Standard-Technik ermöglicht einen viele 100 °C umspannenden Messbereich und eine hohe Auflösung bis zu 0,01 °C. Allerdings ist in Anwendungen, die eine präzise absolute Messung erfordern, ein hoher Aufwand durch externe Kalibrierung nötig. So müssen z.B. in Bioreaktoren der Pharmaindustrie jährliche Kalibrierungen vorgenommen werden, durch die Kosten in Höhe von 400 € pro Messstelle verursacht werden. Für den optischen Polymer-Temperatursensor kann durch den bekannten Temperaturbereich des Phasenübergangs eine Selbst-Kalibrierung des Sensors bei jedem Durchlaufen der Temperaturkurve stattfinden. Der Sensor hat weiterhin die Vorteile einer rein optischen Technik, wie z.B. EMV-Verträglichkeit, galvanische Trennung von Messsonde und Auslesegerät und Explosionssicherheit. Weiterhin sind Messungen in starken Magnetfeldern oder Mikrowellenfeldern möglich, und der Trübungssensor ist vom Aufbau einfacher als konkurrierende optische Verfahren umzusetzen.

### **Anwendungspotential**

Der Sensor bietet Anwendungsmöglichkeiten z.B. zur Temperaturmessung in Bioreaktoren, da geeignete Polymerlösungen mit einem Phasenübergang im physiologischen Temperaturfenster bereits demonstriert wurden. Dabei ist auch die Möglichkeit zur Selbst-Kalibrierung besonders vorteilhaft. Auch bei thermischen Durchflussmesssystemen gibt es Anwendungsmöglichkeiten, da dort zwei Sensoren mit gleichem Ansprechverhalten nötig sind, die bisher aufwändig selektiert werden müssen. Beim optischen Temperatursensor ist aufgrund des Messprinzips eine inhärent geringe Abweichung von Sensor zu Sensor zu erwarten, da mehrere Sensoren mit der gleichen Polymerlösung befüllt werden können. Neben Temperaturmessungen in Flüssigkeiten gibt es weitere Anwendungsfelder wie die Temperaturmessung in starken Magnetfeldern wie z.B. in Transformatoren oder der Patientenüberwachung in Kernspintomographen.

# Entwicklung eines optischen Echtzeit-Reinigungssensors zur bedarfsgerechten, geregelten Reinigung von Filtertüchern

**Richard-Sebastian Moeller, Patrick Morsch, Hermann Nirschl**

*Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik, KIT, Karlsruhe*  
[richard-sebastian.moeller@kit.edu](mailto:richard-sebastian.moeller@kit.edu); [patrick.morsch@kit.edu](mailto:patrick.morsch@kit.edu)

Filtertücher stellen das Herzstück von Filtrationsprozessen im Bereich der Fest-Flüssig-Trennung dar und sind auf Grund ihres Materials, Webart und Maschenweite charakteristisch für den Filtrationserfolg. Die Reinigung von Filtermedien ist wegen ihrer prinzipbedingt feinstrukturierten Oberfläche schwierig. Die große technische Relevanz ergibt sich, da eine – verhältnismäßig grobe – Reinigung prozesstechnisch in jeder Filtration mindestens hilfreich ist um Feststoffrückstände zu entfernen und die freie Filterfläche für den nächsten Filtrationszyklus wieder herzustellen. Die hygienische, gründliche Reinigung ist für die Getränke-, Lebensmittel- und Pharmaindustrie essenziell um Reinheit der Anlagen und damit sichere Produkte gewährleisten zu können.

Bestehende Reinigungsabläufe sind starr gestaltet und berücksichtigen keine individuellen Verschmutzungszustände. Um eine erfolgreiche Reinigung gewährleisten zu können, muss sich die starre Reinigungsprozedur an einem vorbestimmten Auslegungsfall als Worst Case orientieren. Um den Reinigungserfolg sicherzustellen, muss ein Sicherheitsfaktor zugeschlagen werden. Im praktischen Einsatz wird die Verschmutzung geringer ausfallen, was unweigerlich zu Verschwendung führt. Ist die Auslegung hingegen unzureichend, wird auch die Reinigung unzureichend ausfallen. Im Umfeld der Lebensmittel-, Getränke- und Pharmaherstellung kommt es häufig zu Produktwechseln auf den Produktionslinien. Um Kreuzkontaminationen zu vermeiden, müssen die Anlagen dabei besonders gründlich gereinigt werden. Da die unterschiedlichen Ansammlungen an den Apparateoberflächen auch unterschiedlich stark zurückgehalten werden, führt die Auslegung nach dem einen Worst Case zur besonders deutlichen Überdimensionierung in den meisten Einzelfällen. Wenn eine Filtermittelreinigung nicht zuverlässig, sicher und wirtschaftlich erscheint, finden Wegwerfprodukte Verwendung oder die angestrebte Reinheit und Qualität bleibt unerreichbar.

Dieses Einsparpotential soll nun mit einem neuen Reinigungskonzept erschlossen und einem neuen Forschungsprojekt praktisch erprobt werden: Der Verschmutzungsgrad des Filtertuchs wird erfasst und die Reinigungsintensität bedarfsorientiert geregelt. Durch die automatische Kontrolle des Reinigungserfolges wird der Regelkreis geschlossen. In der Konsequenz kann die Reinheit nach jeder einzelnen Reinigung sichergestellt und dokumentiert werden, der Ressourcenverbrauch ist dabei minimiert.

