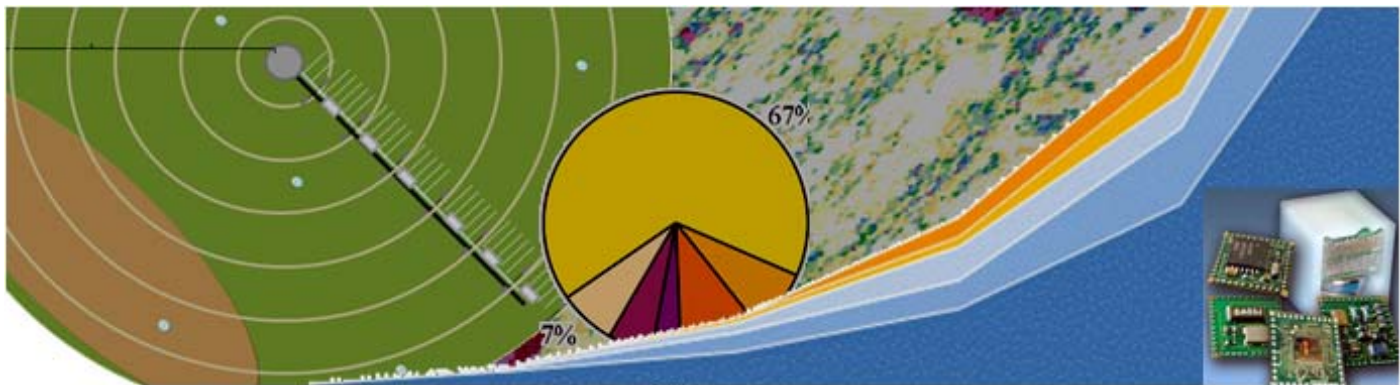




Borderstep Institut für
Innovation und Nachhaltigkeit



Innovations- und Technikanalyse Autonomer Verteilter Mikrosysteme



Karsten Schischke, Fraunhofer IZM
Dr. Severin Beucker, Borderstep
Dr. Jens Clausen, Borderstep
Dr. Michael Niedermayer, Fraunhofer IZM

Berlin, den 1. August 2009

Fraunhofer IZM, Gustav-Meyer-Allee 25, 13355 Berlin
Tel.: +49.30.46403-156, Fax: +49.30.46403-131
e-mail: karsten.schischke@izm.fraunhofer.de

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 16|1568 gefördert, Projektträger VDI/VDE-IT. Die Verantwortung für den Inhalt liegt beim Autor.

Diese Studie wurde erstellt unter Mitwirkung von Hendrik Scholtz, Jennifer Mwanza, Anita Selig und Peter Altendorf.

Inhalt

0	Einleitung	7
1	Entwicklungsstand und ausgewählte Anwendungsfelder	9
1.1	Definition und Grundsätze Autonomer Verteilter Mikrosysteme	9
1.2	Komponenten und Stand der Technik	10
1.3	Systematisierung von Sensornetzwerken	18
1.4	Kurzbeschreibungen der Anwendungsfelder	20
1.4.1	Umweltmonitoring	22
1.4.2	Öffentliche Infrastruktur	25
1.4.3	Bauwerksmonitoring	31
1.4.4	Katastrophenschutz	33
1.4.5	Landwirtschaft	36
1.4.6	Zustandsüberwachung von Patienten und medizinische Diagnostik	40
1.4.7	Automobilelektronik	43
1.4.8	Luft- und Raumfahrt	46
1.4.9	Automatisierungstechnik	48
1.4.10	Logistik	54
1.4.11	Gebäudetechnik	57
2	Rechtliche Rahmenbedingungen und Sicherheitsaspekte	60
2.1	Datenschutz	61
2.2	Umweltrecht	63
2.2.1	Bundes-Immissionsschutzgesetz	63
2.2.2	Entsorgung	64
2.3	Informations- und Telekommunikationsrecht	66
2.3.1	Frequenzordnung	66
2.4	Produkthaftung	67
2.4.1	Vertragliche Haftung	68
2.4.2	Produktsicherheitsgesetz	69
2.4.3	Außervertragliche Haftung des Herstellers	69
2.5	Sicherheitsaspekte	72
2.5.1	Angriffsrisiken	73
2.5.2	Sicherheitsanforderungen für die Einsatzszenarien	75
3	Rahmenbedingungen und Szenarien für Beispielanwendungen in der Automatisierungstechnik	77

3.1	Herausforderungen für die Automatisierungstechnik	79
3.2	Bedeutung von Sensorik in der Automatisierungstechnik	80
3.3	Rahmenszenario digitale Produktion 2020	82
3.4	Anwendungsfelder und Potenziale für Autonome Verteilte Mikrosysteme (AVM) in der Automatisierungstechnik	83
3.4.1	Erfassung von Anwendungsfeldern und Potenzialen	84
3.4.2	Status-Quo und Entwicklungschancen drahtloser Sensortechnik	85
3.4.3	Anwendungsfelder in der Automatisierungstechnik	86
3.5	Einsatz von AVMs zur Zustandsüberwachung von elektrischen Antrieben und Motoren	89
3.5.1	Charakterisierung des Anwendungsfeldes	89
3.5.2	Einsatzmöglichkeiten von AVMs in elektrischen Antrieben und Motoren	91
3.5.3	Anforderungen an den Einsatz von AVMs in elektrischen Antrieben und Motoren	93
3.6	Anwendungsszenario AVMs zur Zustandsüberwachung von Elektromotoren	96
3.7	Umsetzungskonzept: Diskussion der Systemkomponenten	97
3.7.1	Umgebungsschnittstelle	97
3.7.2	Funkschnittstelle	102
3.7.3	Energieversorgung	105
4	Rahmenbedingungen und Szenarien für Beispielanwendungen in der Landwirtschaft	108
4.1	Ansprüche aufgrund wachsender Weltbevölkerung	109
4.2	Ansprüche zum Schutz der Umwelt	110
4.2.1	Süßwasserknappheit	110
4.2.2	Treibhausgasemissionen	115
4.2.3	Überdüngung	117
4.3	Entwicklungen in der Landwirtschaftspolitik	118
4.4	Rahmenszenario Precision Farming 2020	121
4.5	Precision Farming	121
4.5.1	Technologie	122
4.5.2	Ergebnisse	124
4.5.3	Die Möglichkeiten von Precision Farming aus Sicht des ökologischen Landbaus	126
4.6	Messparameter und Stand der Messtechnik	128
4.7	Potenziale des AVM-Einsatzes im Anwendungsfeld Bewässerung	129
4.8	Das Anwendungsfeld Düngung	133
4.9	Ergebnisse der Expertenbefragung zur weiteren Entwicklung der Sensortechnik rund um Precision Farming	135
4.9.1	Precision Farming generell	135
4.9.2	Präzisionsbewässerung	137

4.9.3	Präzisionsdüngung	139
4.10	Szenario Bodensensoreinsatz im Precision Farming 2020	141
4.10.1	Grobkonzept	142
4.11	Umsetzungskonzept: Diskussion der Systemkomponenten	145
4.11.1	Umgebungsschnittstelle	146
4.11.2	Funkschnittstelle	146
4.11.3	Datenverarbeitung	150
4.11.4	Energieversorgung	152
5	Ökonomische Potenziale	154
5.1	Automatisierungstechnik	154
5.1.1	Generelles Marktpotenzial für Anwendungen drahtloser Sensornetzwerke in der Automatisierungstechnik	154
5.1.2	Marktpotenzial für die Zustandsüberwachung von elektrischen Antrieben und Motoren in der Automatisierungstechnik	155
5.2	Landwirtschaft	161
5.2.1	Wasserbedarf und Preis des Wassers	161
5.2.2	Investitionskosten für Bewässerungstechnik	164
5.2.3	Abschätzung des Marktvolumens für Messtechnik in der Präzisionsbewässerung	167
5.3	Zusammenfassung Marktpotenziale	168
6	Umweltauswirkungen	169
6.1	Direkte Umweltauswirkungen	169
6.1.1	Herstellung und Materialien	169
6.1.2	Nutzungsphase	179
6.1.3	Entsorgung	180
6.2	Anwendungsfall Landwirtschaft	181
6.3	Anwendungsfall Prozess- und Automatisierungstechnik	185
6.4	Generalisierung und Zusammenfassung der Umweltbewertung	188
7	Roadmapping, Umsetzungsstrategien, Handlungsempfehlungen	194
7.1	Technologievisionen	194
7.2	Roadmaps für die Entwicklung von AVM-Anwendungen	194
7.2.1	Entwicklung von Roadmaps für Anwendungen von Autonomen Verteilten Mikrosystemen	194
7.2.2	EPoSS Forschungsagenda	196
7.2.3	WiSeNts Forschungsroadmap	196
7.2.4	Besonderheiten und Rahmenbedingungen AVM-Einsatz in der Landwirtschaft	206
7.2.5	Besonderheiten und Rahmenbedingungen AVM-Einsatz in der Automatisierungstechnik	207

7.3	Stärken-Schwächen-Analyse	211
8	Literatur	214
9	Anhang	223
9.1	Teilnehmer Experten-Interviews	223
9.2	Überblick: Methoden und Sensorik zur Bestimmung des Wassergehaltes in Böden	224
9.2.1	Kennzahlen	224
9.2.2	Direkte Methoden	225
9.2.3	Indirekte Methoden	225
9.2.4	Volumetrische Methoden	226
9.2.5	Zusammenfassung der Messmethoden	229
9.3	Umweltauswirkungen der AVM-Herstellung - Schlüsselparameter	232

0 Einleitung

Autonome Verteilte Mikrosysteme (AVM) sind kleinste, eigenständige funktionale Systeme, die als programmierbare Mikromodule mit sensorischen Eigenschaften universell einsetzbar sind. Sie besitzen zudem die Fähigkeit zur bidirektionalen Kommunikation in einem Netzwerk.

AVM besitzen damit ein besonders hohes Einsatzpotenzial für Anwendungen, in denen übliche Sensoren aufgrund ihrer Größe und Kosten nicht oder nur mit großem Aufwand zum Einsatz kommen können. Drahtlose Datenübertragung, hohe Anforderungen an Miniaturisierung, und die Fähigkeit sich selbst als autarkes Netzwerk zu organisieren und zu kommunizieren bestimmen darüber hinaus mögliche Einsatzfelder für AVM. Dementsprechend vielfältig sind die möglichen Anwendungen. Sie umfassen z.B. den Katastrophenschutz (Ortung von Personen in eingestürzten Gebäuden), Medizintechnik (Zustandsüberwachung von Patienten), Automobilelektronik, Flugzeugbau, Transportkontrolle, Landwirtschaft und Überwachung und Steuerung (bio-)chemischer Prozesse.

Die Vision immer kleinerer autarker Mikrosysteme wird von mehreren Forschungseinrichtungen unter Bezeichnungen wie „smart dust“¹ bzw. „golem dust“ (University of California, Berkeley) oder „eGrains“² (Fraunhofer IZM, Berlin) seit einigen Jahren verfolgt. Damit eröffnen sich zahlreiche neue Anwendungsperspektiven für ubiquitäres Computing und drahtlose Sensornetzwerke.

Zugleich zeichnet sich eine immer weitergehende Verknüpfung von Objekten unter dem Stichwort „Internet der Dinge“³ ab; Mikrosystemtechnik ist eine der Schlüsseltechnologien für diese nächste Generation des Inter-

Der Begriff des „Internet der Dinge“ bezeichnet die nahtlose gegenseitige Zusammenschaltung von Geräten, Sensoren, Gegenständen, Räumen, Maschinen, Fahrzeugen usw. mit Hilfe fester und drahtloser Netze. Die zusammenschalteten Sensoren, Geräte und Etiketten können selbständig mit ihrer Umgebung interagieren und Informationen direkt an andere Gegenstände oder Geräte übermitteln (Maschine-Maschine-Kommunikation).

Europäische Kommission, KOM(2008) 594

¹ Hsu, V.; Kahn, J. M.; Pister, K. S. J.: Wireless Communications for Smart Dust, Electronics Research Laboratory Technical Memorandum Number M98/2, Februar, 1998

² Reichl, H.: eGrain – Elektronischer Staub, Fraunhofer Magazin 4.2001, S. 22f.

³ Europäische Kommission: Mitteilung über künftige Netze und das Internet, Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen, KOM(2008) 594, 29.9.2008, Brüssel

nets und um Gegenstände mit „Intelligenz“ auszustatten⁴.

Ziel dieser Innovations- und Technikanalyse (ITA) ist es, zwei potenzielle, exemplarische Anwendungsfelder von AVM im Detail zu untersuchen und mit Hilfe von Szenario- und Roadmappingtechniken Anforderungen, ökonomische Randbedingungen, Akzeptanz- und Umweltfragen zukünftiger ausgewählte Anwendungen fundiert zu analysieren und zu bewerten.

Es erfolgt eine Fokussierung auf Anwendungen von AVM in den Bereichen Landwirtschaft und Überwachung bzw. Steuerung in der Automatisierungstechnik. Dabei sollen der gesellschaftliche Nutzen (z.B. Schaffung neuer Arbeitsplätze in Schlüsseltechnologien) von AVM-Anwendungen, wie auch potenzielle Risiken und Akzeptanzfragen (z.B. Ausbringung von Mikrosystemen in die Umwelt) an konkreten Beispielen bewertet werden. Die ITA möchte somit auch Orientierungswissen in dem komplexen Feld zukünftiger Anwendungen von AVM schaffen und zur Versachlichung einer anwendungsspezifischen Diskussion beitragen.

Mit dieser Zielsetzung führt die ITA die zwei Innovationsstrategien zu Umwelttechnologien und Mikrosystemtechnik, die auch in der Hightech-Strategie⁵ als Schwerpunkte identifiziert wurden, zusammen.

⁴ Dominierend werden jedoch passive RFIDs sein (siehe auch: Das, R.; Harrop, P. (IDTechEx): RFID Forecasts, Players & Opportunities 2008-2018, 2008, Cambridge, MA), die im Sinne dieser Studie nicht unter den Begriff AVM fallen.

⁵ Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF): Die Hightech-Strategie für Deutschland, Bonn / Berlin, 2006

1 Entwicklungsstand und ausgewählte Anwendungsfelder

1.1 Definition und Grundsätze Autonomer Verteilter Mikrosysteme

Der Begriff Autonomer Verteilter Mikrosysteme (AVM) überschneidet sich mit einer Reihe anderer Bezeichnungen, insbesondere dem Begriff der drahtlosen Sensornetzwerke („Wireless Sensor Networks“). AVMs sind auf Mikrosystemtechnik beruhende Sensorknoten⁶ drahtloser Sensornetzwerke. Mikrosysteme schließen jedoch nicht nur Sensorik sondern gegebenenfalls auch Aktorik mit ein.

Autonome Verteilte Mikrosysteme sind

- „autonom“ bezüglich der Energieversorgung und funkbasierten Datenübertragung,
- „verteilt“, d.h. bestehend aus mehreren sogenannten Sensorknoten (einzelnen Komponenten), die miteinander und/oder einer Zentraleinheit kommunizieren,
- „Mikrosysteme“, die insbesondere Sensorik und Datenverarbeitung, ggf. auch Aktorik umfassen.

Nach gängigem Verständnis zeichnen sich Autonome Verteilte Mikrosysteme aus durch:

- Skalierbarkeit
- Fähigkeit zur Selbstorganisation
- Restriktionen bezüglich der Hardware (Volumen- / Gewichtsbeschränkungen, Energieversorgung); daher Miniaturisierungsansätze, wie z.B. Komponenten und Verfahren aus der Mikrotechnik genutzt.

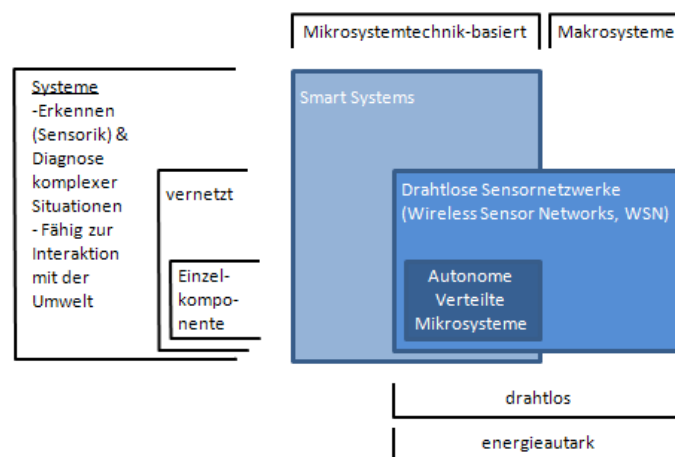
Insbesondere die Fähigkeit zur Selbstorganisation wird häufig als besonderes Merkmal autonomer Sensornetzwerke herausgestellt, in der Diskussion von

⁶ andere gebräuchliche Bezeichnungen aus dem Englischen: „(sensor) node“ oder „mote“

Anwendungsfeldern ist diese Selbstorganisation jedoch häufig gar nicht erforderlich.

Zu unterscheiden sind unterschiedliche System- bzw. Hierarchieebenen, wobei die einzelnen Sensorknoten die unterste Ebene darstellen. Üblicherweise werden AVMs an andere Systeme (konventionelle Rechner u.ä.) angebunden sein.

Abbildung 1: Charakteristika von Smart Systems, drahtlosen Sensornetzwerken und Autonomen Verteilten Mikrosystemen



AVMs sind als Untergruppe von „Smart Systems“ zu verstehen (siehe Abbildung 1), die definiert sind als⁷ intelligente, miniaturisierte Subsysteme mit einer eigenen und unabhängigen Funktionalität, entwickelt auf Basis der Mikrosystemtechnik; fähig zum Erkennen und Diagnostizieren komplexer Situationen; „vorausschauend“; in der Lage Entscheidungen zu treffen und die Entscheidungsfindung zu unterstützen; fähig zur Interaktion mit der Umwelt

1.2 Komponenten und Stand der Technik

Die Schlüsselkomponenten von AVMs sind

- Sensoren / Aktuatoren
- Sender / Empfänger
- Mikrocontroller

⁷ Entsprechend der Definition der European Technology Platform on Smart Systems Integration, siehe: EPoSS: Strategic Research Agenda 2009, EPoSS Office / VDI/VDE-IT, Berlin

- Netzwerk(infrastruktur)
- Energiemanagement

Ein **Sensor** erfasst physikalische, biologische oder chemische Eigenschaften der Umgebung und konvertiert diese in ein elektrisches Signal. Entsprechend der Vielzahl möglicher Messparameter einer spezifischen AVM-Anwendung (Geschwindigkeit, Beschleunigung, Temperatur, Feuchte, Helligkeit, Druck, Durchfluss, Strom und Spannung, Konzentration verschiedenster Stoffe in unterschiedlichsten Medien, Zellkonzentration etc.) ist auch das Spektrum möglicher Sensoren extrem breit, Grenzen setzen jedoch ggf. Anforderungen an die Messgenauigkeit für einzelne Parameter, insbesondere im Bereich der Analytik fehlen für bestimmte Substanzen in-situ-Sensoren auch ganz. Zielkonflikte mit minimalem Energieverbrauch, erforderlichem Miniaturisierungsgrad und Standzeit der Sensorik sind weitere limitierende Faktoren. „Smarte“ Sensoren erfordern üblicherweise zudem integrierte Logik für das Kalibrieren, die Signalverarbeitung oder Analog-Digital-Wandlung⁸.

Chemische Nasen sind Sensorsysteme, die mehrere Sensorelemente gleichzeitig verwenden, wobei die einzelnen Elemente unterschiedliche Selektivitäten gegen verschiedene Gase, wie CO, CO₂ oder NH₃, aufweisen. Damit sind diese Sensorsysteme in der Lage auch komplexe Gasgemische zu detektieren.

Derzeit werden Nanosensoren für die Detektion von Gasen, die bei Bränden auftreten, entwickelt. Diese Sensoren werden mittels halbleitertechnologischer Prozesse aus Silicon-On-Insulator (SOI) Wafern hergestellt, wobei als Sensorelemente so genannte Nanobänder eingesetzt werden. Diese Nanobänder werden mit dünnsten Metalloxidschichten mit Dicken von nur wenigen 10 nm funktionalisiert, um die gewünschte Selektivität gegenüber spezifischen Gasen zu erreichen.⁹

Der Einsatz von Sensorik für das Monitoring chemischer oder biochemischer Parameter, deren Verlauf mittels AVM über einen längeren Zeitraum gemessen werden sollen, unterliegen – anders als bei physikalischen Parametern – einem grundsätzlichen Paradoxon¹⁰:

1. Das Prinzip (bio)chemischer Sensoren basiert auf selektiven Reaktionen an einer aktiven Oberfläche, die direkt mit der Probe in Kontakt steht; daher muss sich die Oberfläche verändern, um ein Signal auslösen zu

⁸ Chalard, L.; Helal, D.; Verbaere, L.; Wellig, A.; Zory, J.: Wireless Sensor Networks Devices: Overview, Issues, State-of-the-Art and Promising Technologies, ST Journal of Research, Vol. 4, No. 1, 2007

⁹ Austrian Research Centres, HOME / Forschung & Entwicklung / Nanoelektronik / Chemische Nasen

¹⁰ Diamond, D.: Energy Consumption Issues in Chemo/Biosensing Using WSNs, Workshop "Energy and Materials: Critical Issues for Wireless Sensor Networks", 30. Juni 2006, Dublin

können, jedoch ist die Regeneration der Sensoroberfläche in einen Zustand, der wiederholte, zuverlässige Messungen ermöglicht extrem schwierig

2. Wenn sich aber die Oberfläche ändert, ist eine Nachkalibrierung erforderlich, mit der Notwendigkeit, die dafür notwendigen Reagenzien zu handhaben.

In einer Schlüsselrolle, dieses Paradoxon zu überwinden, sieht Diamond die Materialwissenschaften, insbesondere die Entwicklung „Adaptiver Materialien“ als reaktive Oberflächen, deren Eigenschaften durch das Schalten unterschiedlicher Modi kontrolliert veränderbar sind. Forschungsarbeiten auf diesen Gebieten laufen derzeit, erforderlich sind jedoch für jedes chemische System spezifische Lösungen.

Aktuatoren wandeln ein elektrisches Signal üblicherweise in eine mechanische Aktion um, wie zum Beispiel das Schließen eines Mikroventils. Die direkte Integration von Aktuatoren in AVM-Komponenten ist die Ausnahme, eher regelt ein AVM elektronisch Makrokomponenten, wie Belüftungssysteme oder Beleuchtung.

Die **Sender-Empfängereinheit** ist essentiell für die drahtlose Kommunikation. Die Fähigkeit zu senden ist eine Grundeigenschaft von AVM-Komponenten, typischerweise können AVM-Sensorknoten auch Signale empfangen, insbesondere wenn der einzelne Sensorknoten einen Aktuator steuert oder in einem Multi-hop-Netzwerk Informationen von Sensorknoten zu Sensorknoten weitergegeben werden müssen. Die Gestaltung der Kommunikation zwischen den Sensorknoten (Datenmenge, -raten, Übertragungshäufigkeit, Frequenz etc.) ist üblicherweise der entscheidende Faktor für den Energieverbrauch von AVMs und damit das Energieversorgungskonzept.

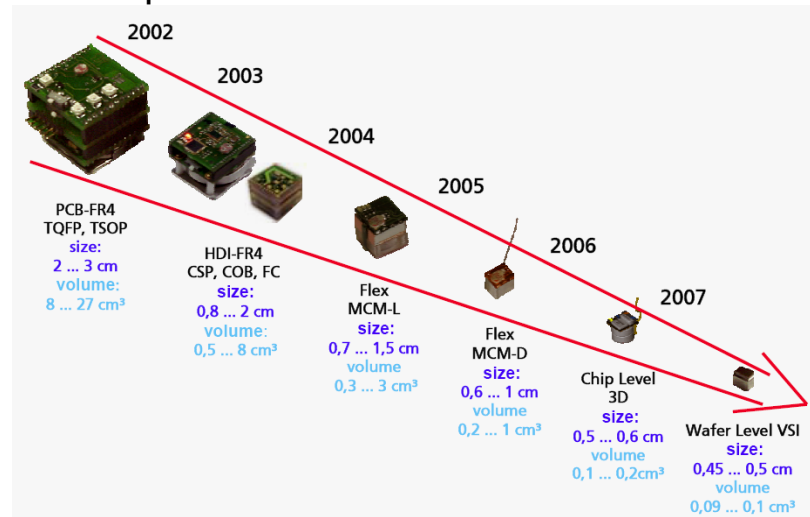
Das **Energiemanagement** ist von besonderer Bedeutung für AVMs, um die Energie-Autarkie zu gewährleisten, insbesondere bei geforderten langen Lebensdauern von AVMs, sowie bei einem hohen Anteil aktiver Betriebszustände (insbesondere bei geforderter kontinuierlicher Datenerfassung und -übertragung). Energiesparende Komponenten (Mikrocontroller, Sender/Empfänger), optimierter / reduzierter Datentransfer, Implementierung energiesparender Modi und energieoptimierte Software (z.B. das Betriebssystem TinyOS) sowie Übertragungsprotokolle ermöglichen im Zusammenspiel eine Reduktion des Energieverbrauchs der Einzelkomponente. Zur Energieversorgung sind bislang in kommerziellen Systemen nahezu ausschließlich Batterien im Einsatz, zukünftig spielen Energy Harvesting im Zusammenspiel mit wiederaufladbaren Batterien absehbar eine größere Rolle. Für sehr leistungsarme Module haben sich bereits photovoltaische Elemente bewährt. Allerdings ist die Verfügbarkeit solarer Energie in zahlreichen Anwendungsfeldern, z.B. der in-

dustriellen Automatisierungstechnik in geschlossenen Räumen problematisch. Thermoelektrische Wandler bieten interessante Perspektiven, sind aber hinsichtlich der Anwendbarkeit und des Leistungspotenzials eher noch eingeschränkt. Wenn es um höhere Leistungen im einstelligen Wattbereich ankommt, bieten elektrodynamische Prinzipien das größte Potenzial: Als primäre Energie können mechanische Bewegung oder fluidischer Druck herangezogen werden. Wenn Systeme bereits mit einem fluidischen Medium versorgt sind, bietet sich eine besonders hohe Energiedichte. Eine weitere Möglichkeit ist die Nutzung abströmender Gase oder Flüssigkeiten.¹¹

Grundsätzlich ist bei der Konzeptionierung von AVMs abzuwägen zwischen dem Energieverbrauch des Transceivers bei großer zu übertragender Datenmenge oder Verringerung der Datenmenge und Übertragungshäufigkeit durch – seinerseits für das Energiebudget relevanten – Zwischenspeicherung und/oder Datenprozessierung (Datenreduktion) im jeweiligen Sensorknoten.

Die Entwicklung der Aufbau- und Verbindungstechnik, d.h. der **Systemintegration**, mit dem Ziel der Miniaturisierung für einzelne AVM-Sensorknoten lässt sich anhand der Technologieroadmap für eGrains nachzeichnen.

Abbildung 2: eGrain-Roadmap¹²



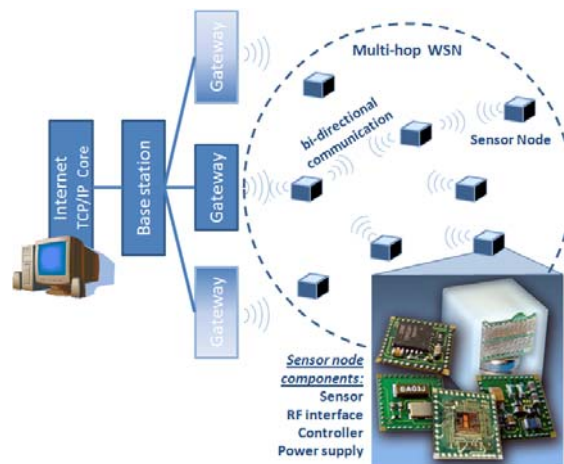
¹¹ Post, P.; Kärcher B. (Festo AG & Co. KG): „Erfahrungen bei der Entwicklung eines Drahtlosen Autonomen Sensornetzes für die Automatisierungstechnik“ in: Mikrosystemtechnik Kongress 2007, 15.-17. Oktober 2007, Dresden, VDE Verlag GmbH, Berlin / Offenbach

¹² Wolf, M. J.; Schacht, R.; Reichl, H.: The „eGrain“ Concept: Technologies for Wireless Sensor Networks, SEMICON 2006 und IMAPS 2006

Abbildung 2 stellt die Technologie-Roadmap seit den ersten Prototypen im Jahr 2002 dar: In der Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) erfordert die Miniaturisierung einen Technologiewechsel; ausgehend von High-Density Interconnect Aufbauten mit Chip Size Packages, Flip Chips oder Chip on Board Technologie auf starren Substraten ist ein Übergang zu Flex-Substraten erforderlich geworden. Weitere Miniaturisierungssprünge erfordern Prozesse auf Chip-Ebene (Konzepte des Wafer Level Packaging und System-on-Chip). Für Größen unterhalb von 0,1 cm³ ist die Vertical System Integration (mehrlagiger Aufbau von gedünnten integrierten Schaltkreisen mit Durchkontaktierungen) erforderlich. Jede dieser Aufbauvarianten erfordert eine eigene AVT. Im Prinzip sind die Technologien verfügbar, jedoch erfordern insbesondere technologische Aspekte der Systemintegration weitere Forschungsarbeiten.

Der bislang erreichte Miniaturisierungsgrad der Sensorknoten liegt für Massenprodukte im Bereich weniger Kubikzentimeter, Sensorknoten mit Kantenlängen im Millimeter-Bereich sind im Forschungs- und Entwicklungsstadium¹³.

Abbildung 3: Komponenten eines drahtlosen Sensornetzwerks autonomer verteilter Mikrosysteme¹⁴



Die **Vernetzung** von AVM-Komponenten kann in sehr unterschiedlicher Weise und extrem variierender Komplexität erfolgen; im einfachsten Fall kommuniziert ein drahtloses Sensornetzwerk über eine zentrale Basisstation. Mit weniger Infrastrukturaufwand kommen ad-hoc Netzwerke aus, in dem heterogene Sensorknoten sich selbst organisieren. Entwicklungsgegenstand für letztere sind

¹³ Niedermayer, M.; Thomasius, R.; Polityko, D.-D.; Schrank, K.; Hefer, J.; Guttowski, S.; Reichl, H.: Design for Miniaturization of Wireless Sensor Nodes Based on 3D Packaging, Smart Systems Integration 2007, 27.-28. Februar 2007, Paris

¹⁴ Beucker, S.; Clausen, J.; Schischke, K.; Mwanza, J.; Altendorf, P.; Reichl, H.: Wireless Sensor Networks for Agriculture and Automation: Challenges and Chances for Sustainability, Electronics Goes Green, 8.-10. September 2008, Berlin

derzeit u.a. Selbstheilungsmöglichkeiten des Netzwerks und energieoptimiertes Routing¹⁵.

Die Funkverbindung zwischen den Sensorknoten ist häufig der fehleranfälligste Systemaspekt¹⁶: Wesentliche Faktoren sind Funkinterferenzen, Änderungen der physikalischen Umweltbedingungen und damit ggf. Störung der Kommunikation, sowie der Ausfall einzelner Knoten.

Die Netzwerkfunktionalität wird üblicherweise realisiert über low-end Mikrocontroller. Neben dem Prozessorkern umfasst der Mikrocontroller Speicherkomponenten und Schnittstellen, sowie Zähler und Zeitgeber. Zahlreiche Mikrocontroller für drahtlose Sensornetze sind kommerziell verfügbar, z.B. von Texas Instruments, Atmel oder STMicroelectronics.

Für AVM Datenübertragungen gibt es eine Vielzahl von verschiedenen Medien, die benutzt werden können. Der Funk ist die bekannteste und meistgenutzte Medium. Funkübertragung benötigt keine direkte Sichtlinie zwischen den Sensorknoten und ist damit der erste Wahl. Mit geringem Energieaufwand und einer wenige Zentimeter langen Antenne lassen sich auch noch Knoten in mittlerer Entfernung erreichen. Der Energiebedarf der Datenübertragung ist ein limitierender Faktor für die Auslegung von AVM.

Wesentliche Faktoren sind:

- zu überbrückende Distanz
- gerichtete Abstrahlung
- Datenmenge / Datenrate / Funkstandard

Störungen treten bei funkbasierter Kommunikation durch alle Einflüsse auf, die auch normalen Funk stören und somit dieses Medium nicht zuverlässig machen.

Tabelle 1 zeigt die verschiedenen Funkstandards und ihre Eigenschaften.

¹⁵ Chalard, L.; Helal, D.; Verbaere, L.; Wellig, A.; Zory, J.: Wireless Sensor Networks Devices: Overview, Issues, State-of-the-Art and Promising Technologies, ST Journal of Research, Vol. 4, No. 1, 2007

¹⁶ Shear, R.: start:Building wireless sensor networks – Low-power, high-reliability augment inexpensive installation, DesignLine, 1. Juni 2007, www.industrialcontroldesignline.com

Tabelle 1: Übersicht Funkstandards¹⁷

	Funkstandard					
	EnOcean	Z-Wave / KNX-RF	ZigBee (802.15.4)	ZigBee (802.15.4)	Bluetooth (802.15.1)	WLAN (802.11)
Frequenz (MHz)	868	868	868	2400	2400	2400
Datenrate (KB/s)	125	9,6 / 20	20	250	720	11000- 54000
Minimale Telegrammlänge (ms)	0,6	20	30	4	0,7	n.a.
Energiebedarf (inkl. Start-up)	Extrem gering	gering	gering	gering	mittel	hoch
Grundbelastung Frequenzband	gering	gering	gering	hoch	hoch	hoch
Risiko einer Datenkollision ¹⁸	Sehr ge- ring	mittel	mittel	gering	Sehr ge- ring	hoch
Batterielose Funksender möglich?	ja	nein	nein	nein	nein	nein
Optimale Lösung für folgende Aufgaben	Wartungs- freie batte- rieloze Funksen- sorsysteme	batteriebe- triebene Funksen- sorsysteme	batteriebe- triebene Funksen- sorsysteme	batteriebe- triebene Funksen- sorsysteme	Computer- vernetzung mit Dru- ckern und PDA	Computer- vernetzung (Web, e- mail, Vi- deo)

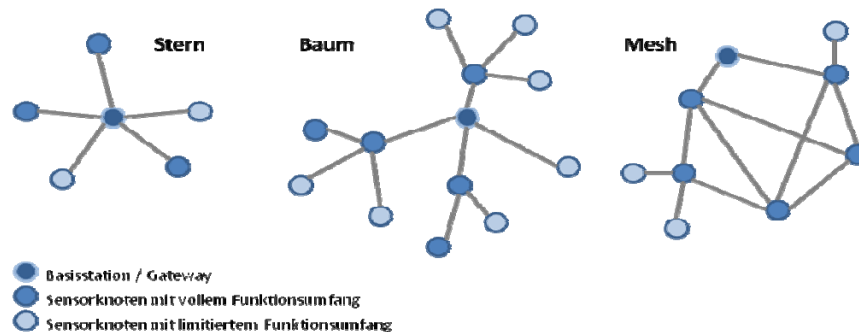
Die Sensorknoten untereinander können mit unterschiedlichen Topologien vernetzt sein. Abbildung 4 illustriert beispielhaft drei Topologien, bei denen sämtliche Sensorknoten direkt mit der Basisstation kommunizieren („Stern“), die Kommunikation über ausgewählte Knoten in einer verästelten Struktur erfolgt („Baum“), oder die Sensorknoten direkt untereinander vermascht kommunizieren und die Informationen von Knoten zu Knoten bis zur Basisstation weiterreichen („Mesh“). Gelegentlich wird ein „Mesh“ Netzwerk auch damit gleichgesetzt, dass alle Sensorknoten eines Netzwerks direkt untereinander kommunizieren können, die Reichweite jedes einzelnen Sensorknotens also das ganze Netzwerk umfassen muss – was unter energetischen Gesichtspunkten bei räumlich großen Netzwerken kritisch ist, z.B. für Anwendungen des Umweltmonitoring oder in der Landwirtschaft.¹⁹

¹⁷ A. Anders, F. Schmidt (EnOcean): Entscheidungshilfe Funkstandards – Welches Funksystem wann einsetzen?, perpetuum 10/2007

¹⁸ Überlagerung von Signalen und damit Datenverlust

¹⁹ Projekt µSWN: State of the Art & Technological Assessment, 16. November 2007

Abbildung 4: Netzwerktopologien Stern / Baum / Mesh



Unterschieden werden können²⁰

1. *Netzwerke ohne Hierarchieebenen*, bei denen alle Sensorknoten den gleichen Funktionalitätsumfang haben, und die Kommunikationspfade und -kanäle dementsprechend verteilt organisiert werden müssen, und
2. *hierarchische Netzwerke*, in denen einige Sensorknoten über einen erweiterten Funktionsumfang verfügen, und somit z.B. koordinierende Rollen im Netzwerk übernehmen

Weiterer Entwicklungsbedarf hinsichtlich Netzwerktechnologien umfasst entsprechend der Analyse des μ SWN-Projekts insbesondere:

- *Quality-of-Service-Aspekte*, insbesondere Echtzeitfähigkeit
- *Mobilität*: die meisten gängigen Netzwerkprotokolle gehen von stationären Sensorknoten und Basisstationen aus, Entwicklungsbedarf wird insbesondere darin gesehen, die Protokolle für mobile Sensorknoten weiterzuentwickeln (neue Routing-Algorithmen erforderlich)
- *Lokalisierung*: Ortsbestimmung von Sensorknoten, möglichst ohne kostspielige GPS-Lösung
- *Cross-layer Design*: Integrierter Ansatz zur Optimierung der unterschiedlichen Protokollayer u.a. für eine verbesserte Energieeffizienz
- *Anpassungsfähigkeit an wechselnde Netzwerkaufgaben*, z.B. von kontinuierlichem Monitoring zur Alarmauslösung

²⁰ Projekt μ SWN: State of the Art & Technological Assessment, 16. November 2007

- *Fernprogrammierung von Sensorknoten*, insbesondere über multi-hop-Netzwerke hinweg
- *Skalierbarkeit*, ist auch von Protokollen zu unterstützen
- *zeitliche Synchronisierung* der einzelnen Sensorknoten eines Netzwerks
- *Sicherheit*: Schutz vor Angriffen auf das Netzwerk oder einzelne Knoten

Hinsichtlich des **Entwicklungsstandes** von AVM-basierten drahtlosen Netzwerken ist das „Generationen-Modell“ der European Technology Platform on Smart Systems Integration teilweise übertragbar, siehe Abbildung 5: Derzeit vollzieht sich der Übergang von der ersten zur zweiten Generation AVM-basierter drahtloser Netzwerke. Vergleichsweise einfache Systeme der ersten Generation befinden sich seit geraumer Zeit in der breiten Anwendung, während für komplexe AVMs, die insbesondere auch das Kriterium der Selbstorganisation erfüllen, der breite Durchbruch am Markt noch nicht gegeben ist. In der 3. Generation werden AVMs eingebunden sein in das „Internet der Dinge“ (siehe 0 Einleitung).

Abbildung 5: Entwicklungsstufen AVM-basierter Systeme²¹

Entwicklungsstand	Anwendung / Charakteristika	Beispiele
1. Generation	Integriert, miniaturisiert, fortgeschrittene Funktionalität, ...	Reifendrucksensor
2. Generation	Implantierbare Komponenten, vorausschauende und reaktive Systeme, fortgeschrittenes Energiemanagement, ...	Zustandsmonitoring komplexer Anlagen
3. Generation	Vollständig autonom (hinsichtlich Selbstorganisation), Anpassung an Umgebung, ubiquitär vernetzt, kognitive Eigenschaften, ...	Autonome, interagierende Mikroroboter

1.3 Systematisierung von Sensornetzwerken

Die Vielzahl möglicher und teilweise schon realisierter Einsatzzwecke von autonomen Sensornetzwerken bedeuten gleichzeitig eine vielfältige Ausprägung und Charakteristik dieser Netzwerke. Als Ergebnis eines Workshops²² haben

²¹ angepasst nach: EPoSS: Strategic Research Agenda 2009, EPoSS Office / VDI/VDE-IT, Berlin

²² Exploratory Workshop on Wireless Sensor Networks, April 2004, gefördert der European Science Foundation, durchgeführt von der ETH Zürich

Römer und Mattern eine Klassifizierung von Sensornetzwerken vorgeschlagen²³, siehe Tabelle 2.

Tabelle 2: Klassifizierung von Sensornetzwerken²⁴

Merkmal	Ausprägungen	Erläuterung	
Räumliche Platzierung der Sensorknoten	zufällige Platzierung	„ausstreuen“, freie Verteilung	
	ausgewählte Platzierung	Gezielte Platzierung z.B. zur exakten räumlichen Zuordnung von Messwerten	
Zeitliche Platzierung der Sensorknoten	einmalige Platzierung	Sensornetz wird erst vollständig aufgebaut, dann betrieben	
	kontinuierliche Platzierung	Erweiterung eines Sensornetzes, Einbindung zusätzlicher Knoten	
Mobilität	stationär		
	mobil	Mobile Sensorknoten	Teilmenge
			Gesamtheit
		Geschwindigkeit der Knoten	Einfluss auf Auslegung bzgl. Verbindungszeiten und Übertragungsgeschwindigkeit
		Häufigkeit der Bewegung	gelegentlich
			kontinuierlich
	Antrieb	aktiv passiv	Eigene Antriebsmöglichkeit: automatisch, autonom oder ferngesteuert Mobilität durch Umweltbedingungen oder durch Befestigung an mobilen Objekten
Größe der Sensorknoten	„Ziegelstein“		
	„Streichholzschachtel“		
	„Getreidekorn“		
	„Staubkorn“		
Energieversorgung	Batterie		
	regenerative Energie	„Energy Harvesting“	
Heterogenität	homogenes Netz	Gleichartige Sensorknoten	
	heterogenes Netz	Netz besteht aus Knoten mit unterschiedlichen Aufgaben / Funktionalitäten (Hardware und Software); hierarchisch	
Kommunikationsart	Funk		
	Licht		
	Induktion		
	Kapazität		
	(Ultra)Schall		
Infrastruktur	Nutzung vorhandener Infrastruktur	Kommunikation läuft über Basistation(en)	
	ad hoc Infrastruktur	Sensorknoten können direkt miteinander kommunizieren	
Netzwerktopologie	Single-hop	Jeder Knoten kann mit jedem anderen direkt kommunizieren	

²³ Römer, K.; Mattern, F.: The Design Space of Wireless Sensor Networks, in: IEEE Wireless Communications, Volume 11, Issue 6, pp. 54-61, IEEE, Dezember 2004; siehe auch: T. Tenbusch: Anwendungsszenarien für Sensornetze, Freie Universität Berlin, Technische Informatik, Sommersemester 2007

²⁴ Nach Römer und Mattern mit eigenen Ergänzungen

Merkmal	Ausprägungen	Erläuterung
	Stern	Kommunikation über eine Basisstation
	Sternnetzwerk	Netzwerk verfügt über mehrere Basisstationen
	Baum	Multi-hop Signalübertragung über verästelte Struktur
	Graph	Signal wird von Knoten zu Knoten weitergereicht
	Mesh	Signal wird von Knoten zu Knoten weitergereicht, Kommunikation mit mehreren benachbarten Knoten
Sensorabdeckung	lückenhaft	Sensorik erfasst nur einzelne Meßpunkte im überwachten Gebiet
	vollständig	Sensorik erfasst das überwachte Gebiet vollständig
	redundant	Messgebiete einzelner Sensoren überdecken sich (Ausfallsicherheit, Datenabgleich)
Konnektivität	ständige Verbindung	Verbindung der Knoten jederzeit gegeben
	zeitweise	Knotenpartition tritt nur zeitweilig mit dem Netz in Verbindung (z.B. zeitweilig außer Funkweite)
	sporadisch	Knoten ist meiste Zeit nicht in Kontakt mit dem Netzwerk
Netzwerkgröße		Wenige Knoten bis zu mehreren tausend und darüber
Lebensdauer		Wenige Stunden bis mehrere Jahre
Weitere Quality-of-Service Aspekte	z.B. Datenübertragung in Echtzeit, Robustheit gegenüber definierten Fehlern / Ausfallsicherheit, Sicherung gegenüber Sabotage und Manipulation, Datensicherheit	

Diese Systematisierung wird nachfolgend zur technischen Charakterisierung ausgewählter Anwendungsfelder in Form von „Steckbriefen“ angewandt.

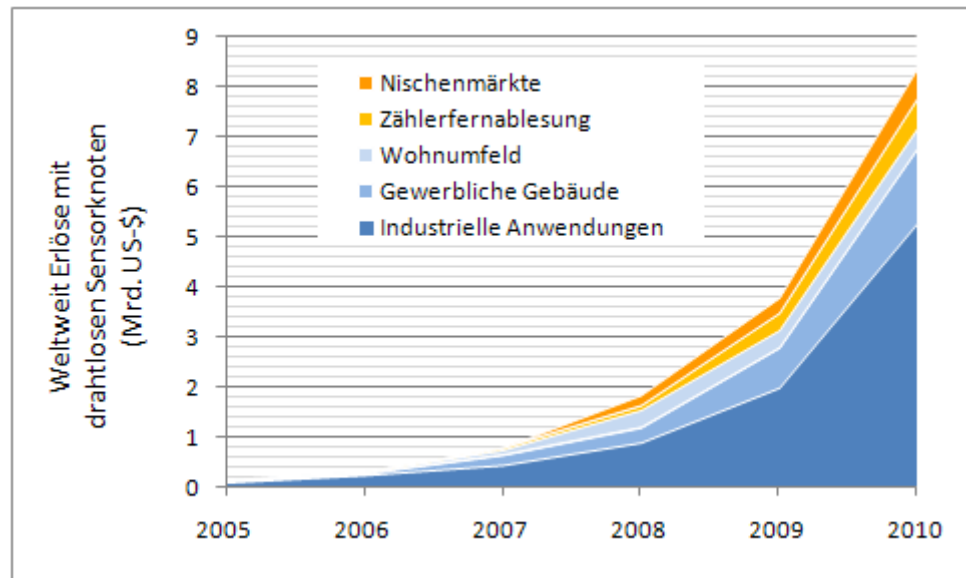
1.4 Kurzbeschreibungen der Anwendungsfelder

Drahtlose Sensornetze kommen bereits heute in zahlreichen Anwendungen zum Einsatz, vielfach jedoch bislang nur in einem Versuchs- oder Pilotstadium. Für den Bereich industrieller Anwendungen ist bereits eine signifikante Marktgröße erreicht, mit prognostizierten 2- bis 3-stelligen Zuwachsraten (siehe Abbildung 6): 2005 wurde für 2010 bereits eine Marktgröße von über 8 Mrd. US-\$ und knapp 500 Mio.²⁵ Sensorknoten weltweit prognostiziert. Es bleibt jedoch festzuhalten, dass neuere Prognosen von einem deutlich geringeren Wachstum ausgehen, und für 2010 eher Stückzahlen im einstelligen Millionenbereich zu erwarten sind²⁶. Die aktuelle Wirtschaftskrise trägt absehbar zu einer weiteren Verlangsamung des Wachstums bei.

²⁵ Anders, A. (enOcean): Digital Networks for the Future – Wireless Sensors / Actuators / Controls, Juli 2007, Bezug auf: OnWorld Marktbericht vom Februar 2004

²⁶ ON World Inc.: WSN for Smart Industries, September 2007

Abbildung 6: Wirtschaftliche Relevanz des Marktes für Sensorknoten nach Anwendungsbereichen (Prognose 2005)²⁷



Grundsätzlich können militärische und zivile Anwendungen unterschieden werden. Die Anforderungen an AVM sind jedoch nur bedingt vergleichbar. So ist bei militärischen Anwendungen häufig die „Unsichtbarkeit“ der Sensorknoten eine Schlüsselanforderung, Hauptfunktion ist meistens die Ortung von Personen oder militärischem Gerät. Auch sind die ökonomischen Rahmenbedingungen für militärische Anwendungen in der Regel andere als im zivilen Bereich. Diese Innovations- und Technikanalyse legt den Schwerpunkt auf zivile Anwendungen; militärische Anwendungsbereiche seien hier lediglich kurz mit weiterführenden Quellenangaben aufgelistet:

- Ortung militärischer Fahrzeuge über ausgestreute Sensorknoten, die in Kontakt stehen zu einer unbemannten Drohne²⁸
- Selbstheilendes Minenfeld, um eine zuverlässige Abdeckung eines Gebiets mit Minen zu gewährleisten; bei Ausfall oder Sabotage einzelner Minen füllen mobile, raketengetriebene Minen die auftretenden Lücken²⁹

²⁷ Basierend auf einer Marktprognose von ON World 2005 (veröffentlicht in: B. Hurley: Strategy in Ireland for SME, MNC and Academic Teams in the Realisation of WSN Deployments, AIC Energy and Materials Workshop, 30. Juni 2006, Dublin)

²⁸ The 29 Palms Experiment: Tracking vehicles with a UAV-delivered sensor network;
<http://robotics.eecs.berkeley.edu/~pister/29Palms0103/>

²⁹ Meriall, W.M. et al.: Collaborative Networking Requirements for Unattended Ground Sensor Systems, in: Proc. IEEE Aerospace Conference, März 2003

- Ortung von Heckenschützen: Lokalisierung von Schallwellen (Richtung und Entfernung zu den Sensorknoten)³⁰

Zivile Anwendungsfelder umfassen unter anderem:

- Umweltmonitoring (Klima, Tiere, Schadstoffe etc.)
- Öffentliche Infrastruktur (Wasser, Abwasser, Energie etc.)
- Landwirtschaft
- Automobil
- Automatisierungstechnik und Prozesssteuerung
- Logistik
- Katastrophenschutz
- Arbeits- und Prozesssicherheit
- Medizintechnik

Nachfolgend werden diese Anwendungsfelder kurz beschrieben und charakterisiert, um die Bandbreite des Einsatzes von autonomen verteilten Mikrosystemen zu verdeutlichen. Exemplarische Pilotanwendungen oder denkbare zukünftige Einsatzszenarien werden konkretisiert. Die Systematisierung erfolgt in Form von „Steckbriefen“.

1.4.1 Umweltmonitoring

Bereits zu Forschungszwecken realisiert sind AVM-Anwendungen für das **Habitat / Wildlife Monitoring**: Im Projekt ZebraNet³¹ werden im Mpala Nationalpark in Kenia Wildtiere mit Sensorknoten bestückt, um deren Verhalten zu erforschen. Durch GPS-Empfänger kann die Position der Tiere ermittelt werden. Die Sensoren erfassen, ob das Tier läuft, rennt, grast oder mit anderen Tieren interagiert. Wetterbedingungen werden ebenfalls sensorisch erfasst. In regelmäßigen Abständen wird per Auto oder Flugzeug eine mobile Basisstation durch den Nationalpark bewegt, diese sammelt Daten von allen Knoten ein, die es passiert. Die Sensordaten werden alle drei Minuten erfasst und gespeichert.

³⁰ Simon, G.; Ledezczi, A.; Maroti M.: Sensor Network-Based Countersniper System, in: Proc. SenSys, Baltimore, USA, November 2004

³¹ Wang, Y.; Zhang, P.; Liu, T.; Sadler, C.; Martonosi, M.: Movement Data Traces from Princeton ZebraNet Deployments, CRAWDDAD Database, 2007

Wenn zwei Sensorknoten innerhalb der Funkreichweite sind, tauschen diese ihre Daten komplett aus. So können Daten über mehrere Partitionen, in diesem Fall Herden, weitergeleitet werden. 2004 wurden erstmals Zebras mit Sensorknoten ausgerüstet^{32,33,34}.

Das bislang wahrscheinlich größte Sensornetzwerk dient der **Überwachung der Meeresumwelt** (ARGO: Global Ocean Sensor Network): Gemessen werden Temperatur, Salzgehalt und Wellengang. Sensoren werden auf Bojen einzeln über die Weltmeere verteilt, dabei wird grob ein Raster von 300 km voneinander eingehalten. Das Ziel ist eine kartografische Erfassung des Wellengangs, sowie der Warm- und Kaltwasserströmungen.

Selavo et al. beschreiben den größten Vorteil drahtloser Sensornetze in der Umweltforschung mit der Möglichkeit, ein „Makroskop“³⁵ aufzubauen, mit dem großflächige Zustände und Veränderungen erforscht werden können. Das Projekt LUSTER („**Licht unter bodenbedeckender Vegetation** für die Umweltforschung“) der University of Virginia entwickelt ein Sensornetzwerk zum Monitoring der Auswirkungen des Sonnenlichts auf die Vegetation – vor dem Hintergrund einer zunehmenden Überwucherung von Grasland durch Sträucher weltweit –, und ist nach Aussage von Selavo et al. auch übertragbar auf Parameter wie CO₂-Konzentration, Luft- und Bodenfeuchte etc. Das LUSTER-Netzwerk ist in drei Ebenen aufgebaut, bestehend auf der ersten Ebene aus den Sensorknoten, die Umweltdaten aufnehmen, und unidirektional an die zweite Ebene weitergeben. Die zweite Ebene besteht wiederum aus Sensorknoten, die für die Datenspeicherung zuständig sind: Die erste Ebene wird somit aus Gründen der Energielimitierung von der Aufgabe der Datenspeicherung entbunden. Um die Ausfallsicherheit zu erhöhen, wird jeder Sensorknoten der ersten Ebene von zwei Datenspeicherungsknoten abgedeckt. Die dritte Ebene bilden Basisstationen, die als Gateway zum Netz fungieren.

Das europäische μ SWN benennt zahlreiche weitere Einsatzszenarien, wie die Erfassung **meteorologischer Daten** für die Wettervorhersage, Vorhersage von Überflutungen, Dürren und tropischen Stürmen, **geologisches Monitoring** zur Vorhersage von Erdbeben und Tsunamis, aber auch für das **Monitoring von Emissionen** (Luft, Wasser, Lärm, Abfall)³⁶.

³² <http://www.princeton.edu/~mrm/zebranet.html>

³³ Cerpa, A., Elson, J., Estrin, D., Girod, L., Hamilton, M., and Zhao, J. Habitat monitoring: application driver for wireless communication technology. In Proceedings of the ACM Sigcomm Workshop on Data Communication (San Jose, Costa Rica, April 2001).

³⁴ Sadler, C., Zhang, P., Martonosi, M., and Lyon, S. Hardware design experiences in ZebraNet. In Proceedings of the Second ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (Baltimore, MD, Nov. 2004).

³⁵ Selavo, L.; Wood, A.; Cao, Q. et al.: LUSTER: Wireless Sensor Network for Environmental Research, SenSys'07, 6.-9. November 2007, Sydney

³⁶ Projekt μ SWN: Clustering Classification of Application Scenarios, 16. November 2007

Als besondere Herausforderung an drahtlose Sensornetzwerke im Bereich der Umweltforschung werden benannt³⁷:

- Raue Umgebungsbedingungen
- Uneingeschränkte Funktionsfähigkeit über mehrere Monate (Sensor-knoten üblicherweise an schwer zugänglichen Stellen)
- Fehlertoleranz (insbesondere beim Ausfall einzelner Komponenten)

Tabelle 3: Steckbrief Umweltmonitoring

1. Anwendungsfeld / Rahmenbedingungen	
Bezeichnung	Umweltmonitoring
Kurzbeschreibung	Überwachung von Flora, Fauna, Klima (in der Regel zu Forschungszwecken)
Konkurrierende Systeme	-
Erwarteter Nutzen	Forschungsergebnisse durch neue technische Möglichkeiten, z.B. kontinuierliches Monitoring von Tieren mit oder ohne Lokalisierung, Messdatenerfassung an schwer zugänglichen Orten
Ökonomische Randbedingungen	Zahlungsbereitschaft (moderat bis hoch) hängt von erwartetem Nutzen der Forschung ab, aber da an die individuelle Forschungsaufgabe angepasste Konfigurationen der Sensornetzwerke erforderlich sind, ist grundsätzlich von vergleichsweise hohen Kosten für Konfigurierung auszugehen.
Messgrößen (Sensorik)	Umweltbedingungen: Temperatur, chemische Zusammensetzung (z.B. Wasseranalytik) Tiermedizinische Parameter
2. Anwendungsreife	
mehrere Pilotanwendungen im Einsatz, vereinzelt auch als dauerhaftes System (z.B. ARGO)	
3. Systematisierung	
Merkmal	Anforderungen des Anwendungsfelds
Räumliche Platzierung der Sensorknoten	ausgewählte Platzierung (auch bei z.B. Wetterdatenerfassung mit mobilen Systemen ist i.d.R. Lokalisierung erforderlich)
Zeitliche Platzierung der Sensorknoten	kontinuierliche Platzierung
Mobilität	Mobile Sensorknoten (i.d.R. passiv: Strömung oder befestigt an Tieren), ggf. auch mobile Datenauslese
Größe der Sensorknoten	Gesamtes Spektrum: größer als „Ziegelstein“ (Bojen) bis „Getreidekorn“ (Insekten); Miniaturisierungsdruck hängt bei der Tierbeobachtung maßgeblich von der Tiergröße ab

³⁷ Selavo, L.; Wood, A.; Cao, Q. et al.: LUSTER: Wireless Sensor Network for Environmental Research, SenSys'07, 6.-9. November 2007, Sydney

Energieversorgung	Batterie, solar oder Umgebungsenergie (Bewegung, Strömung, Temperaturdifferenzen)	
Heterogenität	überwiegend homogene Netze (auf der Ebene der Sensorknoten)	
Kommunikationsart	Funk, ggf. Schall im Wasser	
Infrastruktur	Je nach Aufgabe Benutzung vorhandener Infrastruktur (z.B. Satelliten) oder ad hoc (Datenweitergabe über an sich begegnenden Tieren befestigten Sensorknoten)	
Netzwerktopologie	Stern / Sternnetzwerk	
Sensorabdeckung	lückenhaft	
Konnektivität	sporadische Verbindung meistens ausreichend	
Netzwerkgröße	Wenige dutzend bis wenige hundert	
Lebensdauer	Mehrere Jahre	
Weitere Quality-of-Service Aspekte	-	
4. Chancen und Risiken		
	Chancen / Verbesserungspotenzial gegenüber etablierten Technologien	Risiken
Ökologische Aspekte	Verbesserung der Umweltforschung	Ausbringung von Elektronik in der Umwelt (Rückholbarkeit im Einzelfall kritisch)
Soziale Aspekte / Akzeptanz / Datensicherheit	Chancen einer nachhaltigeren Nutzung natürlicher Ressourcen	Kann umfassendere Ausbeutung natürlicher Ressourcen (Lebensgrundlagen) zur Folge haben
5. Zukunftspotenzial der Anwendung und weiterer grundsätzlicher Entwicklungsbedarf		
Anwendungen in der Umweltforschung sind wesentliche Treiber für die AVM-Entwicklung		

1.4.2 Öffentliche Infrastruktur

Im Bereich der öffentlichen Infrastruktur zeichnet sich ein breites Einsatzspektrum für AVM ab. Nachfolgend werden die beiden Teilbereiche Siedlungswasserwirtschaft und Energieversorgung detaillierter analysiert, darüber hinaus bestehen aber auch weitere Einsatzmöglichkeiten, wie die Parkraumbewirtschaftung³⁸ oder das Gebäudemanagement öffentlicher Einrichtungen.

³⁸ Vermesan, O.: Smart Wireless Identifiable Systems - Connecting the real, virtual and digital worlds, EPoSS Annual Forum 2008, 1.-2. Oktober 2008, Juan-les-Pins, Antibes, Frankreich

1.4.2.1 Siedlungswasserwirtschaft

In der Siedlungswasserwirtschaft bieten sich zahlreiche Einsatzzwecke für AVM an, jedoch ist ein Einsatz bislang nur in einem bekannten Fall realisiert³⁹.

Im Bereich der **Trinkwasserversorgung** ist insbesondere eine Überwachung des Verteilnetzes von Bedeutung: Problematisch sind Rohrbrüche, verbunden auch mit Fremdwassereintrüben. Ein verteiltes Netz von Sensoren, die in die Verteilleitungen eingebracht werden und z.B. das Redox-Potenzial messen, könnte dazu dienen, Fremdwassereintrüben zu detektieren und zu lokalisieren. Für das Berliner Trinkwassernetz wäre beispielsweise eine Anzahl von 100 bis 500 solcher Messstellen hilfreich. Ein anderer Ansatz sind Drucksensoren, die Druckabfälle anzeigen und damit auf Rohrbrüche hinweisen. Derartige Konzepte können einerseits den Verlust von Trinkwasser durch (unerkannte) Leckagen minimieren und des weiteren zu einer hohen Versorgungssicherheit mit qualitativ einwandfreiem Trinkwasser beitragen. Vom Fraunhofer ISIT sind gemeinschaftlich mit Sensordynamics silizium-basierte Sensoren zur Erfassung der Strömungsgeschwindigkeit und der Durchflussmenge für die Trinkwasserversorgung in Pisa, Italien, entwickelt worden. Beziffert werden die Kosten mit 50-100 Euro pro Sensoreinheit. Die gegenwärtig eingesetzten Prototypen haben eine Standzeit von „mehreren Monaten“, insbesondere Kalkablagerungen und Korrosion sind problematisch⁴⁰. Im Versuchsstadium werden die Daten über einen Laptop ausgelesen, in einer späteren Ausbaustufe ist die funkbasierte Datenübermittlung denkbar.

Fremdwassereintrüben sind insbesondere hinsichtlich der Verunreinigung mit und der Verbreitung von Krankheitserregern kritisch – umso mehr in Versorgungsnetzen, die ohne Chlorung auskommen (z.B. Berlin). In tropischen Gegenden ist die Kontamination mit Krankheitserregern potenziell kritischer einzuschätzen als in gemäßigten Breiten (Vermehrung von Krankheitserregern), jedoch wird in den betreffenden Gebieten in der Regel ohnehin gechlort, was der Verbreitung vorbeugt.

Grundsätzlich kritisch wird die Einbringung jedweder Materialien – dies schließt die Sensorik ein - in das Trinkwassernetz gesehen, weil diese potenzielle Kontaminationsquellen darstellen. Ebenso ist die Wartung ein kritischer Aspekt, wenn dabei Trinkwasserleitungen geöffnet werden müssen mit anschließendem aufwändigem Verschluss, um Kontaminationsfreiheit zu gewährleisten. Drahtlose Kommunikation ist unter diesem Aspekt vorteilhaft zu sehen, gege-

³⁹ Die nachfolgenden potenziellen Einsatzfelder sind – soweit nicht anders angegeben - im Rahmen der 16. Berliner Wasserwerkstatt, 4. Dezember 2007, benannt und diskutiert worden. Referenten: Dr. Heinze (VDI/VDE-IT), Dr. Hartwig (VDI/VDE-IT), Prof. Barjenbruch (TU Berlin)

⁴⁰ Tracking down leaks, Fraunhofer magazine 2.2008, S. 46f.

benenfalls redundant besetzte Messstellen können den Wartungsaufwand verringern.

Eine weitere prinzipielle Einsatzmöglichkeit ist die Durchflussmessung zur verbrauchsgerechten Abrechnung, sofern ein drahtlose Sensorik die aufwändige Installation von Wasseruhren ersetzen kann. Eine funkbasierte Übertragung der Verbrauchsdaten ermöglicht eine Abrechnung in kürzerem Turnus. Neben der Verbrauchsabrechnung je Wohneinheit ist auch der „intelligente Wasserhahn“ denkbar, d.h. die noch detailliertere Erfassung von Verbräuchen innerhalb von Haushalten – oder bei gewerblichen Nutzern -, um eine Transparenz für Verbräuche zu schaffen, mit dem Anreiz den Trinkwasserverbrauch zu minimieren.

Im **Abwassernetz** bieten sich insbesondere zwei Einsatzzwecke für Sensornetzwerke an: Zum einen die Überwachung von Einleitungen, zum anderen die Detektion von Korrosion im Kanalnetz. Eine kostengünstiges, universelles, funkbasiertes Messnetz wäre die Voraussetzung für eine bessere Überwachung von Indirekteinleitern, jedoch ist kein großer Handlungsdruck zu konstatieren. Die Vermeidung von Leckagen des Kanalnetzes, die üblicherweise je nach Ausmaß längere Zeit unentdeckt bleiben können, ist dagegen von erheblichem Interesse: In Entwicklung ist bereits das Eingießen von pH-Sensoren in den Beton von Abwasserkanälen, um Leckagen zu detektieren⁴¹.

Schwefelwasserstoffemissionen aus der Kanalisation sind aufgrund der Geruchsbelästigung und auch wegen der Korrosionsgefahr kritisch. Die „Detektion“ kritischer Stellen in der Kanalisation erfolgt üblicherweise durch Anwohnerbeschwerden. Als Gegenmaßnahme werden Chemikalien in den Abwasserstrom dosiert. Zur Kontrolle sind H₂S-Sensoren bereits im Einsatz; funkbasierte Onlinemessungen können eine zielgerichtete Dosierung der Chemikalien steuern.

In Boston wurde im Rahmen des Projekts PIPENET^{42, 43} das Trinkwasser- und Abwassernetz in einem Pilotversuch seit 2004 überwacht: Schall- und Vibrationsmessungen dienen als Indikator für kleinere Leckagen, so dass größeren Rohrbrüchen rechtzeitig begegnet werden kann. Druckunterschiede und Abweichungen in der Fließgeschwindigkeit können direkt größere Leckagen und Probleme z.B. in Pumpstationen anzeigen und lokalisieren helfen. Die Sensorknoten beruhen auf Entwicklungen von Intel und werden mittels Batterien versorgt.

⁴¹ Gemeinschaftsprojekt von MBF, MPA, BAM

⁴² Stoianov, I.; Nachman, L.; Madden, S.; Tokmouline, T.: PIPENET: A Wireless Sensor Network for Pipeline Monitoring, IPSN '07, 25.-27. April 2007, Cambridge, MA

⁴³ Stoianov, I.; Nachman, L.; Whittle, A.; Madden, S.; Kling, R.: Sensor Networks for Monitoring and Watter Supply Systems: Lessons from Boston, WDSA Water Distribution System Analysis Symposium, 27.-30. August 2006, Cincinnati, OH

In der kommunalen **Abwasserreinigung** wird zur Analytik und Prozesssteuerung vielfach bereits Sensorik eingesetzt, jedoch ortsfest. Mess- und Regeltechnik findet Einsatz insbesondere in der Nitrifikations-/Denitrifikationsstufe und der Phosphateliminierung. In der Regel erfolgt eine Prozesssteuerung über die Kontrolle von Ablaufwerten. Grundsätzlich kritisch ist die Wartung von Sensorik im Bereich der biologischen Abwasserreinigung aufgrund der Gefahr des Aufwuchses von Mikroorganismen auf den Messeinrichtungen (Langzeitstabilität). Auch wenn grundsätzlich eine funkbasierte kleinräumige Analytik wünschenswert ist, so sind häufige Wartungszyklen nicht akzeptabel.

Grundsätzliche Anforderungen an Mess- und Regeltechnik im Abwasserbereich umfassen

- Robustheit
- Geringe Störanfälligkeit
- Verstopfungs- und Verzopfungsfreiheit
- Hohe Verfügbarkeit
- Einfache Bedienbarkeit

Tabelle 4: Steckbrief Siedlungswasserwirtschaft

1. Anwendungsfeld / Rahmenbedingungen	
Bezeichnung	Siedlungswasserwirtschaft
Kurzbeschreibung	Überwachung von Trinkwasser- und Abwassernetzen und Prozessen der Siedlungswasserwirtschaft (Klärwerkstechnik)
Konkurrierende Systeme	Leistungsgebundene Sensorik, sporadische Messungen
Erwarteter Nutzen	Frühzeitige Detektion von Leckagen, verursachergerechte Verbrauchsmessungen, Verbesserung von Klärwerksprozessen (Verringerung von Schadstoffausträgen)
Ökonomische Randbedingungen	Zahlungsbereitschaft: moderat; abhängig von den vermiedenen Folgekosten von z.B. Fremdwassereinbrüchen
Messgrößen (Sensorik)	Druck, Strömung / Durchflussmenge, Wasserstandshöhe pH-Wert, Leitfähigkeit Prozessparameter der Klärwerkstechnik: Konzentration von Stickstoffverbindungen
2. Anwendungsreife	
eine Pilotanwendung (Pipenet), ansonsten bislang keine detaillierten Anwendungskonzepte	
3. Systematisierung	
Merkmal	Anforderungen des Anwendungsfelds
Räumliche Platzierung der Sensorknoten	ausgewählte Platzierung

Zeitliche Platzierung der Sensorknoten	einmalige Platzierung	
Mobilität	Stationär; mobile Sensorknoten denkbar in der Klärwerkstechnik	
Größe der Sensorknoten	„Ziegelstein“ (Netzüberwachung) bis „Streichholzschachtel“ (intelligenter Wasserhahn)	
Energieversorgung	Batterie oder Umgebungsenergie (Bewegung, Strömung, Temperaturdifferenzen)	
Heterogenität	überwiegend homogene Netze (auf der Ebene der Sensorknoten)	
Kommunikationsart	Funk, ggf. Schall im Wasser	
Infrastruktur	vorhandene Infrastruktur oder ad hoc	
Netzwerktopologie	Stern / Sternnetzwerk, Baum, Graph	
Sensorabdeckung	lückenhaft	
Konnektivität	sporadische Verbindung meistens ausreichend	
Netzwerkgröße	Wenige dutzend bis wenige hundert, bei „intelligenten Wasserhähnen“ mehrere Millionen	
Lebensdauer	Mehrere Jahre	
Weitere Quality-of-Service Aspekte	Materialien müssen qualifiziert sein für den Kontakt mit Trinkwasser	
4. Chancen und Risiken		
	Chancen / Verbesserungspotenzial gegenüber etablierten Technologien	Risiken
Ökologische Aspekte	Verbesserung der Trinkwasserversorgung, Optimierung der Abwasserbehandlung, Identifizierung von Schadstoffeinleitungen	Potenziell Einbringung kritischer Materialien in die Versorgungsnetze
Soziale Aspekte / Akzeptanz / Datensicherheit	Verbesserung der Trinkwasserqualität	Potenziell personen- / haushaltsbezogene Daten zu Trinkwasserverbrauch und Abwasseraufkommen (und –zusammensetzung)
5. Zukunftspotenzial der Anwendung und weiterer grundsätzlicher Entwicklungsbedarf		
Breites Anwendungsfeld, potenzieller Vorteil gegenüber bestehenden Alternativen ist in der Praxis nachzuweisen Ca. 400.000 km Trinkwasserversorgungsnetz in Deutschland – entsprechendes Potential für Sensorknoten bei ausreichend dichter Vernetzung (<1 km Abstand erforderlich für hinreichend genaue Ortung von Leckagen)		

1.4.2.2 Energieversorgung

Öl- und Gasfördereinrichtungen und Pipelines werden bereits mit drahtlosen Sensornetzwerken überwacht, bzw. von zahlreichen Energieunternehmen derzeit erprobt: Eine 2005 publizierte Marktstudie ermittelte bereits einen brei-

ten Einsatz drahtloser Systeme für die Fernüberwachung von Pipelines und Bohrlöchern⁴⁴. Bis auf eine einzige Ausnahme setzten demnach alle großen Unternehmen der Gas- und Ölbranche zu diesem Zeitpunkt bereits drahtlose Sensornetzwerke zumindest im Rahmen von Pilotanwendungen ein.

Nach Erfahrungen von Shell eignen sich Satelliten- oder Radio-gestützte Systeme für die Fernüberwachung in entlegenen Gebieten (Beispiel: Nigeria) nicht. Von miniaturisierten Lösungen für Sensornetzwerke verspricht man sich insbesondere folgende Vorteile, bzw. stellt folgende Anforderungen⁴⁵:

- Kleine Bauformen ziehen weniger Aufmerksamkeit auf sich (Diebstahl, Sabotage)
- Verzicht auf Solarpanele (stattdessen: verbrauchoptimiert und batteriebetrieben)
- 4-5 Meilen Entfernung zwischen Sensorknoten und entsprechende Übertragungreichweite (dichter Regenwald)

Messgrößen dieser Anwendung sind Temperatur, Druck und Durchfluss.

Tabelle 5: Steckbrief Energieversorgung

1. Anwendungsfeld / Rahmenbedingungen	
Bezeichnung	Energieversorgung
Kurzbeschreibung	Monitoring der Öl- und Gasexplorationsinfrastruktur
Konkurrierende Systeme	Kontrollen vor Ort, Begehung
Erwarteter Nutzen	Produktivitätssteigerung
Ökonomische Randbedingungen	Hohe Zahlungsbereitschaft aufgrund kurzer Amortisationszeiten
Messgrößen (Sensorik)	Öl- und Gasexplorationsinfrastruktur: Temperatur, Druck, Durchfluss
2. Anwendungsreife	
Breite Anwendung in der Gas- und Ölförderung bereits etabliert	
3. Systematisierung	
Merkmal	Anforderungen des Anwendungsfelds
Räumliche Platzierung der Sensorknoten	ausgewählte Platzierung

⁴⁴ On World: Wireless Sensor Networks for the Oil & Gas Industry, veröffentlicht 11. Oktober 2005

⁴⁵ Fasasi, T.; Maynard, D.; Nasr, H.; Patwari, R.; Mashetti, S.: Wireless sensors remotely monitor wells in Nigeria swamps, OIL & GAS JOURNAL, PennWell, 9. Mai 2005

Zeitliche Platzierung der Sensorknoten	einmalige Platzierung	
Mobilität	stationär	
Größe der Sensorknoten	„Ziegelstein“ bis „Streichholzschachtel“	
Energieversorgung	Batterie	
Heterogenität	homogenes Netz	
Kommunikationsart	Funk	
Infrastruktur	Nutzung vorhandener Infrastruktur	
Netzwerktopologie	Stern / Sternnetzwerk	
Sensorabdeckung	lückenhaft	
Konnektivität	zeitweise	
Netzwerkgröße	Mehrere dutzend	
Lebensdauer	Mehrere Jahre	
Weitere Quality-of-Service Aspekte	Sicherung gegenüber Sabotage und Manipulation	
4. Chancen und Risiken		
	Chancen / Verbesserungspotenzial gegenüber etablierten Technologien	Risiken
Ökologische Aspekte	Frühzeitige Detektion von Leckagen in der Gas- und Ölversorgungsinfrastruktur Effizientere Nutzung von Öl- und Gasvorkommen	Reboundeffekt: Bessere Verfügbarkeit von Öl und Gas ist Anreiz für erhöhten Verbrauch fossiler Brennstoffe
Soziale Aspekte / Akzeptanz / Datensicherheit	Detektion des illegalen Anzapfens von Pipelines (hohes Explosionsrisiko)	-
5. Zukunftspotenzial der Anwendung und weiterer grundsätzlicher Entwicklungsbedarf		
Gegenwärtig schnelles Marktwachstum, Etablierung als Standardtechnologie		

1.4.3 Bauwerksmonitoring

Der fortlaufenden Überwachung von Bauwerken mittels geeigneter Technologien kommt insbesondere im Zusammenhang mit Anforderungen an deren Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit eine große Bedeutung zu. Bisher wird vereinzelt eine Technik angewandt, bei der eine Vielzahl von charakteristischen

Kennwerten mit konventioneller Sensorik erfasst und ausgewertet wird. Zu diesen Kennwerten gehören vor allem die Luft- und Bauteiltemperatur und – feuchte oder auch Bauteil deformungen, -verschiebungen und -schwingungen⁴⁶.⁴⁷ Problematisch an den bisher eingesetzten Überwachungssystemen sind der hohe Zeitaufwand bei deren Installation sowie der hohe Kostenaufwand. Daher werden Systeme zur Dauerüberwachung meist nur selten eingesetzt. Durch die Verwendung von intelligenten, drahtlosen Sensornetzwerken könnte hingegen ein breites Anwendungsfeld erschlossen werden, da derartige Monitoringsysteme gegenüber konventionellen Messsystemen einfacher zu benutzen und deutlich kostengünstiger sind.

Sensorknoten können beim Bau von Gebäuden in die tragenden Konstruktionselemente integriert (z.B. in den Beton eingegossen) werden. Das Sensornetzwerk ermöglicht eine frühe Erkennung einer sich verändernden Statik im Lauf der Zeit, dadurch kann die Dynamik eines einstürzenden Gebäudes im Nachhinein mittels unversehrter Knoten nachvollzogen werden oder anhand der Daten die ad-hoc während des Einsturzes übertragen wurden. Entsprechende Anwendungen befinden sich im Entwicklungsstadium^{48,49,50}.

Das Anwendungsfeld Bauwerksmonitoring überschneidet sich mit dem Anwendungsfeld Katastrophenschutz.

Tabelle 6: Steckbrief Bauwerksmonitoring

1. Anwendungsfeld / Rahmenbedingungen	
Bezeichnung	Bauwerksmonitoring
Kurzbeschreibung	Zustandsüberwachung von Bauwerken
Konkurrierende Systeme	Leitungsgebundene Systeme, sporadische Begutachtung
Erwarteter Nutzen	Kontinuierliche Überwachung und Zustandsbeschreibung
Ökonomische Randbedingungen	Bei fortgeschrittenem technologischen Stand ggf. durch Versicherungen in bestimmten Risikogegenden gefordert; andererseits ist Einsturzgefahr besonders groß, in Gegenden, in denen Bauvorschriften nicht ausreichend befolgt werden – Einsatz von AVMS in diesen Fällen unwahrscheinlich
Messgrößen (Sensorik)	Temperatur, Schwingung, Lageveränderung

⁴⁶ Peil, U.: Lebensdauererlängerung von Bauwerken mit Hilfe von Bauwerksüberwachung. Bautechnik 80 (2003), Heft 9, S. 614-630

⁴⁷ Holst, A.; Hariri, K.; Wichmann, H.-J.; Budelmann, H.: Innovative Non-Destructive Techniques for the Monitoring of Prestressed Concrete Structures. 2nd International Workshop on Structural Health Monitoring of Innovative Civil Engineering Structures, September 22-23, 2004, Fort Garry Hotel, Winnipeg, Manitoba, Canada, pp. 513-523

⁴⁸ Paek, J.; Caffrey, K.C.; Govindan, R.; Masri S.: A wireless sensor network for structural health monitoring: performance and experience. In Proceedings of the Second IEEE Workshop on Embedded Networked Sensors (EmNetS-II), Sydney, Australien, Mai 2005

⁴⁹ Xu, N. et al.: A wireless sensor network for structural monitoring, In Proceedings of the Second ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems, Baltimore, MD, November 2004

⁵⁰ Paek, J.; Caffrey, K.C.; Govindan, R.; Masri S.: A wireless sensor network for structural health monitoring: performance and experience. In Proceedings of the Second IEEE Workshop on Embedded Networked Sensors (EmNetS-II), Sydney, Australien, Mai 2005

2. Anwendungsreife		
Einzelne Pilotanwendungen		
3. Systematisierung		
Merkmal	Anforderungen des Anwendungsfelds	
Räumliche Platzierung der Sensorknoten	ausgewählte Platzierung	
Zeitliche Platzierung der Sensorknoten	einmalige Platzierung	
Mobilität	stationär	
Größe der Sensorknoten	„Streichholzschachtel“	
Energieversorgung	Batterie	
Heterogenität	homogenes Netz	
Kommunikationsart	Funk	
Infrastruktur	Nutzung vorhandener Infrastruktur	
Netzwerktopologie	Stern / Sternnetzwerk	
Sensorabdeckung	lückenhaft	
Konnektivität	sporadisch	
Netzwerkgröße	Mehrere dutzend	
Lebensdauer	Mehrere Jahrzehnte	
Weitere Quality-of-Service Aspekte	-	
4. Chancen und Risiken		
	Chancen / Verbesserungspotenzial gegenüber etablierten Technologien	Risiken
Ökologische Aspekte	Optimale Ausnutzung der Gebäudelebensdauer (Abfallvermeidung)	„Verunreinigung“ von Bauschutt (Recycling)
Soziale Aspekte / Akzeptanz / Datensicherheit	Sicherheit	Potenzielle Überwachung der Bewohner / Lebensgewohnheiten
5. Zukunftspotenzial der Anwendung und weiterer grundsätzlicher Entwicklungsbedarf		
Nur langsames Marktwachstum, da ausschließlich geeignet für Neubauten, keine Nachrüstung des Gebäudebestands Extrem lange Lebensdauer erforderlich		

1.4.4 Katastrophenschutz

Im Anwendungsfeld Katastrophenschutz sind zwei verschiedene Zielrichtungen für die Anwendung von drahtlosen Sensornetzwerken zu unterscheiden:

- Früherkennung und Vorhersage von Naturkatastrophen
- Minimierung der Folgen von Katastrophen (Optimierung des Rettungseinsatzes)⁵¹

Im Falle von Brand-, Hochwasser-, Erdbeben- oder Lawinenkatastrophen besteht ein dringender Bedarf hinsichtlich **Frühwarnsystemen** (Hochwasser, Erdbeben), jedoch besteht insbesondere für Erdbeben noch große Unsicherheit, welche Frühindikatoren überhaupt zur Erdbebenvorhersage geeignet sind.

AVMs können prinzipiell eingesetzt werden, um **Boden- oder Gebäudedeformationen** messen und bei ungewöhnlichen Werten automatisch Alarm schlagen zu können. Insbesondere können Sensornetzwerke für diesen Anwendungsfall mit schon existierender GPS-Datenerfassung verknüpft werden. Somit können theoretisch z.B. über frühzeitig auftretenden Deformationen bevorstehende Naturkatastrophen wie Erdbeben, Erdbeben oder Vulkanausbrüche erkannt und im Idealfall die betroffenen Regionen rechtzeitig gewarnt werden. Die Überwachung von Vulkanerdstößen mit Hilfe eines drahtlosen Sensornetzes erfolgte erstmals versuchsweise 2004 am Vulkan Tungurahua in Ecuador im Rahmen des **Volcano Projekts**: Akustik-Sensoren erfassen Schallwellen von Erdstößen und senden die Messdaten über eine 9 km lange drahtlose Verbindung zu einer Basisstation. Die Zeitsynchronisation wurde mit Hilfe eines zusätzlichen GPS Empfängers durchgeführt. Weiterhin wurde ein Event-Detektor entwickelt, der – nach Eintreten bestimmter Ereignisse – das Senden gespeicherter Daten durch die Sensorknoten veranlasst.

Die **Schadensbegrenzung** im Katastrophenfall hängt maßgeblich davon ab, wie schnell Opfer geortet und geborgen werden können. Der Einsatz von AVM bietet hier zahlreiche potenzielle Einsatzmöglichkeiten: Ortungssysteme sind bereits kommerziell realisiert⁵². Sensorik kann darüber hinaus weitere Vorteile bieten⁵³: Dabei trägt jeder in der potentiell gefährdeten Personen einen Sensor, der Herzschlag, Blutsauerstoffgehalt und Sauerstoff in der Umgebung (als Indikator für einen Hohlraum in der Umgebung des Verschütteten) misst. Der Sensor beginnt zu senden, wenn sich die Person nicht mehr bewegt. Dem Retter werden auf seinem PDA alle in Reichweite befindlichen Katastrophenopfer angezeigt, deren Knoten senden. Dabei wird je nach bedrohlichem Zustand des Opfers eine Priorität vergeben; Verschüttete, noch lebende Personen mit geringem Sauerstoffreservoir haben die höchste Priorität für Rettungsmaßnahmen,

⁵¹ Verbundvorhaben: MANET - Beherrschbarkeit von Katastrophenereignissen durch Autonome Vernetzte Sensoren, gefördert vom BMBF, Projektlaufzeit 2007-2010

⁵² Siehe z.B. das System von RECCO (<http://www.recco.com>): In die Kleidung ist ein Reflektor integriert, der mit einem Detektor im Katastrophenfall geortet werden kann

⁵³ Michahelles, F.; Matter, P.; Schmidt, A.; Schiele, B.: Applying Wearable Sensors to Avalanche Rescue: First Experiences with a Novel Avalanche Beacon. In Computers and Graphics, Jg. 27, Nr. 6, Dezember 2003, S. 839-847

Tote werden zuletzt geborgen. Derartige Sensorsysteme müssen sich insbesondere durch Robustheit auszeichnen.

Auch die direkte Unterstützung von Rettungskräften ist ein potenzielles Anwendungsfeld für AVM⁵⁴.

Tabelle 7: Steckbrief Katastrophenschutz

1. Anwendungsfeld / Rahmenbedingungen	
Bezeichnung	Katastrophenschutz
Kurzbeschreibung	Früherkennung und Folgenminimierung von Katastrophenfällen
Konkurrierende Systeme	Schadensbegrenzung: Ortung ist wichtigste Aufgabe (ohne Mikrosysteme prinzipiell realisierbar)
Erwarteter Nutzen	Verbesserte Frühwarnung vor Katastrophen und Unterstützung von Rettungsmaßnahmen im Katastrophenfall
Ökonomische Randbedingungen	Mäßige bis hohe Zahlungsbereitschaft: Katastrophenschutz als öffentliche Aufgabe, bei der Schadensbegrenzung erhebliche Unterschiede in der Zahlungsbereitschaft vermutet (wird an der Qualität der Bausubstanz gespart – mit bekannt verheerenden Folgen im Erdbebenfall – ist nicht davon auszugehen, dass für ein integriertes AVM-System individuelle Zahlungsbereitschaft besteht)
Messgrößen (Sensorik)	Deformation (Boden, Gebäude) Sauerstoffgehalt Medizinische Parameter: Blutsauerstoff, Herzschlag
2. Anwendungsreife	
Einzelne Pilotanwendungen	
3. Systematisierung	
Merkmal	Anforderungen des Anwendungsfelds
Räumliche Platzierung der Sensorknoten	ausgewählte Platzierung, bzw. Sensorknoten werden im Katastrophenfall entsprechend des Katastrophenverlaufs räumlich verändert angeordnet
Zeitliche Platzierung der Sensorknoten	einmalige Platzierung
Mobilität	Anwendungsfall Schadensbegrenzung: Sensorknoten auf im Katastrophenfall ggf. mobilen Gegenständen (Gebäuden) oder Menschen angebracht (passive Mobilität); mobile Detektoren
Größe der Sensorknoten	„Streichholzschachtel“
Energieversorgung	Batterie
Heterogenität	homogenes Netz

⁵⁴ Verbundvorhaben: FeuerWhere - Sichere und effiziente Überwachung von Einsatzkräften durch Sensornetze, gefördert vom BMBF, Projektlaufzeit 2008-2010

Kommunikationsart	Funk	
Infrastruktur	Nutzung vorhandener Infrastruktur	
Netzwerktopologie	Stern	
Sensorabdeckung	lückenhaft	
Konnektivität	kontinuierlich (Anforderung im Katastrophenfall) sporadisch (Monitoring)	
Netzwerkgröße	Mehrere dutzend	
Lebensdauer	Mehrere Jahre bis Jahrzehnte	
Weitere Quality-of-Service Aspekte	Robustheit	
4. Chancen und Risiken		
	Chancen / Verbesserungspotenzial gegenüber etablierten Technologien	Risiken
Ökologische Aspekte	Minimierung ökologischer Folgen von Katastrophen / Schadenseingrenzung	Ausbringung von Elektronik in der Umwelt
Soziale Aspekte / Akzeptanz / Datensicherheit	Minimierung der Folgen von Katastrophen	Erfassung personalisierter medizinischer Daten
5. Zukunftspotenzial der Anwendung und weiterer grundsätzlicher Entwicklungsbedarf		
Hohes Potenzial bei Frühwarnsystemen Potenzial bei der Schadensbegrenzung regional sehr unterschiedlich (abhängig von Eintrittswahrscheinlichkeit und Zahlungsbereitschaft) Tendenziell Einzelanwendungen (individuelles Monitoring) für besondere hoch-Risiko-Aktivitäten		

1.4.5 Landwirtschaft

In der Landwirtschaft sind mehrere Einsatzzwecke für AVM denkbar, bekannt sind bislang jedoch nur zwei Pilotanwendungen im Weinbau^{55,56} sowie im Kartoffelanbau⁵⁷ zum kleinräumigen Monitoring der Temperatur und Feuchte; insbesondere soll im Lofar-Projekt erfasst werden, ob die Blätter der Kartoffelpflanze feucht sind, was die Entwicklung der Knollenfäule begünstigt.

⁵⁵ Burrell, J.; Brooke, T.; Beckwith, R.: Vineyard Computing: sensor Networks in Agricultural Production, Pervasiv computing, IEEE CS and IEEE ComSoc, January-March 2004, p. 38-45

⁵⁶ Brooke, T.; Burrell, J.; Teibel, D.: Proactive Computing in Agriculture, www.intel.com/research

⁵⁷ Projekt Lofar Agro, Niederlande, www.lofar.org/p/Agriculture.htm

Ein grundsätzlicher Bedarf besteht im Landwirtschaftsbereich an Lösungen für u.a. folgende Aufgaben:

- Zielgerichtete Düngung
- Zielgerichtete Bewässerung
- Zielgerichteter Einsatz von Pestiziden
- Bestimmung des optimalen Erntezeitpunkts

„**Precision Farming**“ (teilflächenspezifische Landwirtschaft) ist bereits verbreitete Praxis, bislang jedoch z.B. auf der Basis von Luftaufnahmen oder Satellitenauswertung, bzw. durch individuelle Probenahme, Handmessgeräte oder an landwirtschaftlichen Fahrzeugen montierten Messgeräten, nicht jedoch durch semi-kontinuierliche Messtechnik, die eine höhere zeitliche und räumliche Auflösung von Messreihen ermöglichen. Übergreifende Zielsetzung des Einsatzes von AVM wären eine Erhöhung des Ernteertrages und ein effizienterer Einsatz von Wasser / Dünger / Pestiziden und damit eine Reduzierung der daraus resultierenden Umweltlasten.

Die Düngermenge richtig zu bemessen ist entscheidend für die Verminderung von Umweltbelastungen aus der Landwirtschaft, insbesondere Stickstoffemissionen, Stickstoff- und Phosphorausträge in Grund- und Oberflächenwässer und die Befruchtung von Böden mit unerwünschten, aber oft unvermeidlichen Nebenbestandteilen von Düngemitteln, wie zum Beispiel Schwermetallen. Kernproblem aller landwirtschaftlichen Nährstoffuntersuchungen ist die korrekte Probenahme.

Zur Zeit können Satellitennavigationssysteme (GPS) räumliche Unterschiedlichkeiten von Bodenmerkmalen liefern. GPS-gestützte Probenahme bildet die Grundlage für die Erstellung von Nährstoffkarten und damit den Zugang zur Präzisionslandwirtschaft.

Eine Ausbringung von Sensoren entsprechend einem bestimmten Raster würde eine räumlich und zeitlich differenzierte Bodenanalytik ermöglichen. Gekoppelt werden könnte ein solches System mit der GPS-gestützten Datenerfassung. Erforderliche Messwerte umfassten insbesondere Stickstoff- und Phosphatgehalt des Bodens. Eine Berücksichtigung der Ausgangsbedingungen ermöglicht auch eine zielgerichtete Zusammensetzung des auszubringenden Düngers. Naturdünger werden in der heutigen Praxis häufig im Überschuss ausgebracht, da diese Dünger ggf. Stickstoff und Stickstoffverbindungen ausgasen, die der Pflanze dann nicht zur Verfügung stehen. Eine exaktere Kontrolle der Bodenbeschaffenheit auch nach der Düngung wäre für den Landwirt ein wichtiger Anhaltspunkt für bedarfsgerechtere Düngung.

Erhältlich sind Schnelltestsysteme zur Dünger und Bodenanalytik, aber mit mäßiger analytischer Genauigkeit. Laboranalysen dagegen bringen einen nicht unerheblichen Zeitverzug mit sich. Eine zuverlässige In-situ-Messung wäre daher von erheblichem Mehrwert für die Landwirtschaft.

Die **Ernte** erfolgt entsprechend dem vermuteten Reifegrad der Pflanzen, häufig jedoch nicht zum optimalen Zeitpunkt, weil der geplante Erntetermin nicht dem tatsächlichen Reifegrad entspricht. Insbesondere bei kleinräumigen Unterschieden der Bodenwerte kann es zu räumlich ungleichmäßigem Reifegrad kommen. Ein besseres, AVM-gestütztes Monitoring kann in Verbindung mit geeigneten Pflanzenwachstumsmodellen eine bessere Ernteplanung ermöglichen.

Besondere Anforderungen des Einsatzgebiets Landwirtschaft sind einfache Bedienbarkeit und Robustheit entsprechend dem Einsatz im Außenbereich.

Tabelle 8: Steckbrief Landwirtschaft

1. Anwendungsfeld / Rahmenbedingungen	
Bezeichnung	Landwirtschaft
Kurzbeschreibung	Monitoring der Wachstumsbedingungen (Boden, Wetter) im Rahmen der teilflächenspezifischen Landwirtschaft („Precision Farming“)
Konkurrierende Systeme	Satellitenbilder, flugzeug- oder drohnengestützte Luftaufnahmen, Hand- oder fahrzeuggestützte Messgeräte, Probenahme vorort mit anschließender Laboranalyse
Erwarteter Nutzen	Zeitlich und räumlich aufgelöste Datenreihen für optimiertes Feld- und Erntemanagement (höhere Erträge, geringerer Düngemittel- / Wasser- / Pestizidverbrauch) kein Zeitverzug durch Laboruntersuchungen geringerer Personalbedarf durch Fern-Monitoring
Ökonomische Randbedingungen	Mäßige Zahlungsbereitschaft: Systemaufwand muss sich durch Effizienzgewinne bezahlt machen Konkurrenz zu etablierten Systemen
Messgrößen (Sensorik)	Bodenanalytik: Nährstoffe, pH, Feuchtegehalt Pflanzenmonitoring: Chlorophyllgehalt bzw. Farbspektrum Licht: Photosynthetisch-aktive Strahlung
2. Anwendungsreife	
Pilotanwendung im Weinanbau, Kartoffelanbau	
3. Systematisierung	
Merkmal	Anforderungen des Anwendungsfelds
Räumliche Platzierung der Sensorknoten	ausgewählte Platzierung
Zeitliche Platzierung der Sensorknoten	einmalige Platzierung
Mobilität	stationär

Größe der Sensorknoten	„Ziegelstein“ , Miniaturisierungsbedarf ergibt sich allenfalls durch Anforderung an Robustheit (Überfahren mit Landmaschinen)	
Energieversorgung	Batterie, solar	
Heterogenität	homogene Netze (auf der Ebene der Sensorknoten)	
Kommunikationsart	Funk	
Infrastruktur	vorhandene Infrastruktur	
Netzwerktopologie	Stern / Sternnetzwerk, Baum, Graph	
Sensorabdeckung	lückenhaft	
Konnektivität	sporadische Verbindung meistens ausreichend	
Netzwerkgröße	Wenige dutzend bis wenige hundert	
Lebensdauer	Mehrere Jahre	
Weitere Quality-of-Service Aspekte	Mechanische Robustheit	
4. Chancen und Risiken		
	Chancen / Verbesserungspotenzial gegenüber etablierten Technologien	Risiken
Ökologische Aspekte	Optimierung des Wasserverbrauchs und der Düngemittelausbringung (Minimierung der Auswaschung in Grund- und Oberflächengewässer)	Ausbringung von Elektronik in die Umwelt
Soziale Aspekte / Akzeptanz / Datensicherheit	Effizientere Nutzung von begrenzten Wasserressourcen	Lebensmittelerzeugung als grundsätzlich sensibler Bereich (siehe Gentechnik-Debatte) für Technologieanwendungen
5. Zukunftspotenzial der Anwendung und weiterer grundsätzlicher Entwicklungsbedarf		
Hohes Anwendungspotenzial aufgrund der Flächenanteile der Landwirtschaft Höchster Bedarf für besseres Wassermanagement jedoch in (ariden) Gegenden mit teils geringer Zahlungsbereitschaft (Entwicklungs- und Schwellenländer) In-situ-Bodenanalytik befindet sich für den Bereich der Altlastensanierung im Forschungsstadium, jedoch gibt es hinsichtlich Nährstoffuntersuchungen bislang keine Ansätze		

Die US-amerikanische Firma Lindsay Corp., weltweit zweitgrößter Anbieter von Kreisbewässerungsanlagen, hat 2006/07 mit FieldNET und FieldSENTRY in den Markt drahtlose Systeme zur Überwachung und Steuerung von Kreisbewässerungsanlagen eingeführt, die ein Monitoring und Steuerung über das Internet ermöglichen, einschließlich statistischer Angaben über Wasserbrauch, gekoppelt mit Wetterdaten, und der Möglichkeit, die Wasserabgabe in einzelnen Abschnitten gezielt einzustellen („erstes webbasiertes, Echtzeit-Bewässerungs-

Managementsystem“)⁵⁸. Eine direkte Kopplung mit einer Insitu-Messung der Bodenfeuchte oder anderer Boden- oder Pflanzenparameter ist (bisher) nicht implementiert.

1.4.6 Zustandsüberwachung von Patienten und medizinische Diagnostik

Im Bereich der Medizintechnik sind mehrere Einsatzszenarios für AVM denkbar. Eines der umfassendsten Konzepte stammt von der University of Virginia⁵⁹: „AlarmNet“ umfasst ein heterogenes Netzwerk, das teils tragbare Sensorik direkt am Patienten und teils Sensorik in der Umgebung des Patienten mit einschließt. Solche Systeme können umfassen:

- **Monitoring des Gesundheitszustandes** eines Patienten (ausgewählte Indikatoren zum Vitalzustand, Body Area Network), ggf. mit direkter Übermittlung der Daten an den Arzt und / oder aktiver automatischer Medikamentendosierung
- **Notfallsysteme** (Detektierung kritischer Gesundheitszustände, Sturz, Bewußtlosigkeit, einschließlich Alarmierung von Hilfe)

Das Body Area Network zum Gesundheitsmonitoring kann direkt mit dem IT-Netzwerk des behandelnden Arztes oder der Krankenhausstation verbunden sein, und somit direkt an ein Überwachungs- und Auswertungsprogramm angebunden werden⁶⁰. Bisher erfolgten solche Überwachungen mit aufwendigen Apparaten und umständlich anzubringenden Befestigungsgurten.

Tragbare AVM könnten Patienten die Möglichkeit geben früher aus dem Krankenhaus entlassen zu werden, aber dabei im engen Kontakt mit dem Krankenhaus zu bleiben. Gesundheitskosten könnten so reduziert werden.

AVM sind grundsätzlich auch als **Implantate** denkbar, z.B. eingesetzt in die Herzklappen zur Überwachung der Herzfunktionen oder um Herzflimmern zu detektieren. Sensoren können auch in z.B. künstlichen Herzklappen oder Prothesen die Funktion überwachen⁶¹. Angedacht ist ebenso das Implantieren „intelligenter Kapseln“, die je nach detektierten Gesundheitszustand kontrolliert Medikamente an den Körper abgeben.

⁵⁸ Lindsay Corp., <http://www.lindsayfieldnet.com/>

⁵⁹ University of Virginia: AlarmNet – Assisted-Living And Residential Monitoring Network, <http://www.cs.virginia.edu/wsn/medical/overview.html>

⁶⁰ Gao, T.; Greenspan, D.; Welsh, M.; Juang, R. R.; Alm A.: Vital Signs Monitoring and Patient Tracking Over a Wireless Network. In Proceedings of the 27th IEEE EMBS Annual International Conference, September 2005

⁶¹ www.ecubes.org

Ein Randbereich für den Einsatz von AVM ist der **Leistungssport**: Durch drahtlose Sensorik können medizinische Parameter während des Trainings oder dauerhaft überwacht werden, ebenso bestimmte Leistungsparameter wie Beschleunigung oder Geschwindigkeit bei bestimmten Bewegungen.

Intel hat die Vision einer durch ein Netzwerk miniaturisierter Sensorknoten unterstützten Wohnumgebung für Senioren bzw. hilfebedürftige Menschen (Schlagwort „**Ambient Assisted Living**“)⁶² postuliert. Die Aufgaben der Sensorknoten in dieser Vision umfassen u.a.:

- Detektion, ob jemand im Bett liegt
- Ortung von Alltagsgegenständen (Tasse im Schrank oder außerhalb)
- Zählung der Waschvorgänge des Geschirrspülers, um auf die Anzahl der eingenommenen Mahlzeiten zurückzuschließen
- Monitoring der Badbenutzung
- Medikamentenverpackungen monitoren korrekte Einnahme

Die Daten der einzelnen Sensorknoten werden drahtlos an einen Rechner übertragen, der die Vorgänge in der Wohnung zentral registriert und überwacht.

Tabelle 9: Steckbrief Zustandsüberwachung von Patienten und medizinische Diagnostik

1. Anwendungsfeld / Rahmenbedingungen	
Bezeichnung	Zustandsüberwachung von Patienten und medizinische Diagnostik
Kurzbeschreibung	Monitoring des Gesundheitszustandes und Notfallsysteme
Konkurrierende Systeme	Stationäre Behandlung, mobile unvernetzte Geräte
Erwarteter Nutzen	Kürzere Aufenthaltszeiten in stationärer Behandlung, größere Bewegungsfreiheit für den Patienten Bessere Gesundheitsvorsorge und Notfallmanagement
Ökonomische Randbedingungen	Hohe Zahlungsbereitschaft im Bereich Medizintechnik (Schutz und Wiederherstellung der Gesundheit, Effizienzgewinne)
Messgrößen (Sensorik)	Medizinische Parameter
2. Anwendungsreife	
Einzelne Pilotanwendungen	

⁶² Vermesan, O.: Smart Wireless Identifiable Systems - Connecting the real, virtual and digital worlds, EPoSS Annual Forum 2008, 1.-2. Oktober 2008, Juan-les-Pins, Antibes, Frankreich

3. Systematisierung		
Merkmal	Anforderungen des Anwendungsfelds	
Räumliche Platzierung der Sensorknoten	ausgewählte Platzierung	
Zeitliche Platzierung der Sensorknoten	kontinuierliche Platzierung (Erweiterung um zusätzliche Patienten)	
Mobilität	Passive Mobilität (am Patienten), stationär (Raumüberwachung)	
Größe der Sensorknoten	„Streichholzschachtel“ bis „Getreidekorn“, Miniaturisierungsbedarf ergibt sich aus der Anforderung nach möglichst uneingeschränkter Mobilität des Patienten / einfacher Implantierbarkeit	
Energieversorgung	Batterie, Bewegung, Umgebungstemperatur	
Heterogenität	heterogene Netze	
Kommunikationsart	Funk	
Infrastruktur	vorhandene Infrastruktur	
Netzwerktopologie	Stern / Sternnetzwerk	
Sensorabdeckung	lückenhaft	
Konnektivität	sporadische Verbindung meistens ausreichend	
Netzwerkgröße	Einzelne Sensorknoten bis mehrere tausend	
Lebensdauer	Mehrere Tage bis Jahrzehnte	
Weitere Quality-of-Service Aspekte	Extrem hohe Zuverlässigkeit (abhängig von der überwachten Vitalfunktion), hohe Datensicherheit	
4. Chancen und Risiken		
	Chancen / Verbesserungspotenzial gegenüber etablierten Technologien	Risiken
Ökologische Aspekte	Verkehrsreduktion: Diagnostik / Behandlung ohne Besuch des Arztes	Rückholbarkeit kritischer Komponenten im Todesfall (siehe Quecksilberemissionen aus Krematorien – bedingt durch Zahnfüllungen; Explosionsgefahr bei Batterien)
Soziale Aspekte / Akzeptanz / Datensicherheit	Ambient Assisted Living: erheblicher Gewinn an Lebensqualität für Patienten	„gläserner Patient“, sensible personenbezogene Daten, Sicherheit der implantierten AVM Raumüberwachung
5. Zukunftspotenzial der Anwendung und weiterer grundsätzlicher Entwicklungsbedarf		
Hohes Anwendungspotenzial		
Weiterer Miniaturisierungsdruck: Vision „autarke Nanoroboter“ für operative Eingriffe		

1.4.7 Automobilelektronik

Auch die Automobilindustrie hat Projekte initiiert, bei denen die bereits vorhandenen Sensoren von Kraftfahrzeugen während der Fahrt Daten mit anderen Fahrzeugen austauschen sollen. Die Fahrzeuge bauen dazu untereinander eine Art dynamisches Sensornetzwerk auf. Über dieses werden Informationen zur aktuellen Fahrsituation und ausgeführte Aktionen, wie beispielsweise starke Bremsmanöver an einem Stauende, von Fahrzeug zu Fahrzeug weitergesendet. Auf diese Weise können die Fahrer von nachfolgenden Fahrzeugen vor einer möglichen Gefahrensituation gewarnt werden oder eine Umleitungsempfehlung zum Umfahren von Staus angezeigt bekommen⁶³. Dieses Anwendungsszenario wird im „Steckbrief Automobilelektronik“ charakterisiert (siehe unten), darüber hinaus bietet sich der Automobilbereich für zahlreiche weitere Anwendungen an, z.B. als **Reifendrucksensor**: Bedingt insbesondere durch die gesetzliche Anforderung in den USA nach Reifendruckkontrollsystemen sind bereits in großer Stückzahl Funksensoren in Reifen im Einsatz, teils mit automatisierter Radidentifikation. Messgrößen sind Druck und Temperatur, das Sensornetzwerk beschränkt sich auf das einzelne Fahrzeug und ist damit auf wenige Sensorknoten (Reifen und ggf. Triggersender im Radkasten) beschränkt. Eine Reaktionszeit bzw. Sendehäufigkeit im Bereich von Minuten ist ausreichend für diesen Anwendungsfall.⁶⁴

In einem nächsten Schritt sind „intelligente Reifen“ denkbar, die über Druck- und Temperaturdaten hinaus auch die Reifengeschwindigkeit, Beschleunigung, Abnutzung u.a. überwachen⁶⁵.

Tabelle 10: Steckbrief Automobilelektronik

1. Anwendungsfeld / Rahmenbedingungen	
Bezeichnung	Automobilelektronik
Kurzbeschreibung	Autonome Kommunikation zwischen Fahrzeugen
Konkurrierende Systeme	GPS-/Navigationsgerät-gestützte zentrale Verkehrsinformationen
Erwarteter Nutzen	Erhöhte Verkehrssicherheit, besserer Verkehrsfluss
Ökonomische Randbedingungen	Einführung neuer Technologien zuerst im gehobenen Preissegment
Messgrößen (Sensorik)	z.B. Beschleunigung
2. Anwendungsreife	

⁶³ P. Dizikes, G. Honsel: Multi-Hopping mit dem Gegenverkehr. In: Technology Review, Nr.5 Mai 2006, Seiten 10-12, Heise Zeitschriften Verlag GmbH & Co. KG, S. 10–12

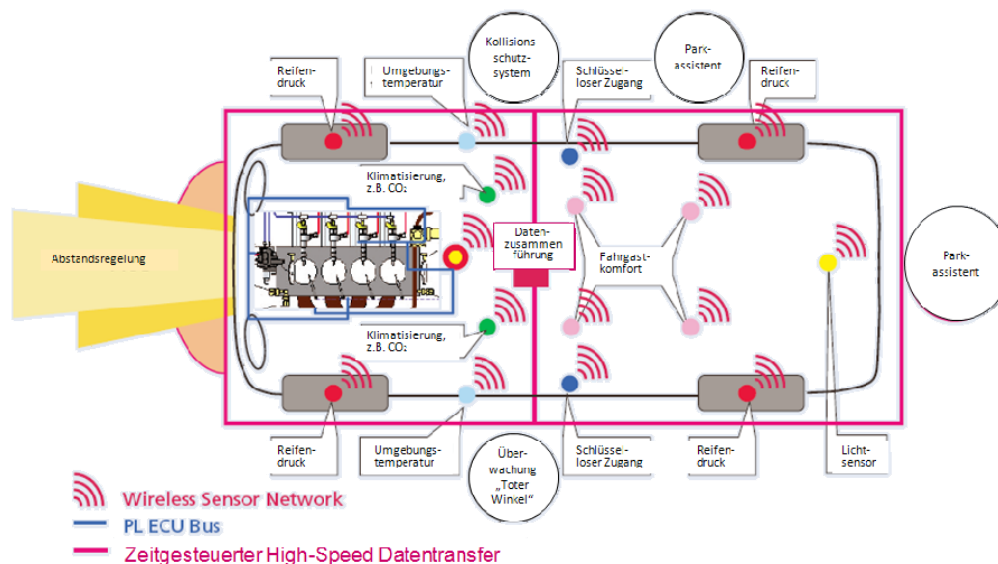
⁶⁴ M. Niedermayer: Methodik zum Entwurf von miniaturisierten, energieautarken, verteilten Funksensorknoten, Dissertation, Berlin, 2008

⁶⁵ L. Li, F.-Y. Wang: Advanced Motion Control and Sensing for Intelligent Vehicles, Springer, 2007

Konzeptstadium		
3. Systematisierung		
Merkmal	Anforderungen des Anwendungsfelds	
Räumliche Platzierung der Sensorknoten	ausgewählte Platzierung	
Zeitliche Platzierung der Sensorknoten	kontinuierliche Platzierung (Erweiterung um zusätzliche Fahrzeuge)	
Mobilität	Passive Mobilität (am Fahrzeug)	
Größe der Sensorknoten	„Ziegelstein“ bis „Streichholzsachtel“, mäßiger Miniaturisierungsbedarf	
Energieversorgung	Automobilinterne Stromversorgung, nicht autark bezüglich des Sensorknotens	
Heterogenität	homogene Netze	
Kommunikationsart	Funk	
Infrastruktur	ad hoc Infrastruktur, ggf. auch Nutzung vorhandener Infrastruktur denkbar	
Netzwerktopologie	Sternnetzwerk oder Graph	
Sensorabdeckung	lückenhaft	
Konnektivität	ständige Verbindung	
Netzwerkgröße	mehrere hunderttausend	
Lebensdauer	Zehn Jahre, entsprechend Lebensdauer des Automobils	
Weitere Quality-of-Service Aspekte	Robustheit gegenüber definierten Fehlern / Ausfallsicherheit: Fehlfunktion darf nicht zum Sicherheitsrisiko werden	
4. Chancen und Risiken		
	Chancen / Verbesserungspotenzial gegenüber etablierten Technologien	Risiken
Ökologische Aspekte	„Mobilität“ wird energieeffizienter	Reboundeffekt: Verstärkter Verkehr durch verbesserten Verkehrsfluss
Soziale Aspekte / Akzeptanz / Datensicherheit	Zeitersparnis und erhöhte Verkehrssicherheit	sensible Bewegungsdaten einzelner Fahrzeuge (Bewegungsprofile)
5. Zukunftspotenzial der Anwendung und weiterer grundsätzlicher Entwicklungsbedarf		
Hohes Anwendungspotenzial		
Technologie nur sinnvoll einsetzbar, wenn zugleich in einer Vielzahl von Fahrzeugen eingeführt		

Abbildung 7 illustriert den in der EPoSS Forschungsagenda aufgeführten zukünftigen potenziellen Einsatz von drahtlos kommunizierenden Sensorsystemen. Angemerkt sei, dass viele der Anwendungen bereits heute drahtlos realisiert sind, siehe den Reifendrucksensor oder auch den schlüssellosen Zugang.

Abbildung 7: (Zukünftiger) Einsatz intelligenter drahtloser Komponenten im Automobil⁶⁶



Das Auto ist bereits heute ein extrem komplexes Sensornetzwerk: In einem Auto sind 80-100 Sensoren aktiv, 50-80 Prozessoren und 80-100 Aktuatoren – aber auch 5 km Verkabelung verbaut⁶⁷, weil für sicherheitskritische Anwendungen kabelgebundene Kommunikation noch auf absehbare Zeit bevorzugt wird. Explizit genannt als Anwendungsfeld für drahtlose Kommunikation und autonome Sensoren und Aktuatoren wird der Bereich der **Verbrennungsmotoren**, auch wenn langfristig ein Übergang zu Elektromotoren möglich erscheint: Verbrennungsmotoren werden bereits heute mit 12-15 Sensoren überwacht und geregelt; in „einigen Jahren“ sind, unter anderem getrieben durch die Forderung nach immer effizienteren Motoren, über 30 zu erwarten – die EPoSS Forschungsagenda schlussfolgert daraus den **Bedarf eines integrierten Ansatzes einschließlich drahtloser und autonomer Sensoren / Aktuatoren**, um die Komplexität des Systems überhaupt noch bewältigen zu können. Für mit Elektromotoren betriebene zukünftige Fahrzeuge wird ebenfalls der dringende Bedarf für ein intelligentes Sensornetzwerk zur Überwachung und Regelung der Leistungselektronik im Sinne eines minimalen Energieverbrauchs gesehen, wenn auch die EPoSS Forschungsagenda offen lässt, ob dieses Netzwerk drahtlos sein wird.

Zusammenfassend lässt sich konstatieren:

⁶⁶ Übersetzt aus: EPoSS: Strategic Research Agenda 2009, EPoSS Office / VDI/VDE-IT, Berlin

⁶⁷ EPoSS: Strategic Research Agenda 2009, EPoSS Office / VDI/VDE-IT, Berlin

- kurzfristig finden AVMs insbesondere im Bereich „**Komfort**“ Verwendung
- erhebliches Potenzial für AVMs zeichnet sich mittelfristig ab für den Bereich „**intelligente Antriebssysteme**“ sowie den Bereich „**Fahrerassistenzsysteme**“ (insbesondere Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation)
- der Bereich „**Sicherheit**“ kann künftig für bestimmte Aufgaben ebenfalls AVM-Komponenten einbinden, jedoch eher nicht in Schlüsselfunktionen.

Der Bereich der Automobilelektronik kann kurz- und mittelfristig eine Vorreiter- und Markterschließungsrolle für AVMs einnehmen.

1.4.8 Luft- und Raumfahrt

Im Bereich der **Luftfahrt**⁶⁸ kann ein AVM-gestütztes Monitoring insbesondere zu einer erhöhten Sicherheit beitragen: Durch die Überwachung von Parametern wie Vibration und Hitzeentwicklung an kritischen Stellen, die sich mit kabelgebundener Sensorik schwer erreichen lassen, können zusätzliche Erkenntnisse zum Zustand des Flugzeugs und einzelner Komponenten während des Flugs gewonnen werden („in-flight safety“). Der im Projekt e-CUBES entwickelte visionäre Ansatz für den Einsatz drahtloser Sensornetzwerke für eine erhöhte Flugsicherheit geht von folgender Systemkonfiguration aus, um ein effektives Monitoring zu ermöglichen:

- Netzwerkdichte von 1 bis 4 Sensoren je Quadratmeter relevanter Oberfläche (Tragflächen, Kabine, Frachtraum) und 1 bis 30 Sensoren je Kubikmeter in gehäusten Bereichen beweglicher Teile
- Vorverarbeitung von Daten und Abgleich mit benachbarten Sensoren, nur Weiterleitung ausgewählter, eindeutiger Informationen an das Cockpit

Als wesentlicher Vorteil drahtloser Systeme in der Luftfahrt wird einerseits der Kostenaspekt, beziffert mit rund 1.500 Euro/kg für vergleichbare on-board-Ausrüstung, und andererseits die Gewichtseinsparung von rund 200 bis 500 kg für Verkabelung und Steckverbinder benannt. Hohe Zuverlässigkeit des Systems sind Grundvoraussetzung für den Einsatz drahtloser Sensornetzwerke im Flugzeug; insbesondere darf der Ausfall einzelner Sensorknoten kein Sicherheitsrisi-

⁶⁸ e-CUBES Projekt: 3-D-Integrated Micro/Nano Modules for Easily Adapted Applications, Deliverable Report D1.1.1: Aeronautical applications preliminary specifications report, Juli 2006

ko darstellen, und eine Selbstüberwachung und –organisation des Sensornetzwerks sind erforderlich.

Das e-CUBES-Projekt⁶⁹ hat ebenso eine Vision für den Einsatz von AVMs in der **Erforschung von Planeten, Asteroiden und Kometen** entworfen, die darauf basiert, dass AVMs einen Miniaturisierungsgrad erreicht haben, der es erlaubt hunderte oder tausende Sensorknoten auf eine Mission mitzunehmen, und diese über einen großen Bereich des Zielobjektes zu verstreuen, statt wie heute einzelne Kleinfahrzeuge die Oberfläche anlaysieren zu lassen.

Tabelle 11: Steckbrief Raumfahrt

1. Anwendungsfeld / Rahmenbedingungen	
Bezeichnung	Raumfahrt
Kurzbeschreibung	Großflächige Erforschung fremder Himmelskörper
Konkurrierende Systeme	“Luft”aufnahmen, einzelne Kleinfahrzeuge
Erwarteter Nutzen	Forschung: Fortschritte in der Erforschung des Weltalls
Ökonomische Randbedingungen	Miniaturisierung und Gewichtsersparnis wichtiger als Kosteneinsparung
Messgrößen (Sensorik)	Verschiedenste Umweltparameter (Konzentrationen von Gasen, Gesteinszusammensetzungen, Strahlung, Bioparameter etc.)
2. Anwendungsreife	
Vision	
3. Systematisierung	
Merkmal	Anforderungen des Anwendungsfelds
Räumliche Platzierung der Sensorknoten	Ausgewählte / semi-zufällige Platzierung
Zeitliche Platzierung der Sensorknoten	Einmalige Platzierung
Mobilität	Stationär
Größe der Sensorknoten	Getreidekorn
Energieversorgung	Batterie / solar
Heterogenität	Heterogen (unterschiedliche Sensorikaufgaben)
Kommunikationsart	Funk
Infrastruktur	ad hoc Infrastruktur
Netzwerktopologie	Graph / Stern (z.B. Rover als Basisstation)

⁶⁹ e-CUBES Projekt: 3-D-Integrated Micro/Nano Modules for Easily Adapted Applications, Deliverable Report D1.S.1: Space applications preliminary specifications report, Juli 2006

Sensorabdeckung	lückenhaft	
Konnektivität	sporadisch	
Netzwerkgröße	Hunderte bis tausende	
Lebensdauer	Wenige Stunden bis mehrere Monate (bei Monitoring [jahres-]zeitlicher Veränderungen)	
Weitere Quality-of-Service Aspekte	Robustheit gegenüber extremen Umweltbedingungen	
4. Chancen und Risiken		
	Chancen / Verbesserungspotenzial gegenüber etablierten Technologien	Risiken
Ökologische Aspekte	-	-
Soziale Aspekte / Akzeptanz / Datensicherheit	Potenzielle Folgenutzen aus Ergebnissen der Forschung	-
5. Zukunftspotenzial der Anwendung und weiterer grundsätzlicher Entwicklungsbedarf		
Sehr begrenztes Mengenpotenzial, aber Möglichkeit zur konkreten Umsetzung von Schlüsseltechnologien		
Extreme Zuverlässigkeit / Ausfallsicherheit des Gesamtsystems, Miniaturisierung gefordert		

1.4.9 Automatisierungstechnik

Bereits 2002 hat das US Energieministerium das Potenzial der industriellen Anwendung drahtloser Sensornetze zur Erhöhung der Energieeffizienz in einer Vision zusammengefasst⁷⁰ und ein umfangreiches F&E-Programm initiiert.

In der Fertigungs- und Prozessautomation gibt es zahlreiche potenzielle Anwendungsfelder für drahtlose Sensornetze, die Aufgaben des Anlagenmonitoring und der Steuerungs- und Regeltechnik übernehmen können⁷¹.

Zwei wesentliche Vorteile ergeben sich aus der Verwendung von AVM in der Automatisierungstechnik:

⁷⁰ U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy: Industrial Wireless Technology for the 21st Century, Dezember 2002

⁷¹ Verbundvorhaben: ZESAN - Zuverlässige, energieeffiziente drahtlose Sensor-/ Aktornetze für Gebäudeautomatisierung, Anlagenüberwachung und Prozesssteuerung, gefördert vom BMBF, Projektlaufzeit 2007-2010

- Kabelbasierte Lösungen sind – insbesondere bei beweglichen Teilen – fehleranfällig und mit ggf. erheblichem Wartungsaufwand, bzw. Stillstandszeiten verbunden. Die Verkabelung oder auch die Stillstandszeiten bei Kabelbruch verursachen hohe Kosten.
- Durch kabellose Sensoren werden Bereiche für die Messtechnik zugänglich, die sich mit drahtgebundenen Systemen nicht erreichen lassen

“Industrial Wireless Sensor Vision

Industrial wireless technology will be robust, reliable, cost-efficient, totally secure, and in many cases, integral to the measurement device. It will be the obvious choice for monitoring and controlling industrial processes to optimize resource efficiency and productivity.”

US Department of Energy, 2002

Bisher dominieren Feldbus-Lösungen, bei denen mehrere Sensoren und Aktoren nicht parallel (je ein Kabel vom Regelungsgerät zu jedem Sensor und Aktor) sondern seriell (nur ein Buskabel wird vom Regelungsgerät aus bei jedem Sensor und Aktor vorbeigeführt) verschaltet sind.

Grundsätzliche Anwendungsfelder sind:

- Prozess-Steuerungs- und Regelungstechnik
- Zustandsmonitoring von Maschinen- und Anlagenteilen (z.B. Motoren)
- Fertigungslogistik

Zur Unterstützung der Fertigungslogistik genügen jedoch zumeist passive RFID-Lösungen.

In einer Marktprognose für den Bereich industrieller Anwendungen hat ON World Inc. im Jahr 2005 für das Jahr 2010 die Anzahl der weltweit eingesetzten Sensorknoten prognostiziert⁷²:

- ca. 15 Mio. im Bereich Maschinenüberwachung
- ca. 14 Mio. im Bereich Prozessmonitoring / -überwachung (davon 8 Millionen Füllstand, Durchfluss, Druck; 6 Mio. Temperatur)
- ca. 5 Mio. zur Überwachung von Tankfüllstand und Leckagedetektion

⁷² erläutert in: Marrón, P.J.; Minder, D. et al.: Embedded WiSeNts Research Roadmap, November 2006

- ca. 4 Mio. zur Überwachung von Überdruckventilen (Raffinerien, petro-/chemische Industrie)
- ca. 4 Mio. im Bereich Arbeitsschutz und Emissions- und Gefahrstoffüberwachung

In der **Prozessautomatisierung** werden bereits vermaschte Wireless Sensor Networks (WSN) erfolgreich eingesetzt. Für die Gebäudeautomatisierung gibt es schon jetzt Sensormodule mit sehr geringem Leistungsbedarf. Durch entsprechende Anpassungsmaßnahmen können diese auch für industrielle Zwecke verwendet werden⁷³. Die erste Generation drahtloser Systeme beschränkt sich jedoch vor allem auf Aufgaben der Zustandsüberwachung⁷⁴, und adressiert noch nicht komplexere, kritische Steuerungs- und Regelaufgaben.

Bereits heute werden in der Automatisierungstechnik unzählige Sensoren eingesetzt – die drahtlose Vernetzung dieser Sensoren kann zusätzliche Möglichkeiten schaffen. Interessant bei einer solchen Lösung ist, dass sie sich auf Grund der Funksensoren auch nachträglich mit relativ geringen Beschaffungs- und Installationskosten in praktisch jede heterogene Fertigungslandschaft integrieren lässt. Die drahtlosen Übertragungsverfahren sorgen dafür, dass keine zusätzlichen Planungs- und Installationskosten durch aufwändige Kabelverlegungen entstehen. Auch weisen kabelbasierte Systeme eine nicht zu vernachlässigende Fehlerrate auf und die Ermittlung der jeweiligen Fehlerquelle, häufig Steckverbinder, kann aufwändig sein⁷⁵. Gerade bei Produktionsstätten, in denen Fertigungslinien oder einzelne Maschinen häufig neu platziert werden⁷⁶, kann es sinnvoll sein auf drahtlose Lösungen zu setzen, statt bei jeder Umgruppierung von Neuem zu verkabeln⁷⁷.

AVM können insbesondere zur **Zustandsüberwachung** von Motoren eingesetzt werden. Elektrische Motoren und Antriebe sind für einen erheblichen Anteil des industriellen Stromverbrauchs verantwortlich. Fehlende Regelungs- und Steuerelektronik bei kleineren Motoren verhindert bisher eine lastabhängige Nutzung und routinemäßige Wartungszyklen erzeugen hohe Personalkosten. Die größte Herausforderung besteht in einer wirtschaftlichen Erfassung der erforderlichen Messwerte von zahlreichen Motoren, die über einen größeren Fer-

⁷³ Post, P.; Kärcher, B.: Erfahrungen bei der Entwicklung eines Drahtlosen Autonomen Sensornetzes für die Automatisierungstechnik, Mikrosystemtechnik Kongress 2007, 15.-17. Oktober 2007, Dresden, VDE Verlag GmbH, Berlin / Offenbach

⁷⁴ Ota, N., Wright, P.: Trends in wireless sensor networks for manufacturing, Int. J. Manufacturing Research, Vol. 1, No. 1, 2006, S. 3-16

⁷⁵ Shen, X.; Wang, Z.; Sun, Y.: Wireless Sensor Networks for Industrial Applications, IEEE 5th World Congress on Intelligent Control and Automation, 15.-19. Juni 2004, Hangzhou

⁷⁶ Viele deutsche Automobilhersteller haben solche flexiblen Fertigungskonzepte, bei denen mobile Roboter kurzfristig in besonders belastete Fertigungslinien integriert werden bereits realisiert (siehe Dilba, D.: Prinzip Porsche, in Technolgy Review Mai 2009).

⁷⁷ J. Montague: Wireless aids molding machine ERP, Industrial Networking, ControlDesign.com, 2006

tigungsbereich verteilt sind. Ebenso ist der Einsatz von Funksensoren zum Monitoring der Dichtheit von Getriebemotoren ein möglicher konkreter Anwendungsfall⁷⁸.

Papiermühlen sind ein besonders erfolgversprechendes Anwendungsfeld für AVMs, da der komplexe Prozess der Papierherstellung und –verarbeitung in Rollenmaschinen anfällig ist für Abweichungen in der Rollengeschwindigkeit, der Temperatur oder der Ausrichtung der Rollen und des Rollendrucks. Sensornetzwerke können in diesem Umfeld Abweichungen in der Papierqualität sowie bei Maschinenvibrationen oder –geräuschen überwachen, und diese zur Prozessüberwachung drahtlos übermitteln^{79,80}.

In der pharmazeutischen Industrie werden Sensornetzwerke eingesetzt, um Prozesse zu überwachen – eine 100 %ige Einhaltung und Überwachung der Umgebungsbedingungen in der Medikamentenherstellung ist zwingend erforderlich -, aber auch für die interne Logistik (Chargenverfolgung einschließlich Qualitätskontrolle)⁸¹.

Eine besondere Herausforderung stellt die Anforderung nach Datenübertragung für die Prozesssteuerung in Echtzeit dar⁸². Die Task-Force „Automatisierungstechnik 2010“ hat die Potenziale drahtloser Sensortechnik in der Automatisierungstechnik wie folgt beschrieben: „Die Fortschritte in der Informationstechnik und Signalverarbeitung sind die Treiber für die weitere Entwicklung von Sensoren in automatisierungstechnischen Anwendungen. ... Intelligenz im Sensor ermöglicht die Interpretation der Messwerte am geeigneten Ort, entlastet das System von Routineaufgaben und vereinfacht die Systemarchitektur. Die drahtlose Kommunikation erlaubt die Ferndiagnose, die Fern- und Selbstüberwachung sowie die Selbstkalibrierung von Sensoren. Netzwerke anstelle von Punkt-zu-Punkt-gekoppelten Sensoranwendungen vereinfachen die Planung, Installation und Wartung von Sensoren. Traditionelle Messwertaufnehmer werden zunehmend durch Sensorarrays (z. B. künstliche Nasen, Augen, Zungen, taktile Sensorarrays), spektrometrische Prinzipien und andere spezifische Methoden sowie durch berührungslose Lösungen ersetzt.“⁸³

⁷⁸ Fraunhofer IZM: Condition Monitoring - Integration von Sensoren mit autarker Energieversorgung in einen Simmerring, Produktblatt, Berlin, 2009

⁷⁹ Shen, X.; Wang, Z.; Sun, Y.: Wireless Sensor Networks for Industrial Applications, IEEE 5th World Congress on Intelligent Control and Automation, 15.-19. Juni 2004, Hangzhou

⁸⁰ Projekt EcoMoS (Energieautarkes Condition Monitoring System), gefördert vom BMBF, Projektträger VDI/VDE-IT, 2008-2011

⁸¹ Toteda, S.: Reliable Wireless Sensor Network Performance in the Face of Adversity, Dust Networks, http://www.dustnetworks.com/flash/reliable_network_performance/player.html

⁸² Verbundvorhaben: RealFlex - Integration zuverlässiger drahtloser Kommunikationssysteme in Sensor-/Aktornetze in Automatisierungsanwendungen -, gefördert vom BMBF, Laufzeit 2007-2010

⁸³ Automatisierungstechnik 2010. Thesen der Task-Force „Automatisierungstechnik 2010“ der VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (GMA), 3. Juni 2003

Honeywell als einer der führenden Systemanbieter drahtloser Sensornetzwerke hat seit Einführung kommerzieller Produkte im Jahr 2003 bis 2007 – dem Jahr des Marktstarts von Honeywells „2.Generation“ von Komponenten für drahtlose, multifunktionale Mesh-Netzwerke - über 200 Installationen weltweit in der Prozessindustrie ausgeliefert⁸⁴; aktuell werden über 500 Installationen von Honeywell genannt⁸⁵; aufgeführte Branchen, in denen drahtlose Sensornetzwerke eingesetzt werden, sind Chemie, Life Sciences (pharmazeutische Industrie), Metalle, Bergbau, Steine und Erden, Raffinerien, Öl- und Gasförderung.

Der Chip-Hersteller Intel hat z.B. vor Jahren seine Fertigung in Oregon mit 200 drahtlosen Sensoren ausgerüstet, die ständig die Vibrationen bestimmter Anlagen überwachen und bei Überschreiten von Grenzwerten Alarm geben. Diese Art der Überwachung hat insbesondere den regulären Wartungsaufwand reduziert⁸⁶.

Alle genannten Anwendungen von drahtlosen Sensornetzwerken stellen noch verhältnismäßig große Komponenten („Zielgestein“ oder größer) dar, die oftmals über bekannte Mobilfunk- oder Datenübertragungsstandards (GSM, WLAN, etc.) vernetzt werden.

Als Charakteristika und generelle Anforderungen an drahtlose Sensornetzwerke in der Automation benennt Neumann⁸⁷ u.a.:

- Typischer minimaler Abstand zwischen zwei Knoten: Meter
- Größe des Netzes: Anzahl Knoten 100 – 1.000; typische maximale Ausdehnung km x km
- Regenerationszeit einer Verbindung: <500ms (abgeleitet aus den Anforderungen der Automobilindustrie für leitungsgebundene industrielle Kommunikation)
- Skalierbarkeit hinsichtlich Knotenanzahl, räumliche Ausdehnung, Bandbreite
- Koexistenz mehrerer funkbasierter Netzwerke gleicher und/oder unterschiedlicher Technologien

⁸⁴ Klüh, M. (Honeywell): Auf dem Weg zur zweiten Generation – Integration drahtloser Systeme in Industrieanlagen, P&A, April 2007

⁸⁵ Honeywell Webseite: <http://hpsweb.honeywell.com/Cultures/en-US/Products/Wireless/ProvenSuccess/default.htm>

⁸⁶ Ricadela, A.: Sensors Everywhere – A „bucket brigade“ of tiny, wirelessly networked sensors someday may be able to track anything, anytime, anywhere, InformationWeek, 24. Januar 2005

⁸⁷ Neumann, P.: Wireless Sensor Networks in der Prozessautomation – Übersicht und Standardisierungsaktivitäten, Tagung Wireless Automation 2007, 28. Februar – 1. März 2007, Magdeburg

Tabelle 12: Steckbrief Automatisierungstechnik

1. Anwendungsfeld / Rahmenbedingungen	
Bezeichnung	Automatisierungstechnik
Kurzbeschreibung	Steuerung und Regelung in der industriellen Fertigung: Maschinensteuerung, Überwachung (bio-)chemischer Prozesse, Verbrennungsprozesse u.ä.
Konkurrierende Systeme	Feldbus-basierte Systeme
Erwarteter Nutzen	Gegenüber feldbus-basierten Systemen ist ein geringerer Wartungsaufwand (Problem: Kabel) zu erwarten, zielgerichteter Steuerung bzw. Erfassung von Zustandsdaten an Anlagen-/Maschinenteilen und damit unter anderem Energieeinsparungen (z.B. Betreiben von Motoren angepasst an Last)
Ökonomische Randbedingungen	Sofern signifikante Prozessoptimierungen, Rationalisierung, Durchsatzsteigerungen, Reduzierung von Stillstandszeiten, Energieverbrauchsoptimierungen und/oder höhere Prozessausbeuten erzielt werden können ist von einer moderaten bis hohen Zahlungsbereitschaft für AVM auszugehen
Messgrößen (Sensorik)	Zustandsüberwachung (vorbeugende Wartung): Geräusche, Vibration, Temperatur Konzentration von Edukten und Produkten (bio)chemischer Prozesse Strömungsgeschwindigkeit, Temperatur
2. Anwendungsreife	
zahlreiche Forschungs- und Entwicklungsprojekte, kommerzielle Anwendungen in der Automatisierungstechnik, Bereich der Steuerung (bio-)chemischer Prozesse noch nicht adressiert	
3. Systematisierung	
Merkmal	Anforderungen des Anwendungsfelds
Räumliche Platzierung der Sensorknoten	Ausgewählte Platzierung
Zeitliche Platzierung der Sensorknoten	Einmalige Platzierung
Mobilität	Stationär, sofern nicht an beweglichen Teilen; Sonderfall: Einbringung in Reaktionsmedien
Größe der Sensorknoten	Ziegelstein / Streichholzschachtel
Energieversorgung	Batterie oder Umgebungsenergie aus dem Prozess (Bewegung, Strömung, Temperaturdifferenzen)
Heterogenität	überwiegend homogene Netze (auf der Ebene der Sensorknoten)
Kommunikationsart	Funk
Infrastruktur	Bevorzugt Benutzung vorhandener Infrastruktur
Netzwerktopologie	Stern / Sternnetzwerk (Fabrikautomation), Baum / Graph (Prozessautomation)
Sensorabdeckung	lückenhaft (ggf. bei Vibrationsmessungen vollständig)
Konnektivität	bevorzugt ständige Verbindung
Netzwerkgröße	Wenige dutzend bis wenige hundert
Lebensdauer	Mehrere Jahre

Weitere Quality-of-Service Aspekte	Datenübertragung in Echtzeit für bestimmte Anwendungen (Nothalt)	
4. Chancen und Risiken		
	Chancen / Verbesserungspotenzial gegenüber etablierten Technologien	Risiken
Ökologische Aspekte	Energieeinsparungen durch Prozessoptimierung (gezieltere Prozesssteuerung) und vorbeugende Wartung (rechtzeitige Erkennung und Austausch von Verschleißteilen) Höhere Ausbeute (bio)chemischer Prozesse Erhöhte Anlagensicherheit	Zusätzlicher Energieverbrauch des Systems
Soziale Aspekte / Akzeptanz / Datensicherheit	Arbeitssicherheit kann erhöht werden durch frühzeitige Erkennung kritischer Betriebszustände (Schadstofffreisetzungen) bzw. durch Fernbedienung von Prozessen	Akzeptanzrisiko aufgrund Rationalisierungseffekten Einsatz in sicherheitsrelevanten Bereichen (Gefahr von Arbeitsunfällen bei Systemfehlern) Möglichkeiten der Sabotage
5. Zukunftspotenzial der Anwendung und weiterer grundsätzlicher Entwicklungsbedarf		
AVM können wichtigen added-value für Maschinen- und Anlagenbau darstellen; aufgrund potenziell erreichbarer Einsparungen ist zukünftige Anwendung in der Breite zu erwarten, aber mit einer Vielzahl von Ausprägungen dieser Sensornetzwerke aufgrund der Vielzahl an Mess- und Regelaufgaben Für die Fertigungssteuerung sind sehr hohe Anforderungen an Echtzeitfähigkeit und Ausfallsicherheit kritische Faktoren für den Einsatz funkbasierter Systeme Für Anwendungen in Reaktoren und besonders raumbegrenzten Bereichen ggf. Bedarf an Getreidekorn-Größe		

1.4.10 Logistik

Logistik und Supply-Chain-Management sind die vielversprechendsten Bereiche für den Einsatz von RFID (Radio Frequency Identification)⁸⁸, insbesondere auch mit der Möglichkeit, einzelne Frachtgüter über GPS zu lokalisieren⁸⁹ – diese Kombination ist jedoch noch nicht als völlig ausgereift anzusehen⁹⁰. Die zusätzliche Ausstattung dieser RFID-Tags nicht nur mit Identifikationsdaten sondern der Fähigkeit, Umgebungsdaten sensorisch aufzunehmen (aktives RFID) eröffnet zusätzliche Möglichkeiten der Frachtüberwachung, insbesondere wenn eine

⁸⁸ Sonderforschungsbereich 637: Selbststeuerung logistischer Prozesse – Ein Paradigmenwechsel und seine Grenzen, Universität Bremen

⁸⁹ Timm-Giel, A.: Visions and Challenges of Wireless Sensor Network, 6. Fachtagung des ITG Fachausschusses 5.2, 2006

⁹⁰ Banker, S.: Dow's RFID Journey, Insight # 2008-23ELMP, 5. Juni 2008

geschlossene **Kühlkette** für Lebensmittel oder Medikamente sicherzustellen ist^{91,92}.

Auch **Sicherheitsaspekte** sind gegenwärtig ein wesentlicher Treiber für die Entwicklung aktiver RFID-Tags: Die Gesetzgebung in den USA (Stichwort „Homeland Security“) erfordert genaue Angaben über den Inhalt von Containern, die in die USA verschifft werden, sowie die Sicherstellung der Unversehrtheit der Sendung bis zu Ankunft. Aktive RFIDs, z.B. der Firma Savi Technology⁹³, bieten die Möglichkeit, in einem Container Licht zu detektieren (als Hinweis auf unberechtigte Öffnung beim Transport), sowie Feuchtigkeit, Temperatur, Gewalteinwirkung, diese Daten zu speichern und bei Überschreiten vorgegebener Grenzwerte einen Alarm auszusenden.

Weitere Anwendungsfelder bieten sich in der internen Logistik⁹⁴ an, z.B. für das Chemikalienmanagement, das auch besondere Anforderungen an die Arbeitssicherheit und zeitige Detektierung von Leckagen stellt.

Tabelle 13: Steckbrief Logistik

1. Anwendungsfeld / Rahmenbedingungen	
Bezeichnung	Überwachung der Logistikkette
Kurzbeschreibung	Sicherstellen der Kühlkette und Schutz von Containern gegen unbefugte Manipulation
Konkurrierende Systeme	Lückenlose Dokumentation, einfache Umschlagsindikatoren (z.B. Farbveränderung bei einmaliger Temperaturüberschreitung), Versiegelung
Erwarteter Nutzen	Sicherung der Lebensmittel- und Medikamentenqualität
Ökonomische Randbedingungen	Teilweise durch Gesetzgebung begünstigt; im Falle eines Sensorknotens pro Container sind Systemkosten gegenüber dem Frachtwert vernachlässigbar, bei Ausstattung einzelner Verkaufsverpackungen sind höchstens Mehrkosten im Cent-Bereich akzeptabel
Messgrößen (Sensorik)	Temperatur, ggf. Licht
2. Anwendungsreife	
Kommerzielle Systeme zur Überwachung von Containern vorhanden; für einzelne Verkaufsverpackungen im Pilotstadium	
3. Systematisierung	
Merkmal	Anforderungen des Anwendungsfelds

⁹¹ Malinowski, M. K.: CargoNet: Micropower Sensate Tags for Supply-Chain Management and Security, Master Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Februar 2007

⁹² z.B. Sencicasts TempTaleRF

⁹³ Savi Technology, Inc.: Products at a Glance, 2008; siehe "Savi SensorTag ST-676"

⁹⁴ Shen, X.; Wang, Z.; Sun Y.: Wireless Sensor Networks for Industrial Applications, IEEE 5th World Congress on Intelligent Control and Automation, 15.-19. Juni 2004, Hangzhou

Räumliche Platzierung der Sensorknoten	Ausgewählte Platzierung	
Zeitliche Platzierung der Sensorknoten	Kontinuierliche Platzierung	
Mobilität	Passive Mobilität	
Größe der Sensorknoten	Ziegelstein / Streichholzschachtel	
Energieversorgung	Batterie, ggf. Energy Harvesting aus Bewegungsenergie denkbar	
Heterogenität	homogenes Netz (auf der Ebene der Sensorknoten)	
Kommunikationsart	Funk	
Infrastruktur	Bevorzugt Benutzung vorhandener Infrastruktur	
Netzwerktopologie	Stern / Sternnetzwerk	
Sensorabdeckung	vollständig	
Konnektivität	sporadische Verbindung	
Netzwerkgröße	Mehrere Millionen	
Lebensdauer	Mehrere Wochen bis wenige Monate	
Weitere Quality-of-Service Aspekte	Für den Endverbraucher auslesbar	
4. Chancen und Risiken		
	Chancen / Verbesserungspotenzial gegenüber etablierten Technologien	Risiken
Ökologische Aspekte	Logistikoptimierung (höhere Verkehrseffizienz)	Zusätzlicher Energieverbrauch des Systems Einbringung von Elektronik in Verpackungsabfall
Soziale Aspekte / Akzeptanz / Datensicherheit	Sicherheitsgewinn Kontrolle der Qualität von Lebensmitteln und Medikamenten möglich (weniger Lebensmittelkandale)	„gläserner Kunde“ Möglichkeiten der Sabotage nicht ausgeschlossen
5. Zukunftspotenzial der Anwendung und weiterer grundsätzlicher Entwicklungsbedarf		
Großes Potenzial aufgrund der Menge an Warenbewegungen: Mehrere Millionen Container weltweit jährlich, Verkaufsverpackungen gekühlter Lebensmittel in Deutschland in der Größenordnung von 1 Milliarde jährlich		
Low-cost-Technologie zwingend erforderlich für den Lebensmittelbereich		

1.4.11 Gebäudetechnik

In der Gebäudetechnik können drahtlose Sensornetzwerke ein Reihe von Kontroll- und Steuerungsaufgaben übernehmen, z.B. Beleuchtung dimmen und schalten⁹⁵, Thermostate regeln, Bewegungsmelder, Gasetektoren (Rauch, Kohlenmonoxid und andere), Belüftung und Verschattung von Fenstern regeln etc.⁹⁶ Auch Telekommunikationsanbieter, wie z.B. Südkoreas SK Telecom, haben das „Digital Smart Home“⁹⁷ als mögliche Marktlücke erkannt, und bieten – im Falle von SK Telecom seit 2007 - eine Fernüberwachung und –steuerung unterschiedlichster Funktionen im Haus als Service an. SK Telecom vermarktet seine „Smart Home“ Aktivitäten jedoch zunehmend unter dem Aspekt der Vernetzung im Bereich Unterhaltungsmedien, weniger im Bereich der Gebäudetechnik⁹⁸.

ON World Inc. geht in einer Marktstudie zu drahtlosen Sensornetzwerken davon aus, dass der Bereich gewerblicher Gebäude aufgrund höherer angenommener Zahlungsbereitschaft zunächst einen größeren Marktanteil einnehmen wird als Privathaushalte⁹⁹. Dominierende Einsatzzwecke in gewerblich genutzten Gebäuden sind demnach:

- Klima- und Lüftungstechnik,
- Beleuchtung und
- Stromzähler / Energieverbrauch.

Gerade der gewerbliche Bereich verspricht erhebliche Energieeinsparungen^{100,101}, da Energiekosten zunehmend auf die Betriebskosten durchschlagen: Drahtlose Sensornetzwerke werden schon heute zur Überwachung und Steuerung der Klimatisierung von **Rechenzentren** eingesetzt und ermöglichen so geringere Energieverbräuche durch bedarfsangepasste Kühltechnik. Rechenzentren verbrauchen in Deutschland etwa 9,1 TWh Strom, davon entfällt etwa die

⁹⁵ Dubberley, M.; Agogino, A. M.; Horvath, A.: Life-cycle Assessment of an Intelligent Lighting System Using a Distributed Wireless Mote Network, 2004

⁹⁶ Gutierrez, J.A.: On the Use of IEEE Std. 802.15.4 to Enable Wireless Sensor Networks in Building Automation, International Journal of Wireless Information Networks, Vol. 14, No. 4, December 2007

⁹⁷ Sharma, R.; LeCompte, C.: SK Telecom to roll out Ember-enabled ZigBee “digital smart home” services, 2005

⁹⁸ SK Telecom: State-of-the-Art Residential Environment - Digital Home Network, www.sktelecom.com/eng/html/service/Ubiquitous/Network

⁹⁹ erläutert in: Marrón, P.J.; Minder, D. et al.: Embedded WiSeNts Research Roadmap, November 2006

¹⁰⁰ Sensicast Systems Inc.: Sensicast Energy Monitoring Improves Efficiency and Reduces Costs, White Paper, 2006

¹⁰¹ Kalp, D.; Tauche, W.; Newman, J.: Sensicast Chiller Monitoring Application Reduces Cost, Case Study, 2006

Hälfte auf die Infrastruktur (Klimatechnik etc.) der Rechenzentren¹⁰². Selbst ausgehend von einer Verbesserung der Effizienz der Gebäudetechnik in Rechenzentren prognostizieren Stobbe et al. einen Anstieg des Stromverbrauchs von Rechenzentren auf 12,3 TWh jährlich in 2020. Überwachungsaufgaben der Rechenzentren-Infrastruktur umfassen insbesondere¹⁰³

- Temperatur (angepasste Vorlauftemperatur der Kühlluft)
- Luftfeuchtigkeit (Vermeidung von Kondensation, Monitoring der Luftfeuchtigkeit in verschiedenen Bereichen des Serverraums)
- Luftstrom

Tabelle 14: Steckbrief Gebäudetechnik

1. Anwendungsfeld / Rahmenbedingungen	
Bezeichnung	Gebäudetechnik
Kurzbeschreibung	Steuerung und Regelung „Smart Home“
Konkurrierende Systeme	Feldbus-basierte Systeme
Erwarteter Nutzen	Vermeidung von Verkabelung, einfache Nachrüstung im Gebäudebestand
Ökonomische Randbedingungen	Kosteneinsparungen durch effizienteres Gebäudemanagement zu erwarten, Energiekosteneinsparungen
Messgrößen (Sensorik)	Temperatur, Infrarot, Gaskonzentrationen, Helligkeit
2. Anwendungsreife	
Kommerzielle Systeme sind auf dem Markt, Einsatz im gewerblichen Bereich, in Wohngebäuden noch nicht in relevanten Stückzahlen	
3. Systematisierung	
Merkmal	Anforderungen des Anwendungsfelds
Räumliche Platzierung der Sensorknoten	Ausgewählte Platzierung
Zeitliche Platzierung der Sensorknoten	Einmalige Platzierung
Mobilität	Stationär
Größe der Sensorknoten	Ziegelstein / Streichholzschachtel
Energieversorgung	Batterie oder Umgebungsenergie (insbes. Licht)
Heterogenität	überwiegend homogene Netze (auf der Ebene der Sensorknoten)

¹⁰² Stobbe, L.; Schlomann, B.; Friedewald, M.; Georgieff, P.; Leimbach, T.; Nissen, N. F.; Proske, M.: Abschätzung des Energiebedarfs der weiteren Entwicklung der Informationsgesellschaft, Studie des Fraunhofer IZM und des Fraunhofer ISI für das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Abschlussbericht, 12. März 2009, Berlin/Karlsruhe (unveröffentlicht)

¹⁰³ Sencisast Systems Inc.: Wireless Sensor Network Solutions for Data Center Applications, White Paper, 2007

Kommunikationsart	Funk	
Infrastruktur	Bevorzugt Benutzung vorhandener Infrastruktur	
Netzwerktopologie	Stern / Sternnetzwerk	
Sensorabdeckung	lückenhaft	
Konnektivität	sporadisch	
Netzwerkgröße	Wenige dutzend	
Lebensdauer	Mehrere Jahre	
Weitere Quality-of-Service Aspekte	Einfache Integration in bestehende Infrastruktur (z.B. Vernetzung über Settop-Box oder WLAN)	
4. Chancen und Risiken		
	Chancen / Verbesserungspotenzial gegenüber etablierten Technologien	Risiken
Ökologische Aspekte	Energieeinsparungen (Licht, Wärme; Wohn-, Büro- und öffentliche und sonstige Gebäude sind mit rund 40% des Energieverbrauchs in der EU der wichtigste Bereich für Einsparmaßnahmen)	Zusätzlicher Energieverbrauch des Systems (Nutzung für „Convenience“-Anwendungen ohne Einspareffekte)
Soziale Aspekte / Akzeptanz / Datensicherheit	Komfortgewinn	Überwachungsmöglichkeit (Detektierung Anwesenheit von Personen, Bewegungsprofil)
5. Zukunftspotenzial der Anwendung und weiterer grundsätzlicher Entwicklungsbedarf		
Aufgrund potenziell erreichbarer Einsparungen und zunehmenden Trend zur Gebäudeautomation (auch Niedrig-Energie-Häuser) ist zukünftige Anwendung in der Breite zu erwarten.		

2 Rechtliche Rahmenbedingungen und Sicherheitsaspekte

AVM-Hersteller unterliegen einer Vielzahl gesetzlicher und untergesetzlicher Regelungen. Aus ihnen ergeben sich zum einen Verpflichtungen, die die Produktion betreffen, zum anderen aber auch Verpflichtungen, die sich auf ihre Produkte beziehen.

Speziellgesetzliche Vorschriften wie das Elektro- und Elektronikgerätegesetz (ElektroG) oder Geräte – und Produktsicherheitsgesetz (GPSG) sind in erster Linie an die Elektro- und – Elektronikbranchen gerichtet. Andere Gesetze wie das Bundesimmissionsschutz Gesetz (BImSchG), das Bundesdatenschutzgesetz (BDSG) oder das Bundestelekommunikationsgesetz (TKG) können mit ihren Rechtsanforderungen, quasi abstrakt für die Hersteller gelten, da sie das Fundament für weitere Präzisierung bilden.

Auf europäischer Ebene sind insbesondere relevant und Voraussetzung für die CE-Kennzeichnung:

- Electromagnetic Compatibility Directive (89/336/EC)
- Radio and Telecommunications Terminal Equipment Directive (1999/5/EC)

Die Einhaltung der geltenden Produkthanforderungen ist Grundvoraussetzung dafür, dass ein Produkt überhaupt auf den Markt gebracht werden darf. Der Hersteller muss sich daher vor dem Betrieb des Produkts ein vollständiges Bild der Produkthanforderungen machen. Er muss die Pflichten ermitteln, die er vor dem Inverkehrbringen eines Erzeugnisses erfüllen muss. Dies sind insbesondere die Anforderungen, die die Rechtsordnung an sein Produkt stellt. Einerseits gibt es gesetzliche Vorgaben mit direktem Bezug zum Produkt, und andererseits Vorgaben mit indirektem Einfluss auf die Produktgestaltung.

Diese Grundsätze sollen hier zunächst vorgestellt werden, um die konkreten Rechtsanforderungen für den Hersteller aufzuzeigen. Bezugspunkt ist das deutsche Recht. Da die verschiedenen Rechtsverhältnisse unterschiedliche Zwecke verfolgen und unterschiedliche Anforderungen haben werden diese nur für AVMs ausdifferenziert. Um die Vielzahl der Faktoren kontrolliert einsetzen und so möglicherweise auch bedeutende Ergebnisdifferenzen aufzeigen zu können, werden nur die rechtsrelevante Charakteristika beschrieben, die relevant für die Entwicklung und Anwendung von AVMs in der Landwirtschaft und Prozessautomatisierungstechnik sind, da diese Anwendungsfelder im weiteren Verlauf der Studie detaillierter untersucht werden.

2.1 Datenschutz

Sofern von AVM erfasste oder verarbeitete Daten personenbezogen sind und entsprechend zugeordnet werden können, ist Datenschutz ein wichtiges Thema. Solche Informationen tangieren das informationelle Selbstbestimmungsrecht des Betroffenen und sind damit relevant im Sinne von Art. 2 Abs. 1 in Verbindung von Art. 1 Abs. 1 des Grundgesetzes (GG) und § 1 des Bundesdatenschutzgesetzes (BDSG). Für die rechtliche Beurteilung ist das Wissen der einzelnen Verarbeitungsschritte personenbezogener Daten von Bedeutung.

Das Datenschutzrecht erfasst nur personenbezogene Daten, Information also, die sich auf einen Betroffenen individuell beziehen oder beziehen lassen. Personenbezogene Daten sind gem. § 3 Abs. 1 BDSG „Einzelangaben über persönliche oder sachliche Verhältnisse einer bestimmten oder bestimmbarer natürlichen Person (Nutzer).“¹⁰⁴ Bestimmt ist ein Nutzer, wenn die Daten mit dem Namen des Nutzers verbunden sind oder sich auch aus dem Inhalt bzw. dem Zusammenhang der Bezug unmittelbar herstellen lässt. Weniger offensichtlich ist die Bestimmbarkeit einer Person, wenn ihre Identität nicht allein durch die vorhandenen Angaben, sondern erst durch die Kombination dieser Angaben mit anderen Informationen feststellbar ist und wenn dabei kein unverhältnismäßiger Aufwand betrieben werden muss. Nicht erfasst sind deshalb anonyme und Sachdaten. Sachdaten sind alle Angaben, die keinen Bezug zu einer Person aufweisen (z.B. Messwerte, Inventarliste eines Schrankes usw.). Anonymisiert sind Daten, bei denen der Personenbezug dauerhaft beseitigt worden ist, also keine Rückschlüsse auf irgendwelche Personen mehr möglich sind.

In der Landwirtschaft oder in der Automatisierungstechnik ist die primäre Aufgabe eines AVM zunächst die Erfassung von relevanten Messwerten: Bei diesen AVM-Anwendungen werden rein sachliche Daten erhoben. Deshalb findet das BDSG auf beiden Anwendungsfelder keine Anwendung¹⁰⁵. Eine Anwendung kann sich ergeben wenn das AVM Datenbestände über Arbeitnehmer sammeln, die eine umfassende Überwachung und Auswertung von Personen am Arbeitsplatz ermöglichen. Dies gilt zumindest dann, soweit das Verhalten der Arbeitnehmer sensorisch erfasst werden kann. Die Einführung derartiger Maßnahmen dürfen gem. § 87 Abs. 1 Nr. 6 BetrVG nur mit Zustimmung des Betriebsrats oder nach Durchlauf eines Schlichtungsverfahrens eingeführt werden

Im Übrigen, wenn Angaben über persönliche oder sachliche Verhältnisse eines Anwenders direkt auf ein AVM gespeichert werden, unterliegen sie dem Schutz

¹⁰⁴ Vgl. Art 2a der Richtlinie 95/46/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 24 Oktober 1995 zum Schutz natürliche Personen bei der Verarbeitung personenbezogener Daten und zum freien Datenverkehr, Nr. L281 vom 23 November 1995, S. 31

¹⁰⁵ Erheblich kritischer ist das Thema Datenschutz bei hier nicht näher betrachteten Anwendungen in der Medizintechnik zu sehen, wenn der Schutz von gesundheitsbezogenen Patientendaten zu gewährleisten ist

des BDSG und dem Datenschutz konforme Sicherheitsmaßnahmen müssen getroffen werden. Auch wenn auf dem Transponder selbst keine personenbezogenen Daten hinterlegt sind, besteht trotzdem die Möglichkeit, dass über Hintergrundsysteme indirekt ein Personenbezug hergestellt werden kann und unerlaubte Bewegungs- oder Verhaltensprofile erstellt werden. Auch in diesem Fall müssen AVM-Anwendungen unter dem Aspekt des Datenschutzes betrachtet und die nachfolgend beschriebenen Prinzipien eingehalten werden:

Für die Zulässigkeit einer Erhebung, Verarbeitung und Nutzung von personenbezogenen Daten gilt Grundsatz des „Verbots mit Erlaubnisvorbehalt.“¹⁰⁶ Danach ist die Verarbeitung personenbezogener Daten nur erlaubt, wenn der Betroffene eingewilligt hat oder das BDSG oder eine andere Rechtsvorschrift dies erlauben oder anordnen. Da das Verbot mit Erlaubnisvorbehalt im Datenschutzrecht in erster Linie rechtstechnischer Art ist, richtet sich die Auslegung datenschutzrechtlicher Vorschriften im öffentlichen Bereich nach dem Prinzip der Erforderlichkeit zur Aufgabenerfüllung¹⁰⁷, oder im nicht-öffentlichen Bereich nach dem Prinzip der Interessenabwägung¹⁰⁸. Daneben gelten folgende Prinzipien für den öffentlichen und nicht-öffentlichen Bereich gleichermaßen:

- Prinzip der Erforderlichkeit und Datensparsamkeit

Es sollen nur die personenbezogenen Daten verarbeitet werden, die für ein konkretes Vorhaben erforderlich sind¹⁰⁹. Dabei ist nicht quantitativ auf die Menge der Daten abzustellen, sondern qualitativ auf den Grad des Personenbezugs. Für die Gestaltung von den AVM-Systemen ist deshalb der Grundsatz der vermeidenden und sparsamen personenbezogenen Datenspeicherung zu befolgen. Darüber hinaus soll auch von den Möglichkeiten der Anonymisierung und Pseudonymisierung Gebrauch gemacht werden, wo dies mit angemessenem Aufwand möglich ist¹¹⁰. Dieser „Datenschutz durch Technik“ soll Gefährdungen des informationellen Selbstbestimmungsrechts präventiv reduzieren¹¹¹.

- Zweckbindung

Eng mit der Erforderlichkeit hängt die Zweckbindung zusammen. Danach sollen Daten grundsätzlich nur für den Zweck verarbeitet werden, für den

¹⁰⁶ Gola, P.; Schomerus, R.: BDSG, Bundesdatenschutzgesetz, Kommentar, a. a. O., § 4 Rn. 3; Globig, in: Roßnagel, Handbuch Datenschutzrecht, a. a. O., 4.7 Rn. 6; Sokol, in: Simitis, Kommentar zum Bundesdatenschutzgesetz, a. a. O., § 4 Rn. 3.

¹⁰⁷ §§ 13 ff. BDSG,

¹⁰⁸ § 28 I 1 Nr. 2 BDSG

¹⁰⁹ Trute, in: Roßnagel, Handbuch Datenschutzrecht, a. a. O., 2.5 Rn. 43 m. w. N.

¹¹⁰ Vgl. § 3a S. 2 BDSG

¹¹¹ Gola, P.; Schomerus, R.: BDSG-Kommentar, a. a. O., § 3a Rn. 1.

sie erhoben worden sind¹¹². Eine Zweckänderung ist grundsätzlich möglich, bedarf jedoch einer dem neuen Zweck entsprechenden Rechtsgrundlage (Einwilligung oder Rechtsvorschrift) und löst zusätzliche Informationspflichten aus.

- Transparenzgebot

Werden im Zusammenhang mit dem Einsatz von AVM personenbezogene Daten erhoben, verarbeitet oder genutzt, sind die verantwortlichen Stellen gem. § 4 Abs. 3, § 4a Abs. 1 S. 2 BDSG und § 4 Abs. 3 TDDSG zur schriftlichen Benachrichtigung der Anwender hierüber verpflichtet. Darüber hinaus steht dem Betroffenen gem. § 34 Abs. 1 BDSG ein Auskunftsanspruch über gespeicherte personenbezogene Daten, deren Herkunft, eventuelle Empfänger oder Empfängerkategorien und den Zweck der Verarbeitung zu¹¹³. Dies gilt allerdings nur, soweit die Datenerhebung ohne Kenntnis des Anwenders erfolgte.

2.2 Umweltrecht

Das Umweltrecht umfasst eine ganze Reihe von einfachgesetzlichen Normen, von denen für die hier zu klärende Fragestellung das Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) und das Elektro- und Elektronikaltgerätegesetz (ElektroG) von besonderer Bedeutung sind.

2.2.1 Bundes-Immissionsschutzgesetz

Unter Hochfrequenzanlagen werden Anlagen verstanden, die hochfrequente EMF (Elektromagnetische Felder) aussenden. Das ist der Frequenzbereich zwischen 1,4 MHz (z.B. Mittelwelle Rundfunk) bis zu 35 GHz (z.B. Verkehrsradar). Für den Bau und die Inbetriebnahme von derartigen Sendeanlagen sind Erfordernisse und sonstige rechtliche Bindungen zu beachten.

Nach dem BImSchG sind Sendeanlagen nicht genehmigungsbedürftig. Aber nach § 22 Abs. 1 BImSchG sind auch nicht genehmigungsbedürftige Anlagen so zu errichten und zu betreiben, dass schädliche Umwelteinwirkungen verhindert werden, die nach dem Stand der Technik vermeidbar sind.

¹¹² So die Vorgaben in Art. 6 Abs. 1 Buchst. b der EG-Datenschutzrichtlinie für elektronische Kommunikation, Richtlinie 2002/58/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 12. Juli 2002 über die Verarbeitung personenbezogener Daten und den Schutz der Privatsphäre in der elektronischen Kommunikation (Datenschutzrichtlinie für elektronische Kommunikation), ABl. EG L 201 vom 31.07.2002, S. 37.

¹¹³ Trute, in: Roßnagel, Handbuch Datenschutzrecht, a. a. O., 2.5 Rn. 33 in Bezug auf die Dokumentation des Kommunikationsverhaltens. Aus diesem Grund ist auch für Medien- und Teledienste eine Unterrichtung vor der Datenerhebung vorgesehen (§ 18 Abs. 1 MDStV, § 4 Abs. 1 TDDSG).

Nach § 23 Abs. 1 BImSchG können an die Errichtung und den Betrieb nicht genehmigungsbedürftiger Anlagen Anforderungen gestellt werden. Von diesem Recht macht der Erlass der 26. BImSchV Gebrauch, der verbindliche Grenzwerte setzt.

Die 26. BImSchV dient dem Schutz der Allgemeinheit und der Nachbarschaft vor schädlichen Umwelteinwirkungen, sie dient nicht dem Arbeitsschutz und berücksichtigt auch nicht die Wirkung elektromagnetischer Felder auf elektrisch oder elektronisch betriebene Implantate, wie z.B. Herzschrittmacher.

Unter die 26. BImSchV fallen Sendeanlagen, die nicht genehmigungsbedürftig nach dem BImSchG, ortsfeste und gewerbliche genutzte Anlagen, oder Sendefunkanlagen mit einer Sendeleistung von 10 Watt EIRP (äquivalente isotrope Strahlungsleistung) oder mehr im Frequenzbereich von 10 MHz – 300 000 MHz sind. Für diese Anlagen gelten die im Anhang der 26. BImSchV festgelegten Grenzwerte. Diese Grenzwerte sollen insbesondere die Sicherheit der Anwohner von Sendeanlagen gewährleisten.

2.2.2 Entsorgung

AVM werden eine Reihe von Metallen, Halbleitern und Kunststoffen beinhalten. Wie bei anderen Elektronikkomponenten mit komplexer Materialzusammensetzung stellt sich daher auch bei ihnen die Frage der Umweltverträglichkeit und der Entsorgung. Dafür ist das Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten (ElektroG)¹¹⁴ und das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG) entscheidend.

Das ElektroG verfolgt ein klares umweltpolitisches Ziel. Grundsätzlich wird beabsichtigt, Abfälle von Elektro- und Elektronikgeräten zu vermeiden bzw. durch vielfältige Formen der Produktgestaltung und -verwertung die Abfallmengen zu reduzieren. Das Gesetz zielt darüber hinaus auf eine verstärkte Herstellerverantwortung und will Anreize schaffen, schon auf der Konstruktionsebene zu berücksichtigen, dass der Einsatz gefährlicher Stoffe verringert und die Wiederverwertung der Produkte verbessert wird.

2.2.2.1 Elektro- und Elektronikgerätegesetz (ElektroG)

Elektro- und Elektronikgeräte gemäß § 3 Abs. 1 sind Geräte, die zu ihrem ordnungsgemäßen Betrieb elektrische Ströme oder elektrische Felder benötigen. Fraglich ist, ob das Gesetz auch auf AVM anzuwenden ist, da sie als Überwa-

¹¹⁴ Basierend auf den EU – Richtlinien 2002/96/EG über Elektro- und Elektronikaltgeräte (WEEE Richtlinie) und 2002/95/EG über die Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten (RoHS Richtlinie).

chungs- und Kontrollinstrumente einzustufen sind, die von einigen Regelungen ausgenommen sind. Entsprechend dem Leitfaden für die Anwendung der Richtlinie¹¹⁵ ist ein Gerät vom Anwendungsbereich ausgenommen, wenn es Teil eines anderen Gerätes ist, das nicht in den Anwendungsbereich dieses Gesetzes fällt. Dies ist z.B. dann der Fall, wenn das Gerät Teil einer ortsfesten Anlage ist.¹¹⁶ Was als ortsfeste Anlage zu qualifizieren ist wird nicht im ElektroG definiert, der Leitfaden zur Richtlinie über die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV Richtlinie)¹¹⁷ enthält dazu aber eine Definition: Nach dem EMV- Leitfaden sind ortsfeste Anlagen Kombinationen mehrerer Komponenten, Systeme, Endgeräte, Bauteile etc., die durch Fachpersonal installiert werden müssen und nicht durch den Endnutzer selbst angeschlossen werden können, an einem bestimmten Ort zusammengefügt und/oder installiert werden, um in einem zu erwartenden Umfeld zusammenzuarbeiten und eine bestimmte Aufgabe zu erfüllen.

Wenn AVMs Bestandteile einer industriellen festen Installation sind, d.h. der Mess-, Regel-, Steuerungs- und Antriebs-Komponenten, können sie von der Ausnahmeregelung erfasst werden. Außerdem sind Industrieanlagen und die mit ihnen verbundenen elektrischen und elektronischen Komponenten bei einer Entsorgung am Ende ihrer Lebensdauer weder von ihrer Beschaffenheit noch von ihrer Menge her mit denen aus privaten Haushalten vergleichbar. Diese Güter werden auch nicht über den kommunalen Weg entsorgt.

Im Fall landwirtschaftlicher AVM-Anwendungen, wenn AVM-Komponenten auf der landwirtschaftlich genutzten Fläche verteilt werden, sollte sinnvollerweise die Installation und Inbetriebnahme so einfach sein, dass sie direkt durch den Landwirt vorgenommen wird. Auch die einzelnen Komponenten sind durchaus in ihrer Größe und Zusammensetzung mit haushaltsüblichen Geräten vergleichbar – folglich ist das ElektroG auf AVM-Komponenten für den landwirtschaftlichen Einsatz anzuwenden. Damit greifen auch Stoffverbote (z.B. weitgehendes Bleiverbot) und Herstellerpflichten: Für die Rücknahme und das Recycling von Investitionsgütern (Business to Business) sieht das Gesetz neben einer allgemeinen Rücknahmepflicht jedoch keine spezifischen Auflagen vor.

2.2.2.2 Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG)

Problematisch kann bei der Entsorgung von AVMs sein, wenn sie massenhaft in der Landwirtschaft eingesetzt werden und nach ihrer Nutzung nicht mehr funktionieren und damit nicht mehr auffindbar sind. Sie können dann als Abfall

¹¹⁵ Leitfaden für die Anwendung der Richtlinie 89/336/EWG des Rates, geändert durch die Richtlinien 91/263/EWG, 92/31/EWG, 93/68/EWG und 93/97/EWG in der Fassung vom 28. Mai 1997 Punkt 6.5.2.1; S. 38

¹¹⁶ www.bmu.de/files/abfallwirtschaft/downloads/application/pdf/elektrog_hinweise.pdf (15.12.2007)

¹¹⁷ Elektromagnetische Verträglichkeit Richtlinie 2004/108/EG (01. März 2005)

im Boden eingestuft werden. Gemäß § 3 I Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG) können AVM Abfall sein wenn sie vom Besitzer/Erzeuger nicht oder nicht mehr verwendet werden und wenn sich ihr Besitzer ihrer entledigt, entledigen will oder entledigen muss.

Eine Entledigung liegt vor, wenn der Besitzer bewegliche Sachen entweder einer Verwertung oder einer Beseitigung entsprechend des KrW-/AbfG zuführt oder die tatsächliche Sachherrschaft über sie unter Wegfall einer weiteren Zweckbestimmung aufgibt. Der Wille zur Entledigung ist hinsichtlich solcher Sachen anzunehmen, ...wenn, deren ursprüngliche Zweckbestimmung entfällt oder aufgegeben wird, ohne dass ein neuer Verwendungszweck unmittelbar an deren Stelle tritt. Nach Gesetzeslage ist folglich eine Rückholbarkeit von AVM aus dem Boden zwingend erforderlich: ein „Ausähen“ von AVM mit der Intention die Komponenten auch nach Ablauf der technischen Lebensdauer im Boden zu belassen, ist nicht zulässig.

2.3 Informations- und Telekommunikationsrecht

Die Verknüpfung mittels Sensoren gesammelter Daten mit Hintergrundsystemen (hier einen Zentralrechner) macht die Telekommunikation zu einem Grundbaustein der AVM-Anwendungen. Das Telekommunikationsrecht wird auf einfacher Gesetzgebungsebene durch das Telekommunikationsgesetz (TKG) geregelt.

Für den Einsatz von AVM in der Landwirtschaft und in der Prozessautomatisierungstechnik können vor allem die Bereiche der Frequenzordnung bei der Belegung von genehmigungspflichtigen Frequenzen, des Datenschutzes und des Fernmeldegeheimnisses im Rahmen der Telekommunikationsdienste von Relevanz sein.

2.3.1 Frequenzordnung

Bei der Entwicklung von AVM muss eine Entscheidung bezüglich der zu verwendenden Frequenz getroffen werden, die im Rahmen der Wireless Standards sowie den von der Frequenzordnung vorgegebenen Bereichen liegen muss.

Die häufigsten Frequenzbereiche der Wireless Sensor Systems sind 315 MHz, 433 MHz, 868 MHz (Europa), 915 MHz (Nordamerika) und die 2.4-GHz Industrial-Scientific-Medical (ISM) Frequenz. Einer der attraktivsten Bereiche für AVM ist das lizenzfreie ISM Band (Industrial, Scientific, Medical) bei 2,4 GHz¹¹⁸ oder

¹¹⁸ Beigl, M.: Ubiquitous Computing (Ubiquitäre Informationstechnologien), 2006
<http://www.teco.edu/lehre/ubiqws0506/05communicationbv.pdf>

das lokale 900-MHz-ISM-Band (entweder 868 oder 900 MHz)¹¹⁹ Dies sind z.B. auch die Frequenzen des Standards 802.11b und Bluetooth.

Die heute bekannten Breitbandverfahren haben zwar klare Vorteile, sind für Sensornetzwerke dennoch nicht optimal geeignet. Insbesondere bei einem massenhaften Einsatz von AVM-Systemen können sich aus der begrenzten legal verwendbaren Frequenzanzahl faktische Beschränkungen (quantitativ und regional) ergeben. Z.B. der hohe Stromverbrauch dieser Systeme, die relativ hohe Strahlenbelastung der Umgebung (Human Exposure) sowie die schwierige Abschirmung und Interferenzen mit Elektrogeräten stehen ihrem Einsatz entgegen. Für die Frequenzbereiche im 860 MHz-Band bestehen auch Einschränkungen der Frequenzbelegungsdauer¹²⁰ und der erlaubten Sendeleistungen.

Ultra Wideband- (UWB-) Systeme gewinnen an Bedeutung für Sensoren und lokalitätsbasierte Dienste innerhalb von Gebäuden. Die Koexistenz von WLAN- und UWB-Installationen im gleichen Ortsbereich scheint möglich zu sein. Es fehlt allerdings noch ein gemeinsamer Standard für UWB. Auch die Regulierung ist in Europa noch offen. In der Literatur wird aber diskutiert ob Frequenzen von 70 GHz und mehr geeignet für kleine Sensorknoten sind^{121,122}. Eine solche Nutzung ist vor allem in kritischen Anwendungsfeldern (Medizin, Ernährung, Verkehr, Sicherheit) denkbar, weil Störungsfreiheit und Verfügbarkeit in diesen Fällen eine sehr hohe Priorität haben.

2.4 Produkthaftung

Die Anwendung von Haftungsnormen richtet sich nach ihrer Anwendung in konkreten Situationen und den Beteiligten. Bei der Frage der Produkthaftung geht es vorrangig um die Frage von Schadenersatzansprüchen. Auf den Hersteller können durch Personenschäden bei Anwendern Schadenersatzansprüche in großer Höhe zukommen. Für die Hersteller stellt sich die Frage, mit welchen Rechtsfragen sie im Einzelnen konfrontiert werden können und zu welchem Maßnahmen sie im Vorfeld dieser Entwicklungen gegebenenfalls rechtlich verpflichtet sind, um Schadenersatzanforderungen zu vermeiden.

¹¹⁹ Humphrey, D. W.: Die drahtlosen Sensoren : 2005: http://www.compotek.de/uploads/media/Computer_Automation_02-2005.pdf. (12.2.2008)

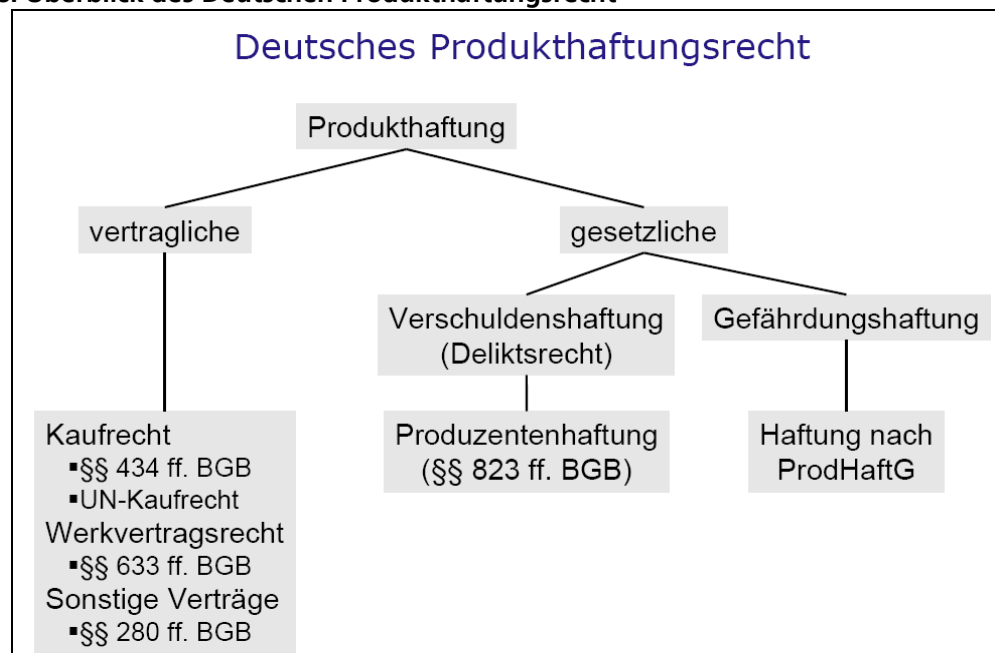
¹²⁰ Bundesnetzagentur: Allgemeinzuteilung von Frequenzen in den Frequenzbereichen 868 – 870 MHz und 169 MHz für nichtöffentliche Funkanwendungen für Alarmierungszwecke (Vfg. 20/2006)

¹²¹ Building Wireless Sensor Networks: A variety of factors contributes to the successful design and operation of a wireless sensor network (WSN), including propagation conditions and requirements for size and power consumption, 2006, <http://mwrf.com/Articles/Index.cfm?ArticleID=11071&pg=2>

¹²² Chalard, L.; Helal, D.; Verbaere, L.; Wellig, A.; Zory, J.: Wireless Sensor Networks Devices: Overview, Issues, State-of-the-Art and Promising Technologies, ST Journal of Research, Vol. 4, Nr. 1, Wireless Sensor Networks, 2007

Die (End-) Produkthaftung bezeichnet die zivilrechtliche Verantwortlichkeit insbesondere des Herstellers für Schäden, die durch die Verwendung von durch ihn in den Verkehr gebrachte Produkte entstehen¹²³. Die in diesem Sinne zu verstehende Produkthaftung bedarf der Abgrenzung zur vertraglichen Haftung, zur strafrechtlichen Produktverantwortlichkeit und zur öffentlich-rechtlichen Produktsicherheit.

Abbildung 8: Überblick des Deutschen Produkthaftungsrecht



2.4.1 Vertragliche Haftung

Vertragliche Ansprüche gegen den Hersteller kommen nur dann in Betracht, wenn zwischen dem Käufer und Hersteller ein wirksames Vertragsverhältnis besteht, also nicht über eine Absatzkette hinweg.

Da in mehrgliedrigen Produktions- und Vertriebsprozessen des AVM keine vertraglichen Beziehungen zwischen dem Hersteller und dem Anwender bestehen, ist das Gewährleistungsrecht für den Hersteller wichtig, weil die Entscheidungsgrundlage der Vertrag (einschließlich der allgemeinen Geschäftsbedingungen und von Gewährleistungsausschlüssen) ist. Ist kein Vertrag vorhanden, gelten die Vorschriften des BGB.

¹²³ Diestch, Ahrens: Deliktsrecht, 4 Aufl.2002 Rn.271

Den Kern der vertraglichen Produkthaftung bildet die Gewährleistung für Sachmängel. Zweck des Gewährleistungsrechts ist es, die durch einen Mangel des AVM bedingte Störung des Verhältnis von Leistung und Gegenleistung durch Ansprüche auf Minderung (Herabsetzung des Kaufpreises), Rücktritt und / oder Nacherfüllung sowie ggf. Schadenersatz auszugleichen (§437 BGB). Zur Beweislast muss vor dem Verkauf der Verkäufer nachweisen, dass sein Produkt mangelfrei ist. Nach dem Verkauf, hat der Käufer die Mängel des Produktes nachzuweisen.

Der Hersteller haftet nur, wenn das AVM einen erheblichen Fehler hat (§ 459 1 BGB). Ein Fehler liegt bei jeder für den Anwender nachteiligen Abweichungen der Ist-Beschaffenheit von der vertraglich vereinbarten Soll-Beschaffenheit vor, wobei der Fehler bereits bei Gefahrübergang (§ 346, 447 BGB) vorhanden sein muss, ohne dass der Anwender vom Fehler Kenntnis bei Abschluss des Vertrages hatte. Hierbei ist zunächst von Relevanz, welcher Vertragstyp beim Erwerb des AVM zugrunde zulegen ist. Dabei ist unter dem Sammelbegriff der AVM die Gesamtheit aller Software und Hardware zu verstehen, die das Produkt zur Erledigung der Aufgabe benötigt.

Die Haftung für Folgeschäden (auch „Haftung aus positiver Vertragsverletzung“) tritt ein, falls schuldhaft vertragliche Pflichten verletzt wurden. D. h. hier werden auch Folgeschäden auf Gesundheit oder anderes Eigentum berücksichtigt und die Beweislast liegt beim Geschädigten.

2.4.2 Produktsicherheitsgesetz

Schutzziel des GPSG ist der Arbeitsschutz und der Schutz der Verbraucher, die an oder mit technischen Arbeitsmitteln arbeiten¹²⁴. In persönlicher Hinsicht schützt das Gesetz auch jeden Dritten, der mit dem Produkt in Berührung kommt, oder in dessen Gefahrenbereich gelangt, ohne es selbst zu nutzen¹²⁵.

2.4.3 Außervertragliche Haftung des Herstellers

Schäden können und entstehen sehr häufig außerhalb von bestehenden Schuldverhältnissen. Die Idee einer außervertraglichen Haftung ist es, jedermann vor einer rechtswidrigen Beeinträchtigung seiner Rechtssphäre zu schützen. Dies gilt im Speziellen auch für den Schutz vor fehlerhaften Produkten. Es steht die Gefährdung oder Schaden des Nutzers, nicht die Funktionstüchtigkeit im Mittelpunkt. Die außervertragliche Produkthaftung gründet sich auf das Produkthaftungsgesetz (ProdHaftG) - und die allgemeinen Haftung des Produ-

¹²⁴ Wilrich: GPSG, 1. Aufl. 2004, Einleitung. Rn. 2, 4

¹²⁵ Vgl. § 4 Abs. 1,2 GPSG; Wirich, Einleitung Rn. 5.

zenten nach Regelungen des Bürgerlichen Gesetzbuches (BGB) – beides ist jedoch weitgehend nur für den privaten Lebensbereich relevant.

Die deliktische Haftung nach §§ 823 Abs 1, 2 sowie 831 BGB knüpft anders als das ProdHaftG nicht an die Herstellung der Sache an, sondern es kommt darauf an, wer eine Gefahrenquelle geschaffen hat. Damit ist eine Verschuldungshaftung wegen unerlaubter Handlung neben den Spezialbestimmungen des Produkthaftungsgesetzes das juristisch schärfste Mittel zugunsten Geschädigter. Es wird also im Rahmen der deliktischen Haftung regelmäßig an ein Unterlassen angeknüpft. Die dafür erforderliche Garantenstellung ergibt sich aus der Tatsache, dass Hersteller und Händler Massenprodukte auf den Markt bringen und dadurch den Verbraucher einer Gefahr aussetzen. Diese Gefahr haben sie, soweit es ihnen zumutbar ist, zu vermeiden.

AVM-Entwickler könnten in diesem Zusammenhang als Produzenten angesehen werden, wenn sie das System vollständig entwickeln und das Endprodukt in Verkehrbringen.

Geschützte Rechtsgüter

Im Rahmen des § 823 Abs. 1 BGB werden sämtliche absolute Rechte und Rechtsgüter geschützt. Das Leben, der Körper, die Gesundheit und das Eigentum werden explizit genannt. Häufiger als Personenschäden, können Fehler durch AVM-Software sonstige Rechte beeinträchtigen. Beeinträchtigungen in Form einer Verletzung der Gegenstände in den sie eingebracht worden. Im § 823 Abs. 1 BGB wird durch das Eigentum auch die Integrität von Daten geschützt. Eine Zerstörung, Löschung oder Veränderung an gespeicherten Daten führt grundsätzlich zu einer Eigentumsverletzung. Voraussetzung für eine Eigentumsverletzung ist jedoch stets, dass die Daten auf einem Datenträger der AVM-Anwender gespeichert waren¹²⁶.

Durch Beeinträchtigungen der bestimmungsgemäßen Verwendung im unternehmerischem Bereich drohen durch fehlerhafte AVM hohe Schadenssummen, wenn der AVM-Defekt zu Betriebsstörungen und Produktionsausfällen führt. Maßgebliche Kriterien für die Schadenshöhe sind die Intensität und der Zeitraum der Nutzungsbeeinträchtigung¹²⁷. Für die Anwendung der Verschuldenshaftungsregelung ist auch Voraussetzung, dass der Schaden dem Produzent nicht nur zugeordnet, sondern auch persönlich vorgeworfen werden kann. Es muss fahrlässig oder sogar vorsätzlich gehandelt worden sein.

Voraussetzungen einer Haftung

¹²⁶ Spindler, in: Hoeren, T.; Sieber, U.: Handbuch Multimedia-Recht 13 Ergänzungslieferung, München 2006, Rn. 364

¹²⁷ BGH NJW 1994, 517 (518)

Der entscheidende Anknüpfungspunkt für die Produzentenhaftung ist die Verletzung von Verkehrssicherungspflichten^{128, 129} und diese Pflicht dient der Begründung der Widerrechtlichkeit in Fällen mittelbarer und durch Unterlassen verursachter Verletzung absoluter Rechte. Die Verkehrssicherungspflicht, ist die Pflicht, eine Gefahrquelle entweder von vornherein zu vermeiden oder eine bestehende zu beseitigen oder zumindest einzudämmen. Die Verkehrssicherungspflicht erfordert es nicht, jede nur denkbare Gefahr auszuschalten. Es genügen diejenigen Maßnahmen, die ein umsichtiger und verständiger, in vernünftigen Grenzen vorsichtiger Mensch für notwendig und ausreichend hält, um andere vor Schaden zu bewahren.¹³⁰

Hieraus wurden im Laufe der Zeit von der Rechtsprechung eine Reihe einzelner Verkehrspflichten abgeleitet, die sämtliche Phasen von Produktentwicklung,-Fertigung, und- Vertrieb betreffen:

- Konstruktionsfehler

Von einem Konstruktionsfehler spricht man, wenn ein Hersteller nicht alle technisch möglichen Sicherheitsvorkehrungen trifft, die gewährleisten, dass derjenige Sicherheitsgrad erreicht wird, den die im entsprechenden Bereich herrschende Verkehrsauffassung für erforderlich hält, um Drittschäden zu vermeiden. Die liegt z.B. vor, wenn die ganze Produktserie bei Herstellung an einem Fehler leidet, der gegen die neuesten Erkenntnisse und Vorgaben (z.B. DIN-Normen) in Forschung und Entwicklung verstößt, oder der Fehler war nach dem Stand der Wissenschaft und Technik im Zeitpunkt des Inverkehrbringens nicht erkennbar¹³¹.

- Fabrikationsfehler

Ein Fabrikationsfehler liegt vor, wenn einzelne Exemplare aufgrund eines planwidrigen Fehlverhaltens eines Arbeitnehmers oder einer Fehlfunktion einer Maschine beim Herstellungsverfahren mangelhaft sind.

- Instruktionsfehler

Der Hersteller ist auch verpflichtet, den Verbraucher mit dem Umgang des Produktes vertraut zu machen und ihn auf die Gefahren aufmerksam zu machen, die beim Verbraucher verbleiben.

¹²⁸ Palandt, O.: Bürgerliches Gesetzbuch, 66 Auflage. München 2007. § 823, Rnr 58.

¹²⁹ MünchKomm-Cahn, § 3 ProdHaftG, Rn.3

¹³⁰ BGH NJW 07, 1683 Rdn. 14; ähnlich BGH NJW 04, 1449

¹³¹ Maryl, Softwareüberlassungsverträge, Rn. 1306

Gegenüber gewerblichen Abnehmern, die fachkundig sind, treffen den Hersteller nur eingeschränkte Instruktionspflichten, da er davon ausgehen kann, dass diese über die typischen Gefahren und den richtigen Gebrauch des Produktes informiert sind¹³².

- Produktüberwachungspflicht.

Entsprechend seiner Pflicht zur Produktbeobachtung ist der Hersteller gehalten seine Produkte sowohl auf noch nicht bekannte schädliche Eigenschaften hin zu beobachten, als sich auch über deren sonstige, eine Gefahrenlage schaffenden Verwendungsfolgen zu informieren. Zudem ist er verpflichtet, laufend den Fortgang der Entwicklungen von Wissenschaft und Technik auf dem einschlägigen Gebiet zu verfolgen. Darüber hinaus muss er zumindest Beanstandungen des Produktes nachgehen und diese überprüfen.

2.5 Sicherheitsaspekte

Wie bei allen funkbasierten Computernetzwerken gibt es die Möglichkeit, Angriffe gegen die in AVM eingesetzten Komponenten auszuführen. Diese Komponenten sind beispielsweise die Hardware, die Software oder auch die verwendeten Kommunikationsprotokolle.

Ein Angreifer kann verschiedene Motivationsgründe haben einen Angriff auf in der Landwirtschaft oder in der Automatisierungstechnik eingebrachte AVM durchzuführen. Ein Angreifer kann die Absicht haben das Sensornetzwerk zu kompromittieren und damit Zugriff auf firmeninterne Daten zu erhalten, die über das Netzwerk übertragen werden. Angriffe können auch durch Vandalismus oder Diebstahl stattfinden.

Eine Übersicht über mögliche Angriffe und Angriffstechniken auf Mobile Ad Hoc Networks, die auch auf Wireless Sensor Networks übertragbar sind, werden u.a. von Endler und Ebinger¹³³, Huang und Lee¹³⁴, Michiardi und Molva¹³⁵

¹³² OGL Karlsruhe VersR. 2003, Zitiert bei Bamber/Roth/Spindler Kommentar zum BGB 2. Aufl. § 823 Rn.508

¹³³ Endler, S.; Ebinger, P.: Konzeption und Implementierung von Angreifermodellen und verbesserten Methoden für die Angriffserkennung in mobilen Ad-hoc-Netzen Master Thesis. 1/2008
<http://publica.fraunhofer.de/starweb/servlet.starweb?path=pub0.web&search=N-34667>.

¹³⁴ Huang, Yi an, Lee, Wenke: A Cooperative Intrusion Detection System for Ad Hoc Networks. In: SASN '03: Proceedings of the 1st ACM workshop on Security of ad hoc and sensor networks. New York, NY, USA : ACM Press, 2003, S. 135–147

¹³⁵ P. Michiardi, R. Molva: CORE: A Collaborative Reputation Mechanism to enforce node cooperation in Mobile Ad hoc Networks / Institut Eur'ecom, Sophia-Antipolis, France. Version:Dezember 2001. http://cawwww.epfl.ch/salem/Publications/References/michiardi_adhoc_core.pdf 2001. – Research Report (RR-02-062)

und Walters et al.¹³⁶ beschrieben. Nachfolgend werden die wichtigsten WSN-Angriffsrisiken, die für AVM wichtig sind, kurz erläutert.

2.5.1 Angriffsrisiken

Routing Angriffe richten sich gegen das im Netzwerk verwendete Routing-Protokoll. Zur Durchführung von Angriffen können beispielsweise Routing-Datenpakete mit falschen Informationen eingeschleust oder die Routing-Tabellen der beteiligten Knoten gezielt manipuliert werden, so dass diese unwissend falsche Informationen verbreiten. Die Manipulationen sollen das Finden von Informationsrouten beeinflussen, so dass beispielsweise unerwünschte Routing-Schleifen entstehen oder das Netzwerk in mehrere Partitionen aufgeteilt wird. Bei der Partitionierung werden zwischen den betroffenen Teilen des Netzwerks keine Routen mehr gefunden, obwohl entsprechende Kommunikationsmöglichkeiten zwischen ihnen bestehen.

Beispiele für diese Angriffe sind die sogenannte **“Sinkhole“- und “Wormhole“-Angriffe**. Bei einem “Sinkhole“-Angriff werden Teile oder sogar der gesamte Datenverkehr eines Bereichs des WSNs zu einem vom Angreifer ausgewählten Sensorknoten geroutet. Es besteht dann die Möglichkeit, dass der Knoten die weiterzuleitenden Daten analysieren und jeweils entscheiden kann, ob er sie weiterleitet oder einfach verwirft (engl. droppt). Dieses Verhalten wird als selektives Weiterleiten (engl. selective forwarding) bezeichnet. Verwirft ein Knoten dauerhaft alle von ihm weiterzuleitenden Nachrichten, so wird dieser Spezialfall auch “Blackhole“-Angriff genannt^{137, 138}.

Bei einem “Wormhole“-Angriff werden, gegebenenfalls zusätzlich zu einem “Sinkhole“-Angriff, alle von einem Knoten empfangenen Nachrichten direkt zu einem zweiten ausgewählten Sensorknoten weitergeleitet. Zwischen den beiden Sensorknoten entsteht auf diese Weise ein Art Tunnel, durch den der betroffene Datenverkehr geleitet wird. Ein mögliches Ziel eines “Wormhole“-Angriffs ist z.B. die Überlastung des Knotens, der sich am Tunnelende befindet. Ein Angreifer kann gezielt ein sehr hohes Datenaufkommen über diesen Knoten leiten, um ihn zu überlasten. Zudem kann ein Angreifer den gesamten Datenverkehr, der über das “Wormhole“ weitergeleitet wird, mitlesen und gegebenenfalls beeinflussen.

¹³⁶ Walters, J.P.; Liang, Z.; Shi, W.; Chaudhary, V.: Wireless Sensor Network Security: A Survey / Department of Computer Science, Wayne State University. – Forschungsbericht.

¹³⁷ Aad, I.; Hubaux, J.-P.; Knightly, E.: Denial of Service Resilience in Ad Hoc Networks. In: Proc. of the 10th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, ACM Press, Philadelphia, PA, USA (2004), pp. 202–215.

¹³⁸ Al-Shurman, M.; Yoo, S.-M.; Park, S.: Black Hole Attack in Mobile Ad Hoc Networks. In: Proc. of the 42nd Annual ACM Southeast Regional Conference, ACM Press, Huntsville, AL, USA (2004), S. 96–97.; Bucher, T.: Modellierung und Analyse von Angriffen auf Routingverfahren in mobilen Ad-hoc-Netzen. Diplomarbeit, Technische Universität Darmstadt, 2005

Beim **Sybil-Angriff** versucht ein Knoten, im Netzwerk mehrere Identitäten anzunehmen. Das kann der Angreifer auf zwei verschiedene Arten erreichen, indem er eine neue Identität generiert und diese zusätzlich zu seiner echten vor-täuscht, oder indem er eine existierende echte Identität eines anderen Knotens stiehlt. Der Vorteil eines Angreifers, der mehrere Identitäten besitzt, besteht darin, dass er u.U. verstärkt im Netzwerk agieren kann, ohne dabei entdeckt zu werden, da er seine Aktivitäten verschleiern kann¹³⁹.

Der wirkungsvollste **Denial-of-Service** (DoS) Angriff auf ein funkbasiertes Netzwerk ist eine Störung (engl. Jamming) der verwendeten Funkfrequenzen mittels Störsignalen. Die vom Netzwerk per Funk übertragenen Daten werden dadurch entweder unbrauchbar gemacht oder die Teilnehmer am Senden der eigenen Daten gehindert. Aufgrund des häufig eingesetzten "listen before talk" (Carrier Detect Multiple Access, CDMA) Verfahrens erkennen die Teilnehmer, dass die Funkfrequenz belegt ist und warten auf das Ende der vermeintlichen Übertragung, bevor sie ihre eigenen Daten übertragen¹⁴⁰.

Ein Spezialfall von DoS-Angriffen auf Sensornetze stellen so genannte "energy depletion" dar. Dies bietet einem Angreifer die Möglichkeit die Sensorknoten früher als vorgesehen ausfallen zu lassen, indem der Angreifer sie dazu anregt übermäßig viel Energie zu verbrauchen. Den besten Ansatzpunkt für solch einen Angriff bietet das Funkmodul, da es im aktiven Zustand den größten Stromverbraucher eines Sensorknotens darstellt. Dies kann ein Angreifer ausnutzen, in dem er Knoten dazu veranlasst, möglichst viele oder große zusätzliche Nachrichten zu empfangen oder zu versenden. Wenn keine Energie mehr vorhanden ist, fallen die Sensorknoten aus.

Insider Angriffe

Da in vielen Einsatzszenarien und besonders in der Landwirtschaft die Sensorknoten in unsicheren Umgebungen verwendet werden, gibt es eine andere Möglichkeit die Verfügbarkeit des Sensornetzwerks durch die physikalische Zerstörung der Sensorknoten oder deren Manipulation einzuschränken. Als unsicher wird eine Umgebung bezeichnet, zu der ein Angreifer ohne große Mühen Zugang erlangen und die Sensorknoten direkt manipulieren kann. Ist er dabei erfolgreich, kann er Zugriff auf die in den Knoten gespeicherte Schlüssel erhalten und diese für eigene Zwecke einsetzen.

¹³⁹ Newsome, J.; Shi, E.; Song, D.; Perrig, A.: The Sybil Attack In Sensor Networks: Analysis & Defences. In: IPSN '04: Proceedings of the third International symposium on Information processing in sensor networks. New York, NY, USA : ACM Press, 2004, S. 259–268

¹⁴⁰ Karlof, C.; Wagner, D.: Secure Routing in Wireless Sensor Networks: Attacks and Countermeasures University of California at Berkeley

Durch die Verwendung der gültigen symmetrischen Schlüssel kann der Angreifer z.B. unbemerkt von den anderen Sensorknoten im Netzwerk mitwirken. Er kann so beispielsweise gezielt übertragene Daten manipulieren, insbesondere wenn diese über einen von ihm kompromittierten Knoten weitergeleitet werden, oder eigene Daten in das Sensornetzwerk einschleusen.

Schutz vor einem Auslesen der Speicherinhalte eines Knotens kann durch physikalisch-technische Maßnahmen erreicht werden, wie sie beispielsweise bei Smartcards vorgesehen sind¹⁴¹. Dabei wird der Bereich um einen EEPROM-Chip durch eine Schutzschicht umgeben, deren Zerstörung ebenfalls den gesamten Chip unbrauchbar macht. So kann der Zugriff auf die gespeicherten Daten verhindert werden, bevor ein Auslesen möglich ist.

2.5.2 Sicherheitsanforderungen für die Einsatzszenarien

Eine der größten Bedrohungen für ein AVM besteht darin, dass ein Angreifer unerkannt im Netzwerk mitwirken kann. Das Vorgehen ist meist das Kompromittieren von Sensorknoten, so dass der Sensorknoten im Interesse des Angreifers agiert. Diese kompromittierten Knoten bieten einen Ausgangspunkt, von dem aus weitere Angriffe vorbereitet und ausgeführt werden können¹⁴². Daher ist es für ein AVM sehr wichtig, diese kompromittierten Knoten möglichst frühzeitig zu erkennen und ausschließen zu können, zumal die korrekte Funktionsweise des Sensornetzwerkes durch diese Knoten erheblich gestört werden kann und Schaden bei Anwender hervorrufen kann¹⁴³. Aus den identifizierten Angriffsrisiken ergibt sich für das Einsatzszenario „Landwirtschaft und Automatisierungstechnik“ die folgenden Sicherheitsanforderungen.

Verfügbarkeit: Die Leistungsfähigkeit des AVM hängt direkt davon ab, wie schnell und zuverlässig Messwerte und Daten an die Senke weitergeleitet werden. Das AVM soll daher möglichst unempfindlich gegen Ausfall von Sensorknoten und auftretende (Funk-) Störungen sein. Auch eine gezielte Störung (DoS / Jamming) durch einen Angreifer soll das Netzwerk möglichst wenig beeinträchtigen. Speziell im Szenario Automatisierungstechnik ist es wichtig, dass Alarmmeldungen schnell und zuverlässig an die Senke gemeldet werden, um Eindringlinge frühzeitig erkennen zu können.

¹⁴¹ Eckert, C.: IT-Sicherheit. Konzepte, Verfahren, Protokolle . 3. Auflage. Oldenburg Verlag, 2004

¹⁴² Schlosser, A.: Simulation von Reputationsberechnungsverfahren in globalen und lokalen Reputations-Systemen., IT Transfer Office, Technische Universität Darmstadt, Diplomarbeit, November 2004. <http://www.inferenzsysteme.informatik.tu-darmstadt.de/~schlosser/paper/theses/schlosser-thesis.pdf>

¹⁴³ Zinaida, B.; Freiling, F.C.: On the Feasibility and Meaning of Security in Sensor Networks in 4. GI/ITG KuVS Fachgespräch „Drahtlose Sensornetze“ ETH Zürich 23.–24. März 2005 Kay Römer (Editor)

Vertraulichkeit: Die im Anwendungsfall Landwirtschaft übertragenen Informationen besitzen nicht die Notwendigkeit einer vertraulichen Handhabung. Wird das Sensornetzwerk jedoch zum Messen und zur Übertragung von Steuerdaten für Maschinen oder Labor- und Forschungsdaten eingesetzt wie in der Automatisierungstechnik, so kann die Vertraulichkeit der Informationen erforderlich sein (Industriespionage).

Integrität der Daten: Eine wesentliche Anforderung an die übermittelten Informationen ist der Schutz vor ungewollter oder nicht nachvollziehbarer Veränderung. Ein Angreifer kann weitergeleitete Informationen, deren Integrität nicht geschützt ist, für seine Zwecke verändern, ohne dass die Manipulation erkennbar ist. Im Fall der Automatisierung und Prozessüberwachung müssen daher die Prozesse vor Veränderung geschützt werden.

Authentizität (Daten und Teilnehmer): Wenn das AVM keine Authentifikationsmechanismen für seine Teilnehmer bereitstellt, so kann ein Angreifer ungehindert am Netzwerk teilnehmen. Mittels eines Sybil-Angriffs kann er zudem beliebig viele andere Teilnehmer repräsentieren und somit das Sensornetzwerk in seiner Funktionsweise erheblich stören. Daher ist es zwingend notwendig, dass sich Sensorknoten im Netzwerk authentifizieren müssen. Desweiteren ist es notwendig, dass die versendeten Informationen authentisch sind. Ansonsten kann ein Angreifer im Namen eines anderen Teilnehmers gefälschte Nachrichten ohne Aufwand in das Netzwerk einbringen.

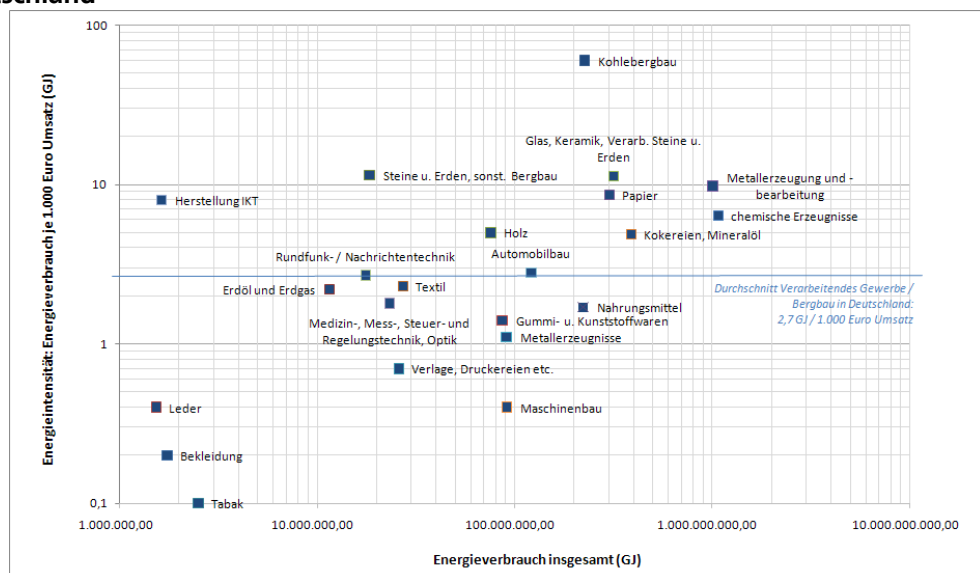
Einen ersten Ansatz bietet die Verwendung eines Regelwerks, um bereits kompromittierte oder defekte Sensorknoten zu erkennen und aus dem Netzwerk auszuschließen. Regelwerke werden beispielsweise von Firewalls zur Erkennung von Angriffen eingesetzt, um die Korrektheit von übertragenen Nachrichten zu überprüfen. Dabei muss das Regelwerk eine Unterscheidung zwischen gefälschten Datenpaketen und netzwerkbedingten Übertragungsfehlern aufgrund von Funkstörungen ermöglichen.

Es bedarf proaktiver Maßnahmen, die eine Schadensentwicklung von Beginn durch standardisierte Lösungen unterbindet. Dies ist insbesondere auch deswegen erforderlich, weil die Verletzung von Sorgfaltspflichten oder das Fehlen von Sicherheitsmaßnahmen als Negativbeispiel öffentlich werden kann und damit das Vertrauen in den konkreten Betreiber in Zweifel ziehen, aber auch die Akzeptanz von AVM generell vermindern kann.

3 Rahmenbedingungen und Szenarien für Beispielanwendungen in der Automatisierungstechnik

Zu den energierelevantesten Industriebranchen in Deutschland gehören die Grundstoffherzeugung (Metalle, Glas, Keramik, Papier, Chemie, Kokereien / Mineralölverarbeitung) und Bergbau (siehe Abbildung 9). Diese sind sowohl bezüglich des absoluten Energieverbrauchs als auch auf der Energieintensität bezogen auf den Branchenumsatz Spitzenreiter. Diese Branchen bieten daher auch den größten Hebel für Energieeinsparungen durch ein intelligentes Prozessmonitoring. Der Automobilbau spiegelt in seiner Energieintensität ziemlich genau den Durchschnitt des verarbeitenden Gewerbes und Bergbaus in Deutschland wieder. Auffällig ist auch der Bereich der Herstellung von Büromaschinen, Datenverarbeitungsgeräten und –einrichtungen, hier verkürzt als IKT zusammengefasst, der zwar nur mäßig zum Gesamtenergieverbrauch in Deutschland beiträgt, aber gemessen am Branchenumsatz eine hohe Energieintensität aufweist – bei vergleichsweise hochwertigen Produkten¹⁴⁴.

Abbildung 9: Energieverbrauch in ausgewählten Branchen des verarbeitenden Gewerbes und des Bergbaus in Deutschland



¹⁴⁴ Angaben beruhen auf: Statistisches Bundesamt: Energieverbrauch des Verarbeitenden Gewerbes nach ausgewählten Wirtschaftszweigen 2007

Die Automatisierungstechnik nimmt eine Schlüsselstellung für nahezu alle industriellen Branchen und Fertigungsprozesse des verarbeitenden Gewerbes ein. Sie hat, angetrieben durch den steigenden internationalen Kosten- und Wettbewerbsdruck, die technischen Möglichkeiten im Maschinen- und Anlagenbau sowie den I&K-Technologien, in den letzten Jahrzehnten stark an Bedeutung gewonnen. Automatisierungstechnik ist zudem Bestandteil vieler Infrastrukturen z.B. der Energie- und Wasserversorgung sowie der Telekommunikation. Sie erfüllt damit auch eine wichtige Funktion für die Grundversorgung der Gesellschaft¹⁴⁵.

Grund für die Entwicklung einer leistungsfähigen Automatisierungstechnik ist vor allem, Produktionskosten zu senken und qualitativ reproduzierbare Produktions- und Fertigungsbedingungen zu schaffen. In einigen Branchen, wie z.B. in der Elektronik- oder der Automobilzuliefererindustrie hat der Automatisierungsgrad bereits ein hohes Maß erreicht und nimmt eine wettbewerbsbestimmende Funktion ein¹⁴⁶.

Der Begriff der Automatisierungstechnik umfasst unterschiedliche Themen der Messung, Steuerung, Regelung, Überwachung, Fehlerdiagnose und der Optimierung in der Gebäude- und Fabrikautomation. Innerhalb der Automatisierungstechnik wird zudem in die Fertigungs- und Prozessautomatisierung unterschieden. Sie umfasst somit auch das Steuern, Regeln und Sichern verfahrenstechnischer und chemischer Anlagen¹⁴⁷. Zu den Teilgebieten und den damit verbundenen Aufgaben der Automatisierungstechnik zählen somit die Mess-, Steuer- und Regelungstechnik, die Kommunikationstechnik, die Prozessanalysetechnik, die Prozess- und Betriebsführungstechnik, die Antriebstechnik, die Robotik sowie die betriebliche Logistik¹⁴⁸.

Darüber hinaus nimmt die Automatisierungstechnik zunehmend eine wichtige Funktion zur Steigerung der Material- und Energieeffizienz in der Produktion ein. Die Mess-, Steuer- und Regeltechnik sowie die Prozessautomatisierung spielen beispielsweise eine wichtige Rolle bei der Leistungsadaption von elektrischen Antrieben, Pumpen und Kompressoren und ermöglichen dadurch die Reduktion des Energieverbrauchs in der Produktion und der Energieerzeugung.

¹⁴⁵ Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. (ZVEI) Fachverband Automation; Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (IZT): Integrierte Technologie-Roadmap Automation 2015+, Frankfurt a.M., 2006, S. 7

¹⁴⁶ Kinkel, S.; Som, O.: Struktur und Treiber des Innovationserfolgs im deutschen Maschinenbau, Mitteilungen aus der ISI-Erhebung zur Modernisierung der Produktion, Nummer 41, Fraunhofer Institut System- und Innovationsforschung, Karlsruhe, 2007

¹⁴⁷ Lunze, J.: Automatisierungstechnik, 2. Aufl., Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München, 2007

¹⁴⁸ Vgl. NAMUR – Interessengemeinschaft Automatisierungstechnik der Prozessindustrie; VDI/VDE Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik; Fraunhofer Institut Produktionstechnik und Automatisierung: Abschlussbericht Technologie-Roadmap Prozess-Sensoren 2005 – 2015, Leverkusen, 2006

3.1 Herausforderungen für die Automatisierungstechnik

Die Automatisierungstechnik befindet sich weltweit im Umbruch. Neben technischen und ökonomischen Faktoren nehmen auch zunehmend gesellschaftliche Fragestellungen wie z.B. Umwelt- und Ressourcenschutz, gesellschaftliche Verantwortung von Unternehmen sowie Sicherheitsaspekte Einfluss auf die Entwicklung der Branche (zu den Herausforderungen der Automatisierungsbranche siehe z.B. ZVEI/IZT¹⁴⁹). Im Folgenden werden ausgewählte Faktoren dargestellt, die einen Einfluss auf die Automatisierungstechnik haben:

- *Wandel von Märkten und industriellen Fertigungsstrukturen:* Das rasche Wirtschaftswachstum in Schwellenländern führt zum Ausbau industrieller Fertigungsstrukturen in diesen Ländern und damit auch zu einer stärkeren Nachfrage nach Automatisierungstechnik. Gleichzeitig nimmt auch im Inland aufgrund hoher Lohnkosten und internationalem Konkurrenzdruck der Bedarf zu. In den Industriestaaten gibt es zudem seit Jahren einen Trend zu einer stärkeren Automatisierung von Fertigungsprozessen.
- *Enabler- und Schlüsseltechnologien:* Entscheidend für die Entwicklungen in der Automatisierungstechnik ist die Verfügbarkeit verschiedener Enabler- und Schlüsseltechnologien, wie z.B. die Sensorik, die Aktorik sowie die Kommunikations- und Softwaretechnik. Sie haben in den zurückliegenden Jahren zu deutlichen Innovationsschüben geführt und werden auch in der Zukunft die Entwicklungsgeschwindigkeit maßgeblich beeinflussen. Enabler- und Schlüsseltechnologien nehmen damit eine Schrittmacherfunktion für die Entwicklung der Automatisierungstechnik ein. Dieser Effekt gilt jedoch auch in gleicher Weise für die Rolle der Automatisierungstechnik innerhalb vieler neuer und alter Technologiefelder, so nimmt diese z.B. eine Schrittmacherfunktion für die Biotechnologie, die Mikroelektronik und viele Infrastrukturtechnologien, wie z.B. die Energie- und Wasserversorgung, die Verkehrstechnik u.a. ein.
- *Standardisierung und Entwicklung offener Schnittstellen:* Die Standardisierung z.B. von Softwareschnittstellen, Kommunikationsprotokollen, Systemumgebungen sowie Steuerungs- und Benutzeroberflächen stellt eine große Herausforderung für die weitere Entwicklung der Automatisierungstechnik dar. Offene Standards wie z.B. ZigBee¹⁵⁰ fördern die

¹⁴⁹ Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. (ZVEI) Fachverband Automation; Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (IZT): Integrierte Technologie-Roadmap Automation 2015+, Frankfurt a.M., 2006, S. 7

¹⁵⁰ ZigBee ist ein offener Funknetz-Standard, der es ermöglicht, Haushaltsgeräte, Sensoren, etc. auf Kurzstrecken (10 - 100 m) zu verbinden. (siehe <http://www.zigbee.org>, letzter Abruf April 2008)

vertikale und horizontale Integration unterschiedlicher Komponenten und Teilsysteme der Automatisierungstechnik und ermöglichen deren breiten Einsatz mit kalkulierbarem Aufwand. In der Zukunft könnten darauf aufbauend auch selbstkonfigurierende Systeme entwickelt werden.

- *Lösungspotenzial für gesellschaftliche Herausforderungen:* Die verstärkte Nutzung von Automatisierungstechnik kann zur Lösung gesellschaftlicher Herausforderungen beitragen. So kann durch ihren Einsatz z.B. ein Beitrag zur Energie- und Ressourceneffizienz geleistet werden, indem die Produktionsprozesse optimiert, die Ausbeute gesteigert oder auch effizientere Produktionsprozesse überhaupt erst ermöglicht werden. Durch den Einsatz von Automatisierungstechnik könnten viele Produktionsprozesse kosteneffizienter gestaltet werden, was zu Kostensenkung bei Produkten führen kann. Andererseits können durch den verstärkten Einsatz von Automatisierungstechnik auch der Energieverbrauch erhöht und Arbeitsplätze reduziert werden. Ihr Einsatz kann somit ambivalente gesellschaftliche Effekte hervorrufen. Ob und in welchem Maß sie zur Lösung gesellschaftlicher Herausforderungen wie Umweltproblemen, einer kostengünstigen Versorgung mit Gütern oder der Schaffung von Arbeitsplätzen beiträgt kann nur im Einzelfall und unter Berücksichtigung der Rahmenbedingungen des jeweiligen Einsatzes beantwortet werden.

3.2 Bedeutung von Sensorik in der Automatisierungstechnik

Ein wesentliches Element der Automatisierungstechnik besteht in der Informationsgewinnung und -verarbeitung, z.B. in Form von Maschinen- und Anlagenzuständen, Materialfluss- oder Produktionsdaten. Die meisten dieser Parameter werden durch kabelgebundene Sensoren erfasst, die Maschinen und Anlagen steuern, überwachen und regeln. Innerhalb der Automatisierungstechnik nimmt daher die Sensorik eine zentrale Stellung ein. Unter Sensorik wird die Wandlung nichtelektrischer Messgrößen, wie z.B. Veränderungen von physikalischen und chemischen Zuständen, in elektrische Signale verstanden¹⁵¹.

Die Interessengemeinschaft Automatisierungstechnik der Prozessindustrie (NAMUR) hat im Jahr 2006 die wichtigsten Anforderungen an die Entwicklung

¹⁵¹ Schlemmer, H.: Grundlagen der Sensorik. Eine Instrumentenkunde für Vermessungsingenieure, Wichmann Verlag, Heidelberg, 1996

von Sensorik aus Sicht der Prozessindustrie formuliert und in einer Technologie-Roadmap zu Prozess-Sensoren zusammengefasst¹⁵², dazu zählen:

- *Spezifische Anforderungen der chemischen Industrie:* z.B. Explosionssicherheit, Hygieneanforderungen und konstruktive Vorgaben,
- *Interoperabilität:* Austauschbarkeit unterschiedlicher Generationen von Sensoren ohne erneute Validierung. Hieraus folgt auch, dass das zur Erzeugung der Messgröße notwendige Beziehungswissen möglichst im Prozesssensor konzentriert sein sollte,
- *Kalibrierung und Justierung:* Möglichst minimaler Aufwand für Kalibrierung und Justierung, bzw. selbstständige oder automatisierte Kalibrierung, andernfalls schneller und einfacher Austausch der Sensoren,
- *Inspektion:* Möglichst minimale Inspektion und Wartung bzw. inhärente und zuverlässige Wartungsdiagnose,
- *Kommunikation:* Wichtige Messgrößen müssen ohne externes Beziehungswissen interpretierbar sein,
- *Bedienung:* Einfache und intuitive Bedienbarkeit.

Grundvoraussetzung für alle Sensoren ist zudem, dass durch die Messung der Prozess nicht chemisch, thermodynamisch oder strömungstechnisch beeinflusst wird. Weitere spezifische Anforderungen ergeben sich aus Sicht der Automatisierungstechnik. Sie beziehen sich insbesondere auf die Einschränkungen, die durch die Verkabelung der Sensoren entstehen (vgl. EnAS¹⁵³ und IWC¹⁵⁴):

- *Kosten und Flexibilität:* Die Verkabelung ist teuer und benötigt Platz. Dadurch werden die Konstruktion sowie Umbauten, Erweiterungen und Wartungen von Maschinen und Anlagen aufwändig und schwerer planbar. Rotierende Teile können nur unter hohem Aufwand oder gar nicht verkabelt werden und durch die Verkabelung wird die Beweglichkeit eingeschränkt. Die Sensoren können durch die notwendige Kabelführung nicht immer am optimalen Messort platziert werden.

¹⁵² NAMUR – Interessengemeinschaft Automatisierungstechnik der Prozessindustrie; VDI/VDE Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik; Fraunhofer Institut Produktionstechnik und Automatisierung: Abschlussbericht Technologie-Roadmap Prozess-Sensoren 2005 – 2015, Leverkusen, 2006, S. 18f

¹⁵³ In Anlehnung an die im Forschungsprojekt „Energieautarke Aktoren und Sensoren (EnAS)“ beschriebenen Einschränkungen (siehe <http://www.energieautark.org>, letzter Abruf Dezember 2008).

¹⁵⁴ Industrial Wireless Community (IWC), U.S. Department of Energy: Industrial Wireless Technology for the 21st Century, Dezember 2002

- *Räumliche Verteilung:* Eine feine räumliche Verteilung von Sensoren ist aufgrund der oben genannten Einschränkungen nur schwer bzw. mit hohem Aufwand realisierbar. Dies stellt insbesondere für die Sensorik in der Prozessindustrie (z.B. in Bioreaktoren oder Reaktionsbehältern) eine große Herausforderung dar.
- *Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit:* Verkabelungen und deren Anschlüsse sind anfällig und können durch Kabelbrüche oder defekte Steckerverbindungen für Ausfälle in der Automatisierungstechnik verantwortlich sein, die wiederum Wartung und damit Kosten nach sich ziehen.
- *Verfügbarkeit von Informationen:* Die Nutzung von Kabeln für die Signalübertragung schränkt die Verfügbarkeit der übertragenen Information ein. Sie ist jeweils nur über einen Kontakt mit dem Kabel abruf- und nutzbar.

3.3 Rahmenszenario digitale Produktion 2020

Ausgangspunkt für die Analyse zukünftiger Anwendungsfelder von AVMs in der Automatisierungstechnik soll das Rahmenszenario „Digitale Produktion 2020“ bilden. Es hat zum Ziel, ein konsistentes Zukunftsbild für die Automatisierungstechnik zu entwerfen und beruht auf der Analyse vergleichbarer Arbeiten¹⁵⁵ sowie den Aussagen von Experten aus dem Bereich der Automatisierungstechnik (siehe Anhang). In ihm sind die wichtigsten Annahmen und Rahmenbedingungen für die Entwicklung der Automatisierungstechnik mit dem Zeithorizont 2020 zusammengefasst. Das Rahmenszenario dient somit auch als Grundlage für die Entwicklung und Bewertung spezifischer Anwendungsszenarien von AVMs in der Automatisierungstechnik.

Rahmenszenario: Digitale Produktion 2020

Im Jahr 2020 ist die digitale Planung, Steuerung und Kontrolle von Produktionsprozessen Standard in der industriellen Massenproduktion. Produktentwicklung, Fabrikplanung, Produktionsplanung, Produktion, Disposition und Logistik werden in großen Teilen informationstechnisch geplant, gesteuert und kontrolliert. Der digitale Planungs- und Produktionsprozess erstreckt sich damit vom Zulieferer bis zum Kunden.

Treibende Kräfte für diese Entwicklung sind die Fortschritte in der Informations- und Kommunikationstechnik sowie in der Automatisierungstechnik. Die Grundlage der digitalen Produktion sind leistungsfähige Computer und „Smart Sensors“, die die gesamte Prozesskette steuern und nach

¹⁵⁵ Vgl. hierzu auch die Arbeiten des Fraunhofer Instituts für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO) und des Fraunhofer Instituts für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) im Rahmen des Innovationsclusters „Digitale Produktion“ unter http://www.fraunhofer.de/institute/innovationscluster/digitale_production.jsp bzw. das Zukunftsbild „Digitale Fabrik 2020“ des Instituts für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (IZT) in ZVEI, IZT (2006: 20).

dem Prinzip des „Grid Computing“ autonome Teilbereiche der Produktionskette koordinieren. Die vernetzten Computer und Sensoren verfügen über Fähigkeiten künstlicher, neuronaler Netze und sind daher teilweise zur autonomen Auswertung von Fehlern und Selbstorganisation fähig. Dadurch optimieren sich Produktionsprozesse in Grenzen eigenständig. Durch den Einsatz lernfähiger und selbstoptimierender Produktionstechniken wird auch die Fertigung kundenindividueller Produktvarianten (mass customization) möglich.

Entscheidend für die präzise Auswertung, Steuerung und Kontrolle der Prozesse sind eine leistungsfähige Sensorik und Aktorik und deren Einbindung in das Computernetzwerk. Parameter wie z.B. physikalische Messwerte, Zustandsdaten und Bilddaten aus der Produktionskette werden durch „Smart Sensors“ in Echtzeit erfasst, innerhalb autonomer Teilnetze der Produktionskette ausgewertet und in Steuerungsimpulse z.B. für die Automatisierungstechnik übersetzt.

Der Einsatz leistungsfähiger und kostengünstiger AVMs in der Sensorik erlaubt, dass physikalische Parameter berührungslos erfasst und drahtlos an viele Empfänger gleichzeitig weitergegeben werden. Dies ermöglicht zum einen eine parallele und multifunktionelle Auswertung im Sensor- und Computernetz und erlaubt zum anderen eine Feinabstimmung der Aktorik in Echtzeit.

Die informationstechnische Planung, Steuerung und Kontrolle der Produktionskette wird für die Verbesserung der Produktion unter Gesichtspunkten der Energie- und Ressourceneffizienz genutzt. AVMs ermöglichen eine Planung und Steuerung der Produktionsprozesse im Optimalzustand. Durch die Auswahl von Rohstoffen und Vorprodukten sowie die Planung von Lieferterminen, Mengen und Auslastungen der Zulieferer werden weitere Umwelteffekte vermieden.

Durch den großflächigen Einsatz von Automatisierungstechnik gehen viele Arbeitsplätze mit niedriger Qualifikation in der Produktion verloren. Dies gilt sowohl für die Industrieländer, als auch für die Schwellenländer, in denen das Lohnniveau und der Lebensstandard steigen. Dagegen steigt der Bedarf an wenigen hoch qualifizierten Kräften, die mit der Planung, dem Aufbau und dem Betrieb der Produktionsanlagen beschäftigt sind. Die Anforderungen an diese Fachkräfte wachsen zudem, da sie transdisziplinär im Überschneidungsbereich von Informatik, Elektrotechnik und den Ingenieurwissenschaften qualifiziert sein müssen.

3.4 Anwendungsfelder und Potenziale für Autonome Verteilte Mikrosysteme (AVM) in der Automatisierungstechnik

Die im vorangegangenen Abschnitt erläuterten Anforderungen an die Entwicklung der Sensorik für die Automatisierungstechnik sowie das dargestellte Rahmenszenario zeigen vielfältige Einsatzmöglichkeiten für drahtlose Sensoren auf. Diese besitzen das Potenzial, viele der genannten Anforderungen zu erfüllen und insbesondere die mit der Verkabelung verbundenen Einschränkungen zu reduzieren.

Diese Einschätzung deckt sich auch mit den von ON World¹⁵⁶ prognostizierten Zuwächsen in der Anzahl der Anwender von 33% für Industrieanwendungen drahtloser Sensornetzwerke bis 2011 verglichen zum Stand 2007. Diese Zuwächse verteilen sich wie in Tabelle 15 gelistet auf die unterschiedlichen Einsatzfelder.

Tabelle 15: Zunahme der Nutzer bestimmter industrieller Anwendungen für drahtlose Sensornetzwerke

	Anzahl Nutzer
Maschinenzustandsüberwachung	+ 122%
Prozessüberwachung	+ 32%
Anlagenüberwachung	+ 300%
Gebäudetechnik	+ 14%
Füllstandsüberwachung Tankanlagen	+ 75%
Überwachung Ventile u.ä.	+ 14%
Sicherheit	+ 86%

Im Folgenden sollen insbesondere Autonome Verteilte Mikrosysteme (AVM) als eine spezielle Form drahtloser Sensoren betrachtet werden. Der Einsatz von energieautarken AVMs könnte die Verkabelungen für die Sensorik in der Automatisierungstechnik stark reduzieren und dadurch neue Konzepte in der Anlagen- und Prozesstechnik ermöglichen. Rotierende und bewegliche Anlagenkomponenten könnten damit leichter realisiert und räumlich fein verteilte Messwerte „in situ“ erfasst und zur Steuerung und Regelung von Produktionsprozessen und Reaktionen genutzt werden.

Durch ihre Fähigkeit zur drahtlosen, bidirektionalen Kommunikation in einem Netzwerk könnte durch den Einsatz von AVMs auch die Vernetzung der Sensoren untereinander realisiert werden. Dies würde grundsätzlich neue Möglichkeiten für die Steuerung und Abstimmung von Prozesssteuerungs- und Automatisierungskomponenten im Nahfeld sowie unter Echtzeitbedingungen ermöglichen. Dadurch wären neben der Verbesserung der Produktionsqualität auch deutliche Potenziale zur Steigerung der Energieeffizienz in der Automatisierungstechnik realisierbar.

3.4.1 Erfassung von Anwendungsfeldern und Potenzialen

Um die Anwendungsfelder von drahtlosen Sensoren und insbesondere AVMs in der Automatisierungstechnik zu erfassen, wurden zwei Zyklen von Experteninterviews durchgeführt.

¹⁵⁶ ON World Inc.: WSN for Smart Industries, 2007, Pressemitteilung

In einer ersten Befragungsrunde wurden 12 Experten aus den Feldern der Automatisierungstechnik sowie der drahtlosen Sensornetze befragt, die aufgrund ihrer Mitgliedschaft in Branchen- oder Forschungsorganisationen sowie ihres Fachwissens und ihrer Berufserfahrung als ausgewiesene Experten auf dem Feld gelten. Weiterhin wurde bei der Auswahl der Experten auf eine ausgeglichene Verteilung aus Wirtschaft, Forschung und Verbänden geachtet¹⁵⁷. Drei der interviewten Experten stammten aus den USA, die neben Europa einen weiteren zentralen Forschungs- und Entwicklungsstandort für drahtlose Sensorik sowie und Automatisierungstechnik darstellen.

Im folgenden Abschnitt werden zunächst die zentralen Aussagen zum Stand und den Entwicklungschancen drahtloser Sensortechnik dargestellt, bevor auf die Potenziale einzelner Anwendungen in der Prozess- und Automatisierungstechnik eingegangen wird.

3.4.2 Status-Quo und Entwicklungschancen drahtloser Sensortechnik

Nach Aussage der befragten Experten befindet sich die Technologie drahtloser Sensornetze heute auf einem Stand, der dem von Mikroprozessoren in den 70er Jahren vergleichbar ist. Verglichen mit dem theoretischen Einsatzpotenzial können bisher nur verhältnismäßig einfache Anwendungen realisiert werden. Für die weitere Entwicklung von AVMs sind demnach die folgenden Punkte maßgeblich:

- *Weiterentwicklung von Teilkomponenten von AVMs:* Während die Miniaturisierung der zentralen Bauteile (Sensor, Funkelement, Energieversorgung, etc.) für viele Anwendungsbereiche bereits akzeptable Größenordnungen im Bereich weniger Kubikzentimeter oder kleiner erreicht hat, stellt insbesondere die Zuverlässigkeit der Komponenten und ihre Einsatzfähigkeit unter realen Bedingungen (Temperatur, Staub, elektromagnetische Felder, etc.) große Anforderungen an die technische Weiterentwicklung. Zudem sind neue technische Konzepte für die Realisierung kostengünstiger, miniaturisierter und standardisierter Bauteile, wie z.B. Antennen, Sensoren und Energieversorgungseinheiten nötig, um neben den zu erwartenden Skaleneffekten einer zukünftigen Produktion deutliche Preisreduktionen für die Bauteile zu erzielen. Vorbild hierfür können z.B. gedruckte Schaltkreise oder Antennen (printed electronics) liefern, die deutliche Fortschritte in Bezug auf eine effiziente und kostengünstige Fertigungstechnologie erlauben.
- *Entwicklung zuverlässiger AVM-Systeme und Systemkomponenten:* Eine wesentliche Herausforderung für die Weiterentwicklung von AVMs liegt

¹⁵⁷ Eine anonymisierte Auflistung der Experten findet sich in Anhang 9.1.

nach der Aussage von Experten in der Entwicklung zuverlässig arbeitender Gesamtsysteme aus weniger zuverlässigen Einzelkomponenten. So können beispielsweise Defizite in der Übertragungsleistung von Funksignalen durch die redundante Übertragung in unterschiedlichen Frequenzbändern¹⁵⁸ oder auch durch die Reduktion der zu übertragenden Daten durch intelligente Sensoren (Smart Sensors) gemindert werden, die einen Teil der Datenauswertung eigenständig vornehmen. Durch die Nutzung fehlertoleranter Technologien und Ansätze, wie z.B. der Komplexitätsreduktion in den Einzelkomponenten und der redundanten Verteilung zentraler Funktionen auf mehrere Komponenten (z.B. parallele Energieversorgung aus Batterie und Brennstoffzelle) kann die Ausfallswahrscheinlichkeit von AVMs stark reduziert werden. Eine Schlüsseltechnologie für die Entwicklung zuverlässiger AVM-Systeme und Systemkomponenten stellen insbesondere auch Software und damit verbundenen standardisierten Übertragungsformate dar, da sie die Voraussetzung für die Verbindung sowie die Systemintegration von einzelnen Sensorknoten in ein Netzwerk sind.

3.4.3 Anwendungsfelder in der Automatisierungstechnik

Die Experten wurden zu den Anwendungsfeldern und -branchen von drahtlosen Sensornetzen in der Automatisierungstechnik befragt. Ziel dieser Erhebung war zum einen, die zukünftigen Marktpotenziale der Automatisierungstechnik mit dem Zeithorizont 2020 zu erfassen und zum anderen, konkrete Anwendungsfelder für AVMs in der Automatisierungstechnik zu erheben.

Zu den wichtigsten zukünftigen Anwendungsfeldern und -branchen der Automatisierungstechnik zählen nach Auffassung der Experten in absteigender Reihenfolge:

- Zustandsüberwachung und Energiemanagement von Maschinen, Gebäuden, etc. (7 Nennungen)
- Energieerzeugung und -versorgung (6 Nennungen)
- Chemie- und Pharmaindustrie (4 Nennungen)
- Automobil- und Transportindustrie (4 Nennungen)
- Elektronikindustrie (4 Nennungen)

¹⁵⁸ Sexton, D.: Distributed Wireless Multi-Sensor Technologies, Final report for the U.S. Department of Energy, Contract DE-FC36-04GO14001, prepared by GE Global Research Schenectady, NY, 2008, S. 12f

Die Experten wurden zudem nach den, aus Ihrer Sicht, wichtigsten Schlüsseltechnologien und Komponenten für die Weiterentwicklung der Automatisierungstechnik befragt. Zu ihnen zählen in absteigender Reihenfolge:

- Sensorik (7 Nennungen)
- Software (6 Nennungen)
- Funk- und Kommunikationstechnologien (6 Nennungen)

Innerhalb der Sensorik wurden von den Experten keine eindeutigen Festlegungen auf besonders kritische, zu entwickelnde Sensoren getroffen. Während insbesondere die Sensorik für Druck- und Temperaturmessung als weitestgehend ausgereift gilt, so wird bei der pH-Wert-Messung sowie der Durchfluss- und Konzentrationsmessung noch Entwicklungsbedarf gesehen.

Keine eindeutige Aussage wurde bezüglich der verwendeten Funk- und Kommunikationstechnologien getroffen. Derzeit konkurrieren unterschiedliche Standards (Wireless HART, Zigbee, WLAN, Bluetooth), die je nach Anwendungsfall zum Einsatz kommen. Die Entwicklung international gültiger und offener Standards wird jedoch als erfolgskritisch für den Einsatz von drahtlosen Sensoren und Sensornetzen gesehen, da die bisher existierenden proprietären Lösungen auf mittlere Sicht eher zu Einzellösungen spezifischer Hersteller führen können und somit eine Vernetzung unterschiedlicher Sensornetze beim industriellen Anwender erschweren.

Als besonders kritisch für den Einsatz von drahtlosen Sensoren und Sensornetzwerken in der Automatisierungstechnik sehen die befragten Experten die folgenden Faktoren:

- Energieversorgung und Energieeffizienz von Sensoren (6 Nennungen)
- Zuverlässigkeit (6 Nennungen)
- Lebensdauer (4 Nennungen)
- Kosten (4 Nennungen)

Die genannten Faktoren geben Zielkorridore für die Entwicklung von AVMs und ihren Teilkomponenten vor¹⁵⁹. Eine genauer Quantifizierung kann nur für einen spezifischen Anwendungsfall und in Verbindung mit den Kosten ermittelt wer-

¹⁵⁹ Zu vergleichbaren Anforderungen kommt auch ein aktuelles Forschungsvorhaben des U.S. Department of Energy, dessen Ergebnisse erst nach Durchführung der Interviews publiziert wurden (vgl. Sexton 2008: 7 ff).

den, da sie je nach Anwendungsfall höchst unterschiedlich sein können. Z.B. können sich in Einzelfällen auch hohe Kosten und eine geringe Lebensdauer von AVMs rechtfertigen, wenn die über den Einsatz erzielten Effizienzsteigerungen oder Verfügbarkeiten von Maschinen und Anlagen diese Kosten aufwiegen.

Schließlich wurden die Experten noch nach den spezifischen Potenzialen befragt, die durch den Einsatz drahtloser Sensoren und Sensornetze in der Automatisierungstechnik entstehen können. Hier wurden mit deutlichem Abstand die vereinfachte Installation (7 Nennungen) durch den Wegfall der Verkabelung sowie eine verminderte Wartung von Maschinen und Anlagen (6 Nennungen) genannt.

Als ein viel versprechendes Anwendungsfeld von AVMs wurde aus den Aussagen der Experten der Einsatz zur Zustandsüberwachung von elektrischen Antrieben und Motoren in der Automatisierungstechnik identifiziert. Die Gründe hierfür werden im Folgenden zusammengefasst:

- *Anforderungen aus der Praxis:* Die Zustandsüberwachung und das Energiemanagement von Maschinen sowie die verminderte Wartung wurden von den Experten mit hoher Übereinstimmung als ein großes Potenzial für den Einsatz drahtloser Sensoren und Sensornetze identifiziert, da diese Aufgaben mit existierenden Sensortechnologien nur unter großem Aufwand bzw. erheblichen Kosten realisiert werden können.
- *Effizienzpotenzial:* Elektrische Antriebe und Motoren werden in der Automatisierungstechnik in großen Stückzahlen eingesetzt. In Deutschland wurden nach Angaben des ZVEI im Jahr 2007 mehr als 150 Mio. Elektromotoren hergestellt¹⁶⁰, die in den unterschiedlichsten Anwendungsfeldern zum Einsatz kommen. Dementsprechend können auch kleine Effizienz- und Wirkungsgradsteigerungen bei elektrischen Antrieben und Motoren in der Summe große Auswirkungen haben. Dies gilt sowohl für Kosteneinsparungen durch einen reduzierten Stromverbrauch oder die Verringerung von Wartungszyklen, wie auch die Steigerung der Energie- und Ressourceneffizienz.
- *Internationaler Vergleich:* Eine Vielzahl von Studien im internationalen Umfeld hat das Feld der elektrischen Antriebe und Motoren als ein Gebiet mit hohem Effizienzpotenzial identifiziert^{161,162,163,164}. Die wenigsten

¹⁶⁰ Daten beruhen auf aktuellen Informationen des ZVEI vom dem November 2008, die telefonisch abgefragt wurden.

¹⁶¹ Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. (VDE): Effizienz- und Einsparpotentiale elektrischer Energie in Deutschland. Perspektive bis 2025 und Handlungsbedarfe, Frankfurt a.M., 2008

dieser Studien gehen jedoch explizit auf die Anwendung von AVMs in der Automatisierungstechnik und die daraus resultierenden Potenziale ein.

Im folgenden Abschnitt wird daher ein Anwendungsszenario für den Einsatz von AVMs zur Zustandsüberwachung von elektrischen Antrieben und Motoren entwickelt. Dabei werden zunächst das Anwendungsfeld und die Einsatzmöglichkeiten charakterisiert bevor schließlich ein Anwendungsszenario und daraus resultierende Anforderungen beschrieben werden. Das Marktpotenzial für das Anwendungsszenario wird in Kapitel 5.1 abgeschätzt.

3.5 Einsatz von AVMs zur Zustandsüberwachung von elektrischen Antrieben und Motoren

Für die Ausgestaltung des Anwendungsszenarios wurde eine zweite Interviewserie mit fünf ausgewählten Experten geführt¹⁶⁵, die aufgrund ihrer Teilnahme in Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten im Bereich elektrischer Antriebe und Sensorik sowie vergleichbaren Roadmapping-Aktivitäten über Qualifikationen zur Bewertung und Spezifizierung des Anwendungsszenarios besitzen.

3.5.1 Charakterisierung des Anwendungsfeldes

Eine wichtige Komponente der Automatisierungstechnik stellen elektrische Antriebe dar, deren zentrales Aggregat wiederum Elektromotoren (in Form von Synchron- und Asynchronmotoren mit Gleich- oder Wechselstromanschluss) bilden. Sie kommen z.B. in Mixern, Förderbändern, Verpackungsmaschinen, Pumpen, Lüftungsanlagen oder auch Druckluft-Anlagen zum Einsatz und bilden damit die Grundlage vieler Anlagen der Fertigungs- und Prozessautomatisierung.

Elektrische Motoren kommen in der Automatisierungstechnik in verschiedenen Größen und Formen zum Einsatz. Ihre Leistung reicht von wenigen Watt (W) bis hin zu mehreren hundert Kilowatt (kW). Elektromotoren stellen einen der Hauptverbraucher von Strom in der Industrie dar. Nach einer aktuellen Studie des VDE verbrauchen Elektromotoren sogar mehr als die Hälfte des in Deutsch-

¹⁶² Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. (ZVEI) Fachverband Automation; Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (IZT): Integrierte Technologie-Roadmap Automation 2015+, Frankfurt a.M., 2006, S. 7

¹⁶³ US Department of Energy: Wireless Sensor Network. Advanced Energy Management Solution for Industrial Motors. CPS #14225, 2006

¹⁶⁴ US Department of Energy: Distributed Wireless Multisensor Technologies - A Novel Approach to Reducing Motor Energy Usage, CPS # 14226, 2006

¹⁶⁵ Eine anonymisierte Auflistung der Experten findet sich im Anhang

land erzeugten Stroms¹⁶⁶. Insbesondere die in der Industrie eingesetzten Drehstrommotoren mit einem Leistungsspektrum von 0,5 – 500 kW besitzen, in Abhängigkeit von Motorenart und –größe, ein großes Einsparpotenzial.

Nach Angaben der Studie sind bei Drehstrommotoren Wirkungsgrade zwischen 70 – 95 % marktüblich. Der Wirkungsgrad von Elektromotoren wird international in die folgenden drei leistungsabhängigen Effizienzklassen unterteilt:

- Standard (IE1, früher eff2)
- Hoch (IE2, früher eff1) und
- Premium (IE3, erste Produkte werde derzeit im europäischen Markt eingeführt)

Über 90 % der heute verkauften Antriebe stammen aus der Effizienzkategorie IE1. Als besonders relevant wird aus der oben genannten Leistungskategorie von 0,5 – 500 kW das Segment bis 10 kW hervorgehoben. In ihm lassen sich demnach Einsparpotentiale von bis zu 30 % realisieren¹⁶⁷.

Für die Verbesserung des Wirkungsgrades von Elektromotoren stehen viele Ansatzpunkte zur Verfügung. Neben der Optimierung des gesamten Antriebssystems (Umrichter, Getriebe, etc.) und konstruktiven Maßnahmen am Motor, die z.B. auf eine Optimierung des Magnetfeldes oder eine Verringerung der Reibung abzielen, spielt die lastabhängige Regelung der Drehzahl eine wichtige Rolle, die sich stark auf den Stromverbrauch auswirkt. Eine Drehzahlregelung kann z.B. eingesetzt werden, um eine mechanische Drosselung von Pumpen- und Lüfteranlagen zu ersetzen sowie um Verluste bei periodischen Anfahr- und Bremsvorgängen zu mindern.

Wird der elektrische Antrieb durch einen Umrichter angesteuert so können über ihn Drehzahl und Drehmoment beeinflusst werden. Größere in der Industrie eingesetzte Elektromotoren (> 150 kW) besitzen z.B. abhängig von ihrem Einsatzgebiet eine Drehzahlregelung sowie zum Teil eine kabelgebundene Zustandsüberwachung. Viele kleinere Motoren in der Automatisierungstechnik (< 10 kW) laufen jedoch mit starrer Netzanbindung und werden aufgrund von Planungsfehlern überdimensioniert¹⁶⁸. In diesem Segment besteht daher der größte Optimierungsbedarf.

¹⁶⁶ Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. (VDE): Effizienz- und Einsparpotentiale elektrischer Energie in Deutschland. Perspektive bis 2025 und Handlungsbedarfe, Frankfurt a.M., 2008

¹⁶⁷ Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. (VDE): Effizienz- und Einsparpotentiale elektrischer Energie in Deutschland. Perspektive bis 2025 und Handlungsbedarfe, Frankfurt a.M., 2008

¹⁶⁸ Kiel, E.: Eine Frage der Wirkung. Elektrische Antriebe bieten viele Möglichkeiten, Energie zu sparen, in: Driveln 20, 2008

3.5.2 Einsatzmöglichkeiten von AVMs in elektrischen Antrieben und Motoren

Aus den genannten Einsatzgebieten und Anwendungsfeldern von Antrieben und Elektromotoren sowie den Eigenschaften von AVMs ergeben sich folgende Einsatzmöglichkeiten in der Automatisierungstechnik:

Zustandsüberwachung und Wirkungsgradoptimierung von Elektromotoren in der Leistungsklasse bis 10 kW: Aufgrund Ihrer geringen Größe sind AVMs besonders für die Zustandsüberwachung von kleineren Elektromotoren geeignet. Sie können daher auch in Motoren bzw. in Komponenten von Motoren zum Einsatz kommen, in denen dies aufgrund von räumlichen Gründen bisher nicht möglich war. Durch die Messung von Stromstärke und Spannung, Vibration, Geschwindigkeit, Beschleunigung, Temperatur und anderer Parametern kann der Zustand des Motors überwacht werden. Das AVM kann außerdem in einer solchen Anwendung durch eine Ermittlung des optimalen Betriebszustandes die Regelung des Motors übernehmen und z.B. durch eine Anpassung der Drehzahl oder Drehmoment den Energieverbrauch senken. Dies gilt insbesondere auch in Verbindung mit anderen Sensoren im Umfeld des Antriebs. So kann z.B. die Drehzahl oder das Drehmoment eines Antriebes in Abhängigkeit vom Durchfluss oder Trabsportaufkommen über die Anpassung der Leistung im Umrichter gesteuert werden.

Das AVM kann in einer solchen Anwendung die Rolle eines intelligenten Sensors übernehmen, der Daten im Antriebsstrang und seinem Umfeld sammelt, autonom auswertet und in Steuerungsimpulse übersetzt.

Ein gesondertes Anwendungsfeld stellen Getriebemotoren dar. Bei ihnen ist eine Vielzahl zusätzlicher Messparameter für die Zustandsüberwachung des Getriebes interessant, bei denen drahtlose, miniaturisierte Sensoren Vorteile besitzen. Dies gilt z.B. für die Messung von Öltemperatur, -stand und -trübung innerhalb des Getriebes.

Reduktion von Wartungsintervallen: Durch eine Verbesserung der Motorentechnik sowie die oben beschriebene Zustandsüberwachung durch AVM können die Wartungsintervalle für Motoren verlängert werden (z.B. von jährlichen auf zweijährliche) und dadurch Kosten eingespart werden. Dies gilt insbesondere für die routinemäßige Überprüfung von Betriebsparametern sowie die Kontrolle von Verschleißteilen, die durch spezifische Messwerte wie z.B. Temperatur oder Leitfähigkeit kontrolliert werden können.

Tabelle 16: Instandhaltungsstrategien¹⁶⁹

Strategie	Charakteristik
Schadensbedingte / Korrektive Instandhaltung	<ul style="list-style-type: none"> • Reparatur bei auftretendem Defekt • Maximale Ausnutzung der Bauteil-Lebensdauer • Potenziell Folgeschäden am Motor / anderen Anlagenteilen / der Maschine / dem Produkt • Nicht-planbarer Stillstand / Produktionsausfall, dadurch vergleichsweise lange Stillstandszeit • Effizienzverluste durch verschlissene Teile häufig lange vor tatsächlichem Ausfall, ggf. Produktbeeinträchtigungen
Intervallabhängige / Vorausbestimmte Instandhaltung	<ul style="list-style-type: none"> • Austausch der Verschleißteile in vorgegebenen Zeitabständen • Festlegung geeigneter Wartungsintervalle erschwert durch starke Varianz der Lebensdauer vieler Bauteile • lange Intervalle erhöhen Risiko des ungeplanten Produktionsausfalls
Zustandorientierte Instandhaltung	<ul style="list-style-type: none"> • Wartungs- bzw. Instandsetzungsintervalle nicht starr vorgegeben • Zeitpunkt für eine Instandhaltungsmaßnahme ergibt sich aus der aufgrund von Zustands- und Betriebsgrößen errechneten Wahrscheinlichkeit für ein baldiges Überschreiten der Abnutzungsgrenze • Zielsetzung: Defekte erkennen, bevor diese Folgeschäden hervorrufen • Überwachung der Messgrößen kann in dem Bauteil angepassten Intervallen, kontinuierlich oder auf Anforderung erfolgen

Die Tabelle verdeutlicht, dass abhängig von der Anwendung und dem Einsatz von elektrischen Antrieben und Motoren unterschiedliche Instandhaltungsstrategien verfolgt werden können. Während bei vergleichsweise wenig beanspruchten und genutzten Motoren eine schadensbedingte Instandhaltung ausreichend sein kann, so ist diese in der Automatisierungstechnik aufgrund des damit verbundenen Ausfalls keine Option. Der Einsatz drahtloser Sensornetze ist daher insbesondere für eine zustandsorientierte Instandhaltung von Bedeutung.

Vermeidung von Verkabelung: Durch den Einsatz von AVMs in der Antriebstechnik entfällt unabhängig von der Leistung des Antriebs die Verkabelung. Diese kann in extremen Anwendungsfeldern, in denen sie aufgrund notwendiger chemischer und mechanischer Resistenz, Abschirmung, Lebensmittelechtigkeit, etc. bis zu € 4.000,- pro Meter¹⁷⁰ kosten. Der Wegfall von Verkabelung kann daher mit deutlichen Einsparpotentialen einhergehen. Hauptmotivation für den Einsatz von AVM ist in diesem Fall nicht die Miniaturisierung als vielmehr die kabellose Signalübermittlung.

¹⁶⁹ angepasst nach: Deutsche Energie-Agentur: Wartung und Instandhaltung von Pumpen und Pumpensystemen, o.J.

¹⁷⁰ US Department of Energy: Wireless Success Story Industrial Technologies Program (ITP) Develops Transformational Wireless Technology, 2008

Erhebung von zusätzlichen oder neuer Messwerte: Durch den Einsatz von AVMs können in zukünftigen Anwendungen der Automatisierungstechnik zusätzliche und neue Messwerte erhoben werden, die mit der heute verfügbaren Messtechnik aus den folgenden Gründen nicht erfasst werden können:

- *Lage und Größe des Messpunktes:* Der Messpunkt ist aufgrund seiner räumlichen Lage oder seiner geringen Größe mit der existierenden Messtechnik nicht zu erreichen. Das gilt z.B. auch für rotierende und bewegliche Messpunkte. Für diese Fälle kann sowohl die Miniaturisierung als auch die autarke Energieversorgung limitierend sein (siehe z.B. Zustandsüberwachung von Getriebemotoren).
- *Aufwand und Kosten:* Ein Reihe von Messungen sind aufgrund des damit verbundenen Aufwandes für die Installation zum aktuellen Zeitpunkt nicht gerechtfertigt. Für diesen Anwendungsfall wären neben der Miniaturisierung insbesondere geringe Systemkosten und eine einfache Installation entscheidend. Z.B. könnte die Vielzahl der kleinen in der Industrie eingesetzten Elektromotoren (0,5 – 1 kW) mit sehr einfach zu installierenden und kostengünstigen AVMs ausgerüstet und so Effizienzpotenziale durch verlängerte Wartungszyklen oder reduzierten Stromverbrauch realisiert werden.

3.5.3 Anforderungen an den Einsatz von AVMs in elektrischen Antrieben und Motoren

Auf Grundlage der Charakterisierung des Anwendungsfeldes lassen sich für den Einsatz von AVMs zur Zustandsüberwachung von Elektromotoren die folgende Anforderungen formulieren, die sich sowohl auf die Entwicklung der Technologie als auch auf den Einsatz zukünftiger Produkte beziehen:

Größe und Robustheit: Für den Einsatz in kleinen und mittleren Elektromotoren sind sowohl die Größe als auch die Robustheit von AVMs entscheidend. Um auch in beweglichen bzw. rotierenden Teilen kleinerer Motoren eingesetzt werden zu können, sollte das AVM einen bis maximal mehrere Kubikzentimeter groß sein. Die Formgebung (zylindrisch, quadratisch, etc.) hängt dabei stark von dem jeweiligen Einsatz ab. Da Elektromotoren in den verschiedensten industriellen Umgebungen eingesetzt werden, ist ein Schutz des AVMs vor chemisch-physikalischen (Gase, Säure, Temperatur, etc.) sowie mechanischen Einflüssen notwendig. Dies kann eine Kapselung der AVMs in Edelstahlgehäusen notwendig machen. Der Temperaturbereich kann für die meisten industriellen Anwen-

dungen mit -40°C bis $+85^{\circ}\text{C}$ angenommen werden¹⁷¹, kann aber im Fall von einzelnen Messparametern wie z.B. der Temperaturmessung auch höher liegen.

Messparameter und Messintervalle: Zu den wichtigsten Messparametern, die für die Zustandsüberwachung sowie zu Bestimmung des optimalen Lastpunktes von Elektromotoren erfasst werden können, zählen^{172,173}:

- *Temperatur:* kann Informationen über Lastpunkt und Verschleiß liefern (Zustandsüberwachung und Wirkungsgradoptimierung)
- *Drehzahl und Drehmoment:* gibt z.B. Auskunft über Lastpunkt (Wirkungsgradoptimierung)
- *Vibration:* gibt z.B. Auskunft über Störungen und Verschleiß in rotierenden Teilen und Getrieben (Zustandsüberwachung)
- *Stromstärke und Spannung:* gibt z.B. Auskunft über Lastpunkt sowie Zustand der stromführenden Wicklungen (Zustandsüberwachung und Wirkungsgradoptimierung)

Die notwendigen Messintervalle können je nach Anwendungsfall stark schwanken. Während für die Zustandsüberwachung Messintervalle im Minuten- bzw. Stundentakt ausreichend sein können, so kann die Bestimmung der optimalen Drehzahl oder des Drehmoments auch kürzere Intervalle z.B. im Sekunden- oder Millisekundentakt erfordern.

Lebensdauer und autonome Energieversorgung: Entscheidend für eine vereinfachte und kostengünstige Wartung ist, dass die AVMs für den Einsatz in Elektromotoren über eine autonome Energieversorgung verfügen, die einen Dauerbetrieb von mehreren Jahren ermöglichen. Auf diesen Zeitraum sollte auch die minimale Lebensdauer des gesamten AVM ausgelegt sein. Für die Energieversorgung können bei der Anwendung unterschiedliche Ansätze (z.B. piezo- oder thermoelektrische Generatoren in Verbindung mit Solarzellen und Batterien) zum Einsatz kommen, die stark von den jeweiligen Einsatzbedingungen abhängen. Eine Diversifizierung in der Energieversorgung erhöht dabei nach Meinung der interviewten Experten die Ausfallssicherheit. Prinzipiell sind bereits piezoelektronische, thermoelektrische und solare Generatoren mit lan-

¹⁷¹ Sexton, D.: Distributed Wireless Multi-Sensor Technologies, Final report for the U.S. Department of Energy, Contract DE-FC36-04GO14001, prepared by GE Global Research Schenectady, NY, 2008, S. 12f

¹⁷² US Department of Energy: Wireless Sensor Network. Advanced Energy Management Solution for Industrial Motors. CPS #14225, 2006

¹⁷³ US Department of Energy: Distributed Wireless Multisensor Technologies - A Novel Approach to Reducing Motor Energy Usage, CPS # 14226, 2006

ger Lebensdauer verfügbar und auch Lithiumbatterien erreichen inzwischen Lebensdauern von bis zu 20 Jahren¹⁷⁴.

Zuverlässige und standardisierte Signalübertragung: Für den Einsatz von AVMs im industriellen Umfeld ist eine zuverlässige Signalübertragung eine zentrale Voraussetzung. Neben der Qualität und der Sicherheit der Übertragung bestimmen vor allem die notwendige Reichweite sowie die Übertragungshäufigkeit des Signals die Auswahl der Technologie und des Standards. Für den Fall der kleinen und mittleren Elektromotoren wird davon ausgegangen, dass eine Übermittlung einer hohen Signalqualität (z.B. eine Gruppe von 5 Messwerten pro Minute) im Bereich von wenigen Metern zum Empfänger ausreichend ist. Die Auswahl des Protokolls ist dabei stark von der Übertragungshäufigkeit und der Datenmenge abhängig. Eine große Herausforderung stellt eine schnelle und sichere Datenübertragung bei geringem Energieverbrauch, z.B. komplexe Signale und Messintervalle im Millisekundenbereich dar.

Für den geschilderten Fall des Einsatzes von AVMs in Elektromotoren zeichnen sich zum jetzigen Zeitpunkt die konkurrierenden Funk- und Protokollformate „Wireless HART“ sowie „Zigbee“ als mögliche Ansätze ab. Beide stellen proprietäre Formate industrieller Initiativen dar, die jeweils spezifische Vor- und Nachteile bezüglich der Übertragungsgeschwindigkeit und der dafür notwendigen Energie besitzen. Darüber hinaus wird derzeit eine neue, energieeffizientere Variante des Bluetoothstandards entwickelt, der für die Übertragung relevant sein könnte.

Langfristig stellt die Standardisierung der Funk- und Protokollformate eine Voraussetzung für die Anwendung von AVMs in der Automatisierungstechnik dar, um Systeme verschiedener Anbieter miteinander kompatibel und vernetzbar zu machen. Wichtigste Organisationen hierfür sind derzeit die nordamerikanische Instrumentation, Systems and Automation Society (ISA) mit ihrem Komitee ISA 100 sowie die International Electrotechnical Commission (IEC).

Einfache Installation und Systemkosten: Die Hauptmotivationen für den Einsatz von AVMs zur Zustandsüberwachung von Elektromotoren liegt in einer Kostenreduktion durch eine vereinfachte und bedarfsgerechte Wartung sowie einer Steigerung der Energieeffizienz durch die Bestimmung des optimalen Wirkungsgrades. Die durch den Einsatz von AVMs gewonnenen Einsparpotenziale sollten daher größer sein als die für die Installation, den Betrieb sowie den Austausch oder die Wartung der AVMs benötigten Mittel. Für eine realistische Abschätzung dieses Kostenvergleichs müssen insbesondere die vollständigen Systemkosten für den Einsatz von AVMs betrachtet werden, zu denen neben

¹⁷⁴ Sexton, D.: Distributed Wireless Multi-Sensor Technologies, GE Global Research, 2008, S. 17f.

den Installationskosten auch die Kosten für die Vernetzung untereinander sowie die damit verbundene Wartung gehören.

Entscheidende Faktoren für die einfache Installation sind neben der softwareseitigen Plug&Play-Funktionalität der AVMs auch die leichte Integrierbarkeit in die Elektromotoren, ihre Kombinierbarkeit mit vergleichbaren Sensoren konkurrierender Hersteller sowie ihre Lebensdauer und Zuverlässigkeit, die über einen Austausch der AVMs entscheiden.

Die Kosten sind das zentrale Kriterium, die über den Einsatz von AVMs entscheiden. Von den Interviewpartnern wurde angemerkt, dass die derzeit existierenden Standardkomponenten für die Herstellung von AVMs (insbesondere Antennen und Sensoren) noch zu teuer für die meisten Serienanwendungen sind. Große Hoffnungen werden daher in neue Fertigungsansätze und -Verfahren wie z.B. einfach anzupassende nanotechnologische Sensoren gesetzt, die in der Zukunft die Produktionskosten von Klein- und Großserien senken könnten.

3.6 Anwendungsszenario AVMs zur Zustandsüberwachung von Elektromotoren

Für die Entwicklung einer Roadmap über den zukünftigen Einsatz von AVM in der Automatisierungstechnik wird ein Anwendungsszenario entwickelt, das eine mögliche Realisierung definiert und so eine Darstellung von Entwicklungen die zur Erreichung dieses Zustands notwendig sind ermöglicht. Das Anwendungsszenario beruht auf der Verbindung von Expertenaussagen und Ergebnissen aus Studien sowie deren Extrapolation in die Zukunft.

Anwendungsszenario: Einsatz von AVMs zur Zustandsüberwachung von Elektromotoren in der Leistungsklasse bis 10 kW (Perspektive 2020)

Kleine bis mittlere Elektromotoren sind im Jahr 2020 grundsätzlich mit AVM zur Zustandsüberwachung der zentralen Betriebsparameter ausgerüstet. Die ca. 1 cm³ großen Einheiten können die Parameter Temperatur, Vibration sowie Drehzahl und Drehmoment messen. Sie verfügen über eine autarke Energieversorgung und besitzen eine garantierte Laufzeit von 10 Jahren. Die Sensoren kommunizieren über ein standardisiertes Format (z.B. Zigbee oder Wireless HART) im Nahbereich (bis ca. 10 Meter) miteinander. Aufgrund des standardisierten Formates können die Sensoren einfach in bestehende Sensornetze integriert und Sensoren unterschiedlicher Hersteller miteinander vernetzt werden. Die Vernetzung der Sensoren untereinander erlaubt auch eine Kombination mit weiteren Sensoren der Automatisierungstechnik (z.B. Druck und Transportfluss) und damit die autarke Steuerung und Regelung von Produktionsprozessen sowie die Auswertung der Daten des gesamten Produktionsprozesses und eine Darstellung in einem zentralen Überwachungs- und Leitsystem.

Durch den Einsatz der AVMs kann die Wartung von Elektromotoren bedarfsgerecht erfolgen. Durch eine lastabhängige Steuerung der Elektromotoren kann im Vergleich zu unregulierten Antrieben 30% der benötigten Energie eingespart werden. Aufgrund der großen Anzahl jährlich produzierter Sensoren liegen die Stückkosten bei maximal 10 € je AVM-Komponente.

3.7 Umsetzungskonzept: Diskussion der Systemkomponenten

In den folgenden Abschnitten wird der technische Entwicklungsstand existierender Systemkomponenten dargestellt, die für die Realisierung von AVM-Anwendungen in der Automatisierungstechnik wichtig sind. Er stellt einen Ausgangspunkt für die Extrapolation einer zukünftigen Technologieentwicklung dar und zeigt Potenziale für technische Verbesserungen und Kostenoptimierungen auf. Durch den Entwicklungsstand werden keine Brüche und radikalen Technologiewechsel (beispielsweise durch zukünftige nanotechnologische Fertigungsverfahren oder druckbare Polymerschaltungen) abgebildet, die für die Prognose der Technologieentwicklung aus einem Zukunftsbild (Retropolation) eine Rolle spielen können.

3.7.1 Umgebungsschnittstelle

Mit den Fortschritten in der Mikrosystemtechnik und der Mikroelektronik werden Mikrosensoren zur Messung von Temperatur, Vibrationen, Drehzahl und Drehmoment verfügbar, welche die Praxisanforderungen hinsichtlich Bandbreite und Messgenauigkeit erfüllen und dabei deutlich robuster als konventionelle Sensoren sind. Bei den derzeitig technologisch erreichten Miniaturisierungsgraden, hängt eine weitere Größenreduktion zur Steigerung der Robustheit maßgeblich von der Verringerung der Leistungsaufnahme und von einer höheren Effizienz der autarken Mikro-Energieversorgung ab. Je nach Genauigkeitsanforderungen sind häufig Kompensationsmaßnahmen in Form von Hardware (meist energieeffizienter) oder Software (meist Platz sparender und flexibler) zu berücksichtigen.

Temperatursensoren

Für Temperatursensoren existieren verschiedene Messprinzipien und unterschiedliche Fertigungstechnologien. Sind Messauflösungen oberhalb von $0,5^{\circ}\text{C}$ ausreichend, können Halbleitersensoren eingesetzt werden, die leicht und kostengünstig zu integrieren sind. Genauere Temperaturmessungen werden in der Regel mit Platin-Sensoren (Abbildung 10) realisiert. Deutlich aufwändiger wird eine Temperaturmessung, wenn eine Messgenauigkeit von unter $0,1^{\circ}\text{C}$ benötigt wird. Wichtige Sensorparameter sind hier kleine Abmaße, hohe Linearität und robuste Häusung. Einige kommerziell erhältliche Temperatursensoren wurden in Tabelle 17 zusammengestellt.

Abbildung 10: Platin-Temperatursensoren von Jumo und IST AG

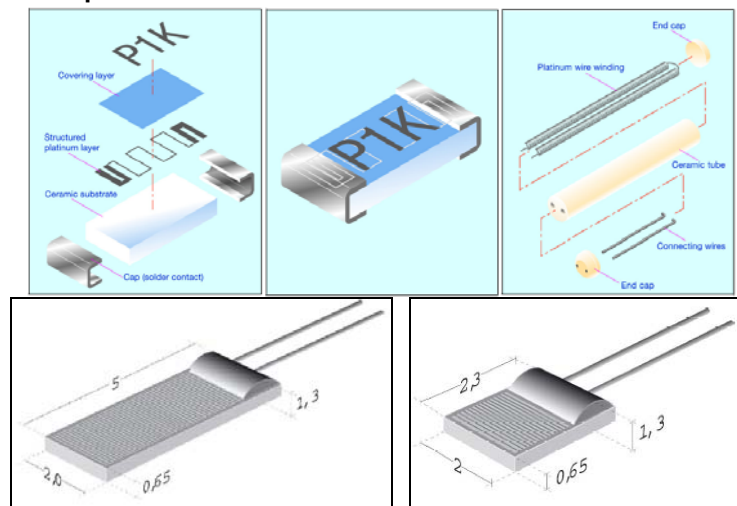


Tabelle 17: Auswahl einiger Temperatursensoren

Manufacturer	Type	Range	Accuracy	Size	Package	Price (euro)
Honeywell	TD Series	- 40 – 150°C	±0,7°C	4.06x1.57 mm	TO-92	
HLPlanar	Ni1000SOT	- 55- 160°C	±0,4°C	3.05x2,5x1.1 mm	SOT23	
Jumo	PF Style 1.2150.1	- 80 – 180°C	±0,1°C (Class1/3B)	21x50x0,3 mm	Foil	26,30 €
Jumo	PK Style 1.1508.1H	-200 – 800°C	±0,1°C (Class1/3B)	1.5x8x mm	ceramic tube	17,04 €
Jumo	PCS Style 1.1302.1	-50 – 150°C	±0,3°C (Class B)	1.3x2x0.5 mm	SMD	1,36 €
Jumo	PCA 1,2003.1S	- 70 – 400°C	±0,3°C (Class B)	2x2.5x1.3 mm	platinum chip	1,44 €
IST AG	P0k1.232.2P.Y	- 50 - 200°C	±0,1°C(Class1/3B)	2x2,3x0.65mm	Leadless Chip	
IST AG	P0K1.520.6W.A.010	- 90 - 300°C	±0,5°C(Class A)	2x53x1.3mm	Platinum thin film	14,53 €
IST AG	P0K1.232.6W.A.010	- 50 - 600°C	±0,5°C(Class A)	2x2,3x1.3mm	Platinum thin film	8,56 €
IST AG	P0k1.232.6W.Y.010	- 50 - 200°C	±0,1°C(Class1/3B)	2x2,3x1.3mm	with wire termination	10,69 €
IST AG	P0k1.204.4R.x.007	- 50 – 400°C	±0,1°C(Class1/3B)	∅2x4mm	with ceramic tubes	
MEAS	44004RC Series	- 80 – 120°C	±0,2°C	2.4 mm	epoxy encapsulated	
MEAS	44904RC Series	- 55 – 90°C	±0,2°C	2.4 mm	epoxy encapsulated	
MEAS	46000 Series	- 55 – 90°C	±0,2°C	2.4 mm	epoxy encapsulated	

Vibration

Im Bereich der Beschleunigungsmessung gibt es ein breites Spektrum von Sensortypen (Abbildung 11). In der Regel werden MEMS-Sensoren bevorzugt, die kostengünstig gefertigt werden können und eine hohe Robustheit aufweisen. Die meisten kommerziellen Sensoren sind für einen Messbereich von wenigen g

($1g = 9,81m/s^2$) ausgelegt. Zu wichtigen Parametern der Sensor-Spezifikation gehören die Werte für die maximale Schockrobustheit und die Anzahl der Messachsen. Dreiachsige Beschleunigungssensoren sind gegenüber einachsigen Messsystemen deutlich aufwändiger in der Fertigung und kosten je nach Messgenauigkeit deutlich mehr. Sehr hohe Kosten von mehreren 100 Euro sind zur Messung hoher Beschleunigung $> 500g$ zu veranschlagen, da solche Sensortypen heute noch Nischenmärkte mit geringen Fertigungstückzahlen darstellen. Viele MEMS-Beschleunigungssensoren basieren auf der Messung von kleinen Kapazitäten. Für diese Sensoren ist bei der Integration auf die thermomechanischen Ausdehnung der umgebenden Materialien zu achten, um die Temperaturdrift des Sensors in Grenzen zu halten.

Abbildung 11: Beschleunigungssensoren von Silicon Design, Bosch und FGP Sensors

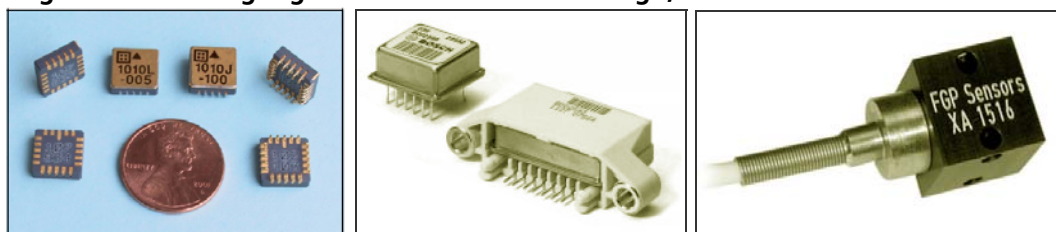


Tabelle 18: Beschleunigungssensoren mit 3 Achsen

Manufacturer	Type	Range	Shock	Temperature	Size	Package	Price (euro)
Bosch Sensotec	SMB 365	$\pm 2g, \pm 10g$		$-40 - 85^{\circ}C$	4x4x1.2 mm	SMD QFN Package	
Silicon Desings	Model 2422	0 - 200g		$- 55- 125^{\circ}C$	25,4x25,4x21.1 mm		
FGP Sensors	FA3106	$\pm 10g; \pm 100g; \pm 500g$ ($\pm 2\%$ acc.)	2000g	$- 20- 80^{\circ}C$	30x30x25mm	Placed in a rugged metal housing	1.986 €
FGP Sensors	FA3109	$\pm 20g; \pm 100g; \pm 500g; \pm 1000g$ ($\pm 2\%$ accuracy, 1%opt.)	2000g	$- 40- 80^{\circ}C$	20x20.8x17mm	metal case	
FGP Sensors	FA3650	$\pm 50g; \pm 100g; \pm 500g$ ($< \pm 2\%$ accuracy)	2000g	$- 20- 80^{\circ}C$	25x25x21mm	placed in a rugged metal housing	1.986 €
FGP Sensors	FA3403	$\pm 2g; \pm 10g; \pm 100g; \pm 500g$ ($< \pm 2\%$ accuracy)	2000g (0.1ms)	$- 20- 80^{\circ}C$	23x23x17mm	metal case	

Tabelle 19: Beschleunigungssensoren mit einer Achse

Manufacturer	Type	Range	Shock	Temperature	Size	Package	Price (euro)
Bosch Sensotec	2-channel 0273 101 150	±35g		-45 - 95°C	18.8x20x8 mm		54,47 €
FGP	XA1000	±10g; ±100g; ±1000g; ±2000g (±1%; 0,5% optional)	10.000g	- 40- 120°C	10x5x5mm	two mounting styles metal case	643 €
FGP	XA1010	±10g; ±100g; ±1000g; ±2000g (±1%; 0,5% optional)	10.000g	- 40- 120°C	15x6x6mm	two styles metal case	643 €
FGP	XA1020	±10g; ±100g; ±1000g; ±2000g (±1%; 0,5% optional)	10.000g	- 40- 120°C	19x7,5x7,5 mm	two styles metal case	601 €
FGP	XA1516 (amplifier optional)	±10g; ±100g; ±1000g; ±2000g (±1%; 0,5% optional)	10.000g	- 40- 120°C	16x16x16mm	16mm metal cube design	601 € (778€)
Silicon Desings	Type 1010	±10g; ±100g; ±200g	2.000g (0.1ms)	- 55- 125°C	0.35x0.36x 0.105 mm	LCC or J-Lead Surface mount package	170 € (LCC) 195 € (JLCC)
Silicon Desings	Type 1210x	±10g; ±100g; ±400g	2.000g (0.1ms)	- 55- 125°C	8,9x8,9x4,2 mm	LCC or J-Lead Surface mount package	165 € (LCC) 190 € (JLCC)
Silicon Desings	Type 1221	±10g; ±100g; ±400g	5.000g (0.1ms)	- 55- 125°C	8,9x8,9x4,2 mm	LCC or J-Lead Surface mount package	165 € (LCC) 190 € (JLCC)

Drehzahl

Zur Erfassung der Drehzahl von elektrischen Antrieben basieren klassische Messsysteme (Tachometer) auf Hallsensoren, die das veränderliche Magnetfeld von rotierenden Permanentmagneten erfassen oder Lichtschranken, die Löcher von Lochscheiben auswerten. Auch mit Beschleunigungssensoren kann die Drehzahl ermittelt werden, sofern die Drehachse nicht vertikal zur Erde ausgerichtet ist und somit die Fallbeschleunigung ausgewertet werden kann. Weiterhin existieren Gyroskope (Abbildung 12), um Drehzahlen ohne festen Referenzpunkt zu messen und Unwuchten zu erkennen. Analog zu den Beschleunigungssensoren sind sowohl Ausführungen mit einer Achse (Tabelle 20) als auch mit 3 Achsen (Tabelle 21) verfügbar. Zur Maschinendiagnose besonders interessant ist die Kombination aus 3-achsigen Beschleunigungssensor und Gyroskop (Tabelle 22). Derzeit sind solche Systeme noch extrem teuer. In der Zukunft sind jedoch Sensoren für wenige Euro denkbar, wenn sich sowohl die Sensorkomplexität bei den MEMS-Technologien weiterentwickelt als auch die Fertigungsstückzahlen größer werden.

Abbildung 12: 3-D Gyroskope von Silicon Design und Memsense

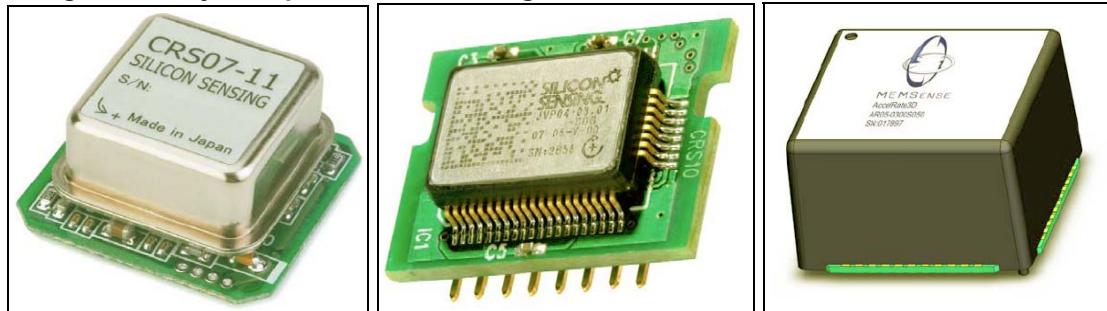


Tabelle 20: Einachsige Gyroskope

Manufacturer	Type	Range	Shock	Supply current	Temperature	Size	Package	Price (euro)
Systron Donner	LCG50	$\pm 20^\circ/s$	500g (2ms)	8mA	-40 - 85°C	29.4x29.4x10.7mm	small pc board	
Systron Donner	Type HZ1-100-100	$\pm 100^\circ/s$	200g	<20mA	-40 - 71°C	58x25.4x25.9mm		

Tabelle 21: 3-Achsen Gyroskope

Manufacturer	Type	Range	Shock	Supply current	Temperature	Size	Package	Price (euro)
Silicon Sensing	CRS10	$\pm 75^\circ/s$ (anal.) $\pm 300^\circ/s$ (dig.)	100g	<60mA	-40 - 125°C	23x18.2x6.8mm		245 €
Silicon Sensing	CRS07-13S	$\pm 100^\circ/s$	200g (1ms)	<35mA	-40 - 85°C	22x21x11.5mm		195 €
Memsense	TriRate MEMS Gyroscope	$\pm 150^\circ/s$; $\pm 300^\circ/s$; $\pm 1200^\circ/s$	2.000g (5ms)	18mA	-40 - 85°C	17,8x17.8x10,2mm	SMT package	931 USD (150Deg/s 50 Hz)

Tabelle 22: Kombinierte 3-achsiges Gyroskope und Beschleunigungssensor

Manufacturer	Type	Range	Shock	Supply current	Temperature	Size	Package	Price (euro)
Memsense AccelRate3D	AccelRate3D	$\pm 150^\circ/s$; $\pm 300^\circ/s$; $\pm 1200^\circ/s$ $\pm 2g$; $\pm 5g$; $\pm 10g$	2000g (0.5ms) any axis	20mA	-40 - 85°C	17,8x17.8x10,2mm	SMT package	1.174 USD (2g, 300 Deg/s 50Hz)

Drehmoment

Zur Messung des Drehmoments werden meist Dehnungsmessstreifen (Abbildung 13) verwendet. Verschiedene Varianten mit unterschiedlichem Formen und Messrastern sind verfügbar. Das Messprinzip basiert auf Messung des elektrischen Widerstands, woraus sich der mechanische Stress über entsprechende Materialparameter bestimmen lässt. Eine exemplarische Auswahl von

Dehnungsmessstreifen (DMS) ist Tabelle 23 zu entnehmen. Ein wichtiger Parameter stellt die DMS-Flexibilität dar, welche durch den minimalen Biegeradius gekennzeichnet ist. Die Montage erfolgt meist mit Spezialkleber, dabei ist die Ankopplung an das Funksensorsystem nicht trivial. In Kombination mit den anderen Sensortypen ist eine Drehmomentmessung eher aufwendig. In der Zukunft ist jedoch zu erwarten, dass sehr dünne und flexible Funksensoraufbauten realisierbar werden, so dass dann ein auf diese Weise integrierter Dehnungsmessstreifen zur Messung von Drehmoment deutlich leichter und kostengünstiger applizierbar wird.

Abbildung 13: Dehnungsmessstreifen von HBM; Position von 3 Messrastern / Rosetten

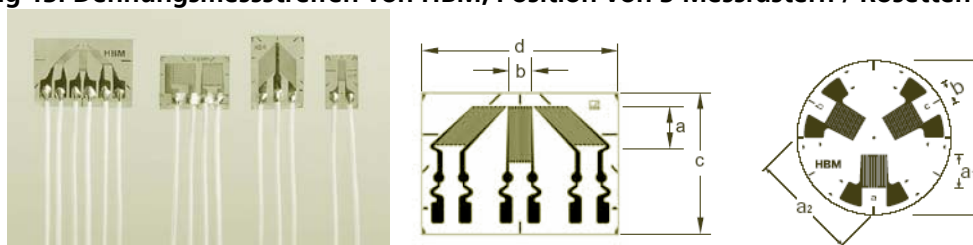


Tabelle 23: Dehnungsmessstreifen

Manufacturer	Type	Range	Size	Temperature	Package	Price (euro)
HBM	HBM 1LY41-0,6/120	max. 50.000µm/m	45µm	- 70- 200°C	Polyamid-carrier	74 €
HBM	HBM 1LY41-1,5/120	max. 50.000µm/m	45µm	- 70- 200°C	Polyamid-Carrier	64 €
HBM	HBM 1LY41-3/120	max. 50.000µm/m	45µm	- 70- 200°C	Polyamid-Carrier	55 €
HBM	HBM 1XY91-1,5/120	max. 50.000µm/m	45µm	- 70- 200°C	Polyamid-Carrier	187 €
HBM	HBM 1XY91-3/120	max. 50.000µm/m	45µm	- 70- 200°C	Polyamid-Carrier	127 €
HBM	HBM 1XY91-6/120	max. 50.000µm/m	45µm	- 70- 200°C	Polyamid-Carrier	127 €
HBM	HBM 1-LE11 3/350Z	max. 50.000µm/m	45µm	- 70- 200°C	Polyamid-Carrier	177 €
HBM	HBM 1-LE11 3/350V	max. 50.000µm/m	45µm	- 70- 200°C	Polyamid-Carrier	143 €

3.7.2 Funkschnittstelle

Funkarchitekturen für das industrielle Umfeld sollten auf einer digitalen Funkkommunikation basieren, um den Zuverlässigkeitsanforderungen gerecht zu werden. Wichtige Funkparameter wie Modulation, Sendeleistung, Datenrate und Trägerfrequenz können dann meist über ein digitales Interface programmiert werden. Somit kann man Funkmodule kostengünstig und flexibel aufbauen und in Betrieb nehmen. In der Nähe von technischen Anlagen können größere elektromagnetische Störfelder auftreten. Diese Störungen führen zu einer erheblichen Fehlerbitrate in der Funkübertragung. Daher gab es in der

Vergangenheit gegenüber Funksensorik in rauen Industrieumgebungen massive Vorbehalte. Während digitale Verfahren wie ARQ-Protokolle und Fehlerkorrekturalgorithmen zur Sicherung einer robusten Funkübertragung auf der Kommunikation redundanter Daten basieren und damit den Energieverbrauch deutlich erhöhen, erlauben Verfahren zur Frequenzspreizung eine sehr energieeffiziente und robuste Funkkommunikation. Für Mikrosysteme ist die Optimierung von Funkarchitekturen besonders komplex. So erlauben Superheterodyne-Funkmodule mit mehreren voluminösen Analogkomponenten durch ihre Energieeffizienz deutlich kleinere Energieversorgungen als gut miniaturisierbare software-basierte Funkarchitekturen¹⁷⁵. Die optimale Architektur ist daher sehr von den Betriebszyklen – entsprechend den verwendeten Funkprotokollen – abhängig.

Zur Bestimmung des Miniaturisierungspotenzials ist die Spezifikation der Netzwerkfunktionalität von fundamentaler Bedeutung. Dazu zählen insbesondere die Festlegung der mittleren Paketlänge, der Kommunikationsintervalle sowie der Synchronisationshäufigkeit. Sofern es keine Restriktionen hinsichtlich der Energie und Kosten gäbe, wünscht sich der Anwender im Produktionsumfeld meist miniaturisierte Funksensorknoten mit folgenden Leistungsmerkmalen

- Bandbreite bis zu mehreren Mbaud zur Verarbeitung schnellerer Signale
- Latenzzeiten bis zu wenigen Mikrosekunden zur Sicherung von Echtzeitfähigkeit
- Unterstützung vieler Standards – teilweise existiert der Wunsch auch Standards zu verwenden, die eigentlich für die Randbedingungen einer drahtgebundenen Kommunikation entwickelt wurden
- Ortung innerhalb von Fabrikhallen bis auf wenige Zentimeter genau
- Netzwerkgröße bis zum mehreren 1000 (Adhoc-netzwerkfähig)
- Funkrobustheit mit Paketfehlerraten $< 10^{-4}$
- Reichweite bis zu einigen 100 Metern auch in Anwesenheit von vielen, gut geschirmten Metallteilen
- Volumen von einigen 100 Kubikmillimeter – teilweise mit spezifischen Formfaktoren, wie Zylinderstifte, dünne Etiketten etc.

¹⁷⁵ Bensky, A.: Short-range Wireless Communication, LLH Technology Publishing, Eagle Rock, VA, USA, 2000, S. 139-144

- Betriebsdauer: wenige Tage bis zu mehreren Jahren – für Sonderfälle können auch kürzere Operationszeiten akzeptiert werden)

Nicht nur aus Kostensicht ist eine solche Spezifikation eine Vision für kostengünstige Funksensorknoten in Kubikzentimetergröße und mittelfristig nur für größere und teure Systeme umzusetzen. Aus heutiger Sicht sind eher folgende Zielparameter zu empfehlen:

- Bandbreite: < 1Mbaud (mittelfristig), 50Mbaud (langfristig)
- Ortung: 5 ... 30cm (mittelfristig), 1cm (langfristig)
- Netzwerkgröße: 10 ... 100 (mittelfristig), >1000 (langfristig)
- Reichweite: 10 ... 200m
- Volumen: < 3cm³ (mittelfristig), < 1cm³ (langfristig)

Die Antenne bildet die Schnittstelle zwischen leitungsgebundener und Freiraumwelle. Betrachtet man Sende- und Empfangsantennen, die ein Signal auf der Frequenz f über eine Entfernung r übertragen, so kann der Leistungstransfer mit der Friis'schen Transmissionsformel wie folgt angegeben werden.

$$\frac{P_{Rx}}{P_{Tx}} = \eta_{Tx} D_{Tx} (1 - |r_1|^2) \cdot \eta_{Rx} D_{Rx} (1 - |r_2|^2) \cdot \frac{c_0^2}{16\pi^2} \frac{1}{r^2 f^2} \cdot |\vec{a}_{Rx} \vec{a}_{Tx}^*|^2$$

P_{Rx} ist die empfangene und P_{Tx} die gesendete Leistung. η_{Tx} und η_{Rx} sind die Antenneneffizienzen. D_{Tx} und D_{Rx} stellen die Richtwirkungen und r_1 und r_2 die Eingangsreflexionsfaktoren der Antennen dar. Die Polarisationsanpassung wird mit den Vektoren \vec{a}_{Tx} und \vec{a}_{Rx} beschrieben. Für die sehr häufig verwendeten ISM-Frequenzbereiche 433 MHz, 868 MHz und 2.4 GHz bieten verschiedene Hersteller Antennen an, die direkt auf einer Leiterplatte als SMD-Komponente bestückt werden können. Häufig werden hier Monopol-, Patch-Antennen oder planare invertierte F-Antennen (PIFAs) als Grundkonfiguration eingesetzt. Die grundsätzliche Optimierung derartiger Antennen für Leiterplattenumgebungen erlaubt nur bedingt einen Einsatz für Funksensorik im Industrieumfeld. Die geometrischen Abmessungen sind in der Regel im unteren cm-Bereich. Allerdings hängen die Antenneneigenschaften, insbesondere die Impedanz und das Richtdiagramm, stark von der Größe der zur Verfügung stehenden Massefläche ab. Zudem sind die erreichbaren Antennengewinne meist deutlich < -3 dBi. Im Bereich der Forschung wurden bereits verschiedene elektrisch kleine Antennen auf ihr Abstrahlungsverhalten untersucht. Antennenkonfigurationen die sich als elektrisch kleine Strahler bewährt haben und sich mittels zusätzlicher Blindelemente anpassen lassen, sind Schleifen-, Spiral- und Helix-Konfigurationen.

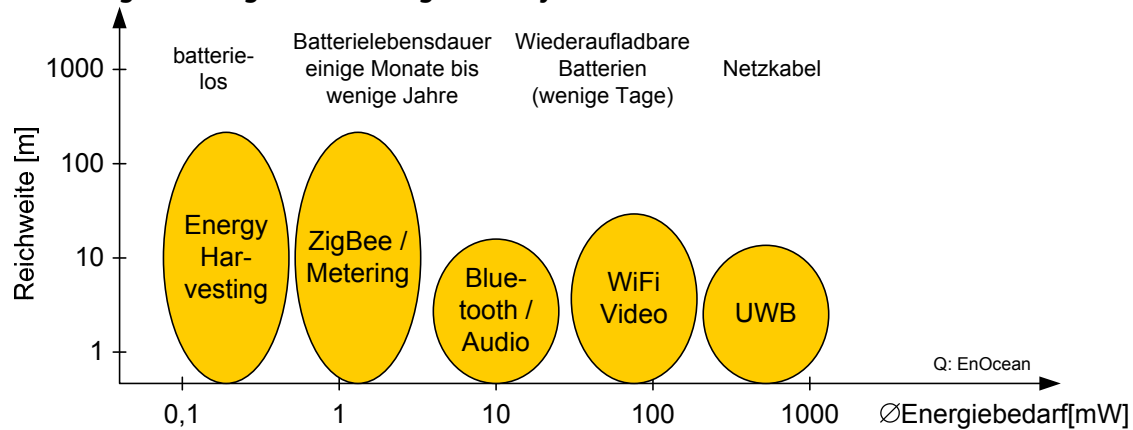
Dennoch bleibt der Entwurf elektrisch kleiner und effizienter Antennen eine Herausforderung, insbesondere weil die Antenne nicht als isolierte Komponente sondern in Betracht des Gesamtsystems sowie des Einsatzfelds ausgelegt und optimiert werden muss. Zudem kann die Wechselwirkung zwischen der Antenne und dem System zu elektromagnetischen Zuverlässigkeitsproblemen führen. Um einen maximalen Leistungstransfer zu und von der Antenne sicherzustellen muss eine gute Impedanzanpassung sichergestellt werden, d.h. die Reflexionsfaktoren r_1 und r_2 sollten gegen Null gehen.

Bei niedrigen Frequenzen können bei gleichbleibender Sendeleistung und Empfängerempfindlichkeit größere Entfernungen überbrückt werden. Allerdings muss die Antenne stets in einem bestimmten Verhältnis zur Wellenlänge λ sein um eine effiziente Abstrahlung zu ermöglichen (idealerweise $\sim \lambda/2$). D. h., elektrisch kleine Antennen haben stets eine geringe Antenneneffizienz η . Die Richtwirkung kann auf Kosten der Raumabdeckung erhöht werden. Um eine hohe Richtwirkung zu erzielen, muss die Antenne jedoch entsprechend elektrisch groß ($> \lambda/2$) ausgelegt werden. Elektrisch kleine Antennen haben omnidirektionale Richtdiagramme. Hervorzuheben ist hier auch der Einfluss der Maschine - bei einigen Orientierungen kann es zur Abschattung kommen. Grundsätzlich stellt sich die Frage, ob ein gerichtetes Antennensystem bei hohen Frequenzen ($> 1\text{GHz}$) energietechnisch einem omnidirektionalen Antennensystem bei niedrigen Frequenzen überlegen ist. Dies kann jedoch nur durch die Energiebilanz für den konkreten Anwendungsfall beantwortet werden.

3.7.3 Energieversorgung

In der Abbildung 14 wurde der Energiebedarf einiger Funksysteme je nach Leistungsklasse abgetragen. Für den Energiebedarf ist zu erwarten, dass im Mess- und Funkbetrieb bei einem Duty-Cycle von 100% die Leistungsaufnahme 10 bis 100 Milliwatt erreichen kann. Für die meisten Anwendungsfälle wird ein Duty-Cycle von unter 1% möglich sein, so dass der durchschnittliche Energiebedarf bei ca. 10 bis 100 Mikrowatt liegen wird. Leistungsfähigere Funksysteme für Videosignale oder eine aufwendige Oberschwingungsanalyse zur Ermittlung der Alterung von Verschleißteilen sind somit als Funksensorsystem in Kubikzentimeter-Größe kaum zu implementieren. Lediglich Sonderfälle sind denkbar, wenn ein extrem seltener Betrieb, die Energiebilanz entschärft, indem beispielsweise eine aufwendige Oberschwingungsdiagnose nur im Alarm-Fall für wenige Sekunden erforderlich ist.

Abbildung 14: Energiebedarf einiger Funksysteme im Industriefeld



Bei der Umsetzung eines effizienten Power-Managements ist die höhere Quellenimpedanz von Mikroenergieversorgungen zu beachten, da größere Stromspitzen eine höhere Verlustleistung bedeuten. Daher sind Strategien zur Anpassung von Lastprofilen unter Berücksichtigung der verfügbaren Leistungsdichte erforderlich. Sofern längere Reaktionszeiten tolerierbar sind, kann die Leistungsaufnahme durch Anpassung der Spannungsversorgung und des Systemtaktes deutlich verringert werden¹⁷⁶. Dies ist allerdings mit zusätzlichem Schaltungsaufwand verbunden.

Je nach Einsatz von Batterien oder Elektrocondensatoren können Funksensorknoten in in einem Kubikzentimeter nur zwischen 1 und 1300 Milliwatt zwischenspeichern. Für Temperatur-, Druck- und Drehmomentmessungen mit moderaten Messintervallen und minimalistischer Funkkommunikation kann der gespeicherte Energievorrat über die gesamte Systemlebensdauer ausreichen. Für die Mehrzahl der Anwendungen ist jedoch ein Nachladen der Energiepuffer erforderlich. Neben dem regelmäßigen Aufladen (bedrahtet oder induktiv) ist auch eine Wandlung von Energie aus der Umgebung (Tabelle 24) in Betracht zu ziehen.

¹⁷⁶ Paradiso, J.; Starner, T.: Energy Scavenging for Mobile and Wireless Electronics, IEEE Pervasive Computing, Vol.4, No.3, 01–03/2005, S. 18-27

Tabelle 24: Typische Kennwerte einiger autarker Mikro-Energieversorgungen

Energiequelle	Wandlerkomponente	Energieeffizienz	Nutzbare Leistungsdichte
Bewegung	Piezokeramik, Spule	5 – 60 %	0,1 ... 10 mW/g
Licht	Solarzellen	5 – 36 %	0,005 ... 30 mW/cm ²
Wärme	Thermoelement	1 – 3 %	1 ... 20 μ W/cm ³ /K
Funk	Antennen	1 – 90 %	1 ... 900 μ W/cm ²

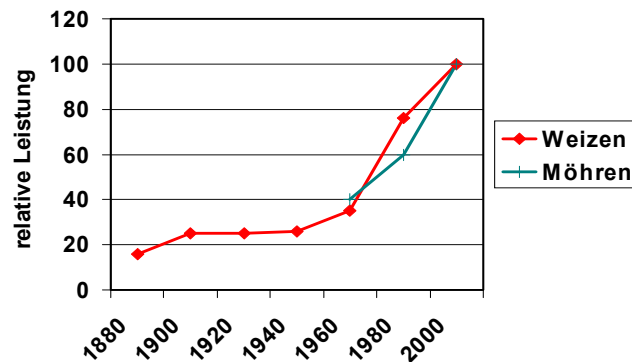
Während die Anwendung von Solarzellen in vielen Industrieumgebungen aufgrund der Staubproblematik eingeschränkt ist, bieten Thermogeneratoren oftmals die Möglichkeit die benötigte Energie bereitzustellen. Dabei muss man jedoch beachten, dass ein ausreichender Temperaturgradient, z.B. mit Hilfe von Kühlkörpern, sicherzustellen ist. Weiterhin sind Vibrationswandler eine interessante Alternative, um die notwendige Energie zu erzeugen. Eine besonders große Energieeffizienz bzw. ein hohes Miniaturisierungspotenzial kann jedoch lediglich dann erreicht werden, wenn die dominierenden Vibrationsfrequenzen mit der Eigenfrequenz des Vibrationswandlers übereinstimmen. Für universell verwendbare Energieversorgungsmodule muss das Energiewandler-Volumen um ein Vielfaches größer sein als für einen optimal abgestimmten Wandler. Je nach Einsatzort kann das Vibrationsspektrum auch stark veränderlich sein, ebenfalls recht große Energiewandler erforderlich macht. Aufbaukonzepte mit einer selbständigen Anpassung der Eigenfrequenzen befinden sich noch im Forschungsstadium. Auch viele MEMS-Wandler sind derzeit aufgrund ihrer geringen Energieausbeute noch nicht einsetzbar, weil bei solchen Energiewandlern die wenigen Mikrowatt lediglich dazu verwendet werden können, um die Leckströme zu kompensieren. Auch Kombinationen mit mehreren Energiewandlern sind denkbar, um die fehlende Verfügbarkeit einer Energiequelle durch eine andere ausgleichen zu können. Es ist jedoch sehr schwer abzuschätzen, wie sich die Kosten solcher Wandler entwickeln werden, da meist anwendungsspezifische Anpassungen erforderlich sind und man damit besonders große Stückzahlen mit entsprechenden Losgrößensparnissen kaum erwarten kann.

4 Rahmenbedingungen und Szenarien für Beispielanwendungen in der Landwirtschaft

Die europäische Landwirtschaft ist in den letzten Jahrzehnten zunehmend arbeitsteilig organisiert und muss sich in hohem Maße den einzelwirtschaftlichen Rationalitäten des sogenannten Agrobusiness unterordnen. Größenvorteile in der Produktion bedingen die Nachfrage nach homogenen und preisgünstigen landwirtschaftlichen Rohprodukten in großen Chargen. In der Landwirtschaft führt der Anpassungsdruck zu einer Konzentration auf die einträglichsten Erzeugnisse, zur Einführung von Effizienztechnologien wie Precision Farming (auf Deutsch: teilflächenspezifische Landwirtschaft) sowie zu einer Standardisierung von Produkten und Produktionsverfahren. Die ursprünglich Produktion und Reproduktion von vielfältigen Produkten in einer kleinteiligen Landwirtschaft ist in ein Produktions- und Innovationssystem eingepasst worden, das auf den Logiken der industriellen Produktion beruht.

Kostenvorteile beruhen auf speziellen Leistungseigenschaften einseitig hochgezüchteter Tiere und Pflanzen, die ihrerseits hohe Anforderungen an optimale Produktionsbedingungen stellen. Höchstleistung kann nur bei optimaler Nährstoffversorgung, Wasserversorgung und unter gezielter Bekämpfung von Krankheiten erfolgen. Beeindruckend ist die relative Steigerung des Flächenertrags im Pflanzenbau genauso wie die Futtermittelverwertung bei Tieren.

Abbildung 15: Zunahmen des Flächenertrags in der Landwirtschaft¹⁷⁷



Es deutet sich allerdings in der Darstellung an, dass diese Leistungsfortschritte gegenwärtig kleiner werden. Dies bedeutet aber nicht, dass der Druck auf das landwirtschaftliche Produktionssystem nachlässt. Vielmehr bestehen aus verschiedenen Richtungen Ansprüche an die weitere Leistungssteigerung der Landwirtschaft sowohl in Europa als auch weltweit. Dabei werden Effizienztechnologien wie Precision Farming eine erhebliche Rolle spielen. Die Chancen, dass sich hier Anwendungsfelder für AVMs finden, stehen gut.

4.1 Ansprüche aufgrund wachsender Weltbevölkerung

Die nach wie vor wachsende Weltbevölkerung erfordert größere Nahrungsmengen. Besonders die Stadtbevölkerung wächst auch in den Entwicklungs- und Schwellenländern. Ungefähr für das Jahr 2050 wird ein Maximalwert für die Weltbevölkerung von ca. 9 Milliarden Menschen prognostiziert. Die Gruppe wohlhabender Menschen wächst dabei gegenwärtig gerade in Schwellenländern stark. Ein geradezu alarmierender Befund ergibt sich aus der von Myers und Kent¹⁷⁸ vorgelegten Untersuchung „New Consumers“, nämlich dass in den prosperierenden Einkommensklassen von insgesamt 20 untersuchten Entwicklungs- und Transformationsstaaten inzwischen „mehr als eine Milliarde Menschen die Finanzkraft besitzen, einem konsumistischen Lebensstil zu frönen“¹⁷⁹. Nie zuvor in der Geschichte der Menschheit sei in einer derart kurzen Zeitspan-

¹⁷⁷ Clausen, J.; Walter, S.: Marktsituation und Anreizstrukturen. In: Institut für ökologische Wirtschaftsforschung, Öko-Institut e.V., Schweisfurth-Stiftung, Freie Universität Berlin, Landesanstalt für Großschutzgebiete (Hrsg.): Agrobiodiversität entwickeln! Handlungsstrategien für eine nachhaltige Tier- und Pflanzenzucht, Endbericht, Berlin, 2004, Online unter www.agrobiodiversitaet.net vom 16.1.2008

¹⁷⁸ Myers, N. ; Kent , J.: Die neuen Konsumenten in Entwicklungs- und Transformationsländern und der Einfluss ihres Wohlstands auf die Umwelt, in: Natur und Kultur, 2005, 6/1, 3-22

¹⁷⁹ Myers, N. ; Kent , J.: Die neuen Konsumenten in Entwicklungs- und Transformationsländern und der Einfluss ihres Wohlstands auf die Umwelt, in: Natur und Kultur, 2005, 6/1, 3-22

ne ein solcher Zuwachs an materiellem Wohlstand zu verzeichnen gewesen. Durch die etwa 1,1 Milliarden „neuen Konsumenten“ werde momentan ein Nachfrageboom im Bereich besonders problematischer Güter ausgelöst: Autos, Rindfleisch, Elektrogeräte etc. Die damit zukünftig einhergehenden Beanspruchungen an Wasser, Energie, Fläche, Ressourcen und ökologischen Assimilationskapazitäten entziehen sich bisherigen Maßstäben¹⁸⁰.

4.2 Ansprüche zum Schutz der Umwelt

Es besteht in weiten Bereichen Konsens über die wesentlichen Umweltwirkungen der Landwirtschaft: Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen, Nährstoffeinträge, Pestizide und Wasserverbrauch gehören ohne Zweifel dazu. Die Problemfelder sind dabei nicht diskret, sondern vernetzt. So führen beispielsweise ein Überschuss an Stickstoffdünger und der Humusabbau zu verstärkten Lachgasemissionen (N₂O) aus dem Boden, welches wiederum durch seine hohe Wirksamkeit erheblich zum Treibhauseffekt beiträgt. Im folgenden sei zunächst ein Überblick über die verschiedenen Wirkungskategorien gegeben. Dabei fokussiert die Darstellung auf diejenigen Wirkungskategorien, bei denen ein Problemlösungsbeitrag von Effizienztechnologien wie Precision Farming und AVMs vermutet werden kann. Die Probleme der Pestizide, der Agrobiodiversität und der Erosion werden daher nicht behandelt.

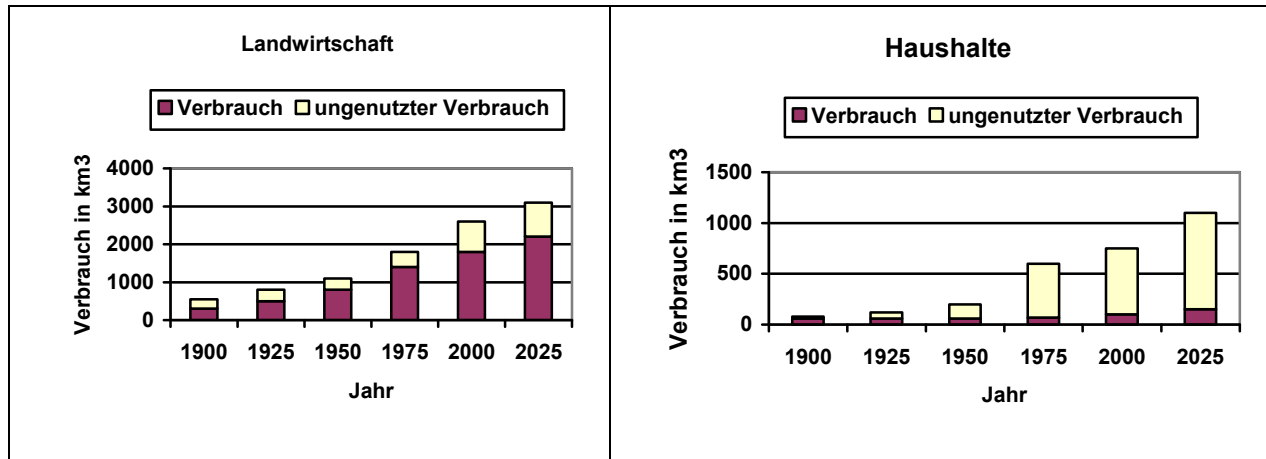
4.2.1 Süßwasserknappheit

Weltweit haben mehr als eine Milliarde Menschen keinen Zugang zu sauberem Trinkwasser. Gleichzeitig kann eine hohe Produktivität der Landwirtschaft nur mit intensiver Bewässerung erreicht werden – was angesichts der immer trockeneren Sommer zunehmend auch in unseren Breiten zutrifft. Die Landwirtschaft wurde damit zum größten Wasserverbraucher weltweit. Aber auch der Verbrauch der Haushalte und der Industrie steigt kontinuierlich. Der größte Teil des der Umwelt entnommenen Wassers wird allerdings verschwendet. Die UNEP¹⁸¹ geht von Verlusten zwischen 90% bei industrieller Wassernutzung und Haushalten sowie 30% in der Landwirtschaft aus (Abbildung 16).

¹⁸⁰ Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie: Fair Future. Begrenzte Ressourcen und globale Gerechtigkeit, 2005, München

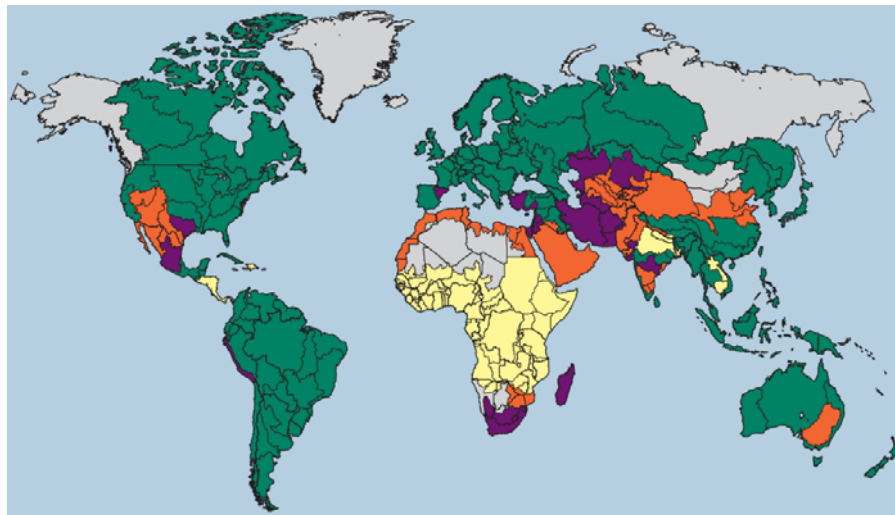
¹⁸¹ UNEP: Vital Water Graphics, The worlds fresh and marine waters, 2002, Internetressource auf www.unep.org vom 16.1.2008

Abbildung 16: Entwicklung von Wasserentnahme und -nutzung in Landwirtschaft und Haushalten



Die Knappheit von Süßwasser ist dabei regional stark unterschiedlich. Die weltweiten Süßwasserreserven sind zwar groß, die Schwerpunkte der Reserven liegen allerdings nicht unbedingt dort, wo die Schwerpunkte des Verbrauchs liegen. Hinzu kommt, dass immer mehr Süßwasserreserven mit unterschiedlichen chemischen und biologischen Stoffen (z.B. Schwermetalle, Düngemittel) kontaminiert sind. In China führt dies bereits zu bedrohlicher Wasserknappheit. FAO und UN unterscheiden des weiteren wie in der Abbildung gezeigt zwischen Gebieten mit physischer und ökonomischer Wasserknappheit.

Abbildung 17: Gebiete physischer und ökonomischer Süßwasserknappheit¹⁸²



- Physische Wasserknappheit
- An der Grenze zur physischen Wasserknappheit
- Ökonomische Wasserknappheit
- Geringe oder keine Wasserknappheit
- Nicht erfasst

Physische Wasserknappheit: Die Nutzung der Wasserreserven hat die Grenzen nachhaltiger Nutzung erreicht oder überschritten. 75% des Oberflächenwassers wird für landwirtschaftliche und industrielle Zwecke, sowie in den Haushalten verbraucht.

An der Grenze zur physischen Wasserknappheit: Mehr als 60% der Oberflächenwasserreserven werden entnommen. Die physische Wasserknappheit steht in