

## Sensorik für erneuerbare Energien und Energieeffizienz

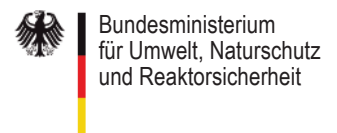
Beiträge zum Workshop vom  
AMA Fachverband für Sensorik e. V. und vom  
ForschungsVerbund Erneuerbare Energien  
im März 2013 in Berlin-Adlershof



Veranstalter



Veranstalter



Schirmherrschaft  
Förderung

# Sensorik für erneuerbare Energien und Energieeffizienz

Beiträge zum Workshop vom  
AMA Fachverband für Sensorik e. V. und vom  
ForschungsVerbund Erneuerbare Energien  
am 12. und 13. März 2013 in Berlin-Adlershof

## Wissenschaftliche Leitung

Fraunhofer IWES • Prof. Dr. Andreas Reuter  
Universität des Saarlandes • Prof. Dr. Andreas Schütze

## Programmkomitee WS Sensorik

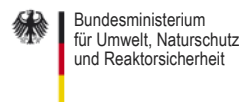
AMA • Dr. C. Thomas Simmons  
DLR • Erich Gülzow  
First Sensor Technology • Peter Krause  
Forschungszentrum Jülich • Prof. Dr. Uwe Rau  
Fraunhofer IBP • Dr. Dietrich Schmidt  
Fraunhofer IIS • Josef Sauerer  
Fraunhofer ISE • Dr. Christof Wittwer  
Fraunhofer IWES • Dr.-Ing. Holger Huhn  
Fraunhofer IZM • Dr.-Ing. Stephan Guttowski  
FVEE • Dr. Gerd Stadermann  
FVEE • Dr. Niklas Martin  
HZB • Dr. Iver Lauer  
Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme • Dr. Wolfgang Sinn  
ISFH • Dr. Karsten Bothe  
Kurt-Schwabe-Institut für Mess- und Sensortechnik • Dr. Jens Zosel  
Universität Freiburg • Dr. Martin Kasemann  
ZAE Bayern • Dr. Hans-Peter Ebert  
ZSW • Dr. Simon Schwarz



Veranstalter



Veranstalter



Schirmherrschaft  
Förderung

## ■ Vorwort

### 4 Einführung und Dank

*Dr. Niklas Martin • FVEE*

*Dr. Thomas Simmons • AMA Fachverband für Sensorik*

## ■ Überblicksvorträge

### 5 Motivation für Sensorik bei erneuerbaren Energien und Energieeffizienz

*Prof. Dr. Andreas Reuter • Fraunhofer IWES*

### 8 Bedeutung der Sensorik für die Energiewende

*Peter Krause • First SensorTechnology GmbH*

## ■ Sensortechnologie

### 13 Punktsensoren: Messprinzipien, Sensortechnologien, Sensorelemente, optische Sensorik, AVT

*Prof. Dr. Andreas Schütze • Universität des Saarlandes*

### 18 Smart Sensors

*Josef Sauerer • Fraunhofer IIS – Fraunhofer Institut für Integrierte Schaltungen*

### 25 Bildgebende Sensoren, Bildauswerteverfahren

*Dr. Helge Moritz • 3i – MORITZ*

*Prof. Dr. Randolph Hanke • Fraunhofer IIS – Fraunhofer Institut für Integrierte Schaltungen*

*Wolfgang Holub • Fraunhofer IIS – Fraunhofer Institut für Integrierte Schaltungen*

### 32 Cyber-physical Systems: Systemintegration, vernetzte Systeme, virtuelle Sensoren, Kommunikation, dezentrale Entscheidung, Sensordatenfusion

*Dr. Wolfgang Sinn • IMMS – Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme*

## ■ Einsatz und Bedarf von Sensoren

### 36 Windenergie und Meeresenergie: Sensoren im FuE-Prozess, Herstellungsprozess und Einsatzmonitoring

*Dr.-Ing. Holger Huhn • Fraunhofer IWES – Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik*

*Jochen Bard • Fraunhofer IWES – Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik*

### 39 Einsatz und Bedarf von Sensorik in der Geothermie

*Jan Henniges • GFZ Potsdam – Deutsches GeoForschungszentrum*

*Harald Milsch • GFZ Potsdam – Deutsches GeoForschungszentrum*

*Simona Regenspurg • GFZ Potsdam – Deutsches GeoForschungszentrum*

*Thomas Reinsch • GFZ Potsdam – Deutsches GeoForschungszentrum*

*Prof. Dr. Ernst Huenges • GFZ Potsdam – Deutsches GeoForschungszentrum*

### 42 Solarthermische Kraftwerke: Sensoren im F&E-Prozess, Herstellungsprozess und Einsatzmonitoring

*Marc Röger • DLR – Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt*

*Prof. Dr. Robert Pitz-Paal • DLR – Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt*

## ■ Energienutzung und Speicherung

### 48 Einsatz von Sensoren für Energieflussanalysen für Energienetze, Smart Grids, Smart Metering

Karlheinz Ronge • Fraunhofer IIS

Dr. Christof Wittwer • Fraunhofer ISE

### 51 Energieeffiziente Gebäude – Gebäudeautomatisierung – Energieflussanalysen

Herbert Sinnesbichler • Fraunhofer IBP – Fraunhofer-Institut für Bauphysik

Peter Pärtsch • ISFH – Institut für Solarenergieforschung

### 56 Sensoren & Messtechniken im FuE- und Herstellungsprozess und für eine effiziente Energiespeichertechnologie (Monitoring) in der Praxis

Bernd Krautkremer • Fraunhofer IWES – Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik

Jens Zosel • Kurt-Schwabe-Institut für Mess- und Sensortechnik e. V. Meinsberg

### 62 Sensoren im FuE-Prozess bei der Komponentenherstellung und Systementwicklung

Erich Gülzow • DLR – Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

## ■ Forschungsbedarfe und Projektideen

### 67 Ergebnisse des World-Café

Dr. C. Thomas Simmons • AMA Fachverband für Sensorik e. V.

## ■ Anhang

### 74 Veranstalter

- AMA Fachverband für Sensorik
- ForschungsVerbund Erneuerbare Energien

### 77 Impressum

## Vorwort

Der hier vorliegende Workshopband enthält die Vorträge zum Workshop „Sensorik für Erneuerbare Energien und Energieeffizienz“, der am 12. und 13. März 2013 in Berlin stattgefunden hat. Der Forschungsverbund Erneuerbare Energien und der AMA Fachverband für Sensorik haben den Workshop gemeinsam veranstaltet.

Der Einsatz von Sensortechnologien bei den erneuerbaren Energien ist ein neues, noch weithin unerschlossenes Gebiet. Zwar existiert bereits eine Vielzahl von Sensoren für die verschiedensten Einsatzgebiete, aber für die Bereiche der erneuerbaren Energien und der Effizienztechnologien müssen Sensortechnologien speziell entwickelt, bzw. angepasst werden. Dabei kann der Einsatz von Sensoren sowohl in Herstellungsverfahren und/oder direkt bei der Energieerzeugung eine Rolle spielen, um Zuverlässigkeit, Sicherheit und Effizienz der Technologien für erneuerbaren Energien und Effizienz zu verbessern.

Die Teilnehmenden des zweitägigen Workshops haben Synergiefelder und Forschungsbedarfe herausgearbeitet, die sich aus dem Zusammenwirken von Messtechnik und Technologien für erneuerbare Energien ergeben. Dabei haben sie Wissen ausgetauscht, Perspektiven erweitert und Kontakte der Mitgliedsinstitute und -unternehmen des AMA Fachverbands für Sensorik mit den Forschungsinstituten des FVEE geknüpft. Im Anschluss an die Vorträge haben die Teilnehmenden in einer moderierten Gruppendiskussion eine Vielzahl gemeinsamer Projektideen entwickelt.

Unser Dank gilt den Autorinnen und Autoren sowie den Mitgliedern des Programmkomitees, besonders Dr. Gerd Stadermann für die Initiierung und Planung der Veranstaltung.

Die Tagung konnte mit der Unterstützung des Bundesumweltministeriums durchgeführt werden, das die Schirmherrschaft über die Tagung übernommen und die vorliegende Publikation gefördert hat. Dafür sei hier ein besonderer Dank ausgesprochen.

Berlin im August 2013



**Dr. Niklas Martin**  
Geschäftsführer  
des FVEE



**Dr. Thomas Simmons**  
Geschäftsführer  
des AMA Fachverbands für Sensorik

# Motivation für Sensorik bei erneuerbaren Energien und Energieeffizienz

## 1. Energiewende in Deutschland: Ziele und Meilensteine

In der öffentlichen Debatte wird der derzeitige Umbau der Energieversorgung in Deutschland zunehmend kritisch bewertet. Insbesondere wird der Atomausstieg mit der Energiewende gleichgesetzt – sicherlich eine der größten Verkürzungen.

Denn die Energiewende ist kein Zufallsprodukt kurzfristiger politischer Entscheidungen, sondern das Ergebnis eines seit geraumer Zeit ablaufenden gesellschaftlichen Prozesses. Hierbei ist das wesentliche Ziel, einen Beitrag zum Klimaschutz durch Reduktion der Treibhausgase zu leisten und diese Reduktion ist dann auch die wesentliche Messlatte für die tatsächlich gemachten Fortschritte.

Ebenfalls sind – anders als oft in der öffentlichen Debatte suggeriert – konkrete Meilensteine für die jeweiligen Bereiche der Energiewende definiert. Das folgende Bild fasst diese zusammen:

Aus dieser Darstellung ist ersichtlich, dass die Energiewende mehrere Bereiche umfasst:

- Die Stromwende, mit dem Zwischenziel von 35 % erneuerbarem Strom bis 2020
- Die Wärmewende, mit z. B. dem Ziel einer Verdopplung der Gebäudesanierungsrate
- Die Mobilitätswende, mit dem Ziel einer Reduktion des Energiebedarfs um 10 % bis 2020 zu senken (oder 1 Mio. Elektroautos auf die Straße zu bringen)
- Die Effizienzwende mit einer Steigerung der Energieproduktivität um 2,1 % pro Jahr

Eine zusätzliche Komplexität entsteht durch die Verknüpfung der Bereiche untereinander, eine getrennte Betrachtung macht wegen der zunehmenden gegenseitigen Durchdringung der Energiebereiche keinen Sinn.

## 2. Dimensionen der Energiewende

Wie aus dieser Zusammenstellung ersichtlich wird, betrifft die Energiewende alle gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Aktivitäten und verändert sie nachhaltig. Es macht sich bereits ein durchgängiger Einfluss auf viele Bereiche des öffentlichen und privaten Lebens bemerkbar, obwohl in den meisten Bereichen der Umsetzungsgrad minimal ist.

Insofern stellt die Energiewende auch eine Kulturwende dar, beispielhaft erkennbar an Fragestellungen wie der Dezentralität einer zukünftigen Versorgung, der Partizipation der Bevölkerung an Entscheidungsprozessen und der Verschiebung von Verantwortung und Einflussmöglichkeiten auf regionale und lokale Ebenen. Hiermit verbunden ist eine derzeit sehr hohe Akzeptanz für das Thema und die anstehenden Veränderungen.

## 3. Derzeitiger Stand der Energiewende

Derzeit werden in Deutschland ca. 300 TWh jährlich aus erneuerbaren Energien produziert, davon knapp die Hälfte für den Wärmemarkt. Dies ergibt eine Quote von ca. 12 % bezogen auf die Gesamtenergieproduktion. Weltweit allerdings dominiert der Wär-

Prof. Dr. Andreas Reuter  
Fraunhofer IWES  
andreas.reuter@iwes.fraunhofer.de

	Klima		Effizienz					
	Treibhausgase (vs. 1990)	Anteil Strom	Anteil gesamt	Primärenergie	Strom	Energieproduktivität	Verkehr	Gebäudesanierung
	-40 %			-20%	-10%		-10%	Rate verdoppeln 1%→2%
2030	-55 %	50 %	30 %	↓	↓	steigern auf 2,1%/a		bis 2020 Minderung d. Wärmebedarfs um 20 %
	-70 %			↓	↓			bis 2050 Minderung PEV um 80 %
2050	-80-95 %	80 %	60 %	-50%	-25%		-40%	

Abbildung 1  
Ziele der Energiewende [1]

Abbildung 2  
Ausbauszenario  
Strommarkt [1]

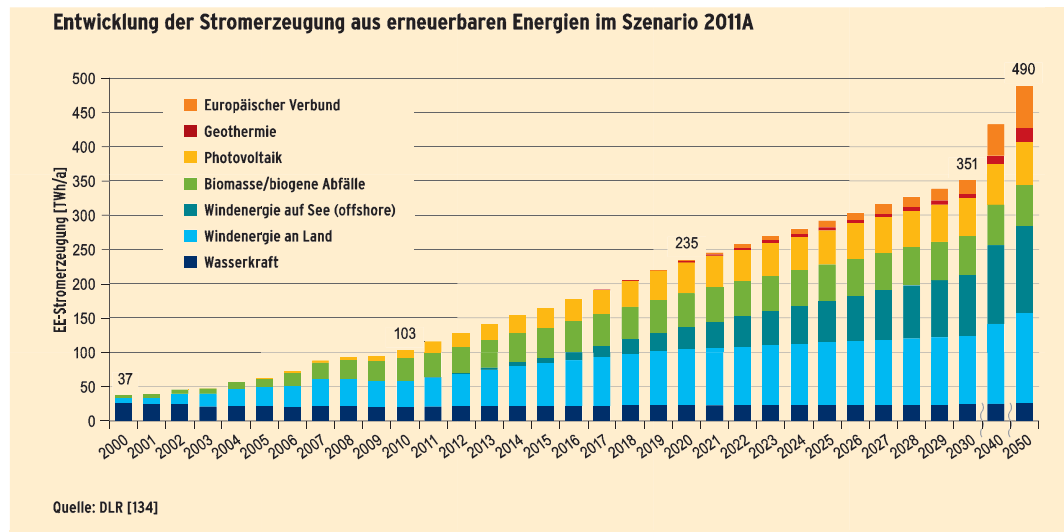
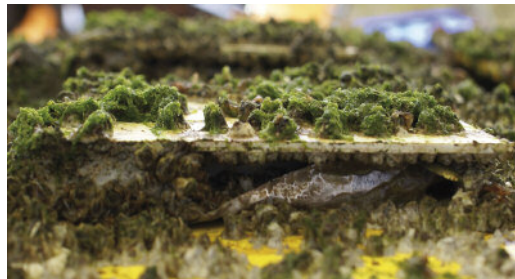


Abbildung 3  
Beispiel für den Bewuchs  
eines Sensors im  
offshore-Umfeld



Unter Voraussetzung der mehr oder weniger kurzfristigen Lösung der genannten Punkte hat die Energiewende das Potenzial, zu einer Erfolgsstory mit erheblicher wirtschaftlicher Tragweite zu werden.

#### 4. Aktuelle Entwicklungen auf der Technologieseite der erneuerbaren Energien

memarkt, hier sind nur ca. 3,5% der gesamten Energieerzeugung regenerativer Strom.

Auch die Wachstumsraten sind in Deutschland für den Stromsektor am dynamischsten. Hier ist der Ausblick für die nächsten Jahre Strom sehr positiv, trotz der derzeitigen strukturellen Herausforderungen.

Auf der Basis des bisherigen Ausbaustandes und der unterschiedlichen Fortschritte in den genannten Bereichen ergeben sich zusammenfassend die folgenden Herausforderungen und Notwendigkeiten für die Energiewende:

- Kurzfristig beschleunigter Netzausbau sowohl im Übertragungs- als auch im Verteilnetz
- Förderelemente für die Transition von 30% auf 100% erneuerbarer Energie entwickeln und implementieren
- Gerechte Verteilung der Kosten der anstehenden Transformation
- Transparente Darstellung von Erfolgen und Herausforderungen
- Weitere Kostenoptimierung auf der Erzeugerseite
- Verstärkte Verknüpfung der Energiebereiche untereinander zur Kompensation von Schwankungen und zur Minimierung des Bedarfs an fossilen Energieträgern

Die im vorherigen Abschnitt beschriebenen Pläne lassen auf einen langfristig interessanten Markt für Produkte im Bereich der erneuerbaren Energien hoffen, so zum Beispiel auch für Sensorlösungen. Technologisch müssen allerdings auch die speziellen Anforderungen berücksichtigt werden.

Die aktuellen technologischen Entwicklungen auf der Erzeugerseite tragen den beschriebenen Anforderungen im Rahmen der Energiewende Rechnung: Windenergieanlagen zum Beispiel entwickeln sich zunehmend zu Kraftwerken, die in der Lage sind, miteinander zu kommunizieren und zur Netzstabilität beizutragen. Dies wird realisiert durch eine wachsende Anzahl von Sensoren und der zugehörigen Auswertungs- und Kommunikationssoftware.

Ein Beispiel für diese Entwicklung sind sogenannte „smart blades“, mit Sensoren und Aktoren ausgestattete Rotorblätter, die trotz enormer Längen von bis zu 85 m lokale Böen ausregeln können und für eine lastarme und gleichmäßige Energieproduktion sorgen. Ähnliche Entwicklungen gibt es auch in allen anderen Bereichen der erneuerbaren Energien bis hin zu den „smart grids“ deren Basis ebenfalls der Austausch großer Mengen von Informationen ist.

Allerdings lassen sich bestehende Sensorlösungen nicht unbedingt direkt auf die neuen Anwendungen

übertragen. Insbesondere in anspruchsvollen Umweltbedingungen wie bei der Nutzung der Windenergie auf See muss auf eine extreme Robustheit und Langlebigkeit der Sensoren geachtet werden. Hier nähern sich die Anforderungen denen in der Raumfahrt an, ohne dass eine vergleichbare Kostenstruktur realisierbar ist.

## 5. Zusammenfassung

Trotz aller derzeitigen Bedenken und Irritationen kann davon ausgegangen werden, dass die Energiewende unumkehrbar ist und sich somit ein langfristig attraktiver Markt für Produkte in dieser Branche etabliert.

Zunehmend entwickelt sich Deutschland zu einem Energielabor, in dem innovative Produkte entwickelt werden, die dann auch für zukünftige Exporte interessant sind.

Insbesondere Sensoren, Datenerfassung und intelligente Vernetzung sind Schlüssel zum Erfolg – es müssen allerdings die speziellen Anforderungen sowohl bezüglich der Umweltbedingungen und der Kostenstruktur berücksichtigt werden.

## 6. Quellenangaben

- [1] Das Energiekonzept der Bundesregierung als wesentlicher Beitrag zur Erreichung der deutschen Klimaschutzziele, Franzjosef Schafhausen, Vortrag Magdeburg 2010
- [2] Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global  
Schlussbericht BMU – FKZ 03MAP146  
Arbeitsgemeinschaft Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Stuttgart  
Institut für Technische Thermodynamik, Abt. Systemanalyse und Technikbewertung  
Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES), Kassel Ingenieurbüro für neue Energien (IFNE), Teltow, 2012



# Bedeutung der Sensorik für die Energiewende

Peter Krause  
 First SensorTechnology GmbH  
 peter.krause@first-sensor.com

## 1. Was ist ein Sensor?

Sensoren spielen eine wesentliche Rolle beim Steuern von Prozessen. Rein formal erfassen sie physikalische oder chemische Eigenschaften und formen diese Informationen in verwendbare Signale um. Sie fallen häufig nicht auf, sind aber nicht mehr wegzudenken. Selbst in unserer nächsten Umgebung befinden sich häufig mehr als hundert Sensoren in verschiedenen Applikationen, sei es im Auto, im Handy, im Haushalt oder im Medizintechnikbereich.

In der Evolution waren es häufig die besseren Sensoren (Sinnesorgane), die einzelne Tierarten z. B. bei der Nahrungssuche eine bevorzugte Stellung ermöglichen. Das lässt sich durchaus auch auf die Technik übertragen.

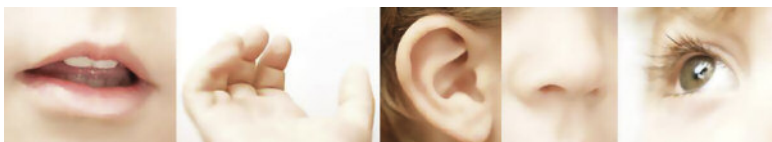
So kann man wesentliche Wettbewerbsvorteile durch „bessere“ Sensoren erzielen, da diese häufig die Grundlage für Produktverbesserungen ermöglichen:

- Smarte Regelung
- In-Situ Messwerverfassung
- Bessere Zuverlässigkeit/Stabilität
- Höhere Robustheit
- Kleinere Baugrößen
- Erweiterter Temperatureinsatzbereich
- Kostengünstigere Produktion und Weiterverarbeitung

Prinzipiell besteht ein Sensor meist aus dem Sensorelement und einer Elektronik, die der Applikation ein digitales oder analoges Messsignal zur Verfügung stellt.

Abbildung 1

Sensor, abgeleitet von sentire: „fühlen“ und „empfinden“



## 2. Einteilung von Sensoren

Prinzipiell lassen sich Sensoren nach dem Messprinzip oder nach der Messgröße einteilen. Während für den Anwender häufig die Messgröße (Temperatur, Druck, ...) das erste Suchkriterium ist, macht es durchaus Sinn, auch die Vor- und Nachteile der Messprinzipien (resistiv, kapazitiv, ...) zu berücksichtigen.

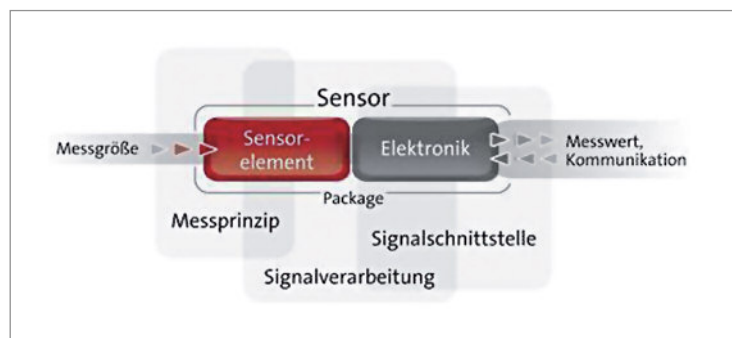
Einen guten Überblick findet man auf der Website des AMA Fachverband für Sensorik unter: <http://www.ama-sensorik.de/site/de/353/1-industrie-produkte.html>

## 3. Wirtschaftliche Lage der Sensorbranche

Der AMA Fachverband (AMA) befragt seine Mitglieder regelmäßig zur wirtschaftlichen Entwicklung. Das Jahresergebnis 2012 wies ein leichtes Umsatzwachstum von einem Prozent aus, verglichen mit dem Vorjahresergebnis. Insgesamt hellen sich die Perspektiven der Sensorik und Messtechnik weiter auf. Nach den Erwartungen für das Jahr 2013 gefragt, setzten die AMA Mitglieder auf ein Umsatzwachstum von gut vier Prozent.

Der Arbeitsmarkt der Branche spiegelt diese Zuversicht wider. Im Jahr 2012 wurden fast drei Prozent mehr Personal von den Mitgliedsunternehmen eingestellt und für das laufende Jahr wird weiterer Bedarf prognostiziert. Die Branche präsentiert sich zudem als besonders investitionsfreudig. Die AMA-Mitglieder tätigten im Geschäftsjahr 2012 gut neun Prozent höhere Investitionen, nach einem bereits investitionsstarken Vorjahr, das mit einem Plus von 16 Prozent abschloss. Die Exportquote insgesamt betrug 2012 rund 39 Prozent.

Abbildung 2  
 Ausbauszenario  
 Strommarkt [1]



#### 4. Anforderungen bei der Zusammenarbeit zwischen Sensorikern/Messtechnikern und den Produzenten erneuerbarer Energien

Wir wissen, dass die konventionellen Energieressourcen der Erde begrenzt sind und dass deren Nutzung einen extrem hohen Anteil an Schadstoffen oder Abfällen erzeugt. Aus diesem Grund ist eine deutliche Erhöhung des Anteils der erneuerbaren Energien zwingend notwendig. In den letzten Jahren wurden bereits Erfolge in den Bereichen Solarenergie, Geothermie, Bioenergie, Wasserkraft und Windenergie erzielt. Nicht zuletzt werden unsere ambitionierten Zielstellungen stark von technischen und wirtschaftlichen Aspekten geprägt.

Die applikationsangepasste Sensorik und Messtechnik wird sowohl bei der Produktion von Anlagen zur Erzeugung erneuerbaren Energien als auch bei der Erhöhung der Effektivität bei der Umwandlung der erneuerbaren in elektrische Energie eine wesentliche Rolle spielen. Dabei ist es einerseits für die Sensorik- und Messtechnikbranche wichtig, Regelmechanismen und Entwicklungswünsche aus den konkreten Applikationen zu erkennen, um diese bei den Weiterentwicklungen berücksichtigen zu können. Andererseits gibt es viele vorhandene Technologien und Trends in der Sensorik, die bei der Weiterentwicklung der erneuerbaren Energien verwendet werden können. Viele Sensoren werden bereits heute in diesem Umfeld genutzt, zur Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit bietet eine engere Zusammenarbeit beider Branchen einen deutlichen Vorteil.

#### 5. Aufbau von Sensoren

Die Wertschöpfung eines Sensors bzw. Sensorsystems erfolgt in den Stufen Sensorelement, Assembly (auch First Level Packaging), der Kalibrierung und Gehäusefertigung (Second Level Packaging) und in der Integration des Sensors im Gerät. Der wirtschaftliche Erfolg eines Sensorsystems wird stark von der Innovationskraft innerhalb der einzelnen Wertschöpfungsstufen der Sensoren und der Messtechnik definiert.

Hier spielt die Informations- und Kommunikationstechnologien (ITK) eine zentrale Rolle. Deutlich wird dies z. B. anhand einer Analyse der Einreichungen zum AMA Innovationspreis für Sensor/Messtechnik 2012. Bei ca. **83 Prozent** der 75 Einreichungen lag der Schwerpunkt der Innovationen im Sensorsystem bzw. der Messtechnik/Software (10 Prozent Sensorelement, 7 Prozent Technologie).

Interessant ist eine weitergehende Analyse die zeigt, inwiefern eine komplexe Sensorhardware Voraussetzung war und ob diese auf dem Markt frei verfügbar ist.

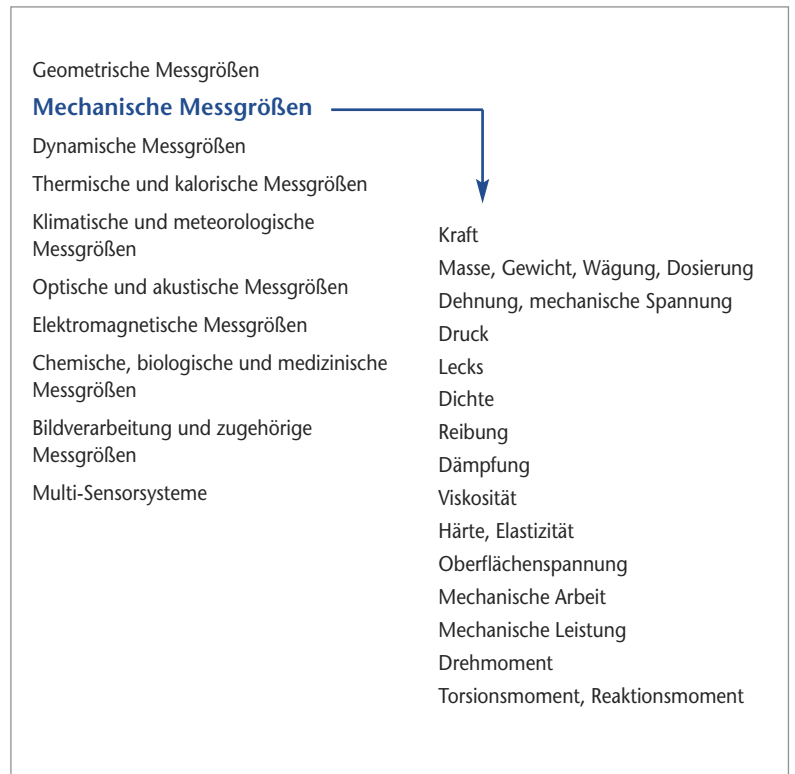


Abbildung 3  
Einteilung von Sensoren nach physikalischer Messgröße

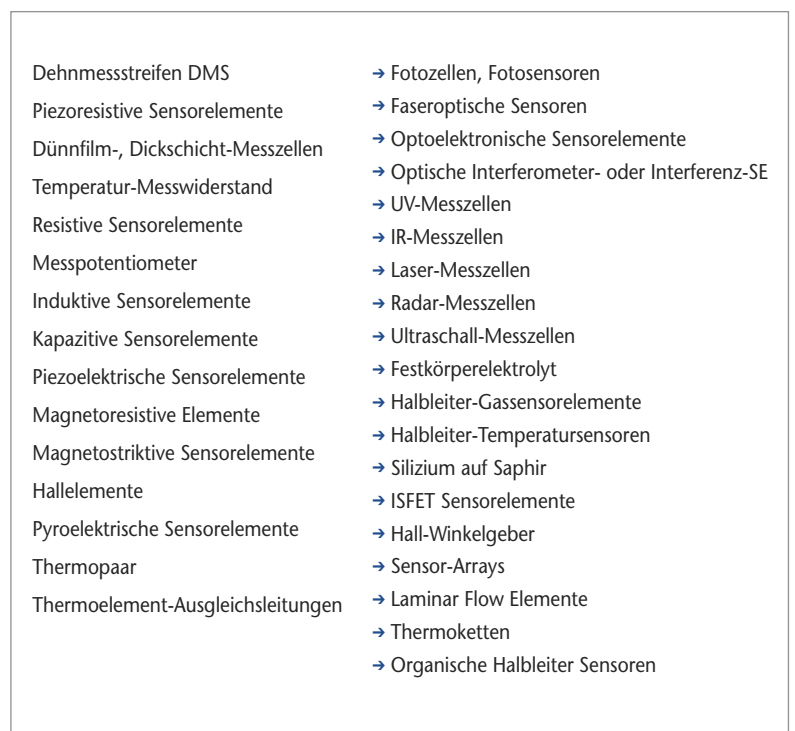


Abbildung 4  
Einteilung von Sensoren nach Messprinzip

Abbildung 5  
links: Umsatz Sensorik und Messtechnik  
Vergleich mit 2003 (Index 100%)  
rechts: Exportquote  
Sensorik und Messtechnik

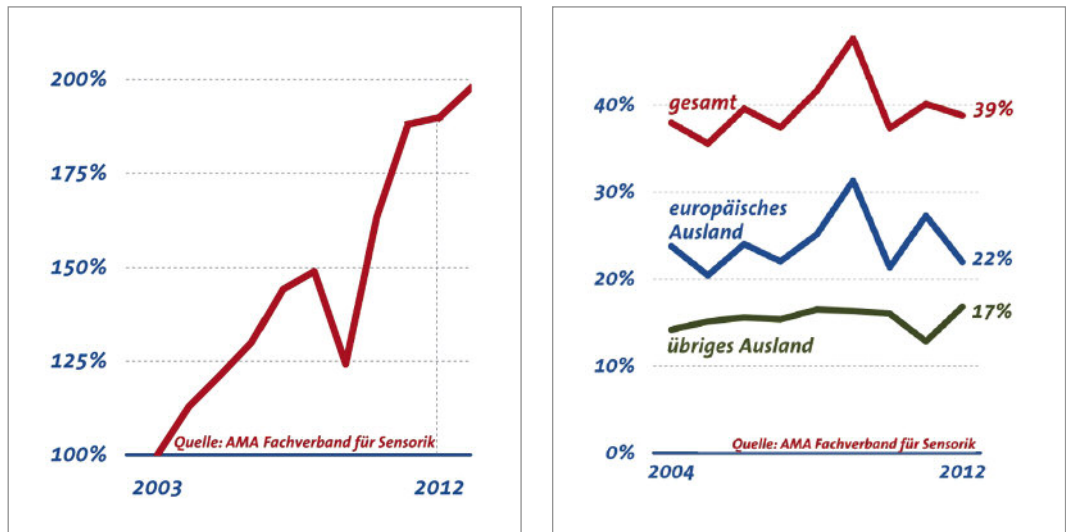


Abbildung 6  
Veränderung des weltweiten Energiemixes bis 2010

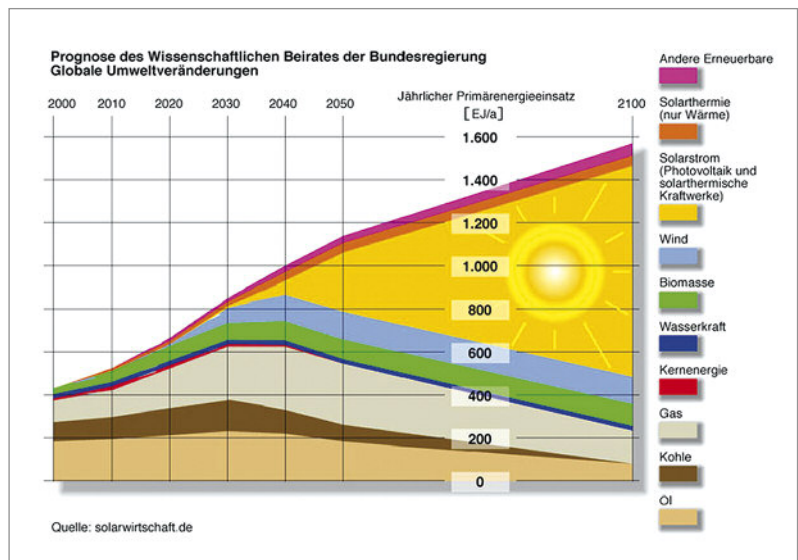
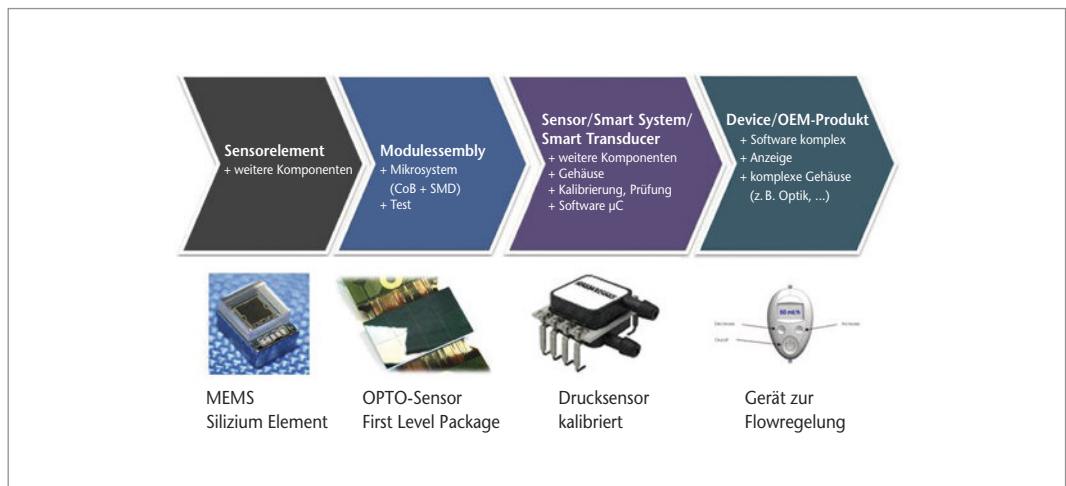


Abbildung 2  
Ausbauszenario Strommarkt [1]



Es zeigte sich, dass bei 92 Prozent der Einreichungen eine komplexe Sensorhardware Voraussetzung, diese aber bei 59 Prozent nicht frei im Markt verfügbar war. Besonders viele Sensorinnovationen entstehen also, wenn man neuste IKT-Möglichkeiten mit neusten Sensortechnologien verbindet.

## 6. Trends in der Sensorik

In der AMA „Trendanalyse 2014“ wurden Entwicklungen in der Sensor- und Messtechnikbranche detailliert untersucht.

Wesentliche Entwicklungen kann man wie folgt zusammenfassen:

1. Näheres Heranführen der Sensoren an die Messgröße **weitere 3D Miniaturisierung**
2. Einführung neuartiger Messverfahren, z. B. zur Erfassung räumlich verteilter Messdaten
3. Zunehmender Einsatz von energieautarken und drahtlos kommunizierenden Sensoren-**Energieautarker, mehr Sensornetzwerke**
4. Zunehmende Systemintegration bei mechatronischen Anwendungen, **Lokalisierung**
5. Zunehmend ganzheitlicher Sensorentwurf
6. Zunehmende Funktionsintegration **smarter** (autonome Entscheidungsprozesse), **sicherer**
7. Nutzung hochintegrierter Bauelemente für echtzeitfähige Signalverarbeitung
8. Kopplung von physikalischen, chemischen und biologischen Sensoren auf einem Sensorelement, z. B. Druckmessung, pH-Wertmessung (Tierzucht), Lab on a Chip, Lab on a Disc
9. Zunehmende Herstellung von Sensorelementen durch spezialisierte Hersteller; hiermit einhergehend wird die Herstellung von kompletten Sensoren zunehmend lukrativ für den Mittelstand

Viele dieser Trends spielen auch im Rahmen der erneuerbaren Energien eine wichtige Rolle für künftige

## 7. Trends im Rahmen von Industrie 4.0

Professor Wahlster prägte zur Beschreibung der aktuellen Entwicklungstendenz der Industrie den Begriff ‚Industrie 4.0‘.

Gemeint sind hier die Stufen

### 1. Industrielle Revolution:

Rein mechanische Produktionsanlagen (Ende 18. Jh. – z. B. 1784 mechanischer Webstuhl)

### 2. Industrielle Revolution:

Massenproduktion mit Hilfe der Nutzung der elektrischen Energie (Anfang 20. Jahrhundert)

### 3. Industrielle Revolution:

Automatisierung der Produktion durch Einsatz von Elektronik und IKT (1970er-Jahre)

### 4. Industrielle Revolution:

Heute selbständig agierende Produktionsanlagen unter Nutzung der CPS (Cyber Physical Systems)

Diese Entwicklungstendenz hat heute bereits in vielen Produktionsanlagen Einzug gehalten. Beispielsweise rufen sich automatisierte Maschinen selbständig Materialien aus dem Lager oder über das Internet vom Zulieferer ab. Der Mensch gibt „nur“ noch den Rahmen vor.

Betrachtet man diese Entwicklung aus Sicht der Sensoriker/Messtechniker, stellt man fest, dass jede Entwicklungsstufe der Industriellen Revolution einhergeht mit einer entsprechenden Entwicklung der Sensorik. So stehen am Anfang die rein mechanischen Sensoren (Sensor 1.0). Die Sensoren 2.0 sind dadurch gekennzeichnet, dass sie elektrische Signale ausgeben wie z. B. bei den Dehnmessstreifen. Die Kompensation bzw. Signalverstärkung erfolgt mit Hilfe diskreter Bauelemente. Die Einführung der Elektronik ermöglichte integrierte Signalverarbeitungen bei den Sensoren (Sensor 3.0). Dies erlaubt komplett neue Sensorfunktionen, wie z. B. digitale Schnittstellen oder auch Fail Safe Funktionen zur Selbstüberwachung.

Die ‚Sensoren 4.0‘ im Rahmen von ‚Industrie 4.0‘ stellen der Applikation nicht mehr nur die Messsignale elektronisch zur Verfügung, sondern senden auch applikationsangepasste Auswertungen der Messungen. Dabei können diese Sensoren zum Teil untereinander kommunizieren oder senden Auswertungen per Internet an zentrale Steuereinheiten. Notwendig wird diese Entwicklung der Sensorik, da es meist nicht sinnvoll bzw. möglich ist, die ständig steigenden Datenmengen zentral zu verarbeiten. Eine „Verdichtung“ der Daten im Sensor ist notwendig.

Ein Beispiel dafür ist eine Neuentwicklung eines Sensornetzwerkes zur Detektion der Durchbiegung von Hochstromkabeln.

Temperatur- und Lagesensoren werden in einem Sensormodul zusammen mit einer Funkeinheit zur drahtlosen Datenübertragung kombiniert. Die Energie wird aus dem Hochstromkabel induktiv ausgekoppelt. Die Sensoren übertragen die Daten jeweils an den benachbarten Sensor (zur Sicherheit auch an den übernächsten Sensor). Am Ende des Sensornetzwerkes werden die Daten gesammelt und z. B. per Internet an den Netzbetreiber gesendet, damit dieser die Last der Hochstromtrasse optimieren kann.



Abbildung 8  
Sensor-Entwicklung

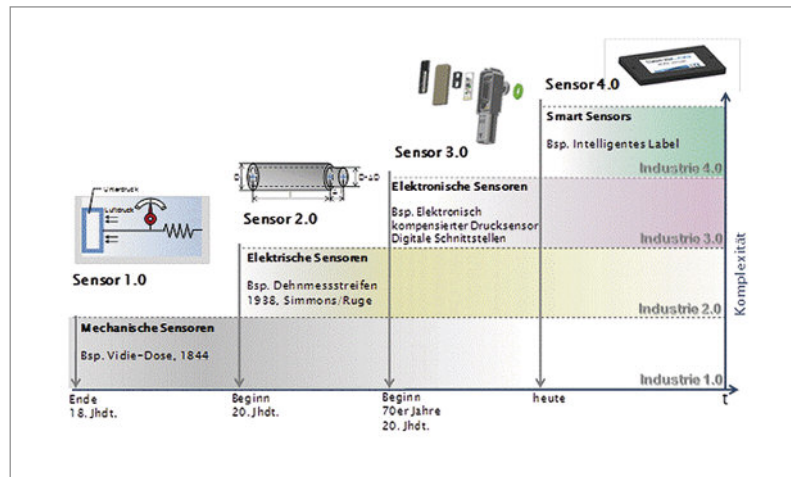
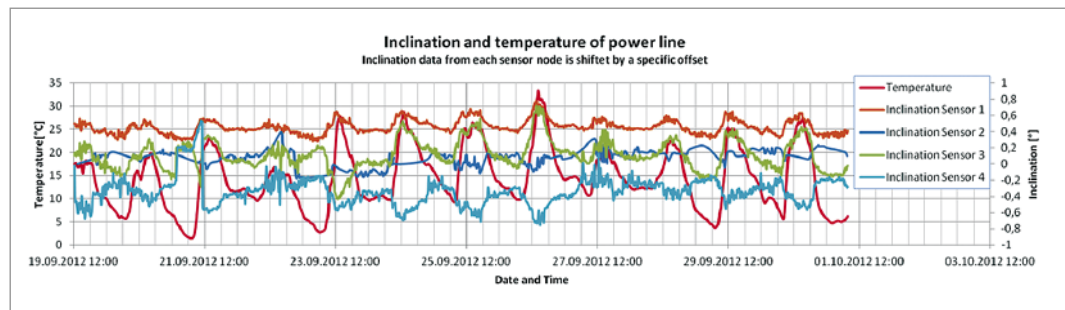


Abbildung 9  
Energimix



Abbildung 10  
Inclination  
and temperature  
of power line  
Inclination data from each sensor  
node is shifted by a specific offset



Derzeit findet ein regelrechter Hype um die ‚Industrie 4.0‘ statt. Trotz aller berechtigter Hoffnungen auf die neuen Entwicklungen darf man nicht vergessen,

- dass die Einführung neuer Technologien und Entwicklungsstufen nicht digital passiert, die ‚Industrie 4.0‘ also noch in den Kinderschuhen steckt
- dass wir z.B. in der Sensorik selbst in Deutschland immer noch sehr erfolgreich Sensoren der ‚Technologiestufe 1.0‘ verkaufen. Ältere Technologien haben weiter ihre Daseinsberechtigung und bieten hervorragende Marktmöglichkeiten
- dass die IKT ein wichtiger Baustein ist, aber ohne Beherrschung und weitere Innovationen der Hardware (z.B. in der Mikrosystemtechnik) nicht zur Marktführerschaft reicht. Das heißt, dass die erfolgreicherer Unternehmen der Zukunft die sein werden, die Innovationen der IKT mit der Hardware verbinden.

Andererseits werden bereits heute richtungsweisende Entwicklungen ‚Sensorik 4.0‘ gestartet. Wer heute anfängt, hat morgen Markt Vorteile.

## 8. Fazit

Die Effektivität bei der Energieerzeugung, Speicherung und Übertragung im Rahmen der erneuerbaren Energien wird wesentlich durch den Einsatz effektiver und robuster Sensorik bestimmt. Die genaue Kenntnis der Applikationsanforderung helfen den Sensorik- und Messtechnikfirmen Märkte zielgerichtet bei den erneuerbaren Energien zu bedienen.

Eine enge Zusammenarbeit bringt beiden Branchen Wettbewerbsvorteile.

# Punktsensoren: Messprinzipien, Sensortechnologien, Sensorelemente, optische Sensorik, AVT

## Einleitung: vom Messwertaufnehmer zum Cyberphysical System

Messwertaufnehmer ist ein etwas altmodischer, aber längst nicht veralteter Begriff für Sensoren, wobei Sensoren selbst i. d. R. aus dem Sensorelement und der zugehörigen Elektronik zusammengesetzt sind. Ziel jedes Messwertaufnehmers bzw. Sensors ist die Erfassung einer Messgröße und ihre Umsetzung in ein elektrisches (bei analogen Schnittstellen) oder logisches (bei digitalen Schnittstellen) Signal, das zur Anzeige und/oder Speicherung und/oder weiteren Verarbeitung, z. B. in Regelstrecken, weitergereicht wird, *Abbildung 1* [1]. Sensoren bilden die Basis für eine Vielzahl technischer Systeme und Anwendungen; sie stehen am Anfang der Informationskette und bilden somit das Fundament der heutigen Informationsgesellschaft.

Aktuelle Trends in der Sensorik gehen insbesondere hin zu Erweiterung von Sensoren zu intelligenten Systemen und Netzwerken, häufig umschrieben mit dem aktuellen Schlagwort *Cyberphysical Systems*, das den fließenden Übergang der realen, physikalischen Welt zur virtuellen Welt des Internet und Cyberspace thematisiert. Dabei sollte aber nicht übersehen werden, dass auch im Bereich der Sensorelemente selbst eine stetige und beeindruckende Weiterentwicklung stattfindet. Die wesentlichen Treiber hier sind verbesserte Funktion durch höhere Messgenauigkeit, Dynamik und Zuverlässigkeit sowie zunehmende Miniaturisierung und Integration der Sensorelemente. Treiber für die Miniaturisierung sind neben neuen Applikationen mit sehr beengten Platzverhältnissen, z. B. bei medizinischen Implantaten, zum einen der geringere Energieverbrauch der Sensoren, z. B. für mobile Anwendungen, zum anderen die geringere Rückwirkung der Messung sowie die

höhere Geschwindigkeit. Die Integration umfasst sowohl die Bündelung verschiedener Sensoren zu komplexen Systemen, aber auch die Integration digitaler bzw. drahtloser Schnittstellen. Diese Trends bringen teils beeindruckende Ergebnisse hervor, wie z. B. die Kompassensoren in Smart Phones, die dreidimensionale Beschleunigungssensoren sowie dreidimensionale Magnetfeldsensoren zur Erfassung der Ausrichtung integrieren und heute in riesigen Stückzahlen (ca. 500 Mio. p. a.) bei Stückpreise von weniger als 50 US-Ct. produziert werden [2].

## Messprinzipien

Es gibt eine nahezu unüberschaubare Vielfalt von physikalischen Effekten, die in Sensoren ausgenutzt werden, angefangen vom temperaturabhängigen Widerstand nahezu aller Materialien, der in resistiven Temperatursensoren vom preiswerten NTC bis zum hochwertigen Pt100 genutzt wird, bis zu Quanteneffekten wie dem Riesenmagnetowiderstandseffekt (GMR), der 1986 erstmals von Grünberg und Fert beschrieben wurde und für den beide 2007 den Nobelpreis für Physik erhielten. Für den Sensorutzer ist dieses Spektrum häufig unübersichtlich und verwirrend, zumal nur in den wenigen Fällen unmittelbar ersichtlich ist, warum ein neues Messprinzip plötzlich Verwendung findet bzw. grundlegend neue Ansätze entwickelt wurden; für die GMR-Sensorik waren Computerfestplatten der entscheidende Treiber, da bei diesen mit kleineren und empfindlicheren GMR-Leseköpfen eine erhebliche Steigerung der Speicherkapazität erzielt werden konnte. Man kann aber generell feststellen, dass in der Regel konkrete Anforderungen aus der Anwendung dazu führen, dass es eben nicht nur ein Sensorprinzip für eine Messgröße gibt, sondern ein breites Spektrum nebeneinander

Prof. Dr. Andreas Schütze  
 Universität des Saarlandes  
 schuetze@lmt.uni-saarland.de

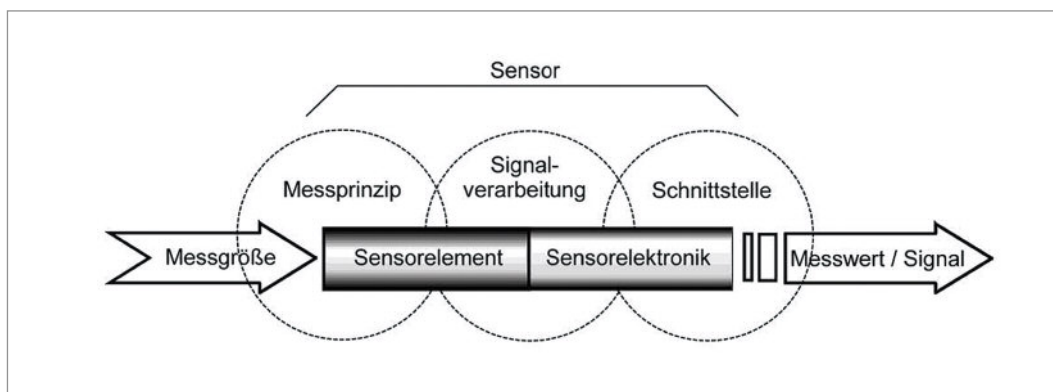


Abbildung 1  
 Ein Sensor wandelt eine Messgröße durch das physikalische Messprinzip des Sensorelements in ein internes Signal. Am Ausgang steht – ggfs. nach elektronischer Weiterverarbeitung – ein elektrisches oder logisches Signal zur Verfügung. So liefert ein typischer Drucksensor z. B. einen analogen Spannungswert. [1]

genutzter Prinzipien. Kriterien für die Auswahl eines Messprinzips sind z. B. der gewünschte Messbereich, die geforderte Messgenauigkeit (wobei zusätzlich noch unterschieden werden muss zwischen absoluter Messgenauigkeit und Wiederholgenauigkeit), das Auflösungsvermögen, die Messdauer, die Messumgebung im Hinblick auf z. B. Temperatur, Druck, Feuchte aber auch elektromagnetische Störungen und nicht zuletzt auch der Preis, der wiederum stark von den erforderlichen Stückzahlen abhängig ist. Nimmt man nur das Beispiel der Temperaturmessung, so findet man ein riesiges Spektrum, angefangen vom low-cost-NTC-Sensor über genaue Metallwiderstandsthermometer, integrierte Temperatursensoren mit digitalem Ausgang und Thermoelemente für hohe Temperaturen bis zu Schwingquarzen für höchste Auflösungen im mK-Bereich. Speziell für den Bereich erneuerbare Energien und Energieeffizienz kommen weitere interessante Sensorprinzipien hinzu: faseroptische Sensoren, die verteilte Temperaturmessungen mittels Faser-Bragg-Gittern ermöglichen, haben ein großes Potential sowohl für Windkraftanlagen, da elektrisch nicht leitende faseroptische Sensoren verteilte Messungen in Rotorblättern ermöglichen, als auch im Bereich Elektromobilität zur Überwachung der Zellen in Li-Ionen-Batterien für optimierte Ladeprozesse und verlängerte Haltbarkeit. Umgekehrt zeigen diese Beispiele, dass die Entwicklung neuer Sensoren eine enge Interaktion von Experten aus der Sensorik und Messtechnik einerseits und aus der Anwendung andererseits erfordern, um die Sensoren auf die Bedürfnisse der Applikation hin zu optimieren.

Hinzu kommen Messprinzipien, die immer wiederkehren und Nachteile „nackter“ Sensoren ausgleichen und damit manches physikalische Prinzip für die Anwendung überhaupt erst praktisch nutzbar machen. Konkret sind die folgenden drei Prinzipien zu nennen:

- Differenzprinzip: wird zur Kompensation von Störungen, vor allem Temperatureinflüssen, eingesetzt; am bekanntesten sind die vielfach eingesetzten Messbrücken, z. B. bei Kraft- und Drucksensoren, aber auch bei magnetoresistiven Sensoren [3]. Das Differenzprinzip findet sich aber z. B. auch bei oberflächenmikromechanischen Drucksensoren, in denen zwei Arten von Druckzellen integriert sind: eine mit dicker Membran, eine mit dünner; nur die dünnen Membranen werden bei Druckbeaufschlagung verformt. Damit lassen sich neben Umgebungseinflüssen auch fertigungsbedingte Streuungen weitgehend ausgleichen. Das Differenzprinzip wird auch genutzt z. B. bei Durchfluss- und Drehratensensoren auf Basis des Corioliseffekts (es werden immer zwei gegenläufig schwingende Elemente eingesetzt,

um Einflüsse von externen Vibrationen bzw. Beschleunigungen auszugleichen) und bei Wärmetönungssensoren (chemische Sensoren zur Messung brennbarer Gase, auch als Pellistoren bezeichnet).

- Aktive Messung: dabei wird das Sensorelement aktiv angeregt und der Einfluss der Messgröße auf die Sensorantwort bestimmt. Neben den bereits angesprochenen Sensoren auf Basis des Corioliseffekts ist hier insbesondere das Kompensationsprinzip von Interesse, bei dem die Wirkung der Messgröße auf den Sensor aktiv kompensiert wird, so dass dieser letztlich immer im Nullpunkt bleibt. Das eigentliche Messsignal ist dann die zur Kompensation erforderliche Anregung. Beispiele hierfür sind magnetische Stromsensoren [3] sowie integrierte Beschleunigungssensoren. Neben der Verbesserung der Messung an sich erlauben aktive Prinzipien häufig auch einen Sensorselbsttest. In unseren eigenen Arbeiten setzen wir aktive Messverfahren bei chemischen Sensoren ein, um damit insbesondere die Selektivität, aber auch die Stabilität der Messsysteme deutlich zu erhöhen. Neben dem temperaturzyklischen Betrieb [4, 5, 6] fallen auch Impedanzmessungen oder Biaszyklen unter den Oberbegriff dieser virtuellen Multisensoren, da mit einem einzigen Sensorelement komplexe Signalmuster erfasst werden, die eine ähnliche Aussagekraft haben wie Multisensorarrays.
- Physikalische Messung chemischer Größen: vor allem die mangelnde Stabilität ist ein großer Nachteil vieler chemischer Sensoren. Die Wechselwirkung des Sensor(material)s mit chemischen Komponenten führt zu Veränderungen, die sich als Drift, Alterung oder Vergiftung zeigen. Physikalische Sensoren zeigen diese Effekte in der Regel nicht, da sie hermetisch gekapselt sind, gerade um chemische Veränderungen wie z. B. Korrosion auszuschließen. Daher ist es naheliegend, auch chemische Information, d. h. Anwesenheit und Konzentration einer bestimmten Substanz in der Gas- oder Flüssigkeitsphase, physikalisch zu messen. Bereits seit langem etabliert ist die (ND)IR-Messtechnik, um z. B. CO<sub>2</sub>, aber auch eine Vielzahl anderer Gase mit hoher Genauigkeit und Langzeitstabilität messen zu können. In unserer Arbeitsgruppe werden derzeit Mikrosensoren untersucht, die das Mischungsverhältnis von (binären) Flüssigkeitsmischungen bestimmen können, *Abbildung 2* [7]. Einsatzmöglichkeiten liegen hier bei Direkt-Methanol-Brennstoffzellen sowie in der Überwachung des Harnstoff-Wasser-Gemisches in De-NOX-Systemen der Automobiltechnik.

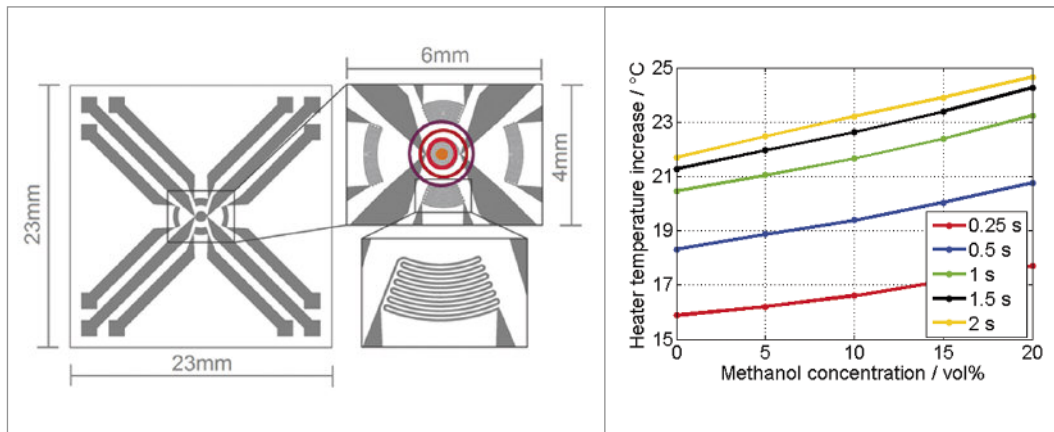


Abbildung 2  
Mikrothermischer Sensor zur Regelung der Methanolkonzentration in Direkt-Methanol-Brennstoffzellen (DMFC). Die Aufheizung eines Mikroheizers in der Flüssigkeit ist ein Maß für das Mischungsverhältnis; mit zusätzlichen, um den Heizer angeordneten Temperatursensoren kann zugleich die Strömungsgeschwindigkeit gemessen bzw. kompensiert werden.

Nutzung dieser grundlegenden Prinzipien, egal ob einzeln oder auch kombiniert, ermöglicht die Realisierung deutlich leistungsfähigerer Messsysteme; natürlich steigt gleichzeitig die Komplexität des „Sensors“ und damit auch seine Kosten, so dass letztlich die Erfordernisse der Anwendung auch hier den Ausschlag geben, welche Prinzipien in der Praxis eingesetzt werden.

### Sensortechnologien: Mikrosystemtechnik und Nanotechnologie

Die Sensorik hat in besonderem Maße von der Mikrosystemtechnik profitiert, die es ermöglicht, neben elektronischen auch mechanische, optische und chemische Funktionen in miniaturisierten Komponenten und Systemen zu nutzen [8]. Neben Mikrotechnologien und Systemtechniken tragen auch die Nano- und Biotechnologie dazu bei, Sensorik und Messtechnik immer leistungsfähiger zu machen, *Abbildung 3*. Die Mikrosystemtechnik erlaubt dabei zum einen die Schaffung sehr kleiner Sensoren und Messsysteme; allerdings ist die Miniaturisierung nur in Ausnahmefällen wie der Medizintechnik der eigentliche Antrieb. Für die breite Anwendung viel relevanter ist die aus der Mikroelektronik übernommene Batchprozessierung, die durch parallele Fertigung vieler identischer Strukturen sehr niedrige Stückkosten erlaubt und damit die heute allgegenwärtige Sensorik erst ermöglicht hat. Aber auch die Funktion wird häufig durch die Miniaturisierung verbessert oder gar erst ermöglicht. Insbesondere die Geschwindigkeit der Sensorreaktion profitiert von der Verkleinerung der Strukturen. Winzige Strahlungssensoren erlauben die Fiebermessung im Ohr in Sekundenschnelle; Beschleunigungssensoren im  $\mu\text{m}$ -Maßstab erlauben erst die Reaktion in wenigen Millisekunden, die für Front- und Seitenairbags unabdingbar ist. Die Physik ist dabei unverändert: Zeitkonstanten elektromechanischer Systeme skalieren umgekehrt proportional zu deren linearen Abmessungen. Der Effekt ist von



Abbildung 3  
Die Mikrosystemtechnik bündelt verschiedenste Technologien im Miniaturmaßstab und erlaubt damit die Schaffung komplexer Mikrosysteme, die in der Praxis insbesondere Sensorik und Signalverarbeitung verknüpfen („intelligenter Sensor“).

Saiteninstrumenten bekannt: eine Halbierung der Saitenlänge verdoppelt die Frequenz. In der Mikro-mechanik verkleinert man allerdings Systeme vom Millimetermaßstab auf den  $\mu\text{m}$ -Maßstab, so dass sie typisch um den Faktor 1000 schneller werden.

Noch kleinere Strukturen werden mittels Nanotechnologie erzielt, gleichzeitig ergeben sich durch die Abmessungen in atomaren Dimensionen neue Effekte. Beispiele sind der oben bereits erwähnte GMR-Effekt, der sehr große Widerstandsunterschiede durch Spin-abhängige Streuung der Elektronen hervorruft. Andere Beispiele sind chemische Sensoren, die durch Nanocluster eine größere Oberfläche und damit höhere Empfindlichkeit erreichen. Aber auch altbekannte Sensoren können durch Nanotechnologie erheblich verbessert werden: neue Entwicklungen bei Dehnungsmessstreifen mit Metall-Nanoclustern eingebettet in Graphen-artigen Kohlenstoffschichten weisen zum einen etwa zehnfach höhere Empfindlichkeit auf, gleichzeitig kann durch die Einstellung des Metallgehalts der Temperaturkoeffizient nahezu beliebig angepasst werden, um einen optimalen Temperaturgang zu gewährleisten [9].



Auch die Biosensorik eröffnet vielfältige Möglichkeiten, insbesondere in der Medizintechnik und Biotechnologie und damit auch für Anwendungen z. B. im Bereich Biogaserzeugung. Biosensoren erreichen extrem hohe Sensitivitäten und Selektivitäten, allerdings ist ihre Stabilität eher gering, so dass die Biosensorik heute praktisch nur bei Einwegsensoren eingesetzt wird.

### Optische Sensorik

Eine besonders rasante Entwicklung haben optische Sensortechnologien in den letzten Jahren genommen. Optische Sensoren sind berührungslos, schnell, störungsempfindlich (insbesondere im Hinblick auf elektromagnetische Verträglichkeit). Faseroptische Sensoren sind integrierbar in Komponenten und ganze Bauwerke, z. B. zur Überwachung von Rotorblättern bei Windkraftanlagen. Sie sind flexibel, mehrgrößenfähig und für eine Vielzahl von Messgrößen einsetzbar, z. B. für Dehnung, Druck, Beschleunigung aber auch Magnetfelder sowie diverse chemische

Größen. Die Einreichungen des AMA Innovationspreises der letzten Jahre zeigen deutlich, dass optische Sensoren sich in einer Vielzahl von Anwendungen etabliert haben und weiter an Bedeutung gewinnen. Ein Beispiel ist die Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy (TDLAS) zur Messung und Regelung von CO im Abgas z. B. von Kleinf Feuerungsanlagen. Im Detektor eingeschlossenes Methan wird als integriertes Referenzgas genutzt, um beim Durchstimmen der Laserdiode eindeutig die Lage und Höhe der CO-Absorption zu bestimmen [10].

Miniaturisierte optische Systeme werden u. a. für den Einsatz in Condition Monitoring Systemen zur Bestimmung der Ölqualität entwickelt, *Abbildung 4*. Das vierkanalige IR-Messsystem erlaubt die Messung des chemischen Ölzustands und kann so Alterung durch Oxidation, Additivabbau und Wasseranreicherung erkennen und unterscheiden. Die Informationen erlaubt nicht nur bedarfsgerechte Ölwechsel und damit eine deutlich verringerte Umweltbelastung, sondern auch eine Systemanalyse zur frühzeitigen Erkennung von Fehlfunktionen [11]. Durch Kombination mit einem optischen Partikelsensor können neben chemischen auch physikalische Schäden erkannt und analysiert werden, da eine Unterscheidung von Staub- und Metallpartikeln sowie Luftblasen möglich ist [12].

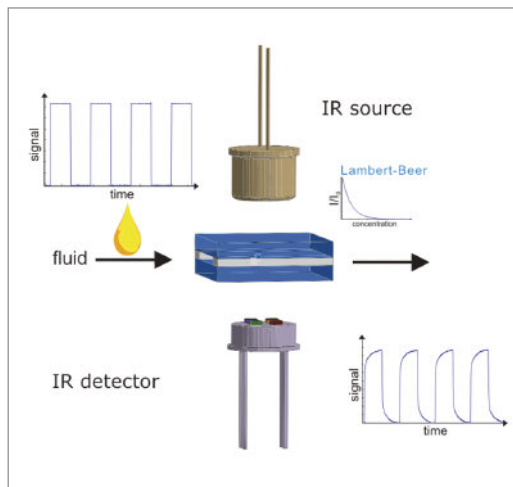
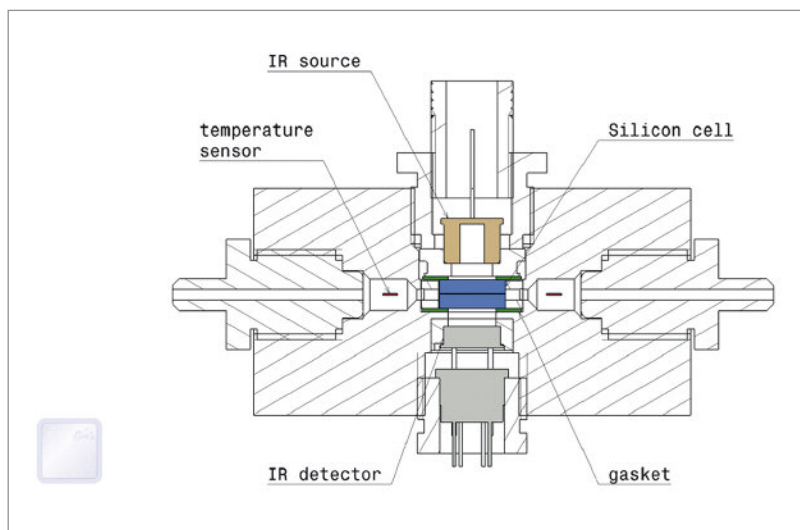


Abbildung 4  
Miniaturisiertes IR-Sensorsystem zur Bestimmung der Ölqualität, z. B. für das Condition Monitoring im Getriebe von Windenergieanlagen.

Oben: Prinzipbild

Unten: Querschnitt durch einen Messblock mit integrierter Silizium-Durchflusszelle, IR-Quelle und Vierfach-Detektor sowie Temperatursensoren zur Kompensation von Störeffekten. Die Messzelle erlaubt den direkten Einsatz im Hydraulikkreislauf bei Drücken von bis zu 100 bar.



### Aufbau- und Verbindungstechnik

Ein oft unterschätzter Bereich ist die Aufbau- und Verbindungstechnik, d. h. die Integration der Sensorelemente in Gehäuse und deren Anbindung an die Umgebung. Auf Chipebene unterscheidet man monolithische – alle Funktionen auf einem Chip – und hybride Integration – d. h. Kombination mehrerer Chips in einem Gehäuse. In den meisten Fällen

wird heute Hybridintegration eingesetzt, da so die Technologie für alle Komponenten separat optimiert werden kann. Monolithische Integration ist nur dann sinnvoll, wenn entweder der Einbauraum sehr beengt ist oder die Kosten ausschlaggebend sind, vor allem bei extrem hohen Stückzahlen. Für die Praxis wesentlich relevanter ist allerdings die Gehäusetechnik, die auf ein breites Spektrum von Technologien zurückgreifen kann, angefangen von der klassischen Leiterplatte über keramische Systeme wie LTCC (Low Temperature Co-fired Ceramics) bis zu modernen Molded Interconnect Devices (MID). Die Gehäusetechnik ist dabei jeweils auf die Anwendung angepasst, sei es für die Medizintechnik, Automobilanwendungen oder erneuerbare Energien, und ist häufig entscheidend für die stabile Funktion in rauer Umgebung.

## Fazit

Sensorik und Messtechnik sind faszinierend und vielfältig, sie kombinieren Physik, Chemie, Mikrosystemtechnik und Nanotechnologie, aber auch Elektronik und Signalauswertung. Sie sind Querschnittstechnologien von besonderer Bedeutung für unsere moderne Technik und Basis der Informationstechnik. Als enabling technology sind Sensoren ein Schlüssel für erneuerbare Energien und Energieeffizienz. Dabei werden sie sowohl für die Erforschung neuer Lösungen zwingend benötigt, als auch für deren späteren Betrieb und die Optimierung der Systeme. Um die erforderliche Funktion, Genauigkeit und Zuverlässigkeit zu erreichen ist eine exakte Anpassung auf die Applikation unabdingbar. Dies erfordert eine enge Interaktion von Sensorentwicklern mit den Anwendern.

## Literatur

- [1] Sensor-Trends 2014 – Trends in zukunftsorientierten Sensortechnologien, AMA Fachverband für Sensorik e. V. (Hrsg.), April 2010.
- [2] W.D. Jones: A Compass in Every Smartphone, IEEE Spectrum, Feb. 2010.
- [3] A. Schütze: MR-Sensorenanwendungen in der Automatisierungstechnik: Prinzipien und Herausforderungen, Tagungsband des 8. MR-Symposiums, Sensitec GmbH (Hrsg.), Wetzlar, 8.–9. März 2005.
- [4] A. Schütze, A. Gramm, T. Rühl: Identification of Organic Solvents by a Virtual Multisensor System with Hierarchical Classification, IEEE Sensors Journal, Vol. 4, No. 6, 2004, pp. 857–863.
- [5] M. Lösch, M. Baumbach, A. Schütze: Ozone detection in the ppb-range with improved stability and reduced cross sensitivity, Sensors and Actuators B: Chemical, Vol. 130, Issue 1, Pages 367–373.
- [6] C. Bur, P. Reimann, M. Andersson, A. Schütze, A.L. Spetz: Increasing the Selectivity of Pt-Gate SiC Field Effect Gas Sensors by Dynamic Temperature Modulation, IEEE Sensors Journal, Vol. 12 Iss: 6, pp. 1906–1913.
- [7] B. Schmitt, C. Kiefer, A. Schütze: Novel Microthermal Sensor for Quantification of Methanol in Water for Direct Methanol Fuel Cells, Proceedings SENSOR 2013, Nuremberg, May 14–16, 2013.
- [8] A. Botthof, W. Claußen, A. Schütze, H. Sturm: Innovation durch Mikrointegration – Intelligente Produkte über Systemintegration von Mikro-, Bio- und Nanotechniken, Dokumentation zum Stand der Mikrosystemtechnik stellt im Auftrag des BMBF, VDI/VDE-Technologiezentrum Informationstechnik GmbH, Teltow, 1998.
- [9] R. Koppert, D. Göttel, G. Schultes, U. Werner: NanoNi@C: Hochempfindliche Funktionsschicht für Druck- und Kraftsensoren, tm – Technisches Messen: Vol. 77, No. 12, pp. 631–637. doi: 10.1524/teme.2010.0111
- [10] J. Chen, A. Hangauer, R. Strzoda, M.-C. Amann: VCSEL-based calibration-free carbon monoxide sensor at 2.3  $\mu\text{m}$  with in-line reference cell, Applied Physics B, Volume 102, Issue 2, pp.381–389
- [11] T. Bley, A. Schütze: A Multichannel IR Sensor System for Condition Monitoring of Technical Fluids, Proceedings IRS<sup>2</sup> 2011–12<sup>th</sup> International Conference on Infrared Sensors and Systems, Nuremberg, Germany, June 7–8, 2011, pp. 94–99, ISBN 978-3-9810993-9-3; doi: 10.5162/irs11/i4.3
- [12] T. Bley, E. Pignanelli, A. Schütze: COPS – Combined Oil quality and Particle measurement System, ICST 2012, Sixth International Conference on Sensing Technology, Kolkata, India, December 18–21, 2012.

# Smart Sensors

Josef Sauerer  
 Fraunhofer-Institut für Integrierte  
 Schaltungen IIS  
 josef.sauerer@iis.fraunhofer.de

In der klassischen Definition ist ein Sensor ein Element, das aus einer physikalischen Größe ein meist analoges elektrisches Signal erzeugt. Der Abgleich des Sensors, die Verarbeitung (z. B. Verstärkung, Filterung) und Übertragung des elektrischen Ausgangssignals ist Sache des Anwenders und erfordert sensor- und systemspezifisches Wissen.

Inzwischen entwickeln sich einfache Sensoren zu höher integrierten und intelligenten Systemen mit Selbstabgleich, Selbstüberwachung, umfangreicher Signalkonditionierung, Digitalisierung, digitaler Signalverarbeitung und digitalen Systemschnittstellen. Häufig werden nicht mehr analoge Messwerte an die lokale höhere Steuerungsebene übertragen, sondern digitale System- oder Störgrößen an zum Teil weit entfernte Überwachungszentralen.

Der Beitrag erläutert diesen Übergang vom Messwertaufnehmer zum Smart Sensor an einigen Beispielen und stellt einen Bezug zu aktuellen Entwicklungen in der Mikroelektronik und bei Halbleitertechnologien her. Kurz wird abschließend auf das Thema energieautarke Sensorik eingegangen.

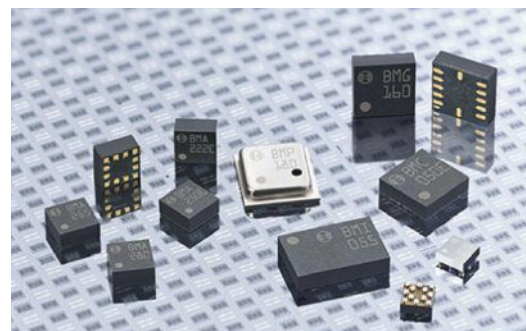
## Vom Messwertaufnehmer zum intelligenten Sensor

Abbildung 1 verdeutlicht die Entwicklung in der Sensorik: *Abbildung 1b* zeigt als Beispiel einen klassischen Drucksensor, der die physikalische Größe Druck in eine elektrische Ausgangsgröße umwandelt. Der Sensor ist als Wheatstonesche Vollbrücke aufgebaut und liefert eine druckabhängige Differenzspannung. Die Brückenschaltung ist häufig nullpunkt- und temperaturkompensiert, so dass sich in den meisten Applikationen der schaltungstechnische Aufwand auf eine einfache Signalverstärkung reduziert und direkt mit einem Instrumentenverstärker gearbeitet werden kann.

*Abbildung 1c* zeigt einen aktuellen Beschleunigungssensor der Fa. Bosch [3] [4]. Mittels System-in-Package-Technologien (SIP) werden MEMS-Sensoren mit komplexer integrierter Signalverarbeitung zu einem Modul mit minimalem Formfaktor assembliert. *Abbildung 2* verdeutlicht den Funktionsumfang solcher Sensorsysteme: In einem Gehäuse sind mehrachsige MEMS-Beschleunigungssensoren mit Drehratensensoren und der kompletten Signalverarbeitung kombiniert. Die Signalverarbeitung umfasst neben den Interfaceschaltungen zu den Beschleunigungssensoren (bestehend aus Referenzerzeugung, Kapazitäts-/Spannungswandlung und Analog-Digital-Umsetzer, ADU) und zu dem Drehratensensor noch Temperatursensor und Temperaturkompensation, Power-Management und eine komplexe digitale Signalverarbeitung mit Diagnose und Interfaceschaltungen (*Abbildung 2*) [5].

Dieses System der Fa. Bosch ist ein typisches Beispiel für einen Smart Sensor. Dies ist ein Sensor, der neben der eigentlichen Messgrößenerfassung auch die komplette Signalaufbereitung und Signalverarbeitung in einem Gehäuse vereinigt. Solche komplexen Senso-

Abbildung 1  
 Einordnung des Begriffs „Sensor“ bestehend aus Sensorelement und Elektronik (*Abbildung 1a*) [1]; ein klassischer Drucksensor (*Abbildung 1b*); intelligenter Sensor bestehend aus MEMS-Sensor und ASIC zur Signalverarbeitung als SIP (*Abbildung 1c*) [3, 4].



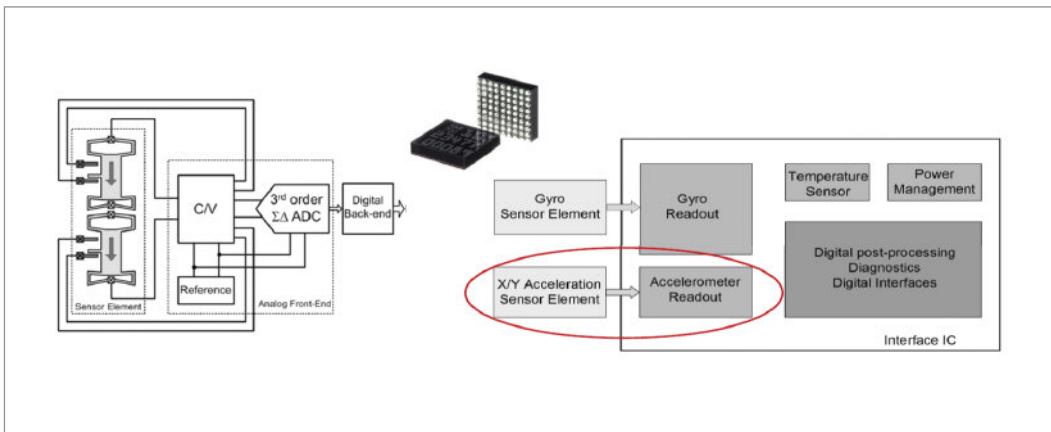


Abbildung 2  
Blockschaltbild eines Smart Sensors zur mehrachsigen Beschleunigungsmessung [5]

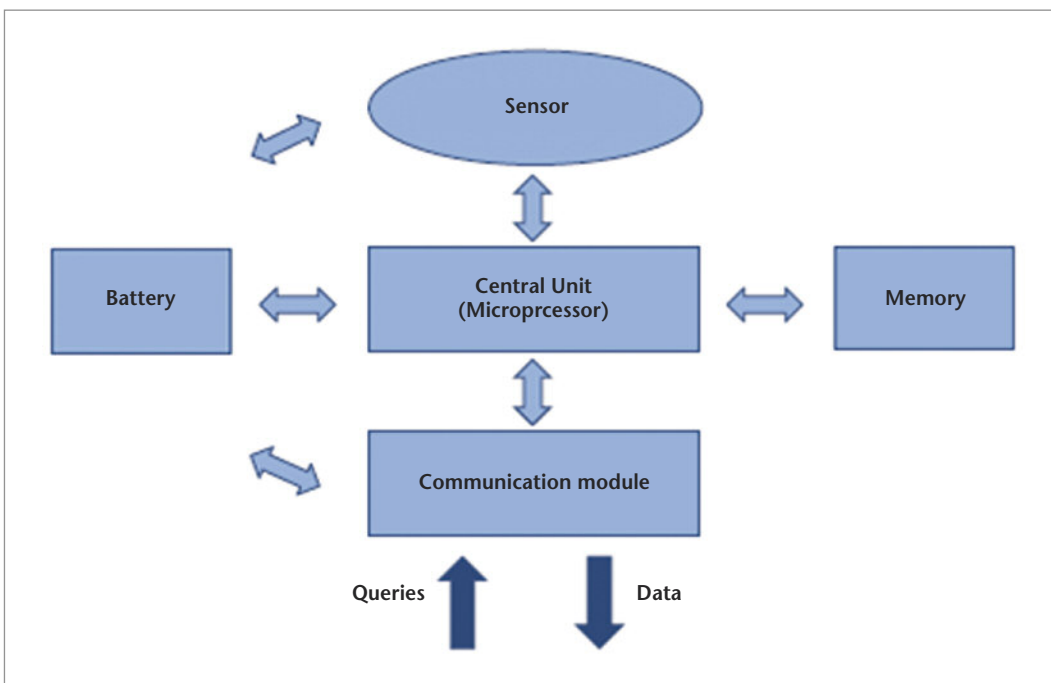


Abbildung 3  
Definition „Smart Sensor“

ren beinhalten meist u. a. einen Mikroprozessor oder Mikrocontroller, wenn nötig auch zusätzlich mit DSP-Funktionalität. Sie stellen standardisierte Schnittstellen zur Kommunikation mit übergeordneten Systemen bereit, z. B. über Feldbussysteme oder Sensornetze. Auf diese Weise soll die komplette anspruchsvolle Aufgabe solcher Sensoren ohne einen externen Rechner erfüllt werden, um den Forderungen nach Miniaturisierung, Dezentralisierung, Erhöhen der Zuverlässigkeit, Reduzieren der Kosten, Verbessern der Flexibilität Rechnung zu tragen.

Eine heute gebräuchliche Definition beschreibt daher einen Smart Sensor (Abbildung 3) als ein System, das

- ein digitales Ausgangssignal liefert, häufig über ein standardisiertes Interface; bei autarken Systemen auch über eine drahtlose Datenverbindung
- über eine Adresse ansprechbar ist und eine bidirektionale digitale Schnittstelle aufweist

- Befehle und logische Funktionen ausführt (komplexe Messwertverarbeitung bis hin zur Messwertbewertung)
- umfangreiche Abgleich- und Diagnosefähigkeiten besitzt
- meistens einen Datenspeicher und, vor allem bei autarken Systemen, einen Energiespeicher aufweist.

Ein Smart Sensor ist geeignet, die steigenden Anforderungen an die Sensorik bezüglich

- Miniaturisierung und damit näherer Heranführung der Sensoren an die Messgrößen
- höherer Genauigkeit und Zuverlässigkeit
- Erfassung und dezentraler Verarbeitung räumlich verteilter Messdaten
- Kombination unterschiedlicher Sensordaten (Sensorfusion)
- (drahtloser) Vernetzung und Autarkie

- höherer Zuverlässigkeit und geringerer Wartung
- Kostenreduktion

zu erfüllen und damit neue Anwendungen für die Sensorik im Bereich Condition Monitoring, eingebetteter Systeme oder verteilter, großzelliger Steuer- und Regelsysteme zu erschließen.

### Die Rolle der Mikro- und Nanotechnologien

Die technologische Basis dafür, dass solche komplexen, intelligenten Sensoren in Miniaturform überhaupt realisiert werden können, bilden die Fortschritte in der Mikrosystemtechnik für die Sensorentwicklung und in der Mikro- bzw. Nanoelektronik für die zunehmende Integrationsdichte und Miniaturisierung bei gleichzeitiger Kostenreduktion. Im Folgenden soll der Schwerpunkt auf der Rolle der Mikro- bzw. Nanoelektronik für die Signalverarbeitung liegen.

Tabelle 1 zeigt typische Kenndaten für aktuelle Halbleitertechnologien im Bereich 350 nm bis 40 nm. Der aktuelle Technologiefokus für ASIC-basierte Sensorsysteme liegt im Bereich 350 nm bis 180 nm. Für mikrocontroller-basierte Systeme liegt er bei den Technologieknoten 180 nm bzw. 90 nm. Die typischen Kenngrößen für die Knoten 65 nm und 40 nm wurden mit aufgenommen, um das zukünftige Entwicklungspotential aufzuzeigen. Die wesentlichen Trends sind

- Verringerung der Versorgungsspannung für den Kernbereich von 3,3 V bei 350 nm auf 1,2 V bei 90 nm als Folge des „constant field scalings“ in diesem Bereich
- Zunahme der Metalllagen von max 4 bei 350 nm auf max 10 bei 40 nm. Allerdings steigt die nötige Zahl der Masken überproportional, da bei kleineren Strukturgrößen zusätzliche Technologieschritte (z. B. zusätzliche Implantationsschritte) nötig werden. Dies bedeutet stark steigende Initialkosten für die Fertigung beim Übergang zu kleineren Technologien, da Masken für kleine Strukturen auch erheblich teurer sind. Dies wird aus wirtschaftlichen Gründen den verstärkten

Übergang zu plattformbasierten Entwicklungen erzwingen, um die Stückzahlen zu erhöhen

- Verringerung der Verlustleistung für digitale Schaltungen (von typ. 10 W/Gatter@100Mhz bei 350 nm auf z.B. 0,4 W/Gatter@100Mhz bei 90 nm. Gleichzeitig sinkt die Gatterverzögerungszeit um ca. 1/3 pro Technologieknoten, was eine höhere Verarbeitungsgeschwindigkeit ermöglicht.
- Verdoppelung der Gatterdichte pro Technologieknoten von typ. 20 kGatter/mm<sup>2</sup> bei 350 nm auf 400 kGatter/mm<sup>2</sup> bei 90 nm.

Für digitale Schaltungen bringt ein Übergang auf kleinere Strukturgrößen, abgesehen von den steigenden NRE-Kosten, die eine gesonderte Betrachtung der wirtschaftlichen Seite erfordern, also durchaus Vorteile bezüglich Integrationsdichte und Verarbeitungsleistung.

Für analoge Schaltungen für die Signalkonditionierung dagegen ist der Übergang zu kleineren Technologieknoten eher problematisch: Der Flächenbedarf analoger Schaltungen verringert sich nur geringfügig. Die niedrigeren maximalen Versorgungsspannungen bei kleineren Strukturgrößen erfordern neue analoge Schaltungstopologien, da die bei Analogschaltungen häufig verwendeten gestapelten Transistorstrukturen (z. B. Kaskodeschaltungen) nicht mehr möglich sind. Außerdem nehmen Parameterschwankungen (z. B. der Einsatzspannung) bei Technologien mit kleineren Strukturgrößen überproportional zu. Zusammen mit den reduzierten Versorgungsspannungen ergibt sich damit ein geringer Dynamikbereich für Analogsignale (Abbildung 4). Lösungsansätze, um dennoch von einem Technologieshrink zu profitieren, sind eine frühe Digitalisierung der Daten und digitale Signalkonditionierung (z. B. Filterung), digitale Kalibrier- oder Abgleichstrukturen für analoge Schaltungen („digital assisted analog“) oder die Kombination von Technologien mit kleinen Strukturgrößen für digitale Signalverarbeitung mit „guten“ Analogtechnologien z. B. mit Hilfe der 3D-Integration.

Ein Schlüsselbauelement für Smart Sensors sind ADUs. Deren Kenndaten bestimmen maßgeblich die erreichbare Messgenauigkeit. Bei früher Digitalisie-

Tabelle 1  
Typische Kenndaten unterschiedlicher Technologieknoten

	350 nm	250 nm	180 nm	90 nm	65 nm	40 nm
Vdd Core [V]	3,3	2,5	1,8	1,2	1,2	1,1
# Masken	> 20	> 25	> 26	> 39	> 33	> 36
# Metalllagen	≤ 4	≤ 5	≤ 6	≤ 9	≤ 9	≤ 10
Typ. (@100 Mhz) Verlustleistung/ Gatter	10 µW		1,7 µW	0,4 µW	0,12 µW	0,018 µW
Gatterdichte [kgates/mm <sup>2</sup> ]	20	40	90	400	800	2000



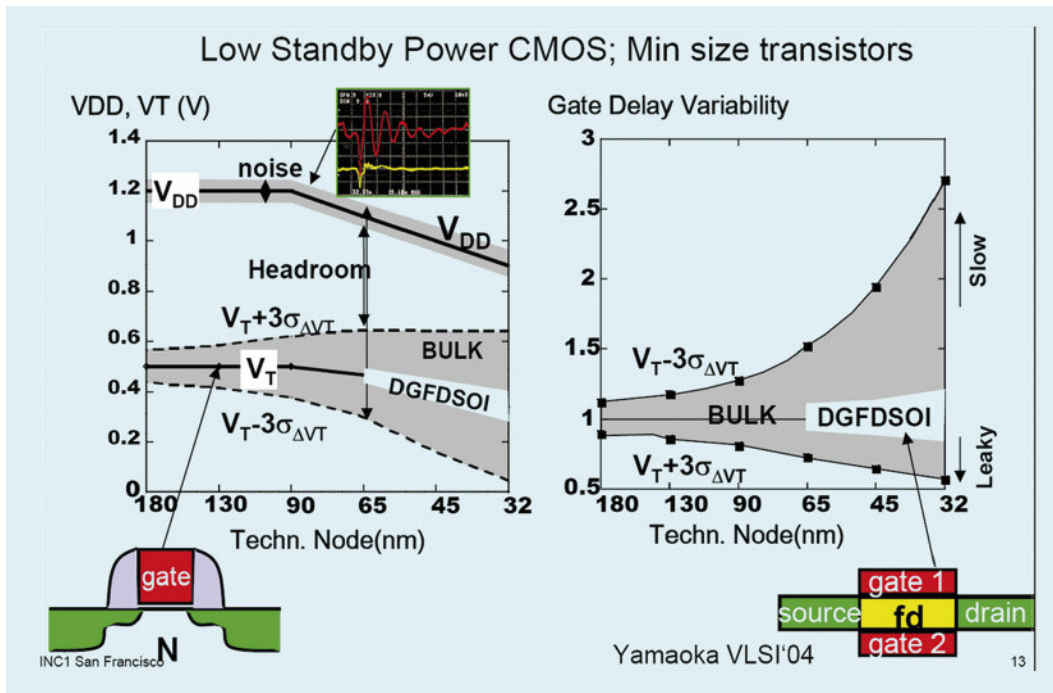


Abbildung 4  
Sinkende Versorgungsspannungen und größere Parameterschwankungen bei kleiner werdenden Technologieabmessungen schränken den Dynamikbereich analoger Schaltungen zunehmend ein.

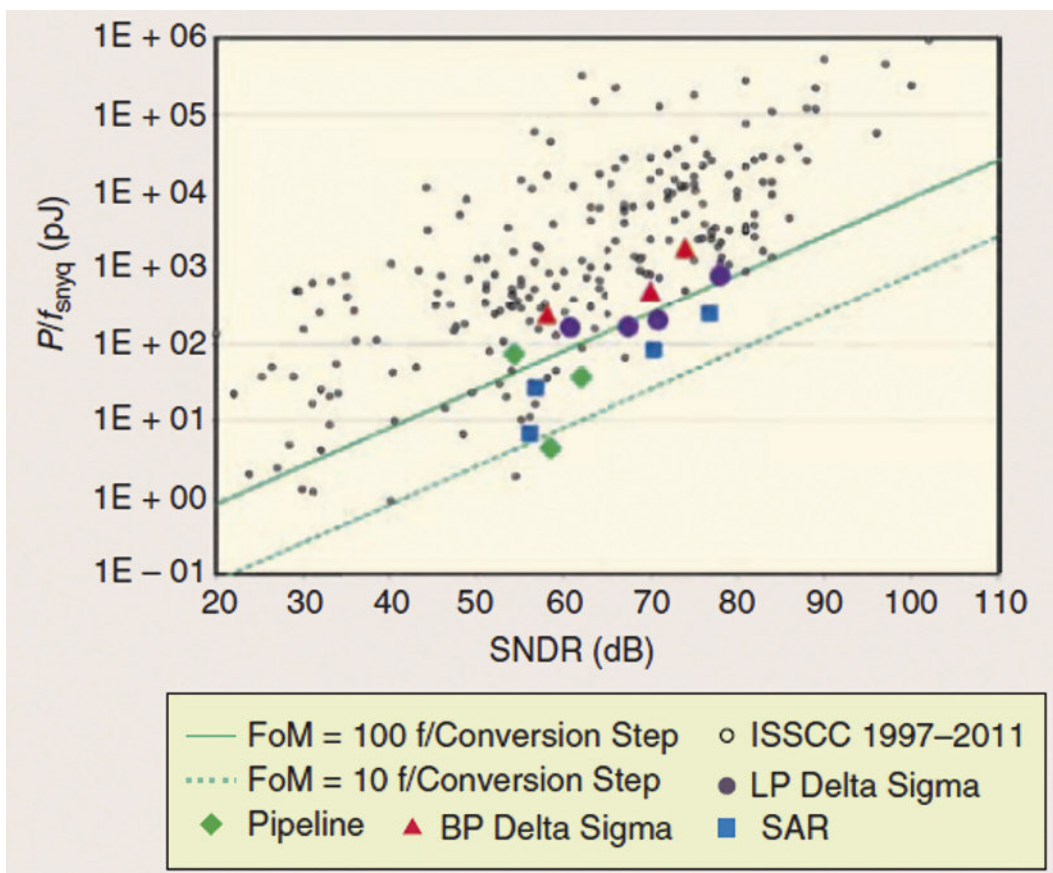


Abbildung 5  
Leistungseffizienz über SNDR für ADUs. Die Punkte zeigen ältere Veröffentlichungen, hervorgehoben sind aktuelle Veröffentlichungen aus dem Jahr 2012 für unterschiedliche ADU-Topologien.

Abbildung 6

Intelligentes Sensor-system für Wälz- oder Kugellager. Rechts ist das Block-schaltbild gezeigt, links unten das Layout mit farblicher Kennzeichnung der Funktionsblöcke [Fraunhofer IIS]

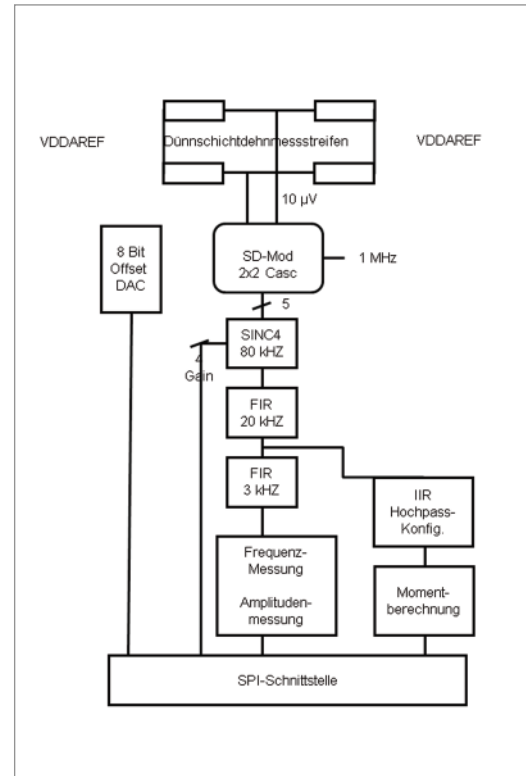
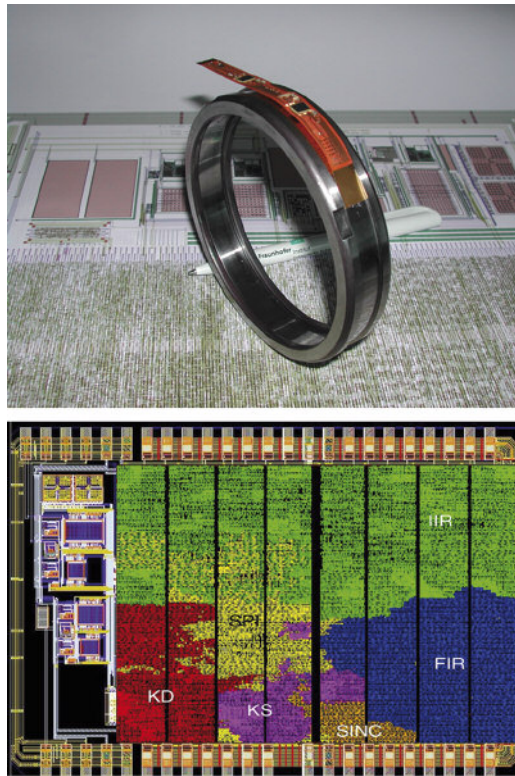
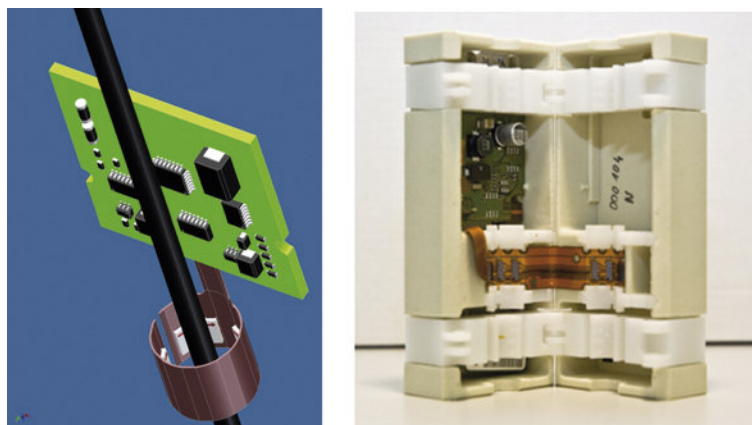


Abbildung 7

Smart Sensor für Leistungsmonitoring in elektrischen Anlagen oder Netzen [Fraunhofer IIS]



Die Genauigkeit der Analogsignale steigen üblicherweise auch die Anforderungen an die ADUs. Deshalb konzentrieren sich auch aktuelle Forschungsarbeiten weltweit auf neue Architekturen und Schaltungstopologien für ADUs. Durch Verbesserung digital orientierter Architekturen wie Delta Sigma ADUs oder sukzessive Approximationsumsetzer gelingt es, auch weiterhin die Trade-offs zwischen Signal-Rauschabstand, Bandbreite, Abtastfrequenz und Leistungseffizienz zu verbessern. *Abbildung 4* verdeutlicht an Hand von aktuell publizierten Ergebnissen den erreichten Fortschritt [6].

## Beispiele für Smart Sensors

*Abbildung 6* zeigt das Beispiel eines Smart Sensors für Condition Monitoring bei Wälz- oder Kugellagern. Auf der Lagerschale befinden sich Dehnmessstreifen (DMS) und ein komplexer mixed-signal ASIC für Signalkonditionierung und Signalauswertung. *Abbildung 6 rechts* zeigt das Blockschaltbild für die Signalverarbeitung: Das Signal der DMS wird unmittelbar mit einem Sigma-Delta-ADU digitalisiert und über digitale Tiefpassfilter geführt. Eine spektrale Aufteilung des Signals ermöglicht im linken Zweig nach erneuter Filterung die Bestimmung von Umdrehungsgeschwindigkeit, Umdrehungsrichtung und Achslast. Aus den höherfrequenten Anteilen im linken Zweig können über eine Körperschallanalyse Aus-

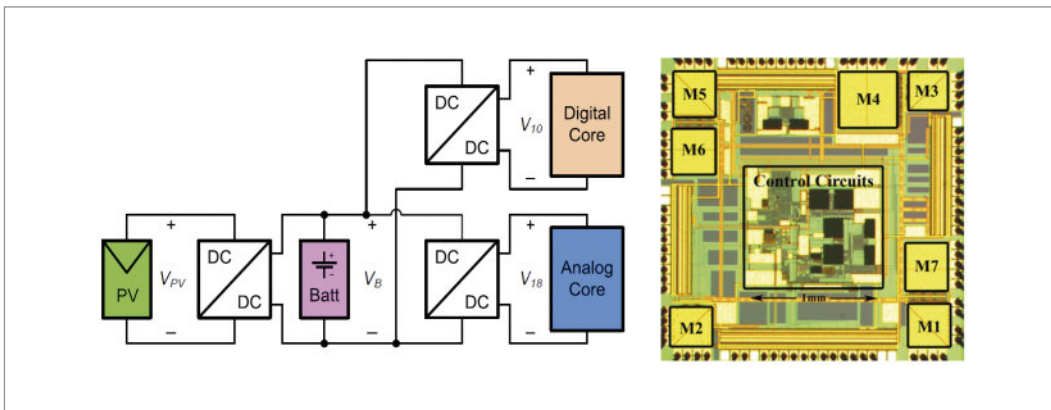


Abbildung 8  
ASIC für komplexes Powermanagement bei Energy Harvesting [8]

gen über den Verschleißzustand des Lagers abgeleitet werden, um mögliche Schäden frühzeitig vorhersagen zu können. Die Systemanbindung erfolgt über eine SPI-Schnittstelle. Im Layout des ASICs (Abbildung 6 links unten) sind die digitalen Komponenten des Blockschaltbilds unterschiedlich eingefärbt, um die Komplexität der unterschiedlichen Teile zu zeigen. Im oberen Teil des Layouts befinden sich der Analogteil und der ADU. Deutlich ist erkennbar, dass die analoge Signalverarbeitung stark reduziert ist.

Abbildung 7 zeigt einen Smart Sensor für Leistungsmonitoring in elektrischen Anlagen. Mit einem Modul, das ohne ihn aufzutrennen um einen elektrischen Leiter geklippt werden kann, werden Strom (auch DC), Spannung, Frequenz und Leistung erfasst. Das Grundprinzip des Sensors beruht auf der Diskretisierung des Ringintegrals. Mit einer definierten Anzahl von Hall-Sensoren, die auf einem Flex-Substrat montiert, um den Leiter gelegt werden, wird die magnetische Flussdichte an äquidistanten Punkten entlang einer kreisförmigen Kurve, um den stromführenden Leiter in tangentialer Richtung zur gedachten Integrations-Kurve gemessen und dient als Maß für den Strom. Die Datenübertragung erfolgt mittels einer RS485-Schnittstelle mit MODBUS-Protokoll.

### Autonome Sensoren mit Energy Harvesting

Bei der Erfassung großzellig räumlich verteilter Messdaten lassen sich durch autarke Sensoren mit drahtloser Datenübertragung und Energy Harvesting Aufwände für Verkabelung oder Batteriewechsel vermeiden, eine nahezu unbegrenzte Betriebszeit an schwer zugänglichen Stellen wird möglich. Aktuelle Forschungsvorhaben nutzen unterschiedliche Quellen wie Photovoltaik, Vibration, Temperaturunterschiede oder RF für die Energieerzeugung. Tabelle 2 zeigt Werte für Energiedichten, die heute erreicht werden. Sie liegen typischerweise im Bereich von einigen zehn  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ . Dennoch werden heute An-

Energiequelle	Energiedichte
PV (indoor)	10 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
Vibration	100 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
Temperaturdiff.	1 ... 20 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
RF (nicht NFC !)	0,01 ... 0,1 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$

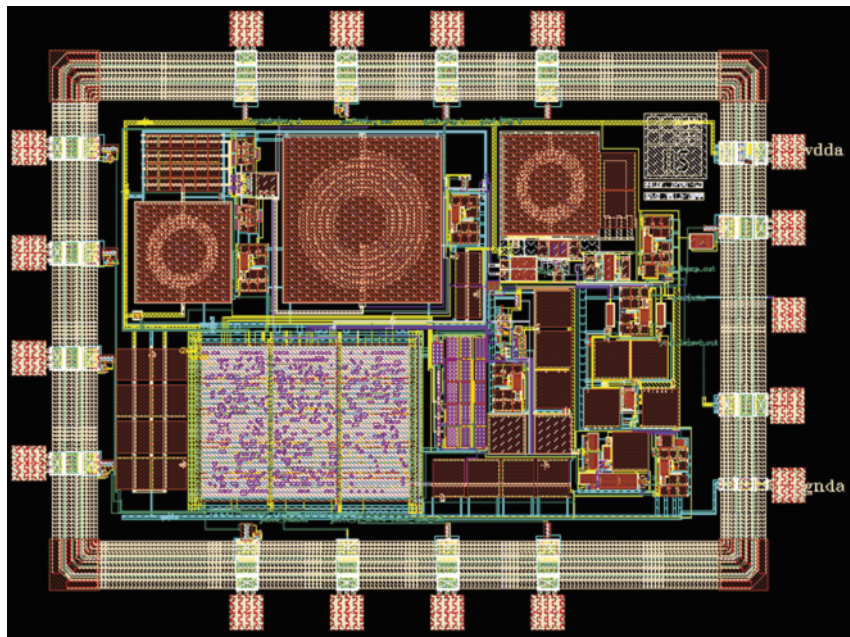
Tabelle 2  
Typische Energiedichten bei Energy Harvesting (PV: Photovoltaik; NFC: Near Field Communication)

wendungen autarker Sensorsysteme mit Energy Harvesting demonstriert. Allerdings müssen diese Systeme wegen der geringen Energie, die gewonnen werden kann, meistens getaktet betrieben werden und benötigen einen Energiespeicher (z. B. Kapazität oder Akku), der die Energie für Betriebszustände mit hohem Verbrauch zur Verfügung stellt. Für das Leistungsmanagement benötigen autarke Sensorsysteme daher DC/DC-Regler mit hohem Wirkungsgrad und niedrigen Betriebsspannungen. Abbildung 9 zeigt ein aktuelles Beispiel für ein Powermanagement eines autarken Sensorsystems [8].

Angesichts des Aufwandes für Energieerzeugung und -Speicherung ist es für energieautarke Sensoren unbedingt notwendig, den Energieverbrauch auf ein Minimum zu reduzieren. Dies gilt insbesondere für die drahtlose Kommunikation. Im Sendebetriebe ist die Möglichkeit zur Energiereduktion allerdings beschränkt, da eine gewisse Sendeleistung für die sichere Datenübertragung über bestimmte Entfernungen notwendig ist. Eine Reduktion des Energieverbrauchs ist allerdings auf der Empfangsseite möglich. Diese wird heute meistens durch zyklisches Ein- und Ausschalten des Empfängers erreicht. Dieses Duty Cycling kann jedoch eine hohe Ansprechzeit (Latenz) des Sensorsystems zur Folge haben. Aktuelle Forschungsarbeiten zielen daher auf die Entwicklung von WakeUp-Receiver, also extrem energiesparenden, immer eingeschalteten Empfängern mit geringer Bandbreite, die im Bedarfsfall das Sensorsystem mit geringer Latenz aufwecken (Abbildung 9) [9].



Abbildung 9  
Layout eines extrem  
leistungsarmen  
WakeUp-Empfängers  
[Fraunhofer IIS]



### Zusammenfassung

Der Trend in der Sensorik geht vom einfachen Messwertnehmer zum Smart Sensor mit lokaler Intelligenz, dezentraler Messwertverarbeitung, umfangreicher Funktionalität, digitalem Ausgangssignal und (drahtloser) Kommunikationsmöglichkeit. Mikrosystemtechnik und Mikro- bzw. Nanoelektronik sind Basistechnologien für diese Entwicklung.

Der zunehmende Funktionsumfang intelligenter Sensorknoten wird in Zukunft auch den Übergang zu Technologien mit kleineren Strukturgrößen erfordern. Aus wirtschaftlichen Erwägungen werden dann verstärkt flexible Plattformlösungen notwendig werden. Diese können controller-basiert sein oder auf konfigurierbare ASIC- oder FPGA-Strukturen aufsetzen. Die spezifischen Anforderungen (analoge Performance, minimale Verlustleistung) intelligenter Sensoren erfordern die Weiterentwicklung analoger Schaltungsstrukturen und neue Ansätze zur Verlustleistungsreduktion für fortschrittliche Technologie-knoten.

### Quellen

- [1] AMA Trendstudie:  
<http://www.ama-sensorik.de/site/de/309/einzeldruckschriften.html>
- [2] [http://ftp.ama-sensorik.de/Innovationspreis\\_Broschüre/AMA\\_Booklet\\_IP\\_web.pdf](http://ftp.ama-sensorik.de/Innovationspreis_Broschüre/AMA_Booklet_IP_web.pdf)
- [3] [http://www.bosch-sensortec.com/homepage/products\\_3/9\\_axis\\_sensors\\_5/9-axis\\_sensors](http://www.bosch-sensortec.com/homepage/products_3/9_axis_sensors_5/9-axis_sensors)

- [4] [http://www.bosch-sensortec.com/homepage/05\\_technologies/how\\_mems\\_sensors\\_work/](http://www.bosch-sensortec.com/homepage/05_technologies/how_mems_sensors_work/)
- [5] P. Petkov et al „A Fully Differential Charge-Balanced Accelerometer for Electronic Stability Control“ 2013 IEEE International Solid-State Circuits Conference, February 2013
- [6] O. Gassmann & J. Kottmann „Technologie-Management in der Sensorik: Ergebnisse einer empirischen Studie aus Anwendersicht“ Wissenschaftsmanagement (1/8), 2002
- [7] Smith, K.C. et al „Trend tracking for ISSCC 2012“ IEEE Solid-State Circuits Magazine, March 2012
- [8] K. Chew et al „A 400nW Single-Inductor Dual-Input-Tri-Output DC-DC Buck-Boost Converter with Maximum Power Point Tracking for Indoor Photovoltaic Energy Harvesting“, IEEE International Solid-State Circuits Conference, February 2013
- [9] H. Milosiu „Integrierter UHF-Funkempfänger mit niedrigem Stromverbrauch und geringer Antwortzeit für die störereichere Datenübertragung“, N & H Verlag GbR, 2013, ISBN: 978-3-9808530-4-0

# Bildgebende Sensoren, Bildauswerteverfahren

## Grundlagen: Wie entsteht ein Bild?

Ein digitales Bild besteht aus einer Matrix (Spalten + Reihen) von Bildpunkten, sogenannten Pixeln. Jeder Pixel liefert einen Intensitäts- oder Helligkeitswert. Die Abstufung oder Auflösung von schwarz bis weiß beträgt meistens 8 Bit, also 256 Graustufen.

Zur Aufnahme von Bildern werden digitale Bildaufnehmersensoren in Matrix- oder Zeilenkameras eingesetzt. Mit Zeilenkameras erhält man sehr hoch aufgelöste Bilder. Allerdings muss hier entweder die Kamera oder das Objekt verfahren werden (wie bei einem Scanner). Zusätzlich sind die vielen Spielarten der Beleuchtungsmöglichkeiten bei Zeilenkameras etwas eingeschränkter.

Natürliche Farbbilder erhält man bei Matrixkameras durch sogenannte Bayer-Pattern: Vor den einzelnen Pixeln befinden sich kleine Farbbilder. Jeder Pixel liefert eine Intensität entweder für Rot, Grün oder Blau. Dies reduziert natürlich die Auflösung, was bei einer Drei-Chip-Farbkamera nicht der Fall ist. Bei diesen Kameras wird jede der drei Farben über eine Prismenkonstruktion auf einem Bildaufnehmerchip abgebildet. Falschfarbener Bilder entstehen, wenn die Graustufen in Farben umgerechnet werden.

## Kameratypen

Die (aller-)meisten digitalen Kameras werden im visuellen (sichtbaren) Wellenlängenbereich betrieben und besitzen einen CCD- oder CMOS-Bildaufnehmersensor. Der Unterschied zu den meisten anderen bildgebenden Bildsensoren liegt in der spektralen Empfindlichkeit (Abb. 1).

In anderen Wellenlängen- oder Spektralbereichen können andere spektrale Eigenschaften genutzt und damit weitere Informationen gewonnen werden. Der dafür zugängliche Wellenlängenbereich beginnt im Röntgenbereich, geht über den ultravioletten und visuellen zum infraroten Bereich und endet (vorerst) beim Terahertz-Bereich.

Eine Besonderheit sind sogenannte Time-of-Flight-Kameras (ToF), die aus einer Matrix von Abstandssensoren bestehen.

## Röntgenbildgebung

Besonders ist für die zerstörungsfreie Prüfung die Bildgebung mit Röntgenstrahlung geeignet. Dabei liegt der Vorteil in der Eigenschaft der Durchdringungsfähigkeit. Bei Röntgenstrahlung handelt es sich – ebenso wie beim sichtbaren Licht – um elektromagnetische Strahlung. Im Gegensatz jedoch zu sichtbarem Licht ist die Wellenlänge von Röntgenstrahlung um Größenordnungen kleiner. Röntgenstrahlung wie sie in der industriellen Röntgenbildgebung genutzt wird, reicht von Photonenenergien von etwa 20 keV (das entspricht circa 0,06 nm Wellenlänge) für die Verwendung mit organischen Materialien bis zur Strahlung aus Linearbeschleunigern mit etwa zehn MeV (etwa 0,1 fm) für große, massive Objekte, zum Beispiel aus Metall. Dabei wird das Röntgenlicht in Abhängigkeit seiner Energie und der Eigenschaften des zu untersuchenden Gegenstandes geschwächt. Die gemessene Intensität nach Durchdringung des Prüfgegenstandes variiert somit mit dessen Dichte bzw. Ordnungszahl sowie der durchstrahlten Weglängen. Zweidimensionale Durchstrahlungsbilder stellen das Objekt somit durchscheinend

Dr. Helge Moritz  
3i – MORITZ  
info@3i-MORITZ.de

Prof. Dr. Randolf Hanke  
Fraunhofer IIS – Fraunhofer  
Institut für Integrierte Schaltungen  
randolf.hanke@iis.fraunhofer.de

Wolfgang Holub  
Fraunhofer IIS – Fraunhofer  
Institut für Integrierte Schaltungen  
wolfgang.holub@iis.fraunhofer.de

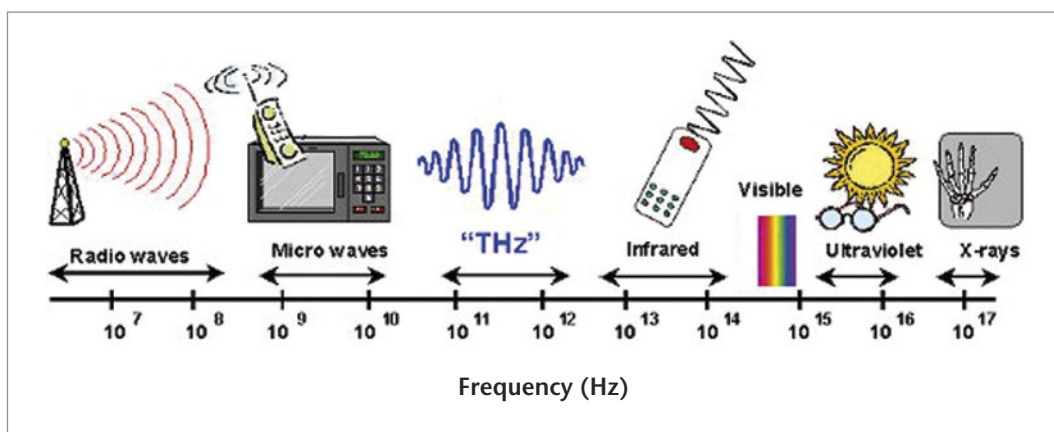


Abbildung 1  
Bildsensoren unterscheiden sich im Wesentlichen durch ihre spektrale Empfindlichkeit: Röntgen – UV – visuell – nahes Infrarot – IR – Terahertz

Abbildung 2a

a) Röntgen-Durchstrahlungsbild

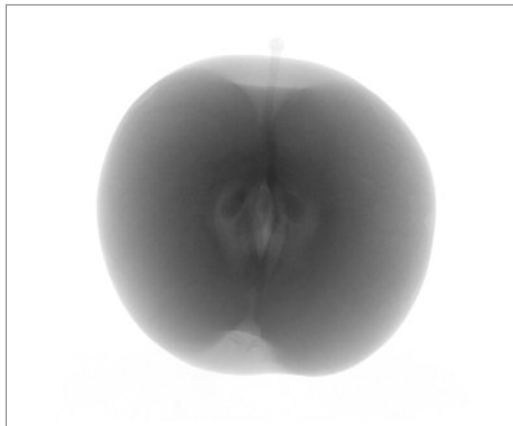


Abbildung 2b

b) Computertomographie-Schnittbild

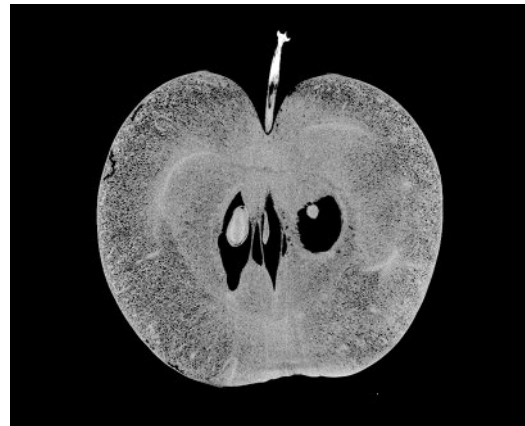
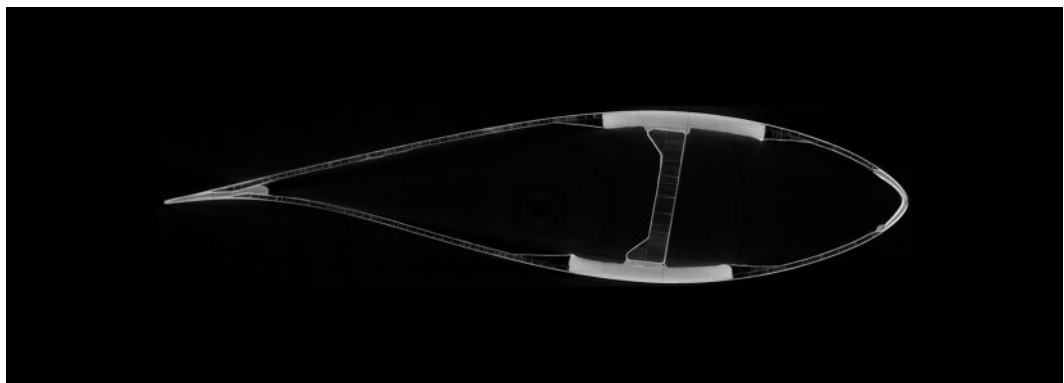


Abbildung 3

Computertomographie des Rotorblattes einer Windenergieanlage (circa 2 m Blatttiefe)



dar und zeigen Material höherer Dichte oder höherer Ordnungszahl mit relativ niedrigerer Intensität, das heißt im Vergleich zur Umgebung dunkler. Während bereits solche zweidimensionalen Durchstrahlungsbilder sehr wertvolle Erkenntnisse für die zerstörungsfreie Prüfung, Inspektion und Qualitätsüberwachung liefern, sind sie dennoch mit dem Nachteil behaftet, dass sich verschiedene Strukturen in unterschiedlicher Tiefe im Objekt überlagern und sich die dreidimensionale Anordnung vor allem in komplexeren Objekten nicht mehr erkennen lässt (Abb. 2a +b).

Die Röntgen-Computertomographie behebt diese Schwäche indem die zweidimensionalen Bilder aus einer Reihe verschiedener Perspektiven um das Objekt herum genutzt werden, um damit die exakte dreidimensionale Struktur mathematisch zu beschreiben und zu einem 3D-Bild des Inneren des Prüfgegenstandes zu rekonstruieren. Man erhält ein dreidimensionales Bild mit Länge, Breite und Tiefe, das – ähnlich einer digitalen Photographie – aus diskreten Einheiten, Voxeln (von ‚volumetric Pixel‘) aufgebaut ist. Der Wert eines solchen Voxels beschreibt so das Schwächungsverhalten des Objekts in der dazu korrespondierenden Raumeinheit.

Entsprechend kann die industrielle Röntgen-Computertomographie genutzt werden, um solche Fehler im Material hochgenau zu untersuchen, die eine

Abweichung im Schwächungsverhalten in mindestens einer solchen Raumeinheit, einem Voxel bewirken. Die erreichten Bilder sind mit Schnittbildern vergleichbar, die sonst nur durch Zerstörung der Prüfgegenstände erzielt werden können.

Man setzt Röntgenbildgebung und Computertomographie beispielsweise zur Bauteilprüfung, zur Materialcharakterisierung, Metrologie in der industriellen Forschung und Entwicklung, inline im Fertigungsprozess, zur Inspektion, in der Sicherheitstechnik, im Recycling oder in Paläontologie und Archäologie ein.

Im Bereich der erneuerbaren Energien bietet sich Röntgenbildgebung besonders zur Qualitätssicherung in der Photovoltaik an, wo höchstauflösende Röntgenbilder mit Pixelgrößen von gegebenenfalls deutlich unter einem Mikrometer die Suche nach feinsten Fehlern in Halbleitermaterialien ermöglichen. Ebenso eignet sich XXL-Computertomographie am entgegengesetzten Ende der Größenskala zur detaillierten Prüfung der Maschinenteile aber auch der Faserverbundbauteile von Windkraftanlagen. Das Fraunhofer EZRT betreibt, erforscht und entwickelt derzeit den weltweit größten Computertomographen, mit dem Ziel, zerstörungsfrei Objekte bis zwölf Meter Länge dreidimensional darzustellen. Mit der XXL-CT und dem Röntgenlicht aus einem Linearbeschleuniger lassen sich Objekte wie Frachtcontainer,

PKW oder Rotorblätter auf so feine innere Fehler wie Abweichungen in der Faserausrichtung von Compositmaterialien untersuchen.

## Allgemeines zur Industriellen Bildverarbeitung (IBV)

Bevor ein Bild ausgewertet werden kann, muss es erst einmal erzeugt werden. Und zwar derart, dass die Informationen, die man erhalten möchte, optimal hervor treten. Dabei spielt die Kamera, die eine von vielen Komponenten bei der Bildaufnahme ist, sogar eine untergeordnete Rolle (Abb. 4).

Als wichtigste Komponente ist die **Beleuchtung** auszumachen. Mit ihr werden die Aspekte in Kontrast gefasst, die man erkennen möchte. Zu berücksichtigen sind im Wesentlichen: Anordnung (Auflicht, Durchlicht, streifende Dunkelfeldbeleuchtung, strukturierte Beleuchtung, ...), Lichterzeugung (meist LED), Farbe, Helligkeit, Polarisation, geometrische Abmessung und Einbaumöglichkeiten.

Weiterhin ist natürlich die **Optik** wichtig, die das Bild der Szenerie auf den Bildsensor abbildet. Hier unterscheidet man im Wesentlichen zwischen „normalen“ entozentrischen Objektiven mit einem Öffnungswinkel (Brennweite), der zwischen einem Tele- und einem Weitwinkelobjektiv liegt, und sogenannten telezentrischen Objektiven. Diese Objektive besitzen zumindest objektseitig einen annähernd parallelen Strahlengang, weshalb diese Objektive gut für Vermessungsaufgaben geeignet sind. Spezielle Formen von Objektiven sind z. B. Endoskope oder sogenannte

Panorama-Objektive. Aspekte der Objektivauswahl sind: Arbeitsabstand, Brennweite, Abbildungsmaßstab, Lichtstärke (maximale Blendenöffnung), Abbildungsfehler, Schärfentiefe, Farbfilter und der Spektralbereich. Einige dieser Aspekte bedingen einander.

Kommen wir (endlich) zur **Kamera**. Wie bereits erwähnt, arbeiten die meisten Kameras, die für die IBV eingesetzt werden, im visuellen Spektralbereich vom UV bis zum nahen Infrarot (NIR). Folgende Aspekte gilt es zu beachten: Größe und Auflösung des Bildaufnehmer-Sensors (Anzahl der Pixel), Matrix- oder Zeilenkamera, CCD oder CMOS-Bildaufnehmer (interlaced, global shutter), Schwarzweiß- oder Farbkamera, Schnittstellen, maximale Anzahl von Bildern pro Sekunde (fps), spektrale Empfindlichkeit sowie Objektivanschluss.

Nach der Bildaufnahme beginnt die **Bildverarbeitung** oder Bildauswertung. Dabei ist es die Qualität der Bilder nicht mit den Maßstäben zu vergleichen, die Menschen an ein perfektes Abbild der Wirklichkeit haben. Vielmehr soll in der IBV ein gutes Bild die Bildauswertung unterstützen und vereinfachen. Daher sind viele Bilder in der IBV recht abstrakt.

Die Bildauswertung erledigt eine Software, die wiederum auf BV-Algorithmen oder -Tools zurückgreift. Inzwischen gibt es eine ganze Reihe von Anbietern von BV-Bibliotheken. Als ein prominentes Beispiel sei hier die Bibliothek Halcon des Münchener Anbieters MVTec genannt, die inzwischen etwa 1.800 Tools oder Operatoren für die Bildauswertung aufweist.

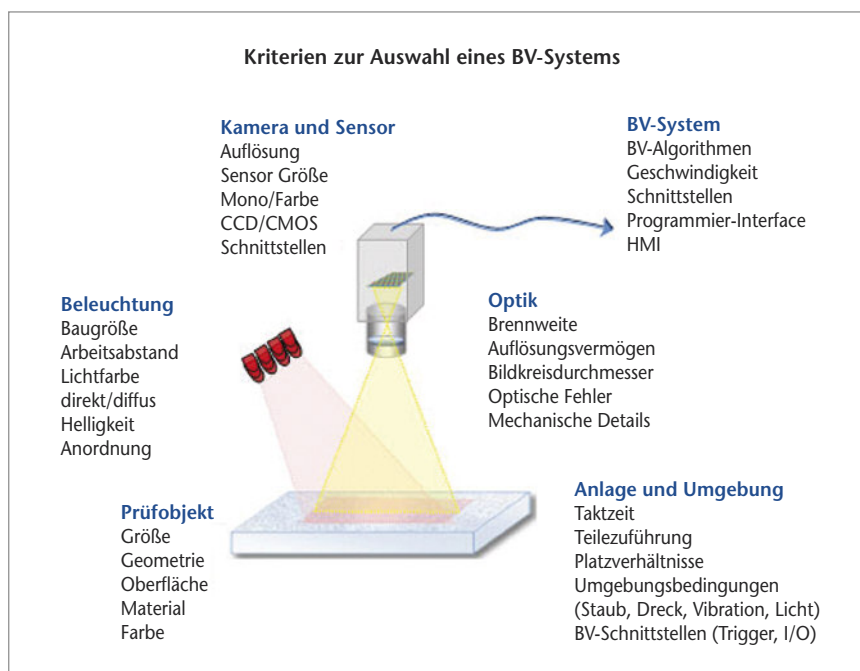


Abbildung 4

Die Hauptkomponenten eines IBV-Systems und einige Auswahlkriterien



## Typische Anwendungen

Wie BV-Tools eingesetzt werden, hängt sehr von der Applikation und der Kreativität des BV-Software-Entwicklers ab. Daher ist es wohl einfacher, typische Prüfaufgaben zu erwähnen:

- **Identifikation** von Objekten durch Form, Geometrie, Maße, Struktur, Farbe, Textur; z. B. Erkennen von Teilen, Lesen von Zeichen oder Codes (Barcodes, 2D-Codes), Vollständigkeitsprüfung.
- **Position** ( $x, y, z$ ; Flächen- oder Volumenschwerpunkt) und Orientierung (3 Raumwinkel) von Objekten, z. B., damit ein Portal oder Roboter danach greifen kann.
- **Vermessung** geometrische Abmessungen in 2D oder 3D; Genauigkeit ist abhängig von Bildfeldgröße.
- **Oberflächeninspektion** Defekte, Fehler, Anomalien, Welligkeiten, Rauheiten, Abweichungen von Farbe oder Textur
- **Inspektion** im Inneren von Objekten auf Materialinhomogenitäten, Fehlstellen, Defekte sowie auf innere Vermaßung, durch Computertomographie (CT, Röntgenstrahlung) oder Wärmefluss-Thermographie (IR)

Vereinfacht betrachtet ist die IBV ein Teil der Qualitätssicherung (QS), Automatisierungstechnik, zerstörungsfreier Inspektion und/oder berührungslosen Vermessung. Anwendungen findet man überall auch dort, wo die visuelle Prüfung durch einen Menschen automatisiert werden soll. Die Hauptbranchen, die die IBV einsetzen sind die Automobilindustrie, Robotik, Elektronik-Fertigung, Medizintechnik, Lebensmittelkontrolle, Druck, Verpackung aber auch Verkehrs- und Sicherheitstechnik.

Im Bereich der erneuerbaren Energien wird die IBV vielfältig in der Solar- und Photovoltaikbranche

eingesetzt. Ein Beispiel hierfür sind die Fehlstellenerkennung an Wafern, Zellen und Dünnschichtsubstraten sowie Kompletprüfung mittels Elektrolumineszenz.

Bei Windkraftanlagen können die elektrischen und mechanischen Komponenten durch Thermografiekameras auf Überhitzung überprüft werden. Mit Hilfe der aktiven Thermografie aber auch der CT können Delaminationen, Klebefehler und fehlerhafte Infusionen festgestellt werden.

Zusätzlich zu typischen Einsatzfällen, die hier aufgeführt wurden, gibt es sicherlich viele Fälle, die durch die IBV abgedeckt werden. Im Folgenden werden einige Bildauswerteverfahren und Anwendungen aufgeführt, die einen Eindruck verschaffen, was bereits möglich ist. Abwandlungen oder Anpassungen können durchaus auch auf spezielle Fragestellungen im Bereich der erneuerbaren Energien relevant sein.

## Beispiele zu Bildauswerteverfahren

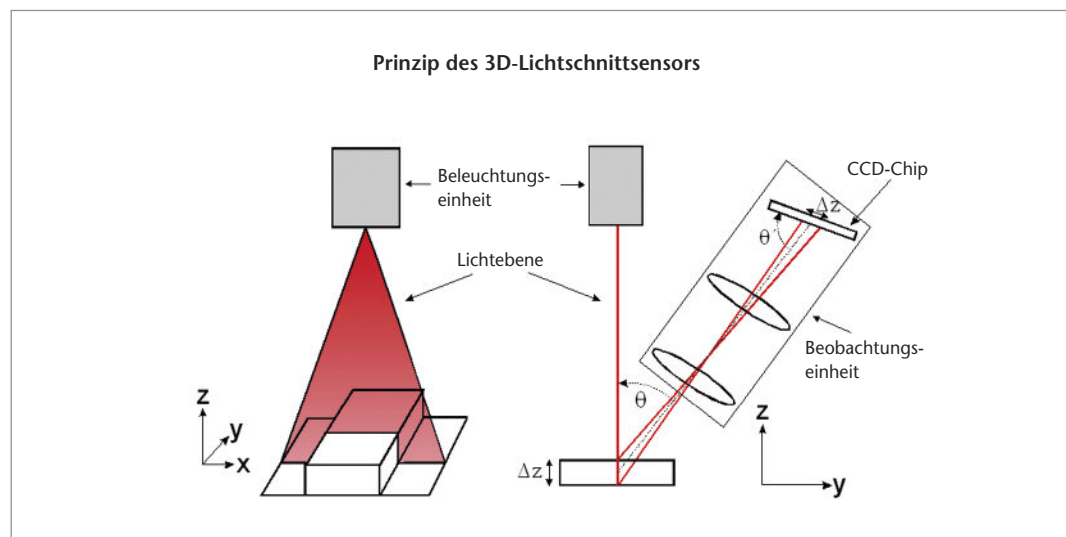
### Laser-Triangulation

Eine Laserlinie wird auf ein Objekt fokussiert und unter einem Winkel von einer Kamera aufgenommen (Abb. 5). Ändert sich der Abstand zur Kamera, wandert das Bild der Laserlinie im Bild, was ein Maß für den Abstand. Bei diesem gängigsten 3D-Messverfahren muss zur Erfassung der ganzen Oberfläche das Objekt verfahren werden. Steile Flanken können abgeschattet sein und daher nicht erfasst werden.

### Streifenlichtprojektion

Statt einer Linie werden mittels eines Projektors viele Linien auf das Objekt projiziert. Dies ist auch ein Triangulationsverfahren. Im wesentlichen werden zwei Verfahren eingesetzt: Das Gray-Code- und das Phasenshiftverfahren. Beim dem nach Herrn Gray benannten Verfahren werden nacheinander sich

Abbildung 5  
Schema der Laser-Triangulation, dem am meisten angewandten 3D-Verfahren.



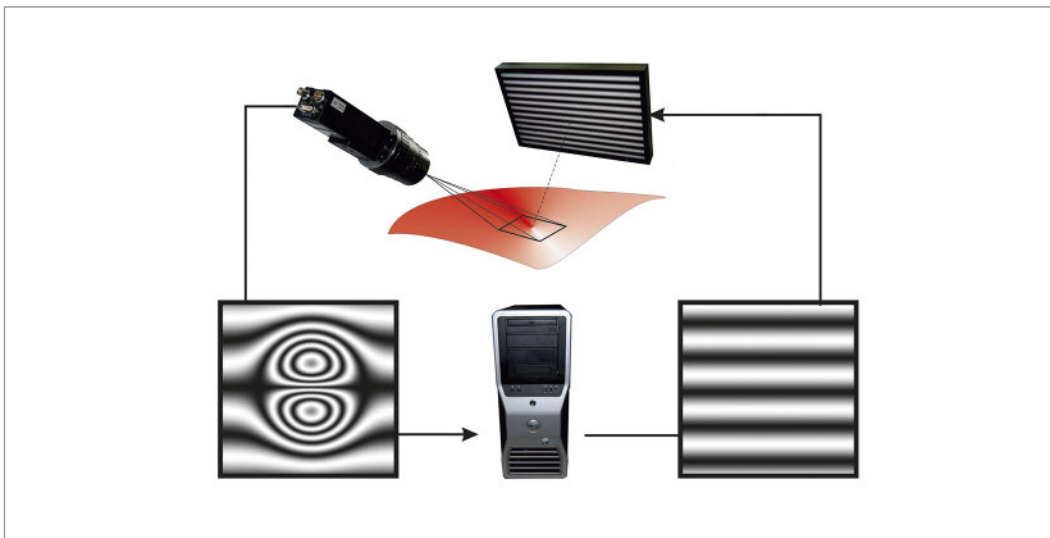


Abbildung 6  
Prinzip der Deflektometrie: Das verzerrte Reflexionsbild eines Streifenmuster gibt Aufschlüsse über Oberflächendefekte.

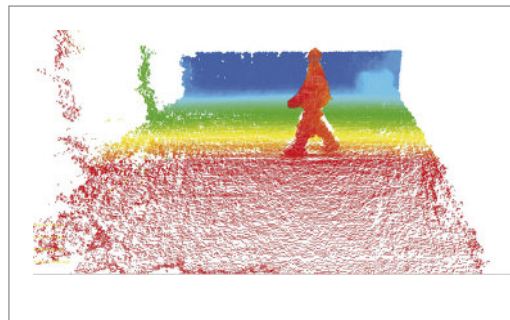


Abbildung 7  
Mit einer Time-of-Flight-Kamera können nach dem Lichtlaufzeitverfahren direkt Abstände gemessen werden, z. B. um Objekte im Vorfeld von Pkws zu detektieren.

verjüngende Streifen auf das Objekt projiziert und jedes Mal ein Bild (insgesamt mehr als 4) aufgenommen. Das Phasenshiftverfahren nutzt Streifen mit einer sinusförmigen Helligkeitsmodulation. Diese Streifen werden um Viertelperioden verschoben. Vier Bilder reichen hier aus, damit eine Software daraus ein 3D-Bild errechnen kann. Auch hier können Abschattungen vorkommen. Vorteil: Das Objekt braucht nicht verfahren werden.

### Deflektometrie

Analyse reflektierender Oberflächen durch Spiegelbilder. Das Streifenmuster eines Monitors wird so über das spiegelnde Objekt gehalten, das eine Kamera dessen Spiegelbild im Objekt aufnehmen kann (Abb. 6). Das verzerrte Spiegelbild wird nun analysiert.

### Shape from Shading (SfS)

Wird ein Objekt angeleuchtet, ergibt sich auf dem Objekt eine Schattierung, die von der Oberflächennormalen abhängt. In dieser Schattierung steckt also die 3D-Information, die der aufwendige SfS-Algorithmus zu einem 3D-Bild errechnet. Hierzu sind mindestens drei Bilder nötig, wobei das Objekt für jedes Bild aus einer anderen Richtung beleuchtet wird. Die Objekte sollten nicht reflektieren (Lambertscher Strahler)

und eine stetige Oberfläche (ohne Sprünge und Kanten) aufweisen.

### Time of Flight-Kamera (ToF)

Die Laufzeit des Lichtes wird pixelweise gemessen. Dazu wird die Intensität der Beleuchtung moduliert. Die Phasenlage des zurück gestreuten Lichts wird gemessen und daraus ein zweidimensionales Abstandsbild erzeugt. Nachteil: geringe Auflösung (ca. 200 x 200 Pixel,  $z \approx 5\text{mm}$ ). Einsatz z. B. als Fahrerassistenzsensor (Fußgängerschutz; Abb. 7) oder Paketerkennung.

### Thermografie, aktive und passive

Matrixanordnung einer Vielzahl von IR-Detektoren, die die Wärmeemission von Objekten misst, aus der Oberflächentemperaturen zweidimensional ermittelt werden können. Beim Einsatz der passiven Thermografie strahlen die Objekte selber. In der aktiven Thermografie wird die Oberfläche der Objekte zusätzlich (gepulst) erwärmt (Abb. 8a). Defekte zeigen sich z. B. durch einen Wärmestau und damit eine höhere, lokale Oberflächentemperatur (Abb. 8b). Durch mehrmalige Wiederholung von Wärmeeintrag und Bildaufnahme kann auch die Tiefe des Defektes (Delamination, Einschlüsse, ...) ermittelt werden.

Abbildung 8a  
 Schema der Pulsphasenthermografie, mit der auch die Tiefe einer Fehlstelle gemessen werden kann.

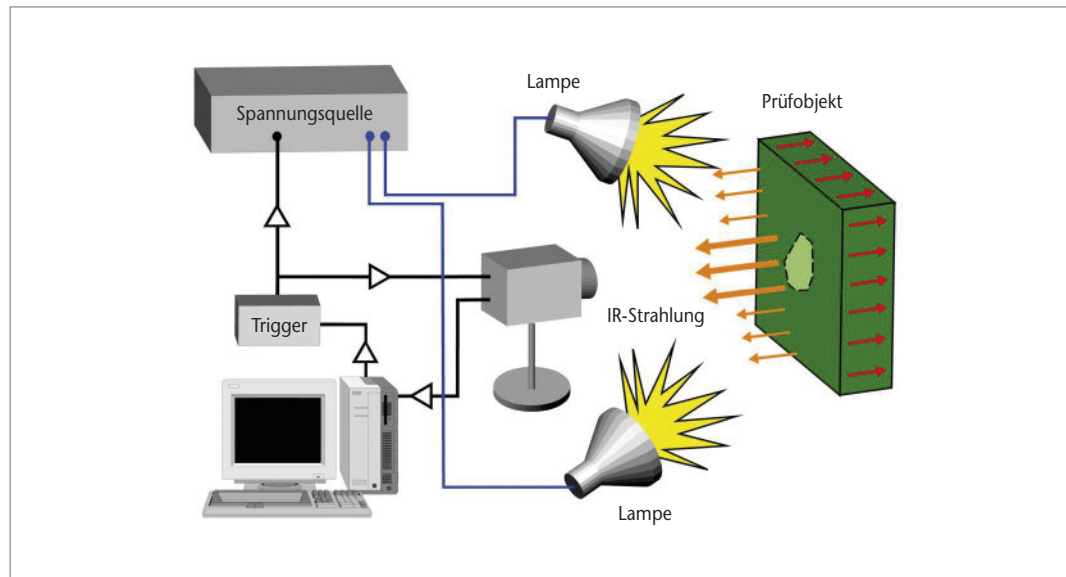
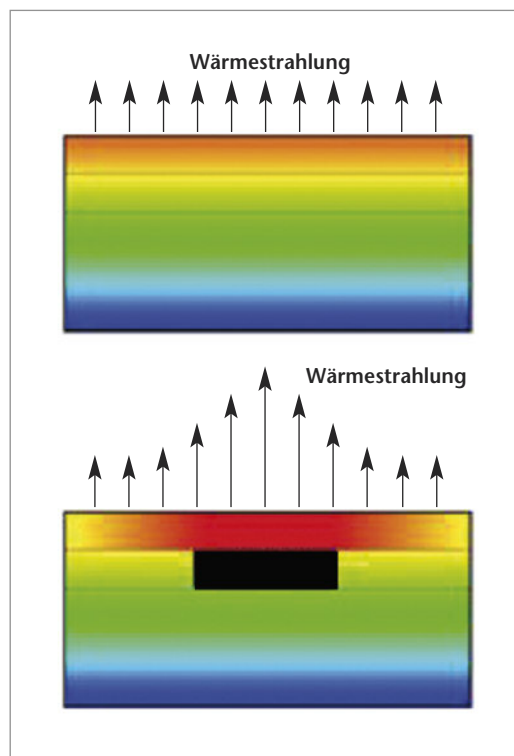


Abbildung 8b  
 Bei einer Fehlstelle (Delamination, Fremdkörper) tritt ein Wärmestau auf, so dass an der Oberfläche eine höhere Temperatur gemessen wird.



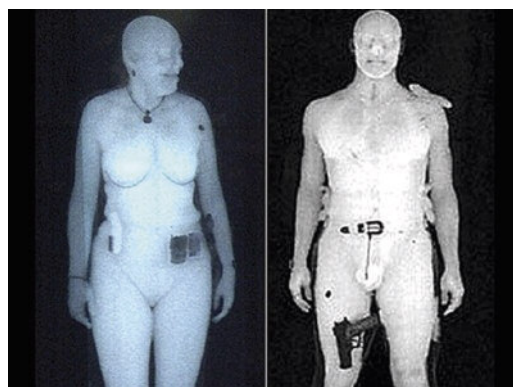
### Terahertz-Imaging (THz)

Energiearme Strahlung, die Papier, Kleidung, Kunststoffe oder Halbleiter durchdringt (Abb. 9). Wird von Metallen reflektiert und von Wasser absorbiert. Organische Moleküle (Drogen, Sprengstoff) können damit identifiziert werden. Einsatz in Transmission und Reflexion.

### Weißlicht-Interferometrie

Das parallele Licht einer Beleuchtung wird in zwei Strahlen aufgespalten. Ein Strahl trifft auf das Messobjekt und der andere auf einen Spiegel. Das zurückgestreute/reflektierte Licht beider Objekte wird überlagert und auf einen Bildsensor abgebildet (Abb. 10). Auf jedem Pixel interferieren (Auslöschung, Verstärkung der Lichtwellen) beide Strahlen. Wird das Messobjekt in der Höhe verschoben, ändert sich das Interferenzmuster. Durch Auswerten aller Interferenzmuster in Abhängigkeit zur Höhe (z), erhält man sehr genaue Höhenmesswerte (bis zu 5 nm). Die Auflösung in x und y hängt von der Bildfeldgröße (max. etwa 50 x 50 mm<sup>2</sup>) und Kameraauflösung ab (bestenfalls einige µm). Dies ist ein scannendes Verfahren. Die Vermessung eines Objektes dauert wenige Sekunden.

Abbildung 9  
 Prominentestes Beispiel von Terahertz-Imaging (THz) sind die sogenannten „Nacktschanner“.



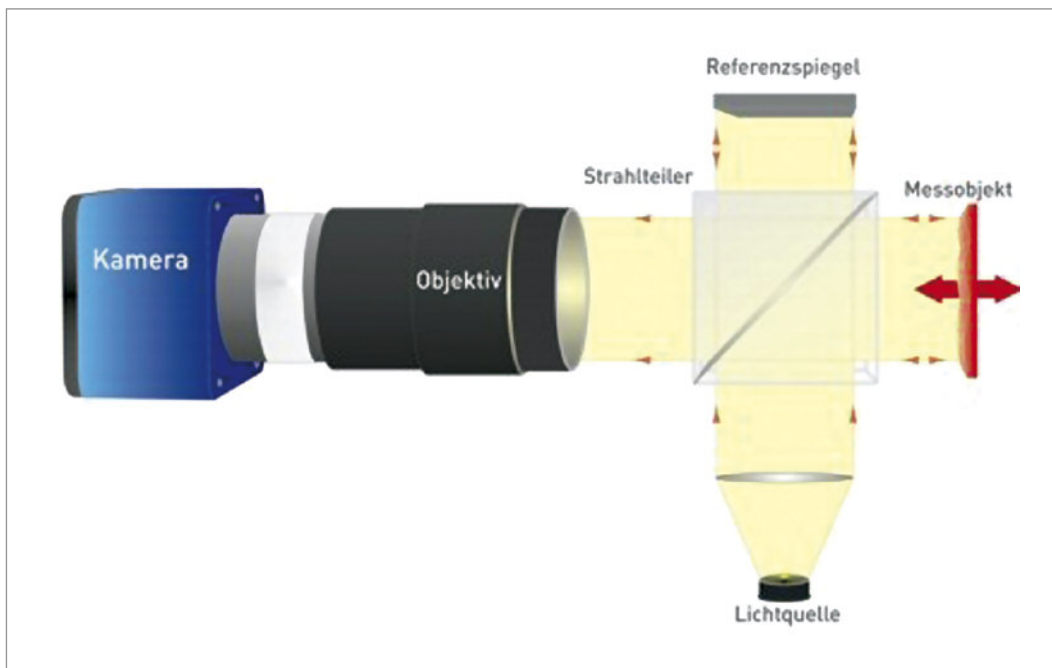


Abbildung 10

Eine der genauesten 3D-Messmethoden ist die Weißlichtinterferometrie, die eine Messauflösung in der Höhe von einigen Nanometern erreichen kann.

## Fazit

Die Möglichkeiten der Bildsensorik und -auswertung sind vielfältig. Allerdings sind sie meist auch recht aufwendig, und zwar nicht nur hinsichtlich der Hardware sondern auch in Bezug auf den personellen Aufwand. Die Kosten für Software-Erstellung oder -Anpassung sowie Installation eines Systems können als etwa doppelt so hoch angesetzt werden, wie die Hardware-Kosten. Um kein Risiko einzugehen, sollten dafür Fachleute beauftragt werden.

Für die meisten Bildverarbeitungssysteme werden Standardkameras oder intelligente Kameras eingesetzt, die bereits viele Aufgaben gut lösen können. Besonders sinnvoll sind IBV-Systeme dann, wenn viele Teile im Sekundentakt gleichbleibend untersucht werden. Dann lassen sich Amortisationszeiten von wenigen Monaten errechnen.

## Literatur

- [1] „Leitfaden zur industriellen Bildverarbeitung“, Fraunhofer-Allianz Vision, 2012, ISBN 978-3-8396-0447-2, Preis: 35,- €, [www.vision.fraunhofer.de/de/texte/1149.html](http://www.vision.fraunhofer.de/de/texte/1149.html)
- [2] „Das Handbuch der Bildverarbeitung“, Firmenschrift von Stemmer Imaging GmbH, 2012, ISBN 978-3-00-030061-5, [www.stemmer-imaging.de/de/handbuch](http://www.stemmer-imaging.de/de/handbuch)



# Cyber-physical Systems: Systemintegration, vernetzte Systeme, virtuelle Sensoren, Kommunikation, dezentrale Entscheidung, Sensordatenfusion

Dr. Wolfgang Sinn  
 IMMS – Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme  
 gemeinnützige GmbH  
 wolfgang.sinn@imms.de

Die Kommunikationstechnologie, insbesondere aber der Mobilfunk, nimmt Einfluss auf alle Bereiche des Lebens. Das Handy ist schon jetzt aus dem täglichen Leben als persönlicher „Kommunikationsbegleiter“ nicht mehr wegzudenken. Der Mensch hat sich mit SMS, e-mail, privater Homepage und nichtkommerziellen Gemeinschaften (Communities) sein Kommunikationsnetzwerk geschaffen.

Der Mobilfunk hat neue Gewohnheiten, eine neue Lebensform hervorgebracht.

Für den Verbreitungsgrad, den das Handy in den letzten zehn Jahren erreicht hat, brauchten Festnetztelefon, Fernsehgerät und PKW mehrere Jahrzehnte.

Einen ebenso erfolgreichen Siegeszug hat die Sensorik aufzuweisen. Sie verleiht der Technik ein Feingefühl. Ob als Bewegungsdetektoren, Brandmelder oder Drehzahlmesser – die kleinen Fühler schaffen echten Mehrwert.

Je digitaler die Welt wird, desto mehr rückt die Konvergenz, die Vernetzung von Branchen in den Mittelpunkt. So wie heute in praktisch jedem elektrischen Gerät mindestens ein Mikrocontroller integriert ist,

werden künftig eine Vielzahl drahtloser Kommunikationseinheiten zu finden sein und dies mehr und mehr in Verbindung mit Sensorik und Messtechnik. Mehrere treibende Kräfte wirken beschleunigend auf diese Entwicklung.

Mit dem Aktionsplan zur Umsetzungen der Hightech-Strategie 2020 verfolgt die Bundesregierung mit zehn Zukunftsprojekten wie Smart Cities, Smart Grid und Smart Factory ambitionierte Ziele (Abbildung 1).

Deutschland soll als Anbieter und Anwender neuer und zukunftsweisender Technologien wie beispielsweise für die industrielle Produktion zum Leitmarkt positioniert werden. Bei „Industrie 4.0“ geht es vor allem darum, neue Dimensionen in der internet-basierten 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 zu beherrschen, die Überwachung, Analyse, Modellierung, eigenständige Kommunikation und (Selbst-)Steuerung umfassen.

Abbildung 1  
 Smart Cities  
 Quelle: IMMS



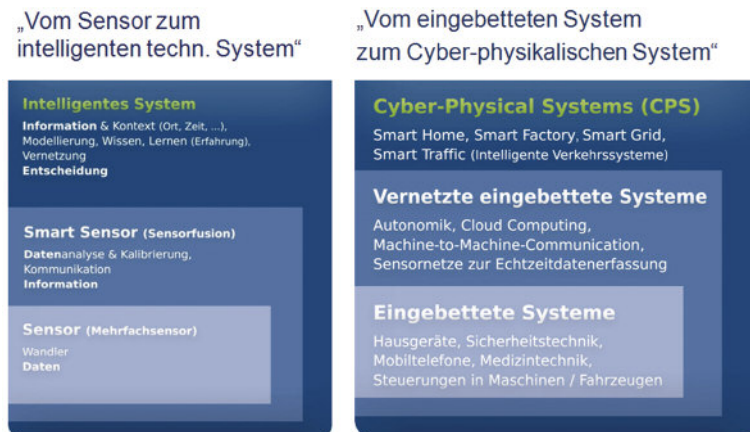


Abbildung 2  
Übersicht der technologischen Trends zu intelligent vernetzten Systemen

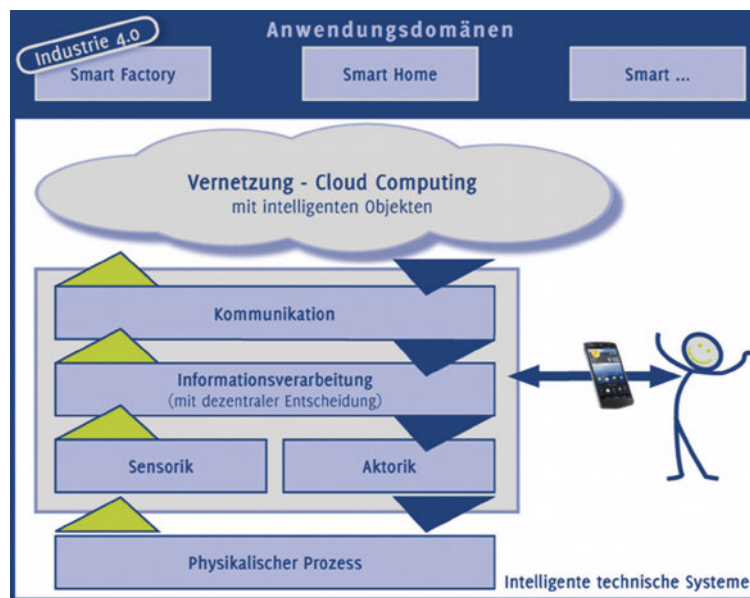


Abbildung 3  
Intelligente technische Systeme  
Quelle IMMS

Der Begriff „Industrie 4.0“ beschreibt den grundlegenden Paradigmenwechsel von einer zentralen zu einer dezentralen, autonomem 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.

Deutschland gehört mit Frankreich und Großbritannien zu den größten Investoren in intelligente Stromnetze. Gemäß einer aktuellen EU-Studie [1] fließen insgesamt 1,8 Mrd. € in nahezu 350 laufende und sich in Entwicklung befindliche Projekte für Smart Grid und Smart Meter.

Um sich den globalen Herausforderungen stellen zu können, sind verstärkt branchenübergreifende und interdisziplinäre Kooperationen zwischen Wirtschaft und Wissenschaft angesagt. Dies trifft auch auf die Querschnittsbereiche der Sensorik und Messtechnik zu.

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.

Moderne Mikrosysteme sind inzwischen vernetzt, autark und intelligent und weit mehr als eine Komponente. Sie haben sich zu eigenständigen Knoten in intelligenten Systemen wie Sensornetzwerken entwickelt. Durch die fortschreitende Miniaturisierung werden damit ständig neue Anwendungsbereiche auf dem Weg zur intelligenten Umgebung („Ambient Intelligence“) erschlossen.

In *Abbildung 2* sind die beiden wesentlichen technologischen Trends

- Vom Sensor zum intelligenten technischen System
- Vom eingebetteten System zum Cyber-physikalischen System

zusammengefasst dargestellt.

Der Brückenschlag von der Nanotechnologie in die Mikro- und Makroumgebung birgt hierbei die Chance, Effekte der Nanotechnologie gezielt innerhalb der gewünschten Mikrostrukturen verfügbar zu machen. Dies bedeutet einen entscheidenden Gewinn an Funktionalität beispielsweise durch die weitere Etablierung von MEMS-Technologien.

## Cyber-physical Systems

Cyber-physical Systems (CPS) stehen für die Verbindung von physikalischer (reale) und informationstechnischer (virtuelle) Welt. Sie entstehen durch ein komplexes Zusammenspiel

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

Wesentliche Komponenten von CPS sind leistungsstarke eingebettete Systeme [2], 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-Technik) wird an Bedeutung gewinnen.

Die Zukunftsprojekte bauen auf cyber-physikalische Systeme und „Intelligente technische Systeme“ (Abbildung 3). CPS steuern von der Cloud aus Dinge der realen Welt, nehmen Sensordaten auf und 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 qualitätsbehafte Hard-/Software werden benötigt. „Es ist nur eine Frage der Zeit, bis sich Plattformen für CPS bilden und sich um diese Plattformen herum Software- und Hardware-Ökosysteme (Zulieferketten und Marktplätze) bilden werden“ [3].

Eine Vielzahl neuer Anforderungen leiten sich an die Sensorik und Messtechnik ab, um die zunehmende Komplexität beherrschbar zu machen. Der Sensor muss zum „Umfeldererkennungssystem“ mit folgenden Eigenschaften weiterentwickelt werden:

- **Physikalische Situationserkennung** (Sensorfusion, virtuelle Sensoren, Mustererkennung, Situationskarten)
- **Vorausschauendes autonomes Handeln** (Folgeabschätzung)

- **Kooperation und Verhalten** (Multiagentensystem, Gruppenverhalten, geteilte Kontrolle)
- **Mensch-Maschine-Interaktion** (Interaktionsregeln)
- **Maschinelles Lernen** (CPS-Systeme stellen sich auf ihre Nutzer bzw. Situationen ein – Personalisierung)
- **Strategie der Selbstorganisation und Adaption** (Selbstorganisation in der Produktion, wobei Werkstücke selbst zum Informationsträger werden und Produktionsabläufe prägen.)
- **Basistechnologien (Sensorik)**
  - Direktes Heranführen der Sensoren an die Messobjekte/-größen
  - Einführung neuartiger Messverfahren zur Erfassung räumlich verteilter Messdaten (Virtuelle Sensoren- aus „realen“ Sensoren empirisch mit Software- Modellen abgeleitete Werte)
  - Einsatz von energieautarken und drahtlos kommunizierenden Sensoren (Ad-hoc-Netze)
  - Multifunktions- und Systemintegration
  - Kopplung von physikalischen, chemischen und biologischen Sensoren auf einem Sensorelement (Sensorfusion- mit Korrelation von Gewichtung, Interpretation, Zeitfolgen, ...)

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 anderen Stellenwert einnehmen (Abbildung 4).

Der wachsende Bedarf an Speicherkapazität und höherer Leistungsfähigkeit der Stromversorgung wird zur weiteren Komplexität führen. Schnittstellen zu personennahen Kommunikationsnetzen werden zur Standardausstattung gehören.

Zweifelsohne ist der Bereich der drahtlosen personennahen Kommunikation momentan einer der sich am schnellsten veränderten Märkte.

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.

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.

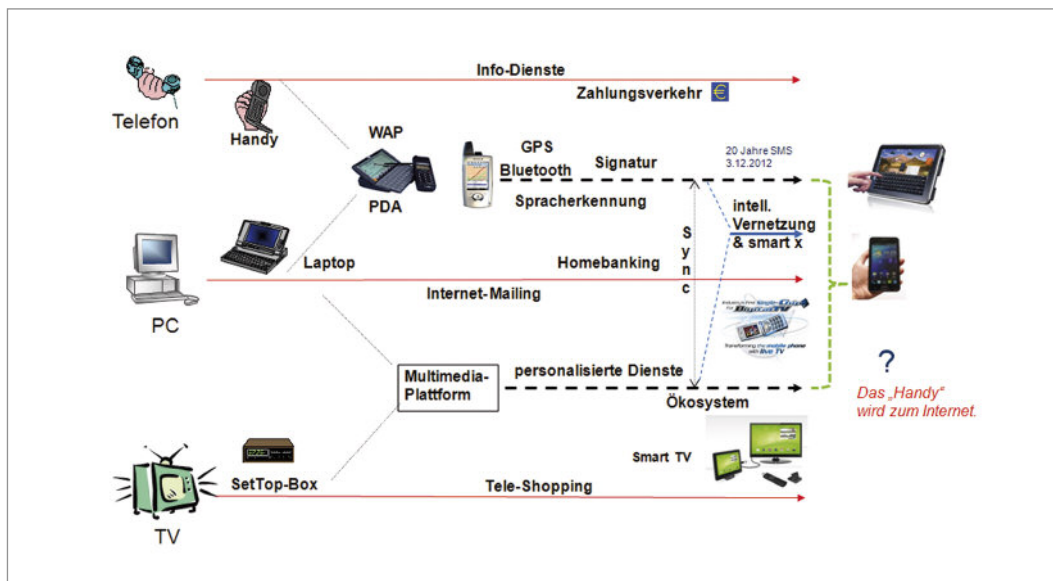


Abbildung 4  
Konvergenz der  
Zugangsmedien

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

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 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 nicht zuletzt wie Autos informationstechnisch voll erfasst sein.

Die Anwendungsszenarien zeigen, dass in der Konvergenz von Sensorik und Mobilkommunikation ein beträchtliches Nutzenpotential zu erschließen ist.

## Fazit und Ausblick

Die Existenz von umfangreichen Netzinfrastrukturen, Zugangsmedien, Plattformen, Tools u. a. m. bilden 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 in der Breite der Anwendungen umgesetzt wird.

Durch drahtlose Netze und intelligent eingebettete Sensorik ist die Voraussetzung geschaffen, damit die einzelnen Gerätekomponten 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“ (Plug & Play-Fähigkeit) zu finden sein.

## Literatur

- [1] [http://ses.jrc.ec.europa.eu/sites/ses.jrc.ec.europa.eu/files/documents/Id-na-25815-enn\\_final\\_online\\_version\\_april\\_15\\_smart\\_grid\\_projects\\_in\\_europe\\_-\\_lessons\\_learned\\_and\\_current\\_developments\\_-2012\\_update.pdf](http://ses.jrc.ec.europa.eu/sites/ses.jrc.ec.europa.eu/files/documents/Id-na-25815-enn_final_online_version_april_15_smart_grid_projects_in_europe_-_lessons_learned_and_current_developments_-2012_update.pdf)
- [2] agendaCPS (2012)
- [3] CPS (2010); Prof. Dr. U. Alßmann, Prof. Dr. M. Wacker



# Windenergie und Meeresenergie: Sensoren im FuE-Prozess, Herstellungsprozess und Einsatzmonitoring

*Dr.-Ing. Holger Huhn*  
Fraunhofer IWES – Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik  
holger.huhn@iwes.fraunhofer.de

*Jochen Bard*  
Fraunhofer IWES – Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik  
jochen.bard@iwes.fraunhofer.de

Der Schwerpunkt des Vortrags liegt auf der Beschreibung des Einsatzes von Sensorik im FuE-Prozess, im Herstellungsprozess und im Einsatzmonitoring. Anhand von Projektbeispielen aus der Windenergie und der Meeresenergie werden auf die besonderen Herausforderungen an die gesamte Messkette, d. h. von der Applikation bis zur Messdatenerfassung mit besonderem Fokus auf die Offshore-Tauglichkeit eingegangen.

Beginnend mit den Marktpotentialen und Prognosen werden anhand einer Roadmap zunächst die möglichen Anteile der Träger der erneuerbaren Energien bei der Energieversorgung (Bruttostromerzeugung) sowie den Energiebedarf in Deutschland dargestellt. Dabei zeichnet sich bis zum Jahr 2050 ab, dass die Windenergie mit über 50% den deutlich größten Anteil der erneuerbaren Energien schultern muss.

Bezüglich der Sensorik stellt sich ein großer Markt dar. Um die größtmöglichen Herausforderungen für die Sensorik darzustellen wird das Thema Offshore-Wind vertieft. Offshore-Wind unterscheidet sich von Onshore-Wind dadurch, dass die Wassertiefe durch unterschiedliche Tragstrukturkonzepte bis zum tragfähigen Meeresboden überbrückt werden muss und zum anderen durch die härteren klimatischen Bedingungen für die Lastannahmen durch Wellen und Strömung, aber auch aus seiner korrosiven Wirkung. Je nach Wassertiefe (bis ca. 70 m) wird zwischen fest mit dem Meeresboden verbundenen Strukturen wie Monopile, Schwergewichtsrundung, Tripod, Tripile oder Jacket und zwischen schwimmenden Strukturen unterschieden. Mit zunehmender Wassertiefe steigen auch die Kosten für die Tragstrukturen an. Als Projektbeispiel wird im Folgenden auf eine als Halbttaucher konzipierte schwimmende Windenergieanlage eingegangen, die als Demonstrationsprojekt im Projekt HiPRwind mit Förderung aus dem 7. Rahmenprogramm der EU errichtet wird. Die Abkürzung HiPRwind steht für „High Power, high Reliability offshore wind technology“.

Die Forschungsschwerpunkte innerhalb von HiPRwind beziehen sich auf die Skalierbarkeit einer schwimmenden 1,5 MW Demonstrationsanlage auf eine schwimmende 10 MW Anlage. Dabei werden Fragestellungen zur schwimmenden Tragstruktur und Ankerkettenbefestigung, der Steuerung, Leistungsübertragung und Netzanbindung sowie das für den Workshop wichtige Thema der Zustands- und Struk-

turüberwachung (CM/SHM) der Tragstruktur sowie der Rotorblätter näher beleuchtet. Ziele von HiPRwind sind eine erhöhte Zuverlässigkeit und verbesserte Kosteneffizienz von Offshore-Windenergieanlagen. Gemäß der geplanten Projektzeitschiene wurde das Schwimmkörperdesign abgeschlossen und momentan befindet sich der Demonstrator im Bau, um in der zweiten Jahreshälfte 2013 in Betrieb zu gehen. Die Betriebsphase ist sehr wesentlich für den Erkenntnisgewinn und wird daher durch eine Messkampagne begleitet. Bevor jedoch die Sensorik und Messtechnik für HiPRwind ausgewählt wurde, mussten die Aufgaben und Funktionen der Sensoren und Messtechnik definiert werden. Hierzu zählen:

- Zustandsüberwachung
- Lebensdauervorhersage
- Lastreduzierter Betrieb
- Erhöhung der Produktivität und Energieeffizienz

Zur Zustandsüberwachung sollen folgende Größen überwacht werden:

- Biege- und Torsionsmomente
- Axiale Zug- und Druckbeanspruchung
- Schwingungen
- Vibrationen

Folgende Anlagenkomponenten werden dabei überwacht:

- Rotorblätter
- Gondel
- Antriebsstrang
- Turm
- Schwimmkörper einschl. Dämpfungsplatten
- Ankerketten
- Anlagenregelung
- Offshore-Umweltbedingungen wie Wind und Wellen

Generell kommen als Sensoren elektrische Dehnungsmessstreifen (DMS), Faseroptische Sensoren zur Dehnungsmessung (FBG, Fibre Bragg Grating), Beschleunigungssensoren, MEMS, Piezoelemente, Neigungssensoren sowie Drucksensoren zum Einsatz.

Eine wichtige Komponente für die Zustandsüberwachung bildet das Messsystem, in dem die Daten aus dem Lastmonitoring der gesamten Anlage zusammenlaufen. In das Messsystem werden zusätzlich die Daten aus der Umgebungserfassung mittels Messmast bzw. Bojen (Stärke und Richtung von Wind,

Richtung und Höhe von Wellen) sowie die Anlagensignale: (Leistung, Drehmoment, Pitchwinkel, Gondelposition) zusammengeführt. Die Vernetzung der Messsysteme erfolgt durch Datenbusse: Ethernet, opt. TCP-IP, opt. CAN-Bus, WLAN. Nur eine zeit-synchrone Messdatenerfassung ermöglicht bei der späteren Auswertung eine Korrelation von Lastvermessungsdaten und Umweltdaten mit Anlagensignalen.

Die größten technischen Herausforderungen im Bereich von Offshore-Windkraftanlagen ist das Off-shore-Lastkollektiv, was sich aus den extremen Umgebungseinflüssen wie Wind, Wasser, Sonne, Salz und Eis zusammensetzt. Dieses Lastkollektiv wirkt mechanisch, dynamisch und korrosiv auf alle Anlagenkomponenten sowie die Sensoren und das Messsystem, deshalb müssen schon beim Design die Auswahl der Materialien, Oberflächenschutz bei der Konstruktion, Produktion und Montage berücksichtigt werden, um eine technische Zuverlässigkeit von mindestens 20 Jahren zu gewährleisten.

Alleine bei der Applikation von Sensoren müssen für jede Oberfläche (Faserverbund-Bauteile, Stahlstrukturen, Gusskomponenten, Betonbauteile, etc.) die entsprechenden Vorbehandlungsmaßnahmen sowie die Befestigungstechniken wie Kleben, (Punkt-)Schweißen, Schrauben oder Klemmen korrekt beachtet und ausgeführt werden. Die Umwelteinflüsse auf eine Messstelle sind Feuchtigkeit, mechanische Belastung und mariner Bewuchs an den Komponenten der Tragstruktur im Wasserwechselbereich und in der Dauertauchzone. Offshore-Auslagerungen von elektrischen DMS mit verschiedenen Abdeckvarianten zeigen Einflüsse der Abdeckung auf den Messwert (Linearitätsfehler, Nullpunktverschiebung). Die Schwachstellen einer Sensorapplikation sind die Kabeldurchführung (Kanäle, Kapillare), die Grenzschichten sowie das Ablösen der Sensorabdeckung (Fouling durch Unterwanderung von Seepocken).

Insbesondere in der Kapselung von Sensoren mit Korrosions- und Degradationsschutz, Energieversorgung und Datenerfassung besteht noch erheblicher Forschungsbedarf. Zur Entwicklung von offshore-tauglicher Sensorik stehen am Fraunhofer IWES mehrere Prüfkammern zu Simulation von Offshore-Lasten sowie von Robustheitsprüfungen (HALT/HASS-Tests) sowie Teststände zur Freifeldbewitterung zur Verfügung.

Des Weiteren wird noch auf das Monitoring der aerodynamischen und hydrodynamischen Lasten an der Ankerkette der schwimmenden HiPRwind Windenergieanlage eingegangen. Zur messtechnischen Erfassung des Lastkollektivs einer Ankerkette wurde ein skalierbarer Labordemonstrator gebaut, an dem die Zugschwellbeanspruchung, Torsion und Ein-

spannwinkel der Plattformbewegung in mehreren Messebenen erfasst wurden. Mit diesem Messkonzept soll dann auch die Prototypenanlage vermessen werden.

In der Meeresenergie – hier insbesondere die Nutzung der Wellenenergie sowie der Meeresströmungen – hat der Einsatz eines umfangreichen Anlagenmonitorings mit ausgereifter Sensorik grundsätzlich die gleichen Aufgaben zu erfüllen und die gleichen Herausforderungen zu meistern wie oben beschrieben. Es kommt allerdings hinzu, dass eine Reihe von Anlagentypen teilweise oder vollständig unter Wasser betrieben wird. Je nach Anlagentyp ist eine Inspektion vor Ort oder eine Wartung überhaupt nicht möglich. Eine Wartung kann dann nur durch Demontage und Überprüfung der Anlage im Hafen erfolgen. Grundsätzlich werden in Meeresenergieanlagen daher sehr lange Wartungsintervalle angestrebt. Demzufolge kommt einer zuverlässigen messtechnischen Überwachung von Meeresenergieanlagen eine Schlüsselrolle für den kommerziellen Erfolg zu. Daher werden bereits Prototypen- und Demonstrationsanlagen in der Regel mit umfangreicher Sensorik bestückt und große Mengen von Messdaten erfasst, die validiert und analysiert werden müssen. Die synchrone Erfassung und Übertragung von Daten z. B. von einem getauchten Rotor erfordern neue technische Lösungen.

Eine Vielzahl von Wellen- und Gezeitenströmungsanlagen europäischer Hersteller wurden bereits über mehrere Jahre in Form von Demo- und Pilotanlagen getestet. Einige wenige Anlagen haben dabei mehr als 20.000 Betriebsstunden erzielt. Diese Technologien befinden sich an der Schwelle zur Kommerzialisierung. Insgesamt sind in der EU bis in 2020 Anlagen mit einer Gesamtleistung von annähernd 2 GW in der Planung.

An einigen Beispielen werden aktuelle Projekte vorgestellt.

Beispiel 1: Die sogenannte „Seaflo“ war mit einer Leistung von 300 kW die erste große Meeresströmungsanlage weltweit. Sie wurde von 2003 bis 2008 vor der englischen Küste als Pilotanlage betrieben. Das Messkonzept umfasst grundsätzlich die gleichen Größen und Anlagenparameter wie oben bereits für Windkraftanlagen beschrieben. Hinzu kommt anstelle der Windmessung eine genaue Messung des Strömungsprofils vor dem Rotor sowie der Wellen, die starke dynamische Effekte in der Strömung bewirken. Die Nachfolganlage Seagen mit 1,2 MW hat seit 2008 mehr als 6 GWh Strom erzeugt. Bis 2015 sollen 5 vergrößerte Anlagen dieses Typs mit je 2 MW errichtet werden. Meeresströmungsturbinen mit horizontaler Rotorwelle sind heute die bedeutendste Technologie im Bereich der Meeresenergie.

Ein weiteres wichtiges Beispiel zeigt einen schwimmenden Wellenenergiewandler nach dem Prinzip der schwingenden Wassersäule. Dabei wird in einer halb getauchten Kammer durch den infolge des Seegangs wechselnden Wasserspiegel Luft verdrängt. Diese treibt eine Turbine an, deren Drehrichtung bei einströmender bzw. ausströmender Luft stets die gleiche Richtung hat. Bei diesem Anlagentyp spielt die Bewegungsdynamik des Schwimmkörpers eine wichtige Rolle. Das Messsystem erfasst die Lasten in den Ankerketten sowie alle Freiheitsgrade jeweils für Rotation und Translation. Darüber hinaus muss der Luftdruck in der Kammer und der Wasserstand bzw. die Eintauchtiefe ständig gemessen werden, um durch Anpassung der Turbinendrehzahl einen hohen Wirkungsgrad zu erzielen. Mit feststehenden OWC-Anlagen an der Küste werden bereits erste kommerzielle Projekte realisiert.

Das dritte Projektbeispiel zeigt ein laufendes Vorhaben, indem ein neues Ultraschall Messverfahren zur Überwachung von Rotorblättern in Meeresströmungsturbinen in Kombination mit drahtloser Signalübertragung getestet wird. Die Überwachung der Rotorblätter von Meeresströmungsanlagen stellt eine besondere Herausforderung dar, da hier eine Inspektion der installierten Anlagen in vielen Fällen nicht möglich ist. Das neue Verfahren ermöglicht eine kontinuierliche Überwachung der Rotorblätter durch Identifikation von Defekten auch innerhalb der Faserverbundwerkstoffe. Durch die drahtlose Signalübertragung werden kostspielige und unter Wasser auch störanfällige Lösungen mit Gleitringen vermieden. Das neu entwickelte Messsystem wird im Rahmen eines Europäischen Demonstrationsprojektes über einen längeren Zeitraum an mehreren Meeresenergieanlagen getestet.

## Fazit

Die Langzeitstabilität und Zuverlässigkeit der gesamten Messkette ist ein wichtiger Aspekt bei jedem Betrieb eines Wind- oder Meeresenergieparks. Die Messkampagnen dienen zum Einen der Verifikation von Lastannahmen und Berechnungsmodellen und zum Anderen dienen die Messdaten zur Lebensdauererhersage auf Basis von realen Lasten. Insbesondere bei solch komplexen Systemen wie Windenergie- und Meeresenergieanlagen ist die Durchführung von aero-servo-hydro-elastischen Simulationen der Gesamtanlage unumgänglich, auch, um die aero- und hydrodynamischen Effekte der Kopplungen zwischen Rotorblättern, Turm, Plattform mit Ankerketten zu erfassen und um entsprechende Reglersystem der Anlage zu dimensionieren.

# Einsatz und Bedarf von Sensorik in der Geothermie

## Einleitung

Die Geothermie kann einen bedeutenden Beitrag zur Energieversorgung in Deutschland leisten. Für den Ausbau der Nutzung dieser heimischen Energieresource wird ein besseres Verständnis von Prozessen benötigt, die sich im untertägigen Reservoir, im Bohrloch und bei der Interaktion zwischen Thermalwasser und obertägiger Anlage abspielen. Dies kann durch die verbesserte Überwachung eines geothermischen Systems mittels geeigneter Sensoren erzielt werden. Besonders die tiefe Geothermie stellt dabei erhöhte Anforderungen an die hierfür einzusetzende Sensorik. In Deutschland ist dies neben Temperaturen von bis zu 150 °C und Drücken bis zu 600 bar vor allem die chemische Zusammensetzung der Thermalwässer, die zum Teil sehr salzhaltig und korrosiv sein können. Weltweit gibt es darüber hinaus Anstrengungen zur Nutzung so genannter superkritischer Reservoirs, die auch in Europa eine Option zum Ausbau der Geothermie darstellen. Hierbei sollen Thermalwässer bei Temperatur- und Druckbedingungen oberhalb des kritischen Punktes von Wasser genutzt werden. Zur Entwicklung verlässlicher und effizienter geothermischer Technologien führt das Internationale Geothermiezentrum (ICGR), angesiedelt am Deutschen GeoForschungsZentrum (GFZ), daher Untersuchungen zur geothermisch angewandten Grundlagenforschung durch.

Tiefe geothermische Anlagen nutzen Thermalwasservorkommen, die in heißen Gesteinsschichten gespeichert sind und aufgrund der natürlichen Durchlässigkeit der Gesteine oder künstlich erzeugter Riss-Systeme über Bohrlöcher zur Oberfläche gefördert werden können. Für einen verlässlichen Betrieb einer geothermischen Anlage ist es wichtig, das Verhalten des sogenannten geothermischen Reservoirs während der Nutzung zu verstehen. Weiterhin ist es wichtig, die Zusammensetzung der Fluide genau zu kennen, um chemische und physikalische Wechselwirkungen zwischen Fluid und Anlage besser abschätzen zu können. Diese werden z.B. durch sinkende Temperaturen und Drücke auf dem Weg vom Reservoir zur obertägigen Anlage sowie die Wärmeentnahme beeinflusst.

Als Modellstandort zur Erforschung der geothermischen Energiegewinnung im Norddeutschen Becken dient das Forschungslabor Groß Schönebeck. Hier können Untersuchungen zu Prozessen im Untergrund als auch in der obertägigen Anlage während

der Nutzung eines geothermischen Reservoirs durchgeführt und verschiedene Sensoren unter in-situ-Bedingungen eingesetzt und bewertet werden.

## In-situ-Geothermielabor Groß Schönebeck

Groß Schönebeck liegt etwa 50 km nordöstlich von Berlin im südlichen Randbereich des norddeutschen Beckens. Eine ehemalige Erdgas-Explorationsbohrung wurde dort 2001 auf 4309 m vertieft. 2007 folgte eine zweite Bohrung mit 4400 m Teufe. Durch die Ablenkung der zweiten Bohrung beträgt der Abstand obertägig 28 m und 475 m in der Tiefe. Sie bilden eine geothermische Dublette mit einer Förderbohrung, in der das warme Thermalwasser mit einer Pumpe in 1200 m Tiefe an die Oberfläche gepumpt wird (*Abbildung 1*). Nach der geplanten Wärmeentnahme wird das Thermalwasser über eine zweite, obertägig installierte, Pumpe und die Injektionsbohrung wieder in das Reservoir zurück geleitet. Messinstrumente in den Bohrungen und in der obertägigen Anlage erfassen Veränderungen im Thermalwasser, aus denen Rückschlüsse auf die Bedingungen im Reservoir und zu Korrosions- und Fällungsprozessen gezogen werden können.

Für die Erschließung der Lagerstätte wurde eine hydraulische Stimulation durchgeführt, bei der Wasser unter hohem Druck in das Gestein eingepresst wurde. Es bildete sich ein unterirdisches Riss-System aus, welches nun als geologischer Wärmeübertrager genutzt werden kann. Die geförderten Fluide haben einen Lösungsinhalt von 265 g/l und einen pH-Wert von 5,7, die Temperatur in der Tiefe liegt bei 150 °C. Das obertägige System wird zum Schutz vor Entgasung, Fluidverdampfung und dem Eindringen von Luftsauerstoff unter einem Druck von ca. 10 bar gehalten.

## Bohrlochmessungen

Zur Bestimmung natürlicher und künstlich induzierter Strömungsprozesse im Untergrund können Messungen von Druck, Temperatur und Fließrate entlang einer durchströmten Bohrung genutzt werden. Hierfür wurde am ICGR ein hybrides Bohrlochmesssystem (*Abbildung 2*) entwickelt und getestet, welches den simultanen Einsatz von elektronischen und faseroptischen Sensoren ermöglicht. Es konnten hiermit

*Internationales  
Geothermiezentrum  
ICGR am  
GFZ Potsdam –  
Deutsches  
GeoForschungszentrum*

*Jan Henniges  
janhen@gfz-potsdam.de*

*Harald Milsch  
harald.milsch@gfz-potsdam.de*

*Simona Regensburg  
simona.regensburg@  
gfz-potsdam.de*

*Thomas Reinsch  
thomas.reinsch@gfz-potsdam.de*

*Prof. Dr. Ernst Huenges  
huenges@gfz-potsdam.de*



Abbildung 1  
Schematische Darstellung des Thermalwasserkreislaufs in einer geothermischen Anlage.

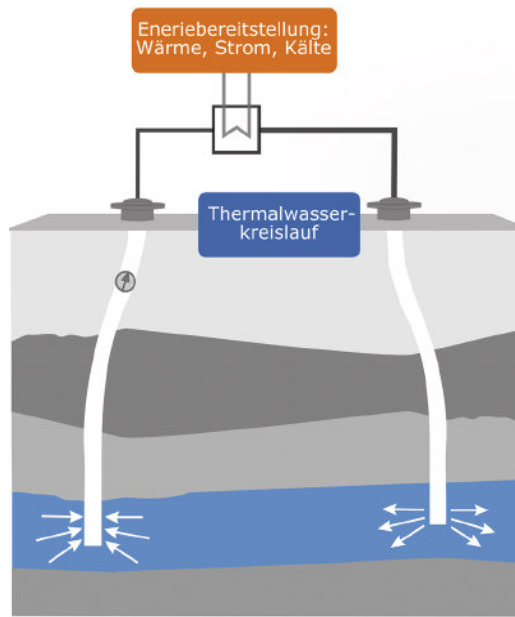


Abbildung 2  
Hybrides Bohrlochmesssystem zur Durchführung von kombinierten Messungen mit elektrischen und faseroptischen Sensoren.



bereits erfolgreich kombinierte Messungen von Druck, Temperatur, Fließgeschwindigkeit und natürlicher Radioaktivität, zusammen mit ortsverteilter Temperaturmessungen (DTS) entlang des Bohrlochs während Förder- und Injektionsbetriebs in der Geothermieanlage in Groß Schönebeck durchgeführt werden [Henninges et al., 2012].

Neben den ortsverteilter Temperaturmessungen ist auch die Integration weiterer faseroptischer Sensoren geplant. Ein Druck- und Temperatursensor wurde dafür erfolgreich im Labor getestet [Bremer et al., 2010; Reinsch et al., 2012]. Bisher fehlen allerdings Sensoren oder Methoden zur Bestimmung chemischer Parameter der Fluide im Reservoir, die zur Quantifizierung von Fällungs- und Korrosionsprozessen benötigt werden. Interessant sind hierbei vor allem der pH-Wert und das Redoxpotenzial (Eh). Die Brechzahl des Fluids kann wichtige Informationen über die Phasenzusammensetzung liefern.

Auch akustische Messungen, wie zum Beispiel ortsverteilter akustische Messungen (DAS, siehe z.B. [Mestayer et al., 2011]) können zur Charakterisierung

der geothermischen Lagerstätte oder die Überwachung des Fließverhaltens in der Bohrung genutzt werden.

Neben Sensoren für den Temperaturbereich bis 150 °C werden am ICGR auch Monitoringverfahren zur Überwachung von Hochtemperaturreservoirs entwickelt [Reinsch et al., 2013].

### Messungen in der obertägigen Anlage

Geothermische Fluide sind komplexe Mehrstoffsysteme, deren Zusammensetzung u. a. vom Gestein und den Fließwegen in der Tiefe abhängen. An den Anlagenteilen, die mit dem Thermalwasser in Berührung kommen, beeinflussen eine Vielzahl von Inhaltsstoffen und Parametern die Fluid-Material-Wechselwirkungen: der Salzgehalt insgesamt und der Anteil einzelner Ionen, der Sauerstoffgehalt, die gelösten Gase, der Gehalt an festen Partikeln, deren Korngröße und mineralogische Zusammensetzung, sowie Temperatur, pH-Wert, Dichte, Druck, das Redoxpotenzial, der Volumenstrom und die Leitfähigkeit. Betriebsbedingt sind einige dieser Größen Schwankungen unterworfen, welche wiederum Einfluss auf Fällungs- und Korrosionsbedingungen in der Anlage haben.

Zur Bestimmung der Auswirkung betriebsbedingter Änderungen im Fluid wurde am ICGR ein mobiles Fluidmonitoringsystem (FluMo, Abbildung 3) entwickelt, das die chemischen und physikalischen Eigenschaften des Thermalwassers erfasst und einatznah speichert [Feldbusch et al., 2013; Milsch et al., 2013]. FluMo kann an unterschiedlichen Punkten der obertägigen Anlage angeschlossen werden und ermöglicht so die Überwachung von Fällungs- und Korrosionsprozessen. Darüber hinaus ermöglicht dieses Monitoringsystem eine sauerstofffreie Fluidprobenahme unter in situ Anlagenbedingungen für eine spätere chemische Analytik.

### Zusammenfassung und Ausblick

Ein zentrales Ziel der Forschung im Bereich der geothermischen Energiegewinnung ist es, die Zuverlässigkeit, Sicherheit und Effizienz von Geothermieanlagen zu verbessern. Das Monitoring relevanter physikalischer und chemischer Parameter in der geothermischen Anlage ist essentiell zum Verständnis komplexer hydraulischer und chemischer Prozesse in der untergägigen Lagerstätte, den Bohrungen und der obertägigen Anlage. Durch ein verbessertes Prozessverständnis wird eine aktive Steuerung der Anlage zur Erhöhung der Zuverlässigkeit, Sicherheit und Effizienz ermöglicht. Darüber hinaus können Umweltauswirkungen überwacht und kontrolliert werden.

Für ein verbessertes Prozessverständnis besteht Entwicklungsbedarf für Sensoren zur Ermittlung von Zustandsbedingungen (Druck und Temperatur), physikochemischen Parametern (z. B. pH, Eh, Sauerstoffgehalt, elektrische Leitfähigkeit, ionenspezifische Aktivitäten) und akustischen Emissionen (Beschleunigungssensoren). Die Einsatzbedingungen können dabei, je nach Standort, sehr rau sein (Druck bis 1000 bar, Temperaturen bis 400 °C und eine stark korrosive Umgebung). Die unterschiedlichen geometrischen Einbaubedingungen (z. B. Bohrloch, Pumpe, Rohrleitung, Durchströmungsarmaturen) erfordern darüber hinaus flexible konstruktive Lösungen. Für spezifische Forschungsfragestellungen, z. B. für physikochemische Messungen direkt im Porenraum von Gesteinen im Rahmen von komplementären gesteinsphysikalischen Experimenten, sind des Weiteren miniaturisierte Sensorkonzepte von großem Interesse. Technische Lösungen auf Basis faseroptischer Messtechnik sind hierfür besonders vielversprechend.

Weiterführende Informationen über die Forschungsarbeiten zu Korrosionsprozessen in geothermischen Anlagen sind enthalten in BINE Projektinfo „Korrosion in geothermischen Anlagen“ (6/2012)

[http://www.bine.info/fileadmin/content/Presse/Projektinfos\\_2012/Projekt\\_06-2012/ProjektInfo\\_0612\\_internetx.pdf](http://www.bine.info/fileadmin/content/Presse/Projektinfos_2012/Projekt_06-2012/ProjektInfo_0612_internetx.pdf)

## Referenzen

Bremer, K., E. Lewis, G. Leen, B. Moss, S. Lochmann, I. Mueller, T. Reinsch, and J. Schroetter (2010), Fibre Optic Pressure and Temperature Sensor for Geothermal Wells, in 2010 IEEE Sensors, edited, pp. 538-541, IEEE, New York.

Feldbusch, E., S. Regenspurg, J. Banks, H. Milsch, and A. Saadat (2013), Alteration of fluid properties during the initial operation of a geothermal plant: results from in situ measurements in Groß Schönebeck, Environmental Earth Sciences, 1-12, doi: 10.1007/s12665-013-2409-9.

Henninges, J., W. Brandt, K. Erbas, I. Moeck, A. Saadat, T. Reinsch, and G. Zimmermann (2012), Downhole monitoring during hydraulic experiments at the In-situ Geothermal Lab Groß Schönebeck, in Proceedings, 37th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering (CD-ROM), edited, pp. 51-56, Stanford, USA.

Mestayer, J., et al. (2011), Field trials of distributed acoustic sensing for geophysical monitoring, in SEG Technical Program Expanded Abstracts 2011, edited, pp. 4253-4257.



Abbildung 3  
Das mobile FluidMonitoringssystem (FluMo).

Milsch, H., R. Giese, M. Poser, S. Kranz, E. Feldbusch, and S. Regenspurg (2013), FluMo – a mobile fluid-chemical monitoring unit for geothermal plants, Environmental Earth Sciences, 1-5, doi: 10.1007/s12665-013-2408-x.

Reinsch, T., J. Henninges, and R. Ásmundsson (2013), Thermal, mechanical and chemical influences on the performance of optical fibres for distributed temperature sensing in a hot geothermal well, Environmental Earth Sciences, 1-16, doi: 10.1007/s12665-013-2248-8.

Reinsch, T., G. Blöcher, H. Milsch, K. Bremer, E. Lewis, G. Leen, and S. Lochmann (2012), A fibre optic sensor for the in situ determination of rock physical properties, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 55, 55-62, doi: DOI 10.1016/j.ijrmms.2012.06.011.

# Solarthermische Kraftwerke: Sensoren im F&E-Prozess, Herstellungsprozess und Einsatzmonitoring

DLR – Deutsches  
Zentrum für Luft- und  
Raumfahrt

Marc Röger  
Marc.Roeger@dlr.de

Prof. Dr. Robert Pitz-Paal  
robert.pitz-paal@dlr.de

Solarthermischen Kraftwerke wandeln im Gegensatz zur Photovoltaik die Energie des Sonnenlichts über Wärme in Elektrizität um. Zur Erzeugung eines ausreichenden Temperaturniveaus wird das Sonnenlicht durch der Sonne nachgeführte Spiegel auf einen Strahlungsempfänger („Receiver“) konzentriert, welcher die Strahlungsenergie auf ein Wärmeübertragungsmedium überträgt. Diese Wärmeenergie kann dann entweder für spätere Zeiten gespeichert werden, oder direkt an einen konventionellen Kraftwerkprozess zur Produktion von Elektrizität oder solarer Brennstoffe weitergegeben werden.

Im Bereich eines solarthermischen Kraftwerks gibt es eine ganze Reihe von Mess- und Regelgrößen, in denen verschiedenste Messtechniken und Sensoren gefragt sind. Dieser Beitrag gliedert sich in optische, mechanische, thermische, strömungstechnische Messaufgaben und Messaufgaben der Umgebungsbedingungen. Er kann dieses umfangreiche Thema nur exemplarisch behandeln. Messtechniken und Sensoren für den F&E-Einsatz dürfen durchaus etwas teurer und komplexer sein, da sie nur selten und wenn, dann von Experten angewendet werden,

während Sensoren, die in großer Anzahl bei der Herstellung von Komponenten wie Spiegeln oder Receivern zum Einsatz kommen, oder gar den Betrieb von Kraftwerken überwachen neben anderen Anforderungen preisgünstig, einfach in der Anwendung und stabil sein sollten.

## 1. Optische/Mechanische Messaufgaben

Solarthermische Kraftwerke konzentrieren das Sonnenlicht mittels gekrümmten Spiegelflächen. Häufig werden mehrere gekrümmte Spiegelfacetten auf einer Tragestruktur zusammengesetzt, um daraus z. B. eine linearkonzentrierende Parabolrinnen-Anlage (Abb. 1) oder einen punktkonzentrierenden Heliostat für Turmkraftwerke (Abb. 2) zu bilden.

Bei der Prototypentwicklung und im Herstellungsprozess von Spiegelfacetten muss die Spiegelform vermessen werden. Bei der späteren Montage der Spiegelfacetten muss sichergestellt werden, dass die Facetten richtig auf der Haltestruktur ausgerichtet werden („Canting“, „Alignment“). Zudem muss die Haltestruktur geometrischen Anforderungen gerecht werden. Zur Vermessung der Form bzw. auch der Verformung unter z. B. Gravitationseinfluss werden häufig photogrammetrische Messmethoden [1] angewendet (Abb. 3). Deflektometrische Messverfahren werden angewendet, um die Abweichung der Spiegelsteigung bzw. der Spiegelform von ihrem Soll zu messen (Abb. 4). Hierfür wird eine Serie von auf der Spiegeloberfläche reflektierten Streifenmustern mit einer Kamera aufgenommen und ausgewertet. Bei einer solaren Turmanlage kann die Bildaufnahme von einem zentralen Punkt auf Turmhöhe [2] gemacht werden, während bei einem Parabolrinnen-Solarfeld, die Kamera am Boden steht [3] bzw. unter einer fliegenden Plattform hängt [4] (Abb. 5). Photogrammetrische und deflektometrische Techniken überlagern sich hier im Zusammenspiel mit automatischer Bildverarbeitung und -auswertung.

Die Konzentratoren solarthermischer Kraftwerke müssen im Allgemeinen der Sonnenbahn nachgeführt werden („Tracking“). Hierfür bietet sich entweder die Steuerung über einen Sonnenalgorithmus an, oder auch die Nachregelung über eine Regelgröße. Zum Einsatz kommen z. B. Inklinometer, Drehgeber und Sonnensensoren. Sonnensensoren im Bereich der Parabolrinnen-Anlagen arbeiten z. B. mit einer ver-

Abbildung 1

Solarthermisches  
Turmkraftwerk auf der  
Plataforma Solar de  
Almería (Südspanien)  
im Versuchsbetrieb



Abbildung 2

Parabolrinnen-Kollektor  
auf der Plataforma  
Solar de Almería







Abbildung 3  
 Photogrammetrische Vermessung eines Heliostaten zur Bestimmung der Form und Verformung in verschiedenen Elevationswinkeln

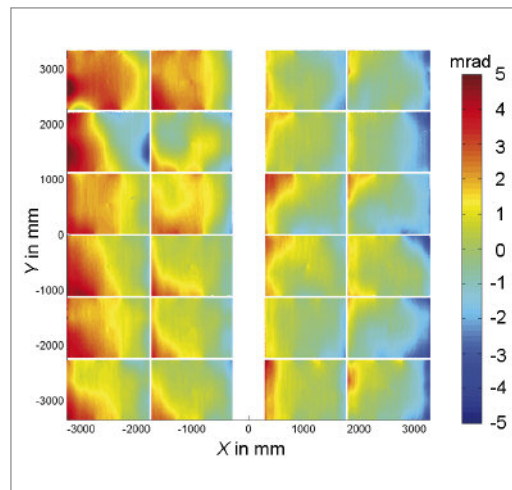


Abbildung 4  
 Auf einem Heliostat reflektiertes Streifenmuster (links) und Ergebnis einer Deflektometrie-Auswertung: Abweichung der Spiegelsteigung in -Richtung vom Soll in mrad (rechts)

schattenden Struktur, die zwei in einem Abstand montierte, hintereinandergeschaltete PV-Zellen teilweise abschattet. Ist der Konzentrator nicht senkrecht zur Sonne ausgerichtet, ist der Anteil der Verschattung größer und der Strom der PV-Zellen ist nicht maximal. Diese Art von Trackingsystemen wird beim Betrieb von solarthermischen Kraftwerken in großer Anzahl benötigt. Exemplarische Herausforderungen sind hierbei die korrekte Ausrichtung des Sensors auf einer nicht vollständig verformungsfreien Struktur, die initiale Orientierung der Konzentratoren, Verschmutzung des Sensors, Drift, Langzeitstabilität, Genauigkeit und Sensorpreis.

Intelligente Sensoren bzw. Algorithmen erlauben dann z. B. die Kompensation einer Verformung der Heliostate bzw. einer Torsion einer Parabolrinne durch Gravitationskräfte, Reibung oder Wind. Einzelne Parabolrinnen-Kollektoren können bei Übertemperaturen teilweise defokussiert werden.

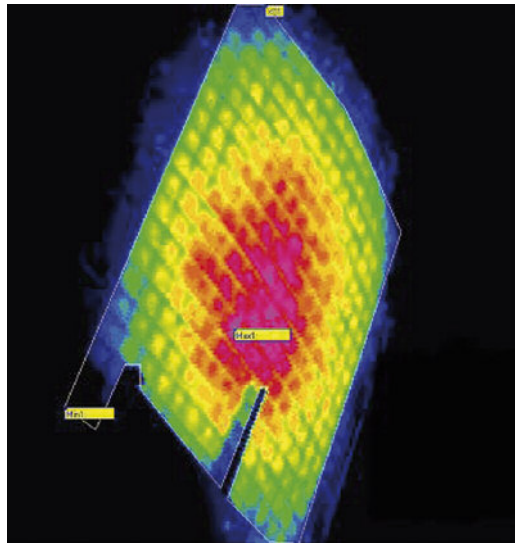
Heliostate von solaren Turmkraftwerken werden individuellen Zielpunkten im Bereich des Receivers



Abbildung 5  
 Quadcopter mit Kamera zur deflektometrischen Vermessung von Parabolrinnen-Konzentratoren aus der Luft

zugeordnet, um eine möglichst homogene Temperaturverteilung des Receivers bei minimalen Verlusten zu ermöglichen. Hier eröffnet sich der Bereich einer optimierten dynamischen Zielpunktstrategie [5], die auf Störungen gezielt reagiert. Voraussetzung ist, dass die individuellen Zielpunkte der Heliostate mit hoher Genauigkeit bekannt sind. Die Zielpunkte werden

Abbildung 6  
Beispiel einer mit einer Infrarot-Kamera gemessenen Temperaturverteilung eines offenen volumetrischen Luftreceivers



derzeit häufig dadurch ermittelt, dass ein Heliostat auf eine weiße Leinwand fokussiert wird, dessen Brennfleck in einer Kamera-Aufnahme und damit dessen Zielpunkt zum Aufnahmezeitpunkt bestimmt wird [6]. Fortgeschrittenere Methoden erlauben auch die Bestimmung der Heliostat-Orientierung mittels Kameras, welche auf das Heliostaten-Feld fokussiert ist [7].

Der Bedarf in diesem Bereich wird gesehen in Sensoren zur intelligenten Messung und Regelung des Antriebs von Parabolrinnen bzw. Heliostaten, entweder in der Form als autonome Einheiten, oder verbunden mit einer zentralen Regeleinheit. Günstige, hochauflösende Kameras, die mit optisch sehr guten Objektiven verbunden werden können, sind hilfreich, um die Errungenschaften im Bereich der Bildverarbeitung und -auswertung industriell anwenden zu können.

Eine wichtige Messgröße, die für den Ertrag und Wirkungsgrad von solaren Turmkraftwerken Bedeutung hat, ist die solare Flussdichteverteilung in der Aperturfläche von Receivern, die über die Fläche integriert der in den Receiver eingestrahlten Energiemenge entspricht. Diese Information wird auch benutzt, um Zielpunkte von Heliostaten zu optimieren. Neben Computersimulationen und anderen Messtechniken [8] wird häufig eine Flussdichte-Messung mit einem beweglichen Lambertschen Target durchgeführt. Die in eine CCD Kamera reflektierte Helligkeit wird über Radiometer kalibriert [9]. Hier werden als Sensoren Radiometer oder PV-Zellen benötigt, die möglichst unabhängig vom Spektrum Flussdichtewerte in der Größenordnung von über tausend Sonnen stabil und preiswert messen können. Zudem sind hier auch preisgünstige CCD-Kameras hoher Dynamik wünschenswert.

Im Bereich der Messung von Reflexionsgraden von Spiegeloberflächen und der Untersuchung von Degradation wurde ein optisches Messgerät entwickelt, mit dem der gerichtete Reflexionsgrad ortsaufgelöst gemessen werden kann [10].

## 2. Thermische Messaufgaben

Typische wärmetechnische Messaufgaben bei solarthermischen Turmkraftwerken ist die Messung der Temperaturverteilung auf einem externen Receiver (Abb. 6) bzw. in einem Hohlraum-Receiver unter konzentrierter Solarstrahlung (sogenannte „solarblinde“ Temperaturmessung) [11]. Teilweise sind Receiver zur Reduktion der konvektiven und radiativen Verluste bzw. zum Abschluss eines Receiverreaktors von der Umgebung über ein Quarzglasfenster abgedeckt. Je nach Messaufgabe muss die Temperatur des Quarzglases bzw. des dahintergelegenen Receivers solarblind gemessen werden.

Für die Messung von Temperaturverteilungen wird meist Infrarotmesstechnik mit spezifischen Filtern verwendet. Für die solarblinde Messung wird häufig in die atmosphärischen Absorptionsbanden ausgewichen, was die Messung wiederum sensitiv für atmosphärische Gase wie Wasserdampf und Kohlendioxid macht. Eine günstige Infrarot-Kameratechnik in den geeigneten Wellenlängenbereichen führe dazu, dass solche Systeme nicht nur im F&E-Bereich, sondern auch industriell im Bereich des Betriebsmonitoring stärkeren Einsatz fänden. Zudem wäre für diesen Bereich denkbar, eine breitbandige Kamera mit Filterrad, welche es erlaubt, im sichtbaren Bereich zur Ermittlung der solaren Flussdichteverteilung und im infraroten Bereich zur Messung der Temperaturverteilung eines Receivers verwendet zu werden. Zusätzlich zur berührungslosen Infrarot-Technik werden handelsübliche Widerstandsthermometer und Thermoelemente verwendet.

Für den Wirkungsgrad wichtige Messgrößen sind konvektive und radiative Verluste, die heute zumeist berechnet werden. Transiente Methoden zur Bestimmung konvektiver Verluste sind derzeit Themen der F&E.

Im Bereich von Parabolrinnen-Kraftwerken stellen deren große örtliche Ausdehnung, die zeitliche Variabilität der solaren Einstrahlung und die Kosten und Genauigkeiten von Messsensoren besondere Anforderungen an Verfahren zur Wirkungsgradmessung und Abnahme von Solarfeldern [12].



### 3. Strömungstechnische Messaufgaben und Fluide

Offene volumetrische Luftreceiver von solaren Turmkraftwerken verwenden Umgebungsluft als Wärmeträgermedium. Die im Receiver erhitzte Luft gibt ihre Wärme an einen sekundären Kreislauf ab, und wird aufgrund ihres Restwärmegehalts wieder vor den Receiver zurückgeführt, um dort zu einem großen Teil rezirkuliert zu werden. Aufgaben in F&E sind die Bestimmung des Anteils der rezirkulierten Luft am Gesamtluftstrom und dessen Beeinflussung durch Wind bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen sowie konstruktive Maßnahmen zu Steigerung der Rezirkulationsrate.

Hierfür sind Messtechniken notwendig, welche die Strömungsverhältnisse in einem größeren Luftvolumen vor dem Receiver auflösen, wie z. B. die in Entwicklung befindlichen LIDAR basierten Scannersysteme. Andere derzeit in Entwicklung befindliche Messmethoden nutzen den Receiver und die darin zirkulierende Luft selbst, indem über Massenbilanzen (Tracergas) bzw. Wärmebilanzen oder transiente Temperaturerregungen Informationen über die Rezirkulationsrate gewonnen werden.

Herkömmliche solarthermische Parabolrinnenkraftwerke nutzen zumeist Thermoöle als Wärmeübertragungsmedium. Zur Abnahme und Optimierung von Anlagen werden Wirkungsgradmessungen vorgenommen, deren Signifikanz von der Genauigkeit des spezifischen Wärmekapazität-Werts des vorliegenden Thermoöls abhängt. Da diese Öle über die Zeit altern und sich ihre physikalischen Eigenschaften ändern können, wird ein Durchströmungskalorimeter entwickelt, welches deren spezifische Wärmekapazität unter Betriebsbedingungen der Wirkungsgrad-Tests bestimmt.

Typische Parabolrinnen-Receiver bestehen aus einem selektiv beschichteten Absorberrohr aus Stahl und einem umliegenden Glashüllrohr. Der Raum zwischen den Rohren ist zur Minimierung von Wärmeverlusten evakuiert. Über Zersetzungsreaktionen des Thermoöls werden kleinste Mengen an Wasserstoff freigesetzt, welche in den evakuierten Raum diffundieren können, und Isolationswirkung zunichte machen können. Im Bereich des Einsatzmonitoring sind kostengünstige, kabellose Sensoren wünschenswert, über die der Wasserstoffgehalt im Ringspalt zu messen und auszulesen wäre.

Neuere Anlagenkonzepte verzichten auf den Thermoöl-Kreislauf und verdampfen das Wasser für den Turbinenspeisedampf direkt in den Parabolrinnen-Kollektoren. In diesem Fall liegt eine komplexere, waagrechte Zweiphasenströmung vor, die über Regeleinrichtungen in einem stabilen Bereich mit homogener



Abbildung 7  
Zwei-Pyrheliometer-  
Aufbau auf einem  
Sonnentracker zur auto-  
matischen Messung der  
Verschmutzung einer  
Spiegeloberfläche

Benetzung der Rohrwände gehalten werden muss. Hier wären kostengünstige Sensoren hilfreich, welche den Dampfgehalt im Zweiphasengebiet bei Drücken bis ca. 100 bar messen.

### 4. Messung der Umgebungsbedingungen

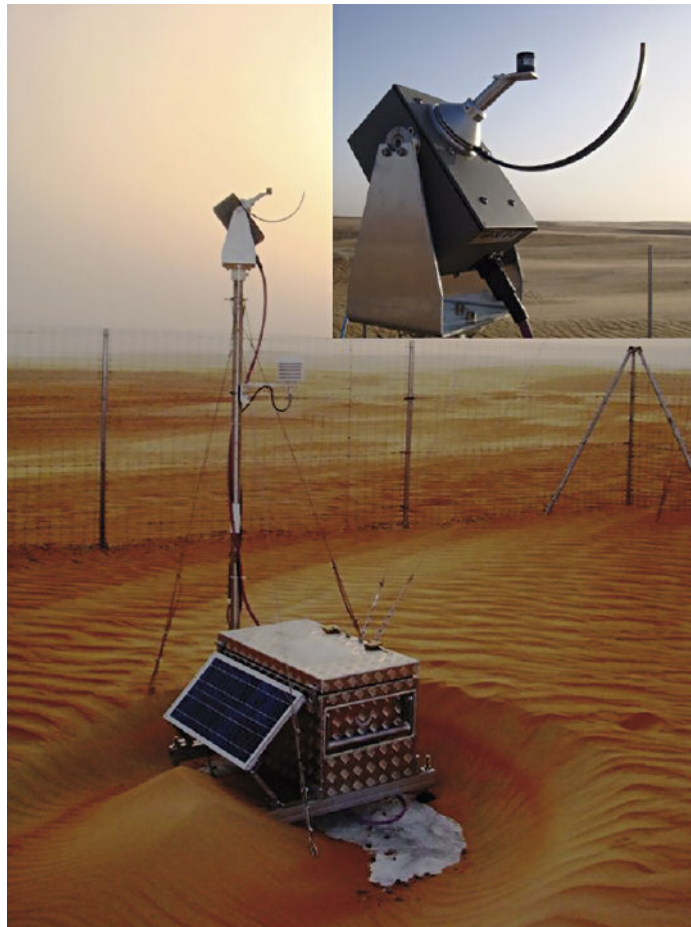
Im Bereich Messung der Umgebungsbedingungen wird in diesem Beitrag zwischen Messaufgaben im Umfeld von F&E, der Standortsuche von solarthermischen Kraftwerken und in einem Kraftwerk unterschieden.

Bei der Messung von Umgebungsbedingungen sind hier exemplarisch die solare Direktstrahlung (DNI), die Messung der Verschmutzung von Spiegeln und Absorbern oder die Extinktion von Licht bei einem solaren Turmkraftwerk auf dem Weg vom Heliostat zum Receiver genannt.

Im F&E Bereich können teure Geräte, die von Wissenschaftlern betreut werden, eingesetzt werden und bringen im Allgemeinen eine ausreichende Genauigkeit mit. Handelsübliche Solartracker mit Pyrheliometer, zwei Pyranometern und Schattenball werden für hochpräzise DNI-Messungen verwendet, siehe z. B. [13]. Für die automatische Messung der Verschmutzung von Spiegeln wurde ein Messgerät entwickelt, bei welchem ein Pyrheliometer direkt in die Sonne gerichtet, und das zweite über einen (verschmutzten) Spiegel in die Sonne blickt [14] (Abb. 7). Im Bereich der Extinktion von Licht vom Heliostat zum Receiver werden z. B. LIDAR-Systeme, Transmissiometer, MOR-Streulichtsensoren, Aerosol-Partikelzähler und Simulationen mit Strahlungstransfermodellen, oder den Einsatz von Pyrheliometer auf verschiedenen Höhen verwendet.

Im Bereich der Standortsuche von solarthermischen Kraftwerken sieht es anders aus. Hier handelt es sich häufig um entfernt gelegene Wüstenstandorte und

Abbildung 8  
Rotating Shadowband  
Irradiometer (RSI) beim  
Einsatz im Wüstenge-  
biet zur Standortsuche  
für solarthermische  
Kraftwerke



mehrere verschiedene Standortoptionen müssen miteinander verglichen werden. Die Messgeräte müssen also energie- und weitgehend personalautark zu betreiben sein und bei nur mittleren Preisen eine hohe Messgenauigkeit und Ausfallsicherheit besitzen. Für die Messung der solaren Direktstrahlung zur Standortsuche werden typischerweise RSI (Rotating Shadowband Irradiometer, Abb. 8) verwendet, z. B. [15]. Hier wird der Signaleinbruch einer Photovoltaikzelle mit Diffusorscheibe ausgewertet, während ein Schattenband über die Zelle rotiert und die Zelle kurzzeitig abschattet. Neben ihren Vorteilen einer schnellen Ansprechzeit und einer geringeren Anfälligkeit gegenüber Verschmutzung besitzt die Photovoltaik-Zelle mit Diffusorscheibe gegenüber den thermischen Sensoren der Pyrheliometer den Nachteil eines ausgeprägten spektralen Akzeptanzverhaltens. Mit dem Einsatz von Mehrfachsolarellen bzw. zusätzlichen Zellen anderen selektiven Verhaltens könnten die durch das sich im Tagesverlauf ändernde Sonnenspektrum notwendigen Korrekturen weiter verbessert werden und sich die Messgenauigkeit dieser Systeme weiter erhöhen.

Im Bereich der Messung der Extinktion zwischen Heliostat und Receiver im Bereich der Standortsuche wird erforscht, inwiefern Korrelationen ableitbar sind, welche den atmosphärischen Extinktionsgrad mit einfach zu messenden Größen und weiteren verfügbaren Standortinformationen korrelieren. Für die Standortsuche ist es auch interessant, ob dieselben Verschmutzungsraten für verschiedene Standortoptionen vorliegen. Hier herrscht noch Bedarf an der Entwicklung kostengünstiger Messgeräte, welche mit vorhandener Sensortechnologie ausgestattet, die Verschmutzungsraten eines Spiegels bzw. einer Oberfläche automatisch messen und auswerten können. Solche Messgeräte sind auch interessant im Hinblick auf den Betrieb eines Kraftwerks.

Während der Betriebsphase eines solarthermischen Kraftwerks müssen Sensoren zum Einsatz gebracht werden, welche vom normalen Betriebspersonal gewartet und bedient werden können. Für einen optimalen Kraftwerksbetrieb stellt sich z. B. die Frage, welche Zonen der Kollektorfelder wie oft gereinigt werden müssen. Hier kommt der Einsatz von kostengünstigen Verschmutzungsmessgeräten in Frage. Die Basis für eine optimale Betriebsstrategie eines solar-

thermischen Kraftwerks sind neben längerfristigen Wettervorhersagen eine solare Direktstrahlungsmessung und eine kurzfristige Vorausschau (Nowcasting), z. B. mit Wolkenkameras und intelligenter Auswertemethodik.

Dieser Beitrag zeigt, dass das Gebiet der Mess- und Sensortechnik, welche im Bereich der solarthermischen Kraftwerke zum Einsatz kommt, sehr breit und umfangreich ist. Eine verstärkte Zusammenarbeit von Fachleuten des Bereichs solarthermischer Kraftwerke mit Fachleuten aus der Welt der Sensorik hat das Potenzial, die Messideen der F&E in marktfähige Messgeräte umzusetzen.

## Quellen

- [1] Pottler, K.; Lüpfer, E.; Johnston, G. H.; Shortis, M. R.: Photogrammetry: A powerful tool for geometric analysis of solar concentrators and their components, *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol 127, pp. 94-101, February 2005.
- [2] Ulmer, S.; März, T.; Prah, C.; Reinalter, W.; Belhomme, B.: Automated High Resolution Measurement of Heliostat Slope Errors *Solar Energy* 85, 2011, pp. 681–687
- [3] Ulmer, S.; Heinz, B.; Pottler, K.; Lüpfer, E.: Slope Error Measurements of Parabolic Troughs Using the Reflected Image of the Absorber Tube. *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol. 131, No. 1, February, 2009
- [4] Prah, C.; Stanicki, B.; Hilgert, C.; Ulmer, S.; Röger, M.: Airborne Shape Measurement of Parabolic Trough Collector Fields. *Solar Energy*, Volume 91, May 2013, pp. 68-78
- [5] Belhomme, B.: Bewertung und Optimierung von Zielpunktstrategien für solare Turmkraftwerke, Shaker Verlag, 2011
- [6] Berenguel, M.; Rubio, F.R.; Valverde, A.; Lara, P.J.; Arahal, M.R.; Camacho, E.F.; López, M.: An artificial vision-based control system for automatic heliostat positioning offset correction in a central receiver solar power plant, *Solar Energy*, 76, 2004, 563-575.
- [7] Röger, M.; Prah, C.; Ulmer, S.: Heliostat Shape and Orientation by Edge Detection. *J. Sol. Energy Eng.*, Vol. 132, No. 2, 21002, 2010
- [8] Röger, M., Herrmann, P., Ebert, M., Prah, C., Ulmer, S., and Göhring, Flux Density Measurement on Large-Scale Receivers. In: *Proceedings of SolarPACES 2011*, Granada, Spain, 2011
- [9] Ulmer, S.: Messung der Strahlungsflussdichte-Verteilung von punktkonzentrierenden solarthermischen Kraftwerken, VDI Verlag, Fortschritt-Berichte, Reihe 6, Nr. 510, 2004
- [10] Sutter, F.: Methoden zur Analyse der Beständigkeit von Aluminium-Solarspiegeln, VDI Verlag, Fortschritt-Berichte, Nr. 604, 2012
- [11] Pfänder, M.: Pyrometrische Temperaturmessung an solarthermischen Hochtemperaturrezeivern, VDI Verlag, Fortschritt-Berichte, Reihe 8, Nr. 1110, 2006
- [12] Janotte, N.: Requirements for Representative Acceptance Tests for the Prediction of the Annual Yield of Parabolic Trough Solar Fields, Shaker Verlag, 2012
- [13] Geuder, N., Quaschnig, V., Soiling of irradiation sensors and methods for soiling correction. *Solar Energy*, 80(11), 1402-1409, 2006.
- [14] Wolfertstetter, F.; Pottler, K.; Merrouni, A.; Mezrhah, A.; Pitz-Paal, R.: A novel Method for Automatic Real-Time Monitoring of Mirror Soiling Rates, *SolarPACES Conference*, Marrakesch, Morocco. 2012.
- [15] Geuder, N.; Pulvermüller, B., Vorbrugg, O.: Corrections for rotating shadowband pyranometers for solar resource assessment, *Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering*, vol. 7046, 2008, pp. 70460F.1-70460F.12.

# Einsatz von Sensoren für Energieflussanalysen für Energienetze, Smart Grids, Smart Metering

Karlheinz Ronge  
Fraunhofer IIS  
karlheinz.ronge@iis.fraunhofer.de

Dr. Christof Wittwer  
Fraunhofer ISE  
christof.wittwer@ise.fraunhofer.de

## 1. Einleitung: Sensoren und Intelligente Netze

Die Transformation des Energieversorgungssystems in ein vorwiegend erneuerbares Energieversorgungssystem erfordert neben der Integration vieler Erzeuger und Verbraucher in allen Energiesparten, den Einsatz von moderner IKT mit modernster Sensorik und Aktorik, um die Energie trotz Fluktuation der Erzeugung mit höchster Effizienz zum Verbraucher zu bringen.

Die technischen Herausforderungen und Innovationen für die Netze der Zukunft liegen in folgenden Themenbereichen:

- Integration dezentraler und erneuerbarer Energiesysteme
- Systemkomplexität
- Lastflussdynamik
- Effizienzkontrolle und Metering
- Vernetzung und Aggregation von Informationen
- Idee: Energieflussanalyse auf Basis vernetzter Sensoren

Der Einsatz der vernetzten Messtechnik führt zu einer massiv zunehmenden Datenmenge, die auch sinnvoll verwertet werden muss und kann. Ein klarer Ansatz hierzu ist beispielsweise die „Energieflussanalyse auf Basis vernetzter Sensoren“, d. h., man kann unter Umständen auf hohe Genauigkeiten und Kalibrierung von Systemen verzichten, wenn man Sensorsysteme aufbaut, die eine Bilanzierung und Sensorkontrolle ermöglichen.

Abbildung 2 zeigt die Lastdisaggregation aus Stromlastgangdaten [BMWI-SmartMetering-Fördervorhaben], die bezüglich typischer Verbraucherguppen qualifiziert wurden. Vielfältige Informationen aus den häuslichen Sensoren können für solche Analysen herangezogen werden.

## 2. Physikalische Messgrößen in Gebäude und Netz

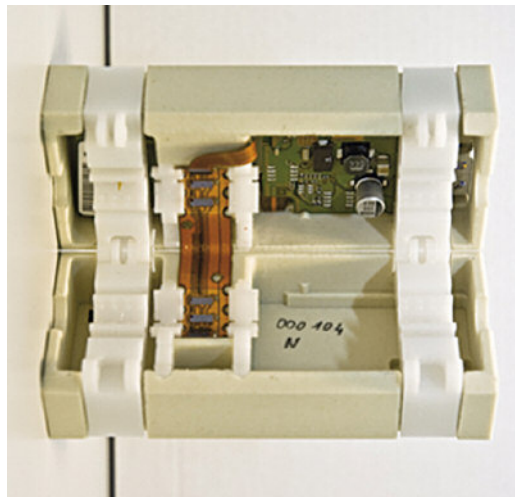
Typische physikalische Messgrößen im Kontext der Gebäude und dem Stromnetz gliedern sich wie folgt:

- Strommessung (DC, AC, Strom/Spannung mit hoher zeitlicher Auflösung, Strom, Wirk-Blindleistung, Power Quality, PMU Phase Measurement Unit)
- Wärmemengen (Durchfluss MID, US, Flügelrad; Temperaturen PT)
- Durchflussmengen (Gas, Wasser, Flüssigbrennstoff, Feststoff), ggf. Erfassung der Zielgröße Energiemenge durch einen „Brennwertsensor“
- Zustandssensoren Temperatur, Strahlung (Thermoelement, Pyranometer), Si-Zellen, Präsenzmessung, Luftqualität, Strömungswächter etc. .

Viele Messgeräte dieser Art gibt es schon im Haushalt, die Systeme sind aber meist nicht vernetzt und weisen oft Probleme bezüglich ihrer Langlebigkeit auf. Die Anforderungen an die Sensoren sind sehr hoch und sehr unterschiedlich. Für eine breite Anwendung sind sehr oft Kostenaspekte (CAPEX und OPEX) und damit einhergehende eine entsprechend lange Lebensdauer entscheidend, um überhaupt neue Anwendungen flächendeckend einführen zu können. Erst die Verfügbarkeit einer passenden Kommunikationsanbindung ermöglicht die Nutzung in einem Gesamtsystem. Speziell bei funkbasierten Lösungen wird immer öfter eine energieautarke Lösung nachgefragt, bevorzugt sind natürlich Lösungen, die Energy Harvesting zur Eigenversorgung nutzen. Sowohl deswegen, aber auch weil Sensorik oft andauernd betrieben wird, werden energieeffiziente Komponenten gefordert.

An Sensorik für Abrechnungszwecke werden noch weitere Anforderungen gestellt. Sie müssen kalibriert und geeicht werden. Das Eichrecht stellt dazu hohe Anforderungen an die Langzeitstabilität der Messwertaufnehmer. Da die Sensoren nach Ablauf der

Abbildung 1  
Beispiel für einen neuartigen Sensor: Clamp-On-Leistungsmessung für die Nachrüstung zum Verbrauchsmontoring für elektrische Großverbraucher





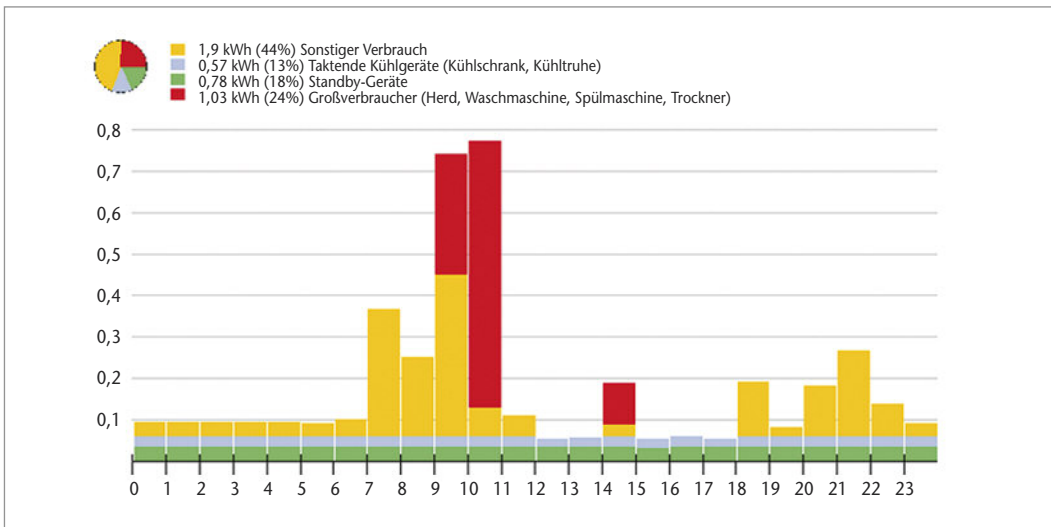


Abbildung 2  
Analyse von Stromlastprofilen in Verbraucherklassen

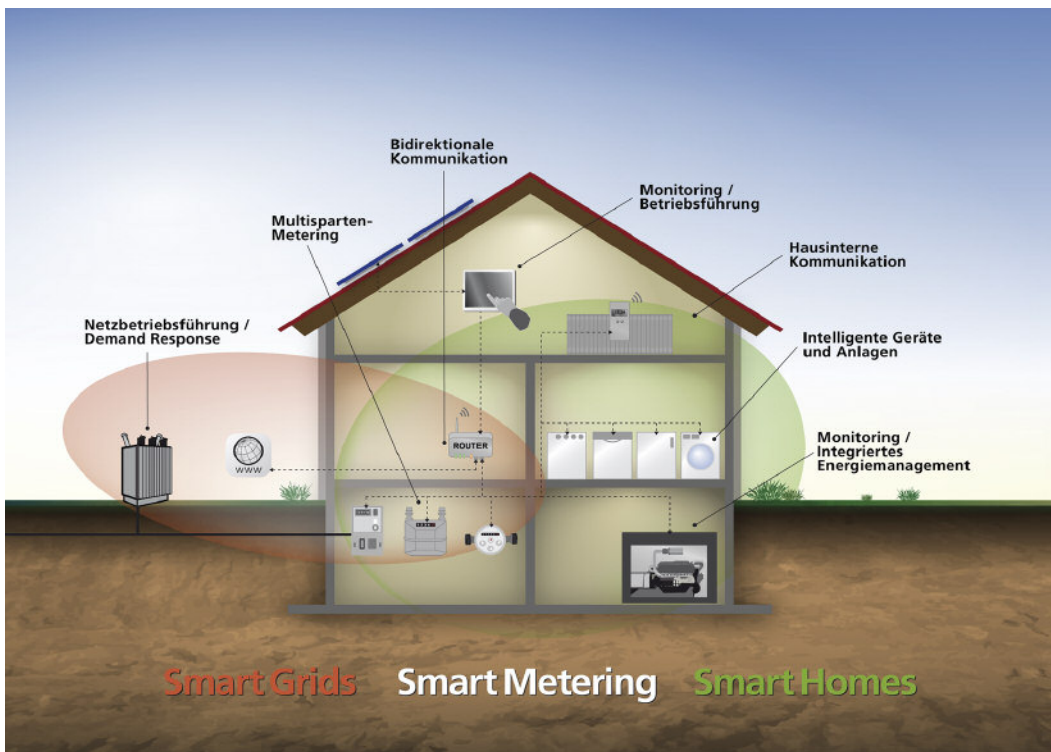


Abbildung 3  
Smart-Home-Anwendungen mit BHKW und PV-Anlagen, die über ein Smart-Metering-System vernetzt werden

Eichdauer getauscht werden müssen, sollten Lebensdauer und Eichdauer in einem wirtschaftlich optimalen Verhältnis stehen. In zunehmendem Maß ist auch eine verschlüsselte oder signierte Übertragung gefordert, um Datenschutz und Datensicherheit zu gewährleisten, z. B. wegen des sog. BSI-Schutzprofils im Bereich Smart Meter.

### 3. Beispiel: Sensoren für die Strommessung

Die Sensoren für die Strommessung gliedern sich in verschiedene Messprinzipien, die Einfluss auf die Eigenschaften haben. Für die „Stromzange/Mess-

wandler“, den „LEM-Sensor, die Magneto-resisiven Sensoren, die Rogowskispule und den Hallsensor wurde eine Zuordnung in Tabelle 1 erstellt:

Die Kostenanalyse zeigt schnell, dass die Hallsensoren für die „intelligenten“ Sensoren sehr interessant sind, weshalb ein solches System beim Fraunhofer IIS entwickelt wurde. Der Vorteil tritt erst auf, wenn der Sensor schon von vorneherein mit einer gewissen Intelligenz und der geeigneten Kommunikationsschnittstelle ausgestattet wird (links unten).



Tabelle 1  
Sensoren für  
die Strommessung

	Stromzange/ Messwandler	LEM-Sensor	Magneto- resis- tiver Sensor	Rogowski- spule	Hallsensor
Kleiner Formfaktor	✗	✗	○	✓	✓
Messung mit großem Dynamikbereich möglich (wenige mA bis zu zweistellige Amperewerte)	✗	✗	○	✓	✓
Wechsel- und Gleichstrommessung	✗	✓	✓	✗	✓
Keine Messverfälschung durch Hysterese- oder Sättigungseffekte	✗	✗	✗	✓	✓
Installation ohne Auftrennen der Leitung	✓	✓	✗	✓	✓
Unempfindlich gegen Überlastung (Überstrom)	✗	✗	✗	✓	✓
Kosten Sensor	✗	✗	✗	✓	✗
Kosten Intelligenter Sensor	✗	✗	✗	✗	✓

#### 4. Zusammenfassung

Viele zusätzliche vernetzte Sensoren im Umfeld der lokalen Energieerzeugung, Versorgung und der Nutzung sind zukünftig nötig. Fast alle Messgrößen können heute bereits erfasst werden, aber oft zu aufwändig. Daher stellen sich folgende Herausforderungen:

- Standardisierung von Schnittstellen zu Sensorsystemen
- Langlebigkeit bei gleichbleibender Messgüte
- Robustheit, da Betrieb in rauen Umgebungen
- Baugröße für Nachrüstung in existierenden Anlagen
- Bedarf für intelligente Sensoren, die energieautonom und energieeffizient sind (insbes. Funkanbindung)
- Einfache Eichbarkeit
- Verschlüsselung und Signatur so nahe wie möglich am Entstehungsort der Messgröße
- Kosten

Das Zusammenspiel der Komponenten im Smart Home und Smart Grid kann im SmartEnergyLab des Fraunhofer ISE erprobt und entwickelt werden, hier finden sich die typischen Rahmenbedingungen für „Wetter“ und „Last“ einer Energieversorgung für Wohngebäude.

Abbildung 4  
Smart Home-  
Anwendungen mit  
BHKW und PV-Anlagen,  
die über ein Smart  
Metering-System  
vernetzt



## Energieeffiziente Gebäude – Gebäudeautomatisierung – Energieflussanalysen

### Energieeffiziente Gebäude – Gebäudeautomatisierung – Energieflussanalysen

Der Gebäudesektor ist für rund 40 % des Endenergieverbrauchs in Deutschland verantwortlich. Aus Klima- und ressourcenpolitischen Erfordernissen ist es zwingend notwendig eine drastische Reduktion dieses Verbrauchs und insbesondere des fossilen Anteils am Energieverbrauch zu erreichen. Um mittelfristig vollständig auf fossile Energieträger verzichten zu können, ist einerseits der Energiebedarf der Gebäude durch bauliche Maßnahmen und effiziente Anlagentechnik deutlich zu verringern und andererseits der noch verbleibende Bedarf vollständig durch erneuerbare Energien zu ersetzen. *Abbildung 1* zeigt die Entwicklung des Primärenergiebedarfs von Wohngebäuden während der letzten Jahrzehnte beginnend von den ersten Solarhäusern in den 80er-Jahren bis hin zu Plusenergie-Häusern.

Da die Verfügbarkeit regenerativ erzeugter Energien starken zeitlichen und örtlichen Schwankungen unterliegt, wird es zukünftig immer wichtiger werden, den Energieverbrauch mit der aktuellen Verfügbarkeit abzugleichen und Überkapazitäten möglichst verlustfrei zu speichern. Hierzu ist ein komplexes Kommunikationssystem nötig, das den Informationsfluss zwischen den einzelnen Akteuren ermöglicht. Der verstärkte Einsatz von Sensorik wird hier zukünftig

eine wesentliche Schlüsselfunktion übernehmen, damit die benötigten Informationen der einzelnen Subsysteme (Energieerzeuger, Energieverbraucher, Speichersysteme, Verteilnetze etc.) verfügbar gemacht und miteinander vernetzt werden können.

Die wesentlichen Akteure sind hierbei:

- Regenerative Energieerzeugung
  - Steuerbare Erzeugung (Biogas, Wasserkraft, BHKW, Nahwärmeversorgung)
  - Nicht/eingeschränkt steuerbare Erzeugung (Solar, PV, Windkraft, Abwärme)
- Energiespeicherung
  - Wärme (Thermische Solarspeicher, Gebäudemasse)
  - Strom (Batterien, E-Kfz, elektrochemische Umwandlung)
- Stromnetz
- Externe Infoquellen
  - Wetterdienst
  - Netzleitsystem
- Energiebedarf/Nutzer
  - Fixe und steuerbare Lasten in Gebäuden sowie auf Siedlungsebene
  - Möglichkeit der Beeinflussung des Energieverbrauchsverhaltens

*Herbert Sinnesbichler*  
Fraunhofer IBP – Fraunhofer-Institut für Bauphysik  
herbert.sinnesbichler@ibp.fraunhofer.de

*Peter Pärtsch*  
ISFH – Institut für Solarenergieforschung GmbH  
paerisch@isfh.de

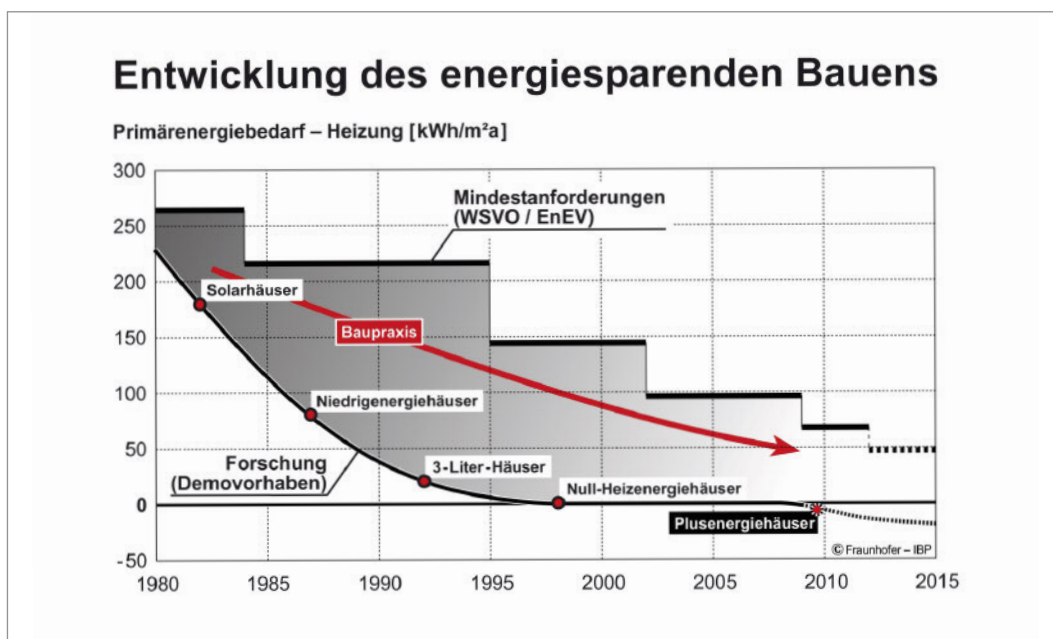


Abbildung 1  
Meilensteine des energieeffizienten Bauens.

In zahlreichen Pilotvorhaben werden derzeit unterschiedliche Konzepte untersucht, welchen Beitrag Gebäude zukünftig in einem intelligenten Energiemanagementsystem leisten können. Im Folgenden sind einige Projekte kurz dargestellt.

### FIEMSER (Friendly Intelligent Energy Management System for Existing Residential Buildings) (IBP)

In dem von der EU geförderte Forschungsprojekt FIEMSER wird ein Energiemanagement-System entwickelt, dass in bestehende Wohngebäude nachträglich ohne großen Aufwand mit Hilfe funkgestützter Sensoren und Aktoren kostengünstig nachgerüstet werden kann. Bedient wird es über Fernseher, Smartphones oder über normale PCs. Ziel des Systems ist es, regenerativ erzeugte, thermische und elektrische Energie möglichst lokal und sofort zu verbrauchen und nur die Überschüsse zu speichern oder ins Netz einzuspeisen. Die FIEMSER-Steuerung stimmt dazu die zeitlichen Energie-Erzeugungs- und Verbrauchsprofile automatisch aufeinander ab (Abbildung 2).

### Betriebsoptimierung von Wohngebäuden unter Einbeziehung von Wetterdaten/-vorhersagen (IBP)

Der Heizenergieverbrauch von Gebäuden ist von mehreren Parametern abhängig. Hierbei spielen sowohl das Gebäude (thermische Speichermassen, Fensterflächen), innere Lasten (Personen, elektrische Verbraucher), das Wetter (Temperatur, Sonnenschein, Windgeschwindigkeit/-richtung) als auch der zeitliche Verlauf dieser Faktoren eine entscheidende Rolle. Eine Änderung der Außentemperatur wirkt sich mitunter – in Abhängigkeit von Luftwechsel, Wärmeübergabesystem und Dämmstandard – erst nach Stunden auf die Innenraumtemperatur bzw. den Wärmebedarf aus. Solare Gewinne wirken jedoch meist unmittelbar. Bei bisher üblichen Heizungsregelungen werden diese Zusammenhänge nur vereinfacht berücksichtigt. Basierend auf einer starren Heizkennlinie und der Außentemperatur wird die Vorlauftemperatur der Witterung angepasst. Die gemessene Außentemperatur wird dabei, abhängig von der in der Regelung eingestellten Zeitkonstante, gedämpft. Es fehlt jedoch eine direkte Verbindung zur

Abbildung 2  
Funktionsprinzip  
Energiemanagement-  
System FIEMSER.



Abbildung 3  
Zwillingshäuser  
Ansicht von Westen.



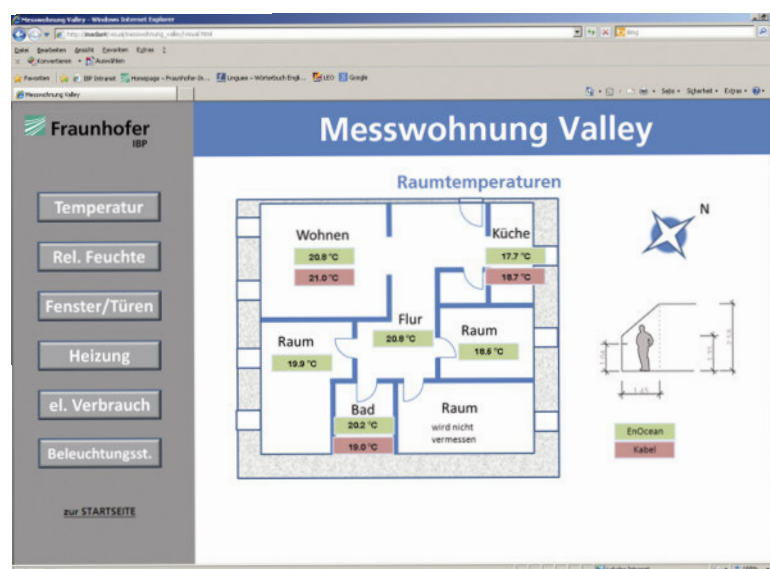


Abbildung 4  
Beispielhafte, web-basierte Visualisierung von Raumlufttemperaturen basierend auf batterielessen Funksensoren.

solaren Einstrahlung. Eine Berücksichtigung der in den nächsten Stunden auftretenden Wetterbedingungen und damit eine vorausschauende Regelung, z. B. durch Einbindung einer Wettervorhersage, wird bisher ebenfalls nicht realisiert. Am Fraunhofer-Institut für Bauphysik wird in den Wintermonaten 2012/13 ein neuartiges Regelungssystem, welches diese Lücke schließen soll, untersucht. Basierend auf den Gebäudedaten und der Wettervorhersage wird von einem Rechenmodell der Heizenergiebedarf vorausgerechnet und anhand der Bedarfsprognose die Vorlauftemperatur der Heizungsanlage angepasst. Ein Abgleich mit den aktuellen Wetterdaten und den gemessenen Raumtemperaturen ermöglicht im Bedarfsfall, z. B. bei einer ungenauen Wettervorhersage, eine entsprechende Korrektur. Für die Vergleichsuntersuchungen werden zwei baugleiche Einfamilienhäuser – Zwillingshäuser – (Abbildung 3) jeweils mit einer identischen Heiztechnik betrieben. Ein Gebäude wird zusätzlich mit der zu testenden, wetterprognosegestützten Regelung ausgerüstet.

### Praxiserprobung von batterielessen Funksensoren (IBP)

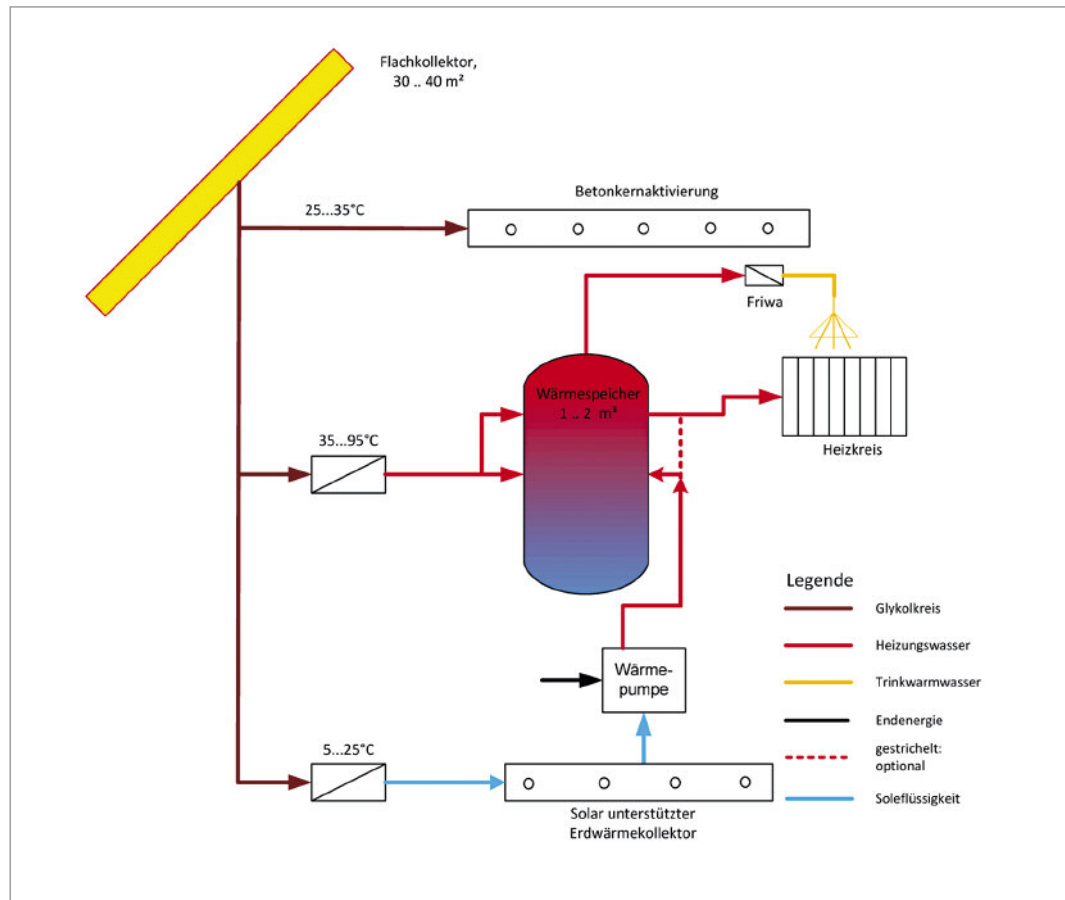
Der effiziente Umgang mit Energie im Gebäudebereich kann einen wesentlichen Beitrag zur Ressourcenschonung, Vermeidung von CO<sub>2</sub>-Emissionen und damit zum Schutz des Klimas leisten. Neben technischen Maßnahmen zur Verbesserung des energetischen Standards von Gebäuden (z. B. Verbesserungsmaßnahmen an der Gebäudehülle und den haustechnischen Anlagen) kann der Mensch als Nutzer der Gebäude durch sein Verhalten in vielfältiger Weise Einfluss auf den Energieverbrauch des Gebäudes nehmen. Um den Nutzer zu unterstützen, seinen Energieverbrauch zu senken und ihn für die Thematik

stärker zu sensibilisieren, sind laufende Informationen über die aktuelle Situation im Gebäude, wie z. B. die Raumlufttemperatur, die relative Luftfeuchte, der CO<sub>2</sub>-Gehalt der Raumluft oder Fensteröffnungszeiten sowie der aktuelle bzw. akkumulierte Energieverbrauch hilfreich (Abbildung 4, webbasierte Visualisierung der Raumlufttemperaturen). Während die zur Erfassung und Darstellung der einzelnen Größen nötige Sensorik im Neubau noch verhältnismäßig einfach installiert werden kann, ist ein Nachrüsten z. B. im Rahmen einer Sanierung nur mit großem Aufwand möglich. Ein vielversprechender Ansatz könnten hier batterielessen Funksensoren, die die zum Betrieb benötigte Energie direkt aus der Umgebung gewinnen (Energy Harvesting), sein. An einem Pilotobjekt werden unterschiedliche, derzeit am Markt verfügbare Funksensoren für Raumlufttemperatur, rel. Feuchte, Helligkeit, elektrische Leistungen etc. erprobt. Zur Beurteilung deren Eignung werden parallel konventionelle, leitungsgebundene Sensoren zu Vergleichszwecken installiert. Ziel dieser Vorstudie ist es, die derzeit am Markt verfügbaren Funkensensoren unter realen Einsatzbedingungen hinsichtlich Messgenauigkeit, Übertragungssicherheit und Zuverlässigkeit zu überprüfen. Basierend auf den Ergebnissen aus dieser Vorstudie sollen Produktoptimierungen bzw. Neuentwicklungen von Funksensoren in Kooperation mit Industrieunternehmen angestoßen werden.

### Sensoren für die Solarthermie (ISFH)

In der Niedertemperatur-Solarthermie können zwei Hauptanwendungsfelder für Sensoren unterschieden werden: einerseits die Steuerung und Regelung der Solaranlage sowie andererseits ihre Funktions- und Ertragskontrolle.

Abbildung 5  
Prinzipskizze als Übersicht der verknüpften Wärmequellen und -senken des neuen Solaraktivhauskonzepts (die Linien entsprechen Energieströmen) (Grafik ISFH).



### Entwicklung eines Konzepts zur temperaturoptimierten Wärmebedarfsdeckung in Solaraktivhäusern (ISFH)

Bei dem untersuchten Systemkonzept für ein Solaraktivhaus steht nicht mehr der Pufferspeicher allein im Zentrum der Anlage. Es wird stattdessen eine temperaturoptimierte Aufteilung der Solarenergiegewinne auf unterschiedliche Wärmesenken wie Betonkernaktivierung, Erdwärmekollektor und Pufferspeicher durchgeführt (Abbildung 5). Die aufgrund der teils sehr unterschiedlichen Temperaturniveaus anspruchsvolle Regelungsaufgabe wird durch kostengünstige Volumenstromsensoren basierend auf dem Vortexprinzip erleichtert. Dabei wird die aktuelle thermische Leistung der Solaranlage gemessen und deren Veränderung bei anderer Betriebstemperatur berechnet. Unter Berücksichtigung der Ladezustände erfolgt eine Priorisierung der Verteilung der Solarwärme. Verglichen mit konventionellen Konzepten sollen mit diesem Konzept bei geringeren Kosten ein höherer Komfort sowie der gleiche solare Deckungsanteil von über 50 % erreicht werden.

### Entwicklung eines Verfahrens zur automatischen Ertragsbewertung thermischer Solaranlagen (ISFH)

Dank kostengünstiger Sensorik beispielsweise für Volumenstrom und Anlagendruck sind Solarregler vermehrt in der Lage die Funktion einzelner Komponenten der Solaranlage zu kontrollieren. Beispiele hierfür sind die Funktion der Umwälzpumpe, die Dichtheit der Anlage, die Durchgängigkeit der Wärmeübertrager, das Ansprechen des Sicherheitsventils usw. Für die Überwachung des Solarreglers und der Komponenten auf leistungsmindernde Veränderungen wie die Alterung von Kollektoren oder die Verschmutzung von Wärmeübertragern sind unabhängige, automatische Ertragsbewertungsverfahren gemäß VDI Richtlinie 2169 notwendig (Abbildung 6). Mit Hilfe der gemessenen Wetterdaten und der Anlagenparameter wird ein erwarteter Ertrag simuliert und mit dem gemessenen Anlagenertrag verglichen. Bei Abweichungen oberhalb eines bestimmten Grenzwerts werden Warnungen an den Betreiber gesendet, der dann mit Hilfe der gespeicherten Messwertverläufe softwaregestützt die Ursache z. B. eines solaren Minderertrags beseitigen kann. Das sogenannte Input/Output-Verfahren ist sowohl in einem unabhängigen Kontrollgerät der Firma RESOL als



auch in einer Serverlösung der Firma INGA umgesetzt, erprobt und am Markt verfügbar.

Im Rahmen der bisherigen Untersuchungen zeigt sich immer wieder, dass es mittlerweile zwar eine Vielzahl von Sensorik zur Erfassung der wesentlichen energetischen Parameter am und im Gebäude gibt, diese in der Regel jedoch deutlich zu teuer sind um eine breite Marktdurchdringung zu erreichen. Darüber hinaus handelt es sich häufig um Einzelapplikationen die zwar einen Teilaspekt gut abdecken können (z. B. Erfassung der thermischen Leistung von Solarkollektoren), diese Information jedoch nicht im Sinne eines Energiemanagementsystems verwertbar machen können.

Damit Gebäude zukünftig noch energieeffizienter werden können und der Energiebedarf im Wesentlichen durch regenerative Energien gedeckt werden kann, wird zukünftig verstärkt ein breiterer Einsatz von Sensorik im Gebäudebereich nötig sein. Damit die Gelingen kann, ergibt sich aus unserer Sicht der folgende Entwicklungsbedarf in Richtung einer intelligenten und effizienzsteigernden Gebäudeautomatisierung:

- Entwicklung von kostengünstiger Sensorik zur Erfassung des aktuellen Energieverbrauchs bzw. der aktuellen regenerativen Energieerträge am Gebäude
- Entwicklung von kostengünstiger Sensorik zur Erfassung des aktuellen thermischen Zustands des Gebäudes und der technischen Anlagen
- Systeme zur einfachen Nachrüstung in Bestandsgebäude (z. B. Funksensorik)
- Einbindung von aktuellen Klimadaten und Wetterprognosewerten
- Integration der Sensorik in „intelligente“ Systemlösungen (Effizienzsteigerung, Detektion von suboptimalen Betriebsverhalten, Störungen)
- Erfassung von Nutzungsprofilen/Anwesenheitsprofilen
- Einbindung einer Ertragsprognose (regenerativ am Gebäude, Smart grid) und Bedarfsprognose (Gebäude)
- Entwicklung einer Plattform zur intelligenten Vernetzung zwischen Energieertragsangebot und Energiebedarf

Das Fraunhofer-Institut für Bauphysik sieht sich hierbei als Partner zur Analyse des Bedarfs an Sensorik, zur Erprobung und Bewertung einzelner Messverfahren sowie zur Erarbeitung von Energiemanagementkonzepten. Neu entwickelte Sensoren sowie vernetzte Regelungs- und Steuerungskonzepte können im Rahmen von Pilotvorhaben erprobt und wissenschaftlich bewertet werden. Hierzu stehen u. a. am Freigelände des Standorts Holzkirchen zahlreiche

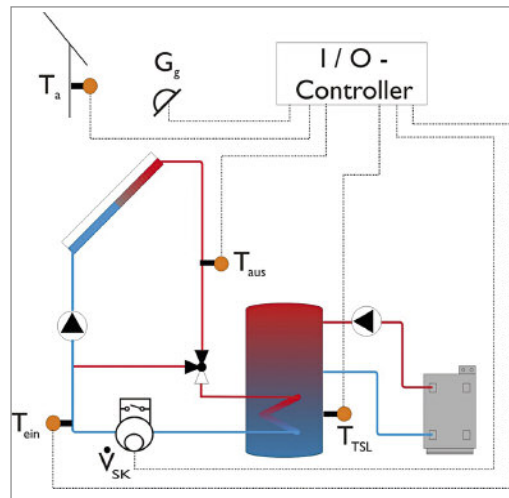


Abbildung 6  
Installationsschema der Messtechnik eines Input/Output-Controllers in eine solare Trinkwarmwasseranlage (Grafik RESOL).



Abbildung 7  
Versuchseinrichtung für energetische und raumklimatische Untersuchungen VERU.

Prüf- und Versuchsmöglichkeiten zur Verfügung (vgl. Abbildung 3 und 7).

Für das ISFH steht insbesondere die permanente und automatische Überprüfung von heute zumeist mehrvalenten Wärmeversorgungsanlagen im Vordergrund. Da die Verarbeitung der zahlreichen Sensordaten nicht manuell durchgeführt werden kann, muss ein Kontrollgerät durch geeignete Algorithmen überprüfen, ob ein Gerät so effizient arbeitet, wie es seinen Betriebsbedingungen entsprechend erwartet werden kann. Die Komplexität einer solchen Kontrollaufgabe kann von Subsystemen bis zum Gesamtsystem gestaffelt werden. Eine wesentliche Voraussetzung für die Algorithmen-Entwicklung ist das notwendige Komponenten- und Systemverständnis, das in den Forschungsarbeiten des ISFH im Vordergrund steht.

# Sensoren & Messtechniken im FuE- und Herstellungsprozess und für eine effiziente Energiespeichertechnologie (Monitoring) in der Praxis

**Bernd Krautkremer**  
 Fraunhofer IWES – Fraunhofer-  
 Institut für Windenergie und  
 Energiesystemtechnik  
 bernd.krautkremer@  
 ives.fraunhofer.de

**Jens Zosel**  
 Kurt-Schwabe-Institut für Mess-  
 und Sensortechnik e. V. Meinsberg  
 zosel@ksi-meinsberg.de

Der zunehmende Anteil erneuerbarer Energien im Stromnetz lässt sich nur dann bedarfsgerecht umsetzen, wenn in steigendem Maß kurzfristig anzapfbare kostengünstige Großspeicher installiert werden. Sowohl Biogasanlagen als auch Prozesse, die eine effektive Umwandlung von Elektroenergie in Erdgas ermöglichen (Power-to-gas), können hier künftig eine wichtige Rolle spielen, wenn sich die sensorisch geführten Prozesse mit ausreichender zeitlicher Dynamik dem momentanen Bedarf anpassen lassen. Im vorliegenden Beitrag wird auf wesentliche Prozessparameter und moderne Möglichkeiten zu deren Online-Messung eingegangen. Ausgehend vom Stand der Technik werden Entwicklungslinien für zukünftige Prozesssensoren in diesen Bereichen beschrieben.

## 1. Einführung

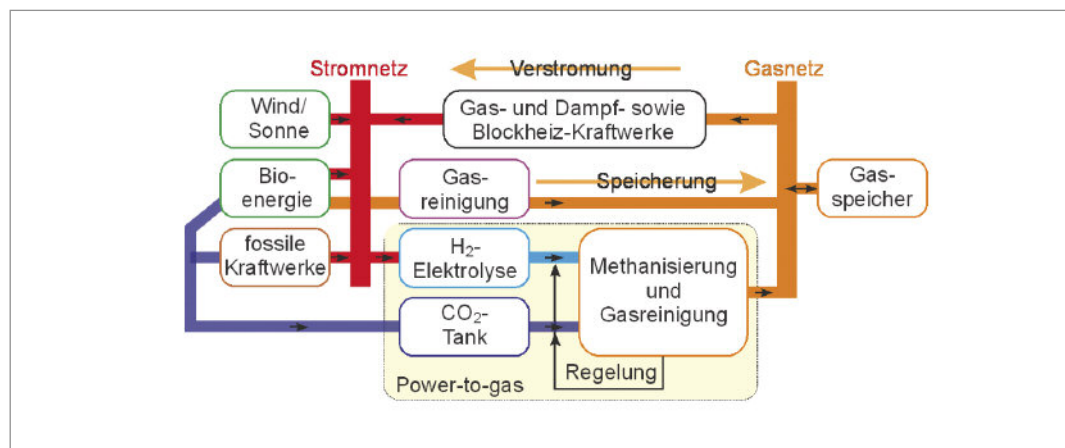
Für die bedarfsgerechte Führung von Netzen zur Energieversorgung spielt die Verfügbarkeit von zuverlässigen und schnell anzapfbaren Großspeichern eine herausragende Rolle. Sind darüber hinaus Technologien vorhanden, mit denen bei hohem Wirkungsgrad die Energie zwischen verschiedenen Netzen transferiert werden kann, lässt sich die für eine weitgehende Nutzung erneuerbarer Energien notwendige Flexibilität erreichen. Deshalb werden, wie *Abbildung 1* zeigt, in jüngster Zeit vor allem Technologien weiterentwickelt, mit denen die Netze für die Versorgung mit Elektroenergie bzw. Erdgas immer enger aneinander gekoppelt werden. Aus diesem sehr umfangreichen Forschungsgebiet sollen in Folgendem zwei

Themenfelder näher betrachtet werden: die Herstellung und Verarbeitung von Biogas sowie die Umwandlung von überschüssiger Elektroenergie in speicherbare Gase (Power-to-gas).

## 2. Biogas

Die Technologie zur Umsetzung organischer Ausgangsmaterialien aus der Land- bzw. Abfallwirtschaft in Biogas hat sich seit einigen Jahren gut etabliert und stellt für viele landwirtschaftliche und nahrungsmittelverarbeitende Betriebe sowie Entsorgungsunternehmen ein wichtiges Standbein zur Existenzsicherung dar. In Deutschland werden derzeit ca. 8.000 Biogasanlagen mit einer Nennleistung von über 3 GWel und einer Jahresstromproduktion von über 20 TWh betrieben [1]. Mit der zunehmenden Etablierung dieser Technologie erfolgt auch eine stetige Verbesserung und Ausweitung der eingesetzten Sensorik. Wiesen die ersten Anlagen nur sehr einfache Messeinrichtungen zur Prozessbilanzierung und -regelung auf, sind heute dagegen vor allem größere Anlagen mit komplexen Prozessleitsystemen auf der Basis einer entsprechend umfangreichen Sensorik ausgestattet [2]. Dennoch sind immer noch Anlagen in Betrieb, die nicht über eine Mindestausstattung an Sensorik verfügen, mit der wesentliche Betriebsparameter wie Rohgasvolumenstrom sowie Substrat- bzw. Prozessstabilität hinreichend genau bestimmt werden können. Dies liegt einerseits an den teilweise hohen Kosten, andererseits aber auch verschiedentlich an unzureichenden Genauigkeiten beispielsweise von Volumenstrommessgeräten.

Abbildung 1  
 Koppelung zwischen  
 Elektroenergie- und  
 Gasnetzen zur flexiblen  
 Bereitstellung beider  
 Energieformen



Nr.	Medium	Parameter	Messverfahren
1	zu fütternde Substrate	Trockensubstanzgehalt, Biogasertrag, Beimengungen von schädlichen Inhibitoren, Konsistenz	Nahinfrarotspektroskopie (NIRS) [5], biochemische Untersuchungen, Mikrowellenanalytik
2	Prozessmedium	biologische Aktivität, Gehalt an flüchtigen Fettsäuren und gelösten Gasen, insbesondere Wasserstoff, pH-Wert, Redoxpotential, TS-Gehalt, Konsistenz	elektrochemische Sensorik, Biosensoren, NIRS, Mikrowellensensoren
3	Rohbiogas	Volumenstrom, Zusammensetzung, Füllstand Speicher	mechanische, optische und elektrochemische Sensoren, Radar, Ultraschall o. ä.

Tabelle 1

*Einsatzorte, Parameter und mögliche Messverfahren für die Beurteilung von Biogas-Prozessen im Hinblick auf eine flexible Strom- bzw. Gasproduktion*

Viele Parameter die für die Stabilität von Biogasprozessen relevant sind und eigentlich direkt an der Anlage zeitnah gemessen werden müssten, lassen sich heute nur im Labor bestimmen. Dabei treten neben inakzeptablen Zeitverzögerungen vor allem durch Probenahme und -transport verursachte Ungenauigkeiten auf, die eine präzise und zeitnahe Prozesssteuerung unmöglich machen. Neue Herausforderungen an Biogasprozesse resultieren weiterhin aus der zunehmenden Flexibilisierung der Einspeisung von Strom bzw. Biogas mit Erdgasqualität, die im Folgenden näher beschrieben werden.

Mit zunehmendem Anteil an erneuerbaren Energien im Stromnetz steigt der Bedarf an zeitlich gezielt einsetzbaren Energiemengen. Hier können Biogasanlagen künftig eine wichtige Rolle spielen [3]. Heute existierende Anlagen sind für diese Aufgabe jedoch nicht geplant worden und somit nur bedingt einsetzbar. Ihr Betriebsziel ist eine möglichst kontinuierliche Abgabe ihrer Nennleistung, wobei moderne Anlagen heute deutlich über 8000 Vollaststunden erreichen. Zur bedarfsgerechten Bereitstellung von Elektroenergie mit Biogasanlagen müssen diese umgerüstet werden, wozu Investitionen notwendig sind. Ein erster Anreiz, in solche Umrüstungen zu investieren, wurde durch die Einführung der sog. Flexibilitätsprämie geschaffen [4]. Diese sieht die Einhaltung definierter Fahrpläne zur Strombereitstellung vor und erfordert die zeitnahe Verfügbarkeit präziser Messwerte zu den in *Tabelle 1* aufgeführten Parametern.

Die Aufbereitung von Biogas als Voraussetzung für dessen Einspeisung ins Erdgasnetz hat sich in Deutschland mit den Novellen der Gasnetzzugangsverordnung der Jahre 2008 und 2010 deutlich entwickelt. Auch in anderen europäischen Ländern kommt sie zum Einsatz. Große Potentiale werden zukünftig in Osteuropa gesehen. Für die Sensorik im Bereich der Produktion des Rohbiogases gelten weitestgehend die gleichen Anforderungen, die bereits in den Ausführungen zur Sensorik für Biogasanlagen genannt wurden. Hinzu kommen jedoch noch weitere Elemente, die dem Thema der Aufbereitung selbst, aber auch dem der Einspeisung in das Erdgasnetz geschuldet sind.

Bei der Aufbereitung wird im Wesentlichen CO<sub>2</sub> abgetrennt und das Biogas von unerwünschten Begleitstoffen befreit. Da hierzu unterschiedliche Technologien zum Einsatz kommen (Druckwechseladsorption, Druckwasserwäsche, Aminwäsche, Membranverfahren, kryogene Verfahren usw.), unterscheiden sich die eingesetzten Messtechniken von Fall zu Fall. Das Hauptproblem der Überwachung solcher Aufreinigungssysteme besteht aktuell in der zu hohen Ansprechzeit der dafür eingesetzten Prozessgas-Chromatographen, die für eine zeitnahe Führung der Aufreinigung und somit für eine vollständige Sicherung der Einspeisequalität noch nicht ausreichend ist.

Um an Einspeise-Anlagen mit Biogasaufbereitung auch unaufbereitetes Rohbiogas vor der Schnittstelle Biogasanlage-Biogasaufbereitungsanlage entnehmen und verkaufen zu können, muss eine eichrechtlich zugelassene Messtechnik vorhanden sein, die bei dem hohen Feuchtegrad und der korrosiven Wirkung des Messgasstroms zuverlässig einsetzbar ist. Diese steht bislang nicht zur Verfügung. Eine aktuelle Übersicht zum Stand der Technik sowie zu zukünftigen Anforderungen an Sensoren und Messsysteme, die für Biogas-Prozesse relevant sind, findet sich in [6].

### 3. Power-to-Gas-Technologie

Ausgehend von den relativ hohen Kosten bzw. limitierten geographischen Randbedingungen bereits etablierter mechanischer, magnetischer und elektrochemischer Stromspeicher sind in zunehmendem Maß Technologien zur effizienten Umwandlung von Elektroenergie in speicherbare chemische Energie als Erdgasersatz (substitute natural gas, SNG) gefragt, die es zukünftig ermöglichen sollen, zur Verfügung stehende überschüssige Elektroenergie zunächst zur Wasserstofferzeugung mittels Elektrolyse zu nutzen, um diesen dann mit CO<sub>2</sub> in kostengünstig speicherbares Methan umzusetzen (Power-to-Gas) [7]. Diese Umsetzung beruht auf folgenden Reaktionen:

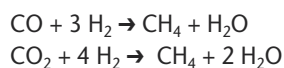
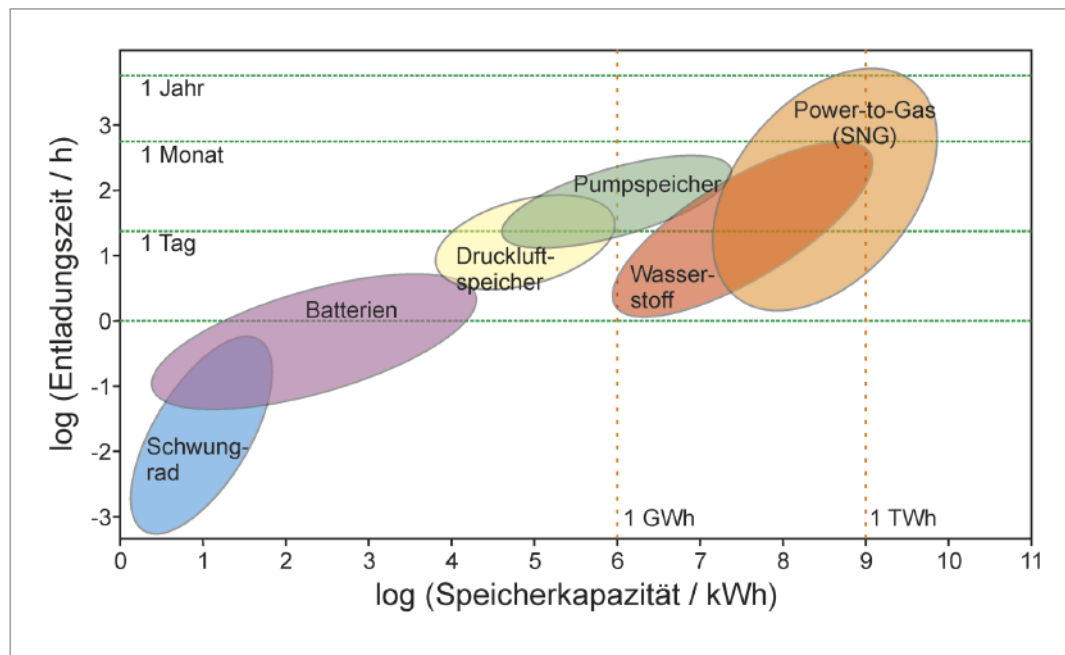


Abbildung 2  
Speichertechnologien für Elektroenergie und deren bevorzugte Einsatzbereiche (nach [8])



Diese in *Abbildung 1* aufgezeigte und im Vergleich zu anderen Speichern (siehe *Abbildung 2*) höchst interessante Option für eine regenerative Energieversorgung ist ein wichtiger Baustein, um sowohl zeitliche als auch räumliche Diskrepanzen zwischen Stromerzeugung und -verbrauch auszuräumen. Die Mehrzahl der heute angedachten Anlagen zielt dabei einerseits auf biogene CO<sub>2</sub>-Quellen, andererseits aber auch auf die Einspeisung in das Erdgasnetz.

Um eine im Hinblick auf die Einspeisespezifikationen optimale Zusammensetzung des Gasmischs gewährleisten zu können, ist es notwendig, den Prozess zeitnah zu regeln. Zu diesem Zweck müssen die Temperatur sowie die Konzentrationen von CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O mit einer speziellen Multisensorik in situ mit kurzer Ansprechzeit bestimmt und geregelt werden. Es ergeben sich daher auf dem Gebiet der Sensorik ähnliche Anforderungen und Randbedingungen, wie sie bei der Biogastechnologie auftreten. Ein besonderes Problem stellt die sichere Detektion von Wasserstoff im Produktgas dar, der aus der nicht vollständigen Umsetzung der Ausgangsprodukte im Methanisierungsreaktor resultiert. Typische Produktgaszusammensetzungen enthalten nach der Trocknung neben 5 Vol.-% CO<sub>2</sub> noch bis zu 5 Vol.-% H<sub>2</sub>, so dass es vorkommen kann, dass der im Erdgasnetz zulässige Anteil, der durch die möglichen Folgeprozesse auf wenige Volumenprozent beschränkt ist, überschritten wird. Viele der bislang dafür zum Einsatz kommenden Prozessgas-Chromatographen sind jedoch nicht in der Lage, Wasserstoff überhaupt zu messen.

#### 4. Beispiele für neuere Sensorentwicklungen

Für den Bereich der Biogas-Technologie werden im Folgenden drei Beispiele aufgeführt, die exemplarisch die Anstrengungen verdeutlichen sollen, die unternommen werden, um dafür adäquate Sensoren und Messsysteme bereitzustellen.

##### A) Messsystem für gelöste Gase in flüssigen Biogasmedien

Neben den Parametern pH-Wert und Redoxpotential, die bislang bereits online in Biogasanlagen gemessen werden können, bilden die Partialdrücke gelöster Gase wie Wasserstoff, Methan, Sauerstoff, Kohlendioxid und Ammoniak sowie die Konzentrationen flüchtiger Fettsäuren wichtige Messgrößen zur Beurteilung der Prozessstabilität. Sensoren für diese Parameter müssen in der Flüssigphase von Biogasanlagen bei Umgebungstemperaturen bis 55 °C und Drücken bis 2 bar eingesetzt werden können, wobei die Genauigkeit parameterabhängig ist und häufig mit <2 % vom Messbereichsendwert angegeben wird. Weitere Herausforderungen für den Sensoreinsatz in dieser Umgebung bestehen

- in der mechanischen Beanspruchung, die durch feste Bestandteile im Biogasmedium hervorgerufen werden kann,
- in der mikrobiellen Aktivität, die für eine schnelle Biofilmbildung auf verschiedenen Oberflächen führt,



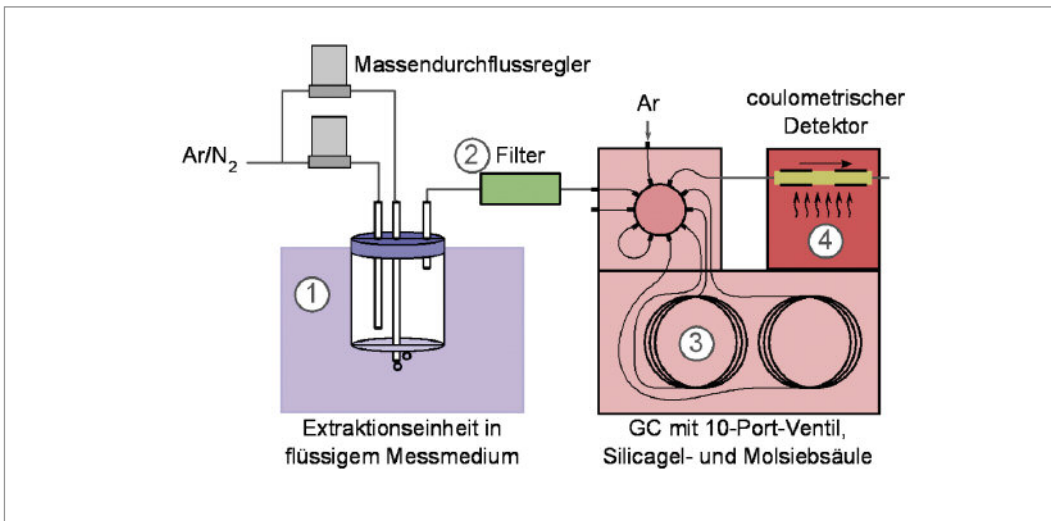


Abbildung 3  
Messsystem für die Langzeitmessung gelöster Gase in Biogas-Anlagen, 1 Extraktor, 2 Gasfilter, 3 chromatographische Trennung, 4 coulometrischer Detektor

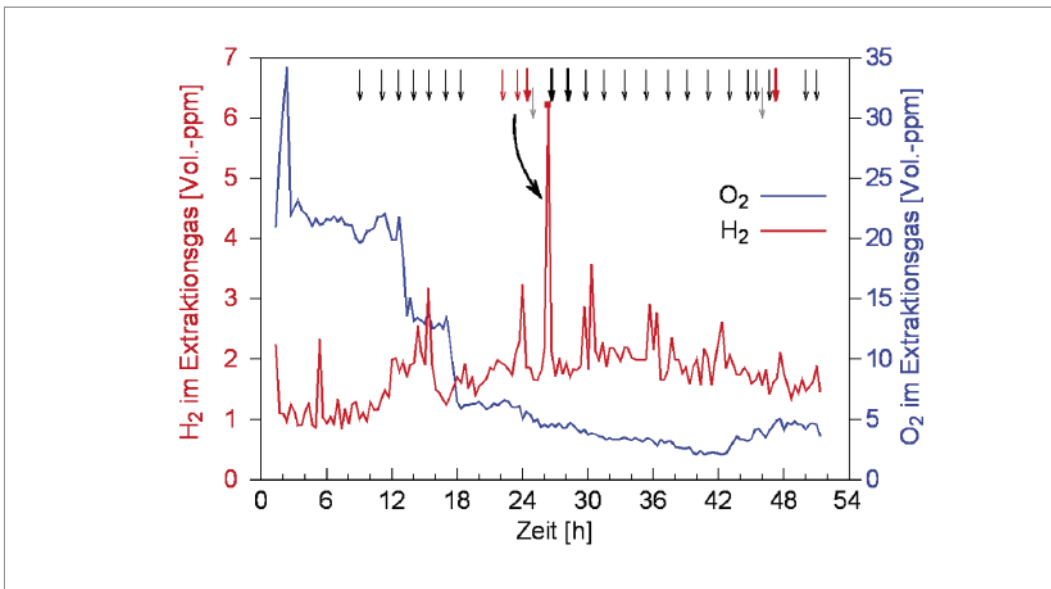


Abbildung 4  
Beispiel für eine Langzeitmessung des gelösten Wasserstoffs und Sauerstoffs in einer Biogas-Großanlage zur Umsetzung eines Substratgemisches aus Maissilage (schwarze Pfeile, Gülle (rote Pfeile) und Festmist (Graue Pfeile) in Biogas

- im Auftreten hoher Schwefelwasserstoffkonzentrationen, die zu verschiedenen Schädigungsmechanismen führen und
- im Gehalt verschiedener Säuren, die zu Korrosionserscheinungen führen können.

Es hat sich gezeigt, dass aus diesen Gründen klassische elektrochemische Sensoren zur Bestimmung der o. g. Partialdrücke auf der Basis membranbedeckter Zellen nicht für den Einsatz in Biogasanlagen geeignet sind [9].

Um dennoch auch unter den genannten erschwerten Umgebungsbedingungen anaerober Prozesse diese Parameter schnell und präzise bestimmen zu können, wurde das in *Abbildung 3* gezeigte Messsystem entwickelt und erprobt. Es beruht auf der membranfreien Extraktion der zu messenden Gase mit Hilfe eines neu entwickelten Extraktors und der anschließenden Messung in der Gasphase mit einem hoch-

selektiven Prozess-Chromatographen, der mit einem kalibrierfreien coulometrischen Festelektrolyt-Detektor ausgestattet ist [10]. Langzeituntersuchungen an realen Biogas-Anlagen haben gezeigt, dass mit diesem System neben dem gelösten Wasserstoff auch der Sauerstoffpartialdruck sowie das Methanbildungspotential schnell und mit hoher Sensitivität bestimmt werden können. Ein Beispiel für eine solche Messung ist in *Abbildung 4* gezeigt

#### B) Portable Biogasanlage zur Überwachung von Großanlagen

Die Übertragung von Resultaten aus dem Labor auf Prozesse von Biogas-Großanlage gelingt oft nicht in zufriedenstellendem Maß, da die Substrate beim Transport ins Labor bereits im Hinblick auf ihr Biogas-Potential und ihre Vergärbarkeit verändert werden sowie auch in den Laborreaktoren oft andere Rand-

Abbildung 5  
 Schema der portablen  
 Biogas-Anlage  
 zur Optimierung von  
 Großanlagen

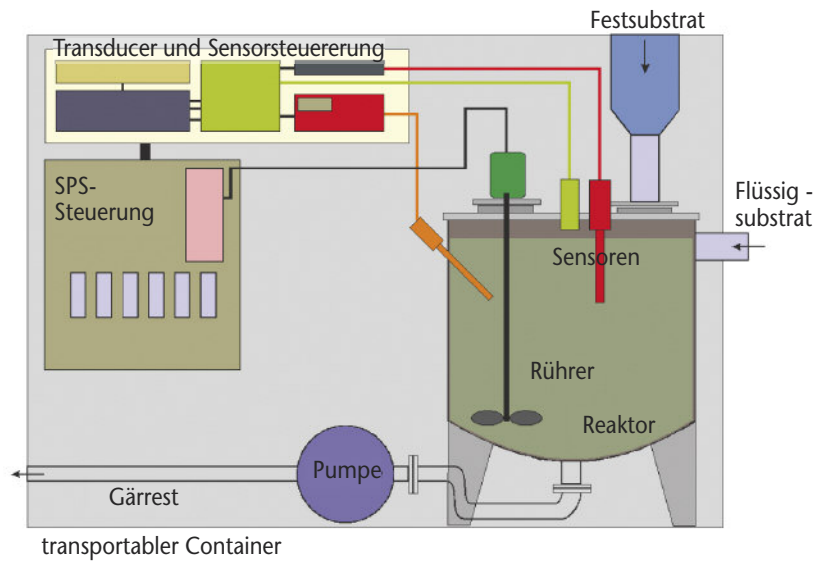
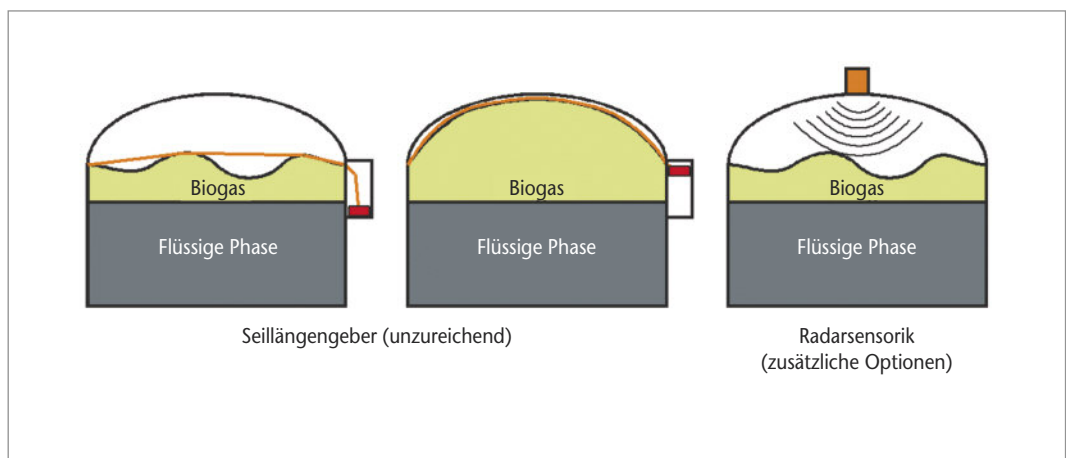


Abbildung 6  
 Innenraum der  
 portablen Anlage



Abbildung 7  
 Füllstandsmessung an  
 Biogasreaktoren  
 mit Seillängengeber  
 bzw. intelligenter  
 Radar-Sensorik



bedingungen als in den Großreaktoren (Hydraulik, Temperaturschwankungen, Wandmaterialien usw.) vorliegen. Um diesen Nachteilen zu begegnen und zeitnahe umfassende Beurteilungen von Biogasprozessen in Großanlagen, insbesondere während der Anfahrphase, zu ermöglichen, wurde die in *Abbildung 5* gezeigte portable Biogas-Anlage entwickelt, die in einem Container untergebracht ist (*Abbildung 6*) und direkt neben der zu optimierenden Großanlage zeitnah mit den gleichen Substraten betrieben wird. Der Reaktor mit 1,5 m<sup>3</sup> Gärvolumen lässt sich mit flüssigen, breiigen und festen Substraten automatisch füttern. Sowohl die Gas- als auch die Flüssigphase des anaeroben Prozesses werden mit einer Multisensorik überwacht, die auf folgende Parameter ausgerichtet ist:

- CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, O<sub>2</sub> und NH<sub>3</sub>-Konzentration sowie Volumenstrom in der Gasphase
- pH-Wert, Redoxpotential, Temperatur, Gelöstpartialdruck H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> und Gehalt an flüchtigen Fettsäuren in der Flüssigphase

### C) Sensorik zur Überwachung flexibler Gasspeicher in Biogas-Anlagen

Bislang kommen in Biogas-Anlagen mit flexiblen Folienabdeckungen vor allem sogenannte Seillängengeber gemäß *Abbildung 7* zum Einsatz. Diese sind für eine genaue Messung des Füllvolumens des Gasspeichers, die für die Umstellung auf eine flexible Einspeisung notwendig ist, ungeeignet. Als Alternative bieten sich intelligente Radarsensoren an, mit denen neben der hochgenauen Bestimmung des vorhandenen Biogas-Volumens im Reaktor auch die Füllstandsmessung im flüssigen Medium unabhängig von einer eventuell auftretenden Schaumbildung gelingt [11].

## 5. Zusammenfassung

Sowohl die Biogas- als auch die Power-to-Gas-Technologie erfordern angepasste Sensoren und Messsysteme, um den Herausforderungen flexibler gekoppelter Netze zur Versorgung mit Elektroenergie bzw. Erdgas gerecht zu werden. Die Anforderungen an solche Sensoren sowie die angestrebten Zielparame-ter sind in beiden Bereichen ähnlich. Im vorliegenden Beitrag werden an mehreren Beispielen die Herangehensweise bei der Entwicklung neuer Sensoren für diese Applikationen sowie wichtige Resultate dargestellt.

## Literatur

- [1] Fachverband Biogas „Branchenzahlen 2011 und Branchenentwicklung 2012/2013“.
- [2] M. Effenberger, V. Aschmann, C. Herb, M. Helm, S. Müller: Empfehlungen für die messtechnische Ausstattung landwirtschaftlicher Biogasanlagen. Biogas Forum Bayern. Nr. IV – 7/2012, Herausgeber: Arbeitsgemeinschaft Landtechnik und landwirtschaftliches Bauwesen in Bayern e.V., Freising, 2012.
- [3] S. Bofinger et al.: Die Rolle des Stromes aus Biogas in zukünftigen Energieversorgungsstrukturen. Endbericht zum Vorhaben FKZ 03MAP054, gefördert durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), 2010. ([http://www.dbfz.de/web/fileadmin/user\\_upload/Berichte\\_Projektdatenbank/2223008\\_Endbericht.pdf](http://www.dbfz.de/web/fileadmin/user_upload/Berichte_Projektdatenbank/2223008_Endbericht.pdf))
- [4] D. Filzek, P. Ritter: Nachgerechnet. joule 6 (2012) 57–58.
- [5] A. Stockl, H. Oechsner, D. Löffler, M. Kranert: Online Messung flüchtiger Fettsäuren im Biogasermenter mit Nah-Infrarot-Reflektions-Spektroskopie. VDI Spezialtag „Prozessmesstechnik in der Biogasanlage“ 10. Juni 2011, Braunschweig, Tagungsband, VDI Wissensforum GmbH, Düsseldorf, S. 63–74.
- [6] 2. VDI-Konferenz „Prozessmesstechnik in Biogasanlagen“. Fulda, 09.–10.10.2012, Tagungsband, VDI Wissensforum GmbH, Düsseldorf 2012, S. 97–107, ISBN 978-3-942980-99-9.
- [7] S. Bajohr et al.: Speicherung von regenerativ erzeugter elektrischer Energie in der Erdgasinfrastruktur. gwf-Gas | Erdgas (2011) 200–210.
- [8] Verbundvorhaben „Power-to-gas“, ZSW Stuttgart, Fraunhofer IWES Kassel, Solar Fuel Stuttgart, Laufzeit 1.4.2011 bis 31.3.2014, FKZ 0325275.
- [9] J. Zosel, W. Oelßner, U. Guth: Entwicklung eines Wasserstoff-Sensors für die Flüssigphase von Biogasanlagen. Gülzower Fachgespräche. Bd. 27: Messen, Steuern, Regeln bei der Biogaserzeugung. Gülzow. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), 2008, S. 58–71.
- [10] M. Schelter, J. Zosel, F. Berthold, W. Oelßner, U. Guth: Measurement of dissolved gases in anaerobic biogenic media. Sensor+Test Conference Proceedings 2011, Vol. I, S. 654–658.
- [11] C. Schulz: Das Labyrinth der Füllstandmessung. P&A 4 (2012) 60–62.

## Sensoren im FuE-Prozess bei der Komponentenherstellung und Systementwicklung

Erich Gülzow  
DLR – Deutsches Zentrum für  
Luft- und Raumfahrt  
Erich.guelzow@dlr.de

Niedertemperatur Brennstoffzellen sind in den letzten Jahren so weit entwickelt worden, dass der sichere und dauerhafte Betrieb möglich ist. In dieser Zeit wurden auch technische Anwendungsfelder definiert, in denen eine Markteinführung als realistisch anzusehen ist. Allerdings gibt es noch erheblichen Entwicklungsbedarf, wenn man die Kosten und Lebensdauern der Zellen, Stacks und Systeme betrachtet.

Hier werden im weiteren Polymer Membran Brennstoffzellen (PEFC) diskutiert, weil hier auch die Markteinführung in der Automobilindustrie zu erwarten ist. Dieser Typ von Brennstoffzellen wird bevorzugt bei Anwendungen mit mobilem oder portablem Charakter eingesetzt. Dabei ist die hohe Dynamik verbunden mit der einfachen Startfähigkeit ein Vorteil.

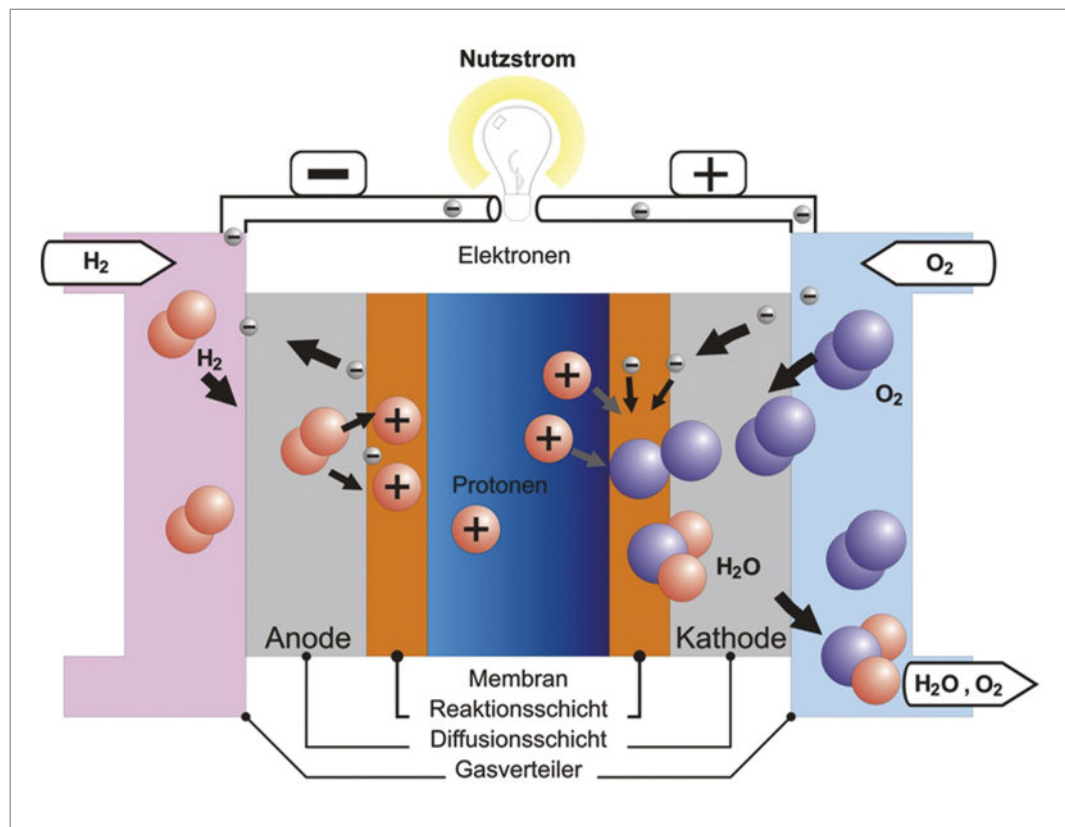
Grundsätzlich ist der Brennstoff Wasserstoff oder ein wasserstoffreiches Gas, wie es auch aus Reformierungsprozessen oder als Produkte in der chemischen Industrie vorliegt.

Kernstück der PEFC ist ein filterpressenartiger Aufbau der schichtweise aus einem Gasraum, der Gasdiffusionslage mit integrierter mikroporöser Schicht, der Elektrode und schließlich der Membran besteht. An die Membran schließt sich dann wieder Elektrode, Gasdiffusionslage und Gasraum an. Diese Wiederholeinheit wird als Stapel dann zu einem Stack mit Spannung von bis mehreren einhundert Volt. Die Anode wird mit dem wasserstoffreichen Gas und die Kathode mit dem Oxidationsmittel umspült, der meist der Sauerstoff der Luft ist.

Die charakteristischen Reaktionen in diesem Stapel mit besonderer Beachtung der Elektrodenreaktionen sind wichtig für die Leistungsfähigkeit und Effizienz.

Im Institut für Technische Thermodynamik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt werden Technologien entwickelt, um ortsaufgelöst innerhalb der laufenden Zelle messen zu können. Die Reaktionen oder Mechanismen sollen dabei nicht oder nur wenig verändert werden.

Abbildung 1  
Schematischer Aufbau  
einer Brennstoffzelle  
(Reaktionen)  
Quelle: DLR Stuttgart





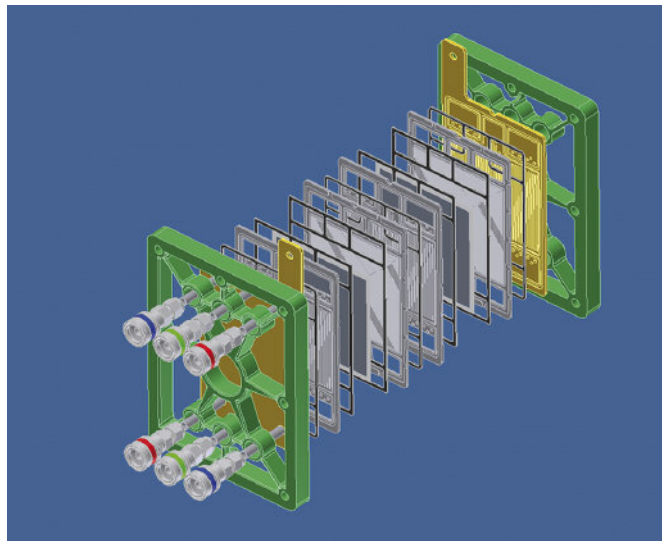


Abbildung 2  
Schematischer Aufbau einer Brennstoffzelle (Hardware Aufbau)

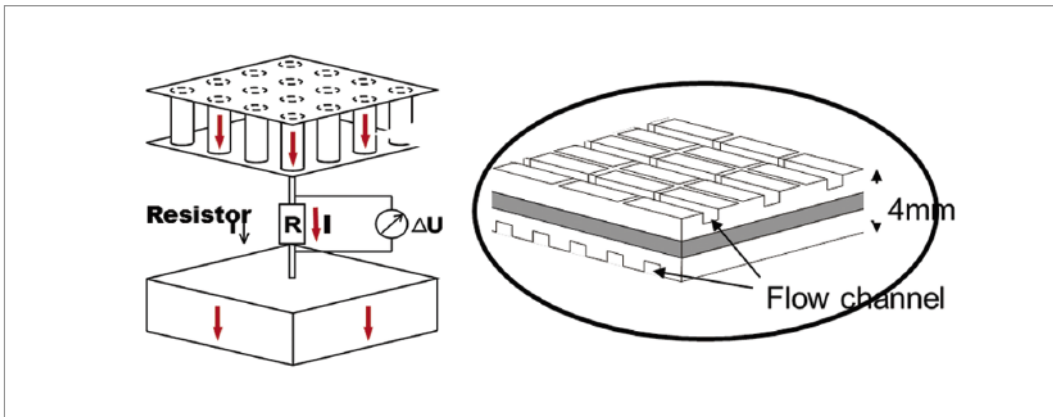


Abbildung 3  
Schematischer Aufbau der segmentierten Messtechnik

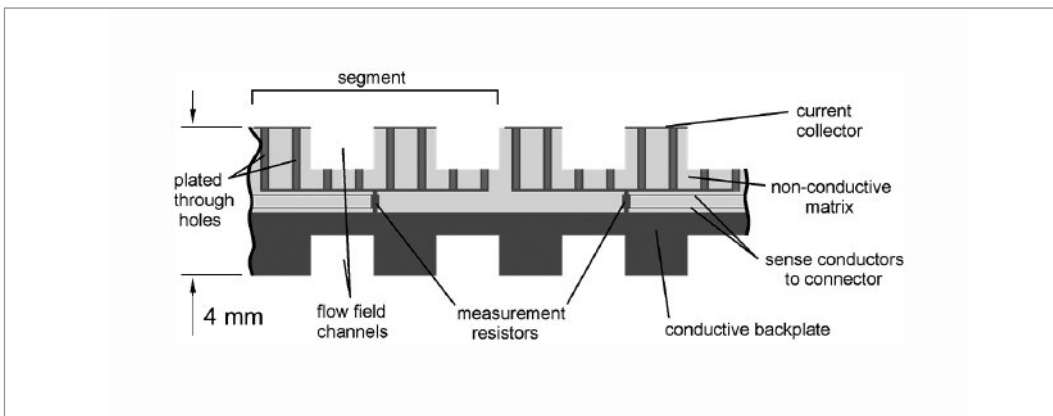


Abbildung 4  
Schnitt durch eine segmentierte Messzelle

Der schematische Aufbau dieser Messplatte ist in *Abbildung 3* dargestellt. Kernstück ist hier die Segmentierung der Fläche, die eine Lokalisierung von Effekten in lateraler Ebene erlaubt. Innerhalb dieser Platte sind elektronische Bauteile integriert, die Messungen der Stromdichte und der Temperatur möglich machen. Mit weiteren Geräten ist auch die Messung der elektrochemischen Zellimpedanz mög-

lich. Diese Messplatte kann sowohl in Einzelzellen, als auch in Stacks an beliebiger Stelle integriert werden.

*Abbildung 4* zeigt die schematische Darstellung einer gesamten Bipolarplatte mit den Segmenten und rückseitigen Kühlmittelkanälen.

Abbildung 5  
Foto einer  
segmentierten  
Messplatte für einen  
PEFC Stack

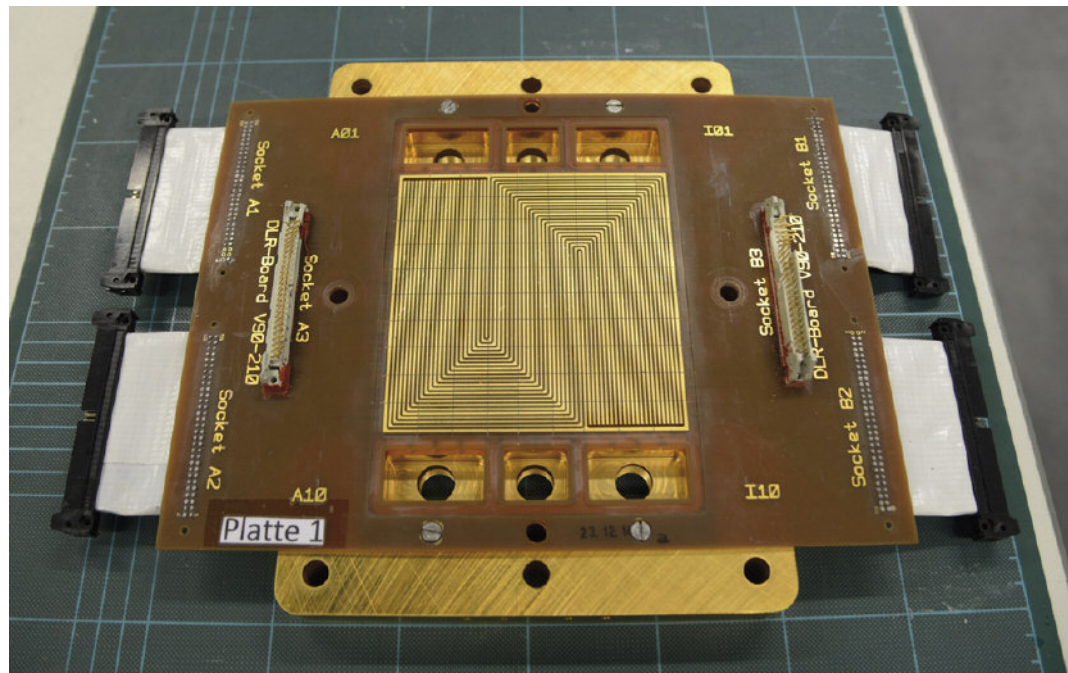
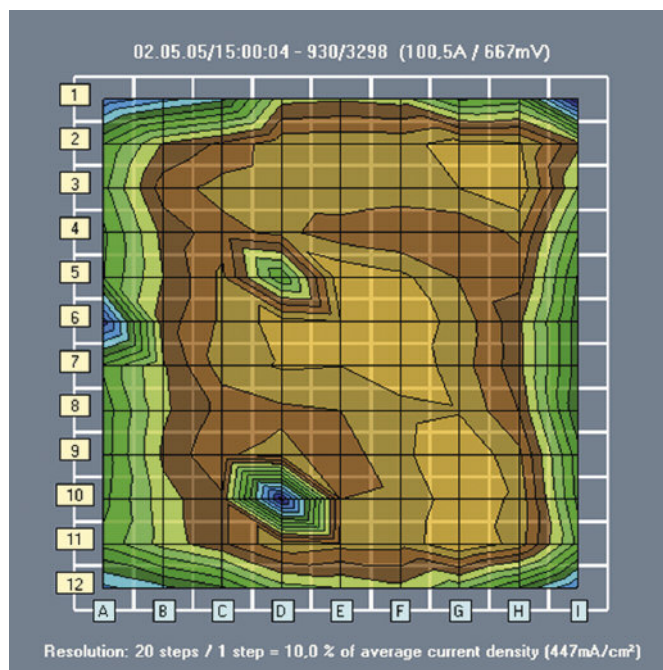


Abbildung 6  
Darstellung einer  
Stromdichte-  
Verteilungs-Messung  
eines technischen  
Stacks



In *Abbildung 5* ist ein Foto einer realen Messplatte zu sehen, wie sie in Stacks mit einer Fläche von etwa 140 cm<sup>2</sup> aktive Zellfläche eingesetzt wird. Hier geht man von Gesamtströmen von etwa 150–250 A aus. Diese Messplatte wird so in den Stack integriert, so dass die Leistungsfähigkeit ortsabhängig in einer Ebene bestimmt werden kann. Möchte man die Leistungsfähigkeit des Stacks entlang der Wiederholeinheiten (dreidimensional) vermessen, dann baut man mehrere Platten ein.

Man kann so bis zu einer dreidimensionalen Gesamtdarstellung kommen. Typischerweise wird, um Kosten zu vermeiden, jedoch nur wenige Sensorplatten an bekannt wichtigen Positionen des Stacks integriert.

Ein beispielhaftes Ergebnis der Stromdichteverteilung ist in *Abbildung 6* zu sehen. Hier ist eine signifikante Heterogenität zu erkennen, die aber aufgrund eines noch nicht optimierten Flussverteilungsfeldes (engl. flowfield) auftreten.

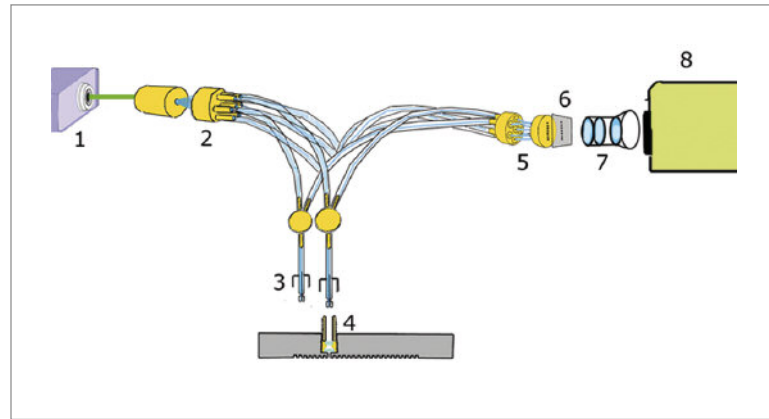


Abbildung 7  
Lichtleiteranordnung  
und schematisch  
dargestellt die Zelhälfte  
mit Flowfield

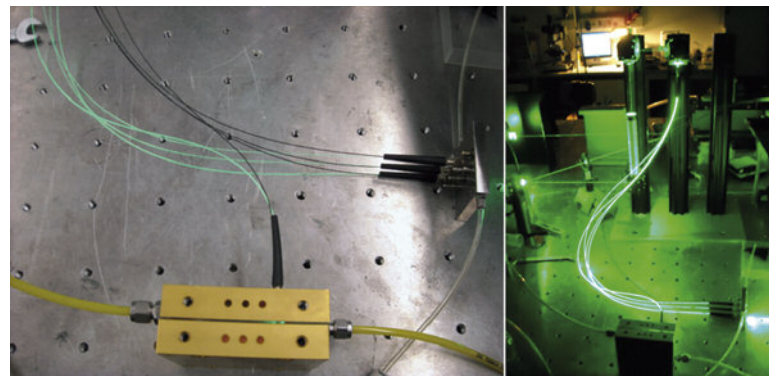


Abbildung 8  
Fotos der realen Zelle  
und Lichtleiter im  
Betrieb

Mit dieser Anordnung können so Designfehler bei der Entwicklung aufgedeckt werden und verbessert werden, die Reaktionen beim Einsatz von problematischen Gasmischungen beobachtet werden, sowie auch Steuerungen von Systemen und Fehlerfrüherkennung durchgeführt werden.

Polymer Brennstoffzellen regieren bezüglich ihrer Leistungsfähigkeit und Lebensdauer äußerst sensibel auf den Wasserhaushalt, da die Leitfähigkeit der Membran direkt von der Feuchte im Stack abhängt. Daher ist auch die Betrachtung der lokalen Feuchte in der Membran von großer Bedeutung. Daher wurden auch im Institut für Technische Thermodynamik die Möglichkeit integriert die Feuchte der Membran über die elektrochemische Impedanz-Spektroskopie zu bestimmen. Hier sind allerdings der Messtechnik Grenzen gesetzt, da diese Messmethode längere Messzeiten hat und man davon ausgehen muss, dass eine Messung über eine Messplatte mit 100 Segmenten auch mehrere Minuten dauern kann. Diese Zeitverzögerung ist beim dynamischen Stack-Betrieb zu beachten.

Ein anderer Ansatz, der zum verbesserten Verständnis der Vorgänge führt, ist die Anwendung von spektroskopischen Methoden als in situ Messtechnik.

Hier ist im Folgenden die Raman Spektroskopie als Beispiel dargestellt:

Es wurde die Zellplatten mit optischen Zugängen ausgestattet, so dass zum einen der Zugang eines Lasers in die Zelle zur Anregung möglich ist und zum anderen auch mittels eines zweiten Lichtleiters das Streulicht als Antwort herausgeleitet werden kann. Das Streulicht wird auf einem CCD-Chip detektiert und ausgewertet. Der schematische Aufbau ist in *Abbildung 7* dargestellt. Es war dann möglich mittels Raman-Spektren die chemischen Zusammensetzungen der Gase und Flüssigkeiten in verschiedenen Bereichen, wie z. B. hinter und in der Gasdiffusionslage sowie auch Messungen direkt in der Membran, zu bestimmen. Ein Foto des Aufbaus ist in *Abbildung 8* dargestellt.

Mit dem Einzeller-Aufbau konnten in situ Messungen durchgeführt werden und die Konzentrationsverteilung des Wasserstoffs und des Wassers in der Zelle dargestellt werden. Gleichzeitig war durch den synchronen Einsatz einer segmentierten Zelle zur Messung der Stromdichte und Temperatur die Abhängigkeit der einzelnen Parameter nachzuweisen.

Diese Kombination der Messmethoden ist bislang nicht für kommerziell erhältliche Systeme sondern nur für modellhafte Untersuchungen eingesetzt

worden. Da allerdings die Stromdichteverteilungen mittels segmentierten Zellen in technischen Zellen und Stacks eingesetzt werden, kann durch diese Kombination die Interpretationstiefe auch der technischen Stacks signifikant verbessert werden.

Ein Ziel für zukünftige Entwicklungen sind daher die Entwicklungen für Messmethoden, die einfach, zuverlässig und auch kostengünstig integrierbar sind, ohne die technischen Stacks zu beeinflussen. Daher sehen wir als nächsten Schritt die Entwicklung der Feuchtemessung auf direkten Weg in der Sensorplatte. Mit einer leistungsfähigen Sensorik in dem oberen Feuchtebereich würde man die Leistungsfähigkeit bei dynamischem Betrieb erheblich vereinfachen können. Heutige eingesetzte Sensoren sind entweder zu langsam, zu teuer oder können nicht nahe dem kondensierenden Feuchtebereich arbeiten.

### Zusammenfassung

Für die PEFC sind in situ Messtechniken wichtig – von der Entwicklung bis hin zum Einsatz im technischen System – wenn man eine hohe Betriebssicherheit erreichen will.

Im Institut für Technische Thermodynamik sind segmentierte Zellen entwickelt worden, die eine ortaufgelöste Messung möglich macht. Folgende Punkte sind wesentlich:

- Stromdichteverteilungen sind für die Komponentenentwicklung sowie die Überwachung von Testes vielfältig notwendig
- In technischen Systemen werden die Anzahl der Sensoren stark reduziert werden, jedoch werden Werte wie Spannung, Strom, Temperatur und Drücke aus Sicherheitsgründen immer zu messen sein
- Ortaufgelöste 3D-Analysen von wesentlichen Teilen des Stacks und Systems sind für Entwicklungsaufgaben notwendig
- Beim Test von Systemen ist es notwendig, ausreichende Daten zu erhalten, um eine Fehlerfrüherkennung möglich zu machen und die Redundanzanforderungen zu minimieren  
Zur Analyse der Effizienz und Energieflüsse sind o. g. Messungen notwendig.

### Danksagung

An dieser Stelle sollen die wichtigen Beiträge von Herrn Heinz Sander (DLR), Dr. Mathias Schulze (DLR), Prof. Hans Bettermann (HHUD) und Herrn Dr. Peter Fischer (FhG – ICT) gewürdigt werden.

### Literaturhinweise

Lin, Rui und Cao, Chunhui und Ma, Jianxin und Gülzow, Erich und Friedrich, K. Andreas (2012) Optimizing the relative humidity to improve the stability of a proton exchange membrane by segmented fuel cell technology. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37 (4), Seiten 3373-3381. Elsevier Ltd.. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2011.11.046. ISSN 0360-3199

Gülzow, Erich und Schulze, Mathias und Friedrich, Andreas und Fischer, Peter und Bettermann, Hans (2011) LOCAL IN-SITU ANALYSIS OF PEM FUEL CELLS BY IMPEDANCE SPECTROSCOPY AND RAMAN MEASUREMENTS. *ECS Transactions*, 30 (1), Seiten 65-76. ECS. DOI: 10.1149/1.3562460

Lin, Rui und Gülzow, Erich und Schulze, Mathias und Friedrich, K. Andreas (2011) Investigation of Membrane Pinhole Effects in Polymer Electrolyte Fuel Cells by Locally Resolved Current Density. *Journal of The Electrochemical Society*, 158 (1). The Electrochemical Society. DOI: DOI: 10.1149/1.3504255

Lin, Rui und Sander, Heinz und Gülzow, Erich und Friedrich, Andreas (2010) Investigation of Locally Resolved Current Density Distribution of Segmented PEM Fuel Cells to Detect Malfunctions. *ECS Transactions*, 26 (1). ECS. DOI: 10.1149/1.3428993

Lin, Rui und Sander, Heinz und Gülzow, Erich und Friedrich, K. Andreas (2010) Investigation of Locally Resolved Current Density Distribution of Segmented PEM Fuel Cells to Detect Malfunctions. *ECS Transactions*, 26 (1). The Electrochemical Society. DOI: 10.1149/1.3428993

Schiller, Günter und Gülzow, Erich und Schulze, Mathias und Wagner, Norbert und Friedrich, K. Andreas (2010) Analytical Investigation of Fuel Cells by Using In-situ and Ex-situ Diagnostic Methods. *Materials Science Forum*, 638-642, Seiten 1125-1130. Trans Tech Publications, Switzerland. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.638-642.1125



# Forschungsbedarf und Projektideen zur Sensorik für erneuerbare Energien und Energieeffizienz

## Ergebnisse des World-Café auf dem Workshop

Zum Abschluss des Workshops diskutierten rund 60 Teilnehmende im Rahmen eines World-Cafés untereinander über Forschungsbedarfe und Projektideen zur Sensorik für erneuerbare Energien und Energieeffizienz. Ziel war es, Forschungsbedarfe und Projektideen zu sammeln, zu systematisieren und zu bewerten.

Das sogenannte „World-Café“ ist eine Workshop-Methode für Großgruppen, die möglichst viele Beteiligte zu Wort kommen lässt und miteinander vernetzt. Hierfür bilden die Teilnehmenden kleine Untergruppen und diskutieren während einer begrenzten Zeit eine zuvor an alle gemeinsam gestellte Frage. Nach Ablauf dieser Zeit wechseln sämtliche Teilnehmer in neue Untergruppen und diskutieren die gleiche Frage erneut mit neuen Gesprächspartnern. Dieser Vorgang wird mehrmals wiederholt, wodurch eine anregende Diskussionsatmosphäre entsteht, die Teilnehmer sich stark durchmischen, mit viel Redezeit für alle. Jede Untergruppe hält ihre Ergebnisse auf Chart-Bögen fest. Abschließend bewerteten die Teilnehmenden die auf den Chart-Bögen aufgeführten Beiträge.

[Weitere Informationen zum Format „World-Café“ siehe z. B. <http://de.wikipedia.org/wiki/World-Caf%C3%A9>]

Insgesamt gelang es, mehrere hundert Ideen zusammenzutragen sowie hieraus 36 besonders relevante Forschungsbedarfe und Projektideen zu identifizieren und zu priorisieren.

### Frage 1

Nach den Vorträgen und Diskursen der letzten 1 ½ Tage – Welche weiterführenden Forschungsbedarfe sehen Sie in der Schnittmenge von Sensorik und erneuerbarer Energien?

### Frage 2

Welche konkreten Projektideen sollten Sie heute gemeinsam entwickeln, damit die Tagung für Sie rückblickend ein voller Erfolg ist?

Die entstandenen und bewerteten Charts wurden nach der Veranstaltung ausgewertet. Hierbei schien eine Gruppierung der Ergebnisse sinnvoll und es entstanden verschiedene trennbare Themengruppen. In Folge der sehr freien Diskussion gelang nicht immer die angestrebte Abgrenzung zwischen Forschungsbedarfen und Projektideen; am auffälligsten ist dies bei der Themengruppe *Vernetzung der Projektpartner, Informationsquellen*, wo praktisch keine Differenzierung zu erkennen ist – hingegen gelang eine klare Abgrenzung in der Themengruppe *Anwendungsspezifisches, Messgrößen*.

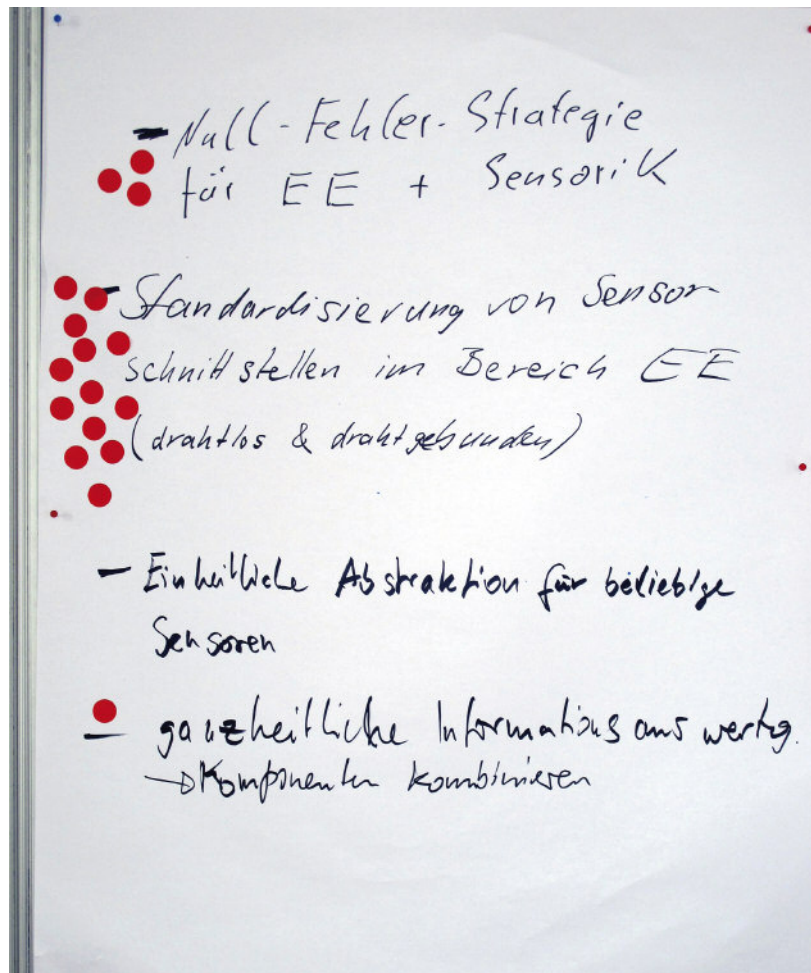
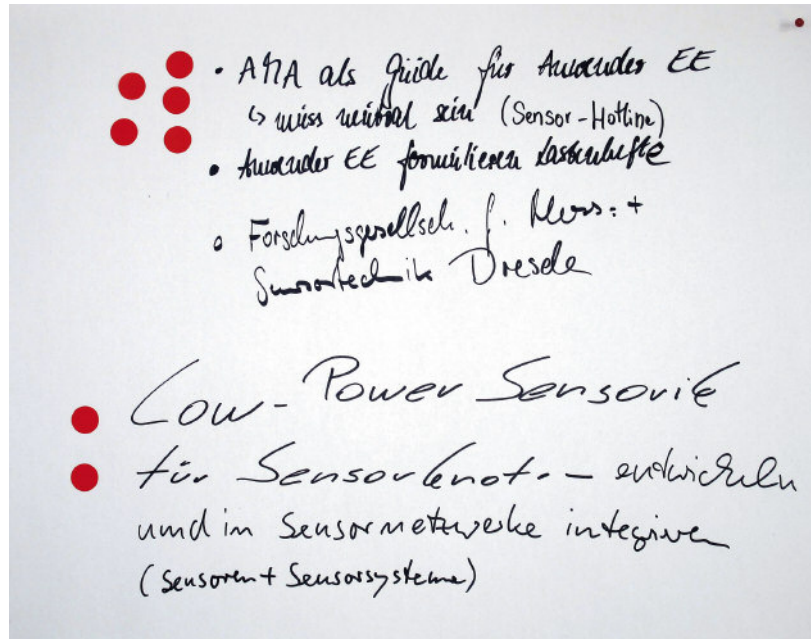
Die Abbildungen ab *Abbildung 3* fassen die Ergebnisse zusammen.

Dr. C. Thomas Simmons  
AMA Fachverband für Sensorik e. V.  
[simmons@ama-sensorik.de](mailto:simmons@ama-sensorik.de)

Abbildung 1  
Eindrücke vom  
World-Café



Abbildung 2  
Zwei beispielhafte  
Charts mit Diskussions-  
ergebnissen und  
aufgeklebten  
Bewertungs-Punkten



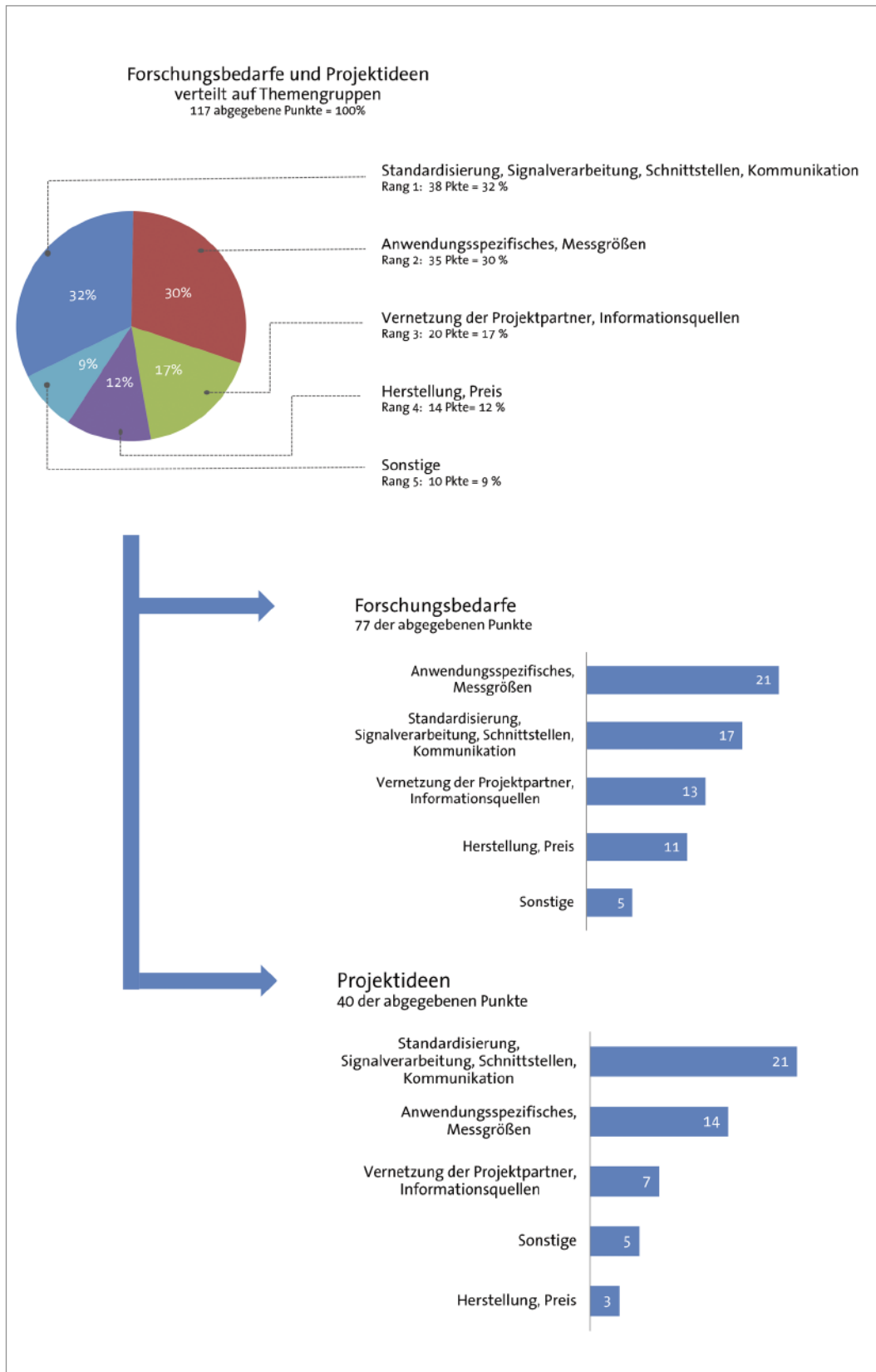


Abbildung 3  
Kreissektorendiagramm zur Illustration, wie sich die Summe des identifizierten Forschungsbedarfs und der Projektideen auf die Themengruppen verteilt. Die zwei Balkendiagramme illustrieren, wie sich jeweils die Forschungsbedarfe und die Projektideen auf die Themengruppen verteilen. Wie in allen folgenden Abbildungen auch, zeigen die Zahlen in den Balken die Anzahl der vergebenen Bewertungspunkte.

Abbildung 4  
Verteilung von Forschungsbedarfen und Projektideen innerhalb der Themengruppe **Standardisierung, Signalverarbeitung, Schnittstellen, Kommunikation**. Diese Themengruppe enthält hauptsächlich elektronische und Software-gemäße Fragestellungen.

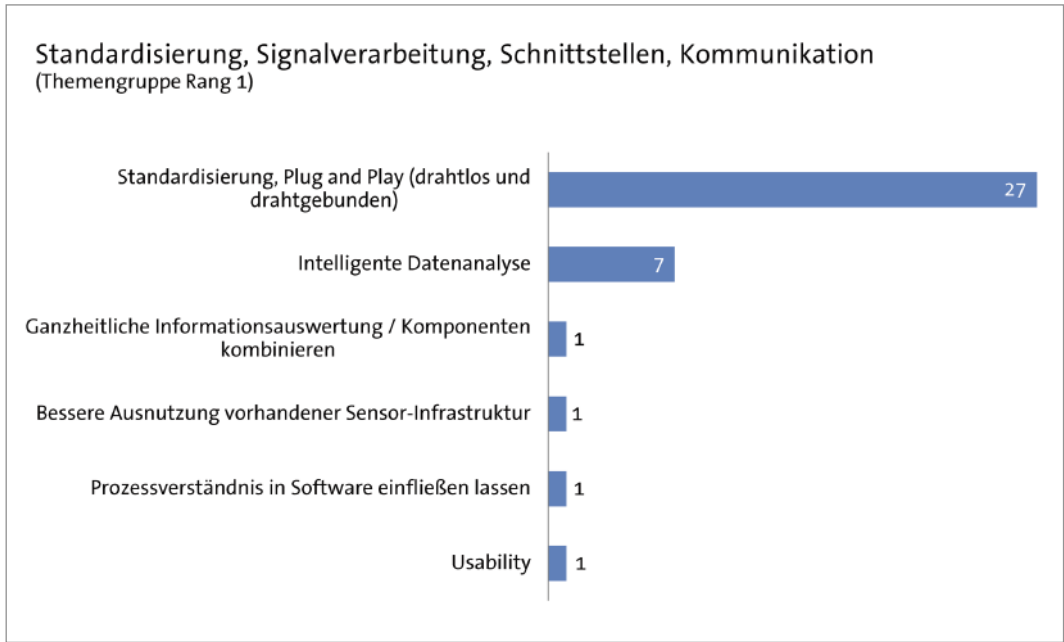
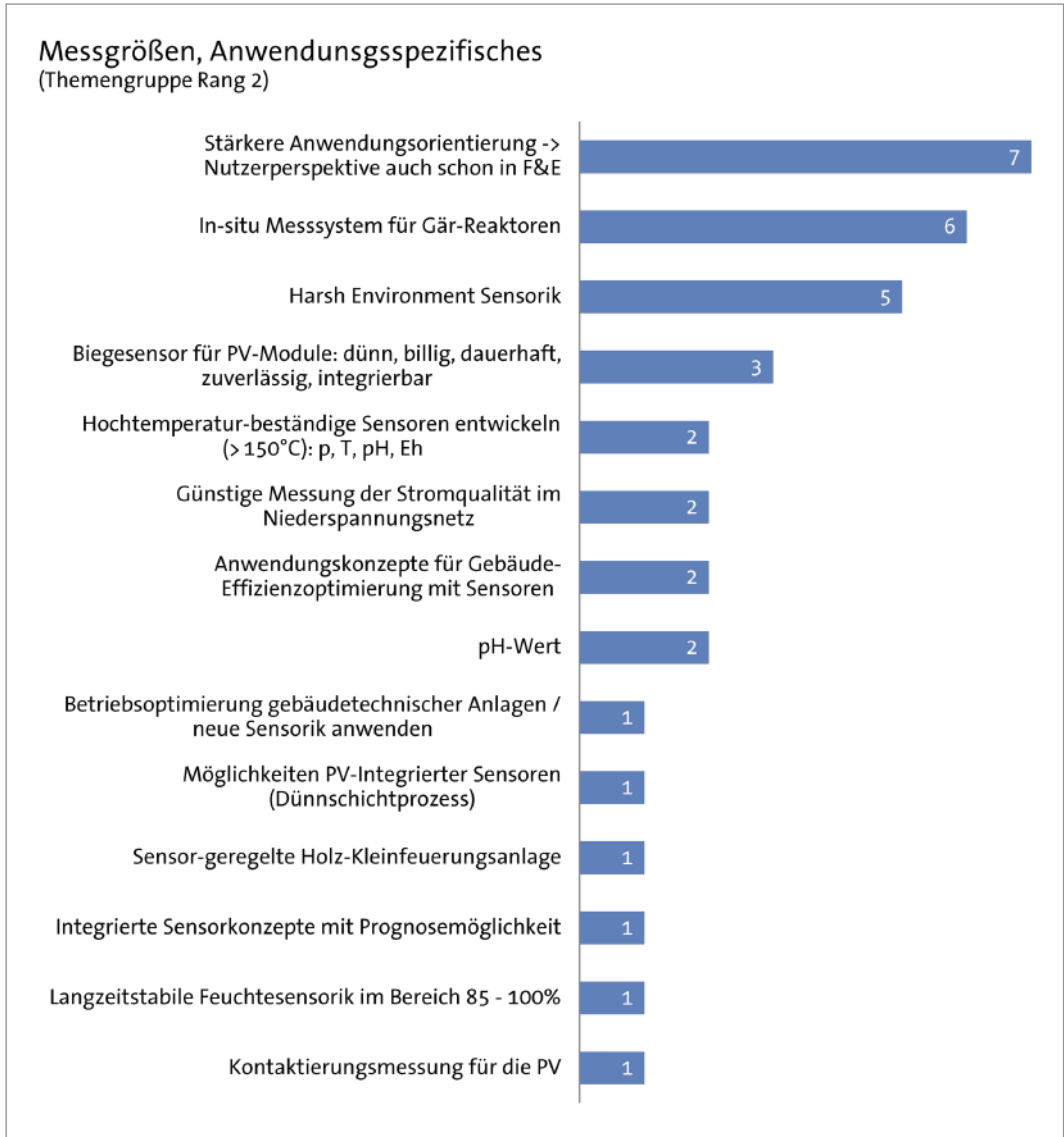


Abbildung 5  
Verteilung von Forschungsbedarfen und Projektideen innerhalb der Themengruppe **Messgrößen und Anwendungsspezifisches**





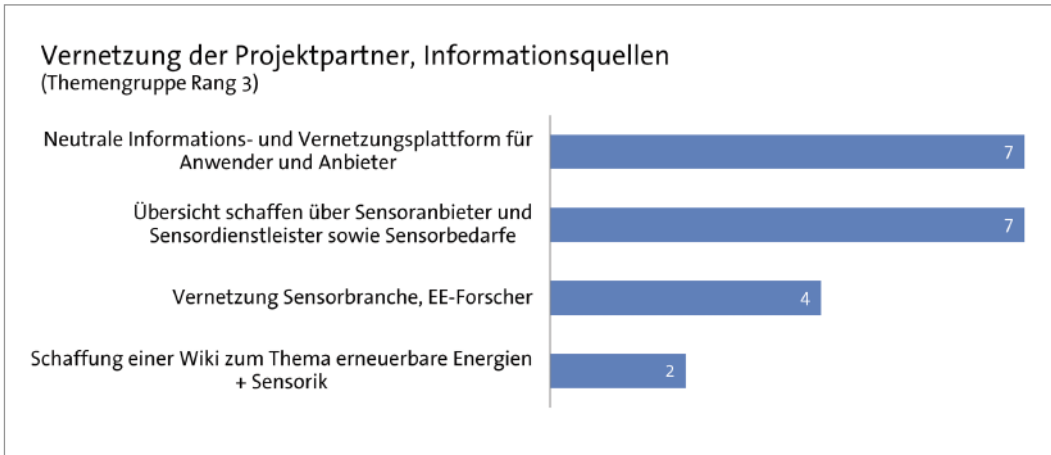


Abbildung 6  
Verteilung von Forschungsbedarfen und Projektideen innerhalb der Themengruppe **Vernetzung der Projektpartner, Informationsquellen.**

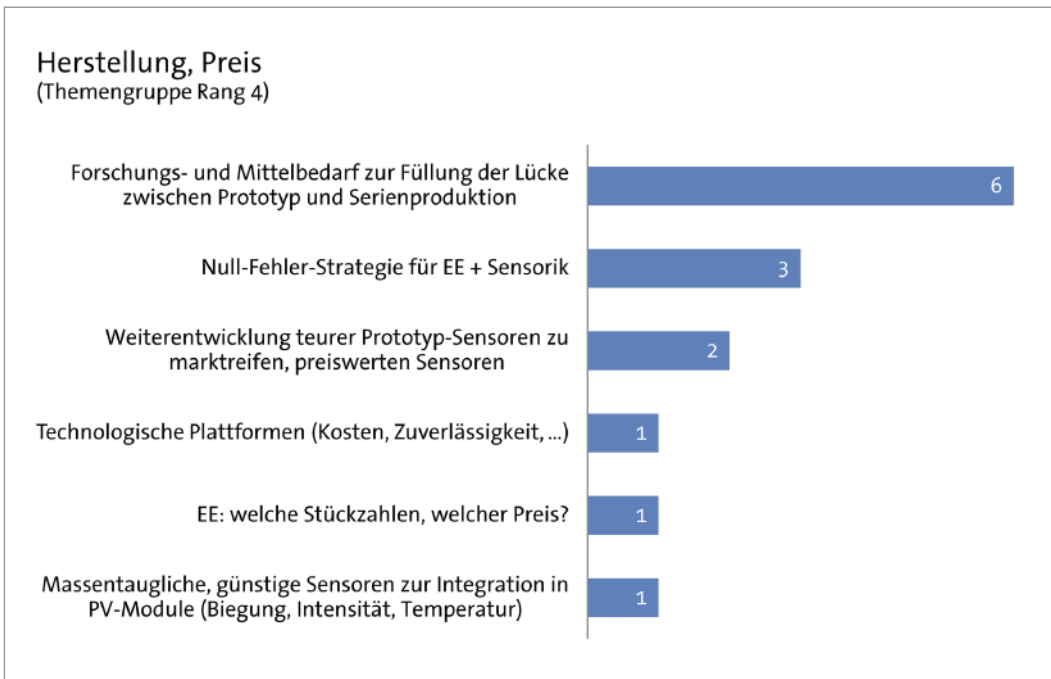


Abbildung 7  
Verteilung von Forschungsbedarfen und Projektideen innerhalb der Themengruppe **Herstellung, Preis**

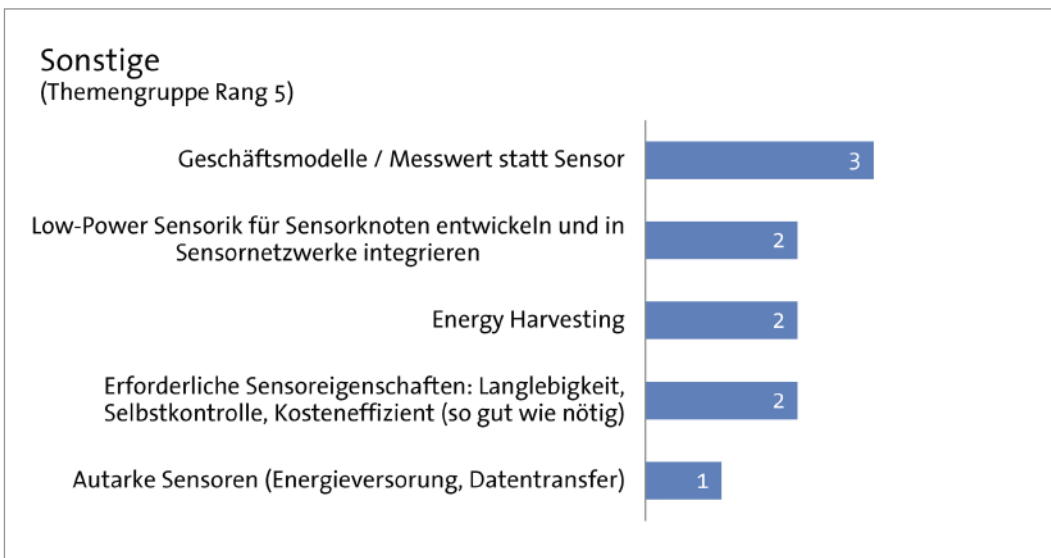


Abbildung 8  
Forschungsbedarfe und Projektideen die keiner der Themengruppen zuzuordnen sind

**Forschungsbedarfe und Projektideen**  
(Top 20 aus allen Themengruppen)



Abbildung 9  
Die „Top 20“  
Forschungsbedarfe und  
Projektideen

## Anhang

---



## Veranstalter AMA Fachverband für Sensorik

Der AMA Fachverband für Sensorik e.V. (AMA) – Innovatoren verbinden – ist das führende Netzwerk und die Interessensvertretung für die Schlüsselbranche technischer Innovationen.

AMA ist erster Ansprechpartner der Sensorik und Messtechnik und bietet mit seinem detaillierten Branchenverzeichnis einen Angebotsüberblick über Sensoren, Mess- und Prüftechniken. Der Verband pflegt den Innovationsdialog auf der führenden Fachmesse SENSOR+TEST, auf Gemeinschaftsständen wichtiger Leitmessen im In- und Ausland und auf den wissenschaftlichen AMA Kongressen SENSOR, IRS<sup>2</sup>. AMA bietet zudem Technologie-Seminare und Thementage mit Themenschwerpunkten aus der Sensorik und Messtechnik an.

Der AMA Verband wurde 1981 als „Arbeitsgemeinschaft Messwertaufnehmer e.V.“ gegründet. Heute baut AMA auf die fachliche Kompetenz von rund 480 Mitgliedsunternehmen und Instituten aus der Sensorik und Messtechnik. Der Verband vertritt die Interessen seiner Mitglieder im wirtschaftspolitischen Umfeld. AMA verbindet Innovatoren aus Forschung, Entwicklung, Herstellung und Distribution mit Vertretern aus verschiedensten Anwenderindustrien.

Der Verband bietet seinen Mitgliedern ein interessantes Netzwerk mit fachspezifischen Gremien, fundierten Brancheninformationen, nationalen und internationalen Messe- und Kongressbeteiligungen sowie ein fachlich qualifiziertes Seminarangebot an.

Im AMA Fachverband sind rund 70 wissenschaftliche Institute vernetzt, die durch den Wissenschaftsrat vertreten werden. Dieser setzt sich zusammen aus engagierten Wissenschaftlern unterschiedlicher Universitäten, Fachhochschulen und Forschungsinstituten.

Einmal jährlich verleiht der AMA Fachverband für Sensorik den AMA Innovationspreis an herausragende Entwicklungen aus der Sensorik und Messtechnik. Die Jury besteht primär aus Vertretern des AMA Wissenschaftsrates und prämiiert seit 1985 innovative, marktrelevante Entwicklungen aus der Sensorik und Messtechnik.

Die zweijährig stattfindenden wissenschaftlichen AMA Kongresse SENSOR und IRS<sup>2</sup> gelten als internationale Vernetzungsplattform der Sensorik und Messtechnik. Die AMA Kongresse ermöglichen dem international ausgerichteten Fachpublikum einen intensiven, fachlichen Austausch und präsentieren neueste Forschungsergebnisse aus den einzelnen Disziplinen.

AMA vereinigt alle, die sich mit Sensorik und Messtechnik für physikalische, chemische, klimatische oder sonstige Messgrößen beschäftigen und bietet Industrie und Wissenschaft damit ein Netzwerk und eine Plattform, um auch in Zukunft gemeinsam innovative Lösungen zu entwickeln.

### **AMA Geschäftsstelle**

Sophie-Charlotten-Str. 15  
14059 Berlin

### **AMA Geschäftsführer**

Dr. C. Thomas Simmons

### **AMA Pressereferentin**

Pascale Taube

### **Assistentin der AMA Geschäftsführung**

Nancy Möller



## Veranstalter

# FVEE – ForschungsVerbund Erneuerbare Energien

Der ForschungsVerbund Erneuerbare Energien ist eine bundesweite Kooperation von Forschungsinstituten. Die Mitglieder erforschen und entwickeln Technologien für erneuerbare Energien, Energieeffizienz und Energiespeicherung sowie für deren Integration in Energiesysteme.

Der ForschungsVerbund wurde 1990 auf Anregung des Bundespräsidenten Richard von Weizsäcker gegründet, um die Forschungsaktivitäten für erneuerbare Energien zu intensivieren und zu bündeln.

Der FVEE repräsentiert rund 80% der außeruniversitären Forschungskapazität für Erneuerbare in Deutschland und ist das größte koordinierte Forschungsnetzwerk für erneuerbare Energien in Europa.

Das Spektrum der Forschungsthemen umfasst alle erneuerbaren Energien, die sich quantitativ und zeitlich zu einem Energiemix aus Strom, Wärme und chemischen Energieträgern ergänzen, der durch Systemtechnik gesteuert wird. Effizienztechnologien senken den Energiebedarf und Speichertechnologien bringen den Restenergiebedarf und das fluktuierende Angebot zum Ausgleich.

Auf seiner Internetseite [www.fvee.de](http://www.fvee.de) bietet der FVEE allen Interessierten kostenlose Informationen an:

- Informationen zu allen Forschungsthemen
- Downloads aller Publikationen des FVEE
- Pressemitteilungen
- Bildmaterial
- Informationen zu den Mitgliedsinstituten

Die Geschäftsstelle in Berlin ist das Informations- und Kommunikationszentrum des Verbunds. Sie ist Ansprechpartner für Wissenschaft, Wirtschaft und Politik und betreibt die gemeinsame Öffentlichkeitsarbeit des Verbunds mit Tagungen, Workshops und Broschüren rund um die Forschung zu erneuerbaren Energien und Energieeffizienz.

### FVEE-Geschäftsstellenbüros

- 10178 Berlin-Mitte, Anna-Louisa-Karsch-Str. 2
  - 12489 Berlin-Adlershof, Kekuléstr. 5
- fvee@helmholtz-berlin.de  
www.fvee.de

### FVEE-Geschäftsführung

Dr. Niklas Martin

### FVEE-Öffentlichkeitsarbeit

Petra Szczepanski  
Franziska Wunschick



## FVEE-Mitgliedsinstitute und Ansprechpartner



**DLR** Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. in der Helmholtz-Gemeinschaft  
www.dlr.de  
Zentrum Köln-Porz • 51170 Köln  
Dorothee Bürkle:  
Telefon 02203/601-3492  
dorothee.buerkle@dlr.de  
  
**Standort Stuttgart**  
Pfaffenwaldring 38–40 • 70569 Stuttgart  
  
**DLR-Projektteam auf der**  
**PSA** Plataforma Solar de Almería  
Apartado 39 • E-04200 Tabernas (Almería)



**Forschungszentrum Jülich**  
www.fz-juelich.de  
52425 Jülich  
Dr. Anne Rother:  
Telefon 02461/61-4661  
info@fz-juelich.de



**Fraunhofer IBP** Fraunhofer-Institut für Bauphysik  
www.ibp.fraunhofer.de  
Nobelstraße 12 • 70569 Stuttgart  
Rita Schwab:  
Telefon 0711/9703301  
rita.schwab@ibp.fraunhofer.de  
  
**Standort Holzkirchen**  
Fraunhoferstraße 10 • 83626 Valley  
Janis Eitner:  
Telefon 08024/643-203  
janis.eitner@ibp.fraunhofer.de  
  
**Standort Kassel**  
Gottschalkstraße 28a • 34127 Kassel  
  
**Standort Nürnberg**  
c/o Energie Campus Nürnberg  
Muggenhoferstraße 135  
90429 Nürnberg



**Fraunhofer ISE**  
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme  
www.ise.fraunhofer.de  
Heidenhofstraße 2 • 79110 Freiburg  
Karin Schneider:  
Telefon 0761/4588-5147  
karin.schneider@ise.fraunhofer.de  
  
**Fraunhofer-Center für Silizium-Photovoltaik CSP**  
Walter-Hülse-Straße 1 • 06120 Halle  
  
**Technologiezentrum Halbleiternaterialien THM**  
Am St.-Niclas-Schacht 13 • 09599 Freiberg  
  
**Labor- und Servicecenter Gelsenkirchen**  
Auf der Reihe 2 • 45884 Gelsenkirchen



**Fraunhofer IWES**  
Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik  
www.iwes.fraunhofer.de  
  
**Institutsteil Kassel**  
Königstor 59 • 34119 Kassel  
Uwe Krengel:  
Telefon 0561/7294-319  
uwe.krengel@iwes.fraunhofer.de  
  
**Institutsteil Bremerhaven**  
Am Seedeich 45 • 27572 Bremerhaven  
Britta Rollert:  
Telefon 0471/14290-220  
info@iwes.fraunhofer.de



**GFZ** Helmholtz-Zentrum Potsdam  
Deutsches GeoForschungsZentrum  
www.gfz-potsdam.de  
Telegrafenberg • 14473 Potsdam  
Franz Ossing:  
Telefon 0331/288-1040  
ossing@gfz-potsdam.de



**HZB** Helmholtz-Zentrum Berlin  
für Materialien und Energie  
www.helmholtz-berlin.de  
  
**Lise-Meitner-Campus**  
Hahn-Meitner-Platz 1 • 14109 Berlin-Wannsee  
Dr. Ina Helms:  
Telefon 030/8062-42034  
info@helmholtz-berlin.de  
  
**Campus Wilhelm Conrad Röntgen**  
Kekuléstraße 5 • 12489 Berlin-Adlershof  
  
**PVcomB**  
Schwarzschildstraße 3 • 12489 Berlin-Adlershof



**ISFH** Institut für Solarenergieforschung GmbH  
Hamel/Emmerthal  
www.isfh.de  
Am Ohrberg 1 • 31860 Emmerthal  
Dr. Roland Goslich:  
Telefon 05151/999-302  
info@isfh.de



**IZES** gGmbH  
Institut für ZukunftsEnergieSysteme  
www.izes.de/  
Altenkesseler Straße 17 • 66115 Saarbrücken  
Michaela Schlichter:  
Telefon 0681/9762 173  
schlichter@izes.de



**WI** Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH  
www.wupperinst.org  
Döppersberg 19 • 42103 Wuppertal  
Dorle Riechert:  
Telefon 0202/2492-180  
info@wupperinst.org



**ZAE** Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V.  
www.zae-bayern.de  
Am Galgenberg 87 • 97074 Würzburg  
Anja Matern-Lang:  
Telefon 0931/70564-52  
matern-lang@zae.uni-wuerzburg.de

**Standort Garching**  
Walther-Meißner-Straße 6 • 85748 Garching  
  
**Standort Erlangen**  
Haberstraße 2a • 91058 Erlangen



**ZSW** Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden Württemberg  
Gemeinnützige Stiftung  
www.zsw-bw.de  
Industriestraße 6 • 70565 Stuttgart  
Claudia Brusdeylins:  
Telefon 0711/7870-278  
info@zsw-bw.de

**Standort Ulm**  
Helmholtzstraße 8 • 89081 Ulm

# Impressum

## Workshop Sensorik für Erneuerbare Energien und Energieeffizienz

### Herausgeber

ForschungsVerbund Erneuerbare Energien  
und AMA Fachverband für Sensorik e. V.

### Redaktion

#### FVEE

Franziska Wunschick  
Dr. Niklas Martin  
Petra Szczepanski

#### AMA

Nancy Möller  
Dr. Thomas Simmons  
Pascale Taube

### Förderung

Der Workshopband wurde durch das Bundesministerium für Umwelt,  
Naturschutz und Reaktorsicherheit gefördert.

### Layout, Grafik

Hoch3 GmbH – Design- und Werbeagentur

Berlin, August 2013

ISSN • 09491082





**FVEE** ForschungsVerbund  
Erneuerbare Energien  
Renewable Energy Research Association

Büro Berlin-Mitte: Anna-Louisa-Karsch-Str. 2 • 10178 Berlin • Tel.: 030 288-7565-71

Büro Berlin-Adlershof: Kekuléstr. 5 • 12489 Berlin • Tel.: 030 8062-41338

E-Mail: [fvee@helmholtz-berlin.de](mailto:fvee@helmholtz-berlin.de) • [www.fvee.de](http://www.fvee.de)

**AMA**

Fachverband für Sensorik e.V.

*Innovatoren verbinden*

Geschäftsstelle • Sophie-Charlotten-Str. 15 • 14059 Berlin • Tel.: 030 2219 0362-0

E-Mail: [info@ama-sensorik.de](mailto:info@ama-sensorik.de) • [www.ama-sensorik.de](http://www.ama-sensorik.de)