Ziel ist die Entwicklung einer Reinigungseinheit, die durch einen bildanalytischen Reinigungssensor geregelt wird. Die Reinigungseinheit besteht aus einer Düsenlanze, die über einen Pulsgeber an eine Wasserversorgung angeschlossen ist. Der Reinigungssensor besteht aus einer Kamera, welche mit einer softwaregestützten Bildanalyse Rückstände auf dem Filtermedium detektiert.

Nach einem Filtrationszyklus reinigt die Düsenlanze das Filtertuch mit Wasserstrahlen ab. Gleichzeitig analysiert die Kamera das Filtertuch und detektiert weitere Rückstände und nicht ausreichend gereinigte Stellen. Über eine definierte Schnittstelle wirkt diese auf die Düsenlanze zurück, welche entsprechende Stellen nachreinigt.

In der Praxis liegen häufig lösliche und partikuläre Verschmutzungen gemeinsam vor und die Partikeln können sehr unregelmäßige Formen annehmen. Eine Bildauswertung bietet sich hierfür besonders an, da sich durch kommerziell erhältliche Sensoren Bildpunkte in der Größenordnung von wenigen Mikrometern unterscheiden lassen. Durch die örtlich hochaufgelöste Analyse zeigen sich auch hygienische Schwachstellen, die bei einer gröberen Betrachtung durch die flächige Mittelung verborgen blieben oder den Schwellenwert zwischen rein und unrein unterschreiten.

Unregelmäßigkeiten im Tuch, Helligkeitsverläufe und Schattenwurf an Fäden, Überkreuzungen und Zwickeln, sowie geringem Kontrast zwischen Tuch und Restschmutz erschweren allerdings die praxisnahe Bildauswertung an Filtertüchern. Da in der Praxis Hintergründe zudem selbst noch Farbverläufe aufweisen, die sich nur geringfügig von den Farben der Kontamination unterscheiden, ist eine schlichte Schwellenwertunterscheidung in reine und unreine Bildpunkte oder der starre Abgleich mit einem Referenzbild durch Subtraktion auch nicht zielführend.

Unser Lösungsansatz basiert auf der Eigenschaft gewebter Tücher, ein wiederkehrendes Muster aufzuweisen, den Rapport. Insbesondere partikuläre Verunreinigungen heben sich von diesem Webmuster ab. Damit liegt der erste Schritt unserer Bildauswertung in der automatischen Erkennung der Rapportgröße. Hierfür werden das publizierte Verfahren der Vorwärtsdifferenzen nach Oh (1999) sowie eine Adaption durch eine Haar-Faltung verglichen, die insbesondere bei schlicht konstruierten Geweben mit übersichtlichen Rapporten bereits zuverlässig Ergebnisse liefert.

Die eigentliche Schmutzerkennung schließt sich im zweiten Schritt an; drei Methoden werden verglichen: Für die ersten beiden wird das Bild in Segmente aufgeteilt, die dem detektierten Rapport entsprechen. Diese einzelnen Bildausschnitte von wenigen Quadratmillimetern Objektgröße werden bezüglich ihrer Helligkeitshistogramme verglichen. Diese Methode ist sehr sensitiv bezüglich Verschmutzungen, aber auch hinsichtlich gleichmäßiger Ausleuchtung des Objekts. Abhilfe schaffen hier die Histogramme orientierter Gradienten (HOG), die ungleiche Beleuchtung sehr viel besser tolerieren. Die dritte Schmutzerkennung greift auf die Vorwärtsdifferenzen zurück und setzt einen Haar-Filter ein, dessen Länge genau zwei Rapporte überspannt. Dadurch schlagen sich Verschmutzungen als Unregelmäßigkeiten vor dem vergleichsweise geordneten Hintergrund intensiv auf die Filterantwort durch. Diese ist durch einen einfache Schwellwert auf Anwesenheit von Fremdkörpern hin auswertbar.

Der angestrebte Reinigungssensor wird leicht in bestehende Reinigungsanlagen nachzurüsten sein und ihren Einsatz wirtschaftlicher und gleichzeitig zuverlässiger gestalten. Die Reinigungsevaluation an sich kann zudem als neuartige Methode



genutzt werden, um einen gegebenen Reinigungsprozess in Echtzeit im Prozess zu validieren und dadurch wertvolle Entwicklungszeit einzusparen.

*Gefördert durch Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.*

# **Sender- und Sensorsystem für den Straßenverkehr auf Basis von langnachleuchtenden, NIR-Licht emittierenden Pigmenten**

**Janet Arras**

*Institut für Anorganische Chemie,  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Engesserstr. 15, 76131 Karlsruhe  
Deutschland.*

