

Roland Werthschützky

Sensor Technologien 2022

AMA Verband für Sensorik und Messtechnik e.V.

The logo for AMA (Verband für Sensorik + Messtechnik) features the letters 'AMA' in a bold, red, sans-serif font. The letters are outlined in white and set against a dark red rectangular background. Below the letters, the text 'Verband für Sensorik + Messtechnik' is written in a smaller, white, sans-serif font.

AMA

Verband für Sensorik + Messtechnik

Innovatoren verbinden

Herausgeber

Prof. Dr. Roland Werthschützky
Technische Universität Darmstadt,
Institut für Elektromechanische Konstruktionen

Autoren

Prof. Dr. Karlheinz Bock
Technische Universität Dresden, Institut für
Aufbau- und Verbindungstechnik der Elektronik

M. Eng. Paul-Gerald Dittrich
SpectroNet – International Collaboration Cluster,
c/o Technologie- und Innovationspark Jena GmbH

Dr. Klaus Ettrich
CiS Forschungsinstitut für Mikrosensorik GmbH

Prof. Dr. Thomas Fröhlich
Technische Universität Ilmenau,
Institut für Prozessmess- und Sensortechnik

Verena Graf
NCTE AG

Dr. Volker Großer
Fraunhofer Institut für Zuverlässigkeit
und Mikrointegration IZM

Dipl.-Ing. Frank Hänschke
Leibniz-Institut für Photonische Technologien

Dr. Hans-Dieter Hartmann
AMA Verband für Sensorik und Messtechnik e.V.

Prof. Dr. Dietrich Hoffmann
SpectroNet – International Collaboration Cluster,
c/o Technologie- und Innovationspark Jena GmbH

Prof. Dr. Klaus-Peter Hofmann
Fraunhofer-Institut für Biomedizinische Technik IBMT

Prof. Dr. Thomas Ortlepp
CiS Forschungsinstitut für Mikrosensorik GmbH

Prof. Dr. Franz Schmidt
Technische Universität Ilmenau,
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik

Prof. Dr. Andreas Schütze
Universität des Saarlandes,
Lehrstuhl für Messtechnik

Dr. C. Thomas Simmons
AMA Verband für Sensorik und Messtechnik e.V.

Dr. Wolfgang Sinn
AMA Verband für Sensorik und Messtechnik e.V.

Dr. Rolf Slatter
Sensitec GmbH

Prof. Dr. Hannes Töpfer
IMMS Institut für Mikroelektronik- und
Mechatronik-Systeme gGmbH

Dr. Guido Tschulena
sgt Sensorberatung Dr. Guido Tschulena

Prof. Dr. Roland Werthschützky
Technische Universität Darmstadt, Institut
für Elektromechanische Konstruktionen

Prof. Dr. Jürgen Wilde
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg,
IMTEK Institut für Mikrosystemtechnik

Dr. Gabriel Zieger
Leibniz-Institut für Photonische Technologien e.V.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	6
Teil A Anforderungen an Sensorik, generelle Entwicklungstrends	9
A 1 Die Sensorindustrie in Deutschland	10
A 2 Globale Herausforderungen an Technologieentwicklungen	13
A 3 Trends der Informationsverarbeitung	15
A 4 Generelle Entwicklungstrends der Sensorik	16
A 5 Typische Sensoranwendungen in ausgewählten Branchen	18
A 6 Vergleich der internationalen Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten	21
Teil B Entwicklungstrends bei Sensoren	25
B 1 Sensorklassifizierung, Bestandsaufnahme, Messgrößen	26
B 1.1 Sensorfunktionsstrukturen	26
B 1.1.1 Sensor als Übertragungssystem	26
B 1.1.2 Sensorstrukturen	27
B 1.2 Ausgewählte Messgrößen	27
B 2 Physikalische Messgrößen	28
B 2.1 Elektromagnetische Messgrößen	28
B 2.1.1 Kontaktlose orts aufgelöste Messung der elektrischen Leitfähigkeit	29
B 2.1.2 Hochempfindliche Magnetometer	30
B 2.1.3 Ultrabreitbandsensoren zur kontaktlosen orts aufgelösten Messung der dielektrischen Eigenschaften	31
B 2.1.4 Magneto-resistive Sensoren	32
B 2.2 Mechanische Messgrößen	36
B 2.2.1 Wandlungsarten	36
B 2.2.2 Bewertung der Wandlungsprinzipien	38
B 2.2.3 Entwicklungsansätze	38
B 2.2.4 Berührungslose Drehmomentsensoren	40
B 2.2.5 Neue Sensor-Anwendungen: Vorausschauende Wartung von Maschinen durch Sensor-basierte Zustandsüberwachung – Condition Monitoring	43
B 2.2.6 Neue Anwendungen: Sensorsystem für Freileitungs-Monitoring	44
B 2.3 Optische Messgrößen	46
B 2.3.1 Photonische Sensoren und Messtechnik	46
B 2.3.2 Pyrometrie – Berührungslose Temperaturmessung	52
B 2.3.3 Neue Anwendungen: Bildauflösende Farbmesssysteme	54
B 3 Chemische und medizinische Messgrößen	56
B 3.1 Sensoren für Gasmessung und Stoffkonzentrationen	56
B 3.1.1 Übersicht, Einteilung	56
B 3.1.2 Bewertung, Probleme, Herausforderungen	57
B 3.1.3 Entwicklungsansätze, Forschungstrends	59
B 3.1.4 Schlussfolgerung, Nutzen	60
B 3.1.5 Neue Anwendungen: Sensorsysteme zur Sicherung einer bedarfsgerechten Lüftung	60
B 3.2 Neue Anwendungen: Medizinische Mikrosensoren und Mikroimplantate	62
B 3.2.1 Neuroprothesen – Implantierbare Assistenzsysteme	63
B 3.2.2 Direkt gekoppelte Sensor-Aktor-Systeme für haptische Bediensysteme	64
B 4 AMA Innovationspreise 2010 bis 2016.....	65
B 4.1 Elektromagnetische Messgrößen	65
B 4.2 Mechanische Messgrößen.....	65
B 4.3 Optische Messgrößen	66
B 4.4 Chemische und medizinische Messgrößen	68

Teil C	Entwicklungstrends der Sensorkomponenten und Fertigungstechnologien	69
C 1	Einleitung	70
C 2	Mikrosystemtechnik – MEMS	73
C 2.1	Einleitung	73
C 2.2	Entwicklung des MEMS-Marktes nach Anwendungen und Zielbranchen	73
C 2.3	Wettbewerber im MEMS-Markt	73
C 2.4	Technologische Entwicklung ausgewählter MEMS-Komponenten	74
C 2.4.1	Allgemeine Herausforderungen	74
C 2.4.2	Drucksensoren	75
C 2.4.3	Inertial Combos	75
C 2.4.4	RF-MEMS	75
C 2.4.5	Gassensoren und Thermopiles	75
C 2.4.6	Aufbau- und Verbindungstechnik	75
C 2.4.7	Weitere ausgewählte MEMS-Entwicklungstrends	76
C 3	Aufbau-, Verbindungs- und Integrationstechnik	77
C 3.1	Aufbau- und Verbindungstechnik	77
C 3.1.1	Einleitung	77
C 3.1.2	Anforderungen, Elemente eines Sensorsystems	77
C 3.1.3	Gehäusetechnologien	78
C 3.2	Integrationstechniken	85
C 3.2.1	Dreidimensionale Schaltungsträger für Mikrosystem-Packaging und MID	85
C 3.2.2	Leiterplattenbasierte Integration	86
C 3.2.3	Waferlevel Systemintegration mittels TSV-Technologie	87
C 3.2.4	Vergleich von Integrationskonzepten	88
C 3.3	Heterointegration mit flexiblem Trägermaterial	89
C 3.3.1	Fortschritte in der Aufbau und Verbindungstechnik	89
C 3.3.2	Herausforderungen	89
C 3.3.3	Entwurf heterointegrierter Foliensysteme	90
C 3.3.4	Stand der Technik in der Industrie	90
C 3.3.5	Entwicklungsbeispiel Transmitter	91
C 3.3.6	Integration in Folienkavitäten	92
C 3.3.7	Ausblick	93
C 3.4	Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) für die Medizintechnik	93
C 4	Sensor-Signalverarbeitung	95
C 4.1	Intelligente Sensoren – Smart Sensors	95
C 4.2	Eingebettete Systeme	96
C 4.2.1	Definition, Aufbau und Verwendung in Sensoranwendungen	96
C 4.2.2	Hardware	97
C 4.2.3	Software	98
C 4.2.4	Aufbau intelligenter Sensoren	100
C 4.2.5	Sensorkonfigurierung – Intelligente Sensoren	100
C 4.2.6	Kommunikationsaspekte	101
C 4.2.7	Sensorvernetzung	102
C 4.2.8	Beispielsystem	104
C 4.2.9	Drahtlose energieautarke Sensorsysteme und -netzwerke	107
C 5	Selbstüberwachung und Störungstoleranz von Sensoren und Aktoren	112
C 5.1	Forderungen aus der Prozesstechnik an Sensoren	112
C 5.1.1	Ziele der Sensor-Selbstüberwachung	112
C 5.1.2	Methoden und Verfahren der Selbstüberwachung bei Sensoren	113
C 5.1.3	Beispiel: Selbstüberwachung magnetischer Sensoren	114
C 5.2	Selbstüberwachende Aktoren	115
C 5.3	Ausblick	116
C 6	Sensorkommunikation und Systemintegration	117

Teil D	Zusammenfassung – Empfehlungen	121
D 1	Sensorik und Messtechnik in Deutschland	122
D 1.1	Sensorfirmen und Sensortechnologien	122
D 1.2	Spezifische Sensor-Technologieentwicklungen	124
D 2	Kooperationen helfen	126
D 3	Firmengründungen aus Forschungsinstituten	126
Teil E	Anhang	129
E 1	AMA Verband für Sensorik und Messtechnik e.V.	130
E 1.1	Der Verband	130
E 1.2	Marketing für die Sensorindustrie	131
E 1.3	Technologie-Unterstützung	132
E 1.4	Wirtschaftliche Bedeutung der Sensorindustrie	132
Die Autoren		134
Literatur- und Quellenangaben		144

Vorwort

Die Studie „Sensor Technologien 2022“ wird vom AMA Verband für Sensorik und Messtechnik e.V. herausgegeben. Sie ist weitgehend von Mitgliedern des AMA Wissenschaftsrats und von innovativen kleinen Firmen als Vertreter der neuen Technologien erarbeitet worden. Die Studie aktualisiert die 2010 erstmalig erschienene AMA-Trendanalyse und ergänzt sie in wesentlichen Punkten.

Die Sensorik zeichnet sich durch ihre enorme Vielfalt aus. Diese findet man in den Messgrößen, in den Sensortechnologien, in den Schnittstellen, in der Verpackung, in den Anwendungen oder in den Sensor-Preisen und eingesetzten Stückzahlen. Dennoch – oder gerade deshalb – ist die Sensortechnik sehr lebendig, es werden immer wieder neue Firmen gegründet, neue Materialien erforscht oder neue Technologien eingesetzt, Sensoren modifiziert und neue Anwendungen gefunden.

Gerade die heute stattfindende Internationalisierung von Märkten und von neuen Technologien erfordert sorgfältige Beobachtungen. Denn diese neuen Trends können zu Chancen oder zu Bedrohungen führen, wie man etwa durch die neuen internetbasierten Entwicklungen gut erkennen kann.

Die Branche der Sensor- und Messtechnik in Deutschland wird überwiegend durch mittelständische Unternehmen geprägt. Über 400 dieser Firmen sind im AMA Verband für Sensorik und Messtechnik e.V. (AMA) organisiert. Sie repräsentieren rund 100.000 Arbeitsplätze, erwirtschaften einen direkten Umsatz von einigen 10 Milliarden Euro und weisen ein starkes Wachstum in Umsatz und Mitarbeiterzahlen auf. Die Sensorik erweist sich als Schlüsseltechnologie für die Konkurrenzfähigkeit von vielen Maschinen, Anlagen und Fahrzeugen, deren Werte letztlich um mehrere Größenordnungen über dem der Sensoren liegen.

Besonders hervorzuheben ist es, dass anspruchsvolle Arbeitsplätze für Facharbeiter und Ingenieure geschaffen werden, nicht nur in der direkten Sensorbranche, sondern auch in den vielen Anwenderbranchen, etwa von Maschinenbau und Robotik, Automobil oder Prozesstechnik.

Für diese Branche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu leisten und die Aus- und Weiterbildung der Fachleute zu ermöglichen liegt im Interesse des AMA - und hier insbesondere dem AMA Wissenschaftsrat, in dem aktuell ca. 70 Institute aktiv sind.

Die Zielgruppe der Studie sind industrielle Entscheidungsträger, Entwickler und Marketingexperten, sie soll aber auch Anregungen zur Gründung von Start-Ups geben. Die vorgestellten Ergebnisse werden sicher auch zu Impulsen für neue Forschungsprojekte führen. Nicht zu vergessen ist aber auch deren Nutzung für die Lehre und Weiterbildung an Universitäten und Hochschulen.

Die vorliegende Studie will einen vorausschauenden Blick in die nahe Sensor-Zukunft geben, der auf kompetentem Expertenwissen beruht. Diese Erfahrungen gilt es zu bündeln und strukturiert darzustellen. Dabei wird nicht Vollständigkeit angestrebt, sondern es werden vor allem die Chancen neuartiger Technologie- und Anwendungsfelder aufgezeigt.

Die Erfahrungen der beteiligten Experten auf dem Gebiet der Sensorik- und Messtechnik, die auf eigenen Lehrveranstaltungen und Weiterbildungsseminaren, eigenständigen Forschungs- und Entwicklungsprojekten und einer Vielzahl von Gesprächen mit industriellen Partnern beruhen, sind hier gesammelt worden.

Es werden auch die globalen gesellschaftlichen Anforderungen an Technologieentwicklungen berücksichtigt. Die aktuellen Trends der sich stürmisch entwickelnden Informations- und Kommunikationstechnik werden einleitend hervorgehoben und deren Einfluss auf die Weiterentwicklung von Sensorik- und Messtechnik berücksichtigt.

Außerdem werden zum anschaulicheren Verständnis der bevorstehenden Entwicklungen einige neuartige Sensoranwendungen beispielhaft zusammengestellt.

Wir wünschen den Lesern dieser Studie möglichst viele Anregungen für ihre zukünftige, spannende und erfolgreiche Tätigkeit auf dem Gebiet der Sensorik- und Messtechnik.


Die vorliegende Studie aktualisiert die bereits 2010 erstmalig erschienene AMA Studie Sensor-Trends 2014.

Berlin, November 2017

AMA Verband für Sensorik und Messtechnik e.V.



Peter Krause
Vorsitzender des Vorstands



Prof. Dr. Stefan Zimmermann
Vorsitzender AMA Wissenschaftsrat



Prof. Dr.-Ing. habil. Roland Wertschützky
Herausgeber

Teil A

Anforderungen an Sensorik,
generelle Entwicklungstrends

A Anforderungen an Sensorik, generelle Entwicklungstrends

A 1 Die Sensorindustrie in Deutschland

Die Sensorindustrie hat sich als eine Schlüsseltechnologie für ein Industrieland wie Deutschland erwiesen. Die internationale Konkurrenzfähigkeit im Maschinenbau, in der Prozesstechnik, im Fahrzeugbau oder bei Hausgeräten hängt von dem Einsatz moderner Sensoren ab.

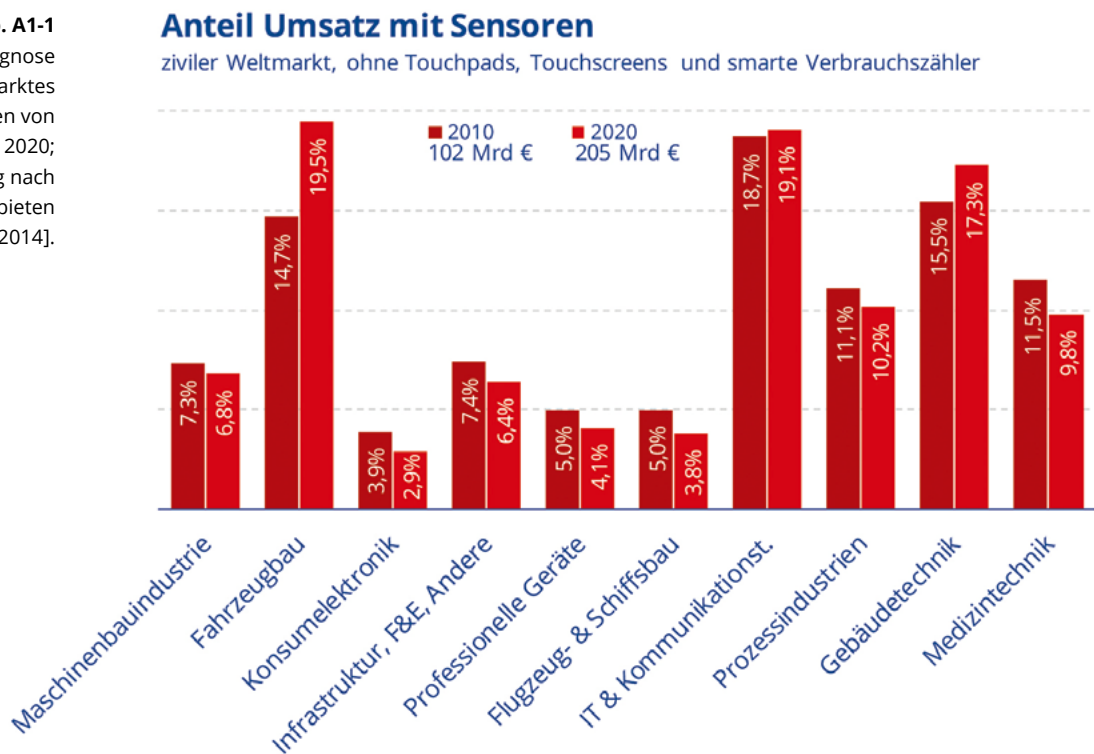
Der Sensor-Weltmarkt wurde 2010 ca. 100 Milliarden \$ geschätzt, mit Wachstumsraten zwischen 5 und über 10 Prozent pro Jahr. Damit wird dieser Sensor-Weltmarkt 2015 auf rund 150 Milliarden \$ steigen und danach weiter bis auf über 200 Milliarden \$ (siehe Abb. A1-1) für 2020 [TSCHE-2015].

Da Sensoren in vielen unterschiedlichen Märkten eingesetzt werden, ist ihr Markt relativ stabil. Er reicht von:

- Automobilelektronik, zu
- Maschinenbau,
- Fahrzeugbau (LKW, Schienenfahrzeuge, Schiffe, Flugzeuge),
- Prozesstechnik,
- Fertigungsautomatisierung,
- Umweltmesstechnik,
- Labormesstechnik,
- Energietechnik,
- Elektrogeräte,
- Sicherheitstechnik,
- Medizintechnik und Prozeßtechnik,
- Gebäudetechnik,
- Konsumgütern (Smart Phones, Tablets, TV, Haushaltsgeräte etc.) und noch viele weitere Verwendungen.

Doch es gibt auch Bedrohungen und Herausforderungen durch neue technische Entwicklungen, insbesondere durch die neuen internetbasierten Technologien, etwa für Konsumanwendungen.

Abb. A1-1
Analyse und Prognose des zivilen Weltmarktes für Sensoren von 2010 bis 2020; Unterteilung nach Anwendungsgebieten [INTE-2014].



Aus der Analyse der Marktanteile in Abb. A1-1 lässt sich erkennen, dass die umsatzmäßig größten Märkte der Fahrzeugbau, Informationstechnik und Gebäudetechnik sind. Dort werden große Stückzahlen zu niedrigen Preisen verlangt, es herrscht grosse, internationale Konkurrenz. Diesen Markt beliefern überwiegend Großunternehmen.

Daneben gibt es noch viele andere Märkte, in denen angepasste höherwertige Sensorik verlangt wird, in mittleren bis kleinen Stückzahlen, mit hoher Präzision und höheren Preisen. Diese Märkte sind die Domäne der eher kleinen und mittelgroßen Firmen, wie wir sie überwiegend im AMA Verband finden. Dies zeigen die Umfrageresultate bei AMA Mitgliedern nach ihren Absatzmärkten. Da dominieren der Maschinenbau und die Prozesstechnik, die Messtechnik, die Automobilindustrie – hier insbesondere für die hochwertigen Fahrzeuge – oder die Medizintechnik, wie in Bild A1-2 gezeigt.

In welche drei Branchen liefert Ihr Unternehmen hauptsächlich?

Januarumfrage AMA-Mitglieder 2017
Pro Befragten max. 3 Nennungen

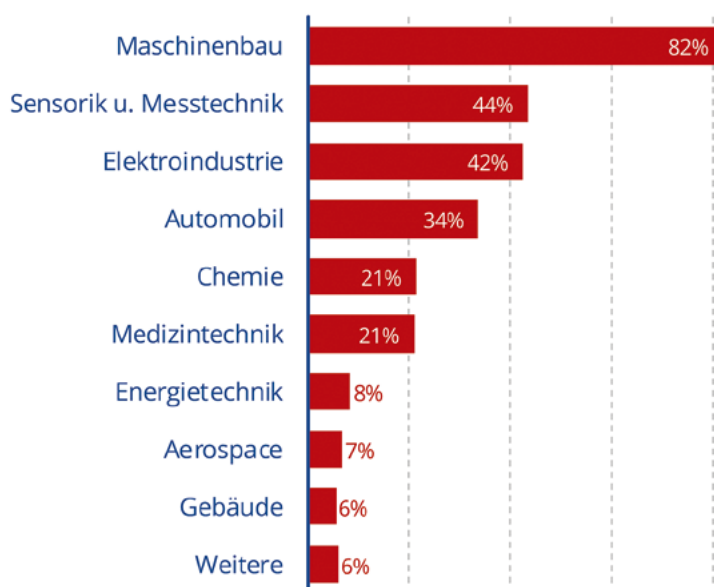


Abb. A1-2

Umfrageresultate bei
AMA Mitgliedern 2017:
In welche drei Branchen
liefert Ihr Unternehmen?

Gerade in diesen Märkten können kleine und mittlere Unternehmen (KMU) extrem viele unterschiedliche Lösungen für die Messaufgaben ihrer Kunden zur Verfügung stellen.

Falls sich neue Aufgaben oder Anforderungen ergeben, können KMU schnell darauf reagieren. Dies ist auch ein Feld in dem Firmenneugründungen mit Erfolg getätigt werden können.

Diese hochspezialisierten Sensorfirmen bieten ihre Produkte oftmals weltweit in ihren Marktsegmenten an. Damit ist die Sensorindustrie ein wesentlicher Faktor für die Beschäftigung von hochqualifizierten Experten in Deutschland.

Der Markt für Sensorik ist sehr inhomogen und stark segmentiert. Es gibt mehr als 100 Messgrößen, für die Sensoren angeboten werden, wie in Abb. A1-3 gezeigt wird.

Wir finden hier Sensoren, den diversen Anwendungsfeldern angepasst, in vielen unterschiedlichen Technologien für die angesprochenen Anwendungsbranchen und Märkte. Auch diese Vielfalt von angepassten Technologien ist eine Stärke der kleineren innovativen Firmen. Eine Übersicht zu den Technologie-Dienstleistungen gibt die Tab. A1-1.

Hier finden sich insbesondere die Miniaturisierungs-Technologien, mit denen größere Stückzahlen hochwertiger Sensoren parallel gefertigt werden können, wie Mikrosystemtechnik, Dünnschichttechnologie, Mikromechanik und mehr. Deshalb werden im Abschnitt C dieses

Berichts einige der wichtigen unterschiedlichen Technologien für die Sensorelemente, für die Datenverarbeitung, für Mikroelektronik-Techniken, für Aufbau und Verbindungstechniken, für die sensornahe Signalverarbeitung, sowie für Kommunikation und Systemintegration beschrieben.

Abb. A1-3
Übersicht über etwa 100 Parameter für die Sensoren auf dem Markt oder in Entwicklung sind [TSCH-1999].

<p>Mechanische Messgrößen an Festkörpern</p> <ul style="list-style-type: none"> - Länge, Distanz - Weg - Dicke - Nähe - Winkel - Neigung - Fläche - Form - Position - Rauigkeit - Bewegung - Geschwindigkeit - Massendurchfluss - Vibration - Beschleunigung - Masse - Gewicht - Druck - Moment - Höhe - Dichte - Drehzahl - Drehmoment - Härte - Elastizitätsmodul - Dehnung <p>Mechanische Messgrößen an Flüssigkeiten und Gasen</p> <ul style="list-style-type: none"> - Strömungsgeschwindigkeit - Durchfluss - Strömungsrichtung - Dichte - Viskosität - Füllstand - Druck - Vakuum - Volumen 	<p>Thermische Messgrößen</p> <ul style="list-style-type: none"> - Temperatur - Wärmestrahlung - Strahlungstemperatur - Wärmekapazität - Wärmeleitung - Thermische Behaglichkeit - Entropie <p>Optische Messgrößen</p> <ul style="list-style-type: none"> - Lichtintensität - Farbe - Licht-Wellenlänge - Brechungsindex - Licht-Polarisation - Leuchtdichte <p>Akustische Messgrößen</p> <ul style="list-style-type: none"> - Schall-Intensität - Schall-Druck - Schall-Frequenz - Schall-Geschwindigkeit - Schall-Polarisation <p>Kernstrahlung</p> <ul style="list-style-type: none"> - Strahlungsfluss - Strahlungstyp - Strahlungsenergie - Strahlungsdosis 	<p>Chemische Messgrößen</p> <ul style="list-style-type: none"> - Konzentration - Zusammensetzung - Reaktionsrate - Molekulargewicht - pH-Wert - Redox-Potential - Feuchte - Wasser-Gehalt - Eis - Staubkonzentration - Partikelgröße - Verunreinigung - Elektrische Leitfähigkeit - Wärmeleitfähigkeit - Ionisationsgrad <p>Magnetische und elektrische Messgrößen</p> <ul style="list-style-type: none"> - Strom - Spannung - Ladung - Frequenz - Phase - Elektrisches Feld - Magnetisches Feld - Elektrische Leistung - Elektrischer Widerstand - Induktivität - Kapazität - Dielektrizitäts-Konstante - Elektrische Polarisation <p>Andere wesentliche Messgrößen</p> <ul style="list-style-type: none"> - Zeit - Frequenz - Anzahl - Pulsdauer
---	---	---

Tab. A1-1
Sensorik-Technologie-Dienstleister, Auftragsfertigung (nach AMA Branchenverzeichnis 2015).

Technologie	Bewertung nach Anzahl
Mikrosystemtechnik	****
Mikrosensorik	****
Aufbau- und Verbindungstechnik, Packaging	****
Dünnschichttechnologie	****
Halbleiter-Technologie	****
DMS-Technologie	****
Mikromechanik, Mikrostrukturierung	***
Integrierte Optik, Mikrooptik	***
Mikroelektronik	***
Feinwerktechnik	***
Mikroaktorik	***
Mikrofluidik	***
CMOS Technologie	**
Keramik-Technologie	**
Hybridtechnologie	**
Mechatronik	**
ASIC	**
Bussysteme	**

**** etwa 30 bis 40 Anbieter
 *** etwa 15 bis 25 Anbieter
 ** 10 bis 15 Anbieter

A 2 Globale Herausforderungen an Technologieentwicklungen

Die Entwicklungen in der Sensorindustrie werden von globalen Faktoren geprägt, die sich wirtschaftlich und politisch auswirken sowie von technologischen Entwicklungen, die unsere Zeit prägen und uns einen Weg in die Zukunft weisen. Solche globalen Änderungen wirken auf technische Fähigkeiten, auf notwendige Transportsysteme, Maschinen und Anlagen und damit auf die Märkte und Entwicklungen generell. Dies wollen wir – soweit möglich und sinnvoll – auf die Sensortechnik und deren Entwicklungen in Deutschland herunter brechen.

An globalen Herausforderungen sind zu nennen:

- Wachstum der Erdbevölkerung. Im Jahre 1960 überstieg sie 3 Milliarden Menschen, im Jahre 2000 die 6 Milliarden, und seit der letzten Studie 2010 die 7 Milliarden Menschen. Zurzeit (2015) wächst die Erdbevölkerung jedes Jahr um rund 80 Millionen, dieses Wachstum soll etwa nach 2040 auf 50 Millionen pro Jahr zurückgehen. Neue Märkte entstehen hier für viele Produkte, Sensoren gehören dazu.
- Mehr Menschen leben in großen Städten, heute mehr als 50 % der Weltbevölkerung. All diese müssen mit vielen Dingen des täglichen Lebens inklusive der Lebensmittel, Wasser, der Energie, Fernsehen und Unterhalteng, „versorgt“ werden. Auch die Entsorgung von Müll, von Abwasser oder der wachsende Verkehr, all dies muss verwaltet und organisiert werden, bei Minimierung des Energieverbrauchs. Diese Aktivitäten nehmen in Zukunft stark zu und sollen in den „Smart Cities“ gipfeln. Hier ergeben sich sehr viele neue Aufgabengebiete für die Sensorik und Messtechnik.
- In unseren Regionen steigt das Alter der Bevölkerung. Dem entsprechend ändern sich die Aktivitäten und Bedürfnisse der Menschen.

An politischen Faktoren sind in Deutschland die europäischen und bundespolitischen Aktionen zu nennen, etwa

- die Gesetzgebung zu den erneuerbaren Energien,
- Hightech-Strategie des Bundesministeriums für Bildung und Forschung [BMBF-2014],
- Aktivitäten der Forschungsorganisationen wie Helmholtz-Institute, Fraunhofer-Institute, Deutsche Forschungsgemeinschaft und mehr.

Auch größere technologische Entwicklungen sind zu beachten, wie

- Aufkommen des Internets vor über einem Jahrzehnt und seiner rasanten Ausbreitung der mobilen Konsumgeräte und von zugehörigen Diensten.
- Industrie 4.0.
- Materialentwicklungen, wie Mikro-Nanotechnik.
- Entwicklung vom Sensor zur intelligenten Systemtechnik, wie in Bild A2-1 gezeigt.

Deutschland nimmt heute weltweit eine Führungsrolle in der Industriesensorik und Aktorik auf der Basis neuartiger Technologien ein. Der Markt wird neben einigen Weltkonzernen vorzugsweise durch mittelständische und kleine Unternehmen geprägt. Das hohe Potential der Ausbildung in Firmen, an Hochschulen und Universitäten sichert perspektivisch den qualifizierten Nachwuchs an hochspezialisierten Facharbeitern und Ingenieuren. Forciert wurde diese Entwicklung durch die umsichtige und langandauernde Förderung durch Bund und Länder.

Mit dem Aktionsplan zur Umsetzung der Hightech-Strategie 2020 [BMBF-2014] verfolgt die Bundesregierung mit zehn Zukunftsprojekten wie Smart Cities, Smart Grid und Smart Factory ambitionierte Ziele (Abb. A2-1). Deutschland soll als Anbieter und Anwender neuer und zukunftsweisender Technologien beispielsweise für die industrielle Produktion zum Leitmarkt positioniert werden. Dazu soll die Zusammenarbeit zwischen Industrie, Hochschulen und Forschungseinrichtungen gestärkt werden. Im Fokus sollen kleine und mittlere Unternehmen sowie Start-Ups stehen.

Die Schwerpunkte der Strategie umfassen sechs prioritäre Zukunftsaufgaben:

- Digitale Wirtschaft und Gesellschaft – Chancen der Digitalisierung für Wohlstand in Deutschland nutzen.
- Nachhaltiges Wirtschaften und damit energie- und ressourcenschonend, umweltverträglich und sozialverträglich produzieren und konsumieren.
- Innovative Arbeitswelt – kreative Ideen und wirtschaftliche Innovationen sind Basis für die moderne Arbeitswelt.
- Gesundes Leben – Forschung für aktives und selbstbestimmtes Leben.
- Intelligente Mobilität – Verkehrsträger arbeiten effizient und leistungsfähig zusammen.
- Zivile Sicherheit – reibungsloses Ineinandergreifen komplexer Systeme und Infrastrukturen, aber auch Schutz der Privatsphäre.

In der industriellen Produktion vollzieht sich ein grundlegender Paradigmenwechsel von einer zentralen zu einer dezentralen, autonomen Steuerung mit dem Ziel einer hochflexiblen Produktion individualisierter, digital „veredelter“ Produkte und Dienste. Klassische Branchengrenzen verschwinden, es entstehen neue, übergreifende Handlungsfelder und Kooperationsformen. Wertschöpfungsprozesse verändern sich, die Arbeitsteilung wird neu organisiert.

Um sich den globalen Herausforderungen stellen zu können, sind verstärkt branchenübergreifende und interdisziplinäre Kooperationen zwischen Wirtschaft und Wissenschaft erforderlich. Dies trifft auch auf den Querschnittsbereich der Informations- und Kommunikationstechnik (IKT), der Sensorik und Messtechnik zu.

Moderne Mikrosysteme – bestehend aus Sensorik und Elektronik – sind inzwischen vernetzt, autark und intelligent und weit mehr als eine Komponente. Sie haben sich zu eigenständigen Knoten in intelligenten Systemen wie Sensornetzwerken entwickelt.

Abb. A2-1
Übersicht der technologischen Trends zu intelligent vernetzten Systemen.



Durch die fortschreitende Miniaturisierung werden damit ständig neue Anwendungsbereiche auf dem Weg zur intelligenten Umgebung (Ambient Intelligence) erschlossen. In Abbildung A2-1 sind die beiden wesentlichen technologischen Trends zusammengefasst dargestellt.

Fazit: All diese gezeigten technologischen Schwerpunkte sind verbunden mit den Schlagworten mehr Digitalisierung, verstärkte Vernetzung und starker Zuwachs an Messstellen durch „Sensoren überall“. Doch diese Sensoren müssen weiterentwickelt und angepasst werden an diese zukünftigen Aufgaben. Dann bieten sich große Chancen.

A 3 Trends der Informationsverarbeitung

Mittlerweile sind mobile Geräte, wie Computer und Handys, so klein und leistungsfähig geworden, dass sie in Kleidung oder tragbare Gegenstände integriert werden können. Die heutigen drahtlosen Kommunikationstechniken erlauben Ad-hoc-Vernetzungen und eine Anbindung an leistungsfähige Rechenanlagen und Datenbanken.

Mit dem Trend zur weiteren Miniaturisierung in der Technik und der steigenden Leistungsfähigkeit kleinster Geräte wird deutlich, dass sich für mobile Nutzer ganz neue Möglichkeiten und Anforderungen an eine Geräteunterstützung ergeben.

Nimmt man den Menschen selbst in den Fokus der Betrachtung, so erkennt man, dass ihn stets ein unsichtbarer, mobiler Informationsraum umgibt. Dieser Raum wird gebildet und aufrecht erhalten durch Interaktion von mobilen Geräten, drahtgebundenen bzw. drahtlosen Netzen und dem Internet, um Informationen zu finden und mit anderen Menschen zu kommunizieren und zusammenzuarbeiten.

Auch bei der „Machine to Machine“ (M2M) – Kommunikation spielt die drahtlose Datenkommunikation von Maschinen, Fahrzeugen, Automaten oder sonstigen Objekten miteinander oder mit einer zentralen Leitstelle eine immer größere Rolle. Im Mittelpunkt für eine Vielzahl von M2M-Applikationen steht der drahtlose Informationsaustausch zur Optimierung von Geschäftsprozessen. Zu den wichtigsten Einsatzgebieten gehören unter anderen Transport und Logistik, Flottenmanagement, Fernüberwachung/-steuerung/-messung, Sicherheitstechnik sowie Gesundheitswesen. Gebäude der Zukunft werden ebenso wie Autos informationstechnisch voll erfasst sein.

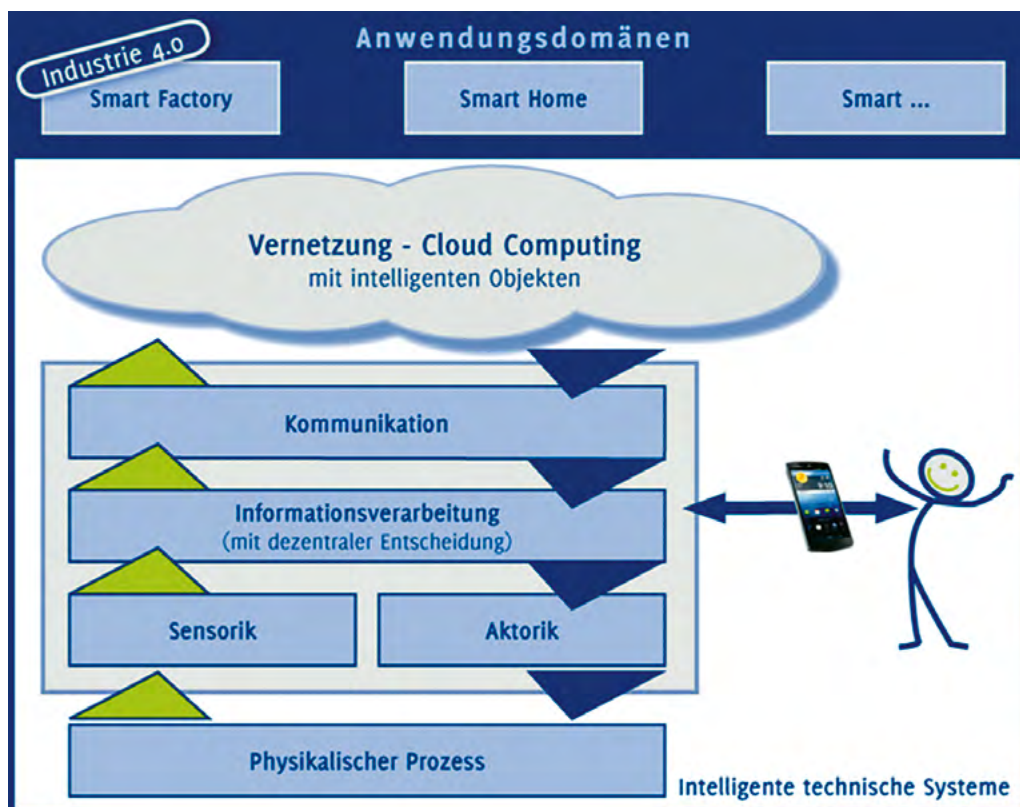


Abb. A3-1
Intelligente technische Systeme als Cyber-Physical Systems (CPS).

Die Existenz von umfangreichen Netzinfrastrukturen, Zugangsmedien, Plattformen, Tools u.a.m. bildet die Basis für ein gewaltiges Marktpotential von integrierten Informationsprodukten. Interaktive und personalisierte Dienste sind entscheidungsorientiert. Dazu werden stets aktuelle und vorausschauende Informationen benötigt. Mit den heute bereits verfügbaren Technologien ist weitaus mehr möglich, als was aktuell in der Breite der Anwendungen umgesetzt wird.

So geht es bei „Industrie 4.0“ vor allem darum, neue Dimensionen in der gesicherten intranetbasierten Erfassung der Umwelt und Interaktion zu erschließen und die Autonomie von Systemen durch zunehmende kognitive Fähigkeiten weiter voranzubringen. Wichtig ist

dabei, die wachsende Dynamik und Komplexität der Prozesse durch intelligente Verfahren, die Überwachung, Analyse, Modellierung, eigenständige Kommunikation und (Selbst-)Steuerung umfassen, zu beherrschen.

Die klassischen Komponenten der Mikrosystemtechnik, die Sensoren und Aktoren, werden heute in großen Stückzahlen gefertigt. Sie bilden die Basis für ein breites Anwendungsspektrum in Elektronik, Mechanik, Optik sowie Biologie und Chemie.

Intelligente technische Systeme als „Cyber-Physical Systems“ (CPS) stehen heute für die Verbindung von physikalischer (realer) und informationstechnischer (virtueller) Welt (Abb. A3-1). Sie entstehen durch ein komplexes Zusammenspiel

- von eingebetteten Systemen (Anwendungssystemen und Infrastrukturen)
- auf Basis ihrer Vernetzung und Integration sowie
- der Mensch-Technik-Interaktion in Anwendungsprozessen.

Wesentliche Komponenten von CPS sind leistungsstarke eingebettete Systeme, die bereits heute als geschlossene Systeme kooperativ und vernetzt agieren. Vor allem in der Automobilbranche, der Luftfahrt und in der Produktion existieren ortsgebundene und zunehmend mobile Sensor-, Regelungs- und Steuerungsdienste. Die Zustands- und Umgebungsbeobachtung sowie das „Gedächtnis“ der digitalen Komponenten, z. B. mit RFID-Technik, werden an Bedeutung gewinnen.

Durch drahtlose Netze und intelligent eingebettete Sensorik sind die Voraussetzungen geschaffen, dass die einzelnen Gerätekomponenten einer Umgebung als Ensemble zusammenhängend und situationsbezogen agieren können. Durch Interaktion, wie Gestik und Sprache, wird die Bedienung von Geräten einfacher. Darüber hinaus sind neue Strategien für die Selbstorganisation von Geräte-Ensembles erforderlich, die eine Anpassung an die jeweiligen Bedürfnisse oder Wünsche der Benutzer ermöglichen.

Die Herausforderung für den zukünftigen Markterfolg wird mehr und mehr in der „Kunst der Vereinfachung“, z. B. als Plug & Play-Fähigkeit zu finden sein.

A 4 Generelle Entwicklungstrends der Sensorik

Eine Vielzahl neuer Anforderungen leiten sich aus den globalen Anforderungen der Technologieentwicklungen für die Sensorik (Kap. A 2) und aus den Trends in der Informationsverarbeitung (Kap. A 3) ab. Um die zunehmende technische Komplexität zu beherrschen, wird sich der „Sensor“ in Richtung „Sensorsystem“ entwickeln. Dabei werden folgende generelle Entwicklungstrends erwartet:

- Zunehmende Funktionsintegration unterschiedlicher Sensorkomponenten einschließlich der analogen und digitalen integrierten Signalverarbeitung (Smart Sensors, Kap. C 4).
- Zunehmend physikalische und chemische Situationserkennung (Sensorfusion, Mustererkennung).
- Vorausschauendes autonomes Handeln des Smart Sensors, z. B. durch Folgeabschätzungen und frühzeitiges Konfigurieren.
- Sensor-Kooperation und Verhalten in globalen Netzen (Multiagentensystem, Gruppenverhalten, geteilte Kontrolle).
- Sensor-Anpassung für die Mensch-Maschine-Interaktion (Interaktionsregeln). Nutzung multimodaler Mensch-Maschine-Schnittstellen wie Sprache und Gesten zur Sensor-Kommunikation und -Steuerung. Umsetzung von Funktionen des Maschinellen Lernens. Dabei stellen sich CPS-Systeme (Kap. C 6) auf die Nutzer, bzw. Situationen ein (Personalisierung).
- Integration von Strategien zur Sensor-Selbstüberwachung und Selbst-Rekonfiguration.
- Strategie der Selbstadaptation, d. h. Sensoren passen sich mit ihrem optimalen Messbereich und Arbeitspunkt an die konkreten Prozessanforderungen selbst an.

- Integration von Sensoren zur Zustandsüberwachung direkt in funktionsbestimmende und besonders kritische Bauteile (Strukturintegration, Kap. B 2.2)

Diese Merkmale kennzeichnen den Übergang der Sensoren zu zunehmend kognitiven Systemen. Abgeleitet vom Cognitive Computing wird man in naher Zukunft auch vom Cognitive Sensor sprechen. Ziel dieses Trends ist die Entlastung des Bedieners von Routineaufgaben und die verstärkte Einführung von Assistenzfunktionen.

Ermöglicht wird diese Entwicklung durch die rasanten Fortschritte bei der Software-Entwicklung und deren hardwaremäßige Umsetzung durch leistungsfähige, höchstintegrierte Rechner- und Speicherschaltkreise.

Daher ist die zukünftige Sicherung einer eng verzahnten Software-, Elektronik- und Sensor-Entwicklung (Kap. C 4, C 6) eine strategisch notwendige Herausforderung für die nationale und europäische Technologieentwicklung.

Die Umsetzung der oben aufgeführten generellen Trends wird zukünftig durch folgende Sensor-Merkmale gekennzeichnet sein:

- Weiterer Ausbau der Anwendungen von MEMS-Sensoren (Kap. C 2).
- Neben mechanischen Größen erfolgt zunehmend auch die Erfassung von chemischen Größen, die Entwicklung von Gassensoren einschließlich des Übergangs zu Multisensoren zur gleichzeitigen Messung von physikalischen, chemischen oder biologischen Größen auf einem Sensorelement (Kap. B 3).
- Nutzung neuartiger physikalischer Messeffekte durch die Anwendung der Mikro-Nano-Integration verbunden mit weiterer Abmessungsreduzierung.
- Verstärkter Einsatz von Sensoren mit berührungslosen Messprinzipien (Kap. B 2).
- Neben der aktuell dominierenden Nutzung des Sensorwerkstoffs Silizium werden sich vor allem bei der Strukturintegration interessante Alternativen durch den Einsatz von Keramik und Polymerfolien ergeben (Kap. C 3).
- Zunehmende Funktionsintegration in der Sensorelektronik: Neben der analogen Signalerfassung zusätzliche digitale Datenverarbeitung und Informationsgewinnung, Trendanalyse, Selbstüberwachung, Selbstadaptation (Kap. C 4 und C 5).
- Direkte Prozesskopplung durch verstärkten Einsatz von Hochtemperatur-Sensorik und berührungslosen Messprinzipien direkt im Prozess.
- Erfassung von flächig oder räumlich verteilten Messdaten, z. B. resistive oder piezoelektrische Sensor-Arrays auf Folien, optische Verfahren, Impedanzspektroskopie und Ultraschallprinzipien.
- Nutzung neuartiger Messprinzipien sowie hochempfindliche magnetische Prinzipien in Dünnschichten, z. B. magnetoresistiver und optischer Messprinzipien auf Basis von Photonenwechselwirkungen.
- Übergang zu drahtlos kommunizierenden Sensoren und Ankopplung an sichere globale Netze (Kap. C 4, C 6).
- Einsatz von energieautarken Sensoren, z. B. durch Energy Harvesting (Kap. C 4).
- Berechnung schwer zugänglicher Messgrößen durch leichter zugängliche oder bereits erfasster Messgrößen auf Basis von reproduzierbaren Systemmodellen als virtuelle Sensoren.
- Stärkere Aufbereitung von verrauschten Signalen durch den Einsatz von anspruchsvollen Schätzfiltern bereits in der integrierten Sensorelektronik.

A 5 Typische Sensoranwendungen in ausgewählten Branchen

Unabhängig von konkreten anwendungsbezogenen Sensormerkmalen werden bei ersten Kontaktgesprächen zwischen Sensoranbietern und Anwendern meistens folgende Grundanforderungen als „selbstverständlich“ vorausgesetzt:

- Sensoren sollen fehlerfrei und mit höchster Genauigkeit – d. h. geringster Messunsicherheit – arbeiten,
- Messwerte sollen in Echtzeit zur Verfügung stehen,
- Sensoren sollen störungsfrei betrieben werden können,
- Wartungsmaßnahmen sollen nicht erforderlich sein,
- Sensoren sollen rückwirkungsfrei messen, d. h. die Messgröße bzw. den Prozess nicht beeinflussen,
- Sensor-Einsatz soll sowohl für Neuanlagen, als auch für Nachrüstungen möglich sein,
- Sensoren sollen einen möglichst geringen Preis aufweisen.

Dabei wird jedoch übersehen, dass deren Umsetzung oftmals physikalisch nicht möglich ist. Außerdem führen solche Ansprüche zu unnötig hohen Sensor-Kosten für den konkreten Anwendungsfall. Unter Berücksichtigung dieser Problematik ist es daher günstiger, die für den Einsatz unbedingt notwendigen Sensor-Kennwerte zu fixieren. Oftmals ist nur eine eingeschränkte Genauigkeit erforderlich, womit andererseits aber auch ein günstiger Preis erzielt werden kann.

In der Tabelle A 5-1 ist eine grobe Bewertung ausgewählter Anforderungen bezüglich ausgewählter Anwendungsfelder

- Konsumelektronik (Smart Phone, Wearables, Tablets etc.),
- PKW-Technik,
- NFZ-Technik (LKW + Schienenfahrzeuge + Schiffe + Flugzeuge),
- Hausgerätetechnik,
- Maschinenbau,
- Prozessautomatisierung,
- Fertigungsautomatisierung,
- Medizintechnik (klinische Anwendungen, Haus- und Freizeitbereich) sowie
- Labormesstechnik

zusammengestellt. Hier soll gezeigt werden, dass die erforderlichen Sensor-Kennwerte je nach Anwendungsbereich stark variieren können. Damit korreliert natürlich auch der Sensorpreis.

Unabhängig von der geforderten Messunsicherheit stehen bei allen Sensor-Anwendungen die mechanische und elektrische Stabilität sowie die Zuverlässigkeit im Vordergrund. Dazu zählt auch ausreichende Robustheit gegenüber den Umgebungsstörgrößen, meistens Temperaturänderungen, Schwingungs- und Feuchtigkeitseinfluss.

Insbesondere in der Medizintechnik treten schwierige Messbedingungen auf und es sind spezielle Anforderungen zu berücksichtigen [HOF-2014]. Daraus folgt, dass das Sensor-Packaging quer über die Anwendungsbereiche eine zentrale Bedeutung aufweist. Leider steht dieser Aspekt bei aktuell geförderten Forschungs- und Entwicklungsthemen oftmals im Hintergrund. Außerdem muss man berücksichtigen, dass die jeweiligen Anwendungsbereiche unterschiedliche standardisierte Prozess- und Signalschnittstellen aufweisen. Die Prozessschnittstellen kennzeichnen dabei den oftmals standardisierten mechanischen Anschluss der Sensoren an die Messgrößen. Sie sind besonders in der Prozessmesstechnik ausgeprägt. Die elektrischen Schnittstellen umfassen entweder die standardisierte analoge Schnittstelle, z. B. (4 bis 20) mA, oder zunehmend die digitalen Schnittstellen, z. B. Feldbus-Schnittstellen (CAN-Bus, HART-Protokoll, Profibus, bzw. Field-Bus, Kap. C 4).

Anforderungen	Anwendung									
	Konsumelektronik	PKW-Technik	NFZ-Technik	Hausrätetechnik	Maschinenbau	Prozessautomatisierung	Fertigungsautomatisierung	Medizintechnik	Labormesstechnik	
Kennwerte										
Hohe Messsicherheit	0	0	*	0	**	***	*	0	***	
Großer Arbeitsfrequenzbereich (Echtzeit)	**	**	**	0	***	***	*	0	***	
Hohe Langzeitstabilität	0	*	*	0	**	***	*	**	***	
Hoher Temperatureinsatzbereich	0	*	*	0	**	**	0	0	***	
Applikationsmerkmale										
Geringes Bauvolumen	***	***	*	***	*	0	*	***	0	
Direkte Prozesskopplung	*	*	*	0	**	***	0	***	0	
Standardisierte Prozessschnittstellen (Sensoreingang)	**	0	0	-	*	***	*	-	0	
Standardisierte elektr. Schnittstellen (Sensorausgang)	**	**	**	*	**	***	***	**	*	
Geringer Energiebedarf	***	**	*	*	*	0	0	***	0	
Funktionsmerkmale										
Explosionsschutz	0	0	0	0	0	***	0	0	0	
Bauartenzulassung (eichfähig)	0	0	0	0	**	***	0	0	0	
Sensorselbstüberwachung	**	**	**	*	**	***	**	*	0	
Hohe Zuverlässigkeit	*	**	**	*	**	***	**	**	**	
Geringer Wartungsbedarf	*	-	-	-	*	***	*	-	*	
Preis	***	***	**	***	**	*	**	*	0	

Tab. A5-1

Grobe qualitative Bewertung der Sensor-Anforderung bezüglich der unterschiedlichen Anwendungsbereiche.

*** sehr wichtig
 ** wichtig
 * vorteilhaft
 0 unerheblich
 - entfällt

Ein weiteres sehr wichtiges Merkmal ist die Gewährleistung von speziellen Schutzanforderungen durch die Sensoren. Hierzu zählen je nach Anwendungsfall konkrete Anforderungen an

- Klimabeanspruchung,
- Schwingungs- und Stoßbeanspruchung,
- Schutz gegenüber äußeren Beanspruchungen, z. B. Fremdkörperschutz,
- Explosionsschutz sowie
- Schutz gegenüber elektromagnetischen Feldern.

Die Gewährleistung dieser Anforderungen wird den Sensor-Herstellern durch internationale Zulassungen bestätigt.

Die Sicherung der für den konkreten Anwendungsfall erforderlichen Schutzanforderungen stellt im Rahmen der Sensor-Entwicklung einen wesentlichen Zeit und Kostenfaktor dar. Im Rahmen der Lasten- bzw. Pflichtenhefterstellung sind die hierzu erforderlichen Zielstellungen fest einzuplanen. Die erforderlichen Aktivitäten zur Umsetzung müssen bereits zu Entwicklungsbeginn berücksichtigt werden. Ansonsten sind sehr teure und meistens nicht ausreichende Nachentwicklungen erforderlich.

Mit der Umsetzung des im Kapitel A 2 bereits erwähnten Zukunftsprojektes Industrie 4.0 (s. Kap. C 6) ergeben sich zusätzliche Herausforderungen. Unabhängig von den Anwendungsbereichen werden Sensoren mit deutlich erweitertem Funktionsumfang gefordert. Damit wird sich ein breiter Übergang zu Smart Sensors nicht nur in der Prozessmesstechnik, sondern auch in den anderen Anwendungsfeldern, wie Maschinenbau, Fahrzeug- und Medizintechnik, vollziehen.

Erstmals wurde 1984 von der Firma Honeywell ein sogenannter intelligenter Sensor (Smart Sensor-ST300) als kompakter Messumformer für die Prozessmesstechnik vorgestellt [BRA-1984]. Nach der primären analogen Signalaufbereitung erfolgte die erweiterte digitale Verarbeitung in der integrierten Sensorelektronik.

Damit konnte eine erweiterte Korrektur der systematischen Temperatur- und statischen Druckmessfehler auf Basis eines Silizium-Multimesselementes gesichert werden. Dieser Lösungsansatz, verbunden mit zusätzlichen Funktionen wie Trendanalyse, Selbstüberwachung und Selbstadaption, wird als Standard auch für kostengünstigere Sensoren für alle Anwendungsbereiche gefordert.

Darüber hinaus stehen für diese neue Generation von Sensoren (Sensor 4.0) folgende zentrale Anforderungen im Fokus:

- Sicherung einer erweiterten Funktionalität der Sensoren durch integrierte Datenauswertung und Datenspeicherung. Der Sensor liefert nicht nur in Echtzeit Daten, sondern bereits verarbeitete Informationen.
- Zunehmende Vernetzung der Sensoren durch offene, globale Netze, sowohl drahtlos als auch drahtgebunden.
- Drahtlose Einbettung der Sensoren durch weltweit verfügbare Daten und Dienste in die Welt der Cyber-Physical Systems (CPS, Kap. A 2, C 6).
- Gewährleistung eines hohen Sicherheitsstandards. Mit der globalen Vernetzung wird Security zu einem dominanten Thema.
- Weitere Herausforderungen stehen mit den Themen weltweite Standardisierung, Low Power, Energy Harvesting (Kap. C 4) und Low Cost an.

Für die Sensor-Entwickler und -Produzenten geht es daher darum, die Digitalisierung der Umwelt als Herausforderung, aber auch als Chance wahrzunehmen.

A 6 Vergleich der internationalen Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten

Bei der Entwicklung von Unternehmensstrategien ist das Antizipieren kommender Technologie- und Marktentwicklungen sehr nützlich. Obwohl unter Ökonomen und Innovationsforschern kein genereller Konsens über die quantitative Interpretation von Patentstatistiken besteht, bieten sie dennoch wertvolle Hinweise auf die relative Wichtung von Forschung und Entwicklung (F&E)-Schwerpunkten, und somit auch über kurz- bis mittelfristig zu erwartende anbieterseitige technologische Veränderungen auf dem Markt.

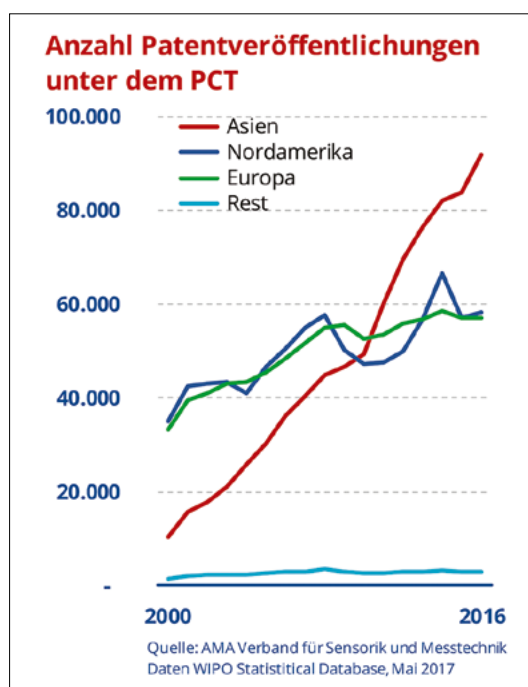


Abb. A6-1

Herkunft internationaler Patentveröffentlichungen unter dem PCT, summiert über alle Technologien.

Bei manchen Größen sind Korrelationen leicht zu erkennen und zu interpretieren. So wuchs z. B. zwischen 2000 und 2016 die jährliche Anzahl internationaler Patentveröffentlichungen unter dem Patent Collaboration Treaty (PCT) um 164 Prozent, von rund 80.000 auf rund 210.000 Patentveröffentlichungen pro Jahr. Der Teil dieser Veröffentlichungen mit Ursprung aus Europa oder Nordamerika stieg während dieses Zeitraums zusammen um ungefähr 70 Prozent, und die Anzahl aus Asien um rund 800 Prozent. Die unterschiedliche Entwicklung der Regionen korreliert mit der beeindruckenden Entwicklung und Marktpräsenz koreanischer und chinesischer Technologieanbieter. Nach einem Anteil Patentveröffentlichungen von global 12 Prozent durch asiatische Anmelder im Jahr 2000 ist er bis zum Jahr 2016 auf 44 Prozent angewachsen – eine plausible Reflektion der weltweiten technologischen und wirtschaftlichen Bedeutung dieser Region, vergleiche dazu Abbildung A6-1.

Rang	Jahr 2000	Anzahl Veröffentlichungen
1	Biotechnologie	5.692
2	Medizintechnik	4.997
3	Organische Feinchemie	4.474
4	Computertechnik	4.364
5	Pharmazie	3.808

Tab. A6-1

Die Top 5 Patentgebiete weltweit im Jahr 2000 [WIPO-2017].

Eindeutige quantitative Rückschlüsse aus der Häufigkeit des Gegenstands von Patenten zu ziehen ist sehr schwierig, hängen diese doch oft auch von politischen Vorgaben ab. Dennoch ermöglichen sie vergleichende qualitative Aussagen über Gegenstand und Stellenwert von F&E-Themen.

Zu diesem Zweck zeigen Tabelle A6-1 und Tabelle A6-2 je eine Top 5 Rangliste der internationalen Patentveröffentlichungen aus den Jahren 2000 und 2016, gruppiert nach Technologie-Gebiet und sortiert nach Häufigkeit. Unter den fünf am häufigsten patentierten Technologiegebieten weltweit im Jahr 2000 sind die Gebiete der Bio-, Medizin-, Chemie- und Pharmatechnik sowie der Computertechnologie.

Bis auf die Medizintechnik wurden seitdem diese Themen durch neue Themen verdrängt. Diese neu hinzugekommenen Spitzenreiter waren in 2016 digitale Kommunikationstechnik, elektrische Maschinen und Geräte, sowie Messtechnik. So liegt seit 2013 die Anzahl internationaler Patentveröffentlichungen auf dem Gebiet der Mess- und Prüftechnik über der auf dem Gebiet der Pharmatechnik.

Tab. A6-2
Die Top 5 Patentgebiete weltweit im Jahr 2014 [WIPO-2017].

Rang	Jahr 2014	Anzahl Veröffentlichungen
1	Computertechnik	17.778
2	Digitale Kommunikation	17.158
3	Elektrische Maschinen, Geräte, Energie	14.470
4	Medizintechnik	14.268
5	Messung	9.339

Abb. A6-2
Rangfolge der global am häufigsten vorkommen- den Themen innerhalb von "Messen; Prüfen"; in 2000 und 2016.

Eine weitere Differenzierung der internationalen Patentveröffentlichungen ist möglich innerhalb der Unterthemen der Mess- und Prüftechnik. Dazu vergleicht Abbildung A6-2 die Anzahl veröffentlichter Patente im Jahr 2000 mit der des Jahres 2016, sortiert nach Häufigkeit der Veröffentlichungen. Mit großem Abstand am häufigsten kommt Technik zur Messung von Materialeigenschaften vor. Dies schließt alle Aggregatzustände ein, d.h. fest, flüssig und gasförmig. Offensichtlich versprechen sich die Akteure bei diesen Größen viel unerschlossenes Potenzial in der Mess- und Prüftechnik. Mittelfristig sind also insbesondere auf dem Gebiet des Messens von Materialeigenschaften weiterhin viel technischer Fortschritt und Bewegung am Markt zu erwarten.



Deutlich zu sehen ist, dass die Technologie auf diesem Gebiet noch nicht die Reife der Technologien anderer Gebiete erreicht hat. Somit sind hier sowohl technologische als auch marktmäßige Bewegung zu erwarten.

Die Regionen bewerten nicht alle Technologien gleich, zu sehen als Verschiebung in den Gewichtungen der Technologien und Messgrößen. Tabelle A6-3 fasst dies für die Regionen Europa, Nordamerika, und Asien zusammen. Besonders augenfällig ist dies bei den

geophysikalischen Messgrößen, die in Nordamerika mit Rang zwei eine sehr starke Gewichtung genießen, wohingegen sie in Asien nur Rang 12 belegen. Dies kann man verstehen als Folge von Explorationsaktivitäten zur Entdeckung und neuartiger Bergung natürlicher Ressourcen wie Erdöl und -gas durch nordamerikanische Unternehmen.

Rang				Messtechnik-Unterkategorie
Asien	Europa	Nordamerika	Weltweit	
1	1	1	1	Analyse/Untersuchung von Stoffen bezgl. chemischer physikalischer Eigenschaften
2	3	2	2	Messen elektrischer und magnetischer Größen
3	4	3	3	Funkpeilung, Funknavigationssysteme, Bestimmung Entfernung/Geschwindigkeit mittels Funkwellen, Orten/Ermitteln der Anwesenheit mittels Reflektion/Wiederausstrahlung von Funkwellen; vergleichbare Anordnungen mit anderen Wellen
4	6	4	5	Messen von Länge, Dicke o.ä. linearer Abmessungen; Messen von Winkeln und Flächen, Unregelmäßigkeiten an Oberflächen / Umrissen
4	5	5	4	Messen von Entfernungen, Höhen, Neigungen oder Richtungen; Geodäsie; Navigation; Kreiselgeräte; Fotogrammetrie oder Videogrammetrie
6	2	10	12	Geophysik; Gravitationsmessungen; Aufspüren von Massen oder Gegenständen; Objektmarkierungen

Tab. A6-3

Ranking der häufigsten Themen innerhalb des Gebiets Mess- und Prüftechnik in 2016. Aufgeschlüsselt nach Global, Asien, Europa, Nordamerika

Quelle: AMA Verband für Sensorik und Messtechnik e.V. / WIPO Statistical Database, Mai 2017

Schließlich zeigen die Abbildungen A6-3 und A6-4, wie sich die Anzahl der Veröffentlichungen unter dem PCT zu thermischen und mechanischen Messgrößen zwischen 2000 und 2016 entwickelt hat. Die genaueren Inhalte sind:

G01K: Messen der Temperatur, Wärmemengen, Temperaturfühler die nicht anderweitig vorgesehen sind (z. B. nicht berührend).

G01L: Messen von Kraft, mechanischer Spannung, Drehmoment, Arbeit, mechanischer Leistung, mechanischem Wirkungsgrad oder des Drucks von Flüssigkeiten

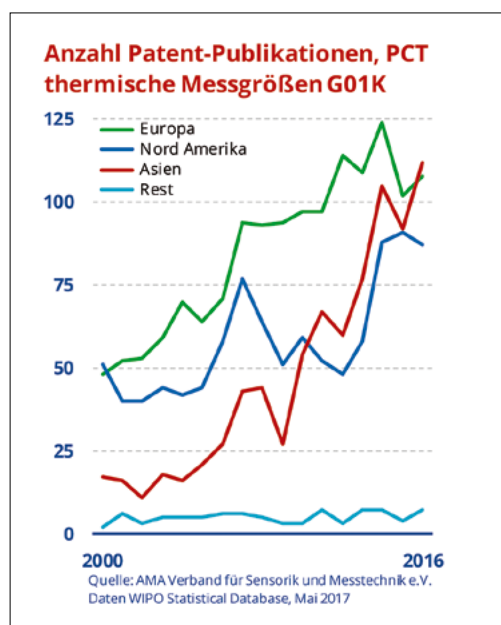


Abb. A6-3
Zeitliche Entwicklung der Anzahl Publikationen unter dem PCT mit Gegenstand G01K [WIPO-2017].

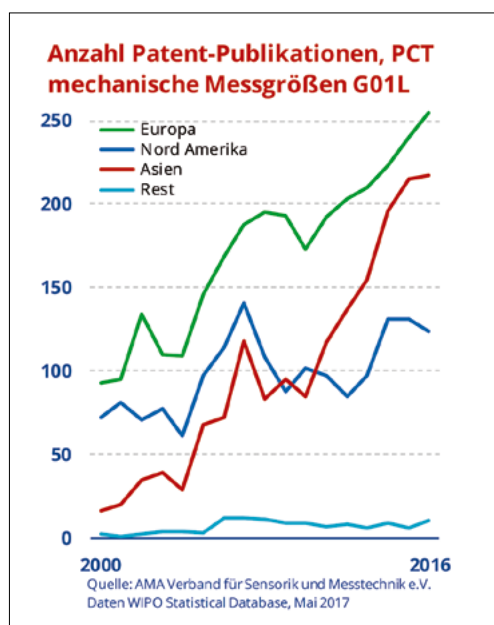


Abb. A6-4
Zeitliche Entwicklung der Anzahl Publikationen unter dem PCT mit Gegenstand G01L [WIPO-2017].

Die Grafiken belegen, dass Europa bei beiden Themen die weltweit produktivste Region ist. Dies ist ein Indiz dafür, dass eine europäische Technologieführerschaft für diese Messgrößen besteht.

