

Sensornetzwerke im Labor

Drahtlose Überwachung von Laboren der Life Sciences

Datenerfassung, Datenweiterleitung und die Auswertung von Messergebnissen: Schon jetzt sind moderne Sensorknoten echte Alleskönner. Derzeit stehen die flexiblen Laborsensornetzwerke aber erst am Anfang ihrer Entwicklung. Doch das Ziel ist klar: Im Labor der Zukunft können die Messgeräte eigenständig und sicher miteinander kommunizieren.



► Prof. Dr. Kerstin Thurow, Celisca – Center for Life Science Automation



► Prof. Dr. Dirk Timmermann, Institut für Angewandte Mikroelektronik und Datentechnik, Universität Rostock



► Dr. Frank Grassert, Institut für Angewandte Mikroelektronik und Datentechnik, Universität Rostock

Applikationen der Life Sciences stellen häufig spezielle Anforderungen an ihre Umgebung und an die Einhaltung besonderer Bedingungen. Der Betrieb analysenmesstechnischer Systeme (z.B. Time-of-Flight-Massenspektrometer) erfordert z.B. die Einhaltung definierter Temperaturen, da ansonsten Kalibrierfunktionen driften und so die Funktionsfähigkeit der Systeme beeinflusst wird. Für die Kultivierung und das Handling von (Säuger-)Zellen ist die Gewährleistung einer bestimmten Luftfeuchtigkeit im Bereich von 90–

95% (bei 5% CO₂) erforderlich. Eine zu hohe Luftfeuchtigkeit kann wiederum die Funktionsfähigkeit eingesetzter Geräte drastisch verschlechtern.

Eine weitere wichtige Aufgabe ist die Überwachung von Reinraumbedingungen, insbesondere der Partikel- und Keimzahlen in einer Laborumgebung. Dies betrifft vor allem Applikationen, die mit sensitiven Objekten (z.B. Nerven- oder Stammzellen) operieren oder aber infektiöse Materialien handhaben. Chemische Applikationen – insbesondere in der Katalysatorforschung – verwenden häufig Gase unter hohen Drücken als Reaktionsmedien. Für die Gewährleistung der Arbeitssicherheit ist hier ein permanentes

Monitoring des Sauerstoffgehaltes, giftiger (wie z.B. Kohlenmonoxid CO) oder explosiver Gase (wie z.B. Wasserstoff) erforderlich.

Für die Verfolgung aller genannten Parameter steht eine Vielzahl von Sensoren zur Verfügung. Wichtigste Eigenschaften der Sensoren sind eine einfache Kalibrierung, einfache Wartung und die hohe Beständigkeit gegenüber korrodierenden Medien. Die Sensoren können mobil oder stationär ausgeführt und in eine komplexe Laborumgebung integriert sein.

Mobile Sensoren stellen dabei häufig preisgünstige Varianten dar, die flexibel an unterschiedlichen Positionen eines Labors appliziert werden können. Nachteilig ist bei dieser Variante der Raumüberwachung, dass die Messdaten in der Regel nur manuell ausgelesen werden können; akustische und / oder visuelle Warnsignale laufen nur in den Bereichen auf, in denen die Sensoren installiert sind. Insbesondere in großen Laborbereichen führt dies zu der Problematik, dass für die rechtzeitige Erkennung gefährlicher Zustände

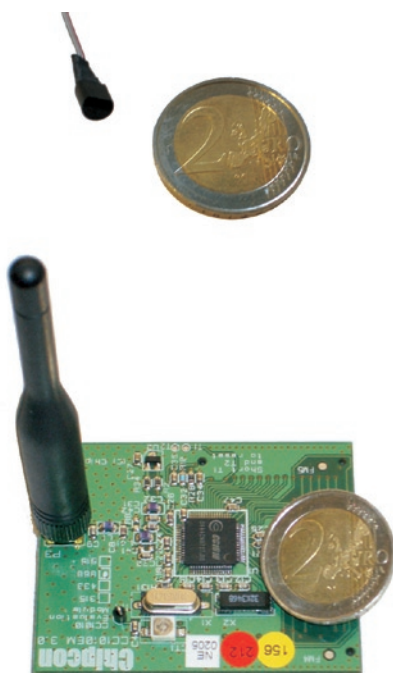


Abb. 1: a) Temperatursensor (LM35 National Semiconductor) [7] und Chipcon CC1010 Modul [6], b) entwickelter Temperatur-Sensorknoten und c) Temperatur-Sensorknoten im Einsatz