*Email: [janet.arras@kit.edu](mailto:janet.arras@kit.edu)*

Die autonome Steuerung von Fahrzeugen wird als eine der zukunftsweisenden Technologien (Trendthemen) der nächsten Jahre in der Verkehrstechnik verstanden. Besonders im Bereich der Verkehrssicherheit und in der Steigerung des Komforts während des Fahrens liegen deren Potentiale. Außerdem werden positive Auswirkungen auf eine Reduzierung von Kraftstoffverbrauch und auf die Leistungsfähigkeit des Straßenverkehrs allgemein erwartet (u. a. bzgl. eines besser fließenden Verkehrs). Es ist auch absehbar, dass in naher Zukunft anhaltender automatisierter Fahrbetrieb in bestimmten verkehrlichen Situationen (s. z. B. Autobahnverkehr) technisch möglich wird. Bevor solche Systeme jedoch zugelassen werden, müssen die haftungs- und verhaltensrechtlichen Rahmenbedingungen geregelt werden. Diskussions- und rechtlicher Handlungsbedarf besteht zwar weiterhin, jedoch hat am 13.04.2016 das Bundeskabinett für Deutschland einen ersten Schritt Richtung Rechtssicherheit für die Nutzer von Assistenzsystemen, die sich bereits im Verkehr befinden, getan und den vom Bundesverkehrsministerium vorgelegten Gesetzentwurf zur Umsetzung des geänderten Wiener Übereinkommens über den Straßenverkehr beschlossen. Der Gesetzentwurf unterstützt die weitere Entwicklung erster automatisierter Fahrsysteme: Die Systeme müssen den technischen Regelungen der UNECE (United Nations Economic Commission for Europe, Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen) entsprechen und so gestaltet sein, dass sie durch den Fahrer übersteuert bzw. abgeschaltet werden können.

Voraussetzung für eine flächendeckende Anwendung des hochautomatisierten und autonomen Fahrens sind effektive Fahrerassistenzsysteme. Alle großen Automobilkonzerne arbeiten inzwischen an Technologien, um das gesamte Verkehrsumfeld eines Fahrzeuges schnell und zuverlässig zu erfassen und im Verhältnis zur eigenen Fahrtbewegung zu bewerten. Bislang reicht allerdings die maschinelle Umfeldwahrnehmung von Fahrerassistenzsystemen nach dem Stand der Technik noch nicht für das automatische Fahren. Neben Ultraschall-, Radar-, Lidar- und Laserscannern werden v. a. Kameras in Fahrerassistenzsystemen eingesetzt. Kameras dienen schon seit Längerem als Hilfen beim Rückwärtsfahren, und sie werden zurzeit in Surround View-Kamerasystemen, als Spiegelersatz, bei automatischen Fernlichtfunktionen und bei maschinellen Sehsystemen als Bildsensoren zur Objektdetektion, zur Verkehrszeichen- und zur Kreuzungserkennung genutzt. Die notwendige Grundlage für eine Vielzahl aktueller und zukünftiger Fahrerassistenzsysteme (v. a. von Kamera-Systemen, wie z. B. Spurhalteassistenten)

sind eindeutige, bei allen Licht- und Witterungsbedingungen sichtbare Straßenfahrbahnmarkierungen bzw. deren automatische Erkennung. Es scheint deshalb unbedingt notwendig, bisherige Straßenfahrbahnmarkierungen auf ihre Wahrnehmbarkeit hin zu optimieren, um eine umfassendere sowie eindeutigere maschinelle Wahrnehmung v. a. bei schwierigeren Wetter- und Sichtbedingungen zu ermöglichen. Besonders die Fern- und die Sichtbarkeit bei Nacht und bei Nässe bisheriger Straßenmarkierungen (z. B. und besonders einer Autobahn) können deutlich gesteigert werden. Bisherige Fahrerassistenzsysteme können somit - was bei Tageslicht noch möglich ist - nicht allein durch das Scheinwerferlicht (ohne Fernlicht) nachts einen Fahrstreifen in größerer Entfernung erkennen. Spezielle physikalische Größen von Straßenfahrbahnmarkierungen wie die Lichtstärke (ohne Beleuchtung) müssen in diesem Zusammenhang deutlich gesteigert werden.

Die weitreichende Erkennbarkeit einer Streckenführung ist durch den Einsatz langnacheuchtender Markierungszusätze deutlich verbesserbar. Insbesondere NIR-Licht emittierende Pigmente könnten eine ausschlaggebende Rolle für die Mobilität der Zukunft spielen. Diese neuen Trends sollen hierin vorgestellt werden.



**Abbildung 1:** Foto der Glowing Lines - wie sie auf der Autobahn N329 in den Niederlanden getestet werden - des von dem niederländischen Designer Daan Roosegaarde und dem Unternehmen Heijmans BV entwickelten Projekts Smart Highway (© Studio Roosegaarde).<sup>3</sup>

1. H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz, C. Singer: Handbuch Fahrerassistenzsysteme, Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort, 3. Aufl., Wiesbaden: Springer Vieweg, **2015**.
2. J. Arras, S. Bräse, *submitted*, **2017**.
3. Homepage des Studios Roosegaarde, Rotterdam, Niederlande, <https://www.studioroosegaarde.net>.

# Implementierung von Aptamer-modifizierten Dickschichtelektroden zur elektrochemischen Detektion von Kokain

Verena Diebold<sup>1</sup>, Norman Baltes<sup>1</sup>, Dominik Müller<sup>1</sup>, Markus Menger<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT, Joseph-von-Fraunhofer-Str. 7, 76327 Pfinztal, Germany.

<sup>2</sup> Fraunhofer-Institut für Zelltherapie und Immunologie IZI, Am Mühlenberg 13, 14476 Potsdam, Germany.