Teil B

Entwicklungstrends
bei Sensoren

B Entwicklungstrends bei Sensoren

B 1 Sensorklassifizierung, Bestandsaufnahme, Messgrößen

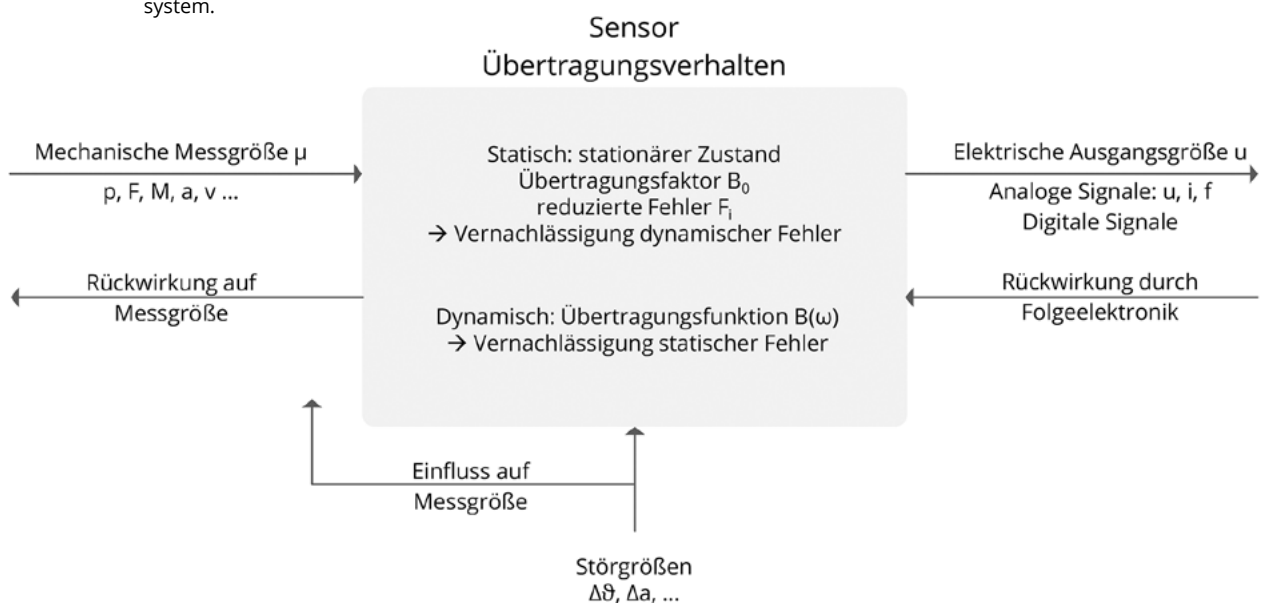
Der Begriff „Sensor“ ist in den letzten Jahren stark im Wandel. Wurden zunächst nur einfache Messelemente als Sensoren bezeichnet, so sind es heute zunehmend Messgeräte in unterschiedlichen Ausbaustufen. Die bisherigen Begriffe wie Wandler, Aufnehmer, Transducer, Transmitter, Messgerät werden daher in dieser Analyse insgesamt durch „Sensor“ ersetzt. Dabei ist es natürlich wichtig zu beachten, dass der „Sensor“ unterschiedliche Integrationsgrade und Funktionsumfänge aufweist.

B 1.1 Sensorfunktionsstrukturen

B 1.1.1 Sensor als Übertragungssystem

Zur Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Messgröße $\mu(t)$, elektrischer Ausgangsgröße $u(t)$ und die auf die Signalkette im Sensor wirkenden Störgrößen, lässt sich ein Sensor unabhängig von seinem gerätetechnischen Aufbau als Übertragungssystem betrachten, wie in Abbildung B1.1 dargestellt.

Abb. B1-1
Sensor als Übertragungssystem.



Der Zusammenhang zwischen der elektrischen Ausgangsgröße $u(t)$ des Sensors und der Messgröße $\mu(t)$ wird für den statischen Messfall durch den Übertragungsfaktor, bzw. die Empfindlichkeit B_0 und die auf das Nennausgangssignal bezogenen reduzierten statischen Fehler F_i beschrieben. Die absoluten Fehler werden in der messtechnischen Praxis vorzugsweise als Abweichungen von der statischen Sollkennlinie des Sensors bezeichnet. Die Abweichungen können systematischen oder zufälligen Charakter aufweisen. Die zufälligen Abweichungen (Reproduzierbarkeiten), bestimmen wegen ihrer Nichtkompensierbarkeit die Genauigkeit (d. h. die Messunsicherheit nach DIN V ENV 13005) des Sensors.

Im dynamischen Messfall wird das Übertragungsverhalten durch die zeit- bzw. frequenzabhängige Übertragungsfunktion $B(\omega)$ beschrieben. Dabei werden bei der experimentellen Fehlerermittlung meist die statischen Abweichungen vernachlässigt. Diese Annahme ist gerechtfertigt, da die dynamischen Abweichungen deutlich größer sind.

B 1.1.2 Sensorstrukturen

In Abhängigkeit vom Integrationsgrad der Elektronik lassen sich drei grundlegende Sensor-Signalverarbeitungsstrukturen unterscheiden (Abb. B1-2):

Das Sensorelement nimmt den eigentlichen Messwert auf und ist durch das physikalische Wandlungsprinzip gekennzeichnet. Es erfolgt die analoge Wandlung der Messgröße in eine elektrisch verwertbare Zwischengröße, z. B. Widerstands- (Δ_R), Kapazitäts- (Δ_C), Induktivitäts- (Δ_L), Frequenz- (Δ_f) oder Ladungsänderung (Δ_Q).

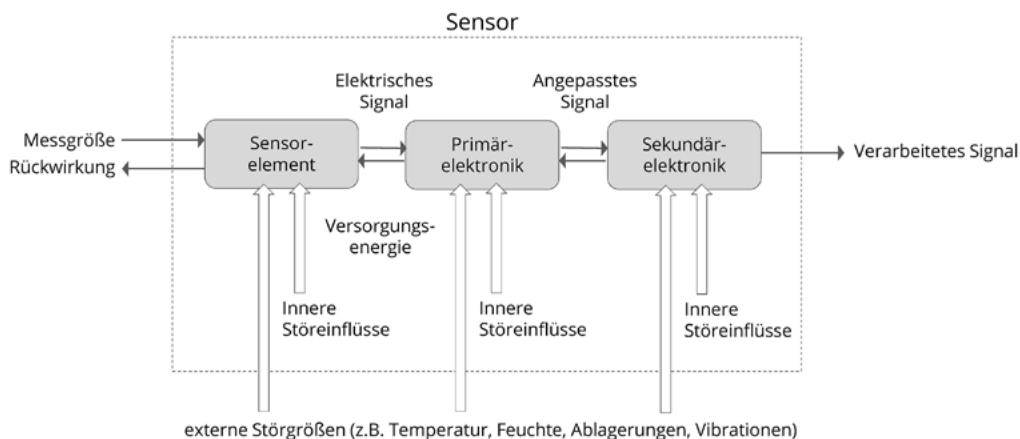


Abb. B1-2
Funktionsblöcke eines Sensors.

Die Primärelektronik übernimmt die Wandlung der Zwischengrößen in ein störsicheres und an einen folgenden ADC angepasstes analoges elektrisches Ausgangssignal, z. B. Spannung $u(t)$ oder Strom $i(t)$. In der Sekundärelektronik erfolgt zunächst durch angepasste Analog-Digital-Converter (ADC) die Wandlung in ein digitales Signal $u^*(t)$. Durch hochintegrierte Schaltkreise, wie Mikrokontroller oder festprogrammierbare Schaltkreise (PLD) erfolgt die jetzt mögliche erweiterte digitale Signalverarbeitung, z. B. Fehlerkorrektur, Filterung, Selbstadaptation, Selbstüberwachung.

Bedingt durch die nun üblichen Integrationsmöglichkeiten werden diese drei Basiskomponenten zusammen als „Sensor“ bezeichnet, manchmal auch noch als „Sensorsystem“. Zu letzterem Begriff ist festzustellen, dass er kontextabhängig und immer mehr auch für Zusammenschlüsse der vorgenannten „Sensoren“ für die Erfassung unterschiedlicher Messwerte, wie z. B. zur Zustandsüberwachung (Condition Monitoring) verwendet wird.

B 1.2 Ausgewählte Messgrößen

Im Folgenden werden für einige ausgewählte Messgrößen der Stand der Technik, Innovationen der letzten Jahre und interessante Entwicklungsansätze, mit ihren potentiellen Vorteilen und bisher schon realisierten und möglichen weiteren Anwendungen beschrieben.

All dies erfolgt beispielhaft aus dem Erfahrungsschatz der beteiligten Institute und Partner im AMA Wissenschaftsrat und einiger beteiligter Sensorfirmen. Im Einzelnen kommen zur Sprache:

- Physikalische Messgrößen
 - Elektromagnetische Messgrößen
 - Mechanische Messgrößen
 - Optische Messgrößen, Pyrometrie
- Chemische und medizinische Messgrößen

An Beispielen wird aufgezeigt, wie sich völlig neuartige Anforderungen und Einsatzgebiete für Sensoren ergeben. Dazu ist in der Regel eine komplexe Kombination von innovativen

Sensoren, Steuerung, Miniaturisierung der Komponenten und Integration (Abb. B1-2) notwendig. Diese und weitere Innovationen werden den jeweiligen Messgrößen-Kapiteln zugeordnet:

- Magnetoresistive Sensoren, kontaktlose orts aufgelöste Messung der elektrischen Leitfähigkeit, hochempfindliche Magnetometer, Ultrabreitbandsensoren zur kontaktlosen orts aufgelösten Messung der dielektrischen Eigenschaften in Kapitel B 2.1, Elektromagnetische Messgrößen.
- Vorausschauende Wartung (Condition Monitoring) und Sensorsysteme für Freileitungs-Monitoring in Kapitel B 2.2, Mechanische Messgrößen.
- Pyrometrie – berührungslose Temperaturmessung und Bildauflösende Farbmesssysteme in Kapitel B 2.3, Optische Messgrößen.
- Bedarfsgerechte Lüftungssteuerung zu Kapitel B 3.1, Chemische Messgrößen und Medizinische Mikrosensoren in Kapitel B 3.2, Medizinische Messgrößen.

Die Sensorik ist eine kontinuierliche Quelle von Innovationen, die meist aus einer Zusammenarbeit zwischen Hochschulen und Industrie hervorgehen und dann auch häufig zu Ausgründung neuer Firmen führen. Dies zeigt sich besonders in Projekten, die den vom AMA-Wissenschaftsrat ausgerufenen jährlichen Innovationspreis auf der Messe SENSOR + TEST betreffen. Geordnet nach den untersuchten Messgrößen sind die Innovationspreise der Jahre 2010 bis 2016 im Kapitel B 4 zusammengefasst:

Elektromagnetische Messgrößen

- Hochintegriertes Hall-Sensor ASIC für energieautarke Absolut-Drehgeber

Mechanische Messgrößen

- Magnetische, pflanzenbasierte ZIM-Druckmesssonde

Optische Messgrößen

- Nerven aus Glas: Faseroptische Positionierung von Herzkathetern
- Ultragenaue Frequenzmessungen mit kristallinen Halbleiterspiegeln
- TWI –schnelle und flexible Asphären- und Freiformflächenvermessung
- Optisches Mikrofon ohne Membran
- 3D-Raster-Laservibrometer-Mikroskop
- HoloTop und HoloFlash – 3D-Sensoren mit Mehrwellenlängen-Holografie

Chemische- und medizinische Messgrößen

- Magnetische Durchflußzytometrie
- Im-Ohr-Sensorsystem für Vitalparametermessungen.

B 2 Physikalische Messgrößen

B 2.1 Elektromagnetische Messgrößen

Hier eingesetzte Sensoren sind empfindlich für die elektrische Feldstärke E , magnetische Feldstärke H , magnetische Flussdichte B sowie die charakteristischen Materialparameter für die Wechselwirkung im elektrischen bzw. magnetischen Feld (ϵ), (μ) und für die spezifische Leitfähigkeit σ . Aus den Feldgrößen lassen sich die elektrischen Messgrößen Strom und Spannung ableiten.

Darüber hinaus gehören in diese Klasse auch Sensoren für elektromagnetische Wellen, wobei nach üblicher Konvention die Frequenzbereiche des sichtbaren Lichts in den Bereich der optischen und photonischen Sensorik und Messtechnik fällt, die in Kapitel B 2.3 separat behandelt wird.

Eine wichtige Klasse von Sensoren sind Magnetometer. Sie dienen zur Messung magnetischer Größen. Sofern sie für punktuelle Messungen geeignet sind, erfassen sie vorzugsweise den Betrag oder die Komponenten des Vektors der magnetischen Flussdichte. Der Stand der Technik wird durch Hallensoren sowie magnetoresistive Sensoren geprägt [HER-2013].

Für hohe Genauigkeiten sind Fluxgate-Sensoren gut eingeführt und weit verbreitet. Bedeu-

tung erlangen Magnetfeldsensoren durch ihre Anwendung in der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung, bzw. der Qualitätskontrolle.

Verfügen Magnetometer über sehr hohe Empfindlichkeit, können sie nicht nur in den genannten Einsatzfeldern hoch performant sein, sondern auch in der klinischen Diagnostik oder der Geoprospektion interessante Anwendungsfelder eröffnen.

B 2.1.1 Kontaktlose orts aufgelöste Messung der elektrischen Leitfähigkeit

Die Wirbelstromprüfung (engl. Eddy Current Testing) dient bei elektrisch leitfähigen Materialien zum Auffinden von Inhomogenitäten oder Defekten in Werkstoffen. Die Messgröße ist dabei vorzugsweise die elektrische Leitfähigkeit σ , bei ferromagnetischen Materialien auch die Permeabilität μ bzw. die räumliche Variation dieser Parameter.

Das Verfahren arbeitet berührungsfrei und beruht darauf, dass eine mit Wechselstrom betriebene Spule ein sich zeitlich änderndes Magnetfeld im Inneren des zu untersuchenden Werkstücks induziert.

Dies führt zur Entstehung von Wirbelströmen, die wiederum ein entgegen gerichtetes Magnetfeld bewirken. Sobald der Wirbelstrom im Prüfkörper eine Region mit einer Beschädigung durchfließt, verändert sich die Größe des mit ihm verbundenen Magnetfeldes. Aus dessen Verteilung können im Ergebnis Rückschlüsse auf die innere Struktur des verwendeten Materials gezogen werden. Neben der Feststellung von Rissen wird die Wirbelstromprüfung auch zur Bestimmung von (nicht leitenden) Schichtdicken genutzt.

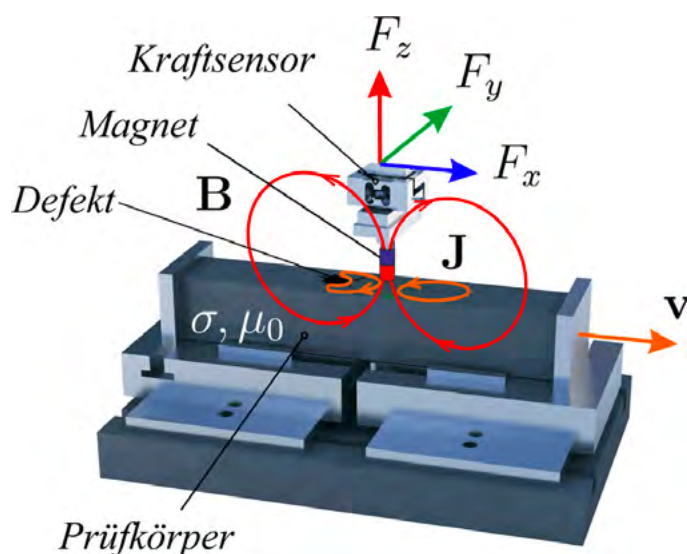


Abb. B2.1-1
Prinzipdarstellung der
Lorentzkraft-
Wirbelstromprüfung.

Eine charakteristische Eigenschaft der induzierten Wirbelströme ist, dass sie nur in eine bestimmte Tiefe des Materials einzudringen vermögen. Diese Eindringtiefe ist abhängig von der elektrischen Leitfähigkeit und der magnetischen Permeabilität des Leitermaterials, wird jedoch vor allem durch die Frequenz des Erregerstromes in der Sendespule bestimmt.

Höhere Frequenzen führen dabei zu geringerem Eindringen. Andererseits ist bei geringen Frequenzen eine Abnahme der Ortsauflösung zu verzeichnen. Insofern ist bei Verwendung des traditionellen Wirbelstromprinzips eine Identifikation tiefliegender Defekte in Leitermaterialien erschwert, bzw. unmöglich. Damit wird die Wirbelstromprüfung als oberflächenorientiertes Prüfverfahren eher zur Detektion von Rissen an der Oberfläche oder nahe der Oberfläche eingesetzt. Diese innewohnende Beschränkung kann mittels einer neuartigen Erweiterung des Verfahrens verringert werden.

In der sogenannten Lorentzkraft-Wirbelstromprüfung werden die Wirbelströme in einem elektrisch leitenden Prüfkörper infolge einer Bewegung des Prüfkörpers im statischen Magnetfeld eines Permanentmagneten generiert (Abb. B2.1-1).

Störungen der Wirbelstromverteilung im Prüfkörper und infolge dessen auch der Magnetfeldverteilung bewirken eine Änderung der am Permanentmagneten einwirkenden Kraft. Somit resultiert der Effekt, dass bei Vorliegen einer Relativbewegung eines elektrisch leitfähigen Werkstücks zu einem Permanentmagneten eine Inhomogenität der elektrischen Leitfähigkeit (z. B. ein Riss, ein Einschluss bzw. allgemein ein Defekt) sich in einer Veränderung der Lorentzkraft nachweisbar widerspiegelt. Die Messung der Änderungen der Komponenten dieser Lorentzkraft am Magneten erlaubt Rückschlüsse auf Inhomogenitäten/Defekte im Prüfkörper. Für eine explizite Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit wurde auf dieser Basis das sogenannte Sigmometrie-Verfahren entwickelt, welches es erlaubt, mit Hilfe der gleichen Messprinzipien diese Materialeigenschaft, insbesondere bei massiven Leitermaterialien, kontaktfrei zu bestimmen [UHL-2012].

B 2.1.2 Hochempfindliche Magnetometer

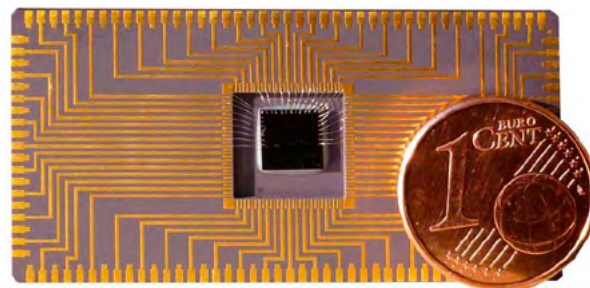
Magnetfeldsensoren mit höchster Empfindlichkeit basieren auf Quanteninterferenz-Effekten, die in ringförmigen Anordnungen aus supraleitenden Materialien hervorgerufen werden können. Diese sogenannten Supraleitenden Quanteninterferometer (SQUIDS) können eingesetzt werden, um extrem schwache magnetische Felder zu erfassen, so z. B. die Verzerrungen im Erdmagnetfeld durch tiefliegende Erzlagerstätten, die magnetischen Signaturen vergrabener archäologischer Reste oder die Signale, welche die menschlichen Vitalfunktionen begleiten.

Auch andere physikalische Größen, die zu einem Magnetfeld führen – insbesondere elektrischer Strom – können mit solchen Sensoren mit hoher Präzision gemessen werden. Insbesondere ermöglicht die hohe Empfindlichkeit in der Materialprüfung die Feststellung von Rissen und anderen Materialfehlern in leitfähigen Körpern.

Eine medizinische Anwendung ist durch die Detektion von magnetischen Nanopartikeln gegeben. Werden diese an Biomoleküle wie Antikörper oder Antigene gekoppelt, kann durch Auswertung der Relaxationsantwort in einem veränderten externen Magnetfeld auf das Vorliegen spezifischer Reaktionen geschlossen werden.

Die beschriebenen Anwendungen sind häufig dadurch gekennzeichnet, dass die Messsituation statisch ist (Materialprüfung) oder nur sehr langsame Veränderungen ablaufen (Untersuchung von Patienten). In bewegten Szenarien jedoch, insbesondere wenn elektromagnetische Abschirmung nicht möglich ist, bestehen wesentlich erhöhte Anforderungen an Bandbreite und Dynamikbereich der Sensoren. Diese resultiert aus der Auflösung von magnetischen Flussdichten im pT-Bereich in der Umgebung des Erdmagnetfeldes (in Mitteleuropa ca. 50 μ T). Die Bandbreite von konventionellen SQUIDS begrenzt die mögliche

Abb. B2.1-2
Digital -SQUID-Chip,
auf einen Proben-träger
gebondet [HAV-2013].



erlaubte Relativgeschwindigkeit zwischen Sensor und Prüfobjekt.

In einem neuartigen Ansatz wird ein supraleitender Magnetfeldsensor direkt auf dem Chip mit einer digitalen Auswerteelektronik ergänzt. In diesen als Digital-SQUIDS bezeichneten Sensoren (Abb. B2.1-2) wird ausgenutzt, dass der magnetische Fluss eine quantisierte Größe darstellt, d. h. nur ganzzahlige Vielfache des Wertes von ca. $2,07 \cdot 10^{-15}$ Vs annehmen kann. Die Kombination aus SQUID und Zusatzelektronik erlaubt, durch Zählen der quantisierten Größe das zu untersuchende Magnetfeld zu bestimmen. Dieser Sensor zeichnet sich durch

einen (theoretisch) unbegrenzten Messbereich aus, die mögliche Bandbreite wird durch die Zählfrequenz für die Flussquanten [HAV-2013] bestimmt.

Eine Erhöhung der Empfindlichkeit von SQUID-Sensoren ist durch deren Verschaltung in einem Array möglich [MUK-2014]. Dabei werden mehrere inkommensurable Ringstrukturen eingebracht. Die Überlagerung verschiedenartiger einzelner Sensorantworten führt zu einer Antwortfunktion in Form eines einzelnen Peaks um den Wert $B=0$.

Diese Anordnungen sind als Superconducting Quantum Interference Filter (SQIF) bekannt. Ihre Empfindlichkeit ist von der Anzahl der Einzelschleifen abhängig und somit gestaltbar. Darüber hinaus ermöglichen sie Absolutmessungen der magnetischen Flussdichte.

B 2.1.3 Ultrabreitbandsensoren zur kontaktlosen ortsgelösten Messung der dielektrischen Eigenschaften

Mikrowellensensoren ermöglichen das kontinuierliche, berührungslose und zerstörungsfreie Messen von Materialparametern, insbesondere der Permittivität ϵ . Messungen im Mikrowellenbereich sind im Allgemeinen an die Verwendung kostenintensiver Ausstattung wie Netzwerkanalysatoren gebunden.

Ein aktueller, apparativ weniger aufwändiger Ansatz, ist durch den Einsatz von Ultrabreitbandtechnik-Sensoren gegeben. Die diesen zu Grunde liegende Ultra-Breitband-Technologie (UWB, von englisch: Ultra Wideband) entstammt der Technologie der Nahbereichsfunkkommunikation [SAC-2012]. UWB-Sensoren nutzen elektromagnetische Wellen mit extrem großer Bandbreite (mehrere Hundert MHz bis einige GHz).

Für die Anwendung in der Sensortechnik werden kontinuierlich sehr breitbandige Signale ausgesendet und die vom Prüfobjekt reflektierten Signale ausgewertet. Aus dem Vergleich werden Informationen über die elektrodynamischen Materialkenngrößen gewonnen. Die hohe Bandbreite ermöglicht dabei eine sehr hohe Auflösung. Durch die kontinuierliche Arbeitsweise können Leistungsspitzen vermieden und die Instrumente wesentlich handlicher ausgeführt werden.

Über die dielektrischen Eigenschaften sind Aussagen über die stofflichen Eigenschaften ableitbar. Wird daraus auf das Vorhandensein bzw. die Abwesenheit von Material geschlossen, ergibt sich ein weites Spektrum an weiterhin ableitbaren Messwerten und Einsatzgebieten. So werden UWB-Radar-Sensoren auch zur hochauflösenden Positionsbestimmung und Objekterkennung im Nahbereich, als Georadar und zur Impedanzspektroskopie eingesetzt.

Anwendungsfelder für solche Sensoren finden sich auch u. a. in der Bauindustrie, Baustoffindustrie, Lebensmittelindustrie, Landwirtschaft, Biotechnologie, Medizin, im Umweltschutz, bei der Produktionsüberwachung und -kontrolle, in der Überwachungs- und Sicherheitstechnik, Verkehrs- und Fahrzeugtechnik [ZET-2014].

B 2.1.4 Magneto-resistive Sensoren

B 2.1.4.1 Einleitung, Historie

1857 entdeckte der britische Physiker William Thomson, später Lord Kelvin, dass sich der elektrische Widerstand eines stromdurchflossenen Leiters unter dem Einfluss eines Magnetfeldes verändert. Die sensorische Nutzung dieses Effekts konnte jedoch erst vor ca. 30 Jahren mit der Weiterentwicklung der Dünnschichttechnik industriell umgesetzt werden.

Weil es ein richtungsabhängiger Effekt ist, wird er auch anisotroper magneto-resistiver Effekt genannt, kurz AMR. Der AMR-Effekt zeigt seine deutlichste Ausprägung bei sehr dünnen magnetischen Metallschichten mit Schichtdicken von 10 bis 100 nm. Die Widerstandsänderung liegt im Bereich von 1 bis 5 % und hat eine Richtungsperiodizität von 180°.

1988 erkannte der Physiker Peter Grünberg einen Grenzflächeneffekt in Stapeln sehr dünner magnetischer Schichten, der eine deutlich höhere Widerstandsänderung im Magnetfeld zur Folge hat. Der Effekt wurde Giant Magneto-resistiver Effekt genannt, kurz GMR. Da diese Entdeckung u. a. revolutionäre Verbesserungen bei Leseköpfen in Festplatten ermöglichte, erhielten Prof. Peter Grünberg und der Franzose Albert Fert im Jahr 2007 dafür den Nobelpreis.

Eine nochmalige Steigerung der Widerstandsänderung verbunden mit der Möglichkeit, extrem kleine und sehr stromsparende magneto-resistive Sensoren zu entwickeln, wurde bei gestapelten magnetischen und nichtmagnetischen Schichten mit extrem dünnen Schichtdicken von 1 bis 3 nm erreicht. Da die Widerstandsänderung aufgrund eines Spin abhängigen Tunnelns der Leitungselektronen erfolgt, spricht man allgemein vom Tunnel magneto-resistiven Effekt (TMR). Die erreichbaren Signalamplituden beim TMR-Effekt sind im Vergleich zum AMR-Effekt deutlich größer, ebenso weist ein Sensor auf TMR-Basis eine Richtungsperiodizität von 360° auf und ermöglicht damit ganz neue Anwendungen.

Die Nutzung von magneto-resistiven (MR)-Effekten ist vor allem überall dort naheliegend, wo das technische Problem der Umwandlung von magnetischer Information in elektrische Signale zu lösen ist. Die MR-Effekte sind deshalb für weite Bereiche der heutigen Sensorik und der magnetischen Speichertechnik von Interesse. Mit ihrer Hilfe können Magnetfeldänderungen, die Indikatoren für magnetische, elektrische oder mechanische Parameter sein können, in elektrische Signale umgewandelt werden, die dann mit herkömmlicher Elektronik weiterverarbeitet werden. Interessant ist hierbei, dass die Magnetfeldänderungen berührungsfrei gemessen werden.

Die zurzeit größte kommerzielle Anwendung ist in den Leseköpfen von Festplatten zu finden. Hier bilden die MR-Effekte die Grundlage dafür, die stetig zunehmende Datenmenge technisch zu bewältigen. Da hier jedoch zunehmend andere Speichertechnologien (wie z. B. Flash-Speicher in Solid-State Disks) Einzug halten, bildet heute die Sensorik den Bereich, in dem neue Anwendungen am schnellsten wachsen.

So eröffnen sich stetig neue Anwendungen im Fahrzeug- und Maschinenbau, der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung oder der Medizintechnik. Seit etwa 1990 ist mit den so genannten xMR-Technologien (x: Variable für alle Ausprägungen des Effekts, MR: Magneto-resistiv) ein ganz neuer Anwendungsbereich des Magnetismus entstanden, der sich gegenwärtig weltweit sehr dynamisch entwickelt.

Trotz des bereits seit über 150 Jahren bekannten Effektes ist die Technologie mit ihren vielfältigen Möglichkeiten keineswegs ausgeschöpft. Um Technologie und Anwendungen zusammenzubringen und weiter voranzutreiben, findet seit 1991 in regelmäßigen Abständen ein internationales xMR-Symposium in Wetzlar statt. Im Turnus von zwei Jahren treffen sich dort Wissenschaftler, Entwickler und Anwender, um ihre Forschungsergebnisse bzw. herausragende industrielle Anwendungen der xMR-Technologie vorzustellen und zu diskutieren. Die dortigen Beiträge geben einen sehr guten Überblick über den Verlauf weltweiter Entwicklung in der xMR-Technologie bzw. deren praktische Umsetzung in den verschiedensten Branchen und Anwendungen in den letzten 25 Jahren.

Während im Jahr 1991 dem Anwenderkreis im Wesentlichen die Grundlagen der AMR-Technologie und eine theoretisch mögliche Umsetzung in Produkte vorgestellt wurden, kommen die Themen 25 Jahre später aus industrieller Anwendungsbreite und reichen mittlerweile bis in die medizinische Diagnostik.

B 2.1.4.2 MR-Sensoren: Marktdurchdringung und Vielfalt

xMR-Sensoren sind heute längst ein wichtiger Teil des technischen Sensor-Baukastens geworden. So gelingt es mit der technologischen Basis der verschiedenen magnetoresistiven Effekte Produkte zu etablieren, die den Trends und den Anforderungen im Bereich der Sensorik gerecht werden und vermehrt in neue Anwendungsbereiche vorstoßen (Abb. B2.1-4).



Abb. B2.1-3

Das Anwendungsgebiet für MR-Sensoren ist sehr vielfältig, so z. B. in Objektiven von hochwertigen Kameras [SENS-2017].

Die heute noch junge TMR-Technologie beginnt sich seit etwa 2015 in breiterer Ebene in industriellen Applikationen zu etablieren, während der GMR-Sensor schon seit längerem einen sicheren Platz gefunden hat. Damit reihen sich GMR- und bald auch TMR-Produkte (Abb. B2.1-5) neben den schon bewährten AMR-Sensoren im Marktangebot ein.

Interessanterweise konnte bisher keine der neuen Technologien die althergebrachte AMR-Technik verdrängen. Vielmehr haben die Bauelemente neuerer MR-Technologien ergänzende Eigenschaften und werden abhängig von den Anwendungsanforderungen ausgewählt. Es werden sogar noch mehr Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten im Bereich der AMR-Sensoren gestartet, um eine weitere Verbesserung der Eigenschaften herbeizuführen. Die Sensorelemente lassen sich ähnlich wie eine elektronische Schaltung sehr variabel ausführen. In Kombination mit ständigen Weiterentwicklungen an den Schichten lassen sich verschiedenste Funktionen und damit umfangreiche Möglichkeiten für den Einsatz realisieren.

So lassen sich in den Sensoren als weitere Funktionslagen zum Beispiel Flusskonzentrationsstrukturen oder Leiterschleifen zum Flippen (Rücksetzen von aufmagnetisierten Sensorelementen) integrieren.



Abb. B2.1-4

TMR Sensoren auf Silizium Wafer prozessiert. Im Hintergrund die typische Anwendungen einer absoluten Winkelmessung am Roboter-Gelenk. Die geringe Stromaufnahme und kleine Bauform fördern die Anwendungen in mobilen Geräten [FOTO-2017].

Das allgemeine Interesse an magnetischen Sensoren – dazu gehören auch Hall Sensoren – wurde bisher permanent durch eine Wechselbeziehung von Technologie-Push und Market-Pull gefördert. In der Regel sind es die Anwender, die mit der Forderung nach höherer Messgenauigkeit und gesteigerter Kompaktheit immer neue Entwicklungsphasen auslösen.

Aber auch die Hersteller und Hochschulen treiben durch ihre Forschung und Entwicklung neue Sensoreigenschaften voran, die meist sehr schnell für den breiten Markt zur Verfügung stehen.

In jüngster Vergangenheit ist zu beobachten, dass bei der Marktdurchdringung der xMR-Technologie ein deutlich sichtbar gesteigertes Engagement großer Halbleiterunternehmen wie Infineon, TDK oder Analog Devices vorhanden ist.

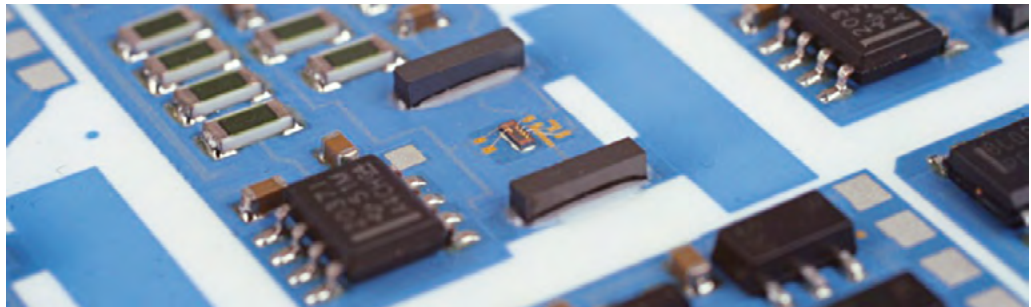
Hier wird das Portfolio durch Sensoren auf Basis der xMR-Technologie verstärkt erweitert. Auch hieran können die Bedeutung und das Potenzial der xMR-Technologie deutlich abgeleitet werden.

B 2.1.4.3 MR-Sensoren: Anforderungen, Anwendungen und Herausforderungen

Steigerung der Leistungsdichte ist eine Herausforderung, die in vielen Branchen als klare Forderung vorgegeben wird, bzw. sie resultiert als Folge von immer leistungsfähigeren Einzelkomponenten. Baugruppen werden immer kompakter, und die Hersteller integrieren immer mehr Funktionsumfang. So ist es der Wunsch nicht mehr nur einen Standard-Sensor mit vordefinierter Schnittstelle zu verwenden, sondern einen optimal angepassten Sensor einzubauen, also direkt zu integrieren. xMR-Sensor-Elemente sind diesem Trend bis an das technisch Machbare gefolgt. Mit dem TMR-Effekt wurde erst vor wenigen Jahren ein weiterer technologischer Meilenstein gelegt, der zusätzliche Miniaturisierungsschritte ermöglicht.

Der Anspruch an Individualität bei der Komponentenwahl löst merklich die standardisierte Katalogware ab, auch die Anforderungen an die Verarbeitung der Sensoren im Fertigungsprozess sind deutlich gestiegen. Die Sensorhersteller tragen dieser Entwicklung durch eine breite Palette verfügbarer Gehäusevarianten Rechnung, die mitunter auch die etablierte Leiterplatten Bond-Technik ablöst (Abbildung B2.1-5).

Abb. B2.1-5
SMD und COB bestückte Stromsensor Platinen im Mehrfachnutzen. Das AMR Sensorelement ist zwischen die beiden quaderförmigen Stützmagneten platziert (siehe Bildmitte) [SENS-2017].



Ebenfalls vermehren sich die Anfragen für Anwendungen, die eine funktionale Sicherheit (SIL) erfordern. Ausfälle und Fehler müssen sicher erkannt werden. Sicher bedeutet, dass die Anlage, bzw. Baugruppe, im Fall eines Fehlers einen sicheren Zustand einnehmen muss, ohne das Umfeld in irgendeiner Art zu gefährden. Auch hier sind Sensorkomponenten gefragt, die diesem Anspruch gerecht werden. Somit muss aus einem „simplen“ Sensor ein Sensor mit mehr Informationsgehalt oder gar mehr Eigenintelligenz werden.

Neben dem Thema der funktionalen Sicherheit spielt der bereits erwähnte Trend der 4. Industriellen Revolution (Industrie 4.0) für die Sensorik ein bedeutendes Wachstumsfeld. Auch magnetoresistive Sensoren werden hiervon sicher profitieren, wobei derzeit Hersteller und Anwender bei dem sehr breit gefächerten Thema scheinbar noch in der Findungsphase sind, welche Funktionen schlussendlich Fertigungsvorgänge regelbarer, überwachbarer und effizienter machen.

Mittels Zustandsüberwachung (Condition Monitoring) sollen Maschinenlaufzeiten deutlich optimiert und Eingriffe wie zum Beispiel vorbeugende Instandhaltung effektiver gestaltet werden (s. Kap. B 2.2.5). Ebenso könnten Anlagen viel effizienter genutzt und gewartet werden, wenn mehr und bessere Informationen zum Produktionsprozess zur Verfügung stehen. Es werden daher ebenfalls weitere Sensoren im Bereich der Prozessüberwachung benötigt, wobei an vielen Stellen die Forderung nicht nur bedingt durch den Wunsch nach Optimierung, sondern vielmehr aus gesetzlichen Vorgaben resultiert.

Der Bedarf an Sensoren aufgrund dieser neuen Anforderungen wird somit steigen, da in den meisten Bereichen solche Mechanismen und Funktionen noch nicht vorhanden sind. Neue Anforderungen bedeuten aber auch neue Herausforderungen. Um diese zu meistern, ist es notwendig die technologische Basis ebenso wie neue Schaltungs- und Funktionsdesigns weiterzuentwickeln und durch Forschungsprojekte alle Potenziale zu heben. Der bekannte Slogan „die Welt ist magnetisch“ deutet an, dass sowohl die Möglichkeiten als auch die Einsatzgebiete so gut wie keinen Grenzen unterliegen.

In der Tat finden sich Anwendungen der MR-Sensoren in umfangreichen Gebieten der Technik. So hat sich die Jury beim AMA Innovationspreis 2016 für ein Entwicklungsprojekt

entschieden, bei dem mit Hilfe von magnetischen Biomarkern und MR-Sensoren magnetische Durchflusszytometrie realisiert wurde. Ein ganz neues und insbesondere schnelles diagnostisches Verfahren für die Untersuchung von Antikörpern im Blut.

Ein weiteres spektakuläres Beispiel für den Einsatz magneto-resistiver Sensoren ist der Marsrover „Curiosity“. Dieser ist an fast allen beweglichen Achsen mit MR-Sensoren ausgestattet und verrichtet unter widrigsten Umgebungsbedingungen seit Jahren seine Aufgabe, die Marsoberfläche zu analysieren.

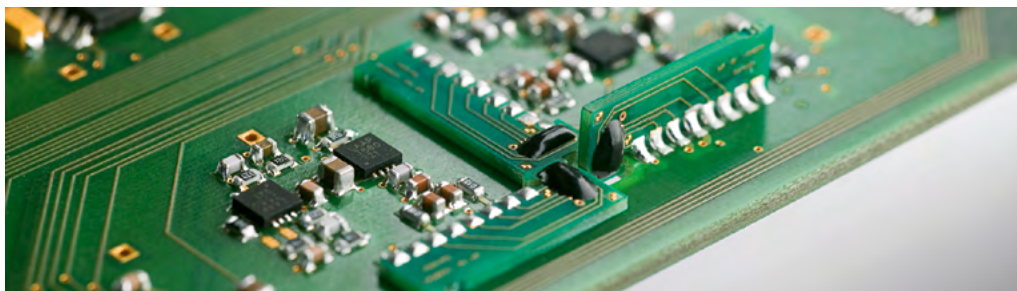


Abb. B2.1-6
AMR Sensoren zur 3-D-Magnetfeldmessung (z. B. als Kompassensensor). In Bildmitte zu sehen: die Sensorplatinen sind so angeordnet, dass drei Raumvektoren gemessen werden können [SENS-2017]..

MR-Sensoren werden in Prüfständen für die Entwicklung von Verbrennungsmotoren eingesetzt. Die Sensoren können die Ventillbewegungen erfassen, dabei sind sie von heißem Motoröl umgeben, welches im Bereich des Auslasskanals bei Volllast auch bis zu 180 °C erreichen kann.

MR-Sensoren sind wichtige Helfer unseres Alltags. Weit über 100 Millionen MR-Sensoren dienen der Überwachung des ABS-Bremssystems im PKW. Sie werden auch in Smartphones in Form von Kompassensoren (Abb. B2.1-6) für die Navigation eingesetzt.

B 2.1.4.4 MR-Sensoren Ausblick

Magnetische Sensoren jeglicher Technologie werden auch zukünftig wichtige Bauelemente in unserer hochtechnisierten Welt sein. Magneto-resistive Sensoren bieten große Potenziale sowohl bei ihrer technologischen Basis als auch in der Flexibilität des Sensordesigns. Die Anforderungen, noch höhere Auflösungen und Genauigkeiten zu erreichen steigen, damit einhergehend auch der Wunsch, noch robuster gegenüber externen Bedingungen zu sein. Auch hier werden die Grenzen durch konsequente Weiterentwicklung permanent verschoben. Keine Revolution, aber Evolution mit einer rasanten Geschwindigkeit.

Schaut man sich beispielsweise eine Festplatte in den 80er Jahren im Vergleich zu heute an, zeigt sich, dass das Bauvolumen extrem reduziert wurde, bei gleichzeitig enormer Erhöhung der Speicherkapazität.

Bedingt durch eine immer älter werdende Bevölkerung zeichnet sich ein weiterer stark wachsender Trend im Bereich der Medizintechnik ab. Ob in Hilfsmitteln oder integriert in Implantaten, es werden vermehrt magnetische Sensorlösungen eingesetzt. Der Trend, dass Sensoren höher integriert, intelligenter und mit mehr Zusatzfunktionen ausgestattet sein müssen, wird an den magneto-resistiven Sensoren nicht vorübergehen. Vielmehr bleibt zu erwarten, dass gerade magnetische Sensoren mit ihren Eigenschaften diesen Trend aktiv unterstützen können. In der Generation von Industrie 4.0 werden zudem magnetische Sensoren den erweiterten Sicherheitsanforderungen gerecht werden. Sensoren von morgen werden ihre Signalkonditionierung selbständig durchführen und mittels Self-X-Funktionen Eigenüberwachung aufweisen.

B 2.2 Mechanische Messgrößen

B 2.2.1 Wandlungsarten

In Tab. B2-1 ist eine Übersicht bezüglich der aktuellen Zuordnung von häufig genutzten physikalischen Wandlungsprinzipien für mechanische Messgrößen angegeben.

Sensoren mit parametrischem bzw. aktivem Wandlungselement werden vorzugsweise zur Messung von statischen bzw. quasistatischen Messgrößen verwendet. Bedingt durch die zunehmende Miniaturisierung, vorzugsweise durch MEMS-Mikrobauteile, sind MEMS-Sensoren (Kap. C 2) jedoch auch zur Detektion dynamischer Messgrößen in einem breiten Frequenzbereich geeignet.

In der Kraft-, Masse- und Drehmomentmessung werden weiterhin kontinuierlich verbesserte resistive *Dehnungsmessstreifen-Elemente* (DMS) dominieren.

Dotierte *piezoresistive MEMS-Silizium-Sensorelemente* nehmen in der Druckmesstechnik eine Vorrangstellung ein. Außerdem werden sie auch für Anwendungen in der Mikrokraft- und Beschleunigungsmessung verwendet.

Resistive Dünn- und *piezoresistive Dickfilmelemente* weisen ebenfalls eine starke Verbreitung in der Kraft und Druckmesstechnik auf.

Neben den klassischen resistiven Sensoren zur Dehnungsmessung finden zunehmend auch *piezoresistive Nanoschichtsensoren* Anwendung. Sie weisen einen deutlich höheren k-Faktor auf und gestatten deutlich kleinere Abmessungen.

Durch die Forderung nach berührungslosen Sensoren werden zunehmend magneto-resistive Dünnschichtsensoren (Kap. B 2.1.4) und magnetisch codierte magnetostriktive Verformungskörper (Kap. B 2.2.4) zur berührungslosen Kraft- und Drehmomentmessung vor allem in der Kfz- und Fahrzeugtechnik verwendet.

Sowohl in der statischen als auch dynamischen Beschleunigungsmessung sind *kapazitive MEMS-Sensoren* dominierend. Eine weitere wichtige Anwendung finden sie in MEMS-Miniatur-Mikrofonen (siehe auch Kap. C 2.1).

Wirkprinzipien	Mechanische Größen								
	Weg und Winkel	Geschwindigkeit	Beschleunigung	Masse und Kraft	Drehmoment	Druck	Durchfluss	Füllstand	Drehung
Sensoren mit aktiven Wandlungselement									
Resistive Sensoren (DMS)	**			***	***	*			***
Piezoresistive Sensoren			**	*		***			
Kapazitive Sensoren			***		**	**			
Induktive Sensoren	**				**	*			
Magnetische Sensoren (Hall-Sensor, Feldplatte, magneto-resistiver Sensor)	***	**							
Resonanz-Sensoren (BAW und SAW-Sensor)			*	*	*	**			
Ultraschall- und Mikrowellen- Sensoren		***					**	*	
Optoelektronische Sensoren (Reflexionsverfahren, Interferometer, faseroptischer Sensor)	***			*	**	*	*	*	**
Sensoren mit passiven Wandlungselement									
Sensoren mit elektrostatischem Wandler	**		**			*** ¹			
Sensoren mit piezoelektrischem Wandler	**	**	***	**		**			
Sensoren mit elektrodynamischem Wandler		**		**		** ²			
Sensoren mit piezomagnetischem Wandler				*		*			

*** dominierende Anwendung ** industrielle Anwendung * geringe Anwendung ¹ Mikrophon ² MID

Tab. B2-1
Zuordnung von Wirkprinzipien zu mechanischen Messgrößen.

Durch die mit dem Strompulsverfahren codierte Magnetisierung von Wellen als Verformungskörper findet das magnetostruktive Messprinzip vor allem in berührungslosen Drehmomentsensoren zunehmend Anwendung.

Induktive Sensoren werden vor allem als hochempfindliche Wegsensoren, z. B. Sensoren für Taststifte und Näherungssensoren, verwendet.

Berührungslose *magneto-resistive Dünnschichtsensoren* (XMR-Sensoren) finden verbreitet Anwendung zur Abstandsmessungen und für inkrementelle und absolute Drehzahlmessung [SLA-2012]. Aber auch für die berührungslose Kraft- und Drehmomentmessung können sie durch Detektion des Ausschlags von Verformungskörpern eingesetzt werden (siehe auch Kap. B 2.1.4)

Resonanzsensoren, z. B. in Form von piezoelektrischen Oberflächenwellen-Elementen (SAW-Sensoren) werden zur Präzisionsmessung von Kraft und Druck verwendet. Die Resonanzsensoren bieten als zusätzlichen Vorteil die Möglichkeit der drahtlosen RFID-Signalübertragung und einfachen Signalverarbeitung.

Ultraschall- und Mikrowellensensoren auf Basis des Laufzeit- und Doppler-Verfahrens sind in der Füllstand- und Durchflussmessung etabliert.

In der optischen Messtechnik wird der Trend in Richtung kostengünstiger, direkt in den Prozess integrierbarer Sensoren mit Übergang zu Nanosensoren weiter ausgebaut [HÄR-2015]. Hier liegen die Hauptvorteile in der Berührungslosigkeit und hohen Auflösung der optischen Messverfahren.

Optoelektronische Sensoren sind stark in der Präzisionsmesstechnik verbreitet, z. B. als hochauflösende Interferometer. Vor allem in der hochpräzisen Weg- und Kraftmesstechnik werden sie verwendet.

Ihre Vorteile beruhen insbesondere auf der berührungslosen Messung, der möglichen Anwendung für Absolutmessungen durch den unmittelbaren Wellenlängenvergleich und ihre Unempfindlichkeit gegenüber elektromagnetischen Störfeldern (siehe auch Kapitel B 2.3).

Sowohl in der ortsverteilten Strukturüberwachung als auch in der Präzisionsmesstechnik wird der Anteil faseroptischer und optischer Reflexionssensoren weiter zunehmen. Als einfache Reflexionssensoren werden LED's für Lichtschranken, aber auch Laser-Dioden für hochauflösende Triangulations-Sensoren verwendet.

Durch die zu erwartende Miniaturisierung der Sensoren und der damit verbundenen Kostenreduzierung, der hohen Auflösung und der berührungslosen Messung wird ihr Anteil in der industriellen Sensorik weiter zunehmen.

Sensoren mit umkehrbarem bzw. passivem Wandlungselement werden vor allem zur Messung dynamischer Größen verwendet. Zu diesen elektromechanischen Wandlern zählen das elektrodynamische, elektrostatische, piezoelektrische und magnetostruktive (piezomagnetische) Wandlungsprinzip.

So dominieren Sensoren mit piezoelektrischem Wandlungselement aus Quarz, Langasit (erweiterter Temperaturbereich) oder PZT-Keramik als Beschleunigungssensoren in der Schwingungsmesstechnik.

Sensoren mit elektrostatischem MEMS-Messelement sind in klassischen Mikrofonen weit verbreitet.

Piezomagnetische Primärsensoren, linearisierte magnetostruktive Wandler, weisen lediglich bei der Erfassung von großen Kräften und Drücken industrielle Bedeutung auf. Ein zukünftig interessantes Anwendungsfeld ist die bereits erwähnte magnetostruktive Codierung von Verformungskörpern und deren berührungslose Drehzahl- oder Verformungsmessung durch hochempfindliche magnetostruktive Dünnschichtelemente.

Für Ultraschallsensoren werden piezoelektrische Keramiken, elektrostatische MEMS-Elemente und magnetostruktive Wandlungselemente verwendet. Sie finden Anwendung als Ultraschallsender und -empfänger in der Durchfluss- und Füllstandmessung.

B 2.2.2 Bewertung der Wandlungsprinzipien

Die analogen Wandlungsprinzipien werden auch in naher Zukunft bestimmend bleiben. Gründe hierfür sind:

- Die für die meisten Anwendungen ausreichende Messunsicherheit.
- Die vorhandene exakte modellmäßige Beschreibung des Übertragungsverhaltens der Sensorelemente einschließlich der Kenntnis des Einflusses von Störgrößen.
- Damit verbunden ist die für die wichtigsten Anwendungen mögliche hochgenaue Korrektur von systematischen Störgrößeneinflüssen.
- Die langjährig nachgewiesene Robustheit der verwendeten Wandlungseffekte gegenüber Umwelteinflüssen.
- Die durch viele Tests und Einsatzfälle nachgewiesenen Sensorkennwerte, die zum Großteil die vorhandenen Anwendungswünsche in hoher Qualität erfüllen.
- Die nachgewiesene Reproduzierbarkeit der Kennwerte und hohe Langzeitstabilität.
- Das vorhandene hohe Miniaturisierungspotential.
- Die kostengünstige Fertigung der Messelemente im Batch-Prozess.
- Die vorhandenen Einsatzbestätigungen für die Messelemente durch eine Vielzahl von international gültigen Zertifikaten.

B 2.2.3 Entwicklungsansätze

Die Schwerpunkte der Weiterentwicklung sehen wir seit Jahren im Zusammenspiel von Miniaturisierung, Integration und Kommunikation.

Die Weiterentwicklungen konzentrieren sich daher bei Beibehaltung der Grundprinzipien vor allem auf die verstärkte Nutzung von berührungslosen Prinzipien, die Messbereichs- und Einsatzerweiterungen, sowie auf neuartige Fragestellungen wie z. B. die

- Strukturintegration der Messelemente, auch als gedruckte Folien, direkt in die Konstruktionswerkstoffe,
- erweiterte Anwendung von Technologien der Mikrosystemtechnik mit Übergang zur Mikro- Nano-Integration und MEMS (Kap. C 2),
- Verbesserung der verlässlichen Abschirmung von Umweltstörgrößen durch ein robustes, kostengünstiges Packaging (Kap. C 3),
- weitere Reduzierung der mechanischen Packaging- Rückwirkungen auf das Wandlungsverhalten des Elementarsensors,
- Funktionserweiterung durch eine anspruchsvollere Signalverarbeitung bereits im Sensor, z. B. Sensor- Selbstüberwachung (Kap. C 5) und Selbstreparatur bei auftretenden Störungen,
- weitere Reduzierung von systematischen, aber auch zufälligen Sensor-Abweichungen, im Einsatzfall, z. B. durch adaptive Filter,
- automatische Adaption der Sensoren an die konkreten Prozessbedingungen bezüglich Übertragungsfaktor, Arbeitsfrequenzbereich, Korrekturalgorithmen und Nullpunkt,
- zunehmende Einführung einer direkten Sensor- Aktor-Kopplung in weiten Anwendungsbereichen, z. B. für haptische Bediensysteme (Kap. B 3.2) oder für Regelungen in der Prozesstechnik,
- vermehrten Einsatz von selbstüberwachenden Sensoren (Kap. C 5.1),
- wachsenden Einsatz von selbstüberwachenden Aktoren, z. B. durch Integration eines Sensors in den Aktor oder durch inverse Nutzung des Aktorprinzips (Kap. C 5.2)
- zunehmende Nutzung von mechanischer oder thermischer Verlustenergie an den Messstellen zur autarken Energieversorgung der Sensoren, z. B. durch Energy Harvester (Kap. C 4.2).

Vor allem durch die Möglichkeit, gleichzeitig statische und dynamische Größen zu erfassen sowie durch ihre kostengünstige Fertigung im Batch-Prozess und ihrem hohen Miniaturisierungspotential werden auch zukünftig resistive, piezoresistive und kapazitive MEMS-Elementarsensoren dominieren. Mögliche Entwicklungsschwerpunkte liegen hier in der Erweiterung der Mess- und Störgrößengebiete, z.B. Druckmessung bis 5.000 bar [HEI-2015] und Erweiterung des Temperatureinsatzbereiches bis 1.000°C. Hierzu werden die bewährten dotierten Silizium-Messelemente zunehmend durch neuartige resistive Werkstoffe, z. B. piezoersistive Keramiken [ROT-2015], ergänzt.

Zur Gewährleistung der zukünftigen Strukturintegration sind gedruckte oder laserstrukturierte resistive bzw. piezoresistive Dünnschicht-Foliensensoren eine interessante Alternative [VOL-2015], [KEC-2015], [DUM-2015].

Die Anwendung komplexer MEMS-Primärsensoren für anspruchsvollere Messverfahren, wie z. B. in der Durchflussmesstechnik, wird zunehmend erfolgen. In [HUB-2015] wird hierzu ein Mikro-Coriolis-Sensor zur Dichte- und Durchflussmessung vorgestellt.

Die hochempfindlichen und robusten magnetischen XMR-Sensoren werden ihren Einsatzbereich vor allem wegen ihres berührungslosen Messverfahrens und der niedrigen Kosten, insbesondere bei rotierenden Messobjekten, erweitern. [SLA-2012], siehe auch Kap. B 2.1.

Piezoelektrische Primärsensoren werden zunehmend zur direkten Strukturintegration, z. B. in Aluminium-Leichtbau-Konstruktionsteile, verwendet werden [DRO-2015]. Zur Sicherung des erweiterten Temperatureinsatzbereiches werden neue Materialien, wie Langasit oder Lithiumniobat, Verwendung finden. Es wird erwartet, dass die Messelemente direkt bei der Anfertigung der Bauteile, z. B. Aluminium-Konstruktionsteile, integriert werden können [DRO-2015].

Bei Ultraschall- und Mikrowellensensoren werden zunehmend MEMS-Realisierungen Anwendung finden, z. B. in der berührungslosen Durchflussmesstechnik, aber auch in der Medizintechnik [JAK-2015].

Ein weiterer Schwerpunkt könnte in der Anordnung von unterschiedlichen Messprinzipien auf einem MEMS-Chip bestehen. Damit würde eine geringere Messunsicherheit und erhöhte Sicherheit der Messdaten ermöglicht. Aber auch die gleichzeitige Erfassung unterschiedlicher mechanischer als auch einem Mix aus mechanischen, thermischen und chemischen Messgrößen durch einen Sensor wäre möglich.

Durch die Anwendung der Nanotechnik könnten neuartige Effekte, die Ortsverteilung von Einzelsensoren zur Aufnahme von ortsabhängigen Profilen und die Erweiterung der Messstellenzahl erschlossen werden.

Daher wird die Forschung auf dem Gebiet der Mikro-Nanointegration zur Erfassung von mechanischen Größen an Bedeutung zunehmen [QUE-2015].

Als besonders wichtig wird die Erweiterung des Funktionsumfangs, wie verbesserte Fehlerkorrektur, Selbstüberwachung und Selbstreparatur, Selbstadaption an konkrete Messbedingungen sowie die kostengünstige Gehäusung und die sichere Vernetzung mit der digitalen Umwelt eingeschätzt.

Dieser Trend basiert auf der für die meisten Anwendungsfälle völlig ausreichende Genauigkeit und Stabilität der bewährten analogen Messprinzipien.

B 2.2.4 Berührungslose Drehmomentsensoren

B 2.2.4.1 Alte Idee – industrielle Umsetzung

Die präzise und schnelle Erfassung von Drehmoment, Biegung und Scherung an sich bewegenden Teilen wie Vorschub-, Antriebs- oder Getriebewellen war angesichts der ständig steigenden Anforderungen an Maschinen und Fahrzeuge schon immer der Wunsch der Entwickler und Ingenieure. Wer zu jedem Zeitpunkt Zugriff hat auf in Echtzeit erhobene Daten aus dem Inneren von Wellen, Motoren und Getrieben, kann Prozesse optimal nach den real auftretenden Kräften in der Maschine bzw. im Fahrzeug planen, auslegen und steuern. Das ermöglicht nicht nur attraktive Kosten- und Gewichtseinsparungen bereits in der Entwicklungsphase, weil Wellen und Antriebsteile nicht mehr vorsorglich überdimensioniert werden müssen. Der Einsatz von Drehmomentsensorik verlängert auch die Lebenszeit von Maschinen, reduziert den Kraftstoff- und Energiebedarf, verlängert die Wartungsintervalle und erhöht die Sicherheit.

Die Vorteile der Drehmomentsensorik liegen also klar auf der Hand. Dennoch war der Einsatz von Drehmomentsensoren aufgrund der komplexen Technologie bis vor kurzem auf Prüfstände und Entwicklungsszenarien beschränkt

B 2.2.4.2 Geschichte der Drehmomentsensoren

1856 entdeckte Lord Kelvin den Zusammenhang zwischen mechanischer Dehnung eines Widerstandsdrahtes und seiner Widerstandsänderung. Auf Basis dieser Erkenntnisse entwickelte A. Ruge 1938 den ersten Dehnungsmessstreifen, drei Jahre später waren die ersten industriell hergestellten Draht-Dehnungsmessstreifen verfügbar. Ihren ersten Marktdurchbruch hatte die Technologie 1952 mit den ersten Folien-Dehnungsmessstreifen. Sie wurden – wie bis heute noch – aus metallbeschichteten Polymerfolien geätzt.

Allerdings gilt diese Messtechnologie als relativ teuer und komplex. Folglich kamen Dehnungsmessstreifen bislang nahezu ausschließlich in der klassischen Messtechnik, also im F&E-Umfeld, zum Einsatz. Industrietaugliche Serienlösungen für Volumenmärkte erschienen kaum erschließbar.

Im Markt kommerziell erhältliche Drehmomentsensoren auf Basis von Dehnungsmessstreifen halten anspruchsvollen Bedingungen nur mit hohem Aufwand stand. Mechanische, thermische und chemische Beanspruchung bringen herkömmliche Lösungen schnell an ihre Grenzen, Dehnungsmessstreifen werden beschädigt oder liefern unzureichende Daten. Zudem ist die Signalübertragung per Telemetrie aufwändig.

B 2.2.4.3 Industriereife Lösungen: Berührungsfreie Drehmomentsensoren

Berührungsfreie Drehmomentsensoren eröffnen durch die präzise Erfassung von Messwerten direkt an Wellen und Gelenken neue Möglichkeiten in einer Vielzahl von Anwendungen, insbesondere in der Automation. Bei Industrie 4.0 Robotereinsätzen an der Schnittstelle Mensch/Maschine leistet ihr Einsatz entscheidende Beiträge zu Unfallvermeidung, erhöhter Benutzersicherheit und mehr Einsatzflexibilität.

Daher werden seit ca. 10 Jahren wachsend immer mehr Sensoren eingesetzt, die den magnetostriktiven Effekt für vollständig berührungsfreie und robuste Drehmomentmesstechnik nutzbar machen. Dabei werden Welle, Achse oder rotierende Komponenten eines Roboters oder einer Maschine selbst zum Elementarsensor.

In einem hierzu speziell entwickelten, Strompulsverfahren wird die Achse dauerhaft mit einer remanenten, schwachen magnetischen Kodierung versehen, wie in Abb. B2.2-1 links gezeigt ist. Durch die Wirkung einer Kraft (gelbe Pfeile im Bild rechts) ändert sich nach dem magnetostriktiven Effekt die Größe und Richtung des eingepprägten Magnetfelds. Dies wird durch nahe angebrachte Magnetfeldsensoren bestimmt. Umgekehrt kann aus der Änderung des Magnetfelds jeweils die einwirkende Kraft ermittelt werden. (Abb. B2-2-1).

Das dabei erzeugte Magnetfeld ist langzeitstabil und unempfindlich auch gegen anspruchsvolle Umgebungsbedingungen wie Vibrationen, hohe Umdrehungszahlen und Temperaturen. Nahe der Achse erfassen hochauflösende Miniatursensoren berührungslos und verschleißfrei selbst kleinste Magnetfeldänderungen durch einen Luftspalt von mehreren

Millimetern. Die erhobenen Daten werden in Echtzeit übermittelt und automatisiert zur optimalen Steuerung der Maschine oder des Roboters genutzt.

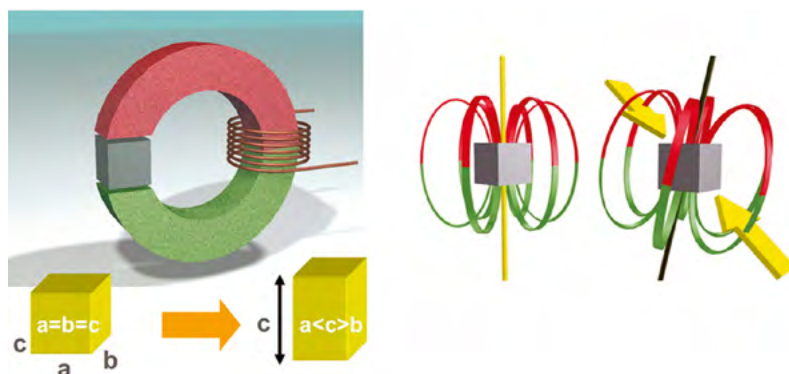


Abb. B2.2-1
Physikalische Wirkung
der Magnetostriktion
[NCTE-2017].

B 2.2.4.4 Vorteile berührungsfreier Drehmomentsensoren

Kosteneinsparungen

Berührungsfreie Drehmomentsensoren sind äußerst robust und halten ein Maschinenleben lang. Ihre geringe Systemkomplexität und einfache Integration macht sie auch kostentechnisch interessant für den Serieneinsatz. Die kontinuierliche Erfassung entscheidender Daten zur Lastsituation, zur Früherkennung von Verschleiß und zur Planung der Wartungsintervalle ermöglicht die Durchführung von Wartungsarbeiten nur dann, wenn sie auch wirklich nötig sind. Durch die automatische Regelung der Maschine über Drehmomentsensorik fährt die Anlage zudem wesentlich öfter im idealen Bereich. Je nach Anlagentyp können Effizienzpotenziale von über 20 Prozent realisiert werden. In besonders anspruchsvollen Industrien, in denen ein Maschinenausfall katastrophale finanzielle Schäden nach sich zieht, ist der Wert noch höher – z. B. bei Spezialextrudern für die Pharmaindustrie.

Industrietaugliche drehmomentabhängige Steuerung

Im Maschinen und Robotern werden bewegungsführende Wellen, Achsen oder Gelenke mit berührungsfreien Drehmomentsensoren ausgestattet.

Die kontinuierliche Echtzeitmessung erkennt zu jedem Zeitpunkt kleinste Veränderungen der Kräfte und Momente an den Achsen und sorgt so für eine unmittelbare Anpassung der entsprechenden Kräfte und Bewegungen. So können Schäden und Unfälle vermieden werden. Ein weiterer Vorteil: Die ständige Krafrückmeldung ermöglicht Antigravitationsregelung.

Drehmomentmessung in Hohl- und Innenwellen

Auch Hohlwellen mit innenliegenden leistungsführenden Kabeln können zu Primärsensoren magnetisiert werden. Die gekapselten Sekundärsensoren sind geschützt vor magnetischen Störfeldern und erfüllen alle EMV-Anforderungen. Ebenso können Innenwellen magnetisiert und als Sensoren genutzt werden. Damit sind hochpräzise Drehmomentmessungen auch in extrem engen Bauräumen möglich.

3 in 1: Kombinierte Kraftmessung – Drehmoment, Scherung, Biegung

Berührungsfreie Drehmomentsensoren können auch gleichzeitig die Biegung und Scherung von Wellen messen. Das eröffnet ihnen völlig neue Einsatzbereiche, in denen verschiedene Arten von Belastungen parallel und in Echtzeit beobachtet werden müssen.

Marktführend sind neuartige Sensorlösungen, die Drehmomentmessung und parallele Biegemessung in zwei Achsen in einem einzigen Sensor vereinigen. Hierfür werden mehrere Miniatursekundärsensoren miteinander verbunden, die die unterschiedlichen Leistungsdaten erheben. Diese hocheffiziente Messtechnologie bietet in Anwendungen mit komplexen Bewegungsabläufen, wie sie z.B. in Robotern auftreten können, entscheidende Vorteile.

Wartung zum idealen Zeitpunkt

Die hohe Präzision der Messung verbessert die vorausschauende Wartung erheblich. Selbst hochdynamische Prozesse werden messbar und transparent. Bei Bedarf arbeitet die Technologie so genau, dass z.B. beim Einsatz in Getrieben jeder einzelne Zahnradengriff hochaufgelöst dargestellt wird. So ergeben sich völlig neue und teils überraschende Ein-

blicke in wichtige Lastsituationen und Prozesse und ermöglicht exakte Erkenntnisse zu Lebensdauer, Last und optimalen Wartungsintervallen.

Überlastschutz

Ein zusätzlicher entscheidender Vorteil für Anlagenbetreiber ist der Überlastschutz, den kontinuierliche Drehmomentmessung bietet. Diese Funktion sichert gleichbleibend hohe Qualität durch die automatische Anpassung der Maschinengeschwindigkeit an die Realbedingungen in der Anlage.

Überwachung von interagierenden Aggregaten

Eine attraktive Einsatzmöglichkeit berührungsloser Drehmomentsensoren in Industrie- und Robotik-Anwendungen liegt in der automatisierten Überwachung von Antrieben interagierender Aggregate. Fehlfunktionen können signifikant reduziert werden. Dies erhöht insgesamt Ausfallsicherheit, Effizienz und Verfügbarkeit der Anlagen, steigert die Produktionsleistung und kann helfen, Reparaturkosten zu vermeiden.

