

# Sensoren in Mikro-Technologie für die Messung von Umweltparametern

**K. Riedling, W. Fallmann, B. Luger, P. Svasek, W. Winkler**  
**Institut für Allgemeine Elektrotechnik und Elektronik, TU Wien,**  
**1040 Wien**

In diesem Beitrag sollen die spezifischen Anforderungen, die an Sensoren für die Messung von Umweltparametern gestellt werden, und die Aspekte einer Implementierung dieser Sensoren mit mikrotechnologischen Methoden diskutiert werden. Die geringen geometrischen Abmessungen von Mikrosensoren erweisen sich in der Regel als nur von untergeordneter Bedeutung für ihren Einsatz; weitaus größere Vorzüge weisen Mikrosensoren dank ihrer Integrierbarkeit, ihres geringeren Verbrauchs an Energie und sonstigen Betriebsmitteln und ihrer größeren Zuverlässigkeit auf.

## 1. Einleitung

Das Monitoring von Umweltparametern umfaßt eine große Anzahl sehr heterogener Meßaufgaben, die von der Erfassung einfacher physikalischer Parameter wie Temperatur und Luft- oder Wasserdruck bis zur Bestimmung komplexer Daten, etwa der Konzentration und Verteilung von Pestiziden, reichen können. Die Messungen sollen vielfach über längere Zeiträume — in der Größenordnung von Monaten bis Jahren —, an einer Vielzahl von Meßstellen im Gelände, und mit einem möglichst geringen Installations- und Wartungsaufwand durchgeführt werden [1] – [3]. Damit sind von dem Meßsystem vielfach Randbedingungen zu erfüllen, die bei Messungen in einer Laborumgebung keine oder nur eine äußerst untergeordnete Rolle spielen, wie etwa:

- Große funktionelle Lebensdauer der Sensoren und hohe Stabilität ihrer Parameter;
- möglichst große Intervalle für Wartungsarbeiten; anzustreben ist ein wartungsfreier Betrieb über die gesamte vorgesehene Einsatzdauer des Meßsystems;
- geringer Verbrauch an Energie und Betriebsmitteln (z.B. chemischen Reagenzien);
- weitgehende Immunität gegen elektromagnetische und mechanische Störeinflüsse;
- niedrige Herstellungs-, Installations- und Betriebskosten und leichte Fertigbarkeit;
- Eignung für einen simultanen Einsatz vieler räumlich verteilter Meßsysteme;
- Kompatibilität mit vorhandenen Einrichtungen.

Diese Forderungen beeinflussen nicht nur den mechanischen Aufbau der Komponenten des Meßsystems und die darin eingesetzte Elektronik, sie erfordern insbesondere einen speziellen Aufwand bei der Wahl der zu verwendenden Sensoren.

## 2. Anforderungen an Sensoren in einem Umwelt-Meßsystem

Stabilität und Immunität gegen Störungen aller Art sowie gegen degradierende Einwirkungen sind die wesentlichsten von Sensoren für Umweltparameter geforderten Eigen-

schaften: Da die Sensorelemente zwangsläufig den mechanischen, elektrischen und chemischen Einflüssen aus ihrer Umgebung ausgesetzt sein *müssen*, während beispielsweise die Datenakquisitions- und Auswerteelektronik beliebig aufwendig gekapselt und abgeschirmt werden kann, kommt ihrer Konzeption eine besondere Bedeutung für die wartungsfreie Betriebs- und Lebensdauer der Datenakquisitionseinheiten zu.

Die Sensoren in Meßsonden für Umweltdaten sind in der Regel entweder funktionell in direktem Kontakt mit Niederschlags-, Oberflächen- oder Grundwasser, oder sie müssen zumindest einen derartigen Kontakt über beliebig lange Zeiträume zulassen. Der Kontakt mit Wasser kann nicht nur zu chemischen oder mechanischen Korrosionserscheinungen führen; in den meisten Fällen ist auch mit einer Belastung durch Schlamm oder organische Substanzen, also Bakterien oder Algen, zu rechnen. Dazu kommen noch potentielle mechanische Beschädigungen durch Pflanzen, Tiere und Menschen.

Weiters ist in den meisten Einsatzfällen ein extrem großer Bereich für die Betriebstemperatur zu erwarten, der von unter  $-30\text{ °C}$  bis  $+70\text{ °C}$  und mehr reichen kann, wenn die Sensoren direkter Sonnenbestrahlung ausgesetzt werden. Nicht nur die jahreszeitlichen Temperaturschwankungen, auch die täglichen Temperatur-Wechselbelastungen tragen zu einer vorzeitigen Alterung der Sensoren und einer Drift ihrer Parameter bei.