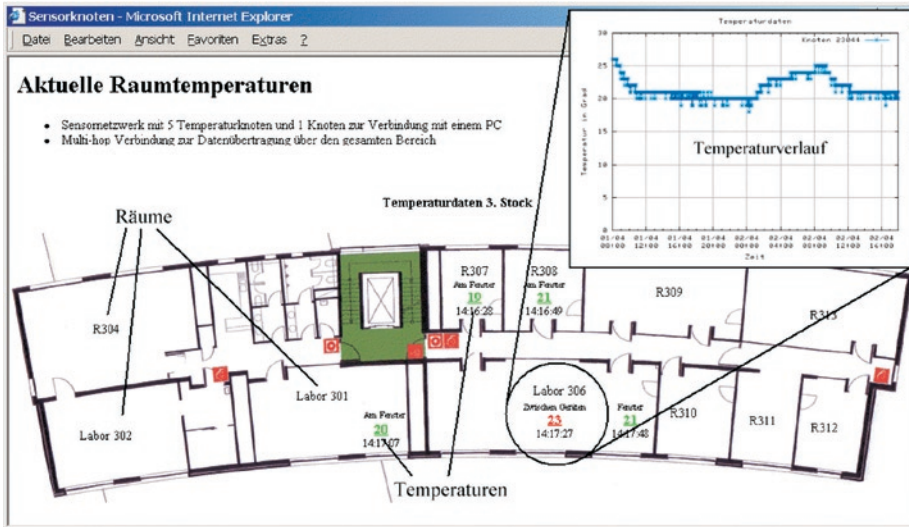
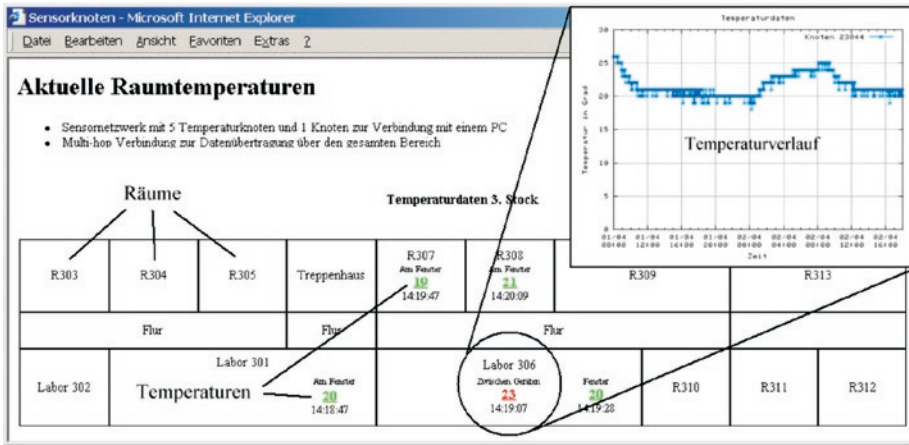


Abb. 2: Mittels Internetbrowser können Daten weltweit abgefragt oder das Netzwerk verwaltet werden.

ständig Personalkapazität in allen Bereichen vorgehalten werden muss. Komplexere Anlagen ermöglichen eine Speicherung und Archivierung der Messdaten, wobei eine Visualisierung und Protokollierung aller Vorgänge in einem zentralen Leitstand erfolgt. Damit ist die Überwachung großer Laborbereiche mit minimalem Personalaufwand möglich. Nachteilig sind bei derart fest installierten Anlagen der hohe Verkabelungsaufwand bei der Installation und die damit verbundene geringe Flexibilität, da die Veränderung der Position der Sensoren und die Integration neuer Sensoren in die komplexe Überwachung nur mit hohem Aufwand zu realisieren ist.

Ziel zukünftiger Entwicklungen ist daher die Kombination der Vorteile beider Varianten der Raumüberwachung. Eine hohe Flexibilität der Sensorpositionierung soll dabei mit den Möglichkeiten einer einfachen Datenübertragung und -verarbeitung in Prozessleitsystemen verbunden werden.

Sensorprinzipien für die Raumüberwachung

Zu den wichtigsten Parametern, die im Bereich der Life Sciences zu überwachen sind, gehören unter anderem Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Par-

tikelzahlen sowie die Konzentration von Gasen und Lösungsmitteln in der Atmosphäre.

Für Temperaturmessungen finden unterschiedliche Verfahren Anwendung, die in berührende und nicht berührende Temperaturmessungen unterschieden werden [1]. Zur berührenden Temperaturmessung eignen sich Thermoelemente und Widerstandsthermometer. Sie werden in der Industrie zur Messung in Gasen, flüssigen und festen Körpern, sowohl an ihrer Oberfläche als auch im Inneren, verwendet. Die Genauigkeit der Messung, das Ansprechverhalten des Thermometers, seine chemischen Eigenschaften in Hinsicht auf Standzeiten, Abnutzung oder ähnliches, stellen die Kriterien für die Auswahl des geeigneten Temperatursensors dar.

Thermoelemente (Preise ab ca. 25 €) nutzen die physikalische Eigenschaft von unterschiedlichen Metallen, an ihrer Verbindungsstelle eine mit der Temperatur zunehmende Spannung zu erzeugen. Sie werden hauptsächlich bei Messungen in höheren Temperaturbereichen (bei Edelmetallen bis 1.800 °C) verwendet oder bei Verwendung von einfachen Legierungen und einer großen Messtoleranz, da sie gegenüber Widerstandsthermometern einen deutlichen Preisvorteil besitzen.

Dort, wo das zu messende Medium nicht durch direkten Kontakt gemessen werden kann

(z.B. bei sich schnell bewegenden Medien), findet die berührungslose Temperaturmessung Anwendung. Durch Infrarot-Pyrometer (je nach Ausführung ca. 20–700 €) können, im Gegensatz zu herkömmlichen Thermoelementen, schnell (Antwortzeit häufig nur wenige Millisekunden) punktuell Temperaturen gemessen werden. Die Infrarotstrahlung im Wellenlängenbereich zwischen 0,78 μm und 1 mm ist für den Menschen ungefährlich und kann mit verschiedenen Infrarotdetektoren gemessen werden.

Der Zusammenhang zwischen der Temperatur des Körpers und der ausgesandten Strahlung wird durch das Planck'sche Strahlungsgesetz und das Stefan-Boltzmann-Gesetz beschrieben. Wird die Strahlungsleistung gemessen, kann daraus die Temperatur des Körpers berechnet werden.

Für die Bestimmung der Feuchtigkeit gibt es eine Vielzahl an Lösungen [2]. Die heute etablierteste Methode ist die kapazitive Messung der relativen Feuchte. Kapazitive Feuchtemessfühler (Feuchtesensoren) beruhen auf der feuchteabhängigen Änderung der Kapazität eines Kondensators mit einem dünnen Polymerfilm als Dielektrikum, der auf einer stabilen Glasträgerplatte aufgebracht wird. In Abhängigkeit von der Umgebungsfeuchte ändern sich die dielektrischen Eigenschaften des Polymerfilmes und somit die Kapazität des Kondensators. Die Kapazitätsänderung ist proportional zur Änderung der relativen Feuchte.

Die kapazitiven Feuchtesensoren reagieren sehr schnell auf Feuchteänderungen und können teilweise im Temperaturbereich von -40 – $+180$ °C eingesetzt werden. Die Messgenauigkeit liegt zwischen ± 2 und ± 5 % relative Feuchte. Datenlogger ermöglichen die Speicherung und das spätere Auslesen der gemessenen Daten. Die drahtlose Übersendung der Messwerte ist für die landwirtschaftliche Anwendung (Messung der Bodenfeuchte, Feldmessstationen) schon realisiert. Kombisensoren ermöglichen die gleichzeitige Messung von Feuchte und Temperatur. Die Kosten eines solchen Sensors variieren je nach Anwendungsbereich, Ausführung (20–1.000 €) und Anbieter (z.B. Sensirion, Honeywell).

Für die Überwachung von Gas- und Lösungsmittelkonzentrationen [3] in technischen Anlagen oder Laboratorien gibt es eine Vielzahl an unterschiedlichen Systemen (z.B. von Oldham, Cambridge Sensotec, MSA Auer, Preise variieren je nach Ausführung). Dabei besteht die Möglichkeit zur Einzel- und Multigasanalyse. Je nach Anforderung kann dabei neben akustischen und visuellen Warnsignalen der ermittelte Messwert an eine Basisstation übertragen, gespeichert oder angezeigt werden. Die der Messung der Gase zugrunde liegenden Prinzipien lassen sich

im Wesentlichen auf Wärmetönung (katalytische Verbrennung, z.B. für H_2), Infrarotverfahren (Absorption und Photoakustik, z.B. O_2 , CO , CO_2), Halbleitertechnik (viele Lösungsmittel) und die Messung über elektrochemische Zellen (auch O_2 , CO , CO_2 , etc.) zurückführen.

Drahtlose Temperaturmessung im Labor

Neueste Sensortechnologien auf Mikrosystembasis ermöglichen geringere Baugrößen und ersetzen zunehmend herkömmliche Sensoren [4]. Gleichzeitig erlauben aktuelle Entwicklungen und die stetige Skalierung in der Mikroelektronik die miniaturisierte Umsetzung von Funktechnologien [5]. Diese Trends gestatten zunehmend die Kombination intelligenter Funkeinheiten mit einem Sensor auf kleinstem Raum und führen so zu Sensorknoten. Derartige Sensorknoten sind in der Lage, selbständig Daten über den Sensor zu erfassen sowie auszuwerten, und sie können mittels der Funkschnittstelle mit der Umgebung kommunizieren.

Neben der reinen Funktionalität ist ein geringer Energieverbrauch notwendig, um ein komplett autarkes Arbeiten über längere Zeiten sicherstellen zu können. Alternativ kann die Stromversorgung aber auch extern erfolgen. Aus einer Vielzahl kleiner, intelligenter Sensoren mit Funkeinheit kann ein so genanntes Sensornetzwerk gebildet werden. Die Kommunikation beschränkt sich dabei nicht auf die Übertragung der Sensordaten zu einer Basisstation. Jeder Sensorknoten ist in der Lage, Informationen weiterzuleiten, zu generieren oder auch auszuwerten.

Die Möglichkeit der Nutzung drahtloser Sensornetzwerke in Laboren der Life Sciences wurde bereits exemplarisch mit der erfolgreichen Inbetriebnahme eines Sensornetzwerkes für die Temperaturmessung demonstriert.

Für diese Realisierung eines Sensornetzwerkes müssen autarke, robuste, drahtlose Sensorknoten zur Verfügung stehen. Da das komplette Gebiet der Sensornetze sich derzeit noch in der Entwicklung befindet, existieren noch keine kommerziell verfügbaren Sensorknoten, die allen Ansprüchen genügen. Für die Temperaturmessung wurde daher eine Entwicklungsumgebung basierend auf Sensorknoten der Firma Chipcon (Chipcon CC1010 [6]) ausgewählt. Bei diesen Sensorknoten sind ein 8051 Mikrocontroller und Funkmodul auf einem einzigen Chip integriert, wodurch unter Erhalt aller Anschlussmöglichkeiten eines Mikrocontrollers (unter anderem Anschlüsse zur Analog/Digital-Wandlung bzw. digitale Ein- und Ausgänge zum Anschluss externer Sensoren) eine kleine Bauform realisiert werden kann. Für die erhältlichen

CC1010-Module mit integriertem Temperatursensor wurde ein Gehäuse entwickelt, welches sowohl für Robustheit und Schutz sorgt, als auch für die Aufnahme von Batterien, so dass diese Sensoren autark betrieben werden können.

Zusätzlich zum Batterieträger mit An/Aus-Schalter wurden LEDs zur Zustandsanzeige und ein Resetschalter am Gehäuse untergebracht. Weiterhin wurde an einigen Knoten ein zusätzlicher externer Temperatursensor (LM35 [7]) angeschlossen. Damit sind diese Knoten unabhängig und flexibel einsetzbar (s. Abb. 1).

Zum Monitoring der Temperatur in analytischen und biologischen Laboren wurde zunächst ein einfaches Netzwerk aus fünf Sensoren installiert, das parallel zu einem klassischen System mit verkabelten Sensoren arbeitet (technolon Raummodule vom Typ DDC110-L4, Firma Kieback & Peter).

Die Schnittstelle des Sensornetzwerkes zu anderer Rechentechnik bildet eine Basisstation. Diese ist in der Lage, mittels einer Funkschnittstelle mit dem Sensornetzwerk zu kommunizieren, kann aber gleichzeitig die Daten über weitere Schnittstellen weiterleiten, wodurch erst eine Integration des Netzwerkes in bestehende Systeme möglich wird. Aufbauend auf dem fest installierten Sensornetzwerk zur Temperaturmessung wurde daher eine Schnittstelle zum Internet programmiert. Diese schließt vier Komponenten ein:

1. Übertragung der Daten vom Basisknoten über die serielle Schnittstelle zum PC und zurück und Weiterleitung der Daten über TCP an einen Webserver.
2. Eine Webserversoftware, die die Daten empfängt, auswertet, speichert und zu versendende Daten an den PC zurückgibt.
3. Ein Webinterface, womit es möglich ist, Nachrichten für das Sensornetzwerk beliebig zusammenzustellen und zu versenden sowie alle am Basisknoten eingehenden Nachrichten darzustellen. Hiermit sind somit die Kontrolle und die Darstellung des Sensornetzwerkes für einen Entwickler möglich.
4. Endnutzerwebinterface, das nur noch die durch das Sensornetzwerk ermittelten Daten in geeigneter Weise darstellt.

Die von den einzelnen Sensorknoten übermittelten Temperaturdaten können den jeweiligen Räumen zugeordnet, angezeigt und farblich markiert werden. Für eine nutzerfreundliche Darstellung sind alle Mittel der Webseitendarstellung möglich. Erweiterungen und Verbesserungen können entsprechend einfach und schnell durchgeführt werden. Abbildung 2 zeigt die Darstellung der Temperaturinformationen des Sensornetzwerkes auf der entwickelten Webseite.

Neben der Anzeige der aktuellen Temperatur ist auch die Verfolgung von Temperaturverläufen

möglich. Dies ist insbesondere dann von Interesse, wenn aufgrund des Betriebes von Geräten und Gerätesystemen oder von Havarien punktuelle Temperaturänderungen auftreten. Derartige Messungen sind mit konventionellen Prozessleitsystemen (PLS) kaum oder gar nicht möglich, da Temperaturdaten lediglich raumweise und in größeren Abtastintervallen aufgezeichnet und ausgewertet werden und die Positionierung des Sensors fest an einer gut zugänglichen Stelle erfolgt.

Abbildung 3 zeigt daher den Verlauf der Temperaturkurve des Prozessleitsystems im Vergleich zur Temperaturkurve eines Sensormoduls, welches die Temperatur direkt in der Nähe eines Gas-Chromatographen aufzeichnete. Die Temperatur ist für beide Systeme mit einer Genauigkeit von einem Grad Celsius dargestellt. Während das PLS lediglich die mittlere Raumtemperatur ermittelt, geben die Daten des Sensormoduls Aufschluss über den Betriebszustand und das korrekte Verhalten des Gerätes.

Es sind fünf Messläufe sowie das endgültige Abkühlen zu erkennen. Zusätzlich zeigt Abbildung 3, dass das Sensornetzwerk häufiger Messwerte aufzeichnet, wodurch eine genauere Darstellung möglich wird. Da die Abtasthäufigkeit bei dem entwickelten Sensornetzwerk skalierbar ist, kann mit diesem Parameter ein Optimum hinsichtlich Genauigkeit, Reaktionszeit und Datenmenge gefunden werden. Derartige Konfigurationsmöglichkeiten bietet das konventionelle PLS nicht. Die Kosten für ein derartiges Sensornetzwerk können mit circa 100 € pro Sensorknoten angegeben werden.

Für die entwickelte Hardware-Plattform wurde eine robuste Knotensoftware entwickelt. An diese werden primär folgende Anforderungen gestellt:

- Stabile Kommunikation über die Funkschnittstelle
- Abfragen und Verwalten von Sensordaten
- Reagieren auf Anfragen
- Zeitgesteuertes oder auch ereignisgesteuertes Senden von Informationen

Bei der grundlegenden Entwicklung muss der Fokus auf eine stabile Kommunikation gelegt werden, da nur so Daten und Befehle auch von höheren Abstraktionsschichten gesendet und verarbeitet werden können. Dazu wurden Interrupt-gesteuerte Sende- und Empfangsroutinen implementiert. Bei höherem Datenaufkommen steigen die Anforderungen an die Software, da mit zunehmender Anzahl an Knoten in einem Netzwerk prinzipiell jeder Knoten alle Nachrichten von anderen Knoten, auch wenn sie nicht für ihn sind, empfängt und somit auswerten kann.

Bei gemeinsamen Anfragen an mehrere Knoten kommt es darüber hinaus zu Konflikten, wenn alle Knoten versuchen, gleichzeitig zu ant-

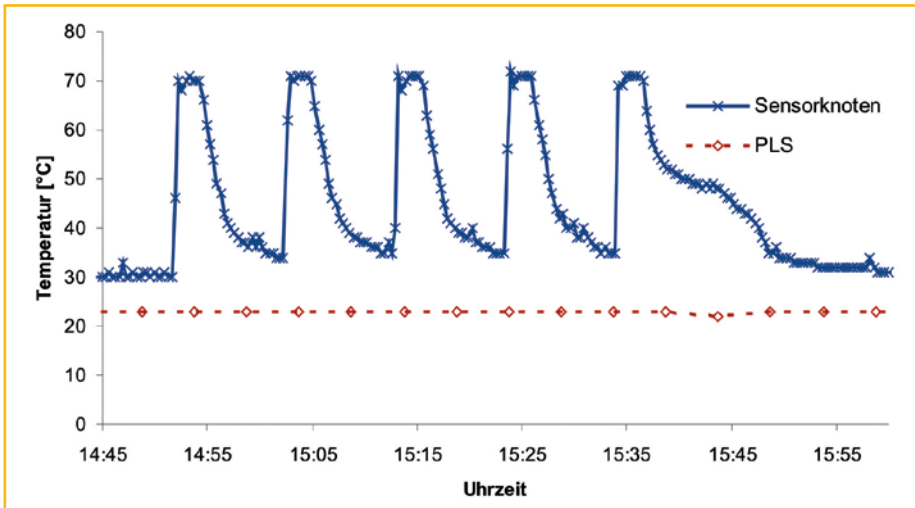


Abb. 3: Vergleich der Temperaturkurve eines Sensorknotens direkt in der Abluft eines GC, gemessen mit der Temperaturkurve des Prozessleitsystems (PLS)



Abb. 4: a) Gassensor (TGS822 von Figaro Engineering Inc.) [8] und b) Lichtsensor (M9960 von Heimann Halbleiterbauelemente) [9]

worten. Außerdem muss in der Knotensoftware beachtet werden, dass eine ankommende Nachricht nicht eine noch nicht verarbeitete Nachricht

überschreibt oder aber mit einer noch nicht gesendeten Nachricht kollidiert. Weiterhin werden jeder Nachricht Routing-Informationen zugeteilt, womit der Weg, den die Information durch das Netzwerk gehen soll, festgelegt wird. Damit müssen die Knoten in der Lage sein, Datenpakete weiterzusenden. Der endgültige Empfängerknoten kehrt in der Antwort die Reihenfolge der Routingknoten um, wodurch der Weg zurück beschrieben wird.

Letztlich dürfen Übertragungsfehler nicht zu unerwünschtem Verhalten führen. Daher muss immer eine Datenprüfung auf jedem Knoten enthalten sein, wodurch die Richtigkeit der Daten sichergestellt und ein Fehlverhalten vermieden wird.

Zukünftig kann das bestehende Sensornetzwerk in verschiedenen Richtungen erweitert werden. Zum einen wird durch Verbesserungen an der Knoten- und Basisstationssoftware die Flexibilität erhöht. Schon jetzt können zusätzliche, fest installierte Sensorknoten einfach aufgestellt werden. Sobald diese in der Auswertungs- und Kontrollsoftware registriert sind, stehen die zusätzlichen Daten dem System zur Verfügung. Für frei bewegliche Sensoren, z.B. zum Monitoring der Temperatur direkt an Personen, müssen die Mechanismen der Datenübertragung noch erweitert werden.

Zum anderen können mehrere Sensoren an die Hardware eines einzelnen Sensorknotens angeschlossen werden. Hier stehen die Messung von Gaskonzentration, Feuchtigkeit oder Licht im Fokus, um die Arbeitsumgebung noch genauer objektiv bewerten zu können.

Abbildung 4 zeigt zwei zusätzliche Sensoren, die bereits an einem speziellen Knoten in Betrieb sind. Eine zukünftige Verkleinerung der Knotenhardware macht die Sensorknoten unauffälliger und gestattet, dass die Positionierung noch dichter an den zu messenden Stellen erfolgen kann.

Referenzen

- [1] Gruner, K.: „Grundlagen der berührungslosen Temperaturmessung“, Fa. Raytek, Firmenschrift
- [2] Wernecke, R.: „Industrielle Feuchtemessung“, Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim, 2003, 367 Seiten
- [3] Wiegleb, G.: „Industrielle Gassensoren“, expert-Verlag GmbH, Renningen, 167 Seiten (2001)
- [4] Akyildiz, I. F.; Su, W.; Sankarasubermanian, E. Cayirici: “A survey on sensor networks”, IEEE Communications Magazine, vol. 40–8(August), S. 102–114 (2002)
- [5] Doherty, L.; Warneke, B. A.; Boser, B.; Pister, K. S.: “Energy and performance considerations for smart dust”, Parallel Distributed Systems and Networks, vol. 4–3, S. 121–133 (2001)
- [6] www.chipcon.com
- [7] www.national.com
- [8] www.figaro.co.jp
- [9] www.smiths-group.com

► KONTAKT

Prof. Dr. Dirk Timmermann

Dr. Frank Grassert

Institut für Angewandte Mikroelektronik und Datentechnik

Universität Rostock

Tel.: 0381/498-7250

Fax: 0381/498-7251

dirk.timmermann@uni-rostock.de

frank.grassert@uni-rostock.de

www-md.e-technik.uni-rostock.de

Prof. Dr. Kerstin Thurow

Celisca – Center for Life Science Automation
Rostock

Tel.: 0381/5196-4802

Kerstin.Thurow@celisca.de

www.celisca.de