Prozessüberwachung

Drehmomentsensoren analysieren und überwachen kritische Prozesse in laufenden Produktionsabläufen, Sondermaschinen, Windenergieanlagen, Extruderanlagen sowie in Forschung und Entwicklung. Auch hochdynamische Prozesse können sichtbar und transparent gemacht werden. Dadurch können Produktverbesserungen auf bislang nicht möglicher Basis erreicht werden. Entwickler und Betreiber nutzen mit Drehmomentmessung effiziente diagnostische Werkzeuge zur Optimierung ihrer Prozesse.

Langzeithaltbarkeit und Robustheit

Berührungsfreie Sensoren messen mechanische Kräfte auf Basis magnetischer Effekte. Die Messung funktioniert unabhängig davon, ob die Welle von Luft, Öl, Wasser oder einem anderen Medium umgeben ist. Die Sekundärsensoren sind gekapselt, so dass sie selbst härtesten Umweltbedingungen, z.B. in der Luftfahrt oder in anspruchsvollen Prüfständen, problemlos standhalten.

Effizienzsteigerung

In der Fahrzeugentwicklung entscheidet das optimale Zusammenspiel aller Einzelkomponenten im Antriebsstrang über die Effizienz des Gesamtantriebs. Hierzu werden u.a. auf Prüfständen und in der Prototypenentwicklung in Testläufen verschiedenste Szenarien erprobt. Berührungslose Drehmomentsensoren ermöglichen hochpräzise Messungen direkt an Wellen.

Gewichtseinsparung

In Einsatzbereichen wie der Luftfahrt oder im Rennsport ist Gewichtseinsparung extrem wichtig. Mechanische Komponenten können durch intelligente Drehmomentsensorik nahezu ohne Bauteilaufwand stark aufgewertet werden. Diese Drehmomentsensoren ersetzen z. B. mechanische Überlastkupplungen (Torque Limiter) und erzielen so massive Gewichts-, Kosten- und Treibstoffeinsparungen.

B 2.2.5 Neue Anwendungen: Vorausschauende Wartung von Maschinen durch sensorbasierte Zustandsüberwachung – Condition Monitoring

Industrie 4.0 als Trend im Bereich der industriellen Produktion stellt einen Paradigmenwandel dar, der vor allem eine optimale Auslastung der Produktionsressourcen anstrebt.

Um solche selbst organisierenden Prozesse zu realisieren, müssen nicht nur die Anforderungen von außen, z. B. was soll wann wie oft gemacht werden, klar definiert sein, sondern auch die Verfügbarkeit der Produktionsressourcen und -prozesse. Insofern muss – idealerweise über einen Zeitraum von mehreren Monaten – im Voraus bekannt sein, welche Wartungsarbeiten an einer Maschine bzw. einem Prozess erforderlich sind, um die Verfügbarkeit sicher planen zu können.

Aber auch weitergehende Optionen sind denkbar: Ist eine Maschine nicht mehr in ihrem Optimalzustand, erreicht z. B. eine Bearbeitungsmaschine nicht mehr die höchste Präzision, so kann diese dennoch für andere Arbeiten verplant werden, wenn die erzielte Präzision dafür noch ausreichend ist.

Im Kern steht also eine Zustandsüberwachung jeder einzelnen Maschine bzw. jedes einzelnen Prozesses, um aus der Kenntnis dieses aktuellen Zustands heraus den Einsatz und die Wartung optimal und flexibel planen zu können.

Die Realisierung einer Zustandsüberwachung, hier z. B. einer Hydraulik-Anlage (Abb. 2.2-2), erfordert primär eine weitergehende Verknüpfung der Sensoren und Komponenten in einer Anlage, bzw. einem Teilprozess und die Bereitstellung der in einem Gesamtprozess erfassten Daten für alle Komponenten und Subsysteme. Dies erfordert vor allem die Digitalisierung der Sensorik, wobei neben den reinen Messdaten auch Metadaten bzw. weitere Merkmale auf Anforderung flexibel zur Verfügung gestellt werden müssen.

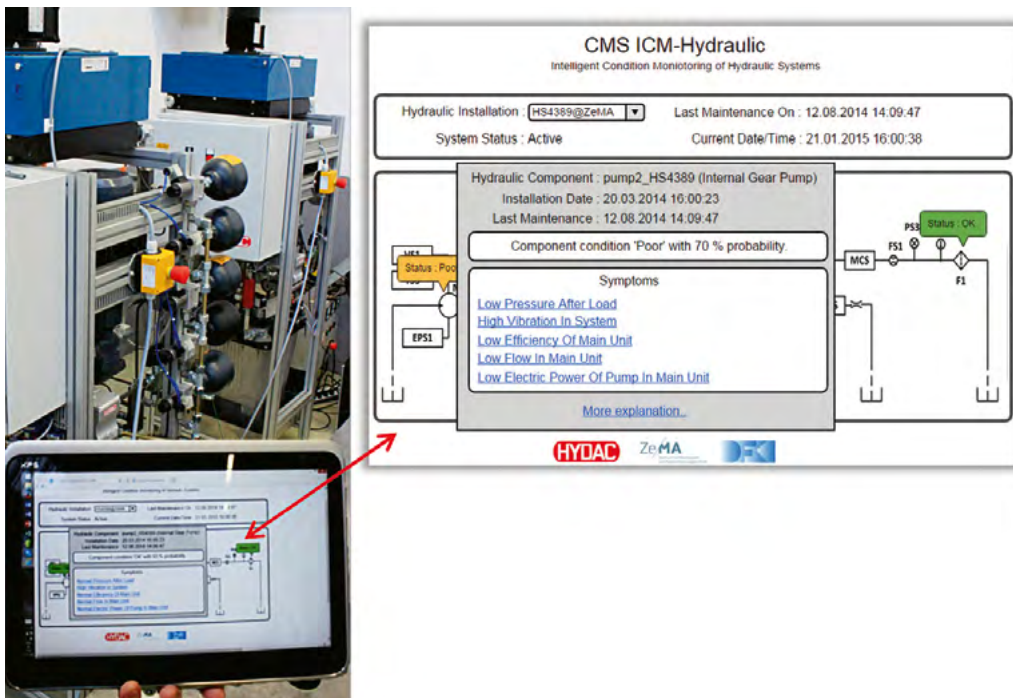


Abb. B2.2-2
Condition Monitoring von Hydraulik-Anlagen mittels kombinierter statistisch-semanticischer Analyse von Prozesssensordaten [ICMH-2017].

Dazu sind zusätzliche, teilweise neuartige Sensoren erforderlich, um insbesondere den Zustand von Anlagenkomponenten (verteilte Temperatur- und Vibrationssensoren, letztere mit integrierter spektraler Auswertung) und Betriebsstoffen (physikalischer und chemischer Zustand, Verunreinigung) zu erfassen.

Hierzu ist auch ein tiefgehendes Verständnis, z. B. durch entsprechende Modelle, erforderlich, wie sich geänderte Parameter, z. B. Viskosität und Säurezahl, einerseits auf den Prozess auswirken, aber auch durch was diese Prozesse hervorgerufen werden, um dies in die Bewertung des Anlagenzustands einfließen zu lassen [HEL-2015a], [HEL-2015-b].

Dieser Zustand muss dann geeignet nach außen kommuniziert, bzw. mit den externen Anforderungen abgeglichen werden. Hierfür ist Sensorik und Messtechnik sowie die Vernetzung verschiedener Maschinen und Anlagen erforderlich, damit der Zustand ausreichend genau bekannt ist [HEL-2014]. So kann eine Bearbeitungsmaschine zwar ihren inneren Zustand an Hand von z.B. Strom-, Drehzahl-, Vibrations- und Kraftsensoren erfassen, die aktuell erzielte Präzision erfordert aber die Rückkopplung, z.B. mit Messprozessen aus der Qualitätssicherung. Für die Planung von Wartungsarbeiten ist zudem der Status der Betriebsmittel, z.B. der Kühl-Schmierstoffe, erforderlich. Auftretende Fehler können bereits in einer Frühphase an Hand charakteristischer Signalmuster verschiedener Sensoren erkannt und identifiziert werden.

Dazu müssen häufig keine zusätzlichen Sensoren verbaut, sondern die vorhandenen Prozesssensoren weitergehend ausgewertet werden, z.B. durch Betrachtung von Signalschwankungen und sich verändernder Korrelationen zwischen Sensorsignalen. Auch der Ausfall einzelner Sensoren in der Prozesskette kann häufig kompensiert werden durch Verknüpfung der Messwerte anderer Sensoren, um zumindest einen Notbetrieb zu realisieren, ggfs. mit reduzierter Leistungsfähigkeit der Maschine bzw. des Prozesses.

B 2.2.6 Neue Anwendungen: Sensorsystem für Freileitungs-Monitoring

Die Aufgabenstellung zur Überwachung von Hochspannungsfreileitungen ergibt sich aus zu erwartenden Engpässen bei der Energieverteilung durch immer häufiger auftretende dezentrale Energieeinspeisungen mit erneuerbaren Energien, z.B. aus Wind- und Solarparks. Für derartige dezentrale Energieeinspeisungen sind wegen der stark schwankenden Übertragungsenergie die existierenden Transport- und Verteilungsnetze nicht ausgelegt. Zur Vermeidung von Neuinvestitionen besteht bei Spitzeneinspeisungen daher die Aufgabe, über vorhandene Freileitungen mehr als die projektierte elektrische Energie zu transportieren.

Die maximale Stromstärke wird u.a. durch den durch Erwärmung erzeugten maximal zulässigen Durchhang der Seile in den Spannungsfeldern begrenzt. Mit einer Neigungsmessung in jedem Spannungsfeld kann anhand der geografischen Daten der Freileitungstrasse der aktuelle Seildurchhang lokal berechnet und damit eine effektivere Betriebsführung ermöglicht werden.

Neben der Erfassung der Seilneigung in jedem Spannungsfeld muss der Aufbau einer Datenkommunikation zur Nutzung der Messwerte für die Betriebsführung von Freileitungen gewährleistet werden. Hierfür sind autarke nachrüstbare Funksensoren als „Messwertquellen“ und eine Cyber Physical Systems (CPS)-Struktur für die Datenkommunikation vorgesehen.

Eine wesentliche Forderung besteht darin, dass die Messtechnik vorrangig an existierenden Freileitungen einzusetzen ist. Die zu findende Lösung muss also nachrüstbar sein. Nach der Installation und Inbetriebnahme soll der Funksensorknoten eine sehr lange Lebensdauer, die sich an den Wartungszyklen für Freileitungen von 20 bis 40 Jahren orientiert, aufweisen. Daraus leitet sich zwingend die Forderung nach einer autarken Energieversorgung durch „Harvester“ ab.

Am Fraunhofer Institut IZM in Berlin wurde hierfür ein autarkes Seilüberwachungssystem als Demonstrator entwickelt [GRO-2015].

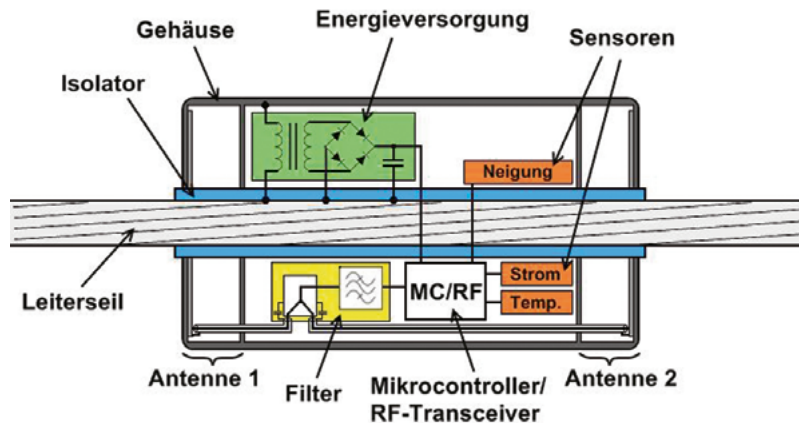
Autarker Funksensorknoten

Das Kernstück des Freileitungs-Monitoring-Systems sind Funksensoren. Entsprechend der Aufgabenstellung ist mit dem Sensor die Seilneigung, die Seilverdrillung, die Temperatur in der Leitung und der fließende Strom zu messen. Hierfür waren die Sensorelemente und die weiteren Baugruppen für den kompletten Funksensorknoten (Abb. B2.2.3) zu entwickeln.

Das Gehäuse des Funksensorknotens in Abb. B2.2-4 muss neben den üblichen Funktionen der sicheren, zuverlässigen und funktionsgerechten Aufnahme aller Komponenten zusätzlich den Anforderungen an

- Hochstrom- und Hochspannungsfestigkeit,
- Blitzschlagfestigkeit und
- rauen Witterungsbedingungen

gerechtfertigt werden. Daher wurde zum besonderen Schutz der Elektronik ein zusätzliches inneres metallisches Gehäuse – die Zentraleinheit – angeordnet. Spezialdurchführungen

**Abb. B2.2-3**

Schematische Darstellung des Funksensorknotens [GRO-2015].

für die Energieversorgung und den HF-Anschluss der Doppelschlitzentennen sichern die Funktionsfähigkeit der Elektronik unter den Betriebsbedingungen der Freileitungen ab.

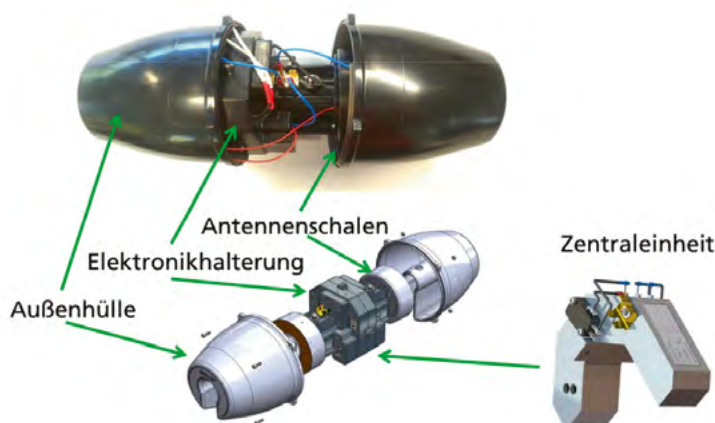
Energieversorgung

Freileitungen stehen stets unter Spannung. Damit rücken kapazitive Harvester-Prinzipien in den Fokus zur Energiegewinnung für den Funksensorknoten. Die Dimensionierung des kapazitiven Harvesters erfolgte als Optimierungsaufgabe zwischen den Abmessungen der Harvester-Schalen und dem möglichen Energieverbrauch des Knotens. Die Energieversorgung wird durch eine Stützbatterie und durch die Integration von Supercaps zur Abfederung von Stromspitzen bei Nutzung der HF-Baugruppen komplettiert.

Datentransfer- und Kommunikationskonzept

Für den Messdatentransfer wird eine kettenförmige, parallele Netzwerkstruktur benutzt. Der jeweils erste Funksensorknoten sendet seinen Datensatz in Richtung der Kette. Der Datensatz wird vom nächsten Funksensorknoten empfangen. Dieser fügt dem empfangenen Datensatz seine Messdaten hinzu und sendet den neuen erweiterten Datensatz an den dritten Knoten in der Kette. Dieser empfängt, ergänzt und sendet in der Kette an den nächsten Knoten weiter und so fort bis zur Funkbasis im Umspannwerk oder zu einem anderen Dateneinspeisepunkt der Leittechnik des Netzbetreibers.

2014 wurde auf Basis dieses autarken Sensorsystems eine Pilotinstallation mit 59 Funksensorknoten an einer 110 kV-Freileitung in Betrieb genommen. Diese sendet im 15 Minuten Takt Messwerte an die Basisstation. Dieses System wird vom Fraunhofer ENAS und IZM in Berlin in Kooperation mit der MITNETZ Strom GmbH evaluiert [AST-2015].

**Abb. B2.2-4**

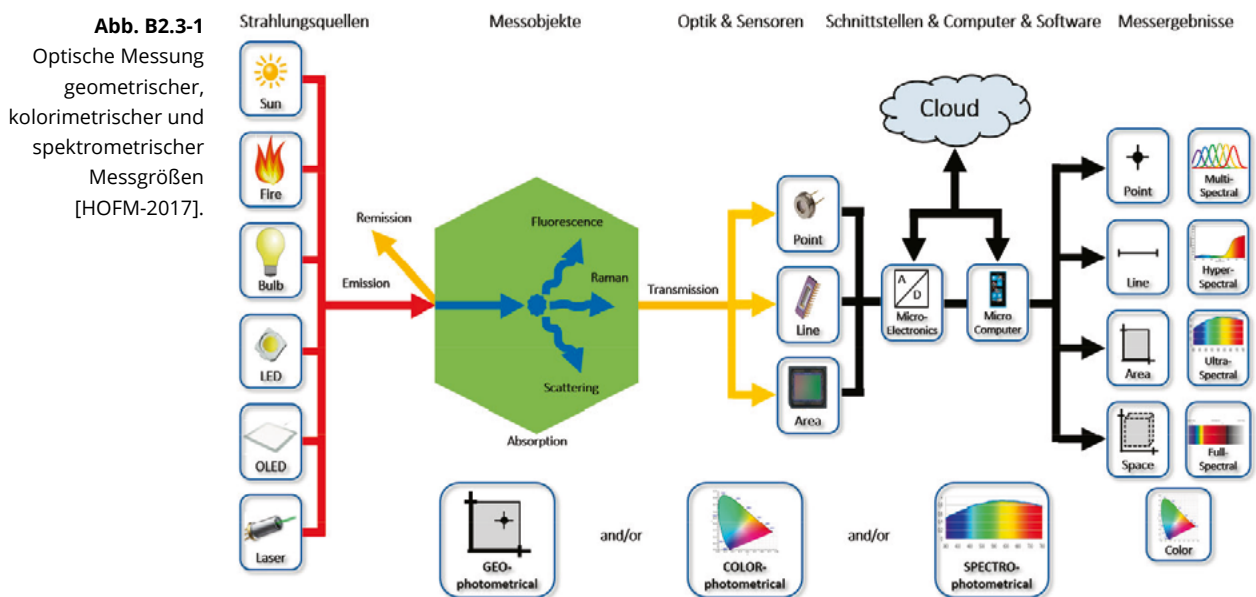
Explosionsdarstellung des autarken Funksensorknotens [GRO-2015].

B 2.3 Optische Messgrößen

B 2.3.1 Photonische Sensoren und Messtechnik

Das Jahr 2015 war das internationale Jahr des Lichtes – International Year of Light and Light-based Technologies (IYL2015) der UNESCO [UNE-2015]. Das 19. Jahrhundert war das Jahrhundert der industrialisierten zentralisierten mechanistischen Arbeitsmaschinen (Mechanik und Dampfmaschine). Das 20. Jahrhundert war das Jahrhundert der industriellen Produktivitätstreiber Automobil und der industriellen Informationsmaschinen (Elektronik und Großrechner).

Das 21. Jahrhundert wird das Jahrhundert der industriell genutzten Photonik sein (Abb. B3.2-1).



Vorreiter der jüngsten Entwicklungen in der Photonik sind die Nobelpreisträger Charles H. Townes, Nikolai G. Bassow und Alexander M. Prochorow (Maser-Laser-Technologie, 1967) sowie die Nobelpreisträger Herbert Kroemer, Jack Kilby und Schores I. Alfjorow (Mikroelektronische Halbleiterheterostrukturen, 2000).

Vereinfachte Zusammenstellungen zum aktuellen Stand der industrialisierten Photonik zeigen die Broschüre „Photonik: Technische Anwendungen des Lichts – Infografiken“ [SÜP-2015] sowie die Darstellungen in [ALS-2016].

Die wissenschaftlich-technische Entwicklung vollzieht sich von industrialisierten Arbeitsmaschinen über industrialisierte Informations- und Kommunikationsmaschinen zu industrialisierten Kollaborationsmaschinen. Bereits erkennbare Vorboten sind vernetzte, mobile Computer und Cloud-Computing

B 2.3.1.1 Photonische Messtechnik und Qualitätssicherung

Bei der optischen Messtechnik für Forschung, Entwicklung und Qualitätssicherung sind zwei Anwendungsfälle zu unterscheiden:

1. die Bestimmung der optischen Messgrößen an sich und
2. die Messung beliebiger Parameter mit optischen Messmitteln.

Praktische Beispiele sind zu

- 1) die Messung von lichttechnischen Messgrößen wie Lichtstärke, Leuchtdichte, Lichtstrom, Lichtmenge und Beleuchtungsstärke (Tab. B2.2), die Messung von photonisch-energetischen Messgrößen wie Strahlungsenergie, -fluss und -flussdichte sowie Strahlstärke und -dichte (Tab. B2-3, umseitig).

Praktische Beispiele sind zu

- 2) die Messung von nicht-optischen Basismessgrößen des Internationalen Einheitensystems SI (Le Système internationale d'unités) wie Länge, Masse, Zeit, Stromstärke, Temperatur und Stoffmenge sowie davon abgeleitete Messgrößen mit photonischen Messgeräten. Photonische Messgeräte sind in der Regel dadurch gekennzeichnet, dass die Messwerte (Ausgangsgrößen) aus Abbildungen gewonnen werden. Deshalb spielt die Bildverarbeitung hier eine entscheidende Rolle.

Bemerkenswert ist in diesem Zusammenhang, dass die bisher weltweit präzisesten staatlichen Normale für Zeitmessungen auf der Basis von Atom-Uhren zukünftig durch die 100-fach präzisere Photon-Uhren ersetzt werden können [PTB-2016].

Größe	Lichtstärke	Leuchtdichte	Lichtstrom	Lichtmenge	Beleuchtungsstärke
Einheit	Candela	Candela je Quadratmeter	Lumen	Lumensekunde	Lux
Kurszeichen	cd	cd · m ⁻²	lm = cd · sr	lm · s	lx = lm · m ⁻²
Definition	Eine Candela ist die Lichtstärke, die ein schwarzer Körper der Fläche (1/600.000) m ² bei der Erstarrungstemperatur des Platins beim Druck 101.325 N · m ⁻² senkrecht zu seiner Oberfläche ausstrahlt.	Eine Candela je Quadratmeter ist die Leuchtdichte der Fläche 1 m ² , die in Richtung der Flächennormale mit der Lichtstärke 1 cd leuchtet (Primärstrahler). Ein Lumen ist der Lichtstrom, den eine punktförmige Lichtquelle	der Lichtstärke 1 cd gleichmäßig in den Raumwinkel 1 sr ausstrahlt.	Eine Lumensekunde ist die ausgesandte oder aufgefangene Lichtmenge des 1 s dauernden Lichtstroms 1 lm.	Ein Lux ist die Beleuchtungsstärke auf der Fläche 1 m ² , auf die der Lichtstrom 1 lm gleichmäßig auftrifft (Sekundärstrahler).
Symbol	I_v	L_v	Φ_v	Q_v	E_v
Beziehung	<i>Basisgröße</i>	$L_v = I_v/A$	$\Phi_v = I_v \Omega$	$Q_v = \Phi_v t$	$E_v = \Phi_v/A$
Erläuterung					

Tab. B2-2
Photonisch-Lichttechnische Messgrößen [HOFM-1983]

Weiterhin ist bemerkenswert, dass elektromechanische Dehnmessstreifen neuerdings durch photomechanische Dehnmessstreifen ersetzt werden können, weil sie robuster und wesentlich genauer sind [HBM-2016]. In den folgenden Kapiteln wird beispielgebend auf die photonische Messung geometrischer, kolorimetrischer und spektrometrischer Messgrößen eingegangen (Abb. B2.3-1).

Größe	Lichtstärke	Leuchtdichte	Lichtstrom	Lichtmenge	Beleuchtungsstärke
Einheit	Joule	Watt	Watt je Steradian	Watt je Quadratmeter und Steradian	Watt je Quadratmeter
Kurszeichen	J	W	$W \cdot sr^{-1}$	$W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$	$W \cdot m^{-2}$
Definition	Ein Joule ist die Strahlungsenergie, die der mechanischen Arbeit (Energie) 1 Joule äquivalent ist.	Ein Watt ist der Strahlungsfluss, der der mechanischen Leistung 1 Watt äquivalent ist.	Ein Watt je Steradian ist die Strahlstärke, die im Raumwinkel 1 sr den Strahlungsfluss 1 W erzeugt.	Ein Watt je Quadratmeter und Steradian ist die Dichte des aus der Fläche 1 m ² in Richtung der Flächennormalen in den Raumwinkel 1 sr austretenden Strahlungsflusses 1 W.	Ein Watt je Quadratmeter ist die Strahlungsflussdichte der Fläche 1 m ² , durch die (von der) der Strahlungsfluss 1 W hindurchtritt (ausgesendet oder empfangen wird).
Symbol	W_e	Φ_e	I_e	L_e	ψ_e
Beziehung	$W_e = \Phi_e t$	$\Phi_e = I_e / A$	$I_e = \Phi_e / \Omega$	$L_e = I_e / A$	$\psi_e = \Phi_e / A$
Erläuterung	<p>Ω Raumwinkel ϵ Ausstrahlungswinkel $I_e = 1 W \cdot sr^{-1}$ $\Omega = 1 sr$ $A = 1 m^2$ $\Phi_e = 1 W$ $\Psi = 1 W m^{-2}$ $W_e = 1 J$ Index e bedeutet visuell</p>				

Tab. B2-3
 Photonisch-Energetische Messgrößen
 [HOFM-1983]

B 2.3.1.2 Einsatzgebiete der optischen Messtechnik und Qualitätssicherung

Die anspruchsvollen Zielstellungen für die Wirtschaftsentwicklung der nächsten Jahre sind eng mit der zu beschleunigenden Qualitätsentwicklung verbunden. Die Qualität beeinflusst auf vielfältige Weise die Kontinuität und den Rhythmus der Produktion, die Produktionskosten, den Produktionsumfang, die Arbeitsproduktivität und den Nutzeffekt der Erzeugnisse bei ihrer Anwendung oder ihrem Verbrauch.

Hohe Produktqualitäten können insbesondere erzielt werden, wenn die Messtechnik unmittelbar in den industriellen Reproduktionsprozess integriert ist. Durch steigende Qualitätsansprüche werden ständig neue Anforderungen an die Leistungsfähigkeit der Messtechnik gestellt.

Besondere Erwartungen werden daher aktuell an die optische Messtechnik und Qualitätssicherung gestellt. Das Anwendungsgebiet reicht von Industrie, Biologie, Medizin, Sicherheit, Umwelt, Verwaltung bis in das tägliche Leben.

B 2.3.1.3 Hyperspektrale Mikrosensorik

Die hyperspektrale Mikrosensorik verbindet die Messung geometrischer Messgrößen mit spektrometrischen Messgrößen. Geometrische Messgrößen beschreiben die Formen der Messobjekte, spektrometrische Messgrößen beschreiben die Zusammensetzungen der Messobjekte.

Die Zusammensetzungen der Messobjekte werden beispielsweise durch ihre spektrometrischen Charakteristika beschrieben, die in umfangreichen digitalen Katalogen durch tausende spektrometrische Referenzgraphen erfasst sind [JEG-2016]. Die Bewertung der Messergebnisse erfolgt durch geometrische und spektrometrische Bildverarbeitung.

- Bei der geophotometrischen Bildverarbeitung werden in der Regel Intensitäten für jedes Pixel des Objektbildes $I(x,y)$ aufgenommen.
- Bei der spektrophotometrischen Bildverarbeitung werden in der Regel Intensitäten für

jedes Pixel des Objektbildes für ausgewählte Wellenlängen $I(\lambda)$ aufgenommen und dem Pixelort zugewiesen, wenn die ausgewählten Wellenlängen für die Beschreibung der Zusammensetzung des Messobjektes geeignet sind (Tab. B2-4).

Im Ergebnis werden grafische Darstellungen bevorzugt, die sowohl die geometrischen als auch die spektrometrischen Messdaten $I(x,y,\lambda)$ wiedergeben (Abb. B2.3-2).

Für die kombinierte geophotometrische und spektrophotometrische Messtechnik haben sich drei Verfahren etabliert, die in Abb. B2.3-3 dargestellt sind.

Bei der kombinierten Messwerterfassung werden die aufgenommen geometrischen (Ortswerte) um die zu jedem Ortspixel gehörenden spektrometrischen (Materialwerte) Informationen ergänzt.

Tab. B2-4
Gegenwärtige Randbedingungen für kombiniert geometrische und spektrometrische Messtechnik und Bildverarbeitung – in Anlehnung an [GIL-2015].

Modus	Anzahl der spektralen Bänder	Spektrale Auflösung	Anwendungen	Verfügbarkeit
Grauwert	keine	keine	erkennt Helligkeitsverteilungen	jetzt
Multispektral	1 bis 100	niedrig	erkennt Festkörper und Flüssigkeiten	jetzt
Hyperspektral	100 bis 1000	mittel	erkennt und beschreibt Flüssigkeiten	jetzt
Ultraspektral	mehrere 1000	hoch	erkennt und beschreibt Festkörper, Flüssigkeiten und Gase	sich entwickelnde Technologie, noch kosten- und rechenintensiv
Vollspektral	kontinuierliches Spektrum von UV bis IR	sehr hoch	erkennt und beschreibt Festkörper, Flüssigkeiten und Gase	zukünftige Technologie und Datenverarbeitung

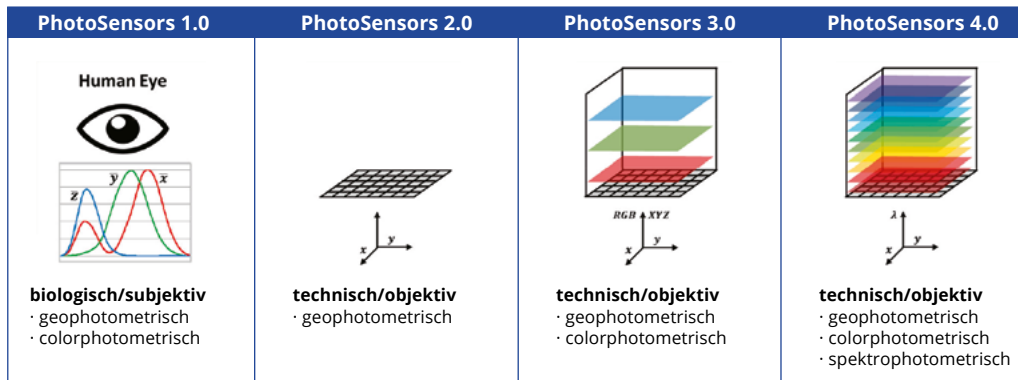


Abb. B2.3-2
Entwicklungstendenzen der kombinierten geophoto- und spektrophotometrischen Messtechnik [HOFM-2017].

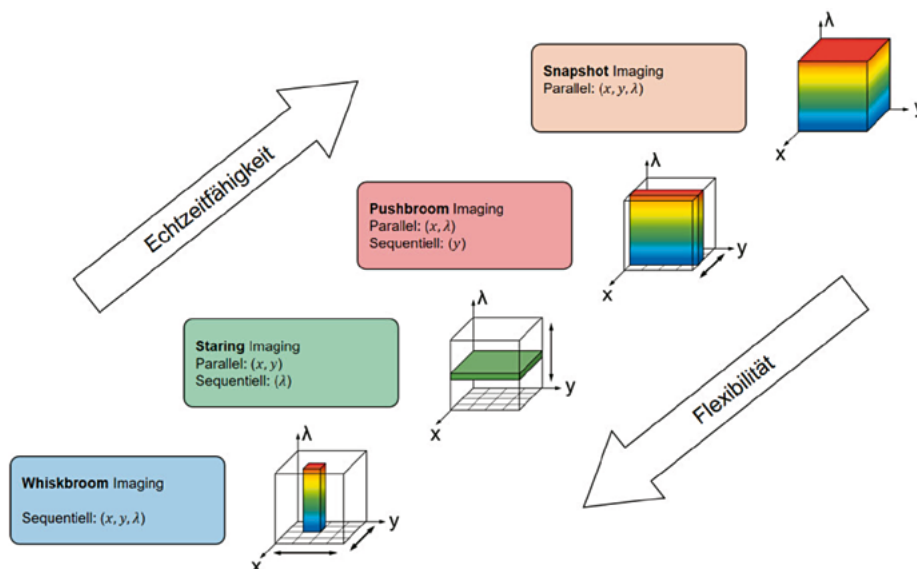
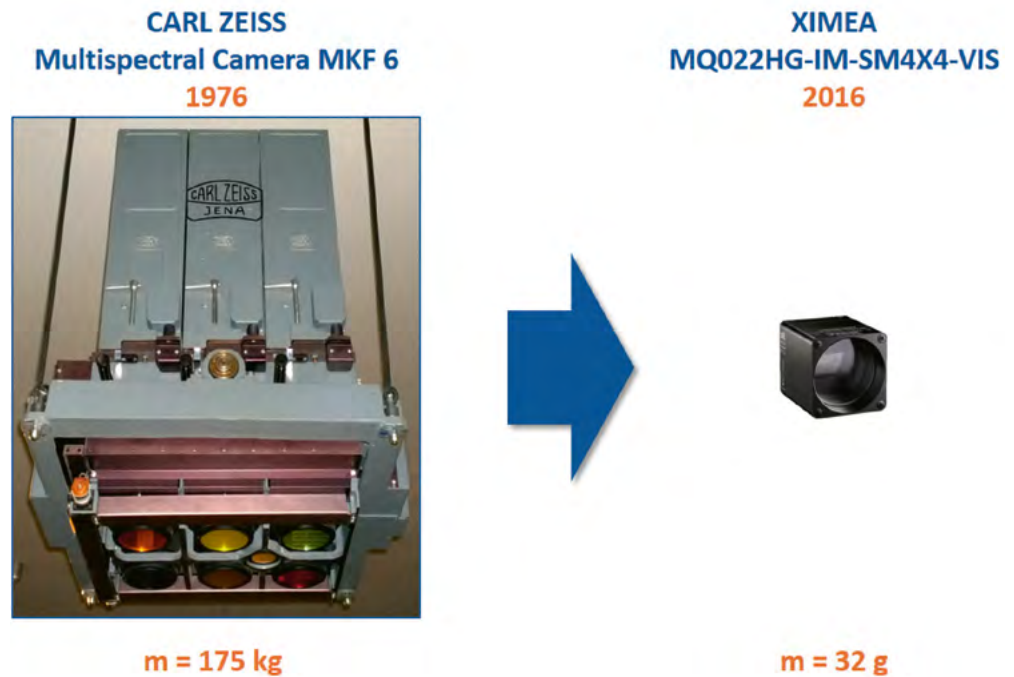


Abb. B2.3-3
Verfahren für die kombinierte geophotometrische und spektrophotometrische Messwertgewinnung [HOFM-2017].

B 2.3.1.4 Entwicklungsansätze und Forschungstrends

Die Entwicklungsansätze und Forschungstrends der nächsten Jahre setzen in Übereinstimmung mit der Hightech-Strategie 2020 folgende Tendenzen fort.

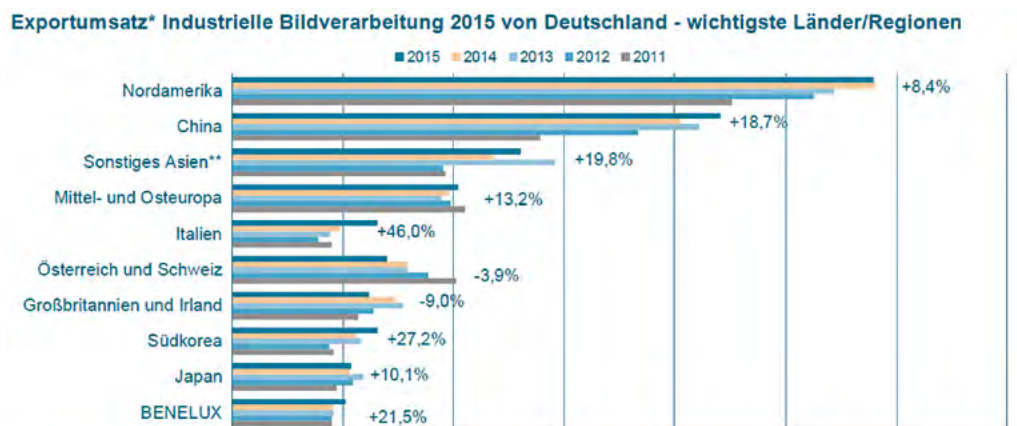
Abb. B2.3-4
Historische Entwicklungstendenzen von Multispektralkameras [HDZX-2017].



Wesentliche Forschungs- und Entwicklungsansätze sind erkennbar:

- Umfassende Miniaturisierung & Modularisierung bei der Technisierung von photonischen Messungen,
- Ablösung konventioneller thermischer Leuchten durch energiesparende miniaturisierte LEDs und OLEDs,
- Ablösung konventioneller kompakter Sensoren für photonische Messgrößen durch Miniaturisierung und Standardisierung von Sensoren zur Messung von ein- und mehrdimensionalen Formen, natürlichen und technischen Farben sowie Multi-, Hyper-, Ultra- und Voll-Spektren in sichtbaren VIS und nicht sichtbaren UV- und IR-Bereichen elektromagnetischer Wellen,

Abb. B2.3-5
Vergleich des Umsatzes der Bildverarbeitung in Deutschland und der Exporte nach Regionen und Jahren [WEN-2015].



* Umsatz teilnehmender Unternehmen
** bzw. nicht unterteilt nach Ländern

Quelle: VDMA Robotik+ Automation

- Modularisierung und Vereinheitlichung von Software für digitale Bildverarbeitung zur Messung von Formen, Farben und Spektren
- Erhöhung der Einheitlichkeit und Richtigkeit von photonischen Messungen durch Rückführung der Messungen auf metrologische Normale,
- Ablösung konventioneller ortsfester Rechner durch mobile Smartpads, Smartphones und Smartwatches,
- Standardisierung von Schnittstellen (Interfaces) zur Erhöhung der Kompatibilität und Flexibilität von Hardware- und Software-Modulen bei Applikationen.

Machine Vision Germany total turnover 2005 - 2016*

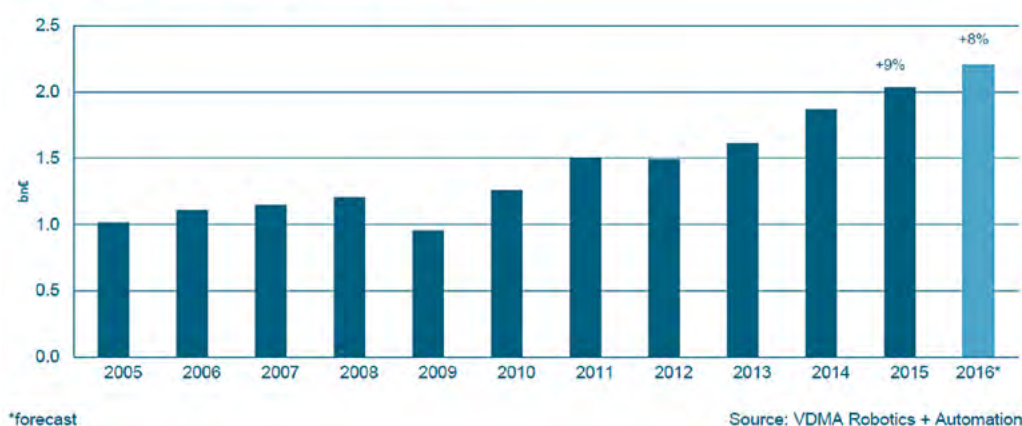


Abb. B2.3-6
Gesamtumsatz der Bildverarbeitung in Deutschland (Inland+ Export) nach Jahren [WEN-2015].

Herausragende Beispiele für diese Entwicklungstendenzen sind:

1. Die Multispektralkameras von CARL ZEISS (1976) und XIMEA (2016) mit ihrer Massereduzierung in Größenordnungen (Abb. B2.3-4).
2. Die Nutzung von digitalen Plattformen für das Selbststudium (Self-Service-Learning, SSL) mit offenen Aus- und Weiterbildungsquellen (Open Educational Resources, OER) auf den Gebieten der optischen Messtechnik, Qualitätssicherung und industriellen Bildverarbeitung. Praktische Beispiele reichen von bekannten Großfirmen bis hin zu Start-Ups.
3. Überdurchschnittliche Steigerung des Umsatzes in digitaler Bildverarbeitung bezogen auf die volkswirtschaftlichen Wachstumsraten (Abb. B2.3-5 und B2.3-6). So ist die digitale Bildverarbeitung im Jahresumsatz von 1995 mit etwa 200 Mio. EUR bis 2015 auf knapp 2 Mrd. EUR gewachsen

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die photonische Messtechnik und Qualitätssicherung gemeinsam mit der digitalen Transformation und der globalen Vernetzung eine neue höhere Stufe der Entwicklung der Produktivkräfte einleitet.

B 2.3.2 Pyrometrie – Berührungslose Temperaturmessung

In nahezu allen Industrieprozessen und weiten Bereichen der naturwissenschaftlichen und technischen Forschung hängt eine hohe Qualität und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse von der genauen Kenntnis der Temperatur und gegebenenfalls von deren Regelung und Stabilisierung ab.

Allerdings führt eine präzise Temperaturmessung im Kontaktmessverfahren oft zu massiven Einschränkungen in Hinblick auf die Geschwindigkeit und Flexibilität des Prozesses. Hinzu kommt, dass Kontaktthermometer direkt den Prozessbedingungen ausgesetzt werden müssen, was oft schwer erfüllbare Anforderungen an die Thermometer stellt.

Demgegenüber hat die Pyrometrie, die berührungslose Temperaturmessung, mehrere Vorteile:

- Die realisierbaren Messzeiten können in den meisten Fällen deutlich unter 100ms liegen. Dadurch besteht die Möglichkeit, auch an bewegten Objekten zu messen und einen hohen Durchsatz zu erreichen.
- Das Messobjekt wird nicht beeinflusst, dementsprechend ist weder eine Unterbrechung der Prozesskette notwendig noch kommt es zur Verfälschung von Messdaten aufgrund von Wechselwirkungen zwischen Sensor und Messobjekt.
- Durch die Trennung von Messgerät und Messobjekt können extreme Temperaturen gemessen werden, ohne die Komplexität (und Kosten) des Messgerätes zu erhöhen.
- Aufgrund der fehlenden mechanischen Einflüsse auf den Sensor und die Vermeidbarkeit von Verschmutzungen können Geräte nahezu wartungsfrei betrieben werden, so dass z. B. auch der Einsatz in der Raumfahrt möglich ist.

Daher ist die Pyrometrie heutzutage ein weit verbreitetes Verfahren. Dabei wird der Umstand ausgenutzt, dass jeder Gegenstand aufgrund seiner vom absoluten Nullpunkt verschiedenen Temperatur Wärmestrahlung aussendet. In idealisierter Form entspricht dies einem planckschen schwarzen Strahler, dessen kontinuierliches Emissionsspektrum nur von der Temperatur abhängt und sich aus dem Planckschen Strahlungsgesetz ergibt. Die gesamte emittierte Strahlungsleistung beträgt gemäß dem Stefan-Boltzmann-Gesetz

$$P_{ges} = \varepsilon_{eff} \sigma A T^4$$

wobei σ mit ca. $(5.6703 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4})$ die Stefan-Boltzmann-Konstante, A die strahlende Fläche und T die absolute Temperatur darstellt. Das Emissionsvermögen ε_{eff} beträgt für einen idealen schwarzen Strahler 1, für reale Materialien bewegt es sich zwischen 0 und 1 und hängt im Allgemeinen von der Wellenlänge ab. Ist diese Abhängigkeit im Messbereich gering, spricht man von einem „grauen Strahler“.

Im einfachsten Fall eines Pyrometers wird die Strahlungsquelle als nahezu idealer schwarzer Strahler angenommen. Bei vielen Isolatoren als Messobjekt führt bereits diese Methode zu guten Messergebnissen. In diesem Fall ist eine schmalbandige Messung der Strahlungsleistung ausreichend, die meist über optische Filter realisiert wird. Alternativ kann mit Hilfe eines breitbandigen Sensors die Gesamtstrahlungsleistung gemessen werden, aus der sich gemäß dem Stefan-Boltzmann-Gesetz die Temperatur ergibt.

Verbesserungs- und Entwicklungsmöglichkeiten

Eine deutliche Verbesserung für verschiedene Materialien kann durch die Berücksichtigung eines im Messbereich wellenlängenunabhängigen Emissionsvermögens erzielt werden. Diese Kalibrierung kann mit Hilfe eines Kontaktthermometers oder auf Basis bekannter Tabellenwerte erfolgen. Um für einen möglichst flexiblen Einsatz des Sensors eine solche Kalibrierung zu vermeiden, können die Emissionsleistungen in zwei separaten Abschnitten des Emissionsspektrums gemessen werden. Durch Quotientenbildung lässt sich ebenfalls die Temperatur bestimmen, wobei keine Kenntnis des Emissionsvermögens notwendig ist, solange es für beide Abschnitte (nahezu) denselben Wert annimmt.

Ebenso kann über die Bestimmung der Lage des Emissionsmaximums unabhängig vom Emissionsvermögen die Temperatur gewonnen werden, solange das Emissionsvermögen (nahezu) wellenlängenunabhängig ist. Allerdings ist hierzu eine komplexere wellenlängenabhängige Messung des Emissionsspektrums notwendig.

Im Falle einer solchen spektral aufgelösten Messung ist prinzipiell die Temperatur beliebiger Materialien bestimmbar, sofern die Emissionscharakteristik bekannt ist. Durch Speicherung der Messdaten kann auch eine nachträgliche Auswertung erfolgen, die mit Materialanalysemethoden kombiniert werden kann, z. B. im Falle der Entnahme von Proben in der Raumfahrt.

Die wesentlichen Kenngrößen eines Strahlungssensors sind die Zeitkonstante τ , die empfindliche Fläche A sowie die Empfindlichkeit, die zur besseren Vergleichbarkeit verschiedener Sensortypen als spezifische Detektivität D^* angegeben wird. D^* stellt dabei die reziproke Strahlungsleistung, welche einem Signal-Rausch-Verhältnis von 1 entspricht, normiert auf Integrationsbandbreite und Sensorfläche dar.

Während τ die maximale Messfrequenz beschränkt, gibt D^* die Genauigkeit der Messung vor. Da sich beide Größen jeweils auf Kosten der anderen optimieren lassen, können je nach Anwendungsfall verschiedene Sensorentwürfe vorteilhaft sein. Dies gilt ebenfalls für die Sensorfläche A . Während ein größeres A prinzipiell eine höhere Empfindlichkeit ermöglicht, wird die Gefahr erhöht, Bereiche außerhalb des Messobjektes zu erfassen und damit das Messergebnis zu verfälschen.

Oft wird zur Abbildung einer möglichst kleinen Objektfläche eine angepasste Optik eingesetzt. Die Anforderungen an diese Optik steigen mit der Fläche A deutlich an, die daher starken Einfluss auf die Kosten des Sensors haben kann. Da A für eine gegebene Optik und angestrebte Messfläche in der Objektebene die maximale Messentfernung begrenzt, ist in vielen Anwendungsfällen eine möglichst kleine Fläche vorteilhaft.

Dementsprechend werden Pyrometriesensoren ständig weiterentwickelt. Insbesondere Anwendungen, bei denen sehr hohe Detektivitäten bei kleinen Sensorflächen mit geringen Zeitkonstanten kombiniert werden müssen, erfordern angepasste Sensorentwürfe.

Aufgrund der geringeren Strahlungsleistung sind hohe Empfindlichkeiten besonders für Sensoren notwendig, die auch Temperaturen unter 150°C präzise messen sollen. Für diesen Bereich kommen Sensoren zum Einsatz, die im mittleren und fernen Infrarotbereich empfindlich sind.

Gegenüber den im kurzwelligen Bereich eingesetzten Photodetektoren haben thermische Sensoren hier deutliche Vorteile. Bislang werden zumeist thermoelektrische oder pyroelektrische Sensoren verwendet. Obwohl pyroelektrische Sensoren prinzipiell eine hohe Leistungsfähigkeit erreichen können, haben sie den Nachteil einer fehlenden Empfindlichkeit für konstante Signale, so dass im Gerät ein mechanischer Modulator integriert werden muss. Daher werden solche Sensoren zunehmend seltener eingesetzt.

Bolometer wiederum sind vergleichsweise empfindlich gegenüber thermischem Driften und müssen daher üblicherweise mittels mechanischer Blenden abgeglichen werden. Insbesondere im Vergleich zu thermoelektrischen Sensoren ist der Dynamikbereich eingeschränkt und zudem nicht linear, so dass eine Kalibrierung erforderlich ist.

Im Bereich kostengünstiger Einzelsensoren, die eine hohe Messgenauigkeit erzielen sollen, sind daher Thermoelemente sehr verbreitet, wie sie zum Beispiel am Leibniz-Institut für Photonische Technologien entwickelt und gefertigt werden.

Aufgrund der höheren Flexibilität bzgl. der Designgeometrie, verbesserter mechanischer Stabilität besonders bei kleinen Chipgrößen und der Möglichkeit, die Detektivität weiter zu steigern, werden zukünftige thermoelektrische Sensoren zunehmend in SMM-Technologie (surface-micromachining) hergestellt. Dies eröffnet den Sensoren neue Einsatzmöglichkeiten, die sich über die Pyrometrie hinaus z.B. auch auf Felder der Gesundheits- und Umwelttechnologien erstrecken.

B 2.3.3 Neue Anwendungen: Bildauflösende Farbmesssysteme

Die Charakterisierung von Lichtquellen bezüglich ihrer ortsabhängigen radiometrischen, photometrischen und farbmtrischen Eigenschaften gewinnt insbesondere mit dem Einsatz von LED an Bedeutung.

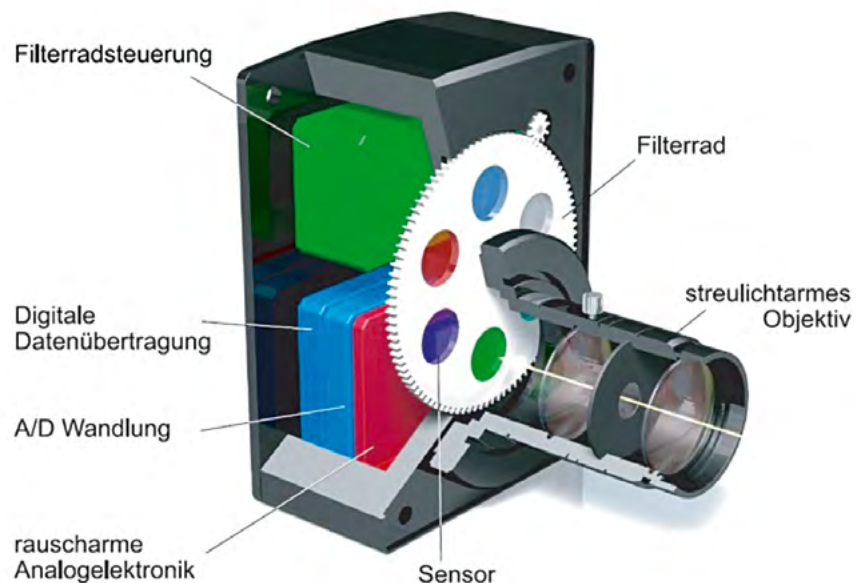
Die Notwendigkeit einer farbmtrischen Charakterisierung, also die Ermittlung von Kennwerten, welche den Farbeindruck des Spektrums einer Lichtquelle auf einen menschlichen Betrachter quantitativ beschreiben, ist für die Entwicklung, die Produktion und die Endabnahme von lichttechnischen Baugruppen, für die Leuchten-, KFZ-, Display- Industrie und andere Zweige unverzichtbar.

Für die orts aufgelöste photometrische und farbmtrische Charakterisierung von leuchtenden Objekten kommen entsprechend qualifizierte Kamerasysteme als Messgeräte zum Einsatz. Die Charakterisierung von farbmtrischen Eigenschaften erfolgt oft durch die Bestimmung von Normfarbwerten (bzw. Normfarbwertanteilen CIE_{xy}). Standard-Farbkameras mit CCD- oder CMOS-Farbmtrizen sind dafür nicht einsetzbar, da deren Farb Räume nicht in die normgerechten Farb Räume transformierbar sind.

Deshalb werden hier Kamerasystem genutzt, die die einzelnen Farbkanäle sequentiell erfassen. Dazu werden im Strahlengang nacheinander Filter eingeschaltet, die die entsprechend erforderlichen spektralen Transmissionen zur Verfügung stellen. Dies können mechanische Anordnungen, z. B. ein Filtrerrad (Abb. B 2.3-7) oder elektrisch durchstimmbare Anordnungen, z. B. ein durchstimmbarer Flüssigkristallfilter (Abb. B 2.3-8) sein.

Mit einer Filtrerradkamera wird das bekannte Dreibereichsmessverfahren, Messen der Farbwerte X, Y, Z, orts aufgelöst realisiert. Die genormten spektralen Empfindlichkeiten (CIE 1931) werden durch drei, vier oder mehr Filter im Filtrerrad und geeignete Matrizierung der N Kanäle auf die drei Farbwerte für jedes Pixel im Bild realisiert. Dazu muss jeder Filter eine spezifische spektrale Transmission aufweisen, die gemeinsam mit der spektralen Empfindlichkeit der Sensormatrix und spektralen Transmission des Objektivs die gewünschte spektrale Transmission insgesamt ergibt. Weiter kommen Kombinationen unterschiedlicher Farbgläser mit unterschiedlichen Dicken zum Einsatz.

Abb. B2.3-7
Filtrerradkamera
[TTG-2017].



Das Filterdesign ist ein Optimierungsprozess, der auf den spektralen Transmissionskurven der Glasschmelzen aufsetzt, eine Auswahl an Glassorten erzeugt und dann für die ausgewählten Gläser die optimalen Dicken bestimmt. Dies erfordert die Suche eines optimalen

Ergebnisses in einem hochdimensionalen nichtlinearen Raum. Hierfür stehen moderne mathematische Mittel zur Verfügung. Wenn man die Variabilität der Sensoren, der Objektive und der Glasschmelzen und dies auch für unterschiedliche Feldwinkel der Objektive beachtet, d. h. natürlich auch messtechnisch erfasst, kann man hochwertige Messsysteme bauen. Diese erreichen die gleichen Parameter wie Standardfarbmesssysteme, liefern aber nicht einen Farbmesswert (X,Y,Z) sondern ein Bild, d. h. z. B. 10^6 solcher Messwerte.



Abb. B2.3-8
Bildauffösendes
Farbmesssystem mit
durchstimmbarem Filter
[TTG-2017].

Die Realisierung der gewünschten spektralen Transmissionen mit solchen im Strahlengang positionierten Filtern ist auch mit hohem Aufwand nur mit endlichen Messunsicherheiten realisierbar. Weiterhin sind mit einem Filtersatz in einem Filterrad die Spektralwertfunktionen festgelegt. Die genormten Spektralwertfunktionen sind aber bekanntermaßen für viele Anwendungsfälle, insbesondere für LED-Beleuchtungen, unzureichend. In den letzten Jahren wurden hier neue Spektralwertfunktionen bestimmt, die besser mit den menschlichen Empfindungen harmonisieren [POL-2014].

Mit durchstimmbaren Filtern [CAM-2006] im Strahlengang lassen sich vielkanalige Aufnahmen gewinnen, aus denen die Spektren geschätzt und daraus genauere Farbwerte, insbesondere auch nach beliebigen Spektralwertfunktionen bestimmt werden können. Dazu sind vielfältige Algorithmen entwickelt worden [RUG-2014], die in den Bereich der inversen Probleme führen. Die durchstimmbaren Filter ändern ihre Eigenschaften für schräg durchgehende Lichtstrahlen beträchtlich. Deshalb werden dafür spezielle Objektive entwickelt, die bildseitig telezentrische Strahlengänge realisieren.

B 3 Chemische und medizinische Messgrößen

B 3.1 Sensoren für Gasmessung und Stoffkonzentrationen

B 3.1.1 Übersicht, Einteilung

Die Bedeutung chemischer Messgrößen wächst ständig. Waren es früher zumeist sicherheitsrelevante Fragestellungen, primär Explosionsschutz und Vergiftungsschutz, erobern chemische Sensoren und Sensorsysteme nun vielfältige Anwendungen in der Prozesssteuerung, der Umwelttechnik und in der Gebäudetechnik.

Einige Beispiele sollen die außerordentliche Bedeutung chemischer Sensoren illustrieren:

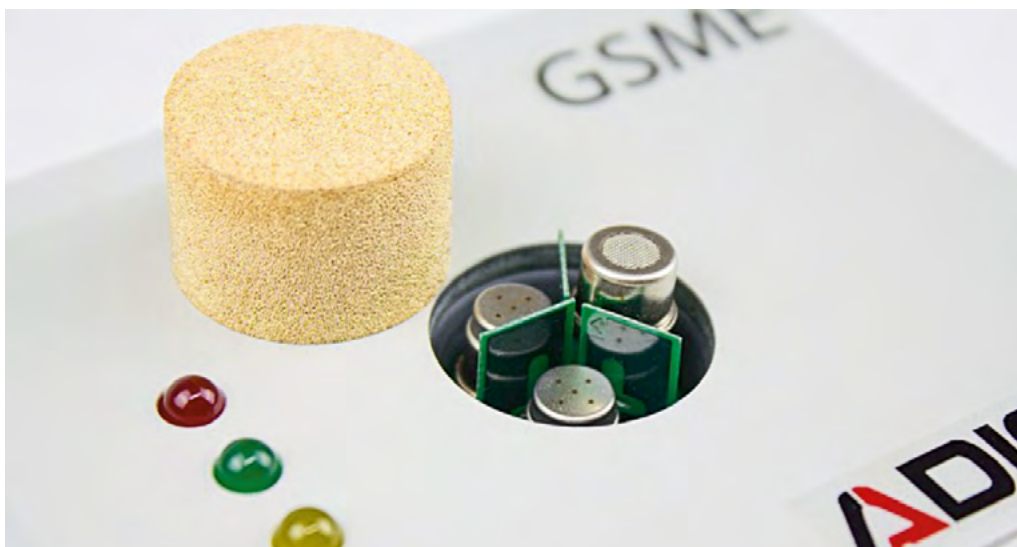
- Zu den klassischen Sicherheitsaufgaben Explosionsschutz und Vergiftungsschutz ist inzwischen die Brandfrüherkennung mit Gassensoren hinzugekommen, die Brände an Hand der charakteristischen Brandgase auch in schwierigen Umgebungen, z. B. mit hoher Staubbelastung, zuverlässig bereits im Frühstadium als Schwelbrand erkennen [KOH-2011], siehe auch Abb. B3.1-1.
- In der Prozessmesstechnik ist das Spektrum der eingesetzten Technologien besonders breit und reicht von den pH-Sonden über Einwegsensoren bis zu prozessintegrierten Analysesystemen, die mittels optischer (UV, VIS, IR) oder Raman-Spektroskopie relevante Prozessgrößen zur Überwachung und Steuerung liefern und letztlich eine Prozessoptimierung ermöglichen.

	Messprinzipien	Zielgrößen	Auflösung (typisch)	Wichtige Anwendungen
Physikalische Messprinzipien	Wärmeleitfähigkeit	unterschiedliche, meist zweikomponentige Gase (z. B. CO ₂ , H ₂ , He in Luft)	1 %	Verbrennungsabgase, Verpackung, Prozessindustrie
	Licht-Absorption (insbesondere Infrarot-, aber auch UV, Vis)	sCO ₂ , Kohlenwasserstoffe (insbesondere Methan)	1-100 ppm	Raumluftqualität, Verbrennungsabgase, Vergiftungsschutz, Explosionsschutz
	Paramagnetismus	selektiv für Sauerstoff	1 %	Prozessindustrie, Sicherheitstechnik
	Schallgeschwindigkeit	unterschiedliche, meist zweikomponentige Flüssigkeiten und Gase (z.B. Harnstoff in Wasser; CO ₂ , Methan in Luft)	1 %	Bestimmung des Methangehalts in Biogas
Chemische Messprinzipien	Potentiometrische Sensoren (Nernst-Sonde, ISFET, GasFET)	Sauerstoff im Abgas, pH-Wert, Wasserstoff, Spurengase im Abgas (NO _x , NH ₃)	k.A.	Lambdasonde (passiv als Sprungsonde, aktiv als Breitbandsonde), pH-Sonde für Prozessindustrie
	amperometrische Sensoren	viele toxische Gase (CO, NO _x , NH ₃ , H ₂ S, Cl ₂ ,...), Sauerstoff	1 ppm	Vergiftungsschutz (stationär und Handgeräte)
	Wärmetönung (Pellistor)	brennbare Gase, vor allem Wasserstoff und Methan	1000 ppm	Explosionsschutz (stationär und Handgeräte)
	Halbleitersensoren (Metalloxid- oder Polymer-basiert)	CO, NO _x , Ozon, Kohlenwasserstoffe	ppb - ppm	Luftqualität (Cabin Air Quality in Pkw), Explosionsschutz, Vergiftungsschutz
	massensensitive Sensoren (BAW, SAW)	diverse Gase, vor allem komplexe (Bio-)Moleküle	1-100 ppm	Nischenanwendungen
	Hydrogelbasierte Sensoren	pH, Glucose	k.A.	Nischenanwendungen (Forschung)
	Einwegmessung*, z. B. basierend auf Coulometrie oder Amperometrie	pH-Wert, Blutglukose, toxische Gase	k.A.	Indikatorpapier, Blutzucker-Teststreifen, Dräger-Röhrchen

* Einwegmessprinzipien sind streng genommen nicht Teil der Sensorik, sollen hier aber wegen der großen Bedeutung insbesondere für die Blutzuckermessung als heute kommerziell wichtigste chemische Messgröße nicht unterschlagen werden.

Tab. B3-1

Übersicht der wichtigsten Messprinzipien chemischer Sensoren für Gassensoren und ihre Anwendungsbereiche.

**Abb. B3.1-1**

Gassensormelde-einheit (GSME) zur Branderkennung in stark staubbelasteten Umgebungen, z. B. Kohlekraftwerken, Müllverbrennungsanlagen etc. [GTEI-2017].

- In der Umwelttechnik werden Sensoren nicht nur zur Überwachung von Grenzwerten und Identifizierung von Verursachern eingesetzt, sondern wiederum auch zur Prozessoptimierung und damit aktiven Reduzierung der Umweltbelastung. Auch hier ist das Spektrum breit und reicht von komplexer Prozessmesstechnik in Großkraftwerken bis zur Lambdasonde im Pkw, die im Zusammenspiel mit weiteren Sensoren die stetige Reduzierung der Abgasgrenzwerte überhaupt erst ermöglicht.
- In der Gebäudetechnik ergänzen heute bereits vielfach CO₂-Sensoren die Messung von Temperatur und Luftfeuchte zur Klimasteuerung. Neben dem Komfort und der Gesundheit der Anwesenden steht der Energieverbrauch zunehmend im Fokus, der sich durch bedarfsgerechte Lüftung deutlich reduzieren lässt. Zukünftig werden Sensorsysteme erwartet, die eine umfassende Bewertung der Innenluftqualität ermöglichen durch Messung weiterer Größen, insbesondere der gesundheitsschädlichen VOC – nicht nur für Gebäude, sondern auch für Verkehrsmittel aller Art. Dies wird ausführlicher in Kap. B3.1.5 beschrieben.

B 3.1.2 Bewertung, Probleme, Herausforderungen

Trotz aller Erfolge ergeben sich nach wie vor vielfältige Herausforderungen für chemische Messgrößen, die eine weitergehende Forschung im Spektrum von den Sensormaterialien über die Transducer und die Signalerfassung bis zur Auswertung erfordert. Die Herausforderungen werden meist mit den „3 S“ beschrieben:

- **Sensitivität:** Wie bei allen Sensoren ist die Empfindlichkeit, bzw. das Auflösungsvermögen, von großer Bedeutung, um z. B. Luftschadstoffe bereits bei sehr kleinen Konzentrationen erfassen zu können (Abb. B3.1-2). Eine Verbesserung der Messsysteme führt häufig auch unmittelbar zu einer Verschärfung von Grenzwerten, z. B. für die Messung karzinogener Substanzen, für die keine sichere Minimalkonzentration angegeben werden kann, da die Grenzwerte sich häufig auf den verfügbaren Stand der Sensorik und Messtechnik stützen. Damit führen empfindlichere Sensoren mittelbar auch zur Verbesserung der Umwelt und damit zu besserer Lebensqualität für alle.
- **Selektivität:** Während bei physikalischen Sensoren die verwendeten Messprinzipien meist eine sehr hohe Trennschärfe besitzen und nur die eigentliche Messgröße und evtl. eine gewisse Querempfindlichkeit zur Temperatur besitzen, stellt die Selektivität für chemische Sensoren heute meist die größte Herausforderung dar. Dies liegt einerseits an den Sensorprinzipien, die häufig auf eine relativ unspezifische Wechselwirkung, z. B. Adsorption oder Reaktion, mit der Zielsubstanz beruhen, vor allem aber an der Komplexität der Chemie selbst: es gibt praktisch unendlich viele chemische Substanzen und Verbindungen, die sich häufig sehr ähnlich sind. Besonders augenscheinlich ist dies beim Versuch, den Geruchssinn des Menschen nachzuahmen: die Nase kann teilweise sogar Enantiomere unterscheiden, also Moleküle, die wie Bild und Spiegelbild auftreten. Technisch ist dies nur mit ausgefeilter Laboranalytik möglich. Gleichzeitig sind auch die

Zielgrößen sehr komplex: typische Brandgase umfassen mehrere hundert Komponenten, misst man nur einfache Leitmoleküle, z. B. Kohlenmonoxid (CO), so sind einerseits Fehlalarme möglich, z. B. durch Abgase aus dem Verkehr, und andererseits können nicht alle Brände zuverlässig entdeckt werden, weil z. B. ein sauberes Spiritusfeuer kaum CO erzeugt.

- **Stabilität:** Auch hier unterscheiden sich chemische Sensoren fundamental von den allermeisten physikalischen Sensoren, die i. d. R. hermetisch gekapselt sind, um eine hohe Langzeitstabilität durch Vermeidung von z. B. Korrosion zu erzielen. Chemische Sensoren müssen aber mit der Umwelt wechselwirken und leiden daher fast zwangsläufig unter Drift durch den Einfluss von Störgrößen sowie zeitweiser oder dauerhafter Vergiftung, z. B. durch schwerflüchtige Verbindungen, die die Sensoroberfläche besetzen. Viele eigentlich preiswerte chemische Sensoren müssen daher im Betrieb regelmäßig überprüft und häufig in relativ kurzen Zeiträumen ausgetauscht werden, was die Kosten für die Betreiber maßgeblich beeinflusst. Andere Messprinzipien, insbesondere spektroskopische Verfahren, die auf einer rein physikalischen Wechselwirkung beruhen, sind deutlich stabiler, aber auch um ein vielfaches teurer und erfordern zudem geschultes Personal; sie scheiden damit für viele Anwendungen aus.