Email: [norman.baltes@ict.fraunhofer.de](mailto:norman.baltes@ict.fraunhofer.de)

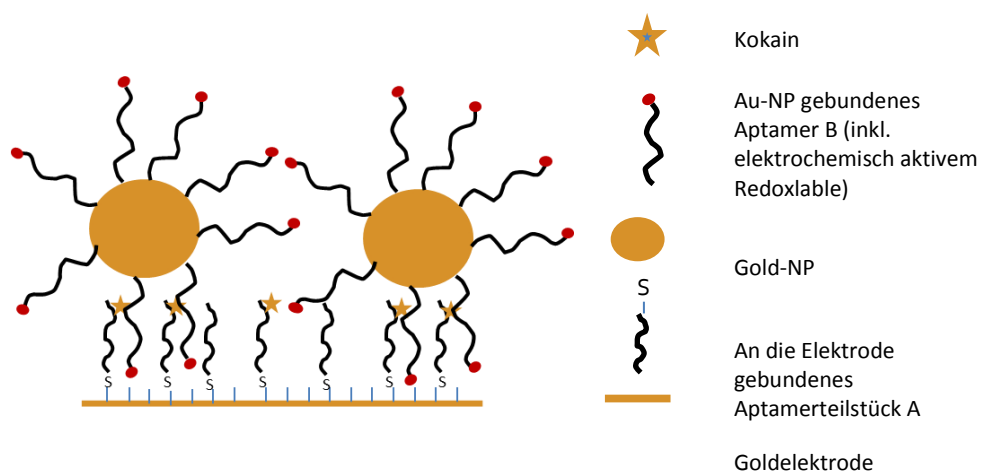
Spektroskopische und chromatographische Methoden stellen einerseits anspruchsvolle und hochgenaue Analyseverfahren zur Detektion kleiner Moleküle dar. Andererseits sind sie zeit-, kosten- und personalintensiv. In diesem Zusammenhang stellen aptamerbasierte, elektrochemische Sensorplattformen eine interessante und kostengünstige Alternative dar. Aptamensensoren basieren ähnlich wie Proteinsensoren auf dem Prinzip eines Schlüssel-Schloss-Mechanismus zwischen Target und (immobilisierten) Oligonukleotiden.

In dieser Arbeit wird die Entwicklung eines neuen in Echtzeit messenden, voltammetrischen Aptamersensors zur Kokaindetektion beschrieben. Die Sensorplattform besteht aus einer kommerziell erhältlichen Gold-Dickschichtelektrode, die über Sulfidbrücken mit mercapto-funktionalisierten Split-MN4-Aptamerderivaten modifiziert ist. Das Konzept beruht auf der von Zhao et al. vorgestellten Komplexierung von Kokain mit Paaren diverser MN4-Splitaptamere.<sup>[1]</sup> Die Autoren zeigten erfolgreich, dass die Bindungsaffinität des Antikokain-Splitaptamerpaares verbessert werden konnte, indem mit zweigeteilten Aptameren gearbeitet wurde, deren eine Hälfte mit Gold-Nanopartikeln funktionalisiert wurde. Da bei dieser Messart mehrere Splitaptamere an einem Goldnanopartikel gebunden sind, können so die lokale Konzentration an Aptameren, die eine redoxaktive Markierung tragen, erhöht und zudem multiple, simultane Ligandinteraktionen ermöglicht werden. Die vorliegende Arbeit stellt einen Sensor vor, der auf punktmutierten, ferrocen- und methylenblaugelabelten Sequenzen der kokainaffinen, großen MN-Aptamerfamilie basiert, die von Neves et al. ausführlich untersucht wurde.<sup>[2]</sup> Erste Messungen zeigten eine untere Nachweisgrenze von 10 nmol/L in PBS-Puffer.

Um ausgedehnte Untersuchungen in menschlichen Flüssigkeiten, wie Urin, Speichel oder Blut(serum) zu ermöglichen, wurden zudem neue Strategien und Methoden zur Reinigung und Aufkonzentrierung mittels Freier Flusselektrophorese entwickelt. Als Modellsystem dienten kokaingespikte, wässrige Rinderserum-Albumin Lösungen. Durch Anlegen eines queranliegenden Feldes konnten Albumin und Kokain im laminaren Strom getrennt und die Fraktionen separat aufgefangen werden.

Innerhalb der letzten zehn Jahre wurde der Nachweis zahlreicher Zielmoleküle mittels elektrochemischer Aptamersensoren beschrieben. Die Spannweite der untersuchten Targets reichte von Thrombin, HER2, Vasopressin, Kodein, PDGF, H5N1, Ochratoxin bis hin zu Oxytetracyclin und lässt die immense Einsatzfähigkeit derartiger Sensorsysteme in Medizin, Pharmazie und Verbraucherschutz erahnen.<sup>[3]</sup> Ein Transfer

von der Laborforschung hin zur industriellen Produktion entsprechender Sensoren im großen Maßstab hat jedoch noch nicht stattgefunden. Von daher liegt es im Interesse der auf angewandte Forschung ausgerichteten Fraunhofer AG die vorliegenden Ergebnisse auszubauen und im Sinne der analytischen/ pharmazeutischen Industrie einen reproduzierbar arbeitenden Sensor zu entwickeln.



- [1] T. Zhao, R. Liu, X. Ding, J. Zhao, H. Yu, L. Wang, Q. Xu, X. Wang, X. Lou, M. He et al., *Analytical Chemistry* **2015**, 87, 7712.
- [2] Miguel A.D. Neves, Oren Reinstein, Makbul Saad, Philip E. Johnson, *Biophysical Chemistry* **2010**, 153, 9.
- [3] a) Y. Huang, X. M. Nie, S. L. Gan, J. H. Jiang, G. L. Shen, R. Q. Yu, *Analytical Biochemistry* **2008**, 382, 16; b) L. L. Huang, X. J. Yang, C. Qi, X. F. Niu, C. L. Zhao, X. H. Zhao, D. H. Shanguan, Y. H. Yang, *Analytica Chimica Acta* **2013**, 787, 203; c) X. G. Liu, Z. Q. Cheng, H. Fan, S. Y. Ai, R. X. Han, *Electrochimica Acta* **2011**, 56, 6266; d) Y. Liu, T. Kwa, A. Revzin, *Biomaterials* **2012**, 33, 7347; e) H. Cai, T. M. H. Lee, I. M. Hsing, *Sensors and Actuators B-Chemical* **2006**, 114, 433; f) L. Barthelmebs, A. Hayat, A. W. Limiadi, J. L. Marty, T. Noguer, *Sensors and Actuators B-Chemical* **2011**, 156, 932; g) P. He, V. Oncescu, S. Lee, I. Choi, D. Erickson, *Analytica Chimica Acta* **2013**, 759, 74; h) L. Chun, S. E. Kim, M. Cho, W. S. Choe, J. Nam, D. W. Lee, Y. Lee, *Sensors and Actuators B-Chemical* **2013**, 186, 446.

# SENSORSYSTEM ZUR TNT-DETEKTION IM MEER

Benjamin Bechtle, Sebastian Geiger, Dominik Müller und Peter Rabenecker

Fraunhofer Institut für Chemische Technologie ICT, Joseph-von-Fraunhofer-Str. 7,  
76327 Pfinztal/D

Email: [dominik.mueller@ict.fraunhofer.de](mailto:dominik.mueller@ict.fraunhofer.de)

## Einleitung

Ziel dieser Arbeit ist die Weiterentwicklung eines bereits etablierten In-situ-Messsystems zur Spurendetektion von 2, 4, 6-Trinitrotoluol (TNT) im Meerwasser.

Im Rahmen der Entmilitarisierung und Entsorgung wurden Munitionen und Kampfmittel (unexploded ordnance, UXO) aus dem Ersten und Zweiten Weltkrieg unkoordiniert und in großen Mengen (Schätzwert: 300.000 t) in die Ostsee entladen. Neben der Umweltbelastung von TNT als potenziell krebserregenden Stoff gibt es heute für den Bau von Offshore-Anlagen eine große Nachfrage diese Altlasten zu beseitigen. Um den Aufwand und Kosten der Entsorgung zu begrenzen, stehen unbemannte U-Boote (UUV) mit unterschiedlichen Detektionsverfahren in der Entwicklung. Die UUV soll zielgerichtet Altlasten orten und eindeutig als UXO identifizieren. Ein Messverfahren beruht auf der elektrochemischen Detektion von TNT als Rückstand von stark korrodierten UXOs (Abbildung 1).

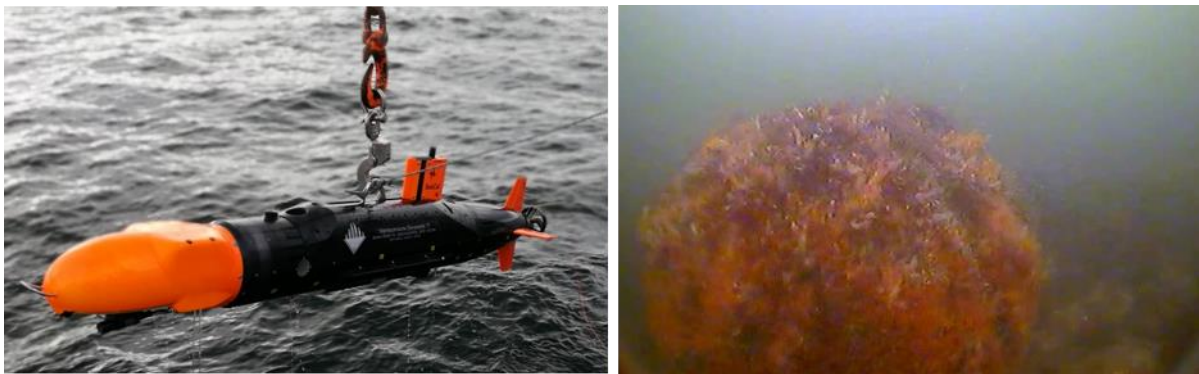


Abbildung 1:

Links: Unbemanntes U-Boot (UUV) "Seekatze", betrieben von der Deutschen Marine

Rechts: Unterwasser-Bild einer Ankertaumine auf dem Meeresboden der Ostsee

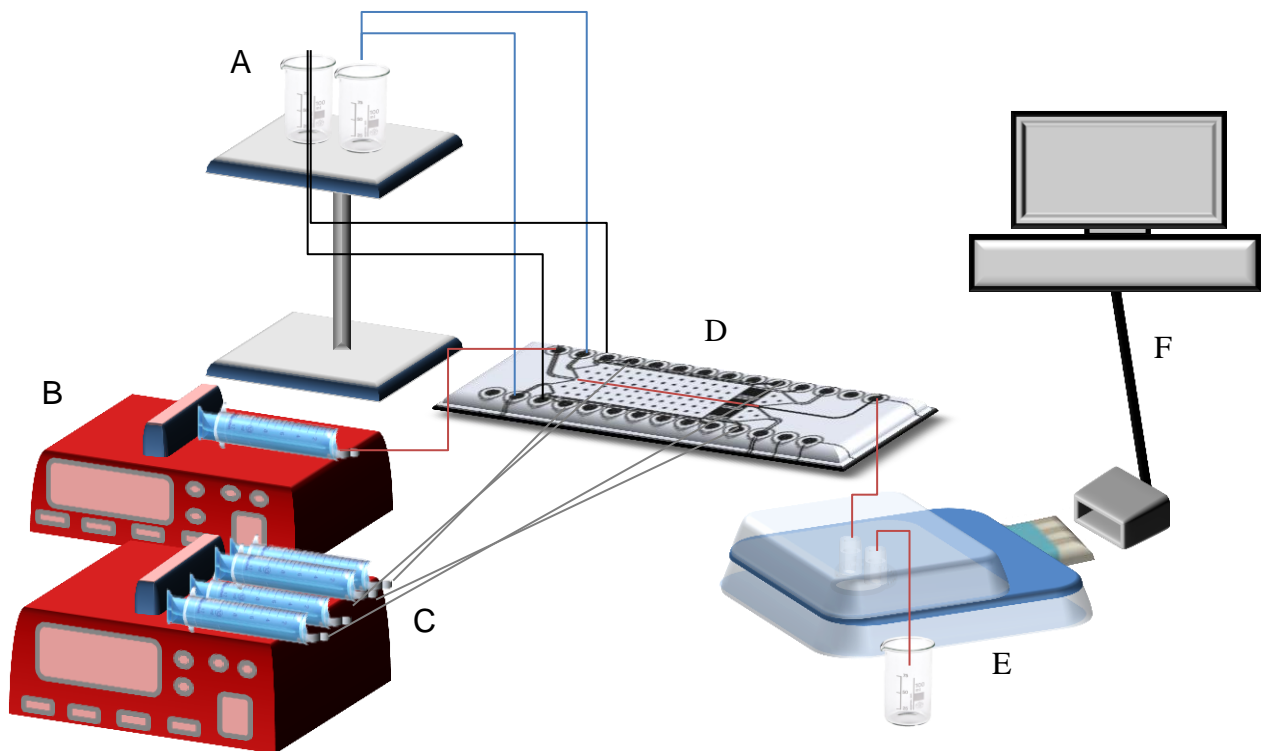
Um eine schnelle und kontinuierliche, aber zuverlässige Messung von TNT im Meerwasser durchführen zu können, wurde das bereits etablierte Messsystem als modulare Durchflusszelle konzipiert. Umfangreiche Experimente wurden unter realistischen Bedingungen in Gebieten der Ostsee durchgeführt, die zu neuen Erkenntnissen geführt haben. Im Anschluss an diese Arbeit wurde ein neuer Aufbau entwickelt, um die Selektivität und Robustheit des Messsystems deutlich zu steigern. Die Neuheit der Entwicklung liegt in der Vorbehandlung der Probe, um für die

elektrochemische Detektion unerwünschte Substanzen aus der Probenmatrix entfernen zu können.

Als Vorreinigung wird die Mikro-Freifluss-Elektrophorese (Mikro-FFE) vor die elektrochemische Detektion angeschlossen. Zu diesem Zweck wurde ein kommerzieller Feldflusschip verwendet, der eine schnelle Vorbereitung der Probe verspricht. Nach der elektrophoretischen Vorabtrennung wurde versucht, die Zielsubstanz (TNT) durch verschiedene und vorher festgelegte elektrochemische Verfahren selektiv nachzuweisen.

## Messaufbau

Die schematische Skizze in Abbildung 2 zeigt den gesamten Messaufbau.



**Abbildung 2: Messaufbau für das elektrochemische Sensorsystem mit elektrophoretischer Vortrennung**

In erhöhter Position stehen die Elektrolytlösungen (A), welche auf die Eingänge des Fraktionierungschips (D) geleitet werden. Die Spritzenpumpe (B) sorgt für die kontinuierliche Zuführung der Probe. Die Spritzenpumpe C saugt die Blasen und den erwärmten Elektrolyten über die Elektrodenausgänge am Chip ab. Die Durchflusszelle (E) ist mit dem Ausgang der Vortrennung verbunden. Gemessen wird an einem Messcomputer mit einem Potentiostaten (F), der über einen entsprechenden Adapter mit der Messelektrode verbunden ist. Am Ausgang der Durchflusszelle kann die Probe für Referenzmessungen genutzt und gesammelt werden (z.B. die Kapillarelektrophorese für die Bestimmung von TNT).

Der ausgewählte Chip des Herstellers microfluidic ChipShop GmbH ist speziell für Frei-Fluss-Elektrophorese Anwendungen konzipiert. Dieser Frei-Fluss-Fraktionierungschip

mit der Produktnummer 14-1025-0159-05 ist 75,5 mm lang, 25,5 mm breit und 1,5 mm hoch [1].

Die Durchflusszelle, in welcher die elektrochemische Detektion mittels einer Dickschichtelektrode stattfindet, soll ein möglichst kleines, auf die Elektrode angepasstes Volumen der Messkammer besitzen, die sich über die Dicke der FMK Matte definiert und ca. 25  $\mu$ L beträgt.

Kostengünstige kommerzielle Kohlenstoffpasten Elektroden wie die der Firma DROPSENS Typ DRP-C110 werden als fertiges Drei-Elektrodensystem aus einer runden Arbeitselektrode (WE), einer Gegenelektrode (CE) und einer Referenzelektrode (RE) geliefert. Der Durchmesser der Arbeitselektrode beträgt vier Millimeter. Die Gegenelektrode sowie die pseudo Referenzelektrode sind in einem Halbkreis um die Arbeitselektrode angeordnet. Die Elektroden sind mit einem passenden Adapter direkt mit dem Messcomputer verbunden. Eine Aktivierung oder spezielle Vorbereitung ist nur bedingt notwendig, wodurch diese Einwegelektroden für eine Plug & Play Anwendung geeignet sind.

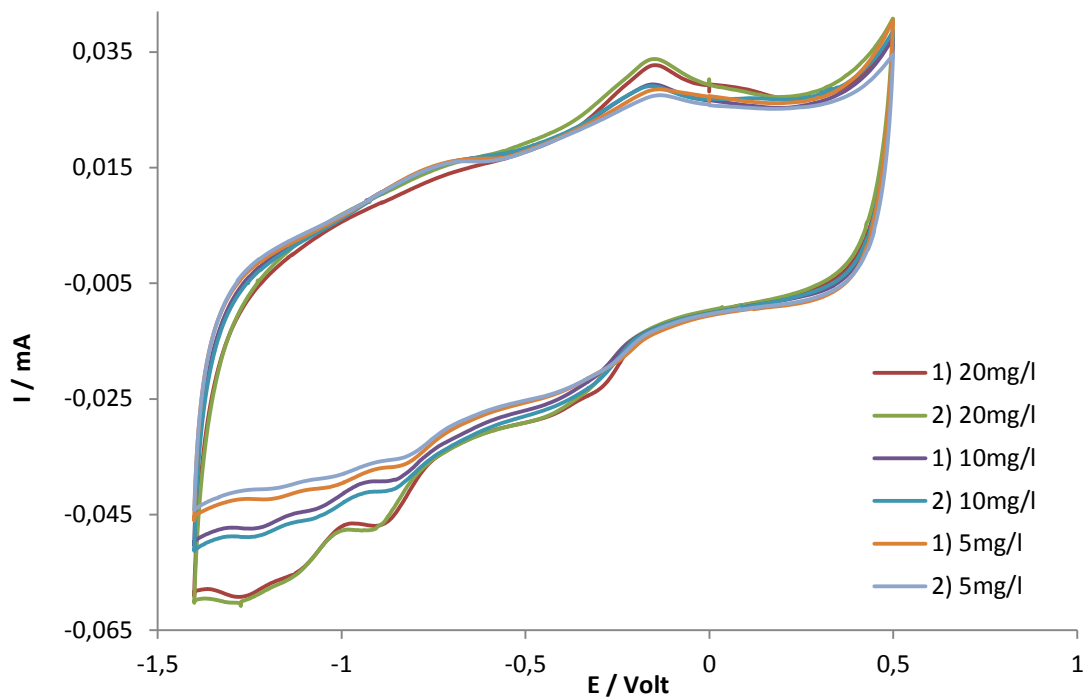
## **Ergebnisse**

Die Nitrogruppen des TNTs werden über drei Schritte elektrochemisch reduziert. Bei jedem der drei Reduktionsschritte gibt das TNT zwei Elektronen ab. Dies führt zu einer Stromantwort und somit zu einem Peak im Voltammogramm. Die drei Reduktionspeaks befinden sich, abhängig vom verwendeten Elektrolyten, zwischen -0,5V und -1,3V (Messdauer ca. 1 min). Im Fall von TNT in der wässrigen Lösung von 2-Hydroxyisobuttersäure (pH=4,5), einer aktivierten Kohlenstoffpasten Elektrode und keinerlei zusätzlichen Verunreinigungen liegen die Peaks bei -0,6V, -0,85V und -1,05V.

Zwei aufgenommene Konzentrationsreihen in Abbildung 3 validieren die Anwendung. Die erste Messreihe ist ohne Vortrennung durchgeführt worden. Verschiedene Konzentrationen von TNT Lösungen werden über eine Spritzenpumpe definiert mit fünf Mikroliter pro Minute in die Messzelle gepumpt. Nach jeder gemessenen Lösung wird die Zelle gespült. Anschließend werden zehn Zyklen reiner Elektrolyt vermessen, um Verschleppung zu vermeiden und die Elektrodenoberfläche zu reinigen.

Für die zweite Messreihe werden in Abbildung 3 exakt dieselben Konzentrationen an TNT eingestellt. Die Lösung wird über eine Spritzenpumpe mit fünf Mikroliter pro Minute durch eine Teflonkapillare auf den Eingang der Vortrennung gegeben. Sie durchläuft den Fraktionierungschip mit aktiver Elektrophorese im Vier-Elektrodenaufbau. Der mittlere Ausgangskanal des Chips wird über eine weitere Teflonkapillare in die Durchflusszelle geleitet, in welcher die elektrochemische Detektion stattfindet.





**Abbildung 3: Linearer Bereich des Sensorsystems. Messreihe von 2-20mg/l TNT, abgebildet sind die Zyklovoltammogramme von innen nach außen mit 5mg/l, 10mg/l und 20mg/l TNT. 1) Detektiert durch direktes Einspritzen in die Messkammer. 2) Detektiert im Gesamtsystem, nach Durchfließen der Vortrennung**

Es ist für die dargestellten Konzentrationen zu erkennen, dass die Detektion am Gesamtsystem mit eingeschalteter Elektrophorese am Fraktionierungschip als Vortrennung und anschließender Detektion in der Durchflusszelle vergleichbare Werte aufweist, wie die direkte Messung in der Durchflusszelle ohne Vortrennung. Die Stromantworten zeigen zu vorgegeben TNT-Konzentrationen ein lineares Verhalten. Es wird eine Nachweisgrenze im Bereich von 2 mg/L ermittelt und ist mit Werten anderer Forschungsgruppen gut vergleichbar [2,3,4].

Die Analysendauer des Gesamtsystems unterteilt sich in die Verweilzeit für die Vortrennung und in die elektrochemische Messzeit mit jeweils ca. 1 min. Das Totvolumen der Messzelle beträgt 25  $\mu\text{L}$ , mit einer Zuführung von 5  $\mu\text{L}/\text{min}$  dauert es 5 min bis das Zellvolumen annäherungsweise ausgetauscht wird. Daraus resultiert eine gesamte Analysendauer von ca. 6 min, mit einer kontinuierlichen Injektion der Probe.

### Ausblick

Neben der Mikro-FFE als Chip besteht die Möglichkeit das elektrophoretische Trennverhalten über eine Labor-Anlage zu untersuchen. Diese besitzt eine längere Trennstrecke und mehrere Ausgänge für den Elektrolyten. Hierüber kann die Methode der Vortrennung unterstützt und die Auftrennung von unerwünschten Substanzen sehr gut untersucht werden. Diese Ergebnisse werden ebenfalls Bestandteil dieser Posterpräsentation sein.

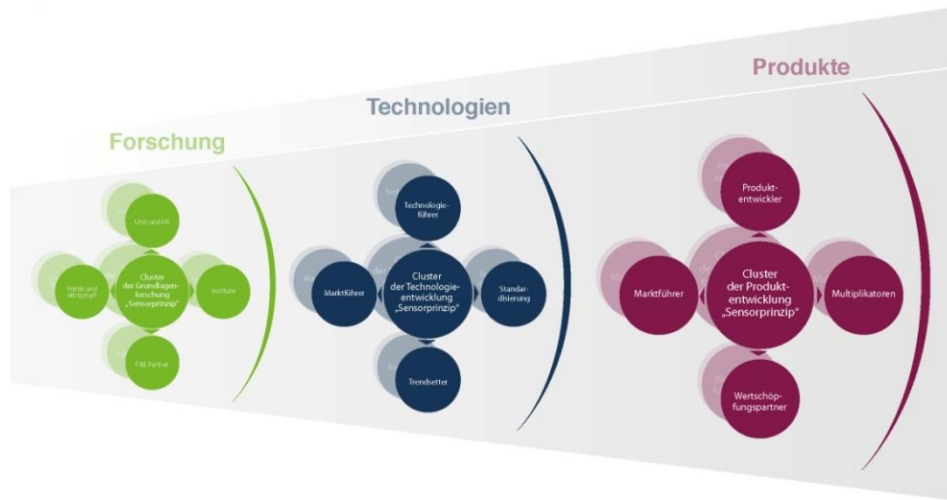
## Literatur

- [1] S. Köhler et al., RSC Adv., 2012, 2, 520–525
- [2] T. Lewis, D. C. Newcombe und R. L. Crawford, „Bioremediation of soils contaminated with explosives,“ Jurnal of Environmental Management, pp. 291-307, 2004.
- [3] J. L. Wang, F. Lu, D. MacDonald, J. Lu, M. Ozsoz und K. Rogers, „Screenprinted voltammetric sensor for TNT,“ Talanta, pp. 1405-1412, 1998.
- [4] X. Yao, J. Wang, L. Zhang, P. Yang und G. Chen, „A Three-dimensionally adjustable amperometric detector for microchip electrophoretic measurement of nitroaromatic pollutants,“ Talanta, pp. 1285-1291, 2006.

<b>Autorenliste (in alphabetischer Reihenfolge)</b>	<b>Seite</b>
Abert M.	19
Arras Jane	74
Baltes Norman	76
Bechtle Benjamin	78
Beuchle Günter	39
Beyerer Jürgen	35
Conrad Thorsten	66
Diebold Verena	74
Drese Klaus Stefan	29,33
Ebert Sandra	29
Elbez Ghada	83
Garbev Krassimir	39
Geiger Matthias	55
Geiger Sebastian	19,78
Gruhl Friederike	16
Gruna Robin	35
Hagenmeyer Veit	83
Illyaskutty Navas	13
Kansizoglu Onur	13
Keller Hubert	37,66,83
Knoblauch Jens	13
Kohler Heinz	13
Kowarik Stefan	69
Krause Julius	35
Krebber Katerina	69
Kufner Maria	29,33
Länge Kerstin	16
Längle Thomas	35

Lasota Sandra	29
Lutz Carolin	39
Matthes Jörg	39
Menger Markus	76
Moeller Richard-Sebastian	71
Morsch Patrick	71
Müller Dominik	76,78
Müller Jacob	44
Nirschl Hermann	71
Ojha Binayak	13
Pecht Ulrich	39
Peter Jens	66
Pinkwart Karsten.	19
Platz Hanno	41
Rabenecker Peter	19,78
Rapp Michael	16
Schmitt Katrin	9
Schneider Oliver	44
Schukar Marcu	69
Schweike Uwe	39
Schwuchow Katrin	29
Seifert Rolf	66
Stemmermann Peter	39
Tarantik Karina	9
Tietze Sabrina	29
Tsai Jia-Jing	44
Waibelt Patrick	39
Wischerhoff Erik	69
Wöllenstein Jürgen	9

# HybridSensorNet e.V.



## HybridSensorNet e.V.

c/o Dr. Hubert B. Keller (Vorsitzender)  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT-CN)  
Institut für Angewandte Informatik (IAI)  
Kaiserstraße 12  
76131 Karlsruhe

Tel.: +49 721 60 82 57 56  
Mobil: +49 171 2 07 52 69  
Fax: +49 721 9 68 35 30

[info@hybridsensornet.org](mailto:info@hybridsensornet.org)  
[www.hybridsensornet.org](http://www.hybridsensornet.org)