Meßeinrichtungen für Umweltparameter sind zudem in der Regel elektromagnetischen Störungen ausgesetzt, sei es durch natürliche Ursachen, sei es durch vagabundierende Ströme oder Störfelder von Energieversorgungseinrichtungen. Diese beeinflussen zwar nicht notwendigerweise den Sensor selbst, sie können aber die Meßdaten verfälschen, wenn sie dem Meßsignal überlagert werden. Dies ist wiederum um so schwieriger zu verhindern, je kleiner die von den Sensoren abgegebenen Signalpegel und je größer die Distanzen sind, über die diese Signale weitergeleitet werden müssen. Zudem können selbst vergleichbare Sensoren in Abhängigkeit von ihrem Aufbau mehr oder weniger empfindliche Antennen für elektromagnetische Störungen darstellen; auch im Hinblick auf die Unterdrückung elektromagnetischer Störungen kann also die Auswahl des Sensorelements die Eigenschaften des gesamten Meßsystems nachhaltig bestimmen.

Die *Abmessungen* der Sensoren, die für viele andere Anwendungen (zum Beispiel im medizinisch-biologischen Bereich) eine kritische Eigenschaft darstellen, sind hingegen für die Messung von Umweltparametern in der Regel von untergeordneter Bedeutung. Bei den meisten interessierenden Umweltdaten handelt es sich um eher globale Größen mit — zumindest im Vergleich zu den Abmessungen einer Meßstelle — vernachlässigbarer örtlicher Varianz; in manchen Fällen sind sogar *Minimaldimensionen* eines Sensors erforderlich, um einen erwünschten integrierenden Effekt zu erzielen, beispielsweise bei einem Regenschirm. Zudem können Störungen durch Kontaminations-Beläge zumindest in ihrem Einfluß verringert werden, wenn die Abmessungen eines Sensors ausreichend groß gegen die zu erwartenden Belagdicken sind; dies ist beispielsweise bei Leitfähigkeits- und Ionenkonzentrations-Messungen zu berücksichtigen.

### 3. Der Einsatz von Mikrosensoren in Umwelt-Meßsystemen

Der entscheidende Vorteil von Sensoren, die in Mikrotechnologie hergestellt wurden, liegt in ihrer potentiellen *Integrierbarkeit*. Dies kann sowohl die Möglichkeit bedeuten, mehrere ähnliche Sensoren in einem Arbeitsgang in unmittelbarer Nachbarschaft zueinander herstellen zu können; noch viel wichtiger ist die Integrierbarkeit mit aktiven Komponenten, also im allgemeinen mit der zugehörigen Signalkonditionier-Elektronik. Dies kann die folgenden Vorteile bieten:

- Vorverstärker können in unmittelbarer Nähe des Sensors angeordnet werden. Damit kann der Pegel des Ausgangssignals des Sensors angehoben und/oder seine Impedanz reduziert werden; beides verringert den Einfluß elektromagnetischer Einstrahlungen auf das Meßsignal. Darüber hinaus kann die weitere Elektronik einfacher ausgelegt werden, weil weniger kritische Anforderungen (beispielsweise im Hinblick auf Rauschen und Drift von Parametern) an sie gestellt werden.
- Wie bei anderen integrierten Bausteinen auch erhöht sich die Zuverlässigkeit des Gesamtsystems bei Verwendung einer mit dem eigentlichen Sensor integrierten Signalverarbeitung, weil insgesamt weniger Komponenten (und vor allem weniger Verbindungsstellen nach außen) zu einem Systemausfall beitragen können.
- Die geringen Dimensionen von Mikrosensoren erlauben es, zusätzliche Sensorelemente, beispielsweise für eine Temperaturkompensation, in unmittelbarer Nähe des eigentlichen Sensors unterbringen zu können.
- Eine mit dem Sensor integrierte Signalkonditionierung ermöglicht eine *Verarbeitung* seines Ausgangssignals, die über eine reine Vorverstärkung weit hinausgehen kann. Es kann sich dabei um die Kompensation von Störeffekten (im allgemeinen um eine Temperaturkompensation) handeln, aber selbst aufwendigere Verarbeitungsschritte wie eine Linearisierung der Sensorkennlinie oder die Bildung des Kehrwertes des gemessenen Signals sind denkbar. (In Anbetracht der Vorteile, die numerische Kalibrierungs- und Datenverarbeitungsverfahren bieten [4], muß dies jedoch nicht in allen Fällen ein zwingendes Argument darstellen.)
- Die beschriebenen Mechanismen erlauben es, die Spezifikationen von im Prinzip einfachen und billigen Sensoren soweit zu verbessern, daß diese vielfach anstelle weit teurerer Standard-Sensoren eingesetzt werden können.

Nicht unerwähnt sollte bleiben, daß Sensoren in Mikrotechnologie dank ihrer kleineren geometrischen Abmessungen in der Regel auch einen geringeren Energieverbrauch aufweisen als „klassische“ Sensoren, was sie wiederum für eine Verwendung in autarken Systemen mit platzbedingt sehr limitierten Energieressourcen prädestiniert.

#### 4. „Klassische“ und Mikrosensoren

Mikrosensoren können entweder durch Anwendung von Mikrotechnologien auf „klassische“ Sensorkonzepte realisiert werden, oder aber auf Konzepten beruhen, die ausschließlich mit mikrotechnologischen Methoden ausgeführt werden können.

So kann beispielsweise das Konzept der „klassischen“ kapazitiven Druckmeßdosen durch mikromechanische Bearbeitung, beispielsweise von Silizium, implementiert werden; Pt100-Temperaturfühler oder Thermoelemente können mit Dünnschichtprozessen hergestellt werden. Durch geeignete Kombinationen von Schichtabscheidungs- und Ätzprozessen können selbst relativ komplexe Strukturen realisiert werden, wie etwa Durchfluß-Meßzellen oder Mehrkammer-Elektroden. Allerdings sind nicht alle „klassischen“ Sensorprinzipien für eine Miniaturisierung geeignet; auch sind ihnen vielfach neuartige Sensorkonzepte von ihren Spezifikationen und/oder ihrem Preis her deutlich überlegen.

Dazu zählen beispielsweise piezoresistive Absolut- oder Differenzdrucksensoren, bei denen eine Temperaturkompensation und eventuell sogar ein Vorverstärker mitintegriert werden können. Weit verbreitet und daher preisgünstig erhältlich sind integrierte

Halbleiter-Temperaturfühler auf Siliziumbasis, die ein vorverstärktes Signal abgeben und ein für viele Anwendungen ausreichend lineares und hinreichend genau kalibriertes Übertragungsmaß aufweisen. Der Ausgangspegel dieser Fühler — typisch 1 mV/K — liegt um etwa zwei Größenordnungen über dem Ausgangspegel von Thermoelementen und ist dementsprechend leichter weiterzuverarbeiten. Erwähnt werden sollten in dieser Gruppe noch Strahlungsdetektoren oder kapazitive Feuchtigkeitsfühler, deren Meßprinzip überhaupt nur durch mikrotechnologische Methoden realisiert werden kann.

## 5. Verfügbarkeit von Mikrosensoren für Umwelt-Monitoring

Für die gebräuchlicheren Umweltparameter ist die Verfügbarkeit kommerzieller mikrotechnologisch hergestellter Sensoren — zum Teil mit integrierter Signalverarbeitungselektronik — heute bereits sehr gut. Vielfach stehen für eine Meßaufgabe sogar mehrere Alternativkonzepte zur Auswahl, sodaß ein für eine gegebene Aufgabenstellung optimaler Sensortyp gewählt werden kann. Zu beachten ist dabei jedoch, daß aus den oben genannten Gründen — Korrosion oder Kontamination — nicht alle Konzepte kommerzieller Mikrosensoren tatsächlich für Umweltmessungen geeignet sind. Vielfach ergeben sich auch Einschränkungen aus dem Umstand, daß Sensoren unter anderen Bedingungen betrieben werden müssen als denen, für die sie ursprünglich entwickelt wurden (beispielsweise in einem unterschiedlichen Temperaturbereich). Dies kann spezielle Maßnahmen für den Einsatz der Sensoren erfordern (zum Beispiel eine aufwendigere Temperaturkompensation), in anderen Fällen aber eine erfolgreiche Verwendung der Mikrosensoren überhaupt verhindern.

Eigenentwicklungen der eigentlichen Sensorelemente sind, soweit dies notwendig und zweckmäßig erscheint, mit den relativ bescheidenen Mitteln einer Universität wohl möglich. Eine *Integration* mit aktiven elektronischen Bauelementen, wie sie für die Realisierung einer monolithisch integrierten Signalkonditionierelektronik erforderlich wäre, übersteigt jedoch wohl auch noch in der ferneren Zukunft die Möglichkeiten (unserer) universitären Labors.

## Literaturverzeichnis

- [1] K. Riedling, W. Ripl, W. Fallmann, W. Frischauf, B. Luger, P. Svasek, W. Winkler: „Langzeit-Registrierung von Umweltparametern“, in: „Mikroelektronik 93, Berichte der Informationstagung ME 93“, ÖVE-Schriftenreihe Nr. 5, Wien 1993, pp. 147 – 152.
- [2] K. Riedling, W. Ripl, W. Fallmann, W. Frischauf, B. Luger, P. Svasek, W. Winkler, „Autonome Datenerfassungs- und Registriereinheiten für Umweltparameter“, Österr. Chemie-Zeitschrift 2/1994, pp. 36 – 40.
- [3] K. Riedling, W. Ripl, W. Fallmann, Ch. Hildmann, B. Luger, P. Svasek, W. Winkler, „Monitoring für die Hydrologie“, in: „Multisensorpraxis“, ed. H. Ahlers, in Vorbereitung.
- [4] K. Riedling, B. Luger, P. Svasek, W. Winkler, „Strategies for the design of systems for the monitoring of environmental parameters“, *Experimental Technique of Physics*, Vol. 40, No. 2, 1994, pp. 151 – 164.