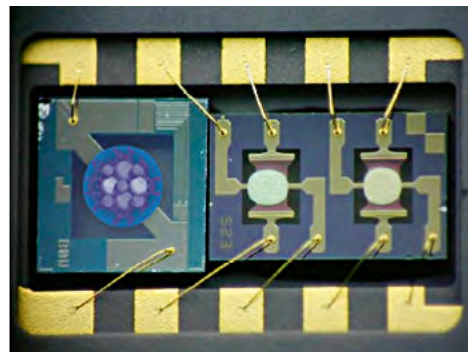
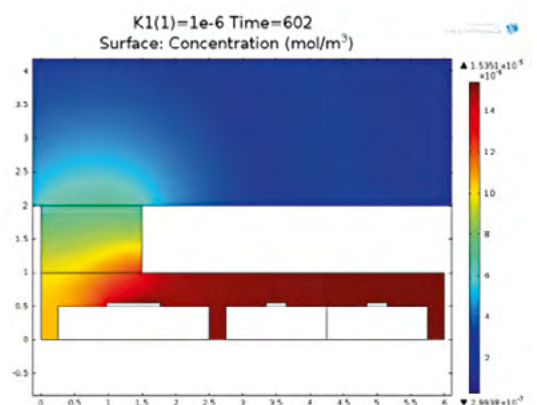
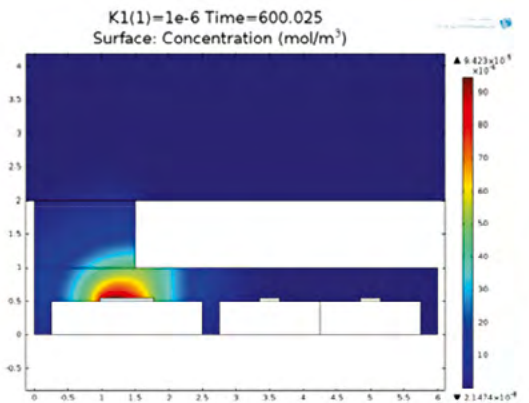


Abb. B3.1-2

Oben: Integriertes Mikro-Gassensorsystem mit Präkonzentrator (links) und zwei Metalloxid-Sensorschichten (rechts).

Oben rechts: Die auf dem Präkonzentrator abgeschiedene MOF-Schicht (metal organic framework) sammelt die Zielgasmoleküle auf und setzt diese beim Aufheizen frei.

Rechts: In einer geschlossenen Mikrokammer wird dadurch eine deutlich höhere Konzentration und damit Empfindlichkeit erzielt [LEI-2016b].



B 3.1.3 Entwicklungsansätze, Forschungstrends

Die Forschungstrends im Bereich der chemischen Sensorik und Messsysteme sind vielfältig. Sie umfassen natürlich zunächst die funktionalen Schichten, auf denen die eigentliche Wechselwirkung zwischen Analyt und Sensor stattfindet.

Hier wurden und werden erhebliche Fortschritte erzielt, vor allem durch den Einsatz der Nanotechnologie, die ein Maßschneidern der Funktionsschichten auf atomarer Skala erlauben und damit eine gleichzeitige Verbesserung von Empfindlichkeit, Selektivität und Stabilität ermöglichen (Abb. B3.1-3).

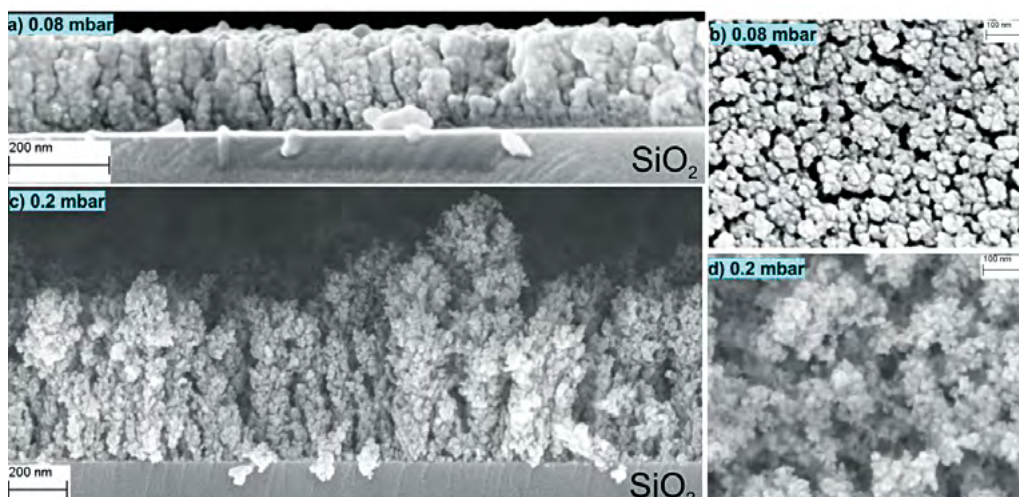


Abb. B3.1-3
Mittels Pulsed-Laser-Deposition (PLD) bei unterschiedlichen O₂-Partialdrücken abgeschiedene, gassensitive WO₃-Schichten für die selektive Detektion von Naphthalin im ppb-Bereich [LEI-2016a].

Dennoch kann damit z. B. keine perfekte Selektivität erzielt werden, so dass der Sensor nur auf eine einzige Zielsubstanz reagiert, weil die Chemie verschiedener Moleküle letztlich sehr ähnlich ist. Aber selbst wenn man eine sehr hohe Selektivität erzielen könnte – wie das beispielsweise mit Biosensoren unter Ausnutzung von spezifischen Antikörpern möglich ist – wäre damit eine reduzierte Stabilität bzw. eine langsame Messrate verbunden: eine sehr hohe Selektivität kann letztlich nur erreicht werden durch eine im Vergleich zu anderen Substanzen sehr hohe Bindungsenergie des Zielmoleküls auf der Funktionsschicht.

Diese bedeutet aber entweder eine irreversible Adsorption, so dass der Sensor nur einmal verwendet werden könnte (wie viele Biosensoren heute, beispielsweise zur Blutzuckermessung), oder eine sehr langsame Rückkehr des Sensors zu seinem Nullpunkt. Verbesserungen können hier grundlegend erzielt werden, in dem man schaltbare Funktionsschichten entwickelt, die elektrisch zwischen Messung und Regeneration umgeschaltet werden können, z. B. durch periodisches Aufheizen, um alle Adsorbate zu entfernen. Dabei ist allerdings die Maximaltemperatur häufig durch die thermische Stabilität der Sensorschicht begrenzt.

Weitere Forschungstrends finden sich im Bereich der Transducer, bei denen nach wie vor die Miniaturisierung eine große Rolle spielt. Neben den erzielbaren Kostenvorteilen können so auch Applikationen mit sehr begrenzten Bauvolumen, z. B. in medizinischen Implantaten, erschlossen werden, gleichzeitig sinken Leistungsaufnahme und vielfach auch Ansprechzeiten. Vereinzelt spielt auch hier die Nanotechnologie eine Rolle, z. B. mit Gassensoren aus einzelnen Nanodrähten, bei denen der Messstrom gleichzeitig ausreicht, um den Sensor auf die gewünschte Arbeitstemperatur zu erhitzen. Dabei spielt auch die Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) eine große Rolle, sowohl zur Integration der Mikro- und Nanostrukturen, als auch zur Einbindung der Sensoren in häufig sehr rauen Umgebungsbedingungen, z. B. unmittelbar im Abgasstrang eines Verbrennungsmotors oder Kraftwerks. Aber auch die Miniaturisierung von analytischen Verfahren erlaubt die Realisierung von Messsystemen, die direkt im Prozess oder im Feld eingesetzt werden können und damit eine schnellere Reaktion sowie prinzipiell eine größere zeitliche und räumliche Auflösung erlauben.

Vor allem zur Verbesserung der Selektivität und der Stabilität werden aber auch weitere Methoden erforscht, z. B. ein dynamischer Betrieb von Sensoren, um nicht nur eine punktuelle Wechselwirkung zu erfassen, sondern mehrere Messgrößen aus der Interaktion von

Zielsubstanz und Sensor zu gewinnen. Hierfür werden dann entsprechende Signalverarbeitungsmechanismen benötigt, die die aufgenommenen Signalmuster interpretieren, um die gewünschte Information zu extrahieren [REI-2014]. Die mathematischen Methoden werden bereits länger unter dem Oberbegriff Chemometrie für die Interpretation von Multisensordaten oder spektralen Informationen eingesetzt, hinzu kommt jetzt die Möglichkeit, den Betriebsmodus aktiv zu gestalten und z. B. auf wechselnde Zielsubstanzen oder Umgebungsbedingungen anzupassen. Als nächster Trend ist hier eine Selbstüberwachung des Sensorsystems zu erkennen (Kap. C 5), um auftretende Störungen selbstständig erkennen zu können [SCHÜ-2015]. Besonders für sicherheitsrelevante Anwendungen ist dies ein entscheidender Punkt zur Erschließung neuer Anwendungsfelder: der Sensor kann eine Störung frühzeitig selbst diagnostizieren und signalisieren bzw. ggfs. in einen eingeschränkten Notbetrieb wechseln, um z. B. eine sofortige Abschaltung der überwachten Anlage zu vermeiden.

B 3.1.4 Schlussfolgerung, Nutzen

Letztlich führt erst die Kombination aller Technologien in der Anwendung zum Erfolg: das Messsystem von der Funktionsschicht über den, bzw. die Transducer, die Elektronik zur Steuerung und Erfassung der Signale, die Signalverarbeitung sowie die AVT müssen perfekt zusammenpassen, um ein erfolgreiches Chemosensorsystem zu realisieren, siehe Abb. B3.1-2. Dabei ist eine Kenntnis der Zielapplikation unabdingbar: es gibt heute praktisch keine generischen Chemosensoren, die unabhängig von der Umgebung für eine bestimmte Messgröße beliebig einsetzbar sind. Selbst für Sauerstoff gibt es unterschiedlichste Sensorprinzipien von der elektrochemischen Zelle mit Gelelektrolyt über ampero- und potentiometrische Zirkonoxid-Sensoren (z. B. Lamdasonde) bis zum paramagnetischen Sauerstoffsensoren, die jeweils in unterschiedlichen Bereichen ihre Daseinsberechtigung haben. Anwendungsorientierte Forschung im Bereich der Chemosensorik erfordert daher eine enge Zusammenarbeit zwischen Anwendern und Sensorexperten aus unterschiedlichsten Disziplinen (Chemie, Physik, Elektronik, Informatik). Gelingt dies, so lassen sich vielfältige weitere Anwendungen erschließen, z. B. dezentrale Sensornetzwerke zur Umweltüberwachung. Durch Kombination stationärer und mobiler Systeme – bis hin zum Gassensor im Handy – mit Geoinformationssystemen können damit detaillierte Luftqualitätskarten nahezu in Echtzeit erstellt werden, die z. B. in Innenstädten eine „grüne Route“ für Fahrradfahrer, Fußgänger und Jogger aufzeigen können, um mit der geringsten Umweltbelastung von A nach B zu gelangen oder um gesunden Sport zu ermöglichen.

B 3.1.5 Neue Anwendungen: Sensorsysteme zur Sicherung einer bedarfsgerechten Lüftung

Das Heizen und Kühlen von Wohn- und Arbeitsräumen ist für einen Großteil des heutigen Primärenergieverbrauchs verantwortlich. Erhebliche Energieeinsparungen lassen sich durch reduzierten Luftaustausch erzielen, was allerdings als Nebenwirkung zu einem Anstieg der CO₂-Konzentration und damit zu Müdigkeit bzw. Kopfschmerzen in genutzten Räumen führt sowie zu einem Anstieg der Schadstoffkonzentration, vor allem durch volatile organische Substanzen (VOC) wie Formaldehyd, Benzol oder Naphthalin.

In größeren Gebäuden und Räumen, z. B. Hörsälen an Universitäten, ist die Überwachung der CO₂-Konzentration mittels IR-Sensorik bereits weit verbreitet. Allerdings können diese Sensoren nicht den Anstieg von Luftschadstoffen überwachen, die in der Folge zum „*Sick Building Syndrome*“ führen.

Die schlechte Innenraumluftqualität führt zu einer deutlichen Beeinträchtigung der Gesundheit, auch weil wir uns im Mittel zu 80 % in geschlossenen Räumen aufhalten. Nach Schätzungen des EU-Projekts HEALTHVENT gehen europaweit jährlich 300.000 gesunde Lebensjahre durch schädliche VOC in Innenräumen verloren.

Heute existieren bereits erste Sensorsysteme, die die Gesamt-VOC-Belastung in Innenräumen erfassen können; allerdings werden neben schädlichen Substanzen dabei auch alle anderen VOC's erfasst, z. B. aus Reinigungs- und Lebensmitteln, die i. A. nicht gesundheitsschädlich sind, sowie Geruchsstoffe, die sowohl erwünscht, z. B. Lufterfrischer, als auch beispielsweise in Form von Schweißgeruch unerwünscht sein können. Dies kann nur mit

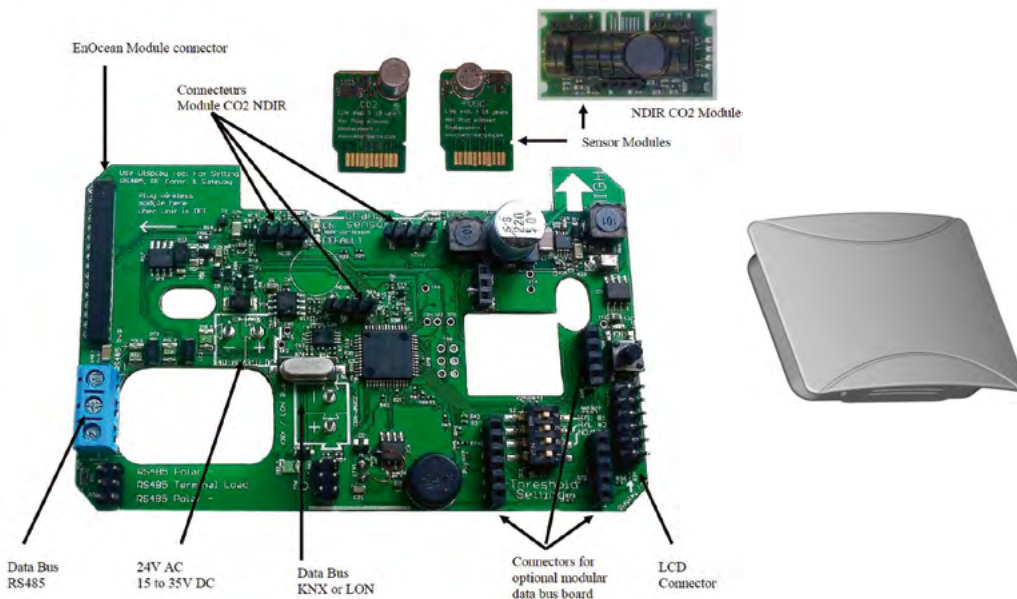


Abb. B3.1-4
Multisensorsystem zur Überwachung der Innenluftqualität mit Anbindung an die Gebäudeautomatisierung [SCH-2017].

Multisensorsystemen ermöglicht werden (Abb. B3.1-4). Eine optimierte, bedarfsgerechte Lüftungssteuerung muss also viel mehr bieten als heutige Systeme: Die Innenraumluftqualität muss raumspezifisch erfasst und im Hinblick auf Nutzung des Raums sowie das Umfeld ausgewertet werden, um eine optimierte Lüftung zu garantieren. Die Bewertung der Luftqualität muss neben der CO₂-Konzentration auch die Schadstoff- und Geruchsbelastung spezifisch berücksichtigen. Somit sind Sensorsysteme erforderlich, die Luftqualität raumspezifisch erfassen und in ein Gesamtsystem integriert sind, um vor allem folgende Funktionen zu realisieren:

- Lüftung nur bei Bedarf, also schlechter Luftqualität und Anwesenheit von Personen,
- Lüftung unter Berücksichtigung der Außenluftqualität, da viele Schadstoffe von außen in Innenräume gelangen (Abgase, Ozon),
- Berücksichtigung der Raumnutzung, d. h. differenziert nach Funktion für Büro-, Wohn- und Schlafräume, Küche, Badezimmer etc. sowie nach Nutzern (Kinder in Kitas, Schulen, Kinderzimmern; ältere bzw. kranke Menschen in Wohnungen, Altenheimen, Krankenhäusern etc.),
- Berücksichtigung der Nutzerwünsche, z. B. Abwägung zwischen Energiebedarf und Komfort,
- Berücksichtigung des Nutzerverhaltens, z. B. typische Tagesabläufe, Abwesenheit im Urlaub.

Sensorsysteme für die Innenluftqualität müssen damit mit weiteren Sensoren (Außenluftqualität, Anwesenheit) vernetzt und in intelligente Steuerungssysteme eingebunden werden, die auch weitere Informationen, z. B. Wettervorhersage, ausnutzen und sich an Nutzerverhalten und Nutzerwünsche flexibel anpassen.

Daher ist neben der Sensorik auch eine entsprechende, möglichst intuitive Nutzerinteraktion erforderlich, die auch beispielsweise eine Visualisierung des Energieverbrauchs beinhaltet, um dem Nutzer die Auswirkungen seiner Wünsche zurück zu spiegeln.



Abb. B3.1-5
a) Integriertes Sensorsystem für Innenraum-Luftqualität mit neuartigem Mikro-Gassensorsystem für selektive VOC-Messung (vgl. Abb. 3.1-4). Das System umfasst zudem einen nicht-dispersiven Infrarot (NDIR) Sensor für CO₂ sowie einen Temperatur- und Feuchtesensor,
b) Installation des Systems in Standard-Unterputzdosen. Der Gaszutritt erfolgt direkt über Öffnungen in der AI-Frontplatte, um Quereinflüsse durch ausgasende Kunststoffe zu vermeiden. [3SG-2017]

Die Realisierung dieser Anwendung erfordert neue, deutlich empfindlichere und zudem selektivere Gassensoren als heute verfügbar, da die relevanten Konzentrationen der Luftschadstoffe teils unter 1 ppb liegen (seitens WHO empfohlener Grenzwert für Benzol beträgt 1,5 ppb; in Frankreich gilt ab 2016 in Innenräumen ein Grenzwert von 0,6 ppb) und die Schadstoffe vor einem i.d.R. wesentlichen höheren Hintergrund anderer Gase, z. B. Ethanol oder Essigsäure aus Reinigungsmitteln erkannt werden müssen.

Derartige Sensorsysteme, wie in Abb. B3.1-5 beispielsweise dargestellt, benötigen folgende Innovationen:

- Verbesserte Sensormaterialien, insbesondere unter Nutzung der Nanotechnologien.
- Gesteigerte Empfindlichkeit durch Integration von Technologien aus dem Bereich Analytik (Aufkonzentration, Trennung von Gemischen).
- Integration von Sensorkomponenten in Systeme, insbesondere unter Nutzung der Mikrosystemtechnik.
- Fortgeschrittene Betriebs- und Auswerteverfahren, z. B. temperaturzyklischer Betrieb und Mustererkennung, für optimierte Sensitivität, Selektivität und Stabilität.
- Miniaturisierung der Komponenten und Systeme zur Minimierung von Leistungsaufnahme sowie der Herstellungskosten.
- Fortgeschrittene Kalibrier- und Prüfstrategien für Sensorelemente und -systeme, sowohl im Herstellungsprozess als auch in der laufenden Anwendung.
- Neue Nutzerschnittstellen und adaptive Signalauswertung zur Berücksichtigung von Nutzerwünschen und Nutzerverhalten.

B 3.2 Neue Anwendungen: Medizinische Mikrosensoren und Mikroimplantate

Technische Messungen und Untersuchungen am biologischen Objekt (Zelle, Gewebe, Tier oder Mensch) unterscheiden sich signifikant hinsichtlich ihrer Reproduzierbarkeit, der möglichen Dauer und der einsetzbaren Methodik. Der Grad der Belästigung des Patienten durch die Signalerfassung und die methodische Durchführung der Untersuchung haben direkten Einfluss auf die Auswertbarkeit der Ergebnisse. Die Dauer einer Messung und deren Wiederholbarkeit sind limitiert. Biologische Störquellen sind der zu messenden Größe häufig überlagert.

Entsprechend ihrer physikalischen Eigenschaften sind folgende Signale zu erfassen:

- bioakustische Signale (z. B. Herzschlag, Lungengeräusche, Sprache),
- biochemische Signale (z. B. Stoffzusammensetzungen, Konzentrationen),
- bioelektrische und biomagnetische Signale (z. B. elektrische Potentiale, Ionenströme),
- biomechanische Signale (z. B. Größe, Form, Bewegungen, Beschleunigung, Fluss),
- biooptische Signale (z. B. Farbe, Lumineszenz),
- biothermische Signale (z. B. Körpertemperatur).

Verteilte Mikrosensoren

Eine besondere Anwendungsgruppe stellen die verteilten implantierbaren Mikrosensoren dar. Sie bilden ein Netzwerk mit drahtloser Signal- und Datenübertragung. Die einzelnen Sensoren sind energetisch autark, so dass sie transkutan, das heißt von Aussen durch die Haut z. B. induktiv, mit Energie versorgt werden müssen. Unterstützt werden kann die Energieversorgung durch die Entwicklung energiesparender Mikrosysteme, die Implementierung eines intelligenten Energiemanagements und zukünftig eventuell auch durch *Energy Harvesting*, d. h. Gewinnung von Energie aus Körperbewegungen oder biochemischen Vorgängen.

Vorteile verteilter Mikrosensoren sind die mögliche Ortsauflösung über den gesamten Organismus, ihrem der Fragestellung angepassten Applikationsort und ihre meist unkomplizierte Implantation.

B 3.2.1 Neuroprothesen – Implantierbare Assistenzsysteme

Eine wichtige Anwendung miniaturisierter Sensoren in der Medizin erfolgt in „intelligenten“ Implantaten. Es sind aktive Implantate, die mittels Signalerfassung und Stimulation Funktionsstörungen mit einem neuronalen, muskulären oder metabolischen Hintergrund kompensieren und die aktuelle Lebensqualität der Betroffenen weitgehend verbessern sollen. Als Neuroprothesen oder Implantierbare Assistenzsysteme sind sie Gegenstand der Forschung; allerdings haben einzelne Anwendungen den Weg in die klinische Routine bereits gefunden. Hierzu gehören Herzschrittmacher, Cochlea-Implantate, Systeme zur Peroneus- und Tiefenhirn- Stimulation. Andere, wie z. B. das Retina-Implantat, haben den Weg der klinischen Zulassung gerade hinter sich und befinden sich in der klinischen Einführung.

Einteilen lassen sich Neuroprothesen hinsichtlich des Signalweges entsprechend Abb. B3.2-1. Dabei kann die Informationsübertragung von peripher nach zentral, von zentral nach peripher oder bidirektional erfolgen. Ein Beispiel hierzu sind bionische Handprothesen einschließlich eines sensorischen Feedbacks. Die bioelektrischen Potentiale als Steuersignale können mit implantierbaren Mikroelektroden entlang der gesamten motorischen Bahn erfasst werden, vom motorischen Kortex, peripheren Nerv [ROS-2010] oder zugehöriger Muskulatur [LEW-2013]. Die elektrische Stimulation peripherer Nerven eröffnet die Möglichkeit eines sensorischen Feedbacks.

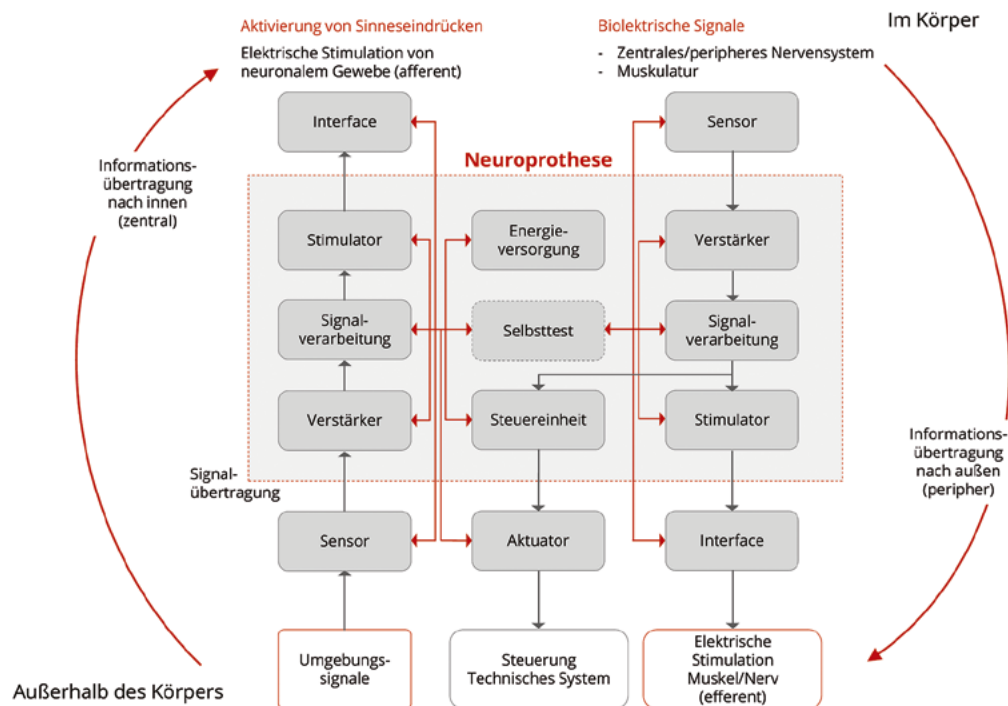


Abb. B3.2-1

Blockschaltbild einer Neuroprothese mit einer bilateralen Informationsübertragung und Sensoren zum Test der Funktionalität des Implantats.

Ein vielversprechender Ansatz der intuitiven Steuerung ergibt sich durch den Einsatz implantierter epimysialer Elektroden (Abb. B3.2-2, umseitig). Bereits realisiert und präklinisch getestet ist die vierkanalige selektive Erfassung von einzelnen Muskeln, die Konditionierung der Signale und ihre MICS konforme telemetrische Übertragung [LEW-2013].

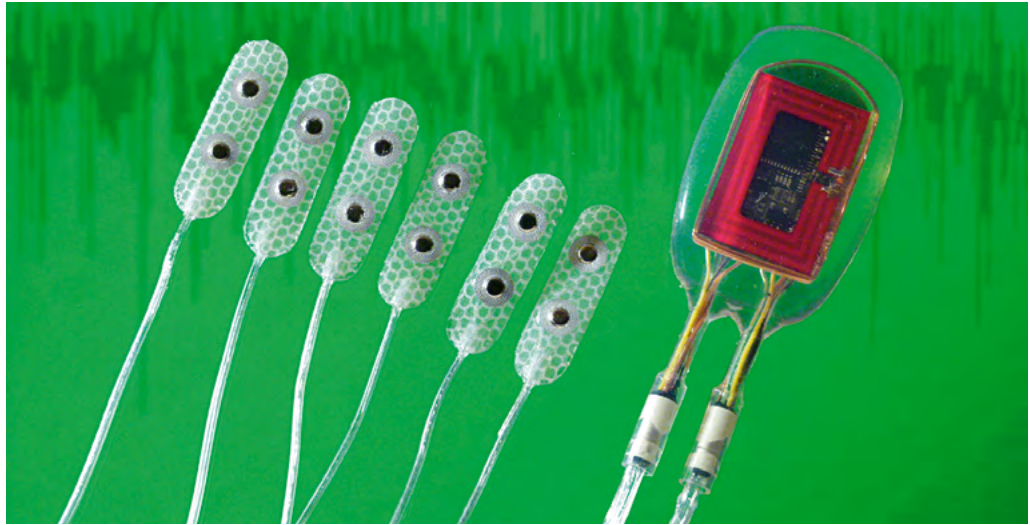
Die Elektroden müssen neben ihren elektrochemischen Eigenschaften insbesondere die mechanische Beanspruchung aufgrund der Kontraktion der Muskulatur mit Längenänderungen bis zu 10 % kompensieren.

Die Energieversorgung erfolgt induktiv. Gegenwärtige Forschungen betreffen die Entwicklung eines ASIC's mit integriertem analogen Frontend zur Signalerfassung und eines Stimulators zur elektrischen Stimulation peripherer Nerven [VÖL-2015].

Neben der notwendigen Miniaturisierung aller implantierten Komponenten sind auch die Bioverträglichkeit und die Langzeitstabilität aller eingesetzten Materialien von grundlegender Bedeutung.

Abb. B3.2-2

Implantierbares Assistenzsystem zur epimiasialen Erfassung von Muskelpotentialen und ihrer drahtlosen transkutanen Übertragung einschließlich der epimiasialen Elektroden mit Silikon als Trägermaterial [JBMT-2017].



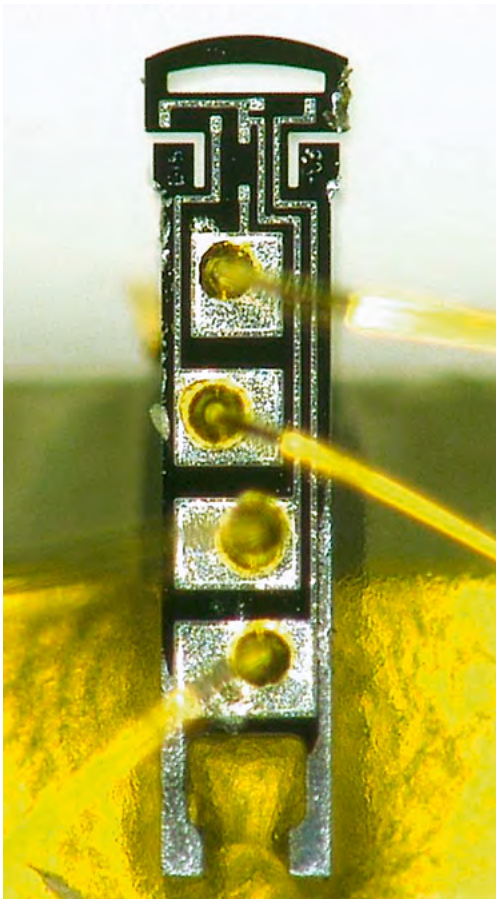
B 3.2.2 Direkt gekoppelte Sensor-Aktor-Systeme für haptische Bediensysteme

Minimalinvasive Chirurgie wird seit den 90er Jahren etwa für Operationen im Bauchraum durchgeführt, um rasche Genesung mit geringen Beschwerden nach Operationen zu erzielen.

Abb. B3.2-3

Silizium-Mikrokraftsensor zur Anwendung in Führungsdrähten. Die Breite des Biegekörpers beträgt 0,2 mm [IEK-2018].

Der chirurgische Eingriff wird dabei mit speziellen Instrumenten und dem Einsatz von Operationsmikroskopen mit Manipulatoren durchgeführt. Oft reichen kleine Schnitte der Bauchdecke aus, damit die Instrumente eingeführt werden können und die notwendigen Operationen – wie Entfernung von Krebsgeschwulsten – an einem externen Manipulationstisch vor einem Bildschirm durchgeführt werden können.



Damit der Operateur neben der optischen Darstellung möglichst mit „Gefühl“ schneiden, bzw. operieren kann, wird an Systemen mit eingebauter haptischer Rückmeldung gearbeitet.

Zur Sicherung einer haptischen Rückmeldung bei minimalinvasiven Instrumenten werden Mikrosensoren zur Erfassung der Wechselwirkungskräfte mit dem Gewebe in die Instrumentenspitze integriert.

Bei Anwendungen für Herzoperationen etwa wird ein Führungsdraht in die verengten Herzkranzgefäße zur anschließenden gezielten Platzierung eines Stents zum Weiten der Engstelle eingeführt. In die Führungsdrahtspitze wird ein integrierter Mikrokraftsensor implementiert. Die erfassten Wechselwirkungskräfte mit der Gefäßwandung werden dem Kardiologen am Führungsdraht durch eine miniaturisierte Aktorik dargestellt. Damit ist der Arzt in der Lage, den Gefäßverlauf durch Fühlen zu ertasten.

Abbildung B3.2-3 zeigt einen solchen Silizium-Mikrokraftsensor. Die Wechselwirkungskraft wirkt jeweils auf einen speziell ausgebildeten Silizium-Mikrobiegekörper mit vier auf der Oberfläche integrierten piezoresistiven Messwiderständen. Im Bild sind die Messwiderstände nicht zu erkennen. Sie liegen zwischen den Enden der hell erkennbaren Aluminiumleiterbahnen. Die Widerstände sind zu einer gleichstromgespeisten Wheatstone-Brücke angeordnet. Die Brückenpunkte werden durch vier Mikrodrähte an den Pads kontaktiert und durch den bis zu 1,5m langen Führungsdraht mit einem Durchmesser von nur 0.36 mm über eine Spezialkupplung herausgeführt. Besonders bemerkenswert sind die sehr geringen Querabmessungen des Silizium-Biegekörpers von nur 0,2 mm.

B 4 AMA Innovationspreise 2010 bis 2016

Der AMA Verband für Sensorik und Messtechnik verleiht seit dem Jahr 2000 jährlich einen Innovationspreis für außergewöhnliche Neuentwicklungen auf dem Gebiet der Sensorik und Messtechnik. Dies ist ein offenes Verfahren, in dem jedes Jahr zwischen 40 und 60 Projekte aus Deutschland und aus dem Ausland eingereicht werden. Der AMA Wissenschaftsrat als Jury bewertet die Projekte nach Innovationshöhe, Originalität der Lösungen und nach der Marktrelevanz. Der Preis ist mit 10.000 € Prämie dotiert und wird jeweils auf der Messe SENSOR+TEST in Nürnberg verliehen.

B 4.1 Elektromagnetische Messgrößen

Innovationspreis 2012

Hochintegriertes Hall-Sensor ASIC für energieautarke Absolut-Geber

Der in Form eines Hall-ASIC realisierte energieautarke Absolut-Drehgeber Sensor verwendet als zentrale Komponente einen Wiegand-Draht, der sowohl das Multiturn-Sensorsignal, als auch die für das Zählen und Speichern der Messsignale benötigte elektrische Energie aus der kinetischen Energie des Antriebs erzeugt. Dieser voll-magnetische energieautarke Geber ersetzt auf kleinstem Raum aktuelle Getriebelösungen und Batterie gepufferte rotative und lineare Systeme. Mit einem integrierten Temperaturmodul zur präzisen Volumestromberechnung eignet sich das System auch für energieautarke Gaszähler.

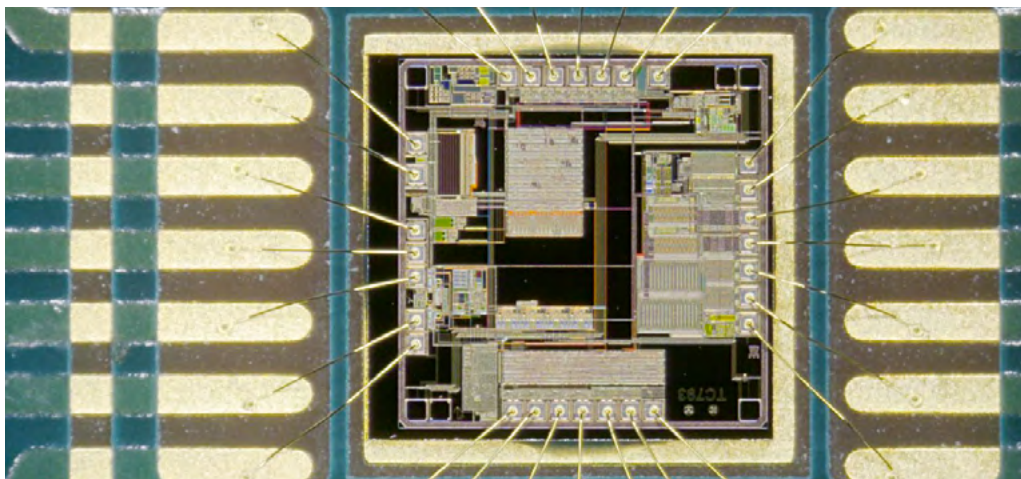


Abb. B4-1
Hochintegriertes
Hall-Sensor ASIC
[ICH-2012]

B 4.2 Mechanische Messgrößen

Innovationspreis 2011

Magnetische, pflanzenbasierte ZIM-Druckmesssonde

Die ZIM-Sonde (ZIM= Zimmermann Irrigation Monitoring) ist eine nutzerfreundliche, langzeitstabile, nichtinvasive Sonde, die mit hoher Genauigkeit die Wasserversorgung von Blättern intakter Pflanzen kontinuierlich unter Feldbedingungen messen kann. Die Daten werden in Echtzeit mittels Telemetrie an eine Basisstation mit integriertem GPRS Modem gesendet, welches die Signale über Mobilfunk an einen Internetserver sendet. Die ZIM Sensorik wurde über drei Jahre lang auf Feldern und in Gewächshäusern in gemäßigten sowie in semiariden Zonen erfolgreich getestet; (d.h. die eingesetzte Wassermenge konnte reduziert bzw. die Produktivität und Qualität von Kulturpflanzen gesteigert werden).



Abb. B4-2
YARA ZIM Wassersensor
an einer Zitruspflanze.
[ZIMM-2011]

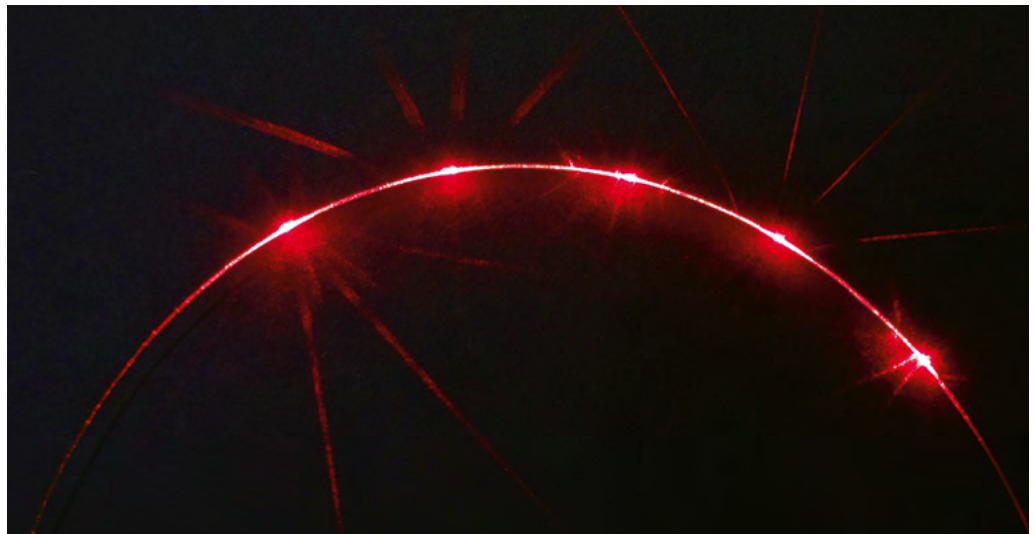
B 4.3 Optische Messgrößen

Innovationspreis 2016

Nerven aus Glas – Faseroptische 3D-Positionierung von Herzkathetern

Präzise Navigations- und Trackingsysteme sind von großer Bedeutung in der minimalinvasiven Radiologie und Chirurgie. Eine neuartige dreidimensionale Form- und Bewegungserfassung mittels faseroptischer Sensorik ermöglicht eine Positionierungsgenauigkeit von Herzkathetern < 1 mm und trägt damit entscheidend zur Verbesserung des Erfolges sowie der benötigten Operationszeit der zugrunde liegenden medizinischen Behandlung bei. Die Markteinführung erster faserbasierter Positioniersysteme ist für Anfang 2017 geplant [SCHA-2016].

Abb. B4-3
Optische Faser für das
Positionierverfahren
[HHI-2016].



Innovationspreis 2015

Ultragenaue Frequenzmessung mit kristallinen Halbleiterspiegeln

Die genauesten Methoden zur Messung von Zeit und Raum verwenden Laserlicht, das zwischen hochreflektierenden Spiegeln hin- und herreflektiert wird. Die Genauigkeit der Messung war bisher durch das thermische Rauschen der Spiegel limitiert. Kristalline Spiegel sind ein radikal neuer Ansatz. Statt vorhandene Laseroptik zu verbessern, wird ein neuartiges Materialsystem aus der Halbleitertechnik entlehnt. Damit gelingt eine Minimierung des thermischen Rauschens um einen Faktor 10. Dies erlaubt einen neuen Genauigkeitsrekord bei Atomuhren und anderen Anwendungen in Physik, Messtechnik sowie Luft- und Raumfahrt [ASPE-2015].

Abb. B4-4
Rauscharme Spiegel
für Hochpräzisions-
messungen der Firma
Crystalline Mirror
Solutions GmbH.



Innovationspreis 2014

TWI – schnelle und flexible Asphären- und Freiformflächenvermessung

Auf Grund der starken Zunahme von Asphären und optischen Freiformen in der Leistungs- und Hochleistungsoptik wird eine schnelle, vollflächige Passprüfung dringend vom Markt gefordert. Asphären und optische Freiformen ermöglichen kleinere, leichtere und flexiblere Abbildungssysteme. Das Tilted Wave Interferometer setzt einen neuen Maßstab für die messtechnische Bewertung derartiger Leistungsoptiken in puncto Messgeschwindigkeit bei gleichzeitig hoher Flexibilität und Messgenauigkeit [BAER-2014].

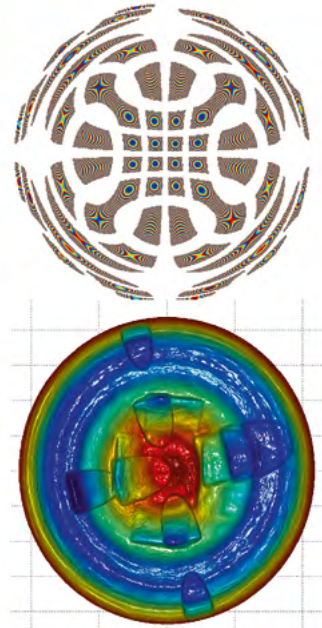


Abb. B4-5

Tilted Wave Interferometer zur Prüfung asphärischer Optiken. [ITO-2017].

Innovationspreis 2013

Entwicklung eines optischen Mikrofons ohne Membran

Das weltweit erste Mikrophon ohne bewegliche Teile ermöglicht eine völlig lineare Klangaufnahme, echte Impulstreue, eine sehr geringe Störanfälligkeit für Windgeräusche und Körperschall sowie ein ausgeprägtes Richtungshören. Bei diesem optischen Mikrophon kommen weder eine Membran noch ein anderes mechanisches Bauteil zur Verwendung. Vielmehr wird der Schalldruck optisch „berührungslos“ über die Änderung des Brechungsindex in Luft gemessen. Der Wandler basiert auf einer Laserdiode (VCSEL) und einem winzigen Fabry-Pérot Interferometer, also zwei parallelen, teilreflektierenden Spiegeln [FISC-2013].

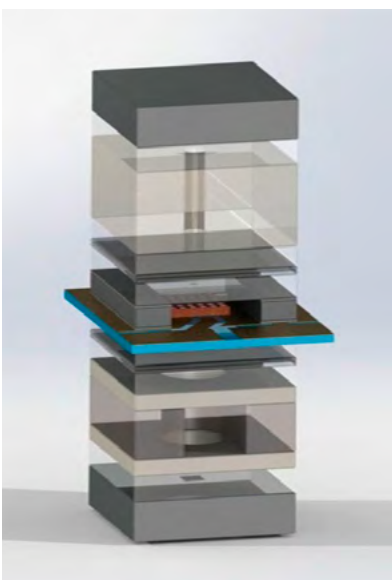


Abb. B4-6

Schema des optischen Mikrofons, mit Größenvergleich [XARI-2013].

Innovationspreis 2013

3D-Raster-Laservibrometer- Mikroskop mit einem Messstrahl

Das Polytec MSA-100-3D ermöglicht die Messung von dreidimensionalen Schwingungsparametern mikroskopischer Objekte in Echtzeit. Im Gegensatz zu anderen Ansätzen mit drei Vibrometern, welche die schwingende Oberfläche aus verschiedenen Richtungen vermessen, besteht das MSA-100-3D aus einem einzelnen, integrierten Messkopf, der den vom Messobjekt in drei Raumrichtungen gestreuten einzelnen Laserstrahl analysiert und daraus die dreidimensionale Objektbewegung bestimmt. Somit konnten bisherige Störeffekte vermieden und die örtliche Auflösung um etwa einen Faktor 10 auf unter 4 μm verbessert werden [WINT-2013].

Innovationspreis 2011

HoloTop und HoloFlash – 3D-Sensoren mit Mehrwellenlängen-Holografie

Erstmals ist es gelungen, holografische 3D-Messverfahren vom Labortisch in die industrielle Anwendung zu holen, und zwar mit Hilfe ausschließlich virtuell erzeugter Wellenlängen im Terahertz- bzw. Infrarot- Bereich. Das Ergebnis sind robuste digital-holografische Inline- Messsysteme (HoloTop und HoloFlash), die ihre Vorteile vor allem im Rahmen einer 100 %-Kontrolle ausspielen können – z. B. um die Qualität funktions- und sicherheitsrelevanter Bauteile im Automobilbau zu sichern. Bei HoloTop handelt es sich um einen 3D-Sensor, der auf zeitlichem Phasenschieben basiert.

Der noch schnellere 3D-Sensor HoloFlash nutzt die Vorteile des räumlichen Phasenschiebens [CARL-2011].

B 4.4 Chemische und medizinische Messgrößen

Innovationspreis 2016

Magnetische Durchflußzytometrie (MRCyte)

Die magnetische Durchflusszytometrie ermöglicht durch spezifische magnetische Markierung und einem rein magnetischen Workflow in einer Kartusche den Nachweis von Zielzellfunktionen ohne Probenaufbereitung direkt im Patientenblut. Dies geschieht innerhalb weniger Minuten durch eine magnetische Laufzeitmessung des Signals patientennah in einem Tischgerät. Die hohe Messpräzision eröffnet Therapieentscheidungen mit instabilen zellulären Biomarkern, die bisher bei konkurrierenden Verfahren keine Routineanwendung aufgrund hoher Investitionskosten und Spezialistenwissen erlaubten [HAYD-2016].

Innovationspreis 2010

Im-Ohr-Sensorsystem für Vitalparametermessungen

Erste Im-Ohr-Messungen mit Langzeitcharakter zur Bestimmung von Puls, Herzfrequenz und arterieller Sauerstoffsättigung wurden im Rahmen einer Belastungs- wie auch einer kontrollierten Hypoxemia Studie erfolgreich durchgeführt [RÖMH-2010].

Abb. B4-7
„Im-Ohr-System“ in der
Anwendung [CIS-2017].



Teil C

Entwicklungstrends der
Sensorkomponenten und
Fertigungstechnologien

C Entwicklungstrends der Sensor-Komponenten und Fertigungstechnologien

C 1 Einleitung

Im Abschnitt A sind die globalen Herausforderungen an die Sensorik und deren Entwicklungen generell und im Abschnitt B ist der heutige und der erwartete zukünftige Einsatz von Sensoren und Messtechnik beschrieben worden.

Die Sensortechnologie erlaubt eine Vielfalt unterschiedlicher Sensoren und Sensorsysteme für elektromagnetische, mechanische, optische, sowie chemische und medizinische Messgrößen. Diese finden ihre Anwendungen in einer großen Anzahl unterschiedlicher Märkte mit ihren angepassten technischen und ökonomischen Anforderungen. So ergeben sich jeweils spezifische Anforderungen durch die geforderten unterschiedlichen Preisklassen, Seriengrößen, thermische Stabilität, mechanische Stabilität, Lebensdauer, Multifunktionalität, Dichtigkeit, medizinische Oberflächen und vieles mehr.

Dieses Zusammenspiel ist in Bewegung, wir beobachten hier ein Wechselspiel zwischen den technisch-ökonomischen Anforderungen und den technologischen Möglichkeiten der Sensorik und Messtechnik bezüglich der Sensorelemente, der Sensorsignalverarbeitung der Verpackung, der Datenverarbeitung und der Kommunikation, bis hin zur Systemintegration. Neuentwicklungen und Verbesserungen an den Sensoren entstehen oftmals langsam, über einen Zeitraum von Jahren. Vieles ist der Tatsache geschuldet, dass moderne Halbleitertechnologien (noch) nicht die erforderliche Robustheit gegen raue Umgebung einhalten können, bzw. bei diversen Anforderungen nie einhalten können.

Wir sehen daher seit vielen Jahren ein Zusammenspiel der Entwicklungstrends bei:

- Miniaturisierung,
- Integration und
- Kommunikation.



Abb. C1-1
Silizium-Einkristalle als Ausgangsmaterial für Halbleiter-Bauelemente erreichen „Baumgröße“ [SILT-2017].

Dabei kann die Sensorik in starkem Ausmaß von der Halbleitertechnologie und damit der Mikroelektronik profitieren. Diese folgt weitgehend der bekannten Moore'schen Regel, nach der sich die Zahl der auf einem Chip vorhandenen Transistoren auf einem Halbleiter-Chips alle 18 Monate verdoppelt, dies wurde in den letzten Jahren auf eine Verdopplung alle 2 Jahre angepasst. So hatten die kleinsten Chipstrukturen vor 10 Jahren eine Abmessung von 64 Nanometern, heute betragen sie ca. 14 Nanometer. Einige Firmen bringen seit 2017 Chips mit 10 Nanometer-Strukturen auf den Markt [KNO-2016]. Im Kontrast dazu wuchs die Größe der Silizium-Kristalle auf „Baumgröße“, und der Waferdurchmesser stieg auf 300 mm (Abb. C1-1).

Diese Miniaturisierungsschritte und die Vergrößerung der Wafer reduzieren die Kosten pro Funktion stark, die Investitionen in die Fertigungsanlagen steigen allerdings rapide. Daher werden immer mehr Chiphersteller zu „Fabless Companies“ und die Produktion konzentriert sich auf wenige Firmen, die jedoch nur bei entsprechend großen Stückzahlen wirtschaftlich fertigen können. Bei Neuentwicklungen von Sensoren und/oder Mikroelektronik-Chips ist daher zu beachten, ob und wie es gelingt, die ersten kleinen Stückzahlen zu fertigen. Hier haben wir zwar in Deutschland eine größere Anzahl von Technologie-Anbietern, die in Kapitel A.1, Tabelle A1-1 zusammengefasst sind. Dennoch bleibt es kritisch ob spezielle Sensorprozesse verfügbar bleiben.

Technologie	Produkt-Beispiele
Silizium-Technologie und MEMS-Technologie	Drucksensoren
	Neigungssensoren
	Beschleunigungssensoren
	Mikrophone
	Optische Sensoren
	Videosensoren, Bildsensoren
	Farb-Sensoren
	Magnetoresistive Sensoren
	Hall-Sensoren
	Feuchtesensoren
	Infrarot-Sensoren, Pyrometer
	Gassensoren
	RF-ID
Temperatursensoren	
Dünnschicht-Technologie	Thermopiles
	Temperatur-Sensoren
	Magnetoresistive Sensoren
	Feuchtesensoren
	Druck-, Kraftsensoren Dehnungsmessstreifen
Dickschicht-Technologie	Drucksensoren
	Gassensoren
	Temperatursensoren
Polymer-Technologie	Dehnungsmessstreifen
	Temperatursensoren
	Biomedizinische Analytik
	Spray-Düsen
Faseroptik	Drucksensoren
	Temperatursensoren
	Bragg-Gitter
	Positions-, Distanzsensoren

Tab. C1-1

Technologien für Sensor-Produkte Schwerpunkt KMU.

Die Sensorik profitiert von neuen Technologien, sowohl bei den Sensorelementen (etwa durch Miniaturisierung) als auch in der Integration immer leistungsfähigerer Mikroelektronik und Datenverarbeitung. Deshalb werden in der Studie Entwicklungen und Trends in Beispielen aufgezeigt.

So laufen interessante technologische Entwicklungen im Bereich der Sensorelemente, die durch die Synergien zu Fortschritten in der Elektronik-Fertigung angestoßen wurden.

Aus der Silizium-Technologie mit Reinraumtechnik, Fotolithografie, Oxidation und Diffusionsprozessen, Metallisierung und mehr – hat sich die MEMS-Technologie abgespalten, die dreidimensionale Strukturen durch Hinzunahme von diversen zusätzlichen Beschichtungs- und selektiven Ätzschritten fertigt.

Auch die Dünnschichttechnik hat sich abgespalten und weiterentwickelt durch das Aufkommen von großflächigen Displays und Dünnschicht-Solarzellen. Damit konnten dann Dünnschichtsensoren entwickelt werden.

Aus den Technologien der optischen Nachrichtenübertragung hat sich die Faseroptik entwickelt, in der auch spezielle Sensoren entwickelt wurden.

Es gibt heute eine Vielzahl von Technologien, in denen Sensoren gefertigt werden, die dann speziell für die oftmals extremen Einsatzfelder geeignet sind. Ein Vergleich all dieser Technologien und der Sensoren dahinter ist in Tabelle C 1-1 gegeben.

Fortschritte bei der Datenverarbeitung, bei der Mikroelektronik und bei der Software verlaufen oftmals schneller als in der Sensorik. Deshalb werden hier Beispiele aufgezeigt, bei denen diese Entwicklungen in die Sensorik und Messtechnik integriert werden. Dadurch wird die Leistungsfähigkeit der Sensorik erhöht, mehr Nutzen für die Anwender generiert und mehr technische Fähigkeiten angeboten. Diese Beispiele können in Zukunft auch in anderen Sensoraufgaben genutzt werden.

Das Kapitel C 2 beschreibt hier die MEMS-Technik mit Produktbeispielen, sowie deren Chancen und Problemen ausführlich.

Im nächsten Kapitel C 3 wird die Aufbau- und Verbindungstechnik und die Gehäusethematik in unterschiedlichen technischen Lösungswegen beschreiben, von der Leiterplattenintegration, über Molden, bis zum Packaging auf Wafer Ebene.

Aus den steigenden Fähigkeiten der Mikroelektronik mit spezifischen Hardware und Softwaremöglichkeiten ergeben sich „Intelligente Sensoren“ (Smart Sensors), mit schrittweise höheren Fähigkeiten, wie in Kap. C 4 beschrieben.

Dabei können Datenspeicherung, sensornaher Signalverarbeitung, etwa in einem Mikrocontroller und Kommunikationselektronik möglichst auf einem Chip mit einem Sensor, bzw. Sensorelement kombiniert in einem Gehäuse untergebracht werden. Dann können per Software die Daten der Sensoren verbessert, etwa linearisiert werden. Zusätzliche Funktionen können angegeben werden, wie Identifizierung oder Diagnoseinformationen.

Digitale Kommunikation der Sensordaten kann über unterschiedliche Schnittstellen erfolgen. Diese Daten können in Netzwerke zur Anlagensteuerung eingespeist werden. Möglichkeiten der drahtlosen Kommunikation runden den Abschnitt ab.

Um mehr Nutzen für die Anwender zu ermöglichen, etwa in der Prozessindustrie, können zusätzliche Funktionen in die Sensorik und Messtechnik integriert und abgefragt werden, die möglicherweise Folgekosten verhindern können.

Die Selbstüberwachung, Selbstkalibrierung und das Auftreten, bzw. Erkennen von Störungen ist hier ein Thema, das in Kap. C 5 behandelt wird.

Die Möglichkeiten der verstärkten Nutzung des Internet der Dinge in der Industrie wird im Kapitel C 6 skizziert, wo Möglichkeiten der Kommunikation und Systemintegration für die Sensorik vorgestellt werden.

C2 Mikrosystemtechnik – MEMS

C 2.1 Einleitung

MEMS-Anwendungen verteilen sich insbesondere auf Automotive-Elektronik, Konsum-Elektronik, Industrie, Medizin und Telekommunikation. Besonders stark ist das Wachstum in den Anwenderbranchen Medizin und Konsum-Elektronik.

Anhand von Anforderungen in den einzelnen Anwendungsfeldern werden ausgewählte wichtige MEMS-Anwendungen auf ihren technologischen Stand sowie die erforderlichen Entwicklungsschritte für die nächsten Jahre beschrieben. Der Markt wird dabei von einigen großen sowie vielen kleinen Herstellern bestimmt. Es ist zu beobachten, dass viele kleinere Hersteller Umsatzzuwächse erzielen, während die großen Hersteller (etwa ST Microelectronics, Texas Instruments, Hewlett Packard ...) mit Ausnahme von Bosch in Ihrer Entwicklung stagnieren oder sogar rückläufig sind.

Somit ergeben sich für kleinere Unternehmen mit technologisch innovativen Produktlösungen sowie schnellem Time to Market Vorteile, die eine erfolgreiche Positionierung am Markt ermöglichen.

C 2.2 Entwicklung des MEMS-Marktes nach Anwendungen und Zielbranchen

Der MEMS-Markt umfasste weltweit im Jahr 2015 ein Umsatzvolumen von ca. 12 Mrd. \$. Die Prognosen gehen von einem Wachstum auf ca. 19,5 Mrd. \$ im Jahr 2021 aus, was einem Zuwachs von ca. 8 % pro Jahr entspricht. Die hauptsächlichen Anwendungen und die Umsatzanteile am MEMS-Markt sind Lage- und Beschleunigungssensoren, MEMS-Hochfrequenzfilter (RF-MEMS), Mikrofone und Drucksensoren. Es ist davon auszugehen dass diese Wachstumstreiber auch die technologische Entwicklung bestimmen/vorantreiben werden. Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass es für einige im Verhältnis derzeit noch geringvolumigen Anwendungen ein erhebliches Wachstumspotential geben kann, z. B. passive Infrarot-Sensoren (PIR) und Thermopiles sowie Microfluidics.

Für den Erfolg eines MEMS Device entscheidend sind

- anwendungs- und kundenorientierte Spezifikation,
- hinreichende Genauigkeit und Langzeitstabilität.
- Potential für Miniaturisierung sowie
- Potential für Senkung der Herstellkosten.

Dies wird in der nahen Zukunft für Gassensoren in besonderem Maße gegeben sein, die ein breites Einsatzspektrum in den Bereichen Gebäudeüberwachung, Medizin, Militär, Luft- und Raumfahrt, Umweltüberwachung, Automotive sowie industrielle Anwendungen besitzen.

Im Jahr 2014 betrug das Umsatzvolumen des Gassensormarktes weltweit ca. 550 Mio. \$. Es wird ein mittleres Wachstum von ca. 8 % pro Jahr für den Zeitraum bis 2021 prognostiziert [YOL-2016].

C 2.3 Wettbewerber im MEMS-Markt

Der MEMS-Markt wird von einigen größeren und vielen kleineren Herstellern bestimmt. Die drei wichtigsten sind Robert Bosch, STMicroelectronics sowie Texas Instruments.

Die Positionierung der großen Player ist sehr unterschiedlich. Während z. B. Robert Bosch sowohl im Sensor- als auch im Systemmarkt positioniert ist, konzentriert sich STMicrosystems auf das Sensorgeschäft. Für einige Standardprozesse sind auch zunehmend Foundry-Anbieter (z. B. X-Fab als Mixed Signal MEMS Foundry) aktiv und bieten technologische Lösungen für kundenspezifische Designs an [YOL-2016].

Kleinere Marktteilnehmer haben die Möglichkeit, mit technologisch innovativen Produktlösungen sowie schnellem Time to Market Wettbewerbsvorteile zu generieren, die eine erfolgreiche Positionierung am Markt ermöglichen.

C 2.4 Technologische Entwicklung ausgewählter MEMS- Komponenten

C 2.4.1 Allgemeine Herausforderungen

Die Anforderungen des Marktes stellt die technologische Entwicklung vor große Herausforderungen. Betrachtet man den Wachstumstreiber Konsum-Elektronik mit seinen Kernprodukten Smartphones und Wearables, so ergeben sich folgende Herausforderungen:

- Größere Performance (Sensor Integration, Sensorkombinationen, bessere Signalverarbeitung) sowie
- Kostensenkung und
- neue Anwendungen (E-Health, Social Media, Internet der Dinge).

Für die Punkte der Größen- und Kostenreduktion gibt es zwei Lösungsansätze – einen evolutionären durch Optimierung von Design und Herstellungsprozessen sowie einen revolutionären durch Einführung neuer Sensorprinzipien.

Internet-Anwendungen lassen sich in verschiedene Felder segmentieren, wobei die Aufteilung von verschiedenen Autoren auf unterschiedliche Weisen vorgenommen wird. Eine Möglichkeit ist die Aufteilung in Gebäudemanagement, Industrie, Handel, Sicherheit, Energie, Consumer, Transport, IT sowie Gesundheit [BEE-2009].

Beachtet man die einzelnen Sensornutzungsfelder für Internetanwendungen, ergeben sich nicht nur Herausforderungen aus erhöhten Anforderungen an Kosten, Zuverlässigkeit usw., sondern auch aus noch nicht ausreichender Performance (Qualität der Sensoren in Bezug auf Lebensdauer, Temperaturabhängigkeit, Energieverbrauch, etc.). Dabei besteht die Herausforderung, mit kleinen, kostengünstigen sowie energiesparenden Sensoren eine Vielzahl an physikalischen Größen in hinreichender Genauigkeit zu messen und eine entsprechende Signalverarbeitung und -auswertung durchzuführen.

Weiterhin besteht die Anforderung der Vernetzung verschiedener Sensorsysteme in einer Applikation (z. B. im Automobil) aber auch darüber hinaus (z. B. Kommunikation zwischen Wearable und Gebäudemanagement zur Steuerung von Beleuchtung, Heizung usw.).

Technologisch lassen sich die MEMS-Bauelemente/ und Packages in drei Kategorien klassifizieren, woraus sich auch drei wesentliche Technologien ergeben:

- geschlossene Packages (z. B. Beschleunigungssensoren, Gyroskope, Magnetometer, IMUs, Inertial Combos),
- Packages mit offenen Vertiefungen (z. B. Druck, Temperatur, Gasdetektion, Mikrofon),
- Packages mit optischen Fenstern (z. B. Gasdetektion, Bewegungsüberwachung, Überwachung medizinischer Parameter).

In der Weiterentwicklung von speziell angepassten hybriden Packaging-Lösungen wird in den nächsten Jahren ein wesentliches Wachstumsfeld erwartet. Im Folgenden wird auf die technologische Entwicklung ausgewählter MEMS-Komponenten eingegangen, die für die Wachstumsmärkte Consumer Electronics, Medizin und Industrie (hier insbesondere Prozessmesstechnik und Automatisierung) von besonderer Bedeutung sind:

- Drucksensoren,
- Inertial Combos,
- RF-MEMS und
- Gassensoren.

C 2.4.2 Drucksensoren

Drucksensoren, insbesondere auf dem piezoresistiven Messprinzip beruhende MEMS-basierte Drucksensoren, werden seit vielen Jahren in Industrie, Automotive sowie Luft- und Raumfahrt eingesetzt. Ihre Entwicklung ist sehr weit fortgeschritten, allerdings gibt es auch heute technologische Begrenzungen, die teilweise mit einer aufwendigen Auswertungs-elektronik kompensiert werden müssen oder ihren Einsatz ganz verhindern.

Insbesondere sind zu hier nennen:

- Begrenzter Druck- und Temperaturbereich.
- Unzureichende Langzeitstabilität des Sensorsignals,
- begrenzte Medienresistenz,
- Temperaturabhängigkeit der Sensorsignale.

Die technologische Entwicklung von Drucksensoren konzentriert sich sowohl auf die Überwindung dieser Begrenzungen, als auch die Kombination von Drucksensoren mit anderen Sensoren z. B. in Inertial Combos, bei denen über den Drucksensor eine Höheninformation gewonnen werden kann.

C 2.4.3 Inertial Combos

Inertial Combos dienen der räumlichen Orientierung und kombinieren z.B. Magnetometer, Beschleunigungssensoren sowie Gyroskope. Hintergrund ist hier, dass erhöhte Anforderungen an Kompaktheit sowie der Kostendruck insbesondere aus dem Bereich Konsum-Elektronik dazu führen, dass die unterschiedlichen Sensoren mit einem ASIC ausgewertet werden können, was Platz und Kosten spart. Für die Entwicklung ist hier in den Low-Cost Bereich (Konsum-Elektronik) und den High-End-Bereich zu unterscheiden (etwa Luft- und Raumfahrt). Im ersten Fall zielt die technologische Entwicklung hauptsächlich auf eine Reduktion von Bauteilgröße, Kosten und Verbrauch an elektrischer Energie, während im zweiten Fall die Integration der verschiedenen Sensoren und deren Leistungsfähigkeit verbessert werden muss (siehe auch Kap. A 1).

C 2.4.4 RF-MEMS

RF-MEMS-Komponenten sind in einem breiten Bereich von sehr niedrigen Frequenzen bis zum sub-mm-Bereich einsetzbar. Dabei wird die die RF-Funktion durch schwingende mechanische Strukturen realisiert. Ausgehend von den Anforderungen der Haupteinsatzgebiete wie in Messequipment, militärischen Anwendungen, Luft- und Raumfahrt ergibt sich technologischer Entwicklungsbedarf in den Bereichen Packaging, Zuverlässigkeit und Langzeitstabilität sowie den Kosten.

C 2.4.5 Gassensoren und Thermopiles

Für diese MEMS-Technologiefelder ist insbesondere die Kombination Infrarot-Quelle-mit einem Gasvolumen, bzw. wellenlängenselektives Element (wie einem optischen Filter) mit einem Infrarot-Detektor von Interesse. Das wellenlängenselektive Element ermöglicht dabei z. B. die Bestimmung der Absorption durch ein spezifisches Gas. NDIR-Sensoren (nichtdispersive IR-Sensoren) bilden hierbei eine im Markt etablierte Anwendung (siehe auch Kap. B 3.1). Die Nutzung von Thermopiles (Kap. B 2.3.2) als IR-Detektor liefert dabei die Möglichkeit, direkt IR-Strahlung in elektrische Energie umzuwandeln. Eine Kühlung der Detektoren ist nicht notwendig. Trotz der Notwendigkeit, ein gewisses Gasvolumen für die Wechselwirkung mit der IR-Strahlung nutzen zu müssen (z. B. Absorption) ergibt sich das Potential, sehr preisgünstige und kompakte Bauelemente entwickeln zu können. Die künftige Entwicklung wird sich hier auf die Verbesserung von Empfindlichkeit sowie die Verbesserung der Kostenstrukturen konzentrieren.

C 2.4.6 Aufbau- und Verbindungstechnik

In einigen Bereichen war in der Vergangenheit ein starker Trend zur vollintegrierten Lösung zu beobachten. In diesem Fall geht man aber stets einen Kompromiss aus der erreichbaren

Performance des Sensors und der Performance der Elektronik ein, da beide Komponenten in der Regel unterschiedliche technologische Randbedingungen verlangen. Heute wird daher oft wieder ein hybrider Aufbau aus dem eigentlichen MEMS-Sensor und dem CMOS-ASIC bevorzugt, da sich nur so die optimalen Eigenschaften für beide Komponenten erreichen lassen. Durch moderne AVT-Lösungen (Kap. C 3) sind diese hybriden Mikrosysteme heute auch kostengünstig und zuverlässig herstellbar.

Neben der Sensorentwicklung ist gerade die Aufbau- und Verbindungstechnik für den Einsatz von MEMS-Komponenten in den o.g. Anwendungsfeldern erfolgskritisch. Dabei sind zwei Faktoren zu beachten:

- Realisierung einer guten Handhabung für die weitere Verarbeitung durch ein geeignetes Package,
- Schutz des Sensors innerhalb einer Umgebung mit extremen Bedingungen bezüglich Temperatur, Druck, chemischer Umgebung, usw.

Es ergibt sich die Notwendigkeit, ausgehend von den IC-basierten Technologien MEMS-AVT-Technologien aufzubauen, die neben den o.g. Anforderungen auch berücksichtigen, dass in der Anwendung auch nichtelektrische Stoffflüsse (mechanisch, chemisch, biologisch) stattfinden.

C 2.4.7 Weitere ausgewählte MEMS-Entwicklungstrends

Es ist zu erwarten, dass sich der Trend zur weiteren Miniaturisierung der Bauelemente, der mit einer Kostenreduktion einhergehen wird, durch Implementierung von fortgeschrittenen Herstellungsmethoden, wie z.B. Verwendung von Plasmaätzverfahren bei der Herstellung der Membranen von Drucksensoren, fortsetzen wird.

Durch den Einsatz von SOI-Wafern sowie von Si-Stapeltechnologien in Verbindung mit Through Silicon Via (TSV, Kap. C 3.2.3) lassen sich kompakte Bauformen herstellen, die Medienresistenz, hohe Zuverlässigkeit und minimale Kosten realisieren.

Durch die konsequente Einführung der Stapeltechnologie werden hybride technologische Lösungen auf der Basis unterschiedlichster Technologien möglich. Neue Herausforderungen liegen zunehmend im Bereich der hybriden Mikromontage. Als wesentliche Anforderungen sind hier Präzision, höhere Betriebstemperaturen, Langzeitbeständigkeit und Zuverlässigkeit zu nennen. Der Einsatz neuer Materialien lässt hinsichtlich Temperaturstabilität und Medienresistenz Vorteile erwarten.

All diese Entwicklungstrends zeigen, dass sich die MEMS-Technologie intensiv weiterentwickelt und für die Sensorik eine zukunftssichere Technologie darstellt.

Oftmals sehen Sensorfirmen den Bedarf an verbesserten oder neuen Lösungen, sowohl am Sensorelement als auch in der Integration mit einer moderneren Datenverarbeitung oder Kommunikation, oder einem verbesserten Gehäuse.

Diese Neuentwicklungen oder Verbesserungen können entweder firmenintern gelöst werden, oder es werden Partner gesucht (Kap. D 2). Insbesondere bei langfristigen Entwicklungen helfen sie an Universitäten, bei Fraunhofer-Instituten oder bei unabhängigen Technologieexperten. Speziell bei MEMS-Technologien ist solch ein Vorgehen zu empfehlen, da Entwicklungs- und Fertigungsprozesse im Reinraum notwendig und Technologieentwicklung aufwendig sein können.

C 3 Aufbau- und Verbindungstechnik, Integrationstechniken

C 3.1 Aufbau- und Verbindungstechnik

C 3.1.1 Einleitung

Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) und Kontaktierungen können die funktionalen Eigenschaften, die Zuverlässigkeit und die Herstellkosten von Sensoren signifikant beeinflussen. Insbesondere Anforderungen an die Robustheit bedingen in der Regel spezifische Technologien der AVT. In der Aufbau- und Verbindungstechnik von Sensoren sind derzeit folgende Trends zu beobachten:

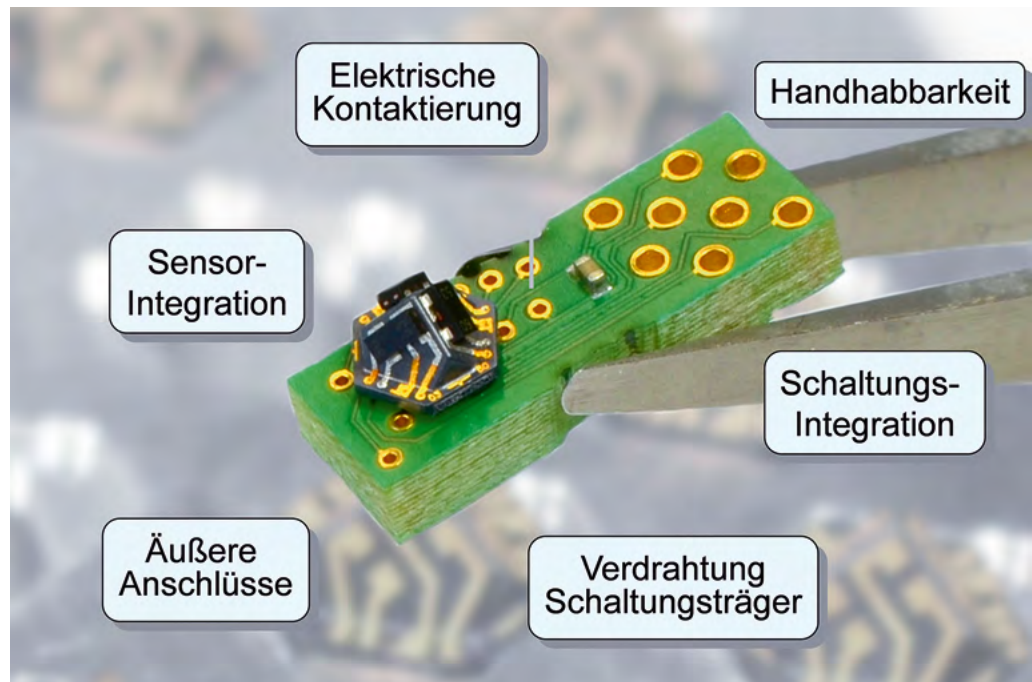
- Weiterhin große Dominanz von leiterplattenbasierten Systemen
- Monolithische Integration als Basis für extreme Größen- und Kostenreduktion
- Miniaturisierung durch sensortaugliche SMD und Chip-Scale-Packages
- In Schaltungsträger und Leiterplattensubstrat integrierte Funktionen – System-in-Leiterplatte
 - Multifunktionales Packaging
 - Premolded-Packaging-Technik für Sensoren und Sensorsysteme
 - Integration nichtelektrischer Funktionselemente in gemoldete Bauelemente
 - Molded-Interconnect-Devices mit integrierten Funktionselementen
- Weiterhin Bedarf an hermetischen Gehäusen
 - Wafer-level-Hermetizität für MEMS
 - Erschließung von Hochtemperaturanwendungen durch keramische Werkstoffe
- Unkonventionelle AVT
 - Neue Integrationskonzepte für Sensoren in Strukturbauteile (Maschinenteile, Bauwerke, Textilien)
- Produktentstehungsprozess
 - Additive Fertigungsverfahren

C 3.1.2 Anforderungen, Elemente eines Sensorsystems

Die Aufbau- und Verbindungstechnik von Sensoren ist in mehrere hierarchische Ebenen gegliedert. Dabei unterscheidet man zunächst das Zero- und First-Level Packaging des eigentlichen Sensorbauelements und der anderen Bauelemente, den Schaltungsträger, der zusammen mit den Montageverbindungen und Kontaktierungen das Second-Level Packaging ergibt (Abb. C 3.1-1, umseitig). Bei dem gezeigten Beispiel werden drei kostengünstige, kommerziell verfügbare SMD-Magnetfeldsensoren rechtwinklig zueinander angeordnet, sodass ein räumlich messendes 3D-System entsteht. Darüber hinaus wird ein Sensor in der Regel durch ein Gehäuse geschützt, welches die Sensorbaugruppe aufnimmt, und darüber hinaus Interfaces und physikalische Schnittstellen zu einem Gesamtgerät integriert.

In der AVT sind wichtige Entwicklungen bei den einzelnen genannten Technologien und Elementen zu erwarten. Jede Branche und jede Anwendung benötigt eine spezifische AVT, weil Bauarten und Zuverlässigkeitsanforderungen sehr anwendungsspezifisch sind. Daher besteht auf dem Gebiet der Gehäuse- und Aufbau- und Verbindungstechnik eine Tendenz zur starken Spezialisierung entsprechend den technischen Anforderungen. Darüber verschwimmen die Grenzen zwischen den Integrationsebenen zunehmend. Gründe sind neue Aufbautechnologien sowie der Trend zu einer direkten Sensorapplikation in mechanische Strukturen.

Abb. C3.1-1
Integrations-
ebenen
und Elemente der Auf-
bau- und Verbindungs-
technik in der Sensorik
[HAHN-2017].



C 3.1.3 Gehäusetechnologien

C 3.1.3.1 Bauformen für die Leiterplattenintegration

Aus Kostengründen hat sich das Plastic-Packaging auch bei Sensoren weitgehend durchgesetzt, vor allem in Massenanwendungen der Sensorik. Für integrierte Sensorschaltkreise mit hohen Stückzahlen, z. B. Hallsensoren, dominiert weiterhin eine Standard-Gehäusetechnik, die auf dem Umspritzen der Aufbauten mit Epoxid-Vergussmassen durch Transfermolden basiert. Bei diesen SMD-Bauformen kann man Kosten von unter einem 1 Eurocent pro Pin annehmen. Die Aufbau- und Verbindungstechnik von Sensoren auf Basis von Standard-Gehäusen, welche mit der Leiterplattentechnik kompatibel sind, hat bereits lange Tradition.

Dabei sind mehrere Entwicklungstrends zu beobachten:

- Zunehmender Einsatz extrem miniaturisierter Standardgehäuse als gemoldete SMD-Bauformen
- Modifikation von gemoldeten Standardbauformen in Richtung Multifunktionalität

Als generellen Trends bei der Miniaturisierung kann man konstatieren:

- Die Entwicklung von Sensorik wird vor allem durch die „Mobile“-Branche vorangetrieben. So werden immer mehr Sensoren im Handy integriert.
- Die Economy of Scale gilt. Es wird also hohe Sensorfunktionalität zu sehr geringem Preis durch sehr hohe Stückzahlen mithilfe von Massen- und Consumeranwendungen ermöglicht.
- Drucksensoren haben sich inzwischen für Smart-Phones etabliert, nach dem sie erstmals im iPhone 6 integriert wurden. Die Anwendung dabei ist die Indoor-Navigation, Apple stellt hier einen Quasi-Standard dar.

Hersteller monolithisch integrierter Sensoren erwarten, dass die nächste Innovationswelle auch durch sog. Wearables ausgelöst wird. Dies erfordert teilweise neue Sensorprinzipien, speziell bei der Erfassung von Körperfunktionen und physischem Zustand durch Smart Watches und andere Smart Wearables. Es wird erwartet, dass zukünftige Anwendungen insbesondere auf Sensorik basieren [QUA-2015], und dass der nächste Technologieschub durch das Internet der Dinge (Internet of Things, IoT) ausgelöst wird (Kap. A 3, C 6). Generelle Anforderungen an mobile Smart Systems und damit auch an deren Aufbau- und Verbindungstechnik sind:

- Verringerte Baugröße, speziell dünnere Packages, um Mobiles weiter zu schrumpfen
- Weiter reduzierte Kosten
- Mehr integrierte Funktionalität auf verkleinerter Fläche

Damit verbunden sind neue erforderliche Lösungen zur Integration und Aufbau- und Verbindungstechniken. Diese umfassen Wafer-Level-Packaging, Multi-Chip-Packages und kombinierte Sensoren (Combo, s.a. Kap. C 2). Aus Sicht der Hersteller von Sensor-ICs und der Anwender sind folgende strategische Aspekte maßgeblich für die erwarteten Trends:

Kombinierte Sensoren geben dem Systemintegrator mehr Funktionalität auf gleicher oder kleinerer Fläche zu geringem Aufpreis und sie sind einfacher zu integrieren. Mikrofone haben z. B. immer Zugang nach außen, sodass eine kombinierte Integration von Sensoren, die Außenanschlüsse brauchen, Anschlüsse spart.

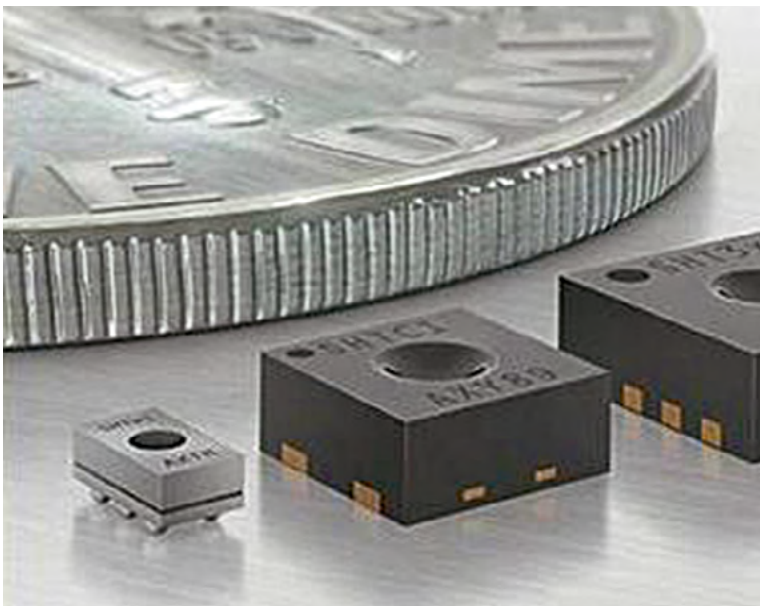


Abb. C3.1-2
Gemoldete Chip-Scale-Packages in QFN Bauform für monolithisch integrierte Sensoren [SENS-2017].

Bei Kombinationssensoren wird schrittweise immer mehr Funktionalität integriert. So bietet beispielsweise Bosch Sensortec Sensoren für Druck und Feuchte/Temperatur als separate Bauelemente an, es sind jedoch auch Druck und Feuchte in einem Modul (BME280) sowie Druck und Feuchte und Gassensorik in einem einzigen Modul (BME680) verfügbar. Eine analoge Entwicklung ist auch bei Inertialsensoren zu beobachten (s. auch Kap. C 2.4).

Wafer Level Chip-Scale Packages (WLCSPP) werden durch Verkapselung und nachfolgende Vereinzelung von Wafern hergestellt. Sie haben theoretisch den Vorteil, dünner, kleiner und kostengünstiger zu sein. Die teilweise sehr komplexe Prozessierung führt zu Nachteilen bei Ausbeute und Zykluszeiten in der Herstellung, sodass die Kosten nicht viel niedriger als bei Chip-Level-Packages sind. Die anhaltend intensive Forschung wird aber die Technologien und Prozesse weiter entwickeln.

Gründe für die Beliebtheit der Chip-Scale-Packages (Abb. C3.1.2 und C3.1.3) sind:

- Fast so kompakt wie ein Bare-Chip: (+20 %)
- Weiterentwicklung der Moldtechnik (Kavität)
- Full-Package-Eigenschaften (Testbarkeit, ...)
- Verarbeitung mit Surface Mount Technology (SMT)
- Einsatzmöglichkeit in rauen, Umgebungen bis 125 °C
- Ausfallraten von nur wenigen FIT (1 FIT = 10⁻⁹ Fehler/Std.)

Die Stressabhängigkeit bestimmter Sensoren (z. B. Druck) erfordert neue Lösungen bei Design und Auslegungsmethodik, um Stress zu entkoppeln und gleichzeitig Miniaturisierung, Reduktion der Herstellungskosten sowie Verbesserung der Sensorgenauigkeit für neue Anwendungen wie die Indoor Navigation zu gewähren.

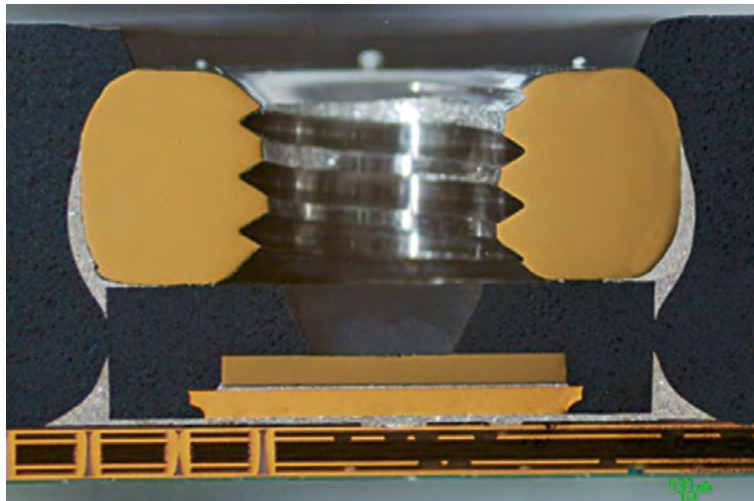
Abb. C3.1-3
Gemoldete Chip-Scale-Packages in verschiedenen Bauformen für monolithisch integrierte Sensoren [BOSC-2017].



C 3.1.3.2 Freiform-Packaging durch Molden

Neue Packaginglösungen können die gemeinsame Einbettung elektronischer und mechanischer Systeme ermöglichen. Hierdurch sind Vorteile in Bezug auf Funktionalität, Integrationskomplexität und Kosten bei der Herstellung zu erwarten. Nachfolgend werden einige Beispiele erläutert.

Abb. C3.1-4
Querschnitt eines gemoldeten SMD mit integrierter Befestigungsschraube, gelötet auf Leiterplatte [SENC-2016].



Ein wesentliches Merkmal der Verkapselung von MEMs und Sensoren ist, dass die Sensoroberfläche in Kontakt mit der Umgebung stehen kann, während zugleich der eingebettete Sensor und die Kontaktierungen (Drahtbonds) gegen schädigende Einflüsse mechanischer, klimatischer, chemischer Art oder Kontaminationen geschützt werden müssen. Wesentliche Voraussetzungen sind Technologien wie Cavity-Molding durch folienunterstütztes Molden oder Multi-Die-Packaging, das vom System-in-Package (SiP) bekannt ist. Freiform-Verkapselung geht über diese Anforderungen hinaus. Ein Hauptmerkmal ist die Abweichung von Bauformen der SMD- und Durchsteck-Technik. Die weiterentwickelte Moldtechnik lässt grundsätzlich auch komplexere Bauformen zu.

Multifunktionalität wird bisher primär durch thermoplastische Premolded-Packages und Molded-Interconnect-Devices erreicht, die im Spritzguss hergestellt sind. Das Packaging mit Duroplasten hat dem gegenüber Vorteile wie eine bessere Werkstoffisotropie, größere thermomechanische Stabilität und höhere Interface-Festigkeiten.

Kostenvorteile können beim Freiform-Packaging vor allem durch einfachere Systemlösungen realisiert werden, indem die 1st-level Sensor-AVT und die 2nd-level Modulfertigung sowie teilweise die Geräteebene durch eine einzige Technologie ersetzt werden.

Inzwischen ist es möglich, mechanische Elemente beim Molding mit Gehäusen zu kombinieren. Solche mechanische Verbindungselemente (Abb. C3.1-4), Justagestrukturen, Tragstrukturen oder Wärmesenken bestehen in der Regel aus kostengünstigen Metallen und werden mit Massenverfahren wie Umformung oder Zerspanung hergestellt. Es werden auch polymere Komponenten wie Röhren und Gehäuse mit direkt montierten Sensoren oder MEMS verwendet. Insgesamt kann so ein mehrfach integriertes Komplettsystem als System-in-Package (SiP) mit ASIC, Sensor, passiven Bauelementen und mechanischen Strukturen auch ohne zusätzliche Leiterplatte realisiert werden. Durch eine derartige Integration elektronischer und mechanischer Teilsysteme ergeben sich Vorteile wie:

- Verbesserte Justage additiver Komponenten
- Erhöhte Messgenauigkeit
- Widerstandsarmer thermischer Kontakt
- Einfacheres Design
- Erhöhte Packagingeffizienz (Verhältnis Chipfläche zu Packagefläche)

Vorfabrizierte mechanische Elemente können physisch umhüllt und fest im Duroplastmaterial verankert werden, um stabile mechanische Befestigungen (Abb. C3.1-4 und C3.1-5), Führungen und Zentrierungen für Anbauteile zu integrieren. Als Basis für die Montage werden Leadframes, Leiterplatten oder Keramikssubstrate verwendet. Durch mehrfache Prozessabfolgen, bei denen Kavitäten erzeugt werden, können auch freitragende Strukturen im Gehäuse erzeugt werden.

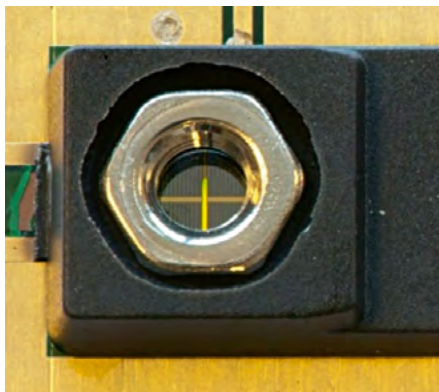


Abb. C3.1-5
Moldgehäuse mit integriertem Schraubfitting über der aktiven Chipfläche [SENC-2016].

Anschlussstutzen, Rohrleitungen und differentielle Messung: Zuleitungen und Anschlussstutzen, die Gases oder Flüssigkeiten führen, können direkt mit einem Sensor oder Mikrosystem verbunden werden (Abb. C3.1-5, C3.1-6). Dies vereinfacht den Zusammenbau und reduziert den konstruktiven Aufwand beim Anschluss der Medienleitungen an den IC. Dabei sind sogar beidseitige Gehäuseanschlüsse für differenzielle oder Durchflussmessungen realisierbar.



Abb. C3.1-6
Moldgehäuse mit befestigter Armatur und Medienschlauch [SENC-2016].

Magnetische Lager für Drehbewegungen: Für hochgenaue Winkelmessung mit magnetoresistiven oder Hallsensoren werden Wellen oft mit Dipolmagneten oder Polringen versehen. Diese Wellen können mit hoher Präzision geführt und zentriert werden, wenn Koordinaten und Neigung der Lager im Moldprozess exakt festgelegt sind (Abb. C3.1-7). Durch die Molding-Integration können die Magnetfeld-Sensorelemente sehr nah am Magneten positioniert werden. Dies erhöht die Messgenauigkeit signifikant und erlaubt auch kleinere oder schwächere Magnete, was die Kosten reduziert. Das so verkapselte Sensorsystem kann als Standardelement mit reduziertem Montage- und Justieraufwand verbaut werden. Zukünftig soll es möglich sein, einen gesamten Motor gemeinsam mit Sensoren für die Läuferposition und dem elektronischen Controller zu vermolden. Diese Integrationslösung reduziert die Verbindungstechnik, Kosten und auch Geräusche.

Abb. C3.1-7
Muster eines Sensors zur Drehwinkelmessung mit integriertem magnetischen Polring und durchgesteckter Welle [SENC-2016].



Optische Justageelemente

Für viele sensorische Anwendungen werden OEM-Kamerasysteme realisiert. Die Integration einer Schraub- oder Schnappverbindung direkt im Gehäuse erlaubt die Montage von Optiken mit Justiergenauigkeiten von bis zu $\pm 20 \mu\text{m}$. Auch können Führungen nicht rechtwinklig angebracht werden. Eine Weiterentwicklung ist die direkte Einbettung einer KameraLinse. Unter Nutzung von Löchern im Leadframe und Referenzmarken an der Kamera sind ebenfalls Positioniergenauigkeiten um $\pm 20 \mu\text{m}$ machbar.

Eingebettete Antennen

Viele Sensoren arbeiten heutzutage drahtlos. Es wird erwartet, dass die direkte Verkapselung der Funkantenne eine sehr hohe Empfindlichkeit ermöglicht. Deutlich verringerte Abstände zwischen der Antenne und der Sende- und Empfangselektronik werden die Impedanz-Anpassung signifikant vereinfachen. Vorteile können geringere Leistungsverluste, größerer Wirkungsgrad oder weniger benötigte Verstärkerstufen sein. Weiterhin ist mit dem Prozess eine Abschirmung zwischen Digital- und HF-Teil möglich, die das Gesamtkonzept vereinfacht.

C 3.1.3.3 Premolded Packages

Bei spritzgegossenen Bauteilen haben die Entwicklungen im Wesentlichen zu den Grundformen Stecker, Bauelementgehäuse, Modulgehäuse und Molded-Interconnect-Devices geführt.

Kleinere Sensorgehäuse für die Leiterplattenmontage sind in ihrer Topologie aus IC-Gehäusen abgeleitet. Sie beinhalten in der Regel nur wenige Bauelemente, z. B. ein MEMS und den Auswerte-IC. Wichtigste Materialien sind LCP, PEEK oder PPS. Wesentlicher Grund für ihre Anwendung ist die inhärente Erzeugung einer Kavität im Premolding-Prozess.

In Modulgehäuse werden ganze Baugruppen montiert. Sie kombinieren damit Strukturen wie Stecker, Wärmesenken oder Medienanschlüsse. Ein solches Bauelement könnte z. B. ein Drucksensor sein, der in die Schnellkupplung einer Kfz-Kraftstoffleitung integriert ist. Das Package hat neben Schutz und Handhabung die Funktionen der elektrischen Kontaktierung über den integrierten Steckverbinder und zugleich der Medienanbindung an den Kraftstoff.

Aufbautechnisch handelt es sich um ein spritzgegossenes Bauteil aus Polyamid mit Kupfer-Leadframe. In die Kavität ist als Schaltungsträger eine Leiterplatte montiert, welche den mikromechanischen Drucksensor mit Glaskörper trägt. Dabei wird neben der „traditionellen“ Gehäuseherstellung auch die nachfolgende Integration von der Montage und Kontaktierung von Sensoren und Elektronik bis hin zum Verschluss hoch automatisiert durchgeführt. Durch einen sehr hohen Automatisierungsgrad in Verbindung mit starken technischen Anforderungen kann das Bauteil wirtschaftlich in Deutschland gefertigt werden.

Wichtigste Materialien für multifunktionelle Premolded Packages sind PBT, ein bis 30 % anorganisch gefüllter Polyester für Anwendungen bis etwa 125 °C und für höhere Temperaturen, Polyamid (PA) oder Polyphenylensulfid (PPS). Da Metall-Polymer-Durchführungen und damit die Gehäuse nicht hermetisch sind, ist oft ein zusätzlicher Schutz des Chip und seiner Kontaktierungen notwendig. Dabei werden teilweise auch mikromechanische Strukturen, z. B. Membranen, mit Silikongel vergossen.

C 3.1.3.4 Vergleich von Gehäusetechnologien für Sensoren

Bisher war konventionelles Molden mit Kontakt des Chips zur Moldmasse für die meisten Sensoren nicht geeignet, da diese freien Zugang zu sensitiven Schicht erfordern, entweder weil die sensitive Schicht frei bleiben muss oder das Molden zu hohen Stress erzeugt. Eine der wenigen geeigneten Sensortypen ist der Magnetfeldsensor (Tabelle C3.1). Das direkte Selektivbeschichten mit einer Glob-Top-Masse vermeidet zwar diese Nachteile, aber die Robustheit der Sensoren reicht für Industrie- und Automotive-Anwendungen meist nicht aus. Bisher war daher das Sensorpackaging weitgehend den Premolded-Varianten, insbesondere mit Thermoplasten vorbehalten. Durch das Exposed-Die-Molding, also das Freilassen der sensitiven Struktur und durch das Freiform-Molden unter Integration mechanischer Elemente können nun viele Integrationskonzepte für Sensoranwendungen erschlossen werden, die bisher eher den spritzgegossenen Premolded-Gehäusen vorbehalten waren (Tabelle C3.1).

Gehäuse-Technologie	Druck	Sensortyp			
		Medium (Gas/Flüssigkeit)	Optik	Inertial- sensorik	Magnet- feldsensor
Konventionelles Molding				**	***
Globtop	***		***	***	**
Exposed Die Molding	***	***	***		
Freiform-Molden	***	***	***	***	***
Premolded Packaging	***	***	***	***	

*** üblich ** ungeeignet * kaum eingesetzt

Tab. C3.1

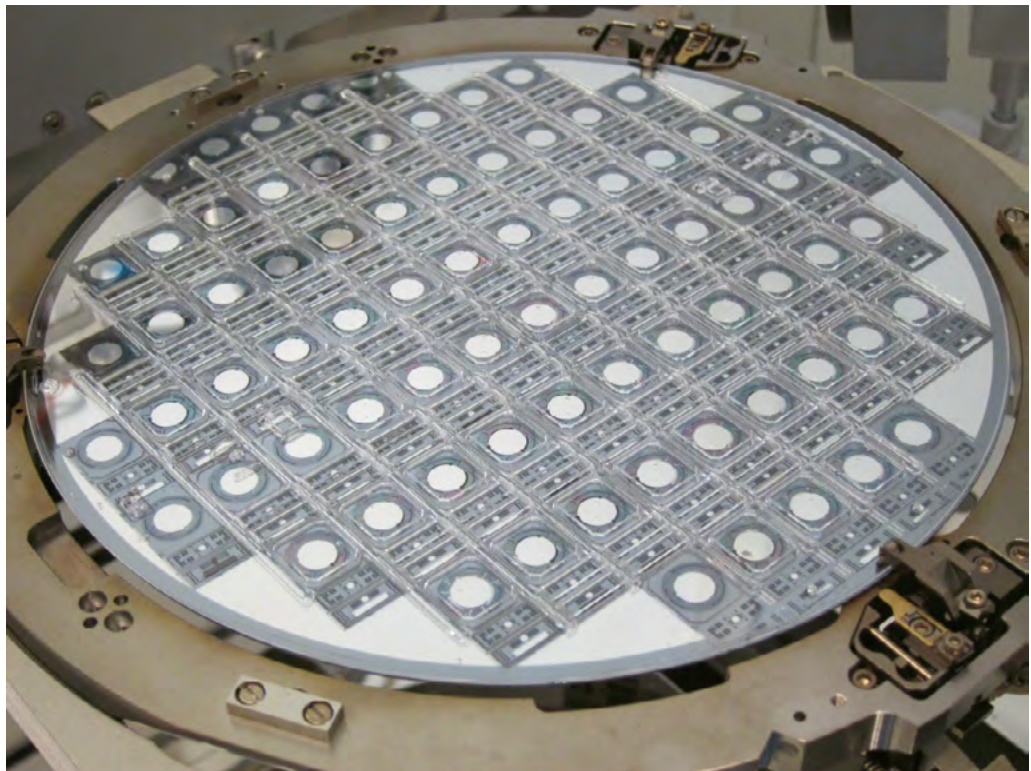
Anwendungsbereiche von verschiedenen Varianten von Molding und Spritzguss für das Zero-Level und First-Level Plastic Packaging von Sensoren

Die Spritzguss- und die Moldingtechnik haben beide im Prinzip einen hohen Reifegrad. Insbesondere das Molding hat sich jedoch technologisch stark weiterentwickelt. Über Vor- und Nachteile der beiden Grundkonzepte können daher nur auf Basis konkreter Spezifikationen genauere Prognosen getroffen werden. Mit dieser Einschränkung ist in Tabelle C3.1 eine Bewertung elementarer Eigenschaften dargestellt.

C 3.1.3.5 Hermetisches Zero-Level-Packaging auf Waferebene

Hermetizität ist oft wegen mikrosystemtechnischer Funktionalitäten erforderlich. Die teuren Materialsysteme aus Glas, Keramik und Metall der hermetischen 1st-Level Packages sind jedoch häufig wirtschaftlich nicht tragbar oder zu groß. Technologien der Wafer-Level-Hermetizität beschränken die Hermetizität auf die mikrosystemtechnische Struktur. Im Prinzip werden hierzu Silizium- oder Glasdeckel entweder einzeln oder als Wafer auf den Grundwafer gebondet (Abb. C3.1-8).

Abb. C3.1-8
Wafergebondetes
Zero-Level-Package.
Die MEMS-Scanner
befinden sich noch
im Waferverbund
[ISIT-2016].



Da Durchkontaktierungen an die Funktionsstrukturen erzeugt werden müssen, basieren Schlüsselprozesse auf Lötten, Glaslötten, Anodischem Bonden, Waferbonden, Eutektischem Bonden oder Intermetallischen Verbindungen. Die Bondschichten werden in situ im Prozess erzeugt oder separat appliziert. Anwendungen sind Inertialsensoren oder optische Sensoren. Zero-Level-Hermetizität kann mit anderen modernen polymeren Konzepten wie MID, Vermolden und Embedding kombiniert werden, wobei immer noch ein sehr hoher Forschungsbedarf existiert.

Zusammenfassend kann man durch Zero-Level Packaging eine hermetische Kavität z. B. mit Gas oder Vakuumatmosphäre erzeugen. Eine "Full-Package-Lösung" entsteht durch Kombination mit Plastic Packaging wie dem nachfolgenden Einbau in Premolded-Gehäuse. Zero-Level-Hermetizität stellt somit eine wichtige Basistechnologie für ein MEMS-Packaging dar, bei dem Funktionalität, Kosten, Baugröße und Zuverlässigkeit optimiert sind.

C 3.2 Integrationstechniken

C 3.2.1 Dreidimensionale Schaltungsträger für Mikrosystem-Packaging und MID

Molded Interconnect Devices (MID) sind spritzgegossene Bauteile, welche zugleich dreidimensionale Schaltungsträger, Präzisions-Strukturbauteile und Gehäuse darstellen, und auf die sowohl SMT als auch Bare Chips montiert sind. Ein wichtiges Merkmal ist der mit dem Leiterbahn-Layout direkt metallisierte thermoplastische Grundkörper. Wichtigstes MID-Material ist ein metallisierbares LCP (Liquid Crystal Polymer). Vorteile und Gründe für die zunehmende Bedeutung der MID sind:

- 3-dimensionale Multifunktionalität und Designflexibilität.
- Kombination von Strukturbauteil und Schaltungsträger.
- Hochgenaue mechanische Strukturen mit Toleranzen $< 10 \mu\text{m}$.
- Assembly und Verbindungstechnik mit SMT und Bare Chip-Technologien.
- Kostengünstige kundenspezifische Lösungen bei Großserien.
- Zudem erhöht sich die Zahl der Anbieter kontinuierlich und es werden kontinuierlich Fortschritte bei Robustheit und Zuverlässigkeit erzielt.

Eine neu belebte Entwicklung stellt die spritzgussbasierte Verkapselung dar. Dabei werden Bauelemente oder Baugruppen, z. B. auch MID, nach dem Assembly mit Thermoplasten direkt umspritzt. Zu diesem Verfahren wurde in den letzten Jahren eine Reihe von Forschungsvorhaben begonnen oder durchgeführt. Materialaspekte waren dabei möglichst geringe Spritztemperaturen, geringer Stress im Bauelement und die Schutzwirkung.

Für Sonderanwendungen gibt es den Bedarf, statt thermoplastischer Materialien keramische Werkstoffe einzusetzen. Technische Anforderungen umfassen hohe Temperaturstabilität ($>300 \text{ }^\circ\text{C}$), gute thermisch-mechanische Anpassung an Silizium, ($\text{CTE} < 5 \text{ ppm/K}$) und hohe thermische Leitfähigkeit ($>5 \text{ W/mK}$). Da dies mit Polymeren nicht erreichbar ist, werden Forschungsanstrengungen unternommen, Keramiken als multifunktionale 3D-Schaltungsträger für die Sensormontage zu erschließen (Abb. C3.2-1). Hierfür kommen verschiedene Technologien in Frage.

Für große Stückzahlen steht der Spritzguss keramischer Massen (Ceramic Injection Molding – CIM) mit anschließendem Brennen zur Verfügung. Laufende Arbeiten beschäftigen sich mit der Materialentwicklung für neue Formmassen, dem Umspritzen von Strukturen und der Erzeugung von Verbundteilen. Für Kleinserien-Bauteile und Rapid Prototyping werden Prozesse der generativen Bauteilerzeugung erforscht. So können beispielsweise keramische Pulver über Ink-Jet-Verfahren zu Grünlingen verklebt und gebrannt werden. Das Laser Selective Melting ist für metallische und teilweise auch für glaskeramische Werkstoffe geeignet. Mit berührungslosem Drucken von Metallen ist es möglich, in oder auf den Bauteilen zusätzliche 3D-Leiterstrukturen herzustellen.

Die beschriebenen Bauteile sollen nach der Erzeugung ähnlich wie MID weiter zu kleinen 3D-Baugruppen integriert werden. Die genannte Technologie befindet sich derzeit in der Phase intensiver Erforschung. Ein wesentlicher Schlüssel zur in der Breite erfolgreichen Industrialisierung sind jedoch Materialentwicklungen bei den keramischen Massen, bestehend aus Pulvern und Hilfsstoffen sowie bei den metallischen Leiterwerkstoffen, welche sowohl fähig für Cofiring als auch dreidimensional applizierbar sind.



Abb.C 3.2-1

Dreidimensionales Sensorsubstrat für die Montage von Drucksensoren [IMTE-2017].

C 3.2.2 Leiterplattenbasierte Integration

Es ist sicherlich zu erwarten, dass trotz neuer konkurrierender Technologien die Leiterplatte weiterhin die wichtigste Integrationsplattform für Sensorsysteme bilden wird. Gründe sind die gute Verfügbarkeit, ein sehr gutes Performance-zu-Kosten-Verhältnis, flexible Losgrößen von 1 bis 1 Million mit identischer Technologie und eine hohe technologische Vielfalt.

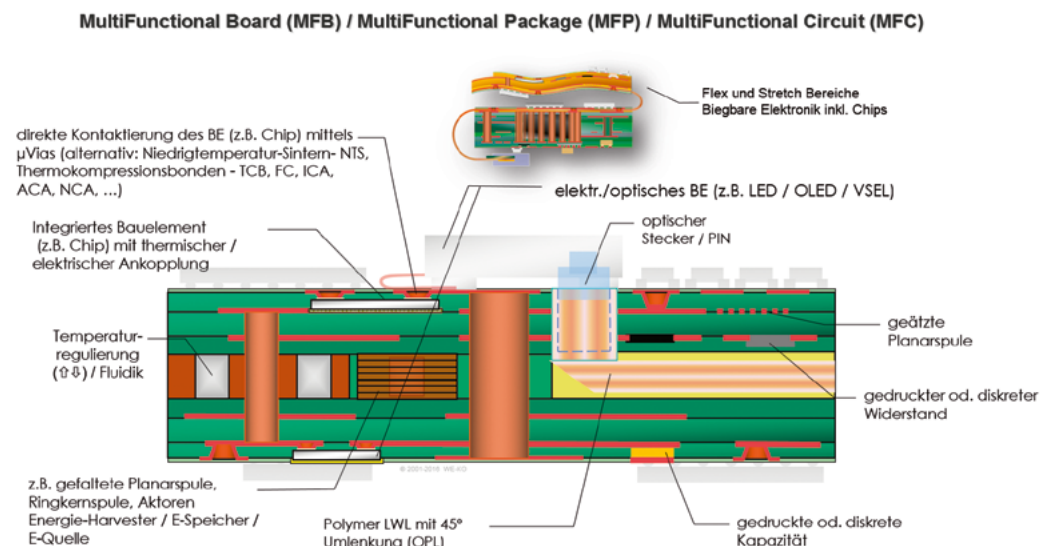
Auch ist inzwischen die Zuverlässigkeit in rauen Umgebungen oder bei hohen Temperaturen sehr hoch. Permanente Weiterentwicklung und Spezialisierung haben Leiterplattensysteme mit höchsten Verdrahtungsdichten und Eignung für bedrahtete Anschlüsse, SMD oder Flip-Chip Chip-and-Wire möglich gemacht.

Passive SMD-Komponenten erreichen inzwischen minimale Baugrößen von 0,4 mm x 0,2 mm und Ultra-Fine-Pitch-Anwendungen, beispielsweise in Flip-Chip-Ausführung. Neben der Miniaturisierung ist ein eindeutiger Trend zur Integration weiterer Funktionen und der hierfür notwendigen Strukturen in alle Arten von Substraten zu beobachten. Eine Technologie, welche zurzeit intensiv erforscht wird, ist die Integration passiver und aktiver Komponenten im Leiterplattensubstrat. In der Phase der zunehmenden industriellen Umsetzung stehen eingebettete Chiptechnologien, sog. „Chip-in-Polymer“. Hierzu werden abgedünnte IC in die Leiterplatte einlaminiert und zumeist über Mikrovia-Technologien direkt elektrisch kontaktiert. Vorteile und damit Treiber dieser Technologie sind unter anderem eine sehr geringe Baugröße und Dicke, Miniaturisierung und die steigende Integrationsdichte von MST-Packages.

Bei der Funktionsintegration in Leiterplatten wurden bisher folgende Einbettungen demonstriert: Ausdehnungskompensierende Lagen, Widerstände, Kondensatoren, Spulen und thermische Vias. Daneben wurde die Erzeugung von Medienkanälen für Gase- und Flüssigkeiten in polymere Substrate bereits mehrfach erfolgreich demonstriert. Integrierte optische und Hochfrequenz-Wellenleiter werden auf den Substraten sowohl für optische Datenübertragung als auch für optische Messtechnik mit verschiedensten Technologien hergestellt. Ein Prinzipbild einer höchstintegrierten Leiterplatte ist in Abb. C3.2-2 gezeigt, wobei die Kombination aller möglichen Einbettungen nicht im Fokus steht. Es ist vielmehr zu beobachten, dass sich einzelne Hersteller auf spezifische Embedding-Technologien spezialisieren.

Weiterhin sind bei Schaltungsträgern flexible Substrate (Kap. C 3.3) wichtig. Für Sensoren sind die stabilen Trägersysteme aus klebstofflosem Polyimid und neuerdings LCP relevant. Solche Schaltungsträger sind robust; eine geringe Baugröße und die Integrierbarkeit in komplexe Einbauräume sind durch die Möglichkeit zum Falten oder Rollen gegeben. Es werden bereits Anwendungen taktile Sensoren mit optischen Elementen auf Foliensubstraten bis hin zu aktiven Schaltungen in TFT-Technik auf flexiblen Schaltkreisen realisiert. Durch Verbesserungen der optischen Einkopplung oder durch organische Halbleiter lassen sich noch weitere Anwendungen erschließen. Interessant erscheint hierzu beispielsweise die „künstliche Haut“ mit großflächig verteilten taktilen oder druckempfindlichen Elementen.

Abb. C3.2-2
Konzept einer multifunktionalen Leiterplatte mit Systemintegration auf Leiterplattenebene [WÜRT-2016].



C 3.2.3 Waferlevel Systemintegration mittels TSV-Technologie

Extrem leistungsfähige Sensorsysteme können bereits auf Waferlevel hoch integriert werden. Ein Schlüsselbaustein dazu ist der Interposer-Wafer, der mit Durchkontaktierungen in Form von TSV (Through Silicon Via) und mit einem Cappingwafer versehen wird. Dies ergibt eine moderne Packaging-Variante hermetischer Gehäuse höchster Packungsdichte. Der prinzipielle Aufbau derartiger dreidimensionaler Packages ist in Abbildung C3.2.3 gezeigt.

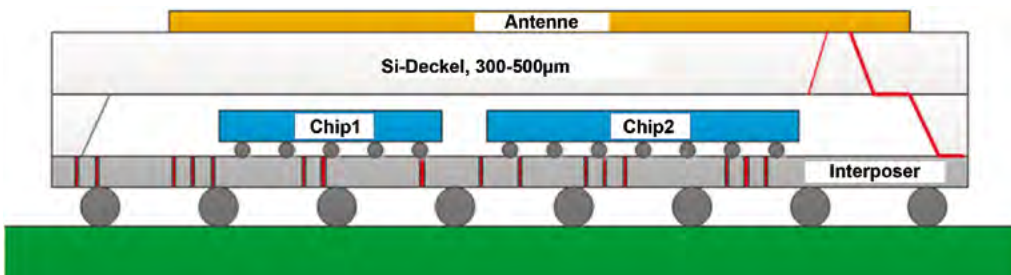


Abb. C3.2-3
Schematischer Aufbau eines Funktransceivers mit integriertem Mikrocontroller in TSV-Technologie mit Si-Kappe und integrierter Antenne [IZM-2017].

An der Unterseite des Silizium-Interposers befinden sich die Anschlüsse zum Auflöten des Komplettbauelementes auf Trägersubstrate. Diese umfassen die I/Os des Mikrocontrollers sowie die sensorielle analogen und digitalen Eingänge. Auf der Oberseite des Interposers befinden sich mehrere Umverdrahtungslagen, die für die Funktionalität des Funktransceivers benötigt werden. Die erforderlichen passiven und aktiven Bauelemente werden auf der obersten Lage montiert und aufgelötet. In der gezeigten Version werden die passiven Bauelemente als diskrete Elemente verwendet und automatisiert bestückt. Zukünftig sollen die passiven Bauelemente (Widerstände und Kondensatoren) Funktionalitäten direkt in die Interposerschaltung integriert werden.

Zur abschließenden Montage von Kappen können Einzelmontageprozesse oder das Waferbonden von Interposer-Wafer und Cappingwafer eingesetzt werden. Der Cappingwafer kann Kavitäten und auf der Rückseite eine nach innen an die Interposerschaltung durchkontaktierte Metallisierung tragen. Bei Funktransceivern dient die Siliziumkappe so nicht nur dem Schutz der Bauelemente sondern sie fungiert auch als Antenne für die 2,4 GHz-Kommunikation. Zusätzlich ist im Fuß des Interposers ein weiterer Antennenanschluss (50Ω) vorgesehen, um in abschirmenden Umgebungen auch eine externe Antenne anschließen zu können. Eine leistungsfähige drahtlose Kommunikationsmöglichkeit ist eine wesentliche Voraussetzung bei vielen Industrie-4.0-Anwendungen.

Die folgenden Abbildungen C3.2.4 und C3.2.5 zeigen als funktionelles Technologiebeispiel mit Bezug zur Sensorik Einzelheiten des komplett integrierten 2,4 GHz Funktransceivers mit Mikrocontroller.

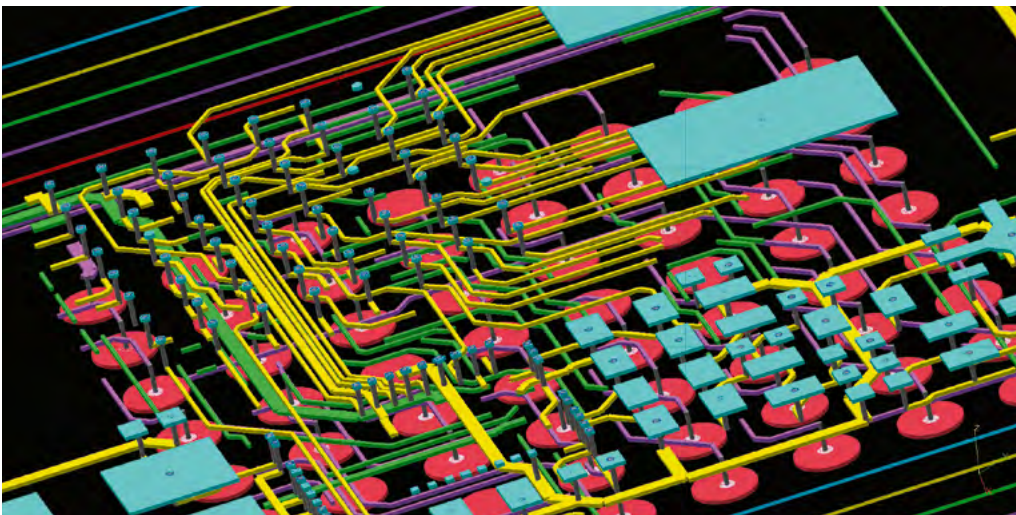
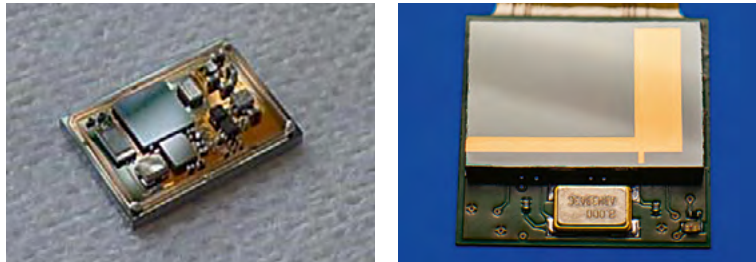


Abb. C3.2-4
Mehrlagiges Si-Interposer-Layout [IZM-2017].

Ein wichtiger Vorteil dieser Packagingvariante besteht in der Flexibilität. Durch die Auswahl von Mikrocontroller, Funktransceiver und Sensoren können auf einem automatisiert bestückten Interposer-Wafer gleichzeitig Schaltungen für unterschiedlichste Anwendungen realisiert werden.

Die Arbeiten wurden zum Teil durch ein BMBF-Projekt [NAN-2015] gefördert und zum Teil durch Eigenmittel des Fraunhofer IZM finanziert.

Abb. C3.2-5
Bestückter Interposer (links), Komplettbauteil mit integrierter RF-Antenne (rechts) [IZM-2017].



C 3.2.4 Vergleich von Integrationskonzepten

In Tabelle C3-2 ist ein Vergleich von verschiedenen multifunktionalen Integrationskonzepten für Sensoren dargestellt. Es zeigt sich, dass es insbesondere im Großserienbereich für sehr viele Anwendungen eine Reihe von gut geeigneten Aufbau- und Verbindungstechnologien gibt, welche sich dynamisch weiterentwickeln.

Tab. C3-2
Vergleich von Gehäuse-technologien für Sensoren und Mikrosysteme

Dies betrifft insbesondere die bereits etablierten Premolded Packages, die Moldingtechnologie und die MID. Da diese Verfahren werkzeuggebunden sind, sind Prototyping und Kleinserien stückbezogen aufwendig. Die Leiterplattentechnologie ermöglicht dagegen auch kleine Stückzahlen bei hoher Komplexität wirtschaftlich zu fertigen. Die Anwendungsgebiete der Technologien überlappen sich stark. Von daher spielt auch die Verfügbarkeit und Anwendererfahrung eine wesentliche Rolle bei der Auswahl.

Gehäusotyp	Gemoldetes Gehäuse	Thermoplastische Premolded Packages	Hermetische Gehäuse Keramik, Metall	MID - Molded Interconnect Device	Leiterplatten basiert, Substrat basiert
Anwendung	Einzel- und Mehrfach-IC Multifunktional	Sensorchips Sensormodule	Einship-Bauelemente Module	3D multifunktionale Bauteile	Sensoren und Sensormodule
Thermische Stabilität	mittel	hoch	mittel	mittel	sehr hoch
Eigenschaften					
Herstellbarkeit	***	**	*	0	***
Großserien	***	***	0	***	**
Prototypen, Kleinstserien	**/S - /AS	**/S - /AS	*	0	***
Designfreiheit	**	**	*	***	**
Kavität	**	***	***	**	*
Multifunktional	**	**	**	***	***
Kosten	***	**	0	**	***
Thermische Stabilität	**	**	***	*	*
Hermetizität	0/SC ***/WGC	- /SC ***/WGC	***	- /SC ***/WGC	-
Zuverlässigkeit	**	**	***	*/**	**
Ökologie	*	**	*	**	*

*** sehr gut * geeignet 0 weniger geeignet S Standardtypen SC Standardchip
** gut - ungeeignet AS Anwendungsspezifisch WGC wafergebondeter Chip

C 3.3 Heterointegration mit flexiblem Trägermaterial

International ist derzeit die flexible, großflächige und polymere Sensorelektronik stark im Fokus der Entwicklungen, gerade die 3D-Heterointegration in Folien wird von vielen Firmen mit dem Ziel der Systemintegration vorangetrieben und als Schlüsseltechnologie für einfache, flexible Lösungen mit niedrigsten Kosten (im Cent-Bereich) und hohen Stückzahlen angesehen. Daneben spielt aber mittlerweile auch der Formfaktor eine immer wichtigere Rolle, einerseits durch die stetige Verkleinerung der Geräte (z. B. Smartphones), durch Verknappung von Einbauräumen (z. B. Kfz) und nicht zuletzt durch die Erweiterung der Möglichkeit, Sensorik direkt an Bauteilen anzubringen. In der Medizintechnik sind viele Anwendungen ohne flexible Elektronik nicht realisierbar. Insgesamt wächst der Bedarf an komplexeren flexiblen Systemen.

C 3.3.1 Fortschritte in der Aufbau- und Verbindungstechnik

Der Aufbau und Verbindungstechnik (AVT) sind in den letzten Jahren entscheidende Fortschritte gelungen. Einige Hürden in der zuverlässigen Entwicklung von Foliensystemen konnten ausgeräumt werden. So ist es gelungen:

1. Selbstassemblierende Prozesse für Silizium ICs mit Justiergenauigkeiten unter $3\ \mu\text{m}$ [BOC-2014] und einem weit höheren Durchsatz als „Pick-and-Place“ AVT zu erreichen (gute Pick and Place Maschinen erreichen $10\ \mu\text{m}$ Justiergenauigkeit bei einem noch akzeptablen Durchsatz),
2. polymere koplanare HF Wellenleiter bis 40 GHz in Folie zu entwickeln [BOC-2013] und polymere HF Wellenleiter auf dünnen Silizium-Interposern sogar bis 170 GHz ebenso erfolgreich zu realisieren [BOC-2014] wie die
3. 3D-Integration mit polymeren Viatechnologien in 3D- (Multilayer-) Foliensystemen und Integration dünner Siliziumkomponenten.

Vollständig in Folien-AVT hergestellte flexible Sensorsysteme [EUI-2013], mit denen verschiedene Luftparameter wie Feuchtigkeit, Temperatur und CO_2 -Konzentration in Innenräumen bestimmt und überwacht werden können, sind für Kleinserien bereits Stand der Technik [EMF-2013]. Hierbei werden einzelne Funktionsfolien in ein flexibles Foliensystem integriert, das die Funktionen Energy Harvesting (s.a. Kap. C 4.2.9.4) durch flexible Solarzellen und Speicherung, Messdatenerfassung und -auswertung sowie den drahtlosen Datenaustausch mittels RF bereitstellt. Das System funktioniert ohne externe Energiequellen mittels Folienbatterien, die zur Speicherung der Solarenergie verwendet werden [EUI-2013].

C 3.3.2 Herausforderungen

Das Hauptproblem der organischen Elektronik ist es immer noch, für Pilotserien von Produkten einen zuverlässigen Prozess zur Integration in der Folie zu entwickeln. Bei der OLED kann mit Dünnglas verkapselt werden, da sie in den derzeitigen Anwendungen nicht dauerhaft flexibel eingesetzt werden.

Die technologische Hürde einer dauerhaft flexiblen Verkapselung ist sehr komplex, da sich flexible Substrate aus Kunststoff, selbst mit ausgewiesener Barrierschicht gegen Sauerstoff und Feuchte, durch sehr viele Umgebungs- und Prozessbedingungen signifikant beeinflussen lassen.

Die Herausforderungen sind neben der Feuchte- und Wasserdampfempfindlichkeit der organischen Funktionswerkstoffe (Halbleiter, Leiter, Dielektrika) auch die Aufbau- und Verbindungstechnik flexibler organischer Systeme, wie z. B. 3D-Folienstapel und verlässliche Durchkontaktierungen, welche elektrisch hohe Leitfähigkeit mit guten Hochfrequenzeigenschaften kombinieren. Dabei darf der Formfaktor nicht limitiert werden, damit flexible Elektroniksysteme entstehen können.

Im Mittelpunkt flexibler 2D- und 3D-Integration stehen dabei Klebe- und Laminiertechniken, die sowohl die mechanische als auch die elektrische Verbindung von dünnen Silizium-ICs

und von großflächigen Komponenten wie Foliensensoren, Folienbatterien und folienbasierten Solarzellen mit einem flexiblen Foliensubstrat als Verdrahtungsebene erlauben.

Um solche Verdrahtungsfolien elektrisch miteinander zu verbinden, wurden verschiedene Durchkontaktierungstechniken entwickelt. Mit der sogenannten „Viafill“ Technologie können zwei aufeinander laminierte Folien durch Auffüllen lasergebohrter Via-Löcher mit einem leitfähigen Material elektrisch verbunden werden.

Weitere Viafill-Technologien, bei denen die Via-Löcher mittels z. B. eines Sputterprozesses in Kombination mit einem Maskenprozess und anschließender Galvanik selektiv gefüllt werden, ermöglichen die Realisation von Verdrahtungsfolien mit Vorder- und Rückseitenmetallisierung und Metall-Durchkontaktierungen [EUI-2013].

Der Herstellungsprozess für komplexe, mikroelektronische Foliensysteme lässt sich durch homogene Integration der passiven Bauelemente vereinfachen. Dazu werden Drucktechniken entwickelt, um z. B. Widerstände direkt auf die Verdrahtungsfolie aufzubringen. Die derzeitige technologische Herausforderung besteht darin, auch mit diesen gedruckten Bauteilen die geforderten Toleranzen und Bedingungen der Zuverlässigkeit einzuhalten.

C 3.3.3 Entwurf heterointegrierter Foliensysteme

Die grundlegenden Entwurfsregeln und Vorgehensweisen für die Heterointegration organischer und flexibler Elektronik wurden in einigen EU Projekten entwickelt (Beispiele EU Poly Apply, Cosmic: www.project-cosmic.eu), ebenso für die AVT [EUI-2013], sowohl für die zu integrierenden flexiblen Komponenten als auch für die Integration von komplexen flexiblen Systemen in einem 2D-/3D-Packaging. Dazu gehört insbesondere das Design für Modularität, um Flexibilität im Systemdesign und bei den Fertigungsprozessen zu erreichen. Eine modulare Vorgehensweise gewährleistete auch die Kompatibilität beim Entwurf von Komponenten, deren Funktionalität kompatibel mit einer flexiblen Folientechnologie und einer 2D-/3D-Integration sein muss.

Software für die Erstellung und Überprüfung von Layouts ist verfügbar für Leiterplatten für PCB-Lamine und für Halbleitermaterialien. Spezielle Software für die Gestaltung von 3D-Foliensystemen existiert nicht.

C 3.3.4 Stand der Technik in der Industrie

Derzeit sind nur Foliensysteme mit relativ geringer Funktionalität, hybride RFID-Transponder sowie flexible Polyimidsubstrate als Platinen-Ersatz mit einer minimalen Strukturierungsauflösung von ca. 80 µm line/space am Markt erhältlich.

RFID werden nach wie vor aus einem Silizium-Chip bestehen und werden auf einem Transponder-Antennensubstrat aus Folie mit Dicken zwischen 30 µm und 200 µm integriert, welches entweder durch Drucktechniken oder durch Metallisierungsprozesse hergestellt wird. Die derzeit auf dem Markt verfügbaren RFID-Inlays sind minimal 120 – 150 µm dick und nicht sehr flexibel, da in den meisten Fällen Chips mit mindestens 80 µm Dicke, typisch aber 160 µm oder sogar dicker verwendet werden. Chip- und Substratdicke ergeben zusammen die Gesamtdicke der Vorrichtung.

Eine Integration von Standard-RFID-Label-Technologie in flexiblen Foliensystemen ist daher noch nicht großtechnisch möglich. Technisch relevant sind jedoch die Antennenfabrikation, die Inlay-Chip-Platzierung und -Integration als Technologien [EUI-2013].

Der etablierte Mitbewerber zu den hier vorgestellten Systemen auf Folie sind die mehrschichtigen Leiterplatten (Kap. C 3.2.2). Diese bestehen derzeit aus bis zu 48 Schichten Verdrahtung mit typisch SMD montierten Elementen, wobei der entscheidende Faktor die Dicke pro Schicht ist. Die Verdrahtung selbst besteht aus 35 µm dicken Cu-Verbindungsleitungen, sodass die direkte homogene Integration von einfachen passiven Elementen in die Verdrahtung der Schichten möglich ist. Die typische Line-Space-Auflösung beträgt 80 µm. Die typische Größe der Mikrovias zwischen den Schichten beträgt 125 µm im Durchmesser. Das Trägermaterial ist derzeit etwa 125 µm dick.

Diese Dimensionen bilden auch den derzeitigen Rahmen und die Begrenzung bei der Anwendung der Mehrschicht-Leiterplatten-Technologie. Die mechanische Flexibilität wird beeinträchtigt sobald zwei Verdrahtungslagen (einseitig oder zweiseitig) verwendet werden.

Die Dimensionen der SMD-Bauteile tragen voll zur Gesamtdicke bei, da sie aufgesetzt werden, sie sind auch intrinsisch unflexibel. Die Integration von passiven Bauelementen wird aufgrund der relativ groben Line-Space-Auflösung begrenzt. Überdies werden Multilayer-Leiterplatten in der Regel als ein komplettes System entwickelt. Dies reduziert ihre Flexibilität in Bezug auf die Aufnahme von zusätzlichen Funktionalitäten oder die Anpassung der Komponenten an spezifische Anforderungen, ohne das komplette System-Layout ändern zu müssen.

Im Gegensatz zu hochentwickelten und standardisierten Halbleiterprozessen gibt die große Gruppe der folienbasierten Herstellungsprozesse derzeit bei den verschiedenen Institutionen in Europa und Weltweit noch ein sehr uneinheitliches Bild ab. Eine Vielzahl von Spezialprozessen wird von einzelnen Anbietern schon für volumenmäßig begrenzte Anwendungen entwickelt. Eine Bündelung von Wissen, Erfahrung und Kapitaleinsatz wird zwingend erforderlich, um vor allem eine wirtschaftliche Produktion bei mittlerem bis hohem Volumen zu ermöglichen.

Einige Firmen wie z. B. Freudenberg/Mektek betreiben die Herstellung von Leiterbahngeometrien für einfache Anwendungen in der Automobilindustrie; seit etwa zwei Jahren auf 60cm breiten Foliensubstraten in Rolle-zu-Rolle (RzR) Anlagen für die LED Montage z. B. für den „Sternen“-Dachhimmel des Mini-Cooper.

Firmen wie STM, Bosch, NXP und Würth sind bereits in Vorlaufforschungsprojekten im Bereich der RzR-Integrationstechnologien engagiert, um die Bewertung der Technologien vornehmen zu können. Finanziert sind diese Unternehmungen durch hauptsächlich EU oder bundesdeutsche Förderrahmen.

Bislang nicht realisiert ist dagegen die Integration von mehreren aktiven und passiven Bauelementen auf Foliensubstraten in einem durchlaufenden Verfahren.

C 3.3.5 Entwicklungsbeispiel Transmitter

Die derzeitige Situation bei der Integrationstechnologie auf Foliensubstraten wird durch das Beispiel eines Transmitter-Moduls mit den Firmen Bosch, STM und Henkel [EUI-2013] in Abb. C3.3-1 [BOC-2013] gut wiedergegeben:

Ein sehr dünner Silizium-Chip sitzt in der Mitte der Substratfolie und ist unter einer Schutzfolie einlaminiert; die elektrische Kontaktierung erfolgte über ACA-Montagetechnik (ACA: Anisotropic Conductive Adhesive).

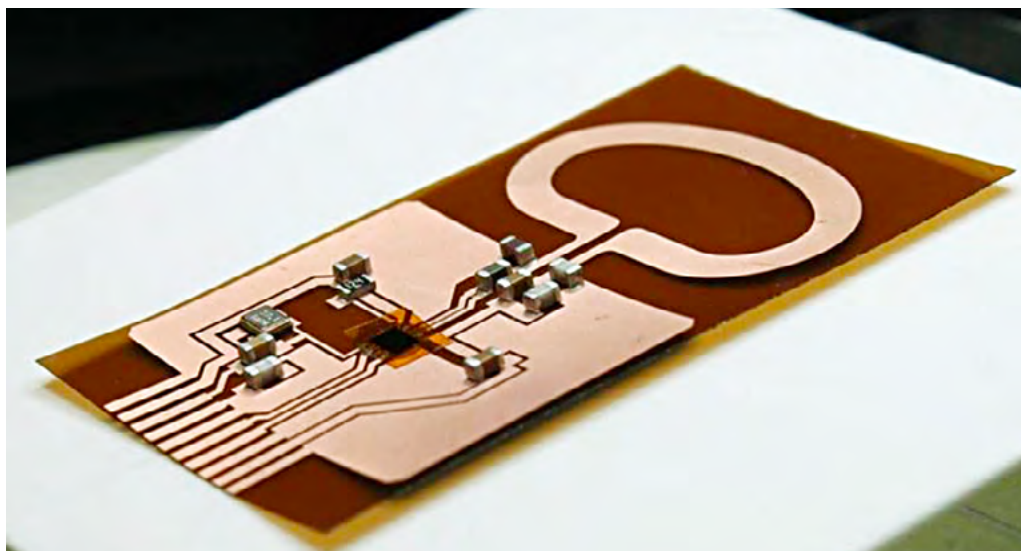


Abb. C3.3-1
Beispiel eines Transmitter-Moduls auf Folie. Die großen SMD-Bausteine verhindern eine flache Ausführung des Gesamtsystems [EMFT-2017].

Zwei Probleme sind bei dieser Hybridmethode deutlich zu sehen: Die SMD Bausteine verhindern eine insgesamt flache Package-Ausführung und der fragile Silizium-Chip muss als ungeschützter Halbleiter-Baustein auf die Folie gesetzt werden. Allerdings ist die Entwicklung gedruckter integrierter passiver Bauelemente (Integrated Passive Devices, IPDs) sehr weit fortgeschritten, sodass SMDs (vielleicht) bald völlig ersetzt werden können.

Wegen der Verarbeitung von Bare Dies ist die Systemintegration Spezialfirmen der Halbleiterbranche vorbehalten. Eine weitere Schwachstelle ergibt sich aus der Tatsache, dass der Silizium-Chip nicht formschlüssig eingebettet ist, sondern die „dickste Stelle“ in seinem Folien-Laminat darstellt. Druck und Verformung wirken somit immer besonders stark auf das fragilste Bauelement des Systems.

C 3.3.6 Integration in Folienkavitäten

Die dargestellten Risiken und Hürden können vermieden werden, wenn alle Komponenten des Systems in einer Kavitäten-Folie eingebettet sind und die Realisierung der passiven Komponenten in dem Herstellungsprozess des Gesamtsystems integriert ist.

Abb. C3.3-2 [BOC-2013] zeigt beispielhaft die technologische Realisierung der Verdrahtungsebene in einem Rolle-zu-Rolle Verfahren mit Feinstleiterbahnen zur Chip-Kontaktierung und C3.3-3 [BOC-2014] einen vorläufigen, „mechanischen“ Demonstrator eines flachen und plan-parallelen Chip-Folien-Package, wie es derzeit als ein mögliches Konzept vorgeschlagen wird. Diese Vorgehensweise zur System-Integration in einem Folien-Package basiert auf der Montage von einzelnen elektronischen Komponenten in den Absenkungen eines zweilagigen Folien-Laminats.

In weiteren Verfahrensschritten werden die Komponenten in einem gemeinsamen und einheitlichen Prozessschritt eingebettet und untereinander elektrisch kontaktiert. Dabei wird auf Lötprozesse oder thermomechanische Verfahren zur Kontaktierung verzichtet. Die Kontaktierung erfolgt stattdessen als Dünnfilm-Umverdrahtung; ggf. mit galvanischer Verstärkung der Leiterbahnen.

Je nach Komplexität der angestrebten Systemfunktionen können einlagige oder zweilagige Verdrahtungsebenen im Mehrfachnutzen realisiert werden. Das Konzept bietet folgende Vorteile: Empfindliche elektronische Komponenten (z. B. Silizium-Bausteine) sind in der Mitte des Laminats bruch sicher eingebettet. Das Laminat weist stets eine plan-parallele Konfiguration auf. Das heißt, es können weitere Prozessschritte wie beispielsweise Siebdruck oder auch 3D-Folienstapel angewendet, bzw. realisiert werden. Die elektrische Kontaktierung aller Komponenten erfolgt in nur einem „universalen“ Schritt. Sehr feine Leiterbahnen für die Chip-Kontaktierung und gröbere Strukturen, wie sie in der Leiterplattentechnik (PCB) üblich sind, können in einem Prozessmodul gemeinsam realisiert werden.

Für die Verdrahtungsebenen zwischen den Komponenten bzw. Packages können Techniken eingesetzt werden, wie sie für Leiterplattentechnologien üblich sind. Der Herstellungsprozess ist modular und universell nutzbar; einzige Anforderung an die Komponenten ist ein zu definierender Dicken-Toleranzbereich. Passive Bauteile (Kapazitäten oder Widerstände)

Abb. C3.3-2
Rolle-zu-Rolle Fertigung
von Feinstleiterbahnen
[EMFT-2017].

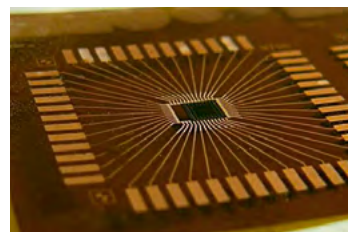
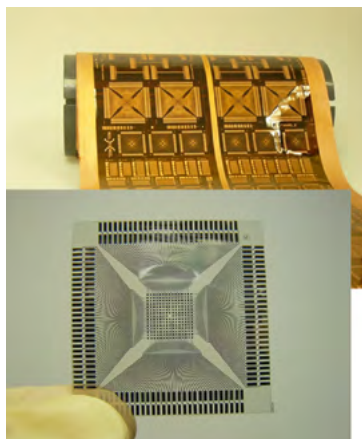


Abb. C3.3-3
Vorstufe eines
Demonstrators eines
Chip-Folien-Package
[EMFT-2017].

können in den Herstellungsprozess integriert werden. Hochfrequenzleitungen und Antennen können integriert werden.

Das entstehende Folien-Package kann bereits das finale Produkt (z. B. flexible Elektronik) sein, in eine Chipkarte einlaminiert werden oder auch als Chip-Modul in einer Leiterplatte integriert werden. Für sehr dünne Lamine erlaubt das Konzept Rolle-zu-Rolle Verfahrenstechniken. Für dickere Lamine kann nach der Bauteil-Montage auf Folien-Sheets im Mehrfachnutzen gearbeitet werden.

C 3.3.7 Ausblick

Die Verwendung von flexiblen Schaltungsträgern hält seit einigen Jahren bereits Einzug in die Smart Phones, da sich so größere Batterien einbauen lassen und Multi-Sensorfähigkeiten der flexiblen Folienplatinen mit dem Gehäuse verschmelzen können. Der Formfaktor ist also zum Treiber der Entwicklung geworden. In ihrer endgültigen Funktion im Smart Phone sind diese flexiblen Schaltungsträger gar nicht mehr flexibel eingebaut.

Die bisherige ressourcenintensive Integration als ASIC auf Chiplevel ist nicht zwingend erforderlich. Mit dem folienbasierten Ansatz der lateralen Integration wird eine Einsparung von Systementwicklungskosten im Bereich von 20-30 % erwartet. Die Hauptfaktoren dieser Einsparung sind in der schnellen Verfügbarkeit der Standard-Hardwarekomponenten am Markt und damit im deutlich geringeren funktionalen, aber auch finanziellen Risiko zu sehen.

Somit erhalten auch KMU und Ingenieurbüros mit der Heterointegration von Komponenten in Folien Zugang zu einem mächtigen Systemintegrationswerkzeug. Da es sich hier um eine Hilfe zur Umsetzung von Systeminnovationen handelt, können gerade die kreativen Industrien und KMUs in Deutschland von diesem Ansatz profitieren. Systeminnovationen aus den Bereichen Investitionsgüter, Sicherheitstechnologie, Automobiltechnik, Luft- und Raumfahrttechnik sowie Umwelt und Medizintechnik sind als vorrangige Nutznießer dieses folienbasierten Systemintegrationsansatzes zu sehen.

C 3.4 Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) für die Medizintechnik

Aufbau- und Verbindungstechnik oder Packaging bilden die technologische Basis, um verschiedene Mikrosysteme für medizinische Anwendungen zu entwickeln und bereitzustellen. Hierzu gehören beispielsweise implantierbare Mikroelektroden. Diese werden häufig in Verbindung mit implantierbaren Assistenzsystemen eingesetzt, um für einen längeren Zeitraum bioelektrische Phänomene messtechnisch zu erfassen und/oder biologisches Gewebe elektrisch zu stimulieren. Etablierte Beispiele hierfür sind neben Herzschrittmacher, Cochlea-Implantat und Retinaimplantat auch Stimulatoren zum Schmerz- und Blasenmanagement. Beispiele aus der gegenwärtigen Forschung sind Elektroden zur Steuerung von Handprothesen, zur vestibulären Stimulation und zur peripheren Unterdrückung von Tremor sowie als Sensor/Aktuator im Zusammenhang mit Brain Computer Interfaces [HOF-2011], [HOF-2005].

Ein Beispiel einer Elektrode zur simultanen Signalerfassung und elektrischen Stimulation der Muskulatur ist in Abb. C3.4-1 dargestellt. Die Fertigung dieser Mikroelektrode erfolgt in verschiedenen mikrosystemtechnischen Prozessschritten, in Abb. C3.4-2 schematisch zusammengefasst sind.

- Nachdem auf einem 4" Siliziumwafer eine Ätzmaske positioniert wurde, wird mittels Spin Coating eine 5 µm dicke Polyimideschicht aufgebracht und bei 350°C imidiert. Danach werden die Elektrodenkontakte aus Platin und die Leiterbahnen aus Gold auf die Polyimideschicht gesputtert und durch einen Lift-Off-Prozess strukturiert (1).
- Eine zweite 5 µm dicke Polyimideschicht wird aufgeschleudert. Falls erforderlich kann danach eine Platinschirmung aufgebracht werden (2).
- Auf eine dritte Polyimideschicht werden die Leiterbahnen und Elektrodenkontakten der Oberseite der Elektrodenstruktur gesputtert (3)
- und danach durch eine abschließende Polyimideschicht elektrisch isoliert (4).

- Die Elektrodenkontakte auf der Unterseite der Elektrodenstruktur werden durch reaktives Ionenätzen des Siliziumwafers freigelegt und durch einen zweiten Ätzschritt unter Verwendung der zu Beginn aufgebrauchten Ätzmaske geöffnet (5).
- Auf die Oberseite der Elektrodenstruktur wird eine zweite Aluminium Ätzmaske gebracht, um auch hier die Elektrodenkontakte freizulegen (6).

Nach Entfernung dieser Aluminiummaske kann die doppelseitige Elektrodenstruktur vom Wafer mit einer Pinzette abgelöst werden [POP-2015].

Die Kontaktierung der flexiblen Mikroelektroden erfolgt häufig über Keramik- oder FR4 Adapter. Die Microflex Technologie, ein spezielles Bondingverfahren, kann hierfür eingesetzt werden. Spezielle Mikrostecker dienen der Herstellung weiterer Verbindungen mit mikroelektronischen Strukturen, wie z. B. Verstärker, Stimulatoren oder Multiplexer.

Mit verschiedenen hermetischen und nicht hermetischen Verfahren lassen sich die Strukturen kapseln. Anwendung finden Glas, Keramik und Metalle oder aber Polymere wie z. B. Silikon, Parylen und Polyimid. Bei letzteren können durch den Aufbau von Mehrschichtpolymeren unter Einsatz von Metalloxyden die Eigenschaften weiter verbessert werden.

Die effektive Größe der Elektrodenkontakte kann durch galvanische Prozesse und dem Abscheiden von mikrorauem Platin um den Faktor 100 weiter vergrößert werden. Dadurch lässt sich die Elektrodenübergangsimpedanz minimieren und die für die Stimulation erforderliche übertragbare Ladungsmenge weiter erhöhen [HOF-2005], [HOF-2011].

Abb. C3.4-1
Beispiel für eine doppelseitige Mikroelektrode auf Polyimidebasis [MÜL-2017].

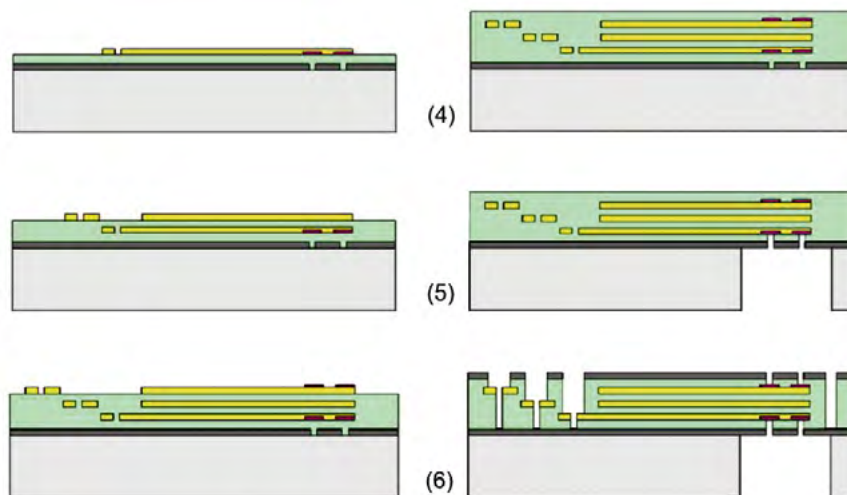
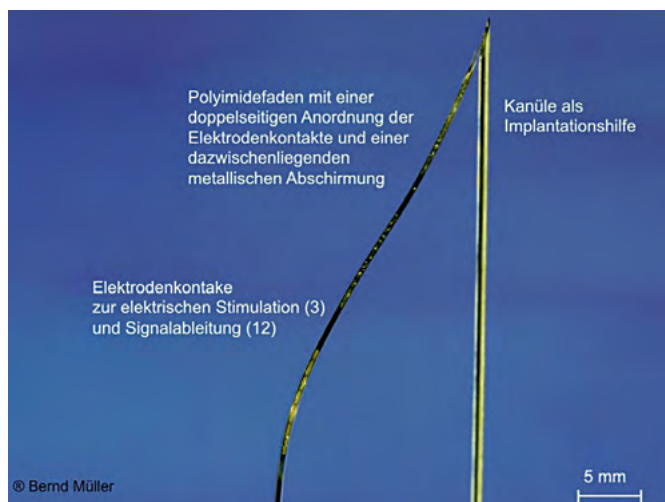


Abb. C3.4-2
Mikrotechnologische Prozessschritte zur photolithographischen Herstellung doppelseitiger Elektroden auf Polyimidebasis [POP-2015].



C 4 Sensor-Signalverarbeitung

C 4.1 Intelligente Sensoren – Smart Sensors

Die Aufgabe eines Sensorelements besteht darin, eine Messgröße aus einer physikalischen Domäne in ein elektrisches Signal umzuwandeln. Dazu müssen Sensoren häufig durch externe Maßnahmen – wie zum Beispiel das Anlegen einer Betriebsspannung – in einen Arbeitsbereich versetzt werden, in welchem sie für die jeweilige Situation empfindlich sind.

Oft sind weniger die rohen Messdaten eines Sensors – als Darstellung des Verlaufs einer physikalischen Größe – von Interesse, als vielmehr höherwertige Aussagen wie z. B. der Mittelwert der zu beobachtenden Größe, die Einhaltung eines definierten Intervalls, oder das Überschreiten von Schwellwerten. Naheliegender ist, die Gewinnung solcher Merkmale gleich in die Sensoreinheit zu integrieren. Dazu dienen elektronische Einheiten mit dediziert zugeschnittener Anwendungsspezifik – sogenannte eingebettete Systeme.

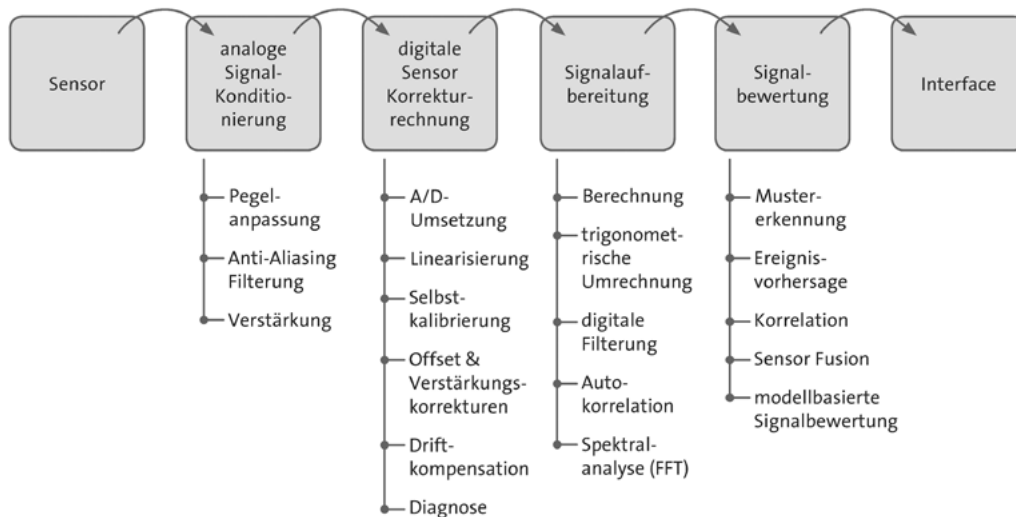


Abb. C4.1-1
Funktionsblöcke der Sensorelektronik [AMA-2010].

Durch ihren Einsatz werden einfache Sensoren zu integrierten und intelligenten Sensorsystemen, die durch kombinierten Einsatz von auf die Messaufgabe zugeschnittener Hard- und Software einen umfassenderen Funktionsumfang abdecken können.

Dazu gehören vor allem Signalkonditionierung, Durchführung von Korrekturrechnungen, Muster- und Signalerkennung, Extraktion von Merkmalen, Schnittstellenkonversionen und Kommunikation zu anderen Komponenten des Gesamtsystems. Abb. C4.1-2 [AMA-2010] zeigt die typischen Funktionsblöcke eines intelligenten Sensorsystems. Dabei ist zu beachten, dass die Aufgaben anteilig von analogen und digitalen Komponenten übernommen werden.

Eine konkrete Ausformung eines solchen Sensorsystems zeigt Abb. C4.1-2 [IMMS-2017]; charakteristische Blöcke werden im folgenden Kapitel erläutert.

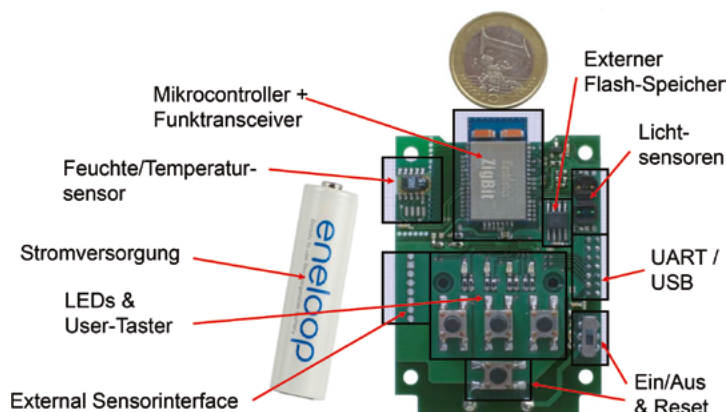


Abb. C4.1-2
Aufbau eines typischen intelligenten, netzwerkfähigen Sensor-Systems [IMMS -2017].

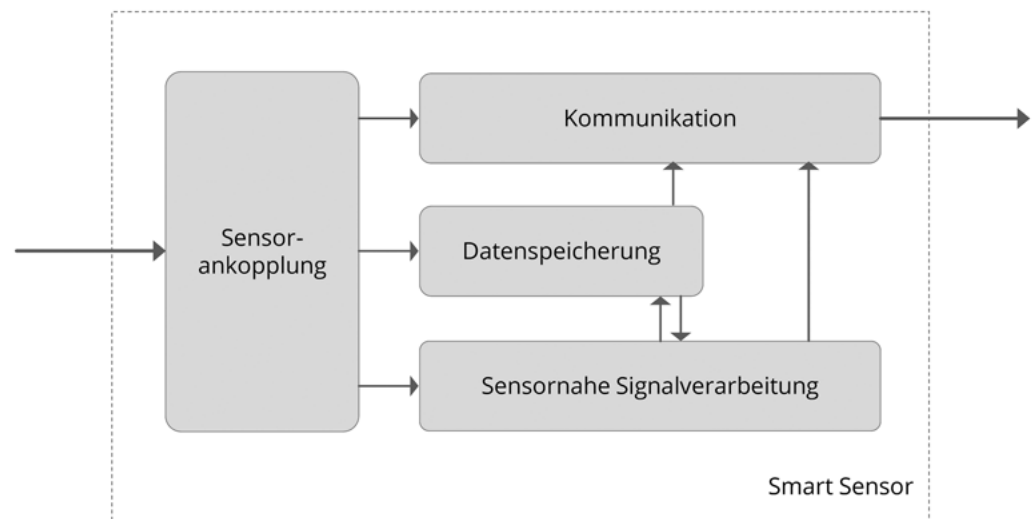
C 4.2 Eingebettete Systeme

C 4.2.1 Definition, Aufbau und Verwendung in Sensoranwendungen

Eingebettete Systeme sind Hard- und Softwarekomponenten, die in einer umfassenden Lösung integriert sind, um dort spezifische Aufgaben zu erfüllen. Ursprünglich wurden sie für das Steuern, Regeln und Überwachen von Prozessen entwickelt. Die zunehmende Miniaturisierung ermöglichte auch die Anordnung in der Nähe zu Sensoren, um dort Funktionen der Signalverarbeitung und Signalkonditionierung zu erfüllen.

Ein wesentliches Merkmal eingebetteter Systeme besteht darin, dass sie für den Anwender im Allgemeinen nicht sichtbar sind, ihre Funktion vordefiniert und nicht beeinflussbar ist. Der Eingriff erfolgt über definierte Interaktionsschnittstellen.

Abb. C4.2-1
Aufgabenklassen der
Sensorkommunikation



Sie werden in technischen Kontexten eingesetzt, die Einsatzbedingungen aufprägen, welche häufig einschränkend wirken. Typisch dafür sind z. B. Kosten, Einbaubedingungen, Rechenleistung und Leistungsaufnahme, thermische Aspekte – vor allem Wärmeabfuhr – und Echtzeitbedingungen. Das Ausgestalten eines Kompromisses hinsichtlich der Optimierung der Funktion stellt eine anspruchsvolle ingenieurtechnische Aufgabe dar.

Da zur Funktion auch die Interaktion mit anderen elektronischen und mechanischen Komponenten, höherwertigen IT-Diensten sowie dem Nutzer zu zählen ist, stellt der Entwurf eingebetteter Systeme einen disziplinübergreifenden Prozess dar. Dieser umfasst einen strukturierten Entwicklungsablauf und betrifft die Aspekte

- Systemarchitektur,
- Algorithmen,
- Hardwareentwurf,
- Hardwareprogrammierung,
- ggf. Betriebssystem,
- Applikationssoftware,
- Vernetzung,
- Test.

Diese Aufgaben werden durch das ausgewogene Zusammenspiel von Hard- und Softwarekomponenten realisiert.

Die von eingebetteten Systemen in Sensoranwendungen übernommenen typischen Funktionen sind in Abb. C4.2-1 illustriert.

C 4.2.2 Hardware

Eingebettete Systeme sind im Wesen elektronische Rechner oder Computer, die in einen technischen Kontext eingebunden sind. Sie sind bezüglich der verwendeten Hardware im Allgemeinen in mehrere miteinander verbundene Teilkomponenten untergliedert.

Typische Bestandteile sind:

- Mikrocontroller
- Digitale Signalprozessoren
- Programmierbare Hardware
- Peripheriebausteine

Diese Hardwarekomponenten unterliegen einer sehr dynamischen Entwicklung, jedes Jahr kommt eine Vielzahl von neuen Typen auf den Markt, wobei auch eine zunehmende Differenzierung durch verschiedene Kombinationen der im weiteren beschriebenen Komponenten zu verzeichnen ist. Dieser Trend führt zu sogenannten System on a Chip (SoC), integrierten mikroelektronischen Strukturen, in denen digitale, analoge und Mixed-Signal-Funktionseinheiten zur Integration aller oder eines großen Teils der Systemfunktionen in einem Chip vereint sein können.

C 4.2.2.1 Programmierbare Hardware

Als Mikrocontroller werden integrierte Schaltkreise bezeichnet, die einen Prozessorkern und zusätzliche Peripheriefunktionen – insbesondere Systemfunktionen und Speicher – auf einem Chip enthalten. Viele der heute eingesetzten Mikrocontroller basieren auf Prozessorkernen, die zuvor als Mikroprozessoren eingesetzt wurden. Es gibt jedoch auch Mikrocontrollerkerne, die vollständig neu entwickelt wurden.

Programmierbare Hardwarebausteine dienen der Abarbeitung von Aufgaben, die aus dem Mikroprozessor ausgelagert werden können und feststehend sind. Sie werden speziell konfiguriert und können wesentlich zur Effizienzsteigerung beitragen. Typische Vertreter sind Field Programmable Gate Arrays (FPGA) oder Complex Programmable Logic Devices (CPLD).

Digitale Signalprozessoren (DSP) werden verwendet, um z.B. aufwendige analoge Filtertechnik zu ersetzen oder Berechnungen auszuführen, die analog nur schwer bzw. nicht ausführbar sind.

C 4.2.2.2 Peripheriebausteine

Diese Bausteine übernehmen wesentliche Aufgaben, welche das Funktionieren des Systems sicherstellen. Ihre Aufgaben umfassen z. B.

- Taktgenerierung und -verteilung,
- Watch-Dog- und Resetfunktionen,
- Brown-Out-Detektion,
- Interruptsystem,
- Powermanagement,
- Debug-Schnittstellen,
- Kryptographie-Einheiten.

Weiterhin sind zur Einbindung in übergeordnete Strukturen häufig Schnittstellenfunktionen zu erfüllen, die von den Peripheriebausteinen übernommen werden. Diese betreffen die Anbindung an Busse wie

- USB (Universal Serial Bus),
- CAN (Controller Area Network),
- LIN (Local Interconnect Network),
- SPI (Serial Peripheral Interface) und

Datenschnittstellen wie

- Funk (Transmitter, Receiver, Transceiver),
- Serielle Schnittstellen (SSI, UART, usw.),
- Ethernetschnittstellen,
- PWM-Ausgänge und Zusatzfunktionen wie
- Timer oder
- LCD-/Video-Controller.

C 4.2.2.3 Datenspeicherung

Die lokale Speicherung von Sensordaten dient folgenden Zwecken:

- Datenpufferung im Rahmen asynchroner Kommunikation,
- Datenbereitstellung für lokale Sensordatenverarbeitung,
- Backup zur Erhöhung der Datensicherheit,
- Optimierung Datenverarbeitung und -kommunikation,
- autonom arbeitende Sensorsysteme.

Typisches Speichermedium sind elektronische Halbleiterspeicher, welche fest installiert oder als Wechselmedium (Speicherkarten) ausgeführt sein können. Weiterhin ist zwischen flüchtigen (z. B. RAM) und nichtflüchtigen (z. B. EEPROM) Varianten zu unterscheiden. Der Hauptvorteil bei der Verwendung von RAM-Speicher ist die hohe Zugriffsgeschwindigkeit. Die Verwendung von Datenspeichern führt zu weiteren speziellen Anforderungen an die Gestaltung der eingebetteten Systeme. Je nach dem konkret verwendeten Speichertyp betrifft dies

- Hardware, z.B. wenn bestimmte Programmierspannungen erforderlich werden,
- Software, z. B. Realisierung blockweisen Lesens und Schreibens bei Flash-Speichern und den
- Systementwurf, z. B. für die Zugriffsgeschwindigkeiten oder den Stromverbrauch bei der Datenverarbeitung.

Nichttechnische Anforderungen resultieren z. B. aus den Abmaßen des Speichermediums oder den Preisen.

C 4.2.3 Software

C 4.2.3.1 Herausforderungen

Der Einsatz eingebetteter Systeme ermöglicht es, Aufgaben in Software auszulagern, wodurch schnelle Anpassbarkeit an veränderte Einsatzszenarien bzw. Anforderungen möglich werden.

Durch den aufgabenspezifischen Zuschnitt und den auf die wesentlichen Funktionen beschränkten Ausbau der Hardwarebausteine – insbesondere der Mikrocontroller-Architekturen – ergeben sich Unterschiede zu herkömmlicher Software-Entwicklung. Insbesondere betrifft dies Ressourcenbeschränkungen wie z. B. den Wegfall von Speichermanagement- oder Gleitkommaeinheiten, fehlende Programmierschnittstellen, abweichende Byteanordnungen, Echtzeitanforderungen.

C 4.2.3.2 Aufbau von Software in eingebetteten Systemen

Die Software von eingebetteten Systemen ist hinsichtlich funktionaler Aspekte und insbesondere des Grades der Zusammenwirkung mit der Hardware gegliedert.

Wichtige Komponenten sind

- Boot-Loader (zur Initialisierung der Hardware, zum Start des Betriebssystems und der Applikationssoftware),
- Treiber, welche Funktionen zum Hardware-Zugriff enthalten,
- Interrupt-Management zur Behandlung von synchronen und asynchronen Unterbrechungen der Verarbeitung,
- Scheduler zur Koordinierung der zeitlichen Ausführung mehrerer Programmteile,
- Betriebssystem für generische Systemdienste wie z. B. zur Speicherverwaltung, Energiemanagement,
- Applikationssoftware, d.h. anwenderspezifische Software zur Realisierung einsatztypischer Funktionen.

C 4.2.3.3 Betriebssysteme

Aus Sicht des Systementwurfs ist in vielen Fällen der Einsatz eines Betriebssystems zweckmäßig. Ein Haupteffekt ist in der Abstraktion zu sehen, d. h. in der Entkoppelung zwischen Anwendersoftware und Hardware spezifisch. So können vor allem Modifikationen in Soft- bzw. Hardware weitgehend unabhängig voneinander vorgenommen werden. Wichtige Charakteristika bei der Auswahl eines Betriebssystems sind

- erforderliche und verfügbare Speichergröße im System,
- Lizenzmodell,
- Echtzeitfähigkeit,
- Multitaskingfähigkeit.

Neben kommerziellen Varianten stehen auch Betriebssysteme mit zugänglichem Quellcode (Open-Source-Software) zur Verfügung. Letztere ermöglichen eine flexible und passfähige Adaption an die konkret gegebenen Bedingungen und Ressourcen. Gegenwärtig sind Betriebssysteme auch für Plattformen mit geringen Hardwareanforderungen verfügbar, was sie sehr interessant für den Einsatz in Sensorsystemen macht. Dies betrifft insbesondere drahtlose Sensornetzwerke, in denen die Kommunikation zwischen den Netzwerkknoten durch generische Betriebssystemfunktionen wesentlich erleichtert werden kann.

C 4.2.3.4 Echtzeit

In Industrieanwendungen besteht häufig die Aufgabe, dass für die Realisierung von Steuerungsaufgaben die von Sensoren erfassten Daten innerhalb einer vorgegebenen Zeitspanne bereit gestellt werden. Diese Echtzeitanforderung kann mittels kommerzieller oder frei verwendbarer Betriebssysteme realisiert werden.

Prominente Vertreter sind dabei Linux – entweder mit Echtzeitfunktionalität des Betriebssystemkerns oder für höhere Ansprüche mittels Softwareerweiterungen – oder auch eCos (Embedded Configurable Operating System), welches sich durch sehr geringe Ressourcenanforderungen – insbesondere niedrigen Speicherbedarf – auszeichnet. Zudem existieren eine Reihe weiterer Betriebssysteme. Ebenso ist die Diversität der Echtzeit-Vernetzungslösungen beträchtlich und unterliegt ständiger Erweiterung. Ein aktueller Trend ist mit einer Standardisierung zu Echtzeit-Ethernet nach IEEE 802.1 TSN (Time-Sensitive Networking) zu verzeichnen.

C 4.2.4 Aufbau intelligenter Sensoren

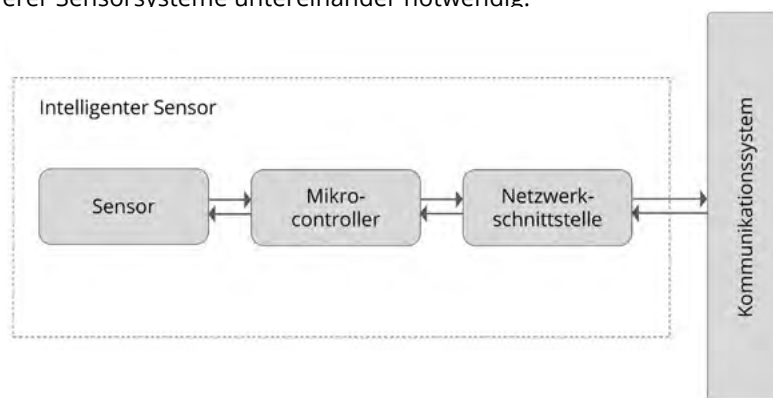
C 4.2.4.1 Sensor-Signalverarbeitung

Die Signalverarbeitung ist eine der Aufgaben, zu deren Bearbeitung eingebettete Systeme eingesetzt werden. Aus der konkreten Anwendungsspezifik sind sie für die Signalverarbeitung zu optimieren. Typische mathematische Operationen mit den gewonnenen Daten sind

- Umrechnung der Sensormessgröße in die repräsentierte physikalische Größe,
- Kennlinienkorrekturen,
- Filterung,
- Mittelwertbildung,
- Schwellwertüberwachung,
- Datenkompression,
- Formatkonvertierungen / Datenkodierung.

Darüber hinaus können auch komplexere Algorithmen wie Transformationen (z. B. Fourier-Transformation), Merkmalsextraktionen, Näherungs- oder Schätzverfahren (z. B. Kalman-Filter) zum Einsatz kommen. Durch das Zusammenführen mehrerer Sensorgrößen lassen sich sogenannte virtuelle Sensoren bilden. Hierzu ist unter Umständen die Kommunikation mehrerer Sensorsysteme untereinander notwendig.

Abb. C4.2-2
Intelligenter Sensor als Integration eines Sensorelements, einer Verarbeitungseinheit und einer – meist standardisierten – Kommunikationsschnittstelle.



C 4.2.5 Sensorkonfigurierung – Intelligente Sensoren

Ein intelligenter Sensor oder Smart Transducer ist die Integration eines analogen oder digitalen physikalischen Sensors oder Aktors, einer Verarbeitungseinheit und einer Kommunikationsschnittstelle. Durch die standardisierte Gestaltung dieser Schnittstelle wird eine Plug-and-Play-Funktionalität ermöglicht (IEEE 1451).

Dabei werden zur Identifikation interne Datenblätter, sogenannte Transducer Electronic Data Sheets (TEDS) genutzt, welche Informationen über den Sensor enthalten, um die Einbindung in bestehende IT-Infrastruktur zu ermöglichen. Dieser Technologie ist insbesondere angesichts der aufkommenden Industrie-4.0 für die Identifikation der Sensoren und Sensorsysteme von höchster Wichtigkeit. Abb. C4.2-2 zeigt den schematischen Aufbau eines netzwerkfähigen intelligenten Sensors. Mehr über die Eigenschaften und Aufgaben sind unter Kapitel C.4.2.8 und C 4.2.9 zu finden.

C 4.2.5.1 Modellbasierter Entwurf

Auf Grund der Qualitäts- und Kostenproblematik sollen die Entwurfs- und Entwicklungsaufwände so weit wie möglich in frühe Phasen verschoben werden. Durch erweiterte Analyse- und Testmethoden in frühen Entwurfsphasen sowie mittels durchgängiger Werkzeugketten inklusive automatischer Codegenerierung lassen sich die Aufwände in den späten Phasen reduzieren.

Moderne Softwarepakete zur Systemsimulation nutzen weitgehend grafische Eingabemöglichkeiten für die Systemstruktur. Diese können z. B. Blockschaltbilder oder Signalflussgraphen sein, wobei hierarchische Staffellungen je nach vorliegender Komplexität üblich sind.

Auf dieser Basis erfolgt im Rahmen des Entwurfsprozesses die Ausgestaltung derart, dass die geforderten Spezifikationen erreicht werden. Auch kann an Hand dieses graphisch vorliegenden Modells eine Verifikation durch Simulation der Modelleigenschaften erfolgen. Statt nach Erreichen des Entwurfsziels auf simulatorischer Ebene in einem abgesetzten Arbeitsvorgang den Softwarecode für die eingebetteten Hardwarebausteine zu „schreiben“, wird im Rahmen des modellbasierten Entwurfs der Zielcode automatisiert generiert.

Nach diesem im Allgemeinen sehr schnell vollzogenen Schritt wird das Kompilat über einen Wartungszugang auf die eingebettete Zielplattform transferiert. Typische Vertreter für letztere sind

- FPGA,
- DSP,
- Mikroprozessoren mit Linux-Betriebssystem,
- Mikroprozessoren mit Echtzeit-Linux-Betriebssystem (mit z. B. einer sog. RTAI-Erweiterung),
- FPGA mit Mikroprozessorkern und Echtzeitbetriebssystem, z. B. eCos und
- Hardware-in-the-loop (HiL)-Systeme.

C 4.2.5.2 Sensorankopplung

Die physikalische Ankopplung des Sensorelements an das Sensorsystem kann analog oder digital erfolgen.

Analoge Sensorgrößen werden typischerweise über Analog-Digital-Wandler (ADC) zur digitalen Weiterverarbeitung aufbereitet. In speziellen Fällen kann jedoch auf ADC verzichtet werden (z. B. bei einer einfachen Schwellwertüberwachung). Bestimmte Klassen von Sensorelementen (z. B. SAW-Sensoren, Kap. B 2.2.1) erfordern hingegen zusätzliche Analogelektronik vor der AD-Wandlung.

Verfügt ein Sensorelement über eine digitale Sensor, bzw. Bus-Schnittstelle, so können die Sensorgrößen ohne spezielle Wandlerelektronik direkt digital im System weiterverarbeitet werden.

C 4.2.6 Kommunikationsaspekte

C 4.2.6.1 Hierarchische Einordnung

Mit der Einbindung von Sensoren in technische Anwendungen, wie z. B. Steuerungen, ergibt sich die Notwendigkeit, die Art des Informationsaustausches an die im System gegebenen Gesamtstandards anzugleichen.

Für die Kommunikation zwischen IT-Komponenten hat sich das OSI (Open Systems Interconnection)-Modell als Standard herausgebildet. Dieses definiert sieben Protokollschichten, die mit zunehmender Ferne von der Hardware und hin zur Anwendung hierarchisch angeordnet sind und einen „Stapel“ darstellen. Die unterste und hardwarenächste Schicht ist die physikalische Schicht (PHY), gefolgt von der Datenübertragungsschicht, auf welcher der Medienzugriff (MAC, Media Access Control) geregelt ist sowie der Netzwerkschicht.

In der äußersten Schicht sind die nutzernahen Anwendungen verortet. Jede der Protokollschichten nutzt nur Daten der darunterliegenden Schicht und stellt ihre Dienste für die direkt darüber liegende Schicht bereit.

C 4.2.6.2 Sensorschnittstellen

Die Sensordaten und gegebenenfalls Statusinformationen des Sensorsystems werden über Kommunikations-Schnittstellen an nachgeordnete Komponenten und Systeme gesendet.

Typische Statusinformationen können beispielhaft sein

- Sensor-Identifikationsnummer,
- elektronisches Sensordatenblatt, z. B. IEEE 1451,
- Diagnoseinformationen, z. B. Batteriestatus.

An analogen Schnittstellen repräsentieren stetige elektrische Signale – d.h. Spannungen bzw. Ströme – die vom Sensor gemessene physikalische Größe. Digitale Schnittstellen nutzen eine vorangegangene Analog-Digital-Wandlung und stellen für die nachfolgenden Systemkomponenten digital codierte Signale bereit.

Über bidirektionale Schnittstellen können Steuerkommandos vom Sensorsystem empfangen werden. Des Weiteren kann nach parallelen und seriellen Schnittstellen unterschieden werden. Gerade letztere haben an Verbreitung gewonnen, denn sie sind wesentlich kompakter ausführbar und werden von Endgeräten auf weitaus breiterer Basis unterstützt. Die physikalische Kommunikation lässt sich wie nachfolgend klassifizieren:

Drahtgebunden

Typische Bussysteme dafür sind unter anderem

- I2C (Inter-Integrated Circuit),
- SPI (Serial Peripheral Interface Bus),
- LIN(Local Interconnect Network),
- M-Bus (Meter-Bus),
- CAN (Controller Area Network),
- IEEE 802.3 (Ethernet),
- 4 - 20 mA-Schnittstelle,
- HART (Highway Addressable Remote Transducer Protocol),
- IEEE 1394 (Firewire).

Passiv drahtlos

Die Kommunikation erfolgt über ein gesendetes Antwortsignal, welches durch elektromagnetische Einstrahlung abgefragt und mit Energie versorgt wird (RFID, NFC).

Aktiv drahtlos

Typische Übertragungstechnologien sind u.a. Mobilfunk, WLAN, Bluetooth, WPAN, Wireless M-Bus.

Kontaktlos optisch

Ein wesentlicher Vertreter ist die IrDA-Schnittstelle (Infrared Data Association).

Die logische Kommunikation wird durch Protokolle definiert. Schnittstellenstandards beschreiben die physikalische und die logische Kommunikation. Die heutige Entwicklung auf dem Gebiet der Sensorik ist gekennzeichnet vom Übergang von einfachen meist analogen Schnittstellen (z. B. 4 - 20 mA Stromschleife) zu komplexen Schnittstellen (z. B. HART, Anybus oder IO-Link), welche für die Umsetzung der Megatrends „Internet der Dinge“ und „Industrie 4.0“ Bedeutung besitzen.

C 4.2.7 Sensorvernetzung

Mit der Fähigkeit von Sensorsystemen zur Kommunikation ist auch die Möglichkeit erwachsen, dass einzelne Sensoren untereinander vernetzt werden und Daten austauschen. Damit kann dem Trend zur Dezentralisierung von Funktionen, hier insbesondere der Datenerfassung und -verarbeitung, gut entsprochen werden. Konzeptionell kann auf reichhaltige Erfahrungen aus der Entwicklung von Computersystemen und -netzen zurückgegriffen werden.

Die Einführung von Bussystemen führt zu höherer Flexibilität, vor allem bei Konfigurationsänderungen oder Systemerweiterungen und ist weitgehend etabliert. Festzustellen ist, dass die Bemühungen um Einschränkung der Vielfalt existierender Lösungen keine wesentlichen Effekte zeigten, so dass gegenwärtig eine Anzahl von Bussen entsprechend den jeweiligen Anwendungsdomänen in Gebrauch ist.

Zumeist stellen Automatisierungsaspekte eine Motivation für den Einsatz von Sensorsystemen dar, weshalb die verwendeten Vernetzungslösungen auch von den branchenüblichen Gepflogenheiten bestimmt werden. Generell kann zwischen drahtgebundener und drahtloser Vernetzung unterschieden werden.

Ein eindrucksvolles, praktisches Beispiel für die Notwendigkeit und Komplexität der Sensorvernetzung wird in Kap. B 3.1.5 anhand einer (vermeintlich) einfachen Aufgabe der Sicherung der Luftqualität in Gebäuden gegeben.

C 4.2.7.1 Feldbusse

Feldbusse werden verbreitet in Automatisierungslösungen eingesetzt. Begrifflich der Verfahrenstechnik entstammend, verbindet ein Feldbus Geräte und Einheiten, welche mit einem zu überwachenden oder zu steuernden Prozess wechselwirken.

C 4.2.7.2 Industrial-Ethernet Verbindungen

Motiviert durch die massive Verbreitung von Ethernet in der Internet- und Bürokommunikation haben sich verschiedene Umsetzungen auch in der industriellen Kommunikation entwickelt.

Zielstellung ist in der Regel, mit preisgünstig verfügbaren Standardkomponenten eine durchgängige vertikale Kommunikation von der Leitebene bis in die Feldebene – also zu den Sensoren – hinein zu realisieren.

Mit den in Internet-Anwendungen üblichen Adressierungsschemata ist es möglich, auf konsistente Weise ebenfalls Sensoren zu identifizieren. Insbesondere mit der durch das IPv6 Protokoll erfolgten Adressbereichserweiterung steht eine noch für lange Zeit ausreichend erscheinende Anzahl von Identifikationsnummern bereit, um die Einbindung einer sehr hohen Anzahl an Sensoreinheiten in Internet-basierte Kommunikations-, Regelungs- oder Überwachungssysteme zu ermöglichen.

C 4.2.7.3 Drahtlose Sensornetzwerke

In drahtlosen Sensornetzwerken wird auf die Verkabelung des Kommunikationskanals verzichtet. Seitdem die Energieeffizienz mikroelektronischer Schaltungen eine Stufe erreicht hat, auf der Vernetzungsfunktionalität mit Batteriebetrieb erreichbar ist, können mit diesem Ansatz flexibel arbeitende und dezentral applizierbare Sensoreinheiten zur Erfassung von Messgrößen eingebracht werden (Kap. C 4.2.9). Für den Fall, dass durch Einsatz von Wandlern von Umgebungsenergie in elektrische Energie – sogenannten Energy Harvestern – auch die Batterien noch ersetzt werden können, spricht man von energieautarken Sensorsystemen (Kap. C 4.2.9.4). Eine Grundvoraussetzung ist eine Ausgestaltung der Sensoren und der Elektronikeinheit, die einen Betrieb mit geringem Energiebedarf gestattet.

Frequenzband	Region
868,0 – 868,6 MHz	Europa
902 – 928 MHz	Nordamerika
2,40 – 2,48 GHz	weltweit
5,70 – 5,89 GHz	weltweit

Tab. C4.1-1

ISM-Frequenzbänder und Regionen ihrer Nutzung.

Wie auch bei Feldbussen ist bereits bei diesem relativ jungen Vernetzungsansatz eine beträchtliche Vielfalt an Lösungen verfügbar. Die Unterteilungen und Einsatzkriterien sind maßgeblich von technischen Parametern wie Reichweite, Energiebedarf und Konnektivität beeinflusst. Viele einsatzrelevante Kenngrößen werden von der verwendeten Frequenz beeinflusst. Diese liegen im Allgemeinen in frei verwendbaren Frequenzbändern, den ISM- (Industrial, Scientific, and Medical Radio) Bändern mit Frequenzen von 6,765 MHz bis 246 GHz. Eine Übersicht über in drahtlosen Sensornetzwerken häufig genutzte ISM-Frequenzbereiche ist in Tab. C4.1-1 gegeben.

Prominente Vertreter von Funkstandards für drahtlose Sensornetzwerke unterliegen einer Standardisierung und werden wegen ihrer Bedeutung nachfolgend kurz charakterisiert:

Wireless Local Area Network – WLAN

Wireless LAN entstammt der Vernetzung von Computern und ist in der Familie der IEEE-Standards 802.11 definiert. Aus Anwendersicht ist die nahtlose Integration von Sensoreinheiten in administrative bzw. industrielle Computernetze sehr attraktiv. Wie bei allen technischen/industriellen Ethernetlösungen zu beachten ist, verläuft die technische Entwicklung hin zu immer größeren Bandbreiten und besserer Verfügbarkeit, sodass auch die Übertragung größerer Datenmengen sowie die Internet-Anbindung einer Vielzahl von Daten liefernden Einheiten – wie eben Sensoren – unproblematisch ist. Ein üblicher Weg ist, dass Komponenten, welche nicht das Internet-Protokoll unterstützen, über Gateways an dieses angeschlossen werden.

Bluetooth

Der IEEE-Standard 802.15.1 beschreibt mit Bluetooth eine Funkschnittstelle, die für mobile Endgeräte entwickelt wurde und die im Consumer-Bereich weit verbreitet ist. Mit der Frequenz von 2,45 GHz beträgt die Übertragungsrate ca. 1MBit/s. Bluetooth-Verbindungen erweisen sich in der Praxis als energieintensive Vorgänge, was zu kurzen Batterielebensdauern führt.

Bluetooth Low Energy – BLE

In der Version Bluetooth 4.0 wurden Maßnahmen umgesetzt, die zu einer deutlichen Absenkung des Stromverbrauchs führten. Dies geht einher mit einer Absenkung der Datenrate, einer Reduktion der Anzahl verfügbarer und genutzter Kanäle. Insbesondere die Kompatibilität mit Smartphones eröffnet vielversprechende Perspektiven, diese als Endgeräte für die Darstellung von Sensordaten einzusetzen.

Low-Rate Wireless Personal Area Networks – WPAN

Speziell für Kommunikation über kurze Distanzen mit Modulen geringer Komplexität und geringem Energieverbrauch wurde der IEEE-Standard 802.15.4 entwickelt [GUT-2004]. Er beschreibt Nahbereichs-Funknetzwerke mit Datenraten in Abhängigkeit vom genutzten Frequenzband von maximal 250 kBit/s. Wegen des energiesparenden Betriebs ist die Funkreichweite eingeschränkt. Dies wird ausgeglichen, indem eine größere Anzahl von Funkknoten im Netzwerk verfügbar ist, welche die Information weiterleiten. Damit ergeben sich interessante Aspekte zur Ausgestaltung der Netzwerktopologie.

Der zugehörige Standard IEEE 802.15.4 beschreibt die untersten Schichten des OSI Modells, d. h. die Schichten PHY und MAC. Die darüber liegenden Ebenen der Netzwerkhierarchie können je nach Anwendung realisiert werden. Sie sind maßgeblich für das Protokoll zuständig. Ein weit verbreiteter Protokollstapel ist unter der Bezeichnung ZigBee bekannt. Alternativ dazu kann diese Funktionalität durch ein angepasstes, frei verfügbares Betriebssystem wie TinyOS (www.tinyos.net) abgedeckt werden. Letzteres ist besonders für u.a drahtlose Sensorik (Kap. C 4.2.9) entwickelt worden. Aufbau, Anwendung und Eigenschaften einer typischen Realisierung werden im nachfolgenden Abschnitt detailliert ausgeführt.

C 4.2.8 Beispielsystem

Am Beispiel des in Abb. C4.2-2 gezeigten intelligenten Sensorsystems sollen nachfolgend die Rolle und Funktion ausgewählter Komponenten – aufsteigend gegliedert nach den OSI-Schichten – dargestellt werden. Das gezeigte Modul stellt einen einzelnen Knoten eines drahtlosen Sensornetzwerkes dar. Die Kommunikation erfolgt über WPAN (IEEE 802.15.4) in Verbindung mit dem Betriebssystem TinyOS. Bei der Entwicklung der Plattform wurden die nachfolgenden aktuellen Herausforderungen für Funksensoren adressiert, wie

- einfache Integration neuer Sensoren in bestehende Netzwerke,
- Koexistenz mit anderen Funkstandards (WLAN),
- Anbindung des drahtlosen Sensor-Netzwerks an das Internet – Realisierung des „Internets der Dinge“,
- bidirektionale Kommunikation und Routing von Nachrichten über mehrere Stationen trotz hoher Anforderungen an die Lebensdauer,
- Realisierung eines stabilen und gegen Störungen oder Angriffe robusten Systems.

C 4.2.8.1 Kommunikationsaspekte

Abbildung C4.2-3 zeigt schematisch die wesentlichen Bestandteile der Sensorkommunikation.

Eigenschaften der physikalischen Schicht

Die Eigenschaften werden maßgeblich durch die Wahl der Trägerfrequenz bestimmt. Wegen der typisch erforderlichen Distanzen zwischen Sensornetzwerkknoten wurde im Beispielsystem mit der Frequenz von 2,4 GHz aus einem ISM-Band gearbeitet. Die Ausbreitungseigenschaften sind bei einer Sensoranwendung in Gebäuden charakterisiert durch

- begrenzte Reichweite,
- Störungen durch Hindernisse wie Wände, Türen, Gegenstände, sich im Ausbreitungspfad bewegende Objekte / Personen,
- Abhängigkeit von Änderungen der Umgebung,
- Interferenz mit anderen Funksystemen, welche diese Frequenzen nutzen, im vorliegenden Fall WLAN, Bluetooth.

Sowohl Simulation als auch Planung sind von vielen Parametern abhängig und somit nicht trivial. Zur Beeinflussung und Anpassung der Verbindung mit anderen Netzwerkknoten sind eine Messung von Verbindungsattributen wie Signalfeldstärke (Received Signal Strength Indicator, RSSI) und Verbindungsqualität (Link Quality Index, LQI) möglich.

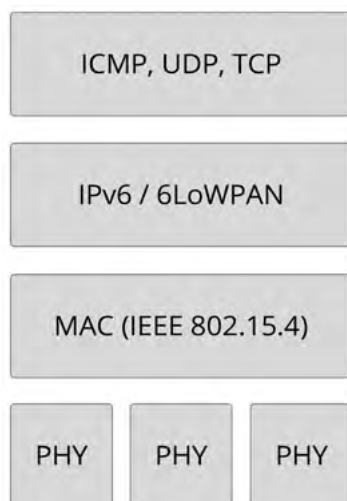


Abb. C4.2-3
Zuordnung der im Beispielfunksensorsystem implementierten Mechanismen zu den Schichten des OSI-Modells.

Eigenschaften der MAC-Schicht

Auf dieser Schicht des OSI-Modells wird geregelt, wie und wann auf das Übertragungsmedium zugegriffen wird. Im Beispielsystem ist dort die Eigenschaft „Low-Power-Listening“ realisiert. Der Zugriff auf den Kommunikationskanal erfolgt, sobald er frei ist (CSMA/CA-Verfahren). Das Senden einer Nachricht wird so lange wiederholt, bis der Empfang bestätigt wird. Der Empfänger „hört“ regelmäßig in den Kanal hinein und sendet eine Bestätigung (Acknowledgement) nach dem Eintreffen einer Nachricht.

Eigenschaften der Vermittlungsschicht (Routing)

Befindet sich ein Teilnehmer außerhalb der Empfangsreichweite, müssen Nachrichten über Zwischenstationen an ihn weitergeleitet werden. Dazu existieren mehrere Möglichkeiten. Verbreitet ist ein Ansatz, nach dem der Routing-Algorithmus anhand einer Bewertung der Verbindungen zu anderen erreichbaren Knoten den besten Weg zum Ziel bestimmt. Dieser Vorgang kann gesteuert werden anhand von Gütekriterien wie

- minimale Sprunganzahl,
- beste Übertragungsqualität,
- geringster Energieverbrauch,
- kürzeste Entfernung.

Die hier dargestellten Sensorknoten können nach Internet-Adressregeln angesprochen werden. Das 6LoWPAN-Protokoll (IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Network) basiert auf dem Standard IEEE 802.15.4 und ist durch Header-Kompression auch in Sensornetzwerken einsetzbar. Es ermöglicht bidirektionalen Betrieb, Autokonfiguration (DHCPv6) und unterstützt Routing-Protokolle auf verschiedenen OSI-Ebenen.

Auf der Schicht sind 3 verschiedene Sensoren nach Digitalisierung der Werte im Mikrocontroller angeschlossen. Die Daten werden protokollkonform im Protokollstapel prozessiert und für eine Internet-Anbindung konfektioniert. In der darüber liegenden Schicht bezeichnen ICMP, UDP und TCP Verfahren zum Transport via Internet.

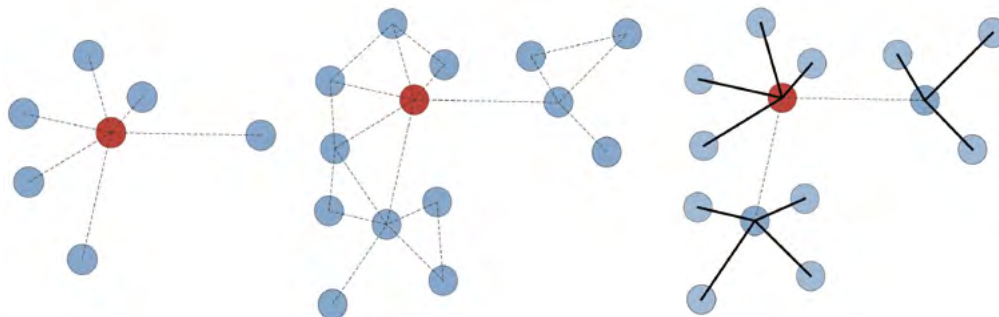
Topologien

Topologien sind wichtige Gestaltungsmittel für Netzwerke im Allgemeinen. In industriellen Ethernet-Verbindungen können sie maßgeblichen Einfluss auf das Zeitverhalten haben.

Wie weiter oben benannt, erfolgt der Zugriff auf den Kommunikationskanal, sobald er frei ist. Dies wird mit einer Abfrage festgestellt. Je weniger Knoten in einem Segment sind, umso schneller kann der Zugriff stattfinden, sodass mit abnehmender Segmentgröße die Übermittlung der Daten immer deterministischer bis hin zu einem echtzeit-ähnlichen Regime erfolgt.

In drahtlosen Sensornetzwerken kommt als zusätzlicher Aspekt hinzu, dass mit der Auswahl einer Topologie auf die zwischen 2 Netzwerkknoten zu überbrückende Entfernung Einfluss genommen wird. Da elektromagnetische Wellen überproportional mit der Distanz schwächer werden, kann durch Einfügen von Zwischenknoten die Erreichbarkeit sichergestellt werden. Abb. C4.2-4 zeigt typische in drahtlosen Sensornetzwerken verwendete Topologien.

Abb. C4.2-4
In drahtlosen Sensornetzwerken häufig verwendete Topologien. Von links: Stern, Mesh (vermaschtes Netz), Baum. Blau: Sensornetzwerkknoten, Rot: Gateway



C 4.2.8.2 Gestaltung und Implementierung

Betriebssystem

Der Hardwareaufbau des Beispielsystems ist in Abb. C4.2-2 dargestellt. Wie in allen eingebetteten Systemen wird ein wesentlicher Teil der Funktionen durch die implementierte Software realisiert. Ein starker Fokus auf Software ist zudem der Schlüssel für einfache Rekonfigurierbarkeit und damit letztendlich für eine Anpassung an Nutzeranforderungen.

Ein konsequentes Verfolgen dieses Ansatzes führt zum Einsatz eines Betriebssystems, welches für den Nutzer die konkrete Anwendung von der verwendeten Hardware entkoppelt. Mit TinyOS steht ein Betriebssystem für drahtlose Sensornetze zur Verfügung. Dies findet im Beispiel Verwendung.

Es besteht aus Softwaremodulen, die zu Komponenten zusammengesetzt werden und ist quelloffen – somit kann eine Anpassung an die Gegebenheiten und funktionalen Aspekte prinzipiell erfolgen. Dies wird durch Bibliotheken für die Realisierung von Synchronisation, Medienzugriff (MAC), Routing, IPv6 und Update-over-the-Air erleichtert.

Die Kommunikation erfolgt ereignisgesteuert mit Reaktion auf Zeitgeber, AD-Wandler, Transceiversignale. Eine typische Verwendung der beschriebenen vernetzten Sensorknoten in einer Automatisierungsanwendung ist in Abb. C4.2-5 dargestellt.

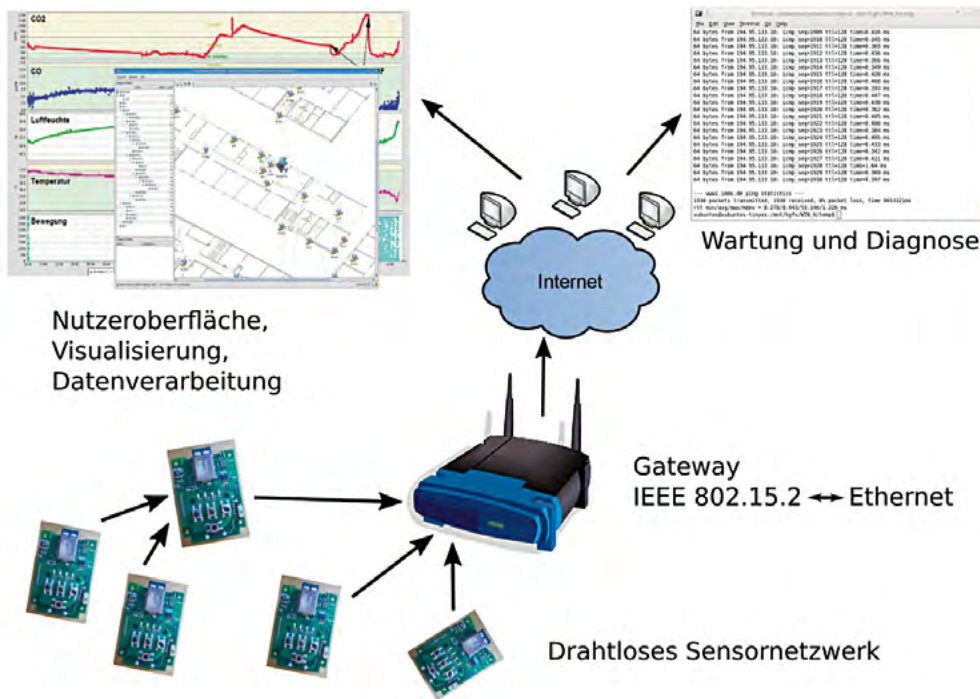


Abb. C4.2-5
Einbindung eines drahtlosen Sensornetzwerkes in eine Internet-Infrastruktur. Sie erfolgt über ein Gateway, welches zwischen den Kommunikationsprotokollen vermittelt.

C 4.2.9 Drahtlose energieautarke Sensorsysteme und -netzwerke

C 4.2.9.1 Besonderheiten drahtloser Sensoren

Drahtlose Sensoren oder Funksensoren sind in der Regel eingebettete intelligente Sensorsysteme, die über zwei Besonderheiten verfügen:

- Die Kommunikation der Messwerte erfolgt drahtlos und benötigt keinen Kabelanschluss.
- Wenn kein Kabelanschluss für die Messwertübertragung notwendig ist, sollte auch die Energieversorgung autark ohne Kabel erfolgen.

Damit sind sie völlig unabhängig von Infrastrukturen und können dort eingesetzt werden, wo der geeignetste Ort für die Messwertaufnahme gegeben ist.

Erst mit der Entwicklung und der kommerziellen Verfügbarkeit von extrem wenig energieverbrauchenden elektronischen Bauelementen und der Verfügbarkeit langlebiger Energiespeicherelemente mit hoher Speicherkapazität sind technisch sinnvolle und wirtschaftliche autarke Funksensoren möglich geworden. Seitdem wächst dieser Nischenmarkt der Sensorik beständig. Sie werden insbesondere im Bereich der Wartung und Instandhaltung von schwer zugänglichen Anlagen, bzw. Messpunkten (z. B. Windenergieanlagen) zur Erhöhung der Ausfallsicherheit durch vorausschauende Wartung (siehe auch Kap. B 2.2.5). und damit des Anlagenwertes nachgefragt.

Aus den genannten Merkmalen autarker Funksensoren ergeben sich die Funktionen, über die ein Funksensor verfügen muss. Die Grundstruktur dieser Systemfunktionalität ist in der Abbildung C4.2-6 (umseitig) gezeigt.

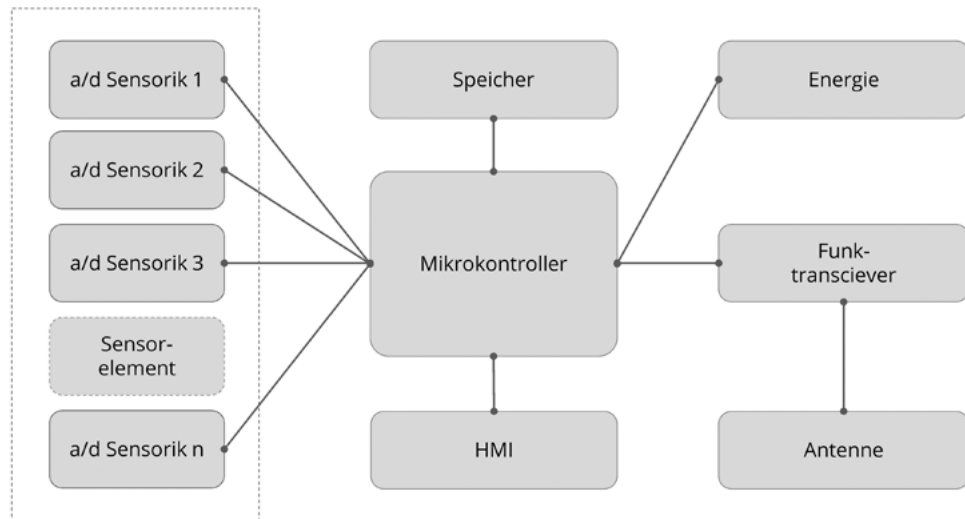
Ein autarker Funksensor besteht aus den folgenden Baugruppen, bzw. Funktionen (siehe auch Kap. B 2.2.6):

- Einem oder mehreren Sensorelementen bzw. Sensorikbaugruppen, (Anmerkung: die Sensorikbaugruppe beinhaltet bereits Sensorelektronik bis zu einem analogen oder digitalen Standardsignal),
- einem Mikrocontroller,
- einem digitalen Speicher (dieser kann Bestandteil des Mikrocontrollers sein),

- einem Funktransceiver in Verbindung mit einer Antenne,
- einer Energiebaugruppe (Batterie, Akku, Harvester),
- einem Human-Machine-Interface (z. B. für die Programmierung),
- der Firmware des autarken Funksensors (nicht in der Abbildung enthalten).

Ein anwendungsspezifisches Gehäuse ergänzt die Baugruppen des Funksensors.

Abb. C4.2-6
Funktionskomponenten
autarker Funksensoren.



Auf den ersten Blick sind anhand dieser Baugruppen keine signifikanten Unterschiede zu anderen Sensorarten ersichtlich. Die Herausforderungen bei Funksensoren leiten sich aus zwei wesentlichen, grundsätzlich anderen Funktionen ab, nämlich

- aus den Besonderheiten der Sensordatenübertragung per Funk und aus der Energieautarkie.

Die Energieautarkie der Funksensoren bedingt die Forderung nach geringstem Energieverbrauch im gesamten Sensorsystem.

Daraus ergeben sich wichtige Forderungen an die funktionellen Baugruppen:

- Für die Auswahl der Sensorelemente sind Messprinzipien zu nutzen, die im Betrieb den geringsten Energieverbrauch besitzen.
- Es sind vorzugsweise Mikrocontroller mit geringstem Eigenenergieverbrauch einzusetzen.
- Es sind Antennen mit höchstem Wirkungsgrad zu verwenden.
- Für die Energiespeicherung sind langlebige Technologien zu verwenden.
- Die komplette Funksensorelektronik ist auf minimalem Energieverbrauch auszulegen.
- In der Firmware sind konsequent Schlafmodi und das Abschalten nicht benötigter Ressourcen vorzusehen.
- Bei der Erarbeitung der Betriebsmodi für den Messwertabruf auf den Server ist auf minimale Energieverbräuche zu achten (Abrufintervalle genau auf die Mess- bzw. Regelaufgabe anpassen). Weitere Spezifikationen und Randbedingungen für die autarken Funksensoren ergeben sich in der Regel aus dem konkreten Einsatz- und Anwendungsszenarien.

C 4.2.9.2 Motivation für die Nutzung drahtloser Sensoren

Die genannten Forderungen an drahtlose Sensoren schränken die Variabilität und Vielfalt der Sensorik erst einmal ein. Allerdings bieten drahtlose Sensoren wesentliche Vorteile, die zu einem ständig wachsenden Nischenmarkt geführt haben.

Aus technischer Sicht ergibt sich:

- Die für autarke Funksensoren benötigten Komponenten sind kommerziell erhältlich,
- die inzwischen existierende weltweite und lokale IT-Umgebung gewährleistet die finale Kommunikationsschnittstelle in existierende Kommunikationsstrukturen und Netzwerke.

Aus Nutzer- oder Anwendungssicht, dass sie:

- In existierende Anlagen und Maschinen nachrüstbar sind,
- keine zusätzliche Infrastruktur benötigen,
- die Messwertermittlung auch an schwer zugänglichen oder weit auseinanderliegenden Orten ermöglichen.

C 4.2.9.3 Hardware für drahtlose Sensoren

In den vorangehenden Abschnitten sind die Hardwarekomponenten für intelligente Sensorsysteme ausführlich vorgestellt worden. Um die Auswahl aus Sicht drahtloser Sensoren zu erleichtern, sind nachfolgend beispielhaft einige bewährte und auch in Zukunft relevante Komponenten komprimiert zusammengestellt.

Messprinzipien

Aus energetischen Gründen sind vorzugweise Messprinzipien mit geringem Energieverbrauch zu nutzen. D.h. statt Messbrücken, die einen Querstrom während der Messphase ziehen, ist die Auswertung kapazitiver oder induktiver Strukturen mit geringerem Energieaufwand möglich.

Mikrocontroller

Die Auswahl eines geeigneten Mikrocontrollers gestaltet sich ob der Vielfalt der am Markt befindlichen Typen und der mannigfaltigen Anforderungen (Leistung, Kosten, Verfügbarkeit, Einsatzgebiet) als schwierig. Im Kontext drahtloser Sensoren mit einer autarken Energieversorgung rückt der Aspekt des Energieverbrauchs und der effizienten Ressourcennutzung in den Vordergrund.

Allgemeingültige Auswahlregeln sind schwer zu formulieren, da auch die übrigen Anforderungen immer an der speziellen Applikation gespiegelt werden müssen. Es kann sich aber an den nachfolgenden Spezifikationen für einen geeigneten Mikrocontroller orientiert werden:

- Low Power Technologie bis Spannungen von 1,8 V,
- skalierbare Architektur, die sowohl die Mainclock in weiten Bereichen konfigurierbar gestattet als auch die Möglichkeit zur Abschaltung der peripheren Funktionsblöcke wie Schnittstellen, Timer etc., Verdrahtung von Ereignisquellen an asynchrone Interrupts zum ereignisgesteuerten Ablauf des Programms.

Speicher

Als Speicher bieten sich Flash-Speicher an. Sie besitzen eine sehr hohe Speicherdichte und lassen sich mit flexiblen Taktraten beschreiben. Zur Anbindung an einen Mikrocontroller eignen sich insbesondere Flash Speicher, die seriell beschrieben werden können.

Funktransceiver

Zur drahtlosen Übertragung eignen sich Low Power Funktransceiver, die eine digitale Repräsentation der Datenströme erlauben. Hierbei sind Sender und Empfänger in einem IC zusammengefasst und erlauben die effiziente Ablaufsteuerung einer Kommunikation.

Zum Stand der Technik gehört nicht nur die Modulation der Daten, sondern auch das sog. Pakethandling, das die Daten mit einer Prüfsumme, mit Adressen und weiteren notwendigen Informationen zur Kommunikationsabwicklung versieht und diese auch auswertet.

Es gibt unterschiedliche Standards, die von Funktransceivern unterstützt werden. Hierzu zählen:

- IEEE 802.15.4,
- Bluetooth low energy,
- ANT.

Alle diese Standards legen den Fokus auf eine sehr energieeffiziente Kommunikation und erlauben die Versorgung der Systeme durch Batterien oder Akkus und z. T. auch durch Energy Harvester.

Energiebaugruppe

Eine besondere Bedeutung kommt bei energieautarken Sensoren der Baugruppe Energie zu. Diese Baugruppe besteht in der Regel aus zwei oder mehreren Komponenten. Eine Komponente ist der Energiespeicher an sich, eine Batterie, ein Akku oder Supercap. Die zweite Komponente beinhaltet die elektronische Schaltung für das Energiemanagement, die Spannungsbereitstellung und ggf. eine Harvesterschnittstelle. Die dritte Komponente kann ein Energieharvester zur Energiegewinnung aus dem Umfeld des Sensors sein.

C 4.2.9.4 Energy Harvesting

Konventionelle Energiespeicher wie primäre oder sekundäre Batterien begrenzen durch ihre Kapazität die unterbrechungsfreie Einsatzdauer von energieautarken Sensoren. Der endliche Energievorrat führt dabei zu einem stets erforderlichen, realisierbaren Kompromiss aus Baugröße und -gewicht sowie Kosten in der Entwicklung und Verbreitung autarker Sensoren.

Einganggröße Umgebung



Optische Energie in Form von Licht

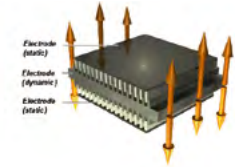
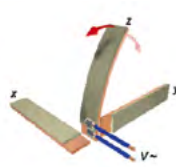
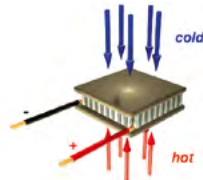
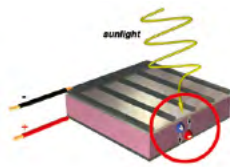


Thermische Energie aus Temperaturgradienten



Kinetische Energie aus mechanischen Schwingungen

Energy Harvester



Verfügbare Technologien

- α -, p-, m-kristallines Si
- GaAs
- Dünnsfilm, z. B. CdTe
- Polymer
- Farbstoff basiert
- Multi junction
- Bi_2Te_3 -basierte Halbleiter:
 - Makro – auf Keramiksubstraten
 - Mikro – auf Si-Wafer bzw. Polyimid
- PZT -basierte Keramiken:
 - Makro – resonante Bimorphstrukturen
 - Mikro – prototypische Labormuster
- Makro – diskrete Komponenten (Miniaturspulen, Permanentmagnete)
- Mikro – prototypische Labormuster
- Simulation kapazitiver MEMS-Interdigitalstrukturen
- Mikro – prototypische Labormuster in Entwicklung

Zukünftige Herausforderungen

- Erhöhte Lebensdauer organischer Zellen
- Konzentratoren
- Kombinierte Ansätze (z. B. Thermoelektrik und Photovoltaik)
- Erhöhte Lebensdauer mikro-technischer Komponenten
- Kostenreduktion durch großvolumige Batch-Produktion
- Markteintritt mikro-technischer Wandler
- Entwicklung von Strukturen mit aktiver Resonanzanpassung
- Entwicklung von Dünnschichtprozessen zur Abscheidung hartmagnetischer Materialien
- Optimierung planarer Spulen
- Entwicklung effizienter Ladeelektronik
- Integration von Elektreten zur Initiierung des Ladeprozesses

Abb. C4.2-1

Einordnung von Energy Harvestern für mikrosystemtechnische Applikationen [IZM-2017].

Dies gilt besonders bei Anwendungen, in denen ein unterbrechungsfreier Langzeitbetrieb ohne Wartungsintervalle für Batteriewechsel gefordert ist. Neben alternativen Konzepten der Energiespeicherung (z. B. Integration miniaturisierter Brennstoffzellen) basieren innovative Versorgungskonzepte auf der Nutzung von Umgebungsenergie mittels „Energy Harvesting“.

Dabei werden nichtelektrische Größen in Strom und Spannung transformiert und nach entsprechender Anpassung den elektrischen Verbrauchern des Sensors zur Verfügung gestellt. Mit dem stetig sinkenden Leistungsbedarf mikroelektronischer Komponenten bei gleichzeitiger Effizienzsteigerung von Funktionswerkstoffen und Zwischenspeichern ist eine drastische Zunahme von durch Energy Harvesting gestützten Konzepten für Cyber Physikalische Systeme (CPS, s. Kap. A 3, C6) zu verzeichnen.

Bei der Auswahl eines geeigneten Energy Harvesters ist zunächst nach den verfügbaren Energiequellen aus natürlichen oder anthropogen verursachten Prozessen aus dem unmittelbaren Umfeld des Sensors zu unterscheiden (Abb. C4-2).

Potenzielle Energiequellen stellen die elektromagnetische Strahlung, Temperaturunterschiede sowie mechanisch induzierte Bewegungen wie z. B. Vibrationen dar. Die Höhe der durchschnittlich bereitgestellten Leistung wird durch die Effizienz des Wandlers sowie die Umgebungsbedingungen dominiert.

Durch Normierung auf das Volumen, bzw. des Gewichts, kann die in der Literatur verbreitete Angabe von volumetrischer, bzw. gravimetrischer Leistungsdichte (σ_V / σ_G), vorgenommen werden. Für planare Anordnungen (z.B. Solarzellen, thermoelektrische Elemente und mikrotechnische mechatronische Wandler) ist jedoch der Bezug pro Fläche, σ_A , sinnvoll. Letztere Größen können jedoch immer nur einen Anhaltspunkt für die Systemkonzeptionierung liefern, da die (lokal) verfügbaren Leistungsprofile aus der Umgebung häufig schwer abschätzbar sind. Zusätzlich besteht eine starke Abhängigkeit der Effizienz des Energy Harvesters vom Arbeitspunkt.

In jüngster Zeit verfügbare mikroelektronische Schaltungen für das Power Management bieten daher zunehmend Schnittstellen für den modularen Austausch sowie die Kombination von konventioneller Batterieversorgung mit verschiedenen gearteten Energy Harvestern an. Die in diesem Abschnitt diskutierten Formen von Micro-Energy Harvestern werden daher als eigenständige funktionale Einheiten verstanden, wobei in typischen Anwendungsgebieten eine durchschnittliche Leistung im Bereich zwischen 100 μW und 1 mW zu erzielen ist.

Realisierbare Funksensoren implementieren daher Maßnahmen für die drastische Reduktion des Leistungsprofils, bspw. niedrige Abstraten oder konsequente Nutzung von Energiesparmodi.

C 5 Selbstüberwachung und Störungstoleranz von Sensoren und Aktoren

C 5.1 Forderungen aus der Prozesstechnik an Sensoren

Standen in der Vergangenheit bei der Sensorentwicklung vor allem Verbesserungen der Spezifikationsdaten, z. B. Reduzierung der Messunsicherheit im Vordergrund, sind heute die Entwicklungsziele zunehmend in Richtung der Erlangung von Kosten-Nutzen-Vorteilen ausgerichtet [NAM-2006].

Dabei ist aus Anwendungssicht zu berücksichtigen, dass den tatsächlichen Sensor-Kosten neben dem Kaufpreis auch die Installations-, Inbetriebnahme-, Wartungs- und Reparaturkosten sowie Folgekosten bei Störungen oder Ausfall des Sensors zugerechnet werden müssen. Vor allem die Wartungs-, Reparatur- und Folgekosten übersteigen in der Prozessmesstechnik den Anschaffungspreis oft um ein Vielfaches.

Eine der Kernforderungen der *NAMUR-Technologie-Roadmap für Prozess-Sensoren* [NA-2006] besteht daher in der drastischen Reduzierung von Wartungen und Inspektionen. Darin eingebunden ist auch die Forderung nach vorausschauender Sensor-Wartung [COL-2001].

Der Sensor sollte also selbst seinen Ist-Zustand erfassen und bewerten sowie daraus Informationen über seine zukünftige Einsatzbereitschaft liefern. Diese Funktionalität, folgend als Selbstüberwachung [MES-2001] bezeichnet, umfasst die Erkennung von Sensor-Störungen und deren Diagnose nach Art und Ort der Störung. Der hierfür erforderliche zusätzliche Signalverarbeitungsaufwand wird durch die zunehmende Integration von Algorithmen der digitalen Signalverarbeitung in den Sensor abgesichert.

Ein weiterer Anwenderwunsch wird zukünftig die Selbst-Rekalibrierung von Sensoren, also deren Rekonfiguration, umfassen. Durch die Anwendung von Selbstüberwachung und Rekonfiguration wird in naher Zukunft der Einsatz von gegenüber Störungen und Ausfällen weitgehend toleranten Sensoren erfolgen.

Aus einer Analyse der wichtigsten Methoden und Verfahren bei der Selbstüberwachung ergibt sich eine Unterstützung der Sensor-Entwickler bei der Implementierung der Selbstüberwachung allgemein und insbesondere in Bezug auf autarke Sensoren. Dies ist ausführlich auch in der AMA-Studie „*Sensor Trends 2014*“ dargestellt [AMA-2010].

Zunächst wird eine Möglichkeit der Strukturierung der wichtigsten Methoden und Verfahren angegeben. Zielstellung dieser Strukturierung ist die Unterstützung eines systematischen Vorgehens der Sensor-Entwickler bei der Implementierung in autarke Sensoren. Ausgehend von der unterschiedlichen Leistungsfähigkeit dieser Verfahren wird ein Ausblick auf zukünftige Entwicklungsschwerpunkte gegeben.

Anschließend erfolgt am Beispiel magnetischer Sensoren eine kurze Einführung in die Sensor-Selbstüberwachung.

C 5.1.1 Ziele der Sensor-Selbstüberwachung

Der Nutzen der Selbstüberwachung von Sensoren liegt vor allem in der Verringerung der Folgen eines Sensorausfalls. Störungen werden rechtzeitig erkannt und diagnostiziert und somit Folgeschäden für den Prozess oder des Objekts vermieden. Damit wird eine höhere Sicherheit (VDI/VDE 3542, DIN EN 61069) des Sensors gewährleistet. Außerdem ist durch das Auswerten der Zusatzinformation ein realistischeres Bild vom Ist-Zustand und bei geeigneter Bewertung auch vom in naher Zukunft zu erwartenden Zustand ableitbar. Durch die damit mögliche vorausschauende Wartung wird eine höhere Verfügbarkeit (DIN 40041) erzielt. Insgesamt besteht das Hauptziel der Sensor-Selbstüberwachung in der Erhöhung der Verlässlichkeit, d. h. solange weder Störung noch Ausfall gemeldet werden, kann man sich im hohen Maße darauf verlassen, dass der Sensor seine Funktion gemäß der Spezifikation voll erfüllt. Der vom Sensor ermittelte Messwert entspricht also mit einer zulässigen Unsicherheit der Messgröße. In Abbildung C5-1 sind die wichtigsten Einflussgrößen zur Erhöhung der Sensor-Verlässlichkeit zusammengestellt.

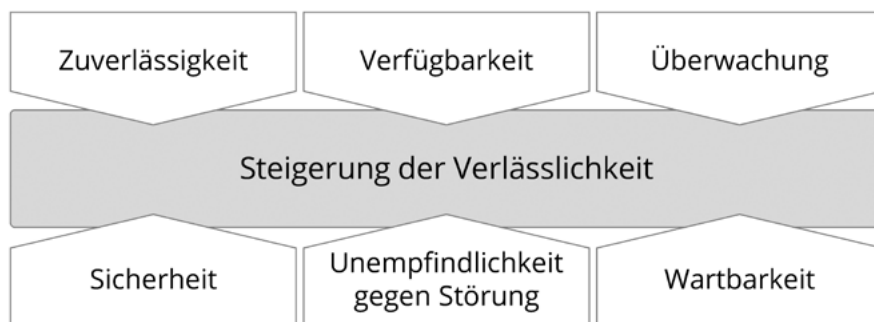


Abb. C5-1
Einflussgrößen zur Steigerung der Verlässlichkeit als Hauptziel der Sensor-Selbstüberwachung.

C 5.1.2 Methoden und Verfahren der Selbstüberwachung bei Sensoren

Zur Selbstüberwachung von Sensoren werden drei grundsätzlich unterschiedliche Methoden,

- die direkte Kopplung des Sensors an den Prozess, ein Maschinenteil usw.
- die Auswertung von Vor- und Erfahrungswissen und
- interne Überwachung des Sensors

angewandt [AMA-2010]. Ausgehend von der bereits erwähnten Analyse des Standes der Technik zu Prozess-Sensoren mit Selbstüberwachung und den eigenen Untersuchungen an druckbasierten Durchfluss-Sensoren [MÜL-2006] ergibt eine Bewertung der Überwachungsverfahren die in Tabelle C5-1 zusammengestellten Vor- und Nachteile [WER-2006].

Beim Verfahren der Redundanz werden redundante Signale durch gleichartige (homogene) oder unterschiedliche (diversitäre) Redundanz erzeugt. Dabei wird die gesamte Messkette oder es werden Teile davon redundant ausgeführt. Weicht ein Signal von einer vereinbarten Toleranz ab, liegt eine Störung vor. Bei einfacher Redundanz kann nur die Erkennung einer Störung stattfinden. Handelt es sich um drei oder mehrere redundante Einheiten, kann aufgrund eines Mehrheitsentscheids (Majoritäts-Redundanz) eine Rekonfiguration durch Abschalten der abweichenden Einheit erfolgen.

Mittels einer Referenzgröße kann sich der Sensor selbst überwachen und, wenn sie am Eingang als Referenzmesswert anliegt, auch rekalisieren. Referenzgrößen können auch als elektrische Zwischengrößen in der Messkette wirken. In diesem Fall sind nur die nachfolgenden Signalverarbeitungsblöcke überwachbar.

Bei der Analyse des Mess-Signals werden sensorspezifische Grenzwerte und Trends überwacht, die aus den individuellen Einsatzbedingungen der jeweiligen Sensorgruppe abgeleitet werden. Eine weitere Überwachungsmöglichkeit bieten zusätzliche Informationen im Mess-Signal, z. B. höhere Frequenzanteile bei quasi-statischen Messungen.

Bei der Analyse des Einflusses einer Störgröße wird der unerwünschte, aber bekannte Effekt der Störgrößenempfindlichkeit (auch als Querempfindlichkeit bezeichnet), auf unterschiedliche Übertragungsblöcke in der Messkette ausgewertet. Hierzu wird in einem getrennten Messkanal die Störgröße erfasst. Durch den Vergleich mit den Zwischensignalen der störgrößenbelasteten Messkette können Störungen erkannt und diagnostiziert werden.

Durch die Analyse von sensorinternen Zusatzsignalen oder Zusatzgrößen kann der Ist-Zustand von Sensoren bestimmt werden. Dabei handelt es sich um Signale und Größen, die bei der Mess-Signal-Übertragung nicht berücksichtigt werden, z. B. Speisespannung von Messbrücken und deren Widerstandsparameter. Dieses Verfahren wird vor allem bei der Überwachung der Sensorelektronik, auch als Selbsttest bezeichnet, angewandt und wird auf die besonders gefährdeten Baugruppen und Bauelemente konzentriert.

Verfahren	Vorteile	Nachteile
Redundanz	<p>Sehr gute Erkennbarkeit der Störungen bei diversitärer Redundanz.</p> <p>Möglichkeit der automatischen Rekonfiguration ab mindestens drei in Redundanz betriebener Sensoren.</p> <p>Bei diversitärer Redundanz ist zusätzlich das Verfahren „Analyse des Mess-Signals“ anwendbar. Durch Sensor-Redundanz wird eine geringere Messungssicherheit, z.B. durch Mittelwertbildung, ermöglicht.</p>	<p>Redundanz von Primärsensoren ist mit hohem Aufwand verbunden, es besteht Gefahr, dass sich die negativen Sensoreigenschaften überlagern und sich somit der Gesamtsensor verschlechtert</p>
Referenz	<p>Bei ausreichender Genauigkeit der Referenzgröße am Eingang ist Rekonfiguration durch Rekalibrierung möglich.</p> <p>Einfach umsetzbar durch Erzeugung einer elektrischen Referenz-Zwischengröße.</p> <p>Einzelne Komponenten der Messkette werden direkt überwacht.</p>	<p>Erzeugung einer Referenz-Messgröße ist sehr aufwendig, es besteht die Gefahr der Beeinträchtigung der Messung durch Betriebsunterbrechungen.</p>
Analyse des Messsignals	<p>Aufwand zur Implementierung der Algorithmen verhältnismäßig gering.</p> <p>Nutzung von Zusatzinformationen, die im Messsignal vorhanden sind.</p> <p>Bietet sich als Ergänzung zu den anderen Verfahren an, da diese zusätzliche Informationen im Messsignal generieren.</p>	<p>Teilweise Abhängigkeit vom Prozess oder der speziellen Applikation, da spezifische Prozesseigenschaften genutzt werden.</p>
Analyse von Störgrößen	<p>Einfluss der Störgröße auf das Ausgangssignal des Sensors kann direkt korrigiert werden.</p> <p>Ausgabe einer weiteren Prozessgröße ist möglich.</p> <p>Störgröße kann zur Verstärkung der Querempfindlichkeit direkt eingebracht werden.</p>	<p>Aufbau einer zweiten Messkette zur Störgrößenerfassung, oftmals nicht ausreichende Querempfindlichkeiten vorhanden.</p>
Analyse von Zusatzsignalen und Zusatzgrößen	<p>Verfahren ist sehr gezielt einsetzbar.</p> <p>Überwachung elektronischer Baugruppen und Bauelemente mit verhältnismäßig geringem Aufwand.</p> <p>Exakte Diagnose der Störungsursachen ist durch gezielten Einsatz möglich.</p>	<p>Nichtelektrische Baugruppen erfordern höheren Überwachungsaufwand als elektrische.</p> <p>Überwachung bezieht sich nur auf einen eingeschränkten Bereich der Messkette.</p>

Tab. C5-1

Bewertung der Verfahren zur Selbstüberwachung autarker Sensoren.

C 5.1.3 Beispiel: Selbstüberwachung magnetischer Sensoren

Sehr anschaulich wird die Selbstüberwachung bei modernen magnetischen Sensoren verständlich. Auf deren Silizium-Chip erzeugen integrierte Spulen definierte Magnetfelder, mit denen regelmäßig z. B. die Empfindlichkeiten einzelner Hallsensor-Elemente bestimmt und untereinander abgeglichen werden [STA-2011]. Oder es wird bei modernen AMR-Stromsensoren das vom Messstrom erzeugte Magnetfeld kompensiert, um die Änderung der Empfindlichkeit mit der Temperatur zu unterdrücken [SCH-2005]. Durch die sehr genaue und langzeitstabile Geometrie der Anordnung muss nur der Strom durch die Spule bekannt sein, um ein definiertes Magnetfeld am Ort der Sensoren zu erzeugen.

Bei Hallsensoren spielt neben der Empfindlichkeit auch der Sensor-Offset, beeinflusst durch die Geometrie und die Umgebungsbedingungen, eine große Rolle. Dieser kann ebenfalls durch die im Chip integrierten Spulen bestimmt werden. Allerdings ändert sich dieser auch mit der Temperatur. Um den Temperaturkoeffizienten (TK) des Offsets ebenfalls

bestimmen zu können, kann z. B. eine kleine Heizung, im einfachsten Fall ein Widerstand, in den Chip eingebaut werden. So lässt sich durch Aufheizen der Offsetverlauf linear annähern und nachführen.

Im späteren Betrieb würden sich bei starker Änderung der Umgebungstemperatur aber wieder deutliche Abweichungen ergeben, weil der Offset einen nichtlinearen Verlauf zeigt. Hier kann wieder eine Bestimmung des Offsets und des TK erfolgen, so dass der Verlauf des Offsets über die Temperatur mit der Zeit immer genauer bestimmt und damit kompensiert werden kann. Dadurch wird eine aufwändige Kalibrierung des Chips bei mehreren Temperaturen im Fertigungsprozess ersetzt. Es werden zudem stabilere Ergebnisse erreicht, weil auch Drieffekte, z. B. durch Veränderungen im Package der Sensoren, Berücksichtigung finden [STA-2011].

Diese Vorgehensweise ist bei magnetischen Sensoren besonders vorteilhaft, da ein lokales Magnetfeld leicht elektrisch erzeugt werden kann. Der Ansatz lässt sich aber auch auf andere Sensorprinzipien erweitern und wird z. B. bei kapazitiven Beschleunigungssensoren genutzt, deren Kraft-Auslenkungs-Empfindlichkeit durch elektrostatische Anregung im Sensor selbst kalibriert werden kann.

Prinzipiell ähnlich könnten Temperatursensoren mit einer integrierten Heizung oder Drucksensoren mit einem integrierten, piezoelektrischen oder Bimetall-Aktor auf der Membran aktiv angeregt und kalibriert werden. Auch bei Gassensoren wird der dynamische Betrieb genutzt, allerdings weniger um den Sensor zu kalibrieren, sondern primär um Schädigungen zu erkennen [SCHL-2015].

Allen Ansätzen gemeinsam ist die aktive Anregung des Sensors durch geeignete Stimuli, also Anwendung des Verfahrens der Erzeugung einer Referenzgröße und die Verknüpfung der Messung mit einer entsprechenden Signalauswertung.

C 5.2 Selbstüberwachende Aktoren

Die Funktion der Aktorik in technischen Prozessen wird üblicherweise durch Sensoren überwacht. Neuartig ist die direkte Kopplung von Aktor und Sensor, z. B. durch Integration eines zusätzlichen Sensors im Aktor oder – kostensparender – die inverse Nutzung des physikalischen Aktorprinzips zur Sensorfunktion.

Der Ansatz selbst ist nicht neu und wird in einer Reihe von Systemen auf niedrigem Niveau seit längerem genutzt, zum Beispiel für die elektrischen Fensterheber in Pkw. Dort wird der Einklemmschutz, also eine Überwachung, ob Finger oder andere Objekte im Fenster eingeklemmt werden könnten, meist durch eine Motorstromüberwachung realisiert. Steigt der Strom deutlich an, so ist dies ein Hinweis auf erhöhte Kraft, damit auf ein Hindernis und Abbruch des Schließvorganges.

Der Ansatz kann aber deutlich erweitert werden, indem man z. B. bei Elektromotoren deren Induktivität, die sich während der Drehbewegung ändert nutzt, um damit einen Winkelsensor zur Überwachung der Bewegung zu ersetzen. Die sensorlose Überwachung stützt sich dabei auf die Antriebselektronik, die elektrische Merkmale aus dem Motor ausliest und damit dessen Zustand, insbesondere die Rotorposition, bestimmt. Das gelingt mit hoher Genauigkeit und Geschwindigkeit und spart so einen separaten Sensor ein.

Besonders einfach kann dieses Grundprinzip bei Festkörperaktoren genutzt werden. Aktoren aus Formgedächtnislegierungen beispielsweise zeichnen sich gerade durch extreme Kompaktheit aus, da der Aktor im einfachsten Fall ein simpler Draht ist, der durch direkten Stromfluss geheizt wird und sich dadurch wie ein künstlicher Muskel zusammenzieht. Hier würde ein zusätzlicher Wegsensor gerade den Vorteil des geringen Einbauvolumens aufheben.

Daher wird gleichzeitig der Drahtwiderstand als Maß für die Längenänderung genutzt. Dieser wird auch von der Temperatur beeinflusst. Allerdings kann bei geeigneter Auslegung ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Widerstand und Länge – und damit der gewünschten Position – identifiziert werden.

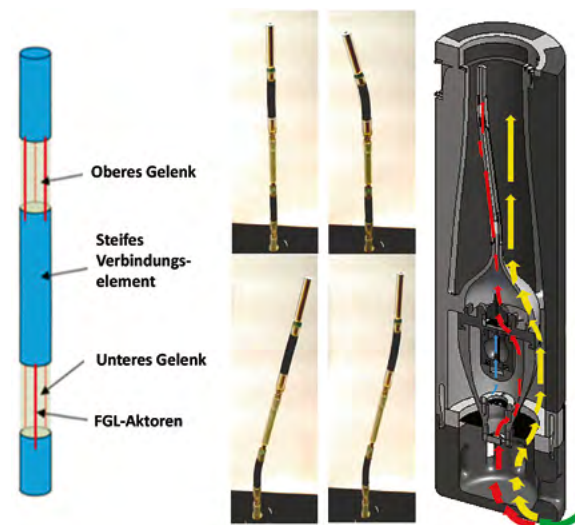
In Abbildung C5-2 ist ein Inhalatorsystem mit Formgedächtnisaktoren und Widerstandsmessung zu deren Längenmessung dargestellt. Im Mundstück eines Beatmungssystems wird eine kleine Düse so positioniert, dass Medikamente nur bestimmte Bereiche der Lunge erreichen. Die Ansteuerung der Düse erfolgt mit insgesamt sechs Formgedächtnisaktoren.

Abb. C5-2

Intelligentes Inhalatorsystem zur gezielten Medikamentverabreichung.

Links und Mitte: Aufbau und Verformungsmoden der NiTi-aktuierten adaptiven Düse.

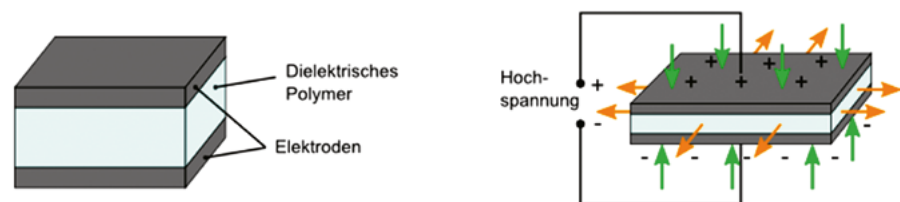
Rechts: Schnitt durch das Gesamtsystem [IMSL-2016].



Auch bei piezoelektrischen Aktoren ist die Kopplung von Aktor- und Sensorfunktion direkt möglich und wird in vielen Anwendungen, z. B. Ultraschallabstandssensoren, bereits vielfach ausgenutzt [JAN-2010]. Hier ist allerdings eine echte Parallelität von Aktor- und Sensorfunktion durch materialbedingte Hysterese- und Gedächtniseffekte deutlich schwieriger zu realisieren und erfordert komplexere Auswerte- und Ansteuerungsmodelle.

Abb. C5-3

Dielektrisches Polymer als Self-sensing Actuator [IMSL-2016].



Als letztes Beispiel seien die elektroaktiven Polymere (EAP) genannt, bei denen durch auf weiche, dielektrische Polymerfolien aufgebraute Elektroden (Abb. C5-3) sowohl aktori- sche als auch sensorische Funktionen erzielt werden können.

Legt man eine (Hoch-) Spannung an die Elektroden auf beiden Seiten der Folie an, so wird die Folie durch das elektrostatische Feld zusammengedrückt, bei einer eingespannten Membran wird dadurch die Membran weicher bzw. kann ausgelenkt werden. Umgekehrt ändert sich die Kapazität bei einer Komprimierung der Folie, auch wenn dies z. B. durch externe Belastung geschieht, was als Sensoreffekt ausgenutzt wird. Durch entsprechende Messung der Kapazität kann, z. B. in Ventilen oder Mikropumpen auf Basis von EAP der Zustand bzw. die Position der Membran kontinuierlich überwacht werden.

Allen diesen Beispielen ist die anspruchsvolle spezielle Ansteuer- und Auswerteelektronik gemeinsam sowie die Existenz eines reproduzierbaren dynamischen Modells des Self-sensing Actuators zur Sicherung dieser erweiterten Funktionalität. Zudem sind häufig spezifische Kalibrierungen erforderlich, um materialbedingte Streuungen auszugleichen.

C 5.3 Ausblick

Die Weiterentwicklung der Sensor-Selbstüberwachung wird vor allem in Richtung komplexerer Signalverarbeitung im autarken Sensor gesehen. Im Vordergrund werden die Verfahren „Analyse des Mess-Signals“ und „Analyse der Querempfindlichkeiten von Störsignalen“ stehen. Auch die Implementierung einfachen Anwendungswissens für typische Einsatzfälle kann ein zukünftiger Ansatz sein.

Zunehmend werden Möglichkeiten zur Sensor-Rekonfiguration untersucht. Einen wichtigen Beitrag werden hier mikroelektromechanische (MEMS-) Sensoren (s. Kap. C 2) leisten, die zur Sicherung von Redundanz als kostengünstige Array-Anordnungen ausführbar sind. Weitere Ansätze sind die automatische Rekalibrierung oder die gezielte Reduzierung des Funktionsumfangs und der Genauigkeit des Sensors, d. h. Ableitung von Degradationsstrategien.

C 6 Sensorkommunikation und Systemintegration

Durch neue multifunktionale Geräte, welche die Eigenschaften von Handys und PDAs mit Fernbedienungen, GPS-Empfängern u.a. kombinieren und Zahlungsströme bzw. Signaturen unter den gesetzlichen Sicherheitsaspekten ermöglichen, werden mobile Zugangsmedien einen hohen Stellenwert in der Mensch-Technik-Interaktion einnehmen (Abb. C6-1). Der wachsende Bedarf an Speicherkapazität und höherer Leistungsfähigkeit wird zur weiteren Komplexität führen. Schnittstellen zu personennahen Kommunikationsnetzen werden zur Standardausstattung gehören.

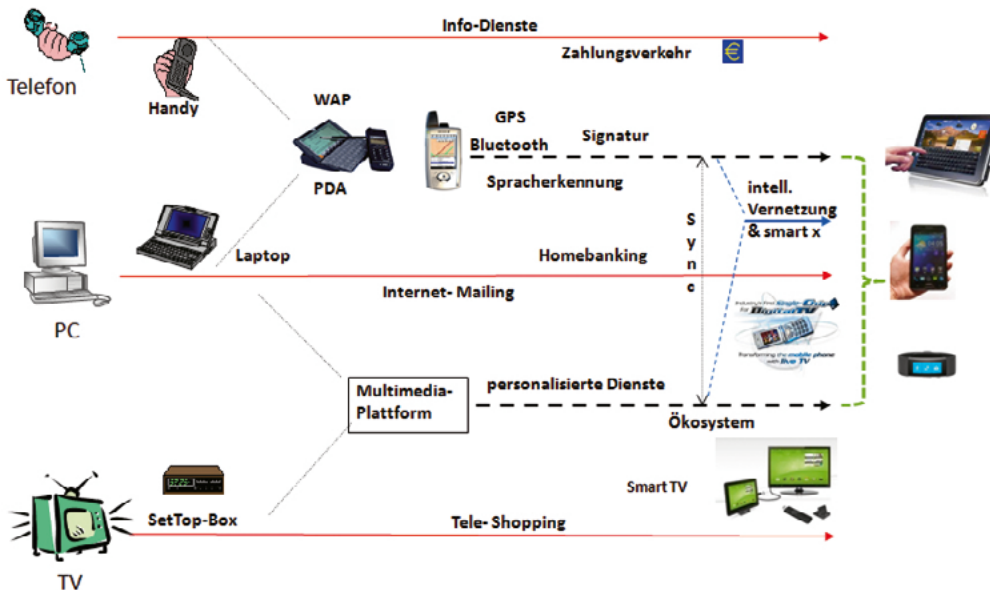


Abb. C6-1
Konvergenz der
Zugangsmedien
[SINN-2017].

Mittlerweile sind mobile Geräte so klein und leistungsfähig geworden, dass sie in Kleidung oder tragbare Gegenstände integriert werden können. Die heutigen drahtlosen Kommunikationstechniken erlauben Ad-hoc-Vernetzungen und eine Anbindung an leistungsfähige Rechenanlagen und Datenbanken (Sensordaten in der Cloud).

Mit dem Trend zur weiteren Miniaturisierung in der Technik und der steigenden Leistungsfähigkeit kleinster Geräte wird deutlich, dass sich für mobile Nutzer ganz neue Möglichkeiten und Anforderungen an eine Geräteunterstützung ergeben.

Nimmt man den Menschen selbst in den Fokus der Betrachtung so erkennt man, dass ihn stets ein unsichtbarer, mobiler Informationsraum umgibt. Dieser Raum wird gebildet und aufrecht gehalten durch Interaktion von mobilen Geräten, drahtgebundenen bzw. drahtlosen Netzen und dem Internet, um Informationen aus dem Umfeld zu erfassen und mit anderen Menschen zu kommunizieren und zusammenzuarbeiten.

Mit der fortschreitenden Entwicklung der Internet-Anwendungen wird die Kapazität hinsichtlich der Anzahl der miteinander verbundenen Geräte stark ansteigen. Konzepte wie das Internet der Dinge (Internet of Things, IoT), die M2M-Kommunikation oder Sensor-Netzwerke werden zur großflächigen Nutzung von Sensoren führen. Flankiert wird dies auch durch das europäische Förderprogramm ECSEL. So steht im Mittelpunkt des Projektes „IoSense“ (Internet of Sensors) der Aufbau von Pilotlinien zur Entwicklung neuer kostengünstiger Sensortechnologien und Methoden einer Hochvolumenfertigung bis hin zur Erarbeitung neuer Anwendungsbeispiele. In Zukunft wird die mobile Kommunikation und das mobile Internet sich vorherrschend platzieren [GMD-2016].

Ein wesentlicher Erfolgsfaktor wird dabei die effiziente Einbettung der Sensoren in immer komplexere und intelligente dezentrale Systeme sein. Energieautarke Sensor- und Mikrosysteme, die sich aus ihrem Umfeld selbst mit Energie versorgen, mit geringstem Energieaufwand Daten erfassen und drahtlos weiterleiten, sind Schlüsselkomponenten für neuartige Anwendungen (Kap. C4). Dabei wandelt sich der Sensor vom Lieferanten von Daten zur Quelle von Informationen und Entscheidungen.

Die industrielle Produktion verlangt ein komplexes Zusammenspiel zwischen realer und virtueller Welt von

- eingebetteten Systemen (Anwendungssystemen und Infrastrukturen)
- auf Basis ihrer Vernetzung und Integration und
- der Mensch-Technik-Interaktion in Anwendungsprozessen.

Immer mehr physische Objekte verfügen über intelligente Sensor- und Aktortechnologie und werden durch die Entwicklung des Internets der Dinge vernetzt.

Wesentliche Komponenten sind leistungsstarke, eingebettete Systeme [ACP-2012], die bereits heute als geschlossene Systeme kooperativ und vernetzt agieren. Vor allem in der Automobilbranche, der Luftfahrt und in der Produktion existieren ortsgebundene und zunehmend mobile Sensor-, Regelungs- und Steuerungsdienste. Die Zustands- und Umgebungsbeobachtung sowie das „Gedächtnis“ der digitalen Komponenten (RFID/NFC-Technik) wird an Bedeutung gewinnen (Abb. C6-2).

Abb. C6-2
Synchronisierte
Produktionsprozesse
[SINN-2017].



Das Zukunftsprojekt Industrie 4.0 baut auf Cyber-Physikalische Systeme (CPS). Diese steuern von einer Cloud aus Dinge der realen Welt, nehmen Sensordaten auf, regeln und optimieren damit Informations-, Energie-, Material-, Güter- und Personenflüsse. Hierfür werden einige Größenordnungen mehr Sensoren/Schaltkreise mit neuen Eigenschaften sowie Plattformen für sicherheits- und qualitätsbehaftete Hard- und Software benötigt.

Schrittweise entstehen neue Kommunikations- und Interaktionsplattformen,

- human-to-human,
- human-to-object,
- object-to-object,
- object-to-networks,

worauf sich intelligente Ökosysteme wie Marktplätze und Zulieferketten bilden werden.

Eine Vielzahl neuer Anforderungen leiten sich an die Sensorik und Messtechnik ab, um die zunehmende Komplexität beherrschbar zu machen. Der Sensor muss zum „Umfeldererkennungssystem“ weiterentwickelt werden [SIN-2013].

Konkrete Anforderungen an neue Prozess-Sensoren sind:

- Trend zu Messungen innerhalb der Fertigungslinie (Inline-Messung).
- Direktes Heranführen der Sensoren an die Messobjekte und -größen.
- Sensoren mit höherer Robustheit und Langzeitstabilität.
- Einfaches Nachrüsten und niedriger Instandhaltungsbedarf.
- Erfassung von Prozessdaten mit Zwischen- und Trendinformationen.
- Höhere Messgenauigkeit.

- Informationen über die räumliche Verteilung von Prozessgrößen (neuartige Messverfahren).
- Ermittlung und Lokalisierung von Grenzflächen.
- Trend zu Bioprozessen; prozesstaugliche Analyse.
- Prozessanalytik mit Einweg-Sensoren.
- Niedrigere Erfassungsgrenzen in Gasen.
- Multifunktions- und Systemintegration.

Im IoT (Internet of Things) kommt es zur starken Vermischung von datenorientierten Geschäftsmodellen aus der digitalen und analogen Welt. Ob bei einem Motor, einem Gebäude oder einer LED- Leuchte, wie am Beispiel in Abbildung C6-3 dargestellt, lassen sich mit den Technologien des IoT Dinge lokalisieren, identifizieren und vermessen, die bisher ungenutzt blieben.

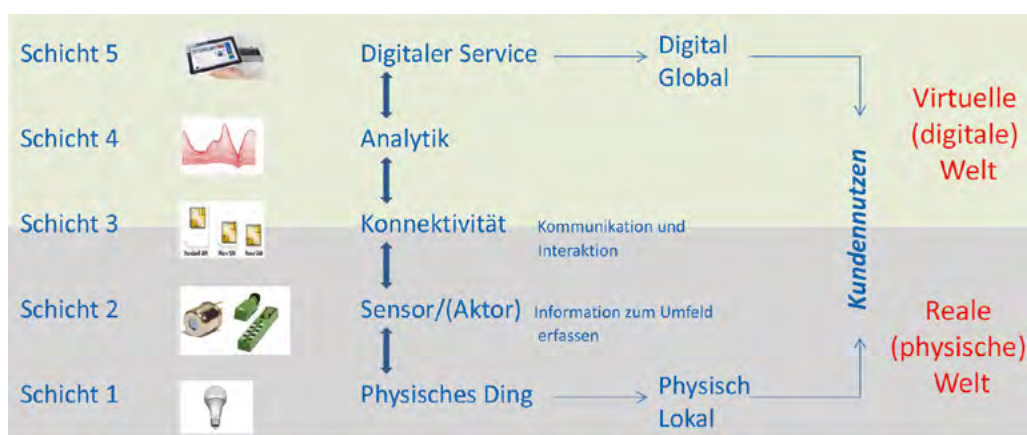


Abb.C6-3
Wertschöpfungsstufen
einer Anwendung im IoT
[SINN-2017].

- S1 LED-Lampe liefert ortsbezogen Licht (**Nutzen**)
- S2 zugefügte Sensoren erfassen lokale Umfeld-Daten (Bewegung, Geräusche, ...)
- S3 Sensoren erhalten Zugang zum Internet
(adressierbarer Funkmodul => Zustand an autorisiertes Personal)
- S4 Sensordaten sammeln und in Cloud speichern (Daten analysiert und verknüpft)
- S5 digitale Dienstleistungen werden strukturiert bereitgestellt
(Webservice, App's) => Sicherheits-LED (**Zusatz-Nutzen als Dienstleistung**)

Die Integration von Sensoren und den Sensordaten wird zunehmend von den digitalen Schichten (S3-S5) beeinflusst. Eine ganzheitliche Betrachtung bei der Hard- und Softwareentwicklung von Anwendungsszenarien wird immer zwingender. Noch fehlen einheitliche Standards und effiziente Entwicklungswerkzeuge, die die Implementierung von Sensoren und den Zugriff auf Sensordaten wesentlich vereinfacht. Auch in der Mensch-Maschine-Interaktion verlangen die Anforderungen bezüglich minimaler Reaktionszeiten (Echtzeit), höchste Verfügbarkeit, Zuverlässigkeit und Sicherheit neue Lösungsansätze.

Die Nutzung der Sensordaten selbst als Geschäftsmodell („Sensor as a Service“) stellt eine weitere Herausforderung bei der Schaffung neuer Ökosysteme dar [SCHU-2014]. Anders als in Abbildung C6-3 zu sehen, stehen nicht mehr die datengenerierenden Produkte oder die resultierenden Dienstleistungen im Mittelpunkt, sondern die Daten selbst.

Der professionelle Umgang mit den Daten, heute unter den Begriffen Analytics, Big / Smart Data oder Data Science diskutiert, ist eine grundlegende Fähigkeit, die Unternehmen besitzen oder als zusätzliches Geschäftsfeld aufbauen müssen, um diese Chance zu nutzen. Wem gehören die aus der Anwendung generierten Daten? Betrachtet man die Daten als wertvolles Gut, das dem Erzeuger der Daten gehört, so sind klare Regeln für eine nachhaltige Nutzung erforderlich.

Mit der Funktionserweiterung von Dingen mittels Sensoren und deren Vernetzung werden die Grenzen des Wettbewerbs neu definiert und erfasst praktisch jede Branche.

Teil D

Zusammenfassung –
Empfehlungen

D 1 Sensorik und Messtechnik in Deutschland

In der Sensorik liegt eine extrem große Vielfalt, die insbesondere auf die gewachsene Erkenntnis zurückzuführen ist, welches immenses Potential sie für gesellschaftliche Prozesse – Produktion, Umweltaspekte, Sicherheit, Gesundheit usw. – bis hin zur menschlichen Kommunikation hat.

Daraus ergibt sich eine Vielzahl von Anwendungen, die sich in den Messgrößen, Sensortechnologien, Schnittstellen und Verpackungen unterscheiden. Sie haben aber auch dominierenden Einfluss auf die Anforderungen, den eingesetzten Stückzahlen und damit den Preis.

Dies ist übergreifend im Teil A der Studie dargestellt und wird dann nachfolgend anhand ausgewählter Beispiele vertieft.

Die Branche der Sensorik- und Messtechnik in Deutschland wird überwiegend durch mittelständische Unternehmen geprägt. Über 400 dieser Firmen sind im AMA Verband für Sensorik und Messtechnik e.V. (AMA Verband) organisiert (Kap. E1). Sie repräsentieren rund 100.000 Arbeitsplätze, erwirtschaften einen direkten Umsatz von einigen 10 Milliarden Euro und weisen ein starkes Wachstum in Umsatz und Mitarbeiterzahlen auf. Die Sensorik erweist sich als Schlüsseltechnologie für die Konkurrenzfähigkeit von vielen Maschinen, Anlagen und Fahrzeugen, deren Werte letztlich um einige Größenordnungen über dem der Sensoren liegen. Von der technologischen Seite her ist die deutsche Sensorindustrie sehr aktiv. Es werden neue Firmen gegründet, neue Materialien erforscht oder neue Technologien eingesetzt, Sensoren modifiziert und neue Anwendungen gefunden. Damit kann die deutsche Sensorindustrie etwa 20 % des weltweiten Sensormarktes beliefern.

Gerade die Internationalisierung von Märkten und von neuen Technologien erfordert sorgfältige Beobachtungen. Denn diese Trends können zu Chancen oder zu Bedrohungen führen, wie man etwa durch die neuen Internet-basierten Entwicklungen gut erkennen kann. Es ändern sich die technischen Möglichkeiten durch die enorm erhöhte Auswertbarkeit der Vielzahl der ermittelten Daten können sich auch noch neue Geschäftsmöglichkeiten eröffnen. Deshalb diese Studie „Sensor Technologie 2022“, um Trends, Chancen und Bedrohungen aufzuzeigen und darzustellen, wie durch die Zusammenarbeit Industrie – Forschung Neues geschaffen und Altes modernisiert werden kann.

D 1.1 Sensorfirmen und Sensortechnologien

Eine Vielfalt unterschiedlicher Sensoren und Sensorsysteme sind in Entwicklung oder kommerziell verfügbar, für elektromagnetische, mechanische, optische, sowie chemische und medizinische Messgrößen. Diese finden ihre Anwendungen in einer großen Anzahl unterschiedlicher Märkte mit den jeweils angepassten technischen und ökonomischen Anforderungen. So ergeben sich spezifische Anforderungen durch die geforderten unterschiedlichen Preisklassen, Seriengrößen, thermische Stabilität, mechanische Stabilität, Lebensdauer, Multifunktionalität, Dichtigkeit, medizinische Oberflächen und vieles mehr.

Wir sehen hier seit vielen Jahren ein Zusammenspiel der Trends

- Miniaturisierung,
- Integration und
- Kommunikation.

Die Sensor-Entwicklung und -Fertigung ist aktuell durch zwei Hauptströmungen gekennzeichnet:

Explosionsartig wachsende Zahl von Sensoren für Massenmärkte

Typische Anwendungen liegen in Smart Phones, Tablet-PC's, Kameras, sowie in der Bekleidungs- und Sportindustrie (Freizeitrends). Zunehmend werden die Sensorfunktionen bereits im Signalverarbeitungs-Schaltkreis integriert. Alternativ können die Sensorelemente und die Elektronik zur Signalverarbeitung und zur Kommunikation in einem gemeinsamen Gehäuse integriert werden, wie in Abb. D1-1 dargestellt.

Die dominierenden Hersteller, Automobilzulieferer wie Bosch sowie Elektronikkonzerne wie Samsung, Intel, TSMC, Texas Instruments, Toshiba usw., die über die kostengünstigen Halbleitertechnologien verfügen, fertigen die Sensoren in Großserien.

Solche Sensoren für die Massenmärkte sind gekennzeichnet durch:

- Stark miniaturisierte Abmessungen und außerordentlich kostengünstige Herstellung in Großserien, teilweise mit vielen Millionen als Stückzahlen,
- minimale Preise bei Fertigung, jedoch nur bei hohen Losgrößen,
- minimalen Energieverbrauch und Anordnung in energieautarken Netzwerken,
- eingebettet in hochintegrierte IC's als Embedded Systems,
- zunehmend drahtlose Kommunikation und
- Anwendungsbereiche sind Consumer-Technik, Kommunikations-Technik, Kfz-Technik, Umweltmesstechnik, Bürotechnik.

Aber:

- Für den überwiegenden Anteil dieser Anwendungen werden oftmals keine hohen Ansprüche an die Messgenauigkeit, Robustheit und Zuverlässigkeit oder Lebensdauer gestellt.
- Diese Anwendungen in Massenmärkten sind durch extremen, globalen Wettbewerb gekennzeichnet, die auch schnelle Produktwechsel mit geforderten kurzen Entwicklungszeiten beinhalten.

Anspruchsvollere Sensorsysteme

Diese werden insbesondere für industrielle Anwendungsgebiete benötigt, wie Automatisierungstechnik, Fahrzeugbau, Landmaschinen, Krane, Flugtechnik und Medizintechnik, chemische und pharmazeutische Prozesstechnik.

Neben ausgewiesenen Herstellern für Automatisierungs- und Fahrzeugtechnik bieten sich hier vielfältige Chancen, vor allem in anspruchsvollen Nischen für die typisch mittelständischen AMA-Firmen.

Die industriell spezifischen Sensoren basieren häufig auf den Fertigungstechnologien des Massenmarktes, allerdings mit robusterem und damit aufwändigeren Packaging, anwendungsspezifischen Zertifikaten, anspruchsvollerer Signalverarbeitung und anwendungsspezifischen Schnittstellen.

Diese Sensorsysteme sind durch folgende Merkmale gekennzeichnet:

- Hohe Anforderungen an Genauigkeit und Arbeitsfrequenzbereich, also Dynamik.
- Besondere Anforderungen an Robustheit und Verlässlichkeit der Messdaten.
- Die Fertigung erfolgt vorwiegend in Kleinserien.
- Anwendungsbereiche: Maschinenbau, Fertigungsautomatisierung, Prozessmesstechnik, Nutzfahrzeugbau, Luft- und Raumfahrt, Energietechnik, Medizintechnik und mehr.
- Deutlich höhere Sensor-Kosten entsprechend der hohen Messgenauigkeit, hoher Langzeitstabilität und Langlebigkeit, sowie dem aufwendigeren Packaging.

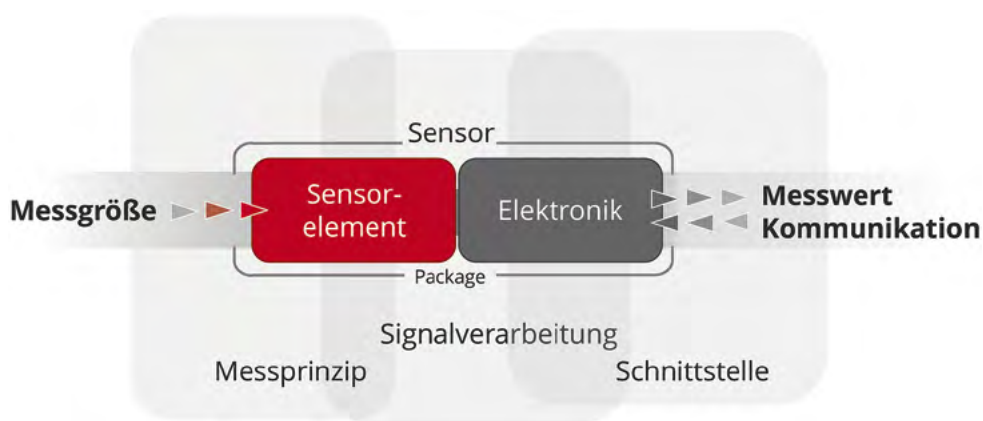


Abb. D1-1

Sensoren und Signalverarbeitung werden in unterschiedlichen Technologien integriert, wie sie in dieser Studie beschrieben werden (AMA Verband)

D 1.2 Spezifische Sensor-Technologieentwicklungen

Im Teil B dieser Studie werden ausgewählte Entwicklungstrends für Sensoren mit diversen Messgrößen ausführlich beschrieben und zwar in Kapitel:

- B 2.1 Elektromagnetische Messgrößen
- B 2.2 Mechanische Messgrößen
- B 2.3 Optische Messgrößen
- B 3 Chemische und medizinische Messgrößen

Sowie in Teil C für Sensorkomponenten und der sensornahen Datenverarbeitung und Kommunikation:

- C 2 Mikrosystemtechnik – MEMS
- C 3 Aufbau-, Verbindungs- und Integrationstechnik
- C 4 Sensor-Signalverarbeitung, -Kommunikation und Systemintegration

Besondere Beachtung finden zurzeit die Entwicklungen der magneto-resistiven Sensoren (Kapitel B 2.1.4), mit denen in miniaturisierter Bauweise berührungslos Magnetfelder, Positionen, Distanzen, Verschleiß in Maschinen und in Fahrzeugen gemessen werden kann.

Auch die berührungslose Drehmomentsensorik auf Basis von Magnetostriktion bietet interessante Potentiale für die Messtechnik (Kapitel B 2.2.4). Daraus ergeben sich neue Anwendungen, wie sie im Kapitel B 2.2.5 exemplarisch beschrieben sind für vorausschauende Wartung von Maschinen (Condition Monitoring) und für die Überwachung von Hochspannungsleitungen (Freileitungs-Monitoring) im Kapitel B 2.2.6.

In der bewegungsinduzierten Wirbelstromprüfung (MECT) für die zerstörungsfreie Materialprüfung werden neue Anwendungen erwartet (Kap. B 2.1.1). MECT ermöglicht die zerstörungsfreie Detektion von Anomalien oder Defekten in elektrisch leitfähigen, vorzugsweise nichtmagnetischen Materialien. Das Verfahren ist passiv, robust und überlastsicher; Sensor oder Prüfkörper können sich mit hoher Geschwindigkeit (mehrere m/s) bewegen. Die bisher im Labor erreichte Inspektionstiefe ist oftmals größer als die der konventionellen Wirbelstrom-Prüfverfahren.

Bei den Entwicklungen für die optischen Messgrößen ergeben sich interessante Entwicklungen, wie

- spektral angepasste LED-Beleuchtung,
- miniaturisierte und optimierte spektral korrigierte Optik mit bildseitiger Telezentrie,
- miniaturisiertes, energieeffizientes multispektrales Fabry-Pérot-Filter-Sensormodul mit sensornaher Datenverarbeitung,
- ganzheitlicher modellbasierter Datenverarbeitungsansatz für die Minimierung von zufälligen Messabweichungen und Kompensation von systematischen Messabweichungen, hervorgerufen durch Beleuchtung, Optik, multispektralem Fabry-Pérot-Filter-Sensormodul und additiven Rauschprozessen sowie die algorithmische Korrektur von geometrischen und spektrometrischen Unterabtastungen.
- Eine Neuentwicklung findet man in Richtung Hyperspektrale Messtechnik, bei der Farbinformationen und geometrische Informationen von hochempfindlichen Kamerasystemen miteinander intelligent verknüpft werden. (Kapitel B 2.3.1 und B 2.3.3).
- Auch ist das Potential der berührungslosen Temperaturmessung mittels Infrarotstrahlung noch lange nicht ausgeschöpft (Kapitel B 2.3.2).

Neue Chancen für unterschiedliche Gassensoren werden im Bereich der bedarfsgerechten Lüftung von Wohn- und Arbeitsräumen gesehen, wie im Kapitel B 3.1.5 beschrieben. Das Gebiet der medizinischen Sensoren wird durch die Miniaturisierung stark profitieren, es wird zur Weiterentwicklung von implantierbaren Sensoren und Aktoren und deren Verschmelzung kommen (Kapitel B 3.2). An interessanten Anwendungsfeldern von neuen Gassensoren kann die Branderkennung oder Gefahrstoff- bzw. Geruchsüberwachung genannt werden.

Die Sensortechnologien profitieren immer wieder von den Technologieentwicklungen in anderen Bereichen, wie von der Mikroelektronik bei den MEMS-Technologien und den Dünnschicht- und Dickschicht-Technologien. Dies ist ausführlich für den MEMS-Bereich – einer Technik zur Herstellung von Einzelsensoren und Kombi-Sensoren für Druck, Beschleunigung, Gassensoren und mehr – in Kapitel C 2 beschrieben.

Wie im Kap. C 3 verdeutlicht, bestimmen die Aufbautechnik, Kontaktierung und Kapselung von Sensorelementen maßgeblich die Zuverlässigkeit und die Kosten. Hier spielt die Leiterplattenintegration eine wesentliche Rolle (Kapitel C 3.1.3). Die Verkapselung von Sensoren und der zugehörigen Kontakte kann dabei durch unterschiedliche Mold-Techniken erfolgen.

Ein hermetischer Verschluss spezieller siliziumbasierter Sensoren kann durch Packaging auf Waferenebene erfolgen (Kapitel C 3.1.5). Auch die leiterplattenbasierte Integration von Sensoren Auswerteelektroniken wird weiter optimiert (Kapitel C 3.2.2).

Neue Chancen für Kostenreduktionen können sich auch aus der Integration von Sensorik, Elektronik und Leiterbahnen auf flexiblen Polymerfolien durch Drucktechniken ergeben, wie in Kapitel C 3.3 beschrieben ist.

Die Sensorelemente liefern nur Rohdaten, die dann weiter verarbeitet, aufbereitet, kombiniert und weitergeleitet werden. Dies führt zu intelligenten Sensoren, die ausführlich im Kapitel C 4 beschrieben sind. Dazu gehören Signalaufbereitung- und -digitalisierung, Einsatz von Microcontroller und DSP, diverse Peripheriebausteine und Datenspeicher (Kapitel C 4.2). Große Unterschiede gibt es in der dazu verwendeten Software (Kapitel C 4.2.3) den Betriebssystemen und der Kommunikation (Kapitel C 4.2.6). An Bedeutung gewinnen drahtlose energieautarke Sensorsysteme und Netzwerke und Energy Harvesting (Kapitel C 4.2.9).

Zur Verbesserung der Kosten-Nutzen-Relation werden Entwicklungen geleistet, um durch Selbstüberwachung der Sensorfunktionen und Störungstoleranz eine verlängerte Lebensdauer sowohl der Sensorkomponenten selbst, als auch der kritischer Bauteile zu erzielen, wie im Kapitel C 5 beschrieben ist.

Es ergeben sich interessante Möglichkeiten durch eine Erweiterung des Funktionsumfangs der sensorinternen Signalverarbeitung, wie unter anderem durch:

- Sensor-Selbstadaptierung, also optimale Anpassung von Messbereich und Arbeitsfrequenzbereich an die jeweiligen Messbedingungen.
- Korrektur von systematischen Sensor-Fehlern und Reduzierung zufälliger Fehler, z. B. durch Optimalfilter bzw. adaptive Filter.
- Sensor-Selbstkalibrierung, z. B. durch Erzeugung von Referenzgrößen zum Abgleich der Messkette.
- Umsetzung von Methoden und Verfahren zur Sensor-Fehlererkennung, -Fehlerdiagnose, -Rekonfigurierung und damit Sicherung von Sensor-Fehlertoleranz.

Dies wird am Beispiel von magnetischen Sensoren (Kapitel C 5.1.2) und selbstüberwachender Aktoren (Kapitel C 5.2) erläutert.

Die Sensorik befindet sich im stetigen Wandel. Das wird durch das Internet und seine Folgen sowie in jüngster Zeit durch die Nutzung mobiler Endgeräte (etwa autarke Sensoren, Smart Phones, Tablets usw.) forciert.

Auch daraus ergeben sich weitere Anforderungen an die Sensorik, die Chancen und Bedrohungen für die beteiligten Firmen darstellen. Wesentliche Änderungen erwartet man bei der

- Sensoreinbettung in die digitale Umwelt: Cyber Physical Systems (CPS, Kap. C 6),
- Integration in die Prozess- und Fertigungsautomatisierung,
- Umsetzung des „Internet der Dinge“, „Pervasive Sensing“ (allgegenwärtige Verfügbarkeit von Messdaten in Real-Zeit), Ethernet im Feld.

D 2 Kooperationen helfen

Die typischen Entwicklungs- und Fertigungsfelder für AMA-Firmen liegen bei Sensoren mit anspruchsvollen, auf konkrete Anwendungen angepassten Kennwerten, die oftmals in Kleinserien für anspruchsvolle Nischen, gefertigt werden. Außerdem erfordern diese industriellen Anwendungen die Gewährleistung von aufwendigen Schutz- und Sicherheitsanforderungen, die in ISO-Normen international vereinbart sind.

Ein wichtiges Mischfeld besteht in der Kooperation zwischen Messelementanbietern der Großserienprodukte sowie deren Bezug und weitere Konfektionierung durch diverse AMA-Firmen. Die in unterschiedlichen Fertigungsstufen gelieferten Messelemente, z. B. kapazitive und piezoresistive MEMS-Sensorelemente, werden durch die mittelständischen Firmen für spezielle Anwendungsfelder als Basis-Messelemente in komplexe Sensorkonstruktionen mit anspruchsvollem Packaging integriert.

Oftmals sehen Sensorfirmen aus ihren Kundenkontakten den Bedarf an verbesserten oder neuen Lösungen, sowohl am Sensorelement als auch in der Integration mit einer moderneren Datenverarbeitung oder Kommunikation, oder einem verbesserten Gehäuse.

Solche Neuentwicklungen oder Verbesserungen können entweder firmenintern gelöst werden, oder es werden kompetente Partner gesucht. Insbesondere bei strategisch längerfristig orientierten Technologieentwicklungen können Universitäts-, Hochschul- und sonstige Institutionen (wie Fraunhofer, Heinrich-Hertz, Hahn-Schickard-Ges. usw.) sowie unabhängige Dienstleister helfen. Ein Projekt kann entweder als Einzelprojekt – z. B. durch Beauftragung – oder als Gemeinschaftsprojekt mit gemeinsamen Interessen durchgeführt werden. Insbesondere bei letzterem ist auf sorgsames Vertragswerk zu achten.

Bei Gemeinschaftsprojekten kann Förderung durch die öffentliche Hand beantragt werden, etwa durch die Europäische Union, das Bundesforschungsministerium (sofern dies in spezifische Programme passt), oder durch Förderprogramme des Bundes-Wirtschaftsministeriums, bzw. der Länder-Wirtschaftsministerien. Es kann sich daher lohnen, sich frühzeitig entsprechend zu informieren. Bei Fördervorhaben ist es jedoch immer wichtig, den Zeitfaktor und die Kosten für die Antragstellung zu berücksichtigen.

Die im AMA Wissenschaftsrat zu findenden Institutionen zeichnen sich durch eine langjährige Erfahrung für Kooperationen bei industrienahen Entwicklungen aus. Diese können für die beteiligten Firmen direkt durchgeführt werden.

Bei den gemeinsamen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zwischen Industrie und Forschungsinstituten besteht noch der Vorteil, dass sich die beteiligten Experten gut kennenlernen.

D 3 Firmengründungen aus Forschungsinstituten

Immer wieder sind die beteiligten Entwickler von ihren Ideen und ihren Neuigkeiten so überzeugt, dass sie den Schritt in die Selbstständigkeit wagen und eine neue Firma gründen. In der Anfangsphase wird dies oft mit Unterstützung der Universität oder eines Instituts erfolgen.

Unsere Universitäten, Hochschulen für angewandte Wissenschaften, (Fachhochschulen) und Fraunhofer-Institute sind im Sensorbereich sehr praxisnah in ihren Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten.

Dies gilt insbesondere für die rund 60 Mitglieder des AMA-Wissenschaftsrats. So können wir Beispiele geben von über 30 Ausgründungen, die in den letzten Jahren den Sprung in die Selbstständigkeit wählten.

Auch die jährlich in Nürnberg stattfindende Messe SENSOR+TEST unterstützt junge innovative Unternehmen auf einem vom BMBF geförderten Gemeinschaftsstand. Da finden sich jeweils nahezu 10 junge, interessante Firmen jährlich. Typisch beginnen solche Firmen mit wenigen Mitarbeitern, wachsen aber häufig schnell und können innerhalb weniger Jahre auf zweistellige Mitarbeiterzahlen kommen.

In der Tabelle D1-1 sind Beispiele von jungen Firmengründungen aus den unterschiedlichen Institutionen gezeigt. Interessant sind auch die Produkte und Serviceleistungen, mit denen sich diese Firmen selbstständig gemacht haben. Dies soll zur Nachahmung und Weiterführung anregen.

Unternehmen, URL	Produkte/Service	Gegründet aus	Gründungsjahr
3S GmbH , Saarbrücken www.3s-ing.de	<i>Dichtigkeitsprüfung, Geruchsbewertung, Gasdetektion</i>	Universität des Saarlandes	2006
Art Guardian GmbH , Berlin artguardian.com	<i>Klimaüberwachung von Kunstwerken</i>	Fraunhofer IZM	2014
BestSens AG , Coburg www.bestsens.de	<i>Lagerüberwachung ISAT</i>	ISAT, Coburg	2012
Bentekk GmbH , Hamburg www.bentekk.com	<i>Mobile GC zur Vor-Ort-Schadstoff-Analytik</i>	TU Hamburg-Harburg	2014
CorTec GmbH , Freiburg www.cortec-neuro.com	<i>Elektroden für Neurowissenschaftliche Forschung</i>	-	2010
Endiio GmbH , Innsbruck www.ediio.com	<i>Anbieter einer Sensorplattform für IoT-Anwendungen</i>	Universität Freiburg	2015
EngineSens MotorSensor GmbH , Viernheim www.motorsensor.de	<i>Temperaturfühler, Abgassensoren</i>	-	2010
Evosense Research & Development GmbH , Darmstadt www.evosense.de	<i>Sensorik für Medizintechnik</i>	TU Darmstadt	2013
Fos4X, München www.fos4x.de	<i>Faseroptische Sensoren zur Überwachung, etwa von Rotorblättern von Windkraftanlagen</i>	TU München	2010
GAMPT mbH , Merseburg www.gampt.de	<i>Ultraschallgeräte- und Sensoren</i>	Martin-Luther-Universität, Halle-Wittenberg	1998
Ilmsens GmbH , Ilmenau www.ilmsens.com	<i>Mikrowellen-Bildgebung, Nahbereichs-Radar</i>	TU Ilmenau – EMT	2016
Innirion GmbH , Freiburg www.innirion.com	<i>Optische Messtechnik</i>	Universität Freiburg	2016
Isys Adaptive Solutions GmbH , Darmstadt www.adaptive-solutions.de	<i>Piezobasierte Materialprüftechnik</i>	Fraunhofer LBF	2007
Jobst Technologies GmbH , Freiburg www.jobst-technologies.com	<i>Bioanalytical Monitoring</i>	Universität Freiburg	2002
Microw GmbH , Oldenburg www.microw.de	<i>Auftragsmontage, Mikromontage, Mikromontageanlagen</i>	Universität Oldenburg, OF-FIS e.V.	2016
Multiphoton Optics GmbH , Würzburg www.multiphoton.net	<i>3D-Printing</i>	Fraunhofer ISC	2013
nano analytik GmbH , Ilmenau www.nanoanalytik.net	<i>AFM equipment, Cantilever</i>	TU Ilmenau	2010
Nanowired , Darmstadt www.nanowired.de	<i>Metallische Nanodrähte auf beliebigen Unterlagen</i>	TU Darmstadt, EMK	2015
NexWafe GmbH , Freiburg www.nextwafe.com	<i>Wafer für Photovoltaik</i>	Fraunhofer ISE	2015
ProNt GmbH , Dresden www.pront.de	<i>Aufgerichtete, einwandige Kohlenstoff-nanoröhren (VA-SWNTs)</i>	TU Dresden	2014
Retina Implant AG , Reutlingen www.retina-implant.de	<i>Augen-Implantate</i>	Universität Tübingen	2003
Scopis GmbH , Berlin www.scopis.com	<i>Chirurgische Navigationssysteme für Minimalinvasive Chirurgie</i>	Fraunhofer-IPK und Charité	2010
Sensation AG , Coburg www.sensation.de	<i>Liquid Sens</i>	ISAT, Coburg	2008
Smart Exergy WMS GmbH , Freiburg www.smartexergy.com	<i>Low Power Funktechnologie für Industrieüberwachungen</i>	Universität Freiburg	2012
Telocate GmbH , Freiburg www.telocate.de	<i>Infor Lokalisierung</i>	Universität Freiburg	2014
WiTech GmbH , Bielefeld www.witech-power.com	<i>Drahtlose Energieübertragung</i>	Fraunhofer ENAS-ASE	2012

Tab. D1-1

Zusammenstellung von Firmengründungen in Sensor- und Messtechnik aus unterschiedlichen Instituten

Teil E

Anhang

E Anhang

E 1 AMA Verband für Sensorik und Messtechnik e.V.

E 1.1 Der Verband

Der Verband entwickelte sich aus der 1980 gegründeten „**Arbeitsgemeinschaft Messwert-Aufnehmer**“ (AMA), einem Zusammenschluss von 14 kleinen und mittelgroßen Sensorfirmen.

Schon nach einem Jahrzehnt konnten 1990 rund 200 Mitglieder gezählt werden. Durch die Wiedervereinigung von West- und Ostdeutschland hatten sich viele Menschen neu orientiert, es wurden Firmen neu gegründet und Kooperationen gesucht, auch im Sensorgebiet. So wuchs von 1990 bis 1995 die Anzahl der AMA-Mitglieder um ca. 100 neue Mitglieder.

1992 erfolgte die Umbenennung in „AMA Fachverband für Sensorik e.V.“. Zur Berücksichtigung der Bedeutung der Messtechnik wurde der Verband 2013 umbenannt in „AMA Verband für Sensorik und Messtechnik e.V.“ (AMA Verband).

Im Zeitraum von 1995 bis 2010 wurde die 400 Mitglieder-Anzahl überschritten, und heute sind im AMA Verband rund 480 Mitglieder organisiert (Abb. E1-1), davon ca. 15% Institute.

Der AMA Verband ist anerkannt als Repräsentant der Sensorik- und Messtechnikbranche in Deutschland. Diese Branche ist sehr heterogen, bedingt durch die große Bandbreite der Anwendungen und Anforderungen. Dies hat Auswirkung auf Stückzahlen und Preise sowie die verwendeten Sensortechnologien, Verpackungen, elektrische und mechanische Schnittstellen (Kap. A 1).

Dennoch – oder gerade deshalb – ist die Branche sehr lebendig, es werden immer wieder neue Firmen gegründet, neue Materialien erforscht oder neue Technologien eingesetzt, Sensoren modifiziert und neue Anwendungen gefunden.

Daher finden wir im AMA Verband eine Vielzahl von kleinen und mittleren Unternehmen, wie im Bild E1-2 dargestellt. Im Mittel haben diese Firmen unter 150 Beschäftigte. Man erkennt, dass sie eine deutliche Mehrheit darstellen. Damit repräsentiert der Verband rund 50.000 Arbeitsplätze direkt, mit Ausstrahlung auf die gesamte Sensorik- und Messtechnik-Branche in Deutschland mit weit über 100.000 Arbeitsplätzen.

Heute versteht sich der AMA Verband als der Ansprechpartner für Sensorik und Messtechnik in Deutschland. Dazu kommen noch 24 Mitglieder aus der Schweiz, 10 aus Österreich und einige weitere Mitglieder aus anderen EU-Ländern.

Anzahl AMA Mitglieder

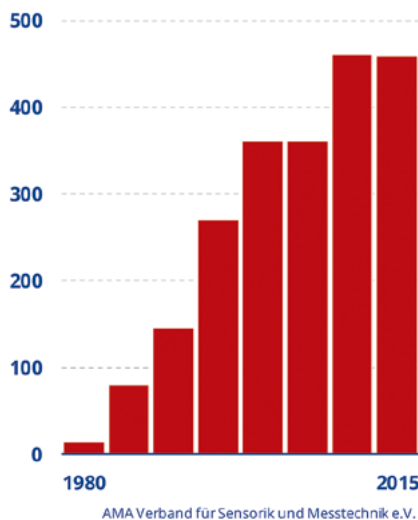


Abb. E1-1

Mitgliederentwicklung im AMA-Fachverband.

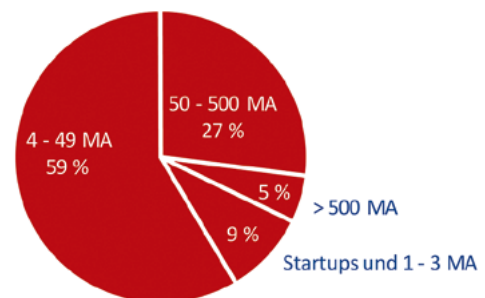


Abb. E1-2

Größenverteilung der AMA-Mitgliedsfirmen.

E 1.2 Marketing für die Sensorindustrie

Eine traditionelle AMA-Aktivität, insbesondere für die Industrie-Mitglieder, ist die jährlich stattfindende Fachmesse SENSOR+TEST in Nürnberg, die seit dem Jahre 2000 erfolgreich durch die Tochterfirma AMA Service GmbH ausgerichtet wird.

Hier können Sensorfirmen aus der ganzen Welt ihre Produkte und Serviceleistungen den Abnehmerindustrien in sehr kompakter Form anbieten. Typisch 500 bis 600 Firmen treffen sich dort mit 7.000 bis 10.000 hochkarätigen Besuchern.

Die SENSOR+TEST wird kombiniert mit den wissenschaftlichen AMA Kongressen „SENSOREN und Messsysteme“ – gemeinsam mit der GMA (VDI/VDE Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik), der ITG (Informationstechnische Gesellschaft im VDE) und der „ettc“ (European Test and Telemetry Conference). Zusätzlich wird auf der SENSOR+TEST jährlich ein Innovationspreis für besondere technologische Entwicklungen vergeben. Die Sieger dieses Wettbewerbs von 2010 bis heute sind im Kap. B 4 dargestellt.

Seit Ausschreibung des Preises wurden jährlich ungefähr 50 Bewerbungen zu innovativen Produkten eingereicht. Es beteiligen sich dabei viele junge Unternehmen, Start-Ups sowie Institute und Konsortien. Etwa ein Drittel der Bewerbungen kamen bisher aus dem Ausland.

Die Auswahl wird vom AMA-Wissenschaftsrat getroffen. Die Preisträger der letzten Jahre sind in dieser Studie mit vorgestellt worden (Kap. B 4).

Weitere AMA-Marketing-Veranstaltungen umfassen die Gemeinschaftsstände (AMA-Zentren) in wichtigen Messen im In- und Ausland, die Hannover Messe Industrie, SPS-IPC-Drives in Nürnberg und electronica in München sowie Beteiligungen an Messen in China (Shanghai) und in Indien (Mumbai).

Regelmäßig wird das „AMA Branchenverzeichnis“ herausgegeben. Dieses Verzeichnis dient als Berater, in dem die vielfältigen Produkte und Dienstleistungen der Mitglieder dargestellt sind. Es besteht aus insgesamt rund 1.000 Klassifizierungen, deren Schema in der Abb. E 1.3 dargestellt ist. Damit sind rund 10.000 Zuordnungen zwischen den einzelnen Angebots-Kategorien und den Mitgliedsunternehmen und -Instituten in deutscher und in englischer Sprache recherchierbar. Damit ist es ein wertvolles Werkzeug, das in Papier und als Datenbank auf der AMA-Website unter <http://www.ama-sensorik.de> verfügbar ist.

Die über 300 Sensorikanbieter im AMA Verband offerieren viele unterschiedliche Sensoren. Dabei werden insbesondere Sensoren für thermische und kalorische Messgrößen von rund zwei Drittel aller Firmen angeboten, gefolgt von den dynamischen Messgrößen, klimatischen und danach die eher klassischen mechanischen und geometrischen Messgrößen. Diese Verteilung ist für die 10 wesentlichen Messgrößen-Familien in Abb. E.1-4 zusammengestellt.

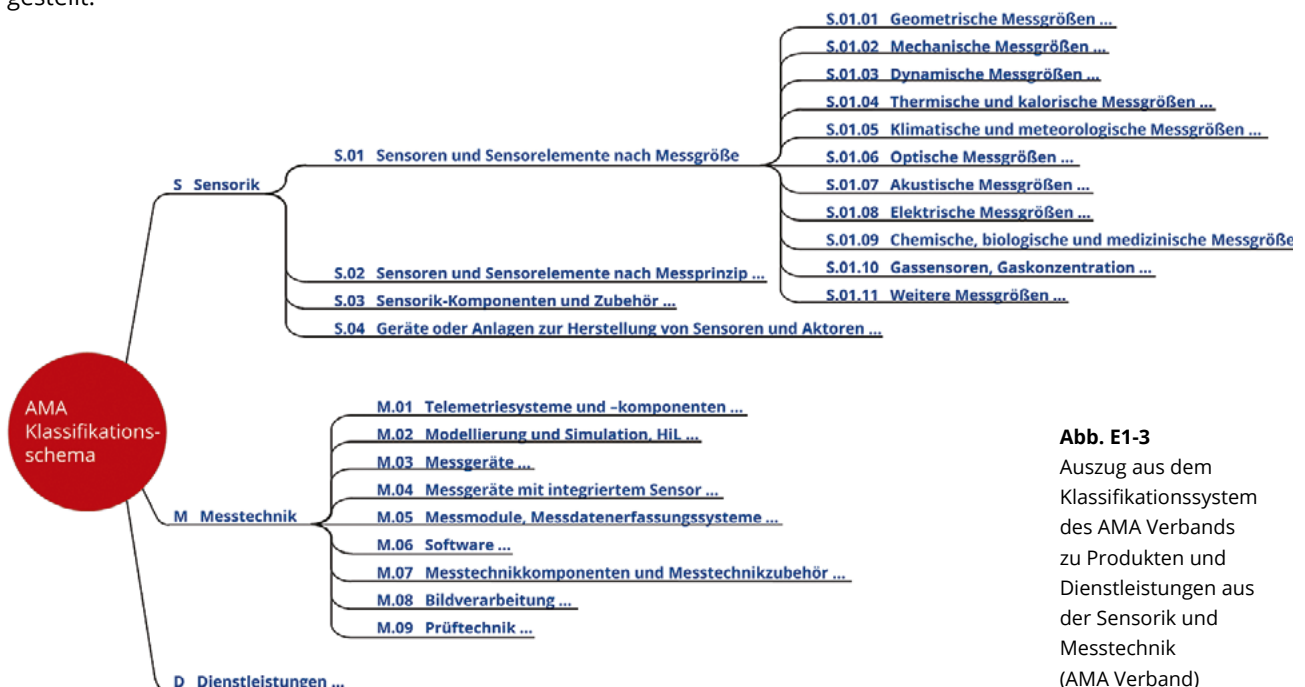
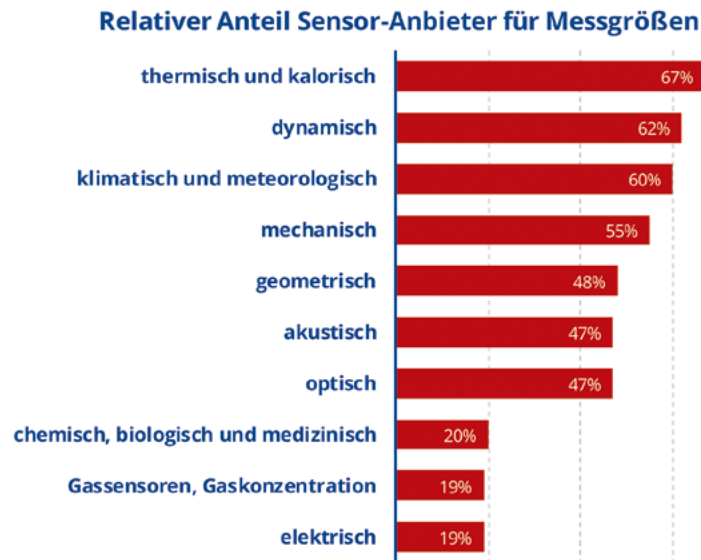


Abb. E1-3
Auszug aus dem Klassifikationssystem des AMA Verbands zu Produkten und Dienstleistungen aus der Sensorik und Messtechnik (AMA Verband)

Abb. E1-4
Auszug aus dem
Klassifikationssystem
des AMA Verbands zu
Sensor-Angeboten für
die verschiedenen
Messgrößen (AMA
Verband)



E 1.3 Technologie-Unterstützung

Rund 60 forschende Institute aus Universitäten und Fachhochschulen sowie Fraunhofer-Institute sind AMA – Mitglieder. Diese haben sich seit 1998 im AMA Wissenschaftsrat zusammengefunden. Dieses Gremium hat auch eine erste Studie „Sensor Trends 2014“ erstellt und die jetzige Studie „Sensor Technologien 2022“ initiiert. Damit soll den vielen KMUs ein Leitfaden an die Hand gegeben werden, um die zukünftigen technischen Trends besser zu überblicken.

Darüber hinaus sehen es die Mitglieder des Wissenschaftsrats als ihre Aufgabe, die notwendigen neuen Technologien, teilweise mit Industriebeteiligung, zu entwickeln und zwar auch im wissenschaftlichen Vorfeld. In beiden Fällen sollen diese Ergebnisse schnell und erfolgreich in die Industrie transferiert werden. Die hier aktiven Fachleute stehen für Gespräche gerne zur Verfügung, um über Technologien, Transfer von Wissen und gegebenenfalls über öffentliche Förderung solcher Maßnahmen zu sprechen.

Die AMA Weiterbildung bietet Technologie-Seminare und Thementage mit Schwerpunkten aus der Sensorik und Messtechnik an. Die AMA-Mitglieder haben sich zusätzlich in Arbeitskreisen mit folgenden Prioritäten organisiert:

- Internationale Aktivitäten
- Marketing und Vertrieb
- Temperatur
- Weiterbildung
- Industrie 4.0, und
- dem Wissenschaftsrat.

E 1.4 Wirtschaftliche Bedeutung der Sensorindustrie

Die im AMA Verband organisierten mehr als 400 überwiegend mittelständisch geprägten Unternehmen repräsentieren rund 100.000 Arbeitsplätze, die einen direkten Umsatz von rund 10 Milliarden Euro erwirtschaften. Die Sensorik erweist sich als Schlüsseltechnologie für die Konkurrenzfähigkeit von vielen Produkten, deren Marktwert durchaus um einige Größenordnungen über dem der eingesetzten Sensorsystemen liegen (Maschinen, Anlagen, Fahrzeuge usw.). Damit wird die Konkurrenzfähigkeit der deutschen Wirtschaft durch die technischen Fähigkeiten der Sensorik stark beeinflusst.

Der AMA-Verband führt bei seinen Mitgliedern eine jährliche Umfrage zu Umsatz, Exportdaten, Arbeitsplätzen und Investitionen durch. In Abb. E1-5 wird die Umsatzsteigerung der Mitglieder dargestellt. Im Mittel konnte in den letzten Jahren ein jährliches Umsatzwachstum von etwa 7 % beobachtet werden.

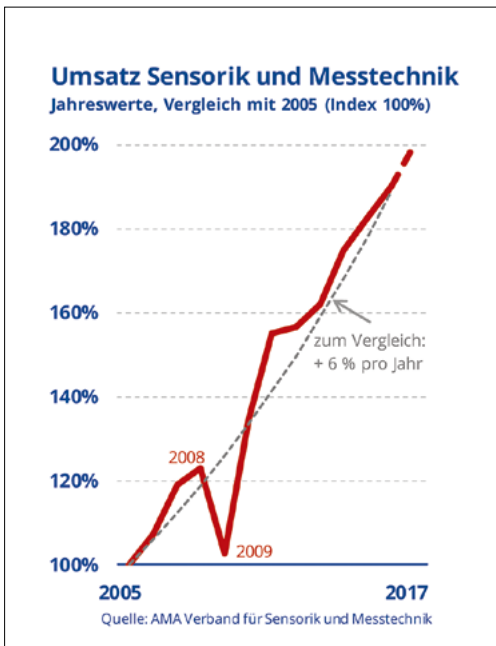


Abb. E1-5
Umsatzwachstum der AMA Mitglieder
(AMA Verband)

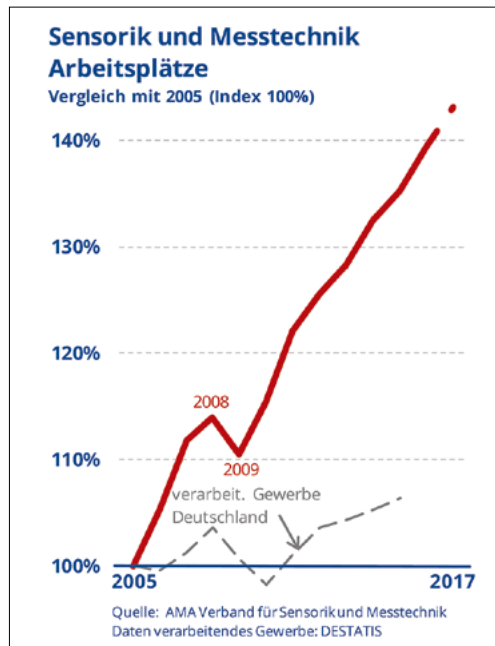


Abb. E1-6
Wachstum der Mitarbeiterzahlen der
AMA Mitglieder (AMA Verband)

Der regelmäßig gesteigerte Umsatz bewirkt ein kontinuierliches Wachstum der Mitarbeiterzahlen, die im vergleichbaren Zeitraum um etwa 40 % anstiegen. Besonders hervorzuheben ist der außerordentlich positive Beitrag bei der Schaffung und Bereitstellung von anspruchsvollen Arbeitsplätzen für Facharbeiter und Ingenieure.

In Abb. E1-6 ist der relativ starke Zuwachs von Sensorfirmen im Vergleich mit den Zahlen des allgemeinen verarbeitenden Gewerbes dargestellt. Die Sensorik-Branche wächst also auch in schwierigen Zeiten, in denen andere Industrien abbauen. Dies zeigt die Bedeutung der Aus- und Weiterbildung von Fachleuten auf diesem Hochtechnologie-Gebiet.

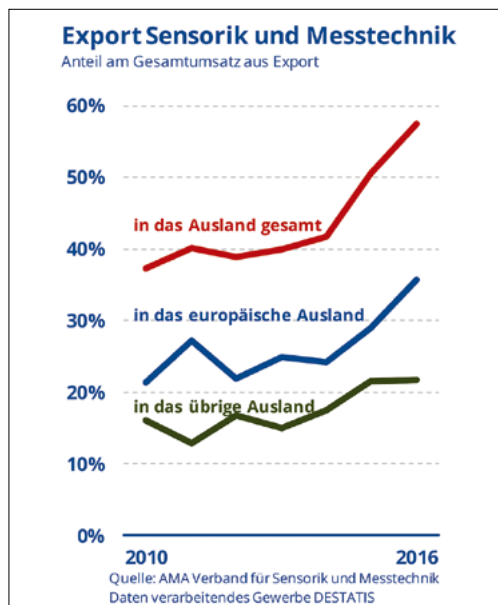


Abb. E1-7
Quote direkter Exporte
der deutschen Sensorik-
und Messtechnik-
Industrie (AMA Verband)

Sensorsysteme aus deutscher Produktion wurden von 2005 bis 2016 im Mittel zu über 40 % direkt exportiert, wie man in Abb. E1-7 erkennt. Die Quote direkter Exporte stieg bereits um 2008 auf nahezu 50 %, mit durch die Wirtschaftskrise bewirktem Abfall bis ca. 2010 auf unter 40 %. In den darauf folgenden Jahren wurde ein Anstieg auf über 50 % in 2015 erzielt. Davon wurden 29 % in das europäische Ausland und über 20 % ins nichteuropäische Ausland exportiert.

Die Autoren



Technische Universität Dresden

Institut für Aufbau- und
Verbindungstechnik

Fachgebiet Aufbau- und
Verbindungstechnik der Elektronik

Mommsenstraße 15
01069 Dresden

www.avt.et.tu-dresden.de

Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Karlheinz Bock

Karlheinz Bock studierte ab 1979 Allgemeine Elektrotechnik an der Universität des Saarlandes. Nach Abschluss seines Studiums 1986 und nach Industrietätigkeit als Systemanalysator bei Kappmeyer & Partner wechselte er 1989 an das Institut für Hochfrequenztechnik der TU Darmstadt und forschte auf dem Gebiet der hochfrequenten integrierten Schaltungen und deren Zuverlässigkeit bei Professor Hans Hartnagel. Im Jahr 1994 promovierte er auf dem Gebiet der feldemissionsbasierten ESD Schutzschaltungen für GaAs-Bauelemente und deren integrierte Mikrowellenschaltungen.

Nach Aufhalten in Japan an der Tohoku Universität in Sendai und am IMEC in Leuven, Belgien arbeitete er seit 1999 bei der Fraunhofer Gesellschaft; seit 2001 am Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration – (IZM) in München (seit 2010 EMFT) als Leiter der Abteilung Polytronik und Multifunktionale Systeme an der Entwicklung von dünnen und flexiblen Systemen und an Technologien für chemische und biologische Sensoren und bioanalytische Systeme. Seit März 2008 bis September 2014 war er parallel auch als Professor für Polytronische Mikrosysteme an der TU Berlin berufen. Ihm wurde im Jahr 2012 der Ehrendoktor der Polytechnische Universität von Bukarest in Rumänien verliehen. Seit Oktober 2014 dient er als Professor für Aufbau- und Verbindungstechnik der Elektronik und Direktor des Instituts für Aufbau- und Verbindungstechnik (IAVT) an der TU Dresden.



M. Eng. Paul-Gerald Dittrich

SpectroNet – International Collaboration Cluster

c/o Technologie- und
Innovationspark Jena GmbH

Wildenbruchstraße 15
07745 Jena

www.spectronet.de

Paul-Gerald Dittrich erlernte den Beruf des technischen Assistenten für Automatisierungs- und Computertechnik am Staatlichen Berufsbildenden Schulzentrum Jena-Göschwitz. Im Anschluss absolvierte er seinen Zivildienst am Universitätsklinikum Jena. Von 2009 bis 2013 studierte er im Bachelorstudiengang Elektrotechnik und Automatisierungstechnik an der Ernst-Abbe-Hochschule Jena. Von 2013 bis 2014 studierte er ebenfalls an der Ernst-Abbe-Hochschule Jena im Masterstudiengang Systemdesign mit der Spezialisierungsrichtung Photonische Sensorik. Seit 2015 ist Paul-Gerald Dittrich Promotionsstudent und wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Technischen Universität Ilmenau. Seit 2008 begleitet Paul-Gerald Dittrich das Clustermanagementprojekt „SpectroNet“ als Clustermanager jr.



Dr. Klaus Ettrich

CiS Forschungsinstitut für Mikrosensorik GmbH

Konrad-Zuse-Straße 14
99099 Erfurt

www.cismst.org

Klaus Ettrich studierte ab 1988 Physik an der Friedrich-Schiller-Universität Jena. Forschung über Wechselwirkung von UV-Laserstrahlung mit Materie sowie Laser-materialbearbeitung, Promotion 1997 am Institut für Optik und Quantenelektronik.

Es folgte ein Traineeprogramm bei der Jenoptik AG, dann 1999 ein Wechsel zu Jenoptik Bioinstruments GmbH, der späteren CyBio AG.

Seit 2008 ist Klaus Ettrich als Geschäftsfeldleiter am CiS Forschungsinstitut für Mikrosensorik in Erfurt für Projekte mit industriellen Kunden verantwortlich, bis zum Jahr 2013 im Bereich Photovoltaik und seit 2014 im Bereich MEMS.



Verena Graf

NCTE AG

Inselkammerstraße 4
82008 Unterhaching

www.ncte.de

Frau Verena Graf leitet seit 2015 als Alleinvorständin das dynamisch wachsende Unternehmen NCTE AG. Sie setzt ihre langjährige Erfahrung als Entwicklungs- und Produktionsleiterin in High Tech-Unternehmen für die Implementierung modernster Industrie- und Produktionsstandards am Standort Unterhaching bei gleichzeitiger Skalierung des Geschäfts ein. Innovation und Wirtschaftlichkeit sind für die engagierte Ingenieurin untrennbar miteinander verbunden. Mit ihrem Team macht sie die NCTE 2016 bereit für einen Produktionsanstieg von über 200 Prozent, die Einführung der NCTE-Sensoren in weiteren Märkten und die weitere Internationalisierung des Geschäfts.

Koautorin: Ulrike Schramm, Public Relations, NCTE AG



Fraunhofer Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration IZM

Abteilung RF und Smart Sensor Systems

Gustav-Meyer-Allee 25
13355 Berlin

www.izm.fraunhofer.de

Dr.-Ing. Volker Großer

Volker Großer studierte ab 1974 an der Technischen Universität Chemnitz, Fakultät Maschinenbau, Montage und Fügetechnik. 1982 Promotion auf dem Gebiet Löttechnik. Von 1982 bis 1993 war er Labor- und Forschungsgruppenleiter Lasermesstechnik am Institut für Mechanik der Akademie der Wissenschaften in Chemnitz.

Seit 1993 arbeitet Dr. Großer am Fraunhofer Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration in Berlin als Gruppenleiter Package Design and Characterization und ist als Projektkoordinator wissenschaftlicher Projekte und von Industrietransferprojekten tätig. Seine fachlichen Schwerpunkte sind Produkt Design für die Entwicklung und Systemintegration von spektral-optischen Handmessgeräten. In den letzten Jahren spezialisierte er sich auf miniaturisierte autarke Funksensoren und deren Einbindung in Sensor- und IT-Netzwerke. Seit 2016 ist er als Senior Scientist am IZM tätig.



AMA Verband für Sensorik und Messtechnik e.V.

Sophie-Charlotten-Straße 15
14059 Berlin

www.ama-sensorik.de

Dr.-Ing. Hans-Dieter Hartmann

Ausbildung und berufliche Tätigkeit als Schriftsetzer, dann Hochschulreife auf dem Zweiten Bildungsweg. Studium der Physik an der TU Hannover (TUH, heute Leibniz Universität). Nach dem Diplom 1983 arbeitete er an Blitzschutzmessungen an CFK-Flugzeugteilen, bevor er 1985 zum Institut für Halbleitertechnologie der TUH wechselte. Im industrienahen Großprojekt „Redundante Strukturen für Signalprozessoren“ untersuchte er die Prozess-, Ausbeute- und Ausfallstatistik vertikaler, Nd:YG-Laser formierter Kontakte in mikroelektronischen Standard-Zweilagmetallisierungen.

Er promovierte 1993 und übernahm bei der SICAN F&E GmbH die Position eines Gruppenleiters, ab 1998 bei der SICAN GmbH. 2000 wurde er bei der sci-worx GmbH System-Architekt für Mixed-Signal-Schaltkreise und Automotive Systems, 2004 für Sub-Module eines Multistandard-Videodecoder-Chips. 2007 wurde er bei der Silicon Image GmbH IP-Architekt für HDMI-Bausteine. Das Unternehmen wurde im Zuge der Wirtschaftskrise 2008/9 im Juni 2010 geschlossen. Hans-Dieter Hartmann leitete diverse Entwicklungsprojekte mit Bezug zur Automobil- und Zulieferindustrie und direktem oder indirektem Bezug zur Sensorik.

Weiter war er 1996 bis 2004 Projektmanager des „Forum Bordnetzarchitektur“ (Stichwort: 42V Bordnetz), von 1998 - 2000 der vom VDA finanzierten „AG Normung“ (Resultat: ISO 21848, 2005), von 2000 - 2002 der vom VDA unterstützten „AG Kurzschlusschutz“ (14/42-V-Bordnetz, Annex zu 21848).

Von Oktober 2012 bis Mai 2015 war er bei der AMA-Weiterbildung gGmbH beschäftigt, seitdem arbeitet er für den AMA-Verband.



Dipl.-Ing. Frank Hänschke

Leibniz-Institut für Photonische Technologien

Abteilung Quantendetektion

Albert-Einstein-Straße 9
07745 Jena

www.leibniz-ipht.de

Frank Hänschke studierte Maschinenbau an der Technischen Universität Ilmenau und schloss sein Studium 2008 mit dem Diplom ab. Seit 2008 ist er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Leibniz-Institut für Photonische Technologien e.V. (IPHT) auf dem Gebiet der thermoelektrischen Strahlungsempfänger tätig. 2009 wurde er mit der Leitung der angeschlossenen Musterfertigung von Thermoelektrischen Dünnschichtsensoren betraut.

Seit 2015 leitet er zusammen mit Herrn Dr. Gabriel Zieger die Arbeitsgruppe Integrierte Thermoelektrische und Mikromechanische Technologien der Abteilung Quantendetektion. Hauptgebiet des Teams ist die Erforschung und Entwicklung von thermoelektrischen Sensoren, angefangen von der Grundlagenforschung auf Materialebene über die anwendungsspezifische Sensortechnologieentwicklung bis zum fertigen Sensor.



Prof. Dr.-Ing. Klaus-Peter Hoffmann

Hauptabteilung Biomedizintechnik Fraunhofer-Institut für Biomedizinische Technik (IBMT)

Hauptabteilung Biomedizintechnik

Joseph-von-Fraunhofer-Weg 1
6280 Sulzbach

www.ibmt.fraunhofer.de

Professor Dr.-Ing. Klaus-Peter Hoffmann ist Leiter der Hauptabteilung Biomedizintechnik und des Geschäftsfeldes Theranostik am Fraunhofer Institut für Biomedizinische Technik (IBMT) in St. Ingbert. Er ist Gründungsprofessor für Biomedizinische Technik an der htw saar in Saarbrücken.

Zu seinen Forschungsgebieten gehören Geräte und Methoden für die Klinische Neurophysiologie, einschließlich Intraoperatives Neuromonitoring, sowie der Einsatz von Mikrosystemen und implantierbaren Assistenzsystemen in der Medizin. Dabei stehen insbesondere Sensoren und Aktuatoren für die Neuroprothetik und für verteilte intelligente Systemen im Fokus. Schwerpunkte stellen die technologischen Prozesse der Entwicklung und Fertigung von Mensch-Maschine Schnittstellen aber auch die Lösung von methodischen Fragen dar.

Professor Hoffmann koordinierte verschiedene europäische und nationale Forschungsprojekte, veröffentlichte über 250 Publikationen, Konferenzbeiträge und Buchartikel. Er ist Mitherausgeber des Springer Handbook of Medical Technology, leitet den Fachausschuss Implantierbare Assistenzsysteme und ist Mitglied im Beirat der DGBMT sowie im Technical Committee on Cardiopulmonary Systems der IEEE EMBS



Prof. Dr.-Ing. habil. Dietrich Hofmann

SpectroNet – International Collaboration Cluster

c/o Technologie- und
Innovationspark Jena GmbH

Wildenbruchstraße 15
07745 Jena

www.spectronet.de

Dietrich Hofmann erlernte den Beruf eines Feinmechanikers am Technisch Physikalischen Institut der Friedrich-Schiller-Universität Jena und bei Carl Zeiss Jena. Anschließend studierte er elektrischen und mechanischen Feingerätebau an der Technischen Hochschule Dresden. Nach Abschluss seines Studiums wechselte er an die Leningrader Elektrotechnische Hochschule LETI im heutigen St. Petersburg und forschte auf dem Gebiet der dynamischen Korrektur von trägen Industriethermometern. 1960-1964 Promotion zum Thema „Dynamische Korrektur träger Sensoren“. 1965-1969 Arbeitsleiter an der Deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, Zentralinstitut für Technische Kybernetik Dresden. 1969 Habilitation zum Thema „Untersuchungen der dynamischen Messfehler von Industriethermometern für unterschiedliche Betriebsbedingungen“.

1970-1993 ordentlicher Professor für das Fachgebiet Prüftechnik an die Sektion Technologie der Friedrich-Schiller-Universität Jena. 1993 bis 1998 Direktor des Centrums für intelligente Sensorik CiS, jetzt Forschungsinstitut für Mikrosensorik in Erfurt. 1998 bis 2005 organisierte Dietrich Hofmann innovative Managementprojekte zur Vernetzung von Messtechnik und Qualitätssicherung für Forschungseinrichtungen und Industrie. Im Jahre 2005 startete er das Clustermanagementprojekt „SpectroNet“, das heute eines der führenden global arbeitenden Cluster für photonische Messtechnik und Qualitätssicherung ist. Parallel ist Dietrich Hofmann seit 1991 Leiter des Steinbeis Transferzentrums für Qualitätssicherung & Qualitätsmesstechnik. Darüber hinaus absolvierte er mehrere Gastprofessuren in Finnland und Japan.



**CiS Forschungsinstitut
für Mikrosensorik GmbH**

Konrad-Zuse-Straße 14
99099 Erfurt

www.cismst.org

Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Ortlepp

Nach einer Berufsausbildung zum Industriemechaniker studierte Thomas Ortlepp an der Technischen Universität Ilmenau ab 1993 Mathematik mit Nebenfach Technische Informatik. Nach seinem Abschluss wechselte er dort 1999 an das Institut für Theoretische Elektrotechnik und schloss 2004 seine Promotion auf dem Gebiet der energieeffizienten Mikroelektronik ab. Im Anschluss wechselte er in den Bereich Tieftemperaturphysik an die Universität Twente in Holland. Im Jahr 2010 schloss er seine Habilitation auf dem Gebiet Mikroelektronik an der TU Ilmenau ab.

Im Jahr 2011 wechselte er an die University California in Berkeley, USA und leitete ein Industrieprojekt zur Entwicklung von hybriden Hochleistungsspeichern für Supercomputer. Im Jahr 2013 wechselte Thomas Ortlepp an das CiS Forschungsinstitut für Mikrosensorik GmbH. Darüber hinaus ist er seit 2013 Privatdozent an der Technischen Universität Ilmenau am Lehrstuhl für Mikro-Nano-Elektronik. Im Jahr 2015 wurde Thomas Ortlepp zum Distinguished Professor an der Yokohama National University in Japan berufen. Am Institute of Advanced Science leitet er den Lehrstuhl für extrem energieeffiziente Mikroelektronik und hochempfindliche Sensorik. Seit Oktober 2015 ist Thomas Ortlepp Geschäftsführer am CiS Forschungsinstitut für Mikrosensorik GmbH in Erfurt.



Universität des Saarlandes NT Fakultät

Fachrichtung Systems Engineering
Lehrstuhl für Messtechnik

Postfach 15 11 50
66041 Saarbrücken

www.lmt.uni-saarland.de

Prof. Dr. rer. nat. Andreas Schütze

Andreas Schütze studierte Physik an der RWTH Aachen und promovierte 1994 an der Justus-Liebig-Universität Gießen in der angewandten Physik im Bereich Gasesstechnik in Zusammenarbeit mit einem mittelständischen Unternehmen. Nach der Promotion war er als wissenschaftlicher Mitarbeiter der VDI/VDE-IT in Teltow im Bereich Projektträgerschaft speziell in der Mikrosystemtechnik sowie für technologie-orientierte Unternehmensgründungen und im nationalen sowie internationalen Technologietransfer sowie Netzwerkaktivitäten tätig.

1998 wurde Andreas Schütze als Professor an die Fachhochschule Niederrhein, Lehrgebiet Sensorik und Mikrosystemtechnik berufen. Seit 2000 leitet er an der Universität des Saarlandes den Lehrstuhl für Messtechnik in der Fachrichtung Mechatronik. Seine Forschungsschwerpunkte sind intelligente Sensorsysteme zur Messung chemischer Größen, sowohl für die Gasphase als auch in Flüssigkeiten sowie Sensordatenfusion für industrielle Prozesse. Hauptanwendungsfelder sind die Sicherheitstechnik, erneuerbare Energien/Energieeffizienz sowie das Condition Monitoring mechatronischer Systeme.

Herr Schütze ist Mitglied von AMA, VDE, fms und IEEE sowie des AHMT. Er engagiert sich neben seiner Forschungstätigkeit auch in der Nachwuchsförderung, u.a. mit dem Schülerlabor SinnTec und dem Schülerforschungszentrum Saarlouis.



**AMA Verband für Sensorik
und Messtechnik e.V.**

Sophie-Charlotten-Straße 15
14059 Berlin

www.ama-sensorik.de

Dr. rer. nat. C. Thomas Simmons

Dr. Simmons ist promovierter Physiker und Geschäftsführer des AMA Verbands für Sensorik und Messtechnik e.V. in Berlin. AMA ist das führende Netzwerk und die Interessenvertretung der Branche Sensorik und Messtechnik, mit derzeit rund 480 Mitgliedsunternehmen und -Instituten.

Nach dem Physikstudium an der University of Texas at Austin und an der Freien Universität Berlin promovierte Dr. Simmons an der FU Berlin über ein Thema aus der experimentellen Festkörperphysik.

Bevor er zu AMA kam, hielt Dr. Simmons unter anderem Positionen als Dozent an der Beuth Hochschule für Technik Berlin, wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft, Vorstandsvorsitzender der Novaville AG und als Direktor Business Development der Aktiv Sensor GmbH.



**AMA Verband für Sensorik
und Messtechnik e.V.**

Sophie-Charlotten-Straße 15
14059 Berlin

www.ama-sensorik.de

Dr.-Ing. Wolfgang Sinn

Nach der Berufsausbildung zum Elektromonteur im Kalibergbau und dem Fachschulabschluss zum Ingenieur für Elektronik in Eisleben studierte Wolfgang Sinn von 1973 bis 1977 Informationstechnik und theoretische Elektrotechnik an der Technischen Hochschule Ilmenau. Seine Doktorarbeit behandelte die Thematik Datenübertragungssysteme mit Basisbandsignalen, die er 1984 abschloss.

Von 1971 bis 1990 forschte er im Kombinat Robotron auf dem Gebiet der Informations- und Kommunikationstechnik. Zahlreiche Patente führten zu einer neuen Generation leistungsfähiger Produkte bei der Computervernetzung.

In den Jahren 1991 bis 2001 eignete er sich als Manager Strategic Alliances bei Ericsson umfangreiche internationale Erfahrungen bei der Etablierung neuer Technologien und Dienste in mobilen Kommunikationsnetzen an. Von 2002 bis 2013 war er als Leiter Strategisches Marketing und Business Development am Institut für Mikroelektronik und Mechatronik-Systeme in Ilmenau tätig. Projekte zu Sensornetzwerken bildeten die Basis für neue Anwendungsfelder in der Wirtschaft.

Dr. Sinn ist Mitglied von Expertengruppen zu den Zukunftsthemen Cyber-physical Systems, Internet of Things, Industrie 4.0, Smart Cities, Satellitennavigation und Neue Geschäftsmodelle.



Dr. Rolf Slatter

Sensitec GmbH

Georg-Ohm-Straße 11
35633 Lahnau

www.sensitec.com

Rolf Slatter studierte von 1981 bis 1985 Maschinenbau am Imperial College in London. 1990 promovierte er dort mit einer Doktorarbeit zum Thema „A Human-Centred Approach to Computer-Integrated Manufacturing“. Von 1988 bis 2006 war er beim Getriebehersteller Harmonic Drive AG in Limburg in verschiedenen leitenden Positionen tätig, zuletzt als Vorstand Marketing & Vertrieb sowie als Geschäftsführer der Tochterfirma Micromotion GmbH in Mainz. In 2007 wechselte er als CTO zur Sensitec GmbH. Der Sensorhersteller verfügt über zwei Standorte in Lahnau und Mainz und entwickelt magnetoresistive Sensoren, die u. a. in der Industrieautomation, dem Automotive-Sektor, der Medizintechnik und der Luft- und Raumfahrt zum Einsatz kommen. Hier zeichnete er verantwortlich für die Bereiche Produktion, Entwicklung und Produktmanagement. Seit 2009 ist er Geschäftsführer bei Sensitec.

Sensitec engagiert sich sehr aktiv in diversen Forschungs- und BMBF-Projekten auf dem Gebiet der Mikrosensorik. Seit 2009 ist Rolf Slatter stellvertretender Vorsitzender des MST-Netzwerks Rhein-Main und seit 2012 Vorstandsvorsitzender von INNOMAG e.V., der Innovationsplattform für magnetische Mikrosysteme. 2014 wurde er in den Rat der Technologie in Rheinland-Pfalz berufen, dessen zentrale Aufgabe darin besteht, den Austausch von Ideen in allen Forschungs-, Technologie- und Innovationsfragen zu fördern.

Koautoren sind Rene Buß und Harry Knöller, Produktmanagement bei Sensitec.



Prof. Dr.-Ing. habil. Hannes Töpfer

IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gGmbH

Themenbereich System Design

Ehrenbergstraße 27
D-98693 Ilmenau

www.imms.de

Hannes Töpfer studierte von 1984 bis 1989 an der TH Ilmenau, arbeitete danach als Forschungsstudent und wissenschaftlicher Mitarbeiter an der TH / TU Ilmenau mit dem Schwerpunkt des Entwurfs hochempfindlicher Magnetfeldsensoren und promovierte 1996 zu diesem Thema. Im Anschluss widmete er sich im Rahmen einer wissenschaftlichen Assistenz der Aufbereitung der Entwurfsgrundlagen für eine Hochgeschwindigkeits-Digitalschaltungstechnik mit sehr geringem Verlustleistungsumsatz auf der Basis supraleitender Materialien (Habilitation dazu 2003). Forschungsreisen führten ihn an Labore und Institute in Deutschland, Japan, Schweden und Frankreich, wo er vor Ort zum Entwurf von Sensoren, elektronischen Bauelementen und Schaltungen beitrug.

Seit 2002 arbeitet er im IMMS (Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH) Ilmenau, wo er von 2004 bis 2009 den Themenbereich „System Design“ leitete. Schwerpunkte der industrienahen Forschung dort waren die Entwicklung komplexer eingebetteter Systeme zum Einsatz zur Sensorsignalverarbeitung und Aktorsteuerung. Hannes Töpfer wurde 2009 an der TU Ilmenau zum Universitätsprofessor für das Fachgebiet „Theoretische Elektrotechnik“ ernannt, wo das Gebiet der elektromagnetischen Sensorik einen Forschungsschwerpunkt darstellt.



sgt Sensorberatung
Dr. Guido Tschulena

Reichenberger Straße 5
61273 Wehrheim

www.sgt-sensor.de

Dr. phil. Guido Tschulena

Dr. Tschulena studierte Halbleiterphysik an der Universität Wien, Österreich, zusammen mit Philosophie und Psychologie. Er promovierte am Boltzmann-Institut für Festkörperphysik in Wien mit einer Dissertation über „Abweichungen vom Ohmschen Gesetz in Silizium Germanium“ im Jahr 1971. Danach folgten Entwicklungsaktivitäten über Festkörpersensoren (optische, für Kernstrahlung, Infrarot, Gase) am Battelle-Institut in Frankfurt am Main, zuletzt als Wissenschaftlicher Leiter Sensortechnik, wo auch weltweite technische und Marktstudien zur Sensorik durchgeführt wurden.

Ab 1993 selbstständig in sgt Sensorberatung mit technisch-wirtschaftlicher Beratung sowie mit europäischen und lokalen Netzwerkaktivitäten. Seit etwa 2010 zusätzlich Redakteur der technischen Zeitschrift SENSOR MAGAZIN.



Technische Universität Darmstadt

Institut für Elektromechanische
Konstruktionen EMK

Merckstraße 25
64289 Darmstadt

www.emk.tu-darmstadt.de

Prof. Dr.-Ing. habil. Roland Werthschützky

Roland Werthschützky studierte ab 1968 Regelungstechnik an der TU Dresden. Nach Abschluss seines Studiums wechselte er dort 1972 an das Institut für Technische Akustik und forschte auf dem Gebiet der elektromechanischen Sensoren für Kraft und Druck bei Professor Arno Lenk. Im Jahr 1976 promovierte er auf dem Gebiet der Kraftmesstechnik und 1982 wurde er auf dem Gebiet der piezoresistiven Silizium-Drucksensoren habilitiert.

Seine Industrietätigkeit führte er im Zeitraum 1981 bis 1992 im VEB Geräte- und Reglerwerk Teltow durch. In verschiedenen Leitungspositionen war er an der Entwicklung einer neuen Generation von Halbleiter-Messumformern beteiligt. Im Jahr 1992 kehrte Roland Werthschützky in den akademischen Bereich durch Wechsel an die FH in Furtwangen als Professor für Messtechnik zurück. Seit 1995 ist er an der TU Darmstadt als Professor für Mess- und Sensortechnik am Fachbereich Elektrotechnik tätig. Dort wurde er Anfang Oktober 2015 in den Ruhestand verabschiedet. Er betreut an der TU Darmstadt noch mehrere DFG- und BMBF-Projekte auf dem Gebiet der medizinischen Mikrosensorik. Ein weiterer Forschungsschwerpunkt besteht in der Entwicklung von haptischen Bediensystemen, z.B. als medizinische Assistenz- und Telemetriesysteme.



Prof. Dr.-Ing. Jürgen Wilde

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Institut für Mikrosystemtechnik – IMTEK

Professur für Aufbau- und
Verbindungstechnik

Georges-Köhler-Allee, Geb. 103
79110 Freiburg im Breisgau

www.imtek.de

Jürgen Wilde studierte Materialwissenschaften an der Universität Erlangen-Nürnberg, wo er den Dipl.-Ing. 1982 erhielt. Von 1982 bis 1988 forschte er an der Universität Clausthal und schloß mit einer Doktorarbeit ab über „Drahtbonden mit mikrostrukturierten Kompositmaterialien“. Es folgten Arbeiten am Daimler Forschungsinstitut, wo er Packaging und Zuverlässigkeit von elektronischen Bauelementen optimierte.

Seit 1999 ist er Professor an der Universität Freiburg und leitet das Laboratorium für Aufbau- und Verbindungstechnik. Schwerpunkt seiner Arbeit war dabei die Auslegung von Fügeverbindungen im Hinblick auf hohe Zuverlässigkeit, geringen Stress und hohe Leitfähigkeit. Die Anwendungen lagen dabei insbesondere auf Lötten und leitfähigem Kleben in der Hybridtechnik, bei Sensoren und in der Leistungselektronik. Zur Gewinnung grundlegender Erkenntnisse zur Optimierung und Modellierung von AVT wurden sowohl neue experimentelle Methoden als auch die Simulationsverfahren weiterentwickelt.

Prof. Wilde ist Mitglied von IEEE, von VDI und DGM.



Dr. Gabriel Zieger

**Leibniz-Institut für
Photonische Technologien**

Abteilung Quantendetektion

Albert-Einstein-Straße 9
07745 Jena

www.leibniz-ipht.de

Gabriel Zieger studierte Physik an der Friedrich-Schiller-Universität Jena, wo er 2007 das Diplom erhielt. Seitdem ist er am Leibniz-Institut für Photonische Technologien e.V. in Jena tätig. Schwerpunkte seiner Arbeit sind thermische Sensoren im Terahertz- und Infrarotbereich und die zugehörige Physik dünner Schichten bei tiefen Temperaturen und Raumtemperatur. 2014 promovierte er über supraleitende Strahlungssensoren für eine passive Terahertz-Sicherheitskamera an der Universität Twente (Niederlande).

Literatur- und Quellenangaben

Teil A

[BRA-1984] A. Bradshaw: Smart Pressure Transmitters. Measurement and Control, Volume 17, 1984

[BMBF-2014] Hightech-Strategie 2020. Berlin 2014

[HOF-2014] K.-P. Hoffmann, T. Velten: Microsystems Technology in Implantable Medical Devices. Microsystems Technology in Germany 2014

[INTE-2014] Daten von Intechno Consulting, Basel, Switzerland

[TSCH-1999] G. Tschulena, Mikrosystemtechnik – Grundlagen, Praxis, Trends, Hüthig Verlag Heidelberg (1999)

[WIPO-2017] Daten von WIPO Statistical Database, Mai 2017

[TSCH-2015] G. Tschulena, 30 Jahre Sensorik und SENSOR MAGAZIN, Sensor Magazin 4 (2015), S. 7-10

Teil B

B2.1

[FOTO-2017] Fotolia, gettyimages, istockphoto (einfache Lizenz)

[HAV-2013] I. Haverkamp: Systementwicklung und Optimierung eines hochempfindlichen digitalen Magnetfeldsensors Dissertation TU Ilmenau, 2013.

[HER-2013] E. Hering, G. Schönfelder (Hrsg.): Sensoren in Wissenschaft und Technik – Funktionsweise und Einsatzgebiete, Vieweg + Teubner Verlag, 2012

[MUK-2014] O. Mukhanov, G. Prokopenko und R. Romanofsky: Quantum Sensitivity: Superconducting Quantum Interference Filter-Based Microwave Receivers, IEEE Microwave Magazine, vol. 15, no. 6, Sept.-Oct. 2014, S.57-65

[SAC-2012] J. Sachs Handbook of Ultra-Wideband Short-Range Sensing, Wiley 2012, S. 10-14

[SENS-2017] Sensitec GmbH

[UHL-2012] R. P. Uhlig, M. Zec, M. Ziolkowski, H. Brauer und A. Thess: Lorentz force sismometry: A contactless method for electrical conductivity measurements, Journal of Applied Physics, vol. 111, 2012, S. 094914-1 – 094914-7

[ZET-2014] R. Zetig: UWB Sensors for Surveillance Applications in Emergency and Security Situations, Habilitationsschrift, TU Ilmenau, 2014

B2.2

[AST-2015] Astrose – Freileitungsmonitoring für Hoch- und Höchstspannungsnetze, ein Pilotprojekt von Fraunhofer ENAS und Fraunhofer IZM in Zusammenarbeit mit MITNETZ Strom mbH, 2015

[DRO-2015] W.-G. Drossel: Integration of piezo-sensors and actuators in light construction components, FhG-IWU Dresden, Plenarvortrag SENSOR15-Kongress, Nürnberg 2015

[DUM-2015] C. Dumstorff u. a.: Printed Sensor for Integrating in Aluminium during Casting, FhG-IMSAS, Dresden, SENSOR15-Kongress, Nürnberg 2015

[GRO-2015] V. Großer: Sensorsystem für Freileitungs-Monitoring, Fraunhofer IZM, Berlin 2015

[HÄR-2015] T. Härtling: Optical nanosensor technology – from basic research to industrial applications, FhG-IKTS Dresden, Plenarvortrag SENSOR15-Kongress, Nürnberg 2015

[HEI-2013] C. Heinicke: Piezoresistives Hochdruck-Messelement mit intrinsischer Überlastfestigkeit durch den hydrostatisch belasteten Verbund-Verformungskörper, Dissertation, TU Darmstadt, 2013

[HEL-2014] N. Helwig, A. Schütze: Intelligentes Condition Monitoring mit automatisierter Merkmalsgenerierung und -bewertung, in: A. Schütze, B. Schmitt (Hrsg.), XXVIII. Messtechnisches Symposium des Arbeitskreises der Hochschullehrer für Messtechnik, Tagungsband, Shaker Verlag, Aachen (2014), S. 121-128

[HEL-2015a] N. Helwig, E. Pignanelli, A. Schütze: Condition Monitoring of a Complex Hydraulic System Using Multivariate Statistics, Proc. I2MTC-2015 - 2015 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference, Pisa, Italy, May 11-14, 2015

[HEL-2015b] N. Helwig, A. Schütze: Detecting and compensating sensor faults in a hydraulic condition monitoring system, Proc. SENSOR 2015 – 17th International Conference on Sensors and Measurement Technology, Nuremberg, Germany, May 19-21, 2015; doi: 10.5162/sensor2015/D8.1

[HUB-2015] C. Huber: MEMS-based Micro-Coriolis Density and Flow Measurement, Endress + Hauser, Reinach, SENSOR15-Kongress, Nürnberg 2015

[ICMH-2017] Projekt iCM-Hydraulik; Partner: HYDAC Filtertechnik, DFKI, ZeMA

[JAK-2015] R. Jakoby: Microwave Sensors: Enabling Technologies for Life Science, Environmental and Industrial Process Monitoring, TU Darmstadt, Plenarvortrag SENSOR15-Kongress, Nürnberg 2015

[KEC-2015] J. Keck u. a.: Mit Injekt und Aerosol Jet gedruckte Sensoren auf 2D- und 3D-Substraten, Hahn-Schickard, Stuttgart, SENSOR15-Kongress, Nürnberg 2015

[NCTE-2017] NCTE AG

[QUE-2015] S. Quednau: Strömungssensoren mit galvanisch erzeugten Drähten als sensitive Elemente, TU Darmstadt, SENSOR15-Kongress, Nürnberg 2015

[ROT-2015] F. Roth: Piezoresistive Keramiken für Hochtemperaturkraft- und -drucksensoren, TU Darmstadt, MST-Kongress, Karlsruhe 2015

[SLA-2012] R. Slatter: Magneto-resistive Sensors for High-Performance Electric Drives, Proc. of Electric Drives Production Conference, Nürnberg, 2012

[VOL-2015] D. Vollberg u.a.: Hochempfindliche Folien-Dehnungsmessstreifen auf dem Weg zur technologischen Reife, Technisches Messen-11/2015

B2.3

[CAM-2006] Cambridge Research & Instrumentation Inc. (CRI): VariSpec Liquid Crystal Tunable Filter – User's Manual, CRI, Produktdokumentation 2006.

[GIL-2015] G. P. L. John R. Gilchrist und S. I. L. Timo Hyvärinen: Hyperspectral Imaging Spectroscopy – A Look at Real-Life Applications, Laurin Publishing Company, Inc.

[GTEI-2017] GTE Industrieelektronik GmbH

[HBM-2016] HBM: Optische und elektrische Dehnungsmessstreifen: Ein Vergleich, HBM, 09. August 2016.

[HDZX-2017] Prof. Dr. Dietrich Hofmann & M.Eng. Paul-Gerald Dittrich, SpectroNet International Collaboration Cluster; Carl Zeiss Jena & Ximea

[HOFM-1983] D. Hofmann: Handbuch Meßtechnik und Qualitätssicherung, bearbeitete Auflage Hrsg., Jena: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 1983.

[HOFM-2017] Prof. Dr. Dietrich Hofmann & M. Eng. Paul-Gerald Dittrich, SpectroNet International Collaboration Cluster

[JEG-2016] S. T. Japan-Europe GmbH, verfügbar unter <http://www.stjapan.de>. [Zugriff am 10 August 2016].

[POL-2014] S. Polster, Neue Spektralwertfunktion für die korrekte Bewertung von LED-Spektren und Einführung eines Metamerie-Index für Beobachtungsfeldgrößenunabhängigkeit, TU Ilmenau, Dissertation 2014.

[PTB-2016] Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB): 1400 km Glasfasern verbinden optische Uhren in Deutschland und Frankreich, 2016.

[RUG-2014] B. Ruggaber: Ortsaufgelöste Bestimmung von colorimetrischen Größen mit einer Hyperspektralkamera, TU Ilmenau, Dissertation 2014.

[SÜP-2015] W. Süptitz und S. Heimes: Photonik: Technische Anwendungen des Lichts – Infografiken, Hrsg., Berlin: SPECTARIS, 2015

[UNE-2015] International Year of Light, 2016. Online: <http://www.light2015.org>.

[WEN-2015] A. Wendel: Industrielle Bildverarbeitung bleibt auf Erfolgskurs, VDMA, 08 Dezember 2015.

[TTG-2017] TechnoTeam GmbH Ilmenau

B3.1

[3SG-2017] 3S GmbH, Saarbrücken

[GTEI-2017] GTE Industrieelektronik, Viersen

[LEI-2016a] M. Leidinger, J. Huotari u.a.: Selective detection of naphthalene with nanostructured WO₃ gas sensors prepared by pulsed laser deposition, J. Sensors and Sensor Systems (2016), 5, pp. 147-156; doi: 10.5194/jsss-5-147-2016

[LEI-2016b] M. Leidinger, M. Rieger u.a.: Integrated pre-concentrator gas sensor microsystem for ppb level benzene detection, Sensors and Actuators B: Chemical 2016, 236, pp. 988-996

[REI-2014] P. Reimann, A. Schütze: Sensor Arrays, Virtual Multisensors, Data Fusion, and Gas Sensor Data Evaluation, in C.-D. Kohl, T. Wagner (Eds.): Gas Sensing Fundamentals, Springer Series on Chemical Sensors and Biosensors, Volume 15, 2014,

[SCHÜ-2015] M. Schüler, T. Sauerwald, A. Schütze: A novel approach for detecting HMDSO poisoning of metal oxide gas sensors and improving their stability by temperature cycled operation, Journal of Sensors and Sensor Systems 4, 2015, pp. 305-311

[SCH-2017] A. Schütze, Universität des Saarlandes, Saarbrücken

B3.2

[IBMT-2017] H. Frank, Fraunhofer IBMT, Sulzbach 2017

[IEK-2018] Institut für Elektromechanische Konstruktionen, Fachgebiet Mess- und Sensortechnik, Technische Universität Darmstadt

[LEW-2013] S. Lewis, F.M. Russold et al: Fully implantable multi-channel measurement system for acquisition of muscle activity. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement 2013

[ROS-2010] P.M. Rossini, S. Micera et al: Double Nerve Intraneural Interface Implant on a Human Amputee for Robotic Hand Control. Clin Neurophysiol. 121, 5, 2010: 777-783. 3,120

[VÖL-2015] M. Voelker, A. Nikas, H. Zhou, J. Hauer, R. Ruff, K.-P. Hoffmann: Implantable EMG measuring system. AMA Conferences SENSOR 2015 and IRS2 2015, 19.05.-21.05.2015, Nürnberg

B4

[ASPE-2015] Prof. Dr. Markus Aspelmeyer,
Dr. Garrett Cole, Dr. Christian Pawlu
(Crystalline Mirror Solutions GmbH, Wien, Austria)

[BAER-2014] Goran Baer, Chistof Pruß, Johannes
Schindler (Universität Stuttgart); Jens Siepmann,
Dr. Markus Lotz (Mahr GmbH, Göttingen)

[CARL-2011] Dr. Daniel Carl, Dr. Dominik Giel,
Dr. Markus Fratz (Fraunhofer IPM, Freiburg);
Dr. Ulrich Breitmeier (Breitmeier GmbH, Ettlingen);
Dr. Thomas Krieger (ASENTICS GmbH, Siegen)

[CIS-2017] CiS Forschungsinstitut für
Mikrosensorik GmbH

[FISC-2013] Dr. Balthasar Fischer, (XARION Laser
Acoustics GmbH, Wien); Friedrich Reining,
(Knowles Electronics Austria GmbH, Wien);
Prof. Dr. Ernst Winter (TU Wien)

[HAYD-2016] Dr. Oliver Hayden, Lukas Richter,
Michael Helou, Mathias Reisbeck (Siemens Health-
care, Erlangen), Ronald Lehndorff (Sensitec, Lahnau),
Ignaz van Domelein (Sencio, Nijmegen, NL),
Mario Nitzsche (M2 Automation, Berlin)

[HHI-2016] Fraunhofer Heinrich-Hertz-Institut, Goslar

[ITO-2017] ITO Institut für Technische Optik,
Universität Stuttgart

[RÖMH-2010] Dieter Römhild, Dr. Thomas Henning,
Dr. Dietmar Starke (CiS Forschungsinstitut für
Mikrosensorik und Photovoltaik GmbH, Erfurt);
Franz Panitzsch (Audia Akustik GmbH, Sömmerda);
Dr. Markus Hülsbusch (MedIT, WTH Aachen)

[SCHA-2016] Prof. Dr. Wolfgang Schade,
Dr. Martin Angelmahr, (Fraunhofer HHI, Goslar);
Christian Waltermann, Anna Lena Baumann (Pho-
tonik Inkubator/Fraunhofer HHI, Göttingen/Goslar);
Philip Gühlke (Photonik Inkubator, Göttingen)

[WINT-2013] Dr. Marcus Winter, Robert Kowarsch,
Wanja Ochs, Alexander Collet, Moritz Giesen,
Lars Heller, Dr. Christian Rembe (Polytec GmbH,
Waldbronn)

[XARI-2013] XARION Laser Acoustics GmbH

Teil C**C1**

[KNO-2016] C. Knop, Moore's Law läuft aus –
na und?, FAZ vom 10. August 2016, S. 23

[SILT-2017] Siltronic AG

C2

[BEE-2009] Beecham Research, M2M Sector Map,
2009,

[YOL-2016] Yole Developpement, PRESS RELEASES
GALLERY – MEMS, Dokument aktualisiert 2016

C3

[BOC-2013] K.-H. Bock, E. Yacoub-George u.a.,
Heterointegration technologies for high frequen-
cy modules based on film substrates, Proc. CS
MANTECH Conf. 2013

[BOC-2014] K.-H. Bock, E. Yacoub-George u.a., Multi-
functional System Integration in Flexible Substrates,
Proc. ECTC 2014

[BOSC-2017] Bosch Sensortec GmbH

[EMF-2013] Fraunhofer EMFT, Technology Service
Offering Polymer Foil Technology,
www.project-interflex.eu > Downloads

[EMFT-2017] © Fraunhofer EMFT

[EUI-2013] Interflex Final Project Report,
www.project-interflex.eu > Downloads

[HAHN-2017] Hahn-Schickard-Gesellschaft für
angewandte Forschung e.V., AIF/IGF-Vorhaben
„Adima-3D“

[HOF-2005] K.-P. Hoffmann, J. Dehm (Eds.):
VDE-Studie zum Anwendungsfeld Neuroprothetik,
in: Initiative Mikromedizin, VDE Frankfurt, 2005:
[ISBN 3-00-017424-9].

[HOF-2011] K.-P. Hoffmann, S. Micera, Neuropro-
sthetics, in: R. Kramme, K.-P. Hoffmann, R. Pozos
(Eds.): Handbook Medical Technology, 1st edition,
Springer Heidelberg New York, 2011: 785-800.

[IMTE-2016] Albert-Ludwigs-Universität Freiburg,
Institut für Mikrosystemtechnik IMTEK,
Aufbau- und Verbindungstechnik

[ISIT-2016] Fraunhofer ISIT, Itzehoe; und: Hofmann
et al.: Resonant biaxial 7-mm MEMS mirror for
omnidirectional scanning“, Journal of Micro/Nano-
lithography, MEM and MOEMS, Bd. 13, 2013

[IZM-2017] Fraunhofer IZM, Berlin

[MUEL-2017] B. Müller/Fraunhofer IBMT, Sulzbach

[NAN-2015] Fraunhofer IZM Jahresbericht 14/15,
S. 50 und S. 57, Berlin 2015

[POP-2015] W. Poppendieck, S. Muceli, J. Dideriksen, E. Rocon, J. L. Pons, D. Farina, K.-P. Hoffmann: A New Generation of Double-Sided Intramuscular Electrodes for Multi-Channel Recording and Stimulation, 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, Proceedings, 978-1-4244-9270-1/15 2015: 7135-7138.

[QUA-2015] M. Grob, Qualcomm Technologies, Inc., Luncheon Vortrag auf der ECTC, 2015

[SENC-2016] Sencio B.V., Netherlands

[SENS-2017] Sensirion AG, Switzerland

[WÜRT-2016] Würth Elektronik GmbH & Co. KG

C4

[AMA-2010] AMA Verband, Studie Sensor-Trends 2014, S.10, Berlin, 2010 (www.ama-verband.de)

[IMMS-2017] IMMS GmbH

[GUT-2004] J.A. Gutiérrez, E.H. Callaway Jr., R.L. Barrett Jr.: Low-Rate Wireless personal Area Networks. Enabling Wireless Sensors with IEEE 802.15.4, IEEE Press, New York, 2004

[IZM-2017] Fraunhofer IZM, Berlin

C5

[AMA-2010] AMA Verband, Studie Sensor-Trends 2014, Berlin, 2010 (www.ama-sensorik.de)

[COL-2001] M. Collucci, M. Hennemann: Predictive Maintenance – Vision oder Realität?, Men Tec & automation, Berlin, Heft 9, 2001.

[IMSL-2016] Universität des Saarlandes, Lehrstuhl für intelligente Materialsysteme iMSL

[JAN-2010] H. Janocha: Unkonventionelle Akteure: Eine Einführung, Oldenbourg, 2010

[MES-2001] F. Mesch: Struktur zur Selbstüberwachung von Mess-Systemen. atp, Heft 8, 2001.

[MÜL-2006] Müller, R.: Selbstüberwachung differenzdruckbasierter Durchflussmessverfahren für Flüssigkeiten, Dissertation, TU Darmstadt, 2006.

[NAM-2006] NAMUR und VDI/VDE-GMA, Technologie-Roadmap: Prozesssensoren 4.0, Düsseldorf 2006, aktualisiert 2009

[SCH-2005] A. Schütze: MR-Sensorenanwendungen in der Automatisierungstechnik: Prinzipien und Herausforderungen, 8. MR-Symposium, Wetzlar, 8.-9. März 2005.

[SCHL-2015] M. Schüler, T. Sauerwald, A. Schütze: A novel approach for detecting HMDSO poisoning of metal oxide gas sensors and improving their stability by temperature cycled operation, Journal of Sensors and Sensor Systems 4-2015, 305-311

[STA-2011] M. Stahl-Offergeld: Robuste dreidimensionale Hall-Sensoren für mehrachsige Positionsmesssysteme, Dissertation, Universität des Saarlandes, Aachen 2011

[WER-2006] R. Werthschützky: Selbstüberwachung und Störungstoleranz von Sensoren, Vortrag auf AHMT-Symposium, Bayreuth 2006.

C6

[ACPS-2012] agendaCPS, 2012, Springer Vieweg (auch als Download unter www.acatech.de)

[GMD-2016] Global Mobile Data Traffic Forecast, Cisco, 2016

[SCHU-2014] Schuermans, S., Vakulenko, M., Breaking Free From Internet and Things, How communities and data will shape the future of IoT in ways we can't imagine, VisionMobile Report, 2014

[SIN-2013] W. Sinn, Cyber-physical Systems: Systemintegration, vernetzte Systeme, virtuelle Sensoren, Kommunikation, dezentrale Entscheidung, Sensordatenfusion, Workshop: Sensorik für erneuerbare Energie und Energieeffizienz, Berlin-Adlershof, März 2013

AMA Verband für Sensorik und Messtechnik e.V.

Sophie-Charlotten-Straße 15
14059 Berlin | Deutschland

Telefon +49 30 2219 0362 - 0

info@ama-sensorik.de
www.ama-sensorik.de

© 2018 AMA Verband für Sensorik und Messtechnik e.V.

Nachdruck, Übertragung auf elektronische Medien – auch auszugsweise – nur mit schriftlicher Genehmigung durch den AMA Verband für Sensorik und Messtechnik e.V.. Der Verband übernimmt keine Gewähr auf Vollständigkeit oder Richtigkeit der Angaben.

Titelgestaltung | Satz und Layout
Claudia Kessler-Simsch

ISBN 978-3-9816876-3-7

Schutzgebühr € 12,00

AMA
Verband für Sensorik + Messtechnik

Innovatoren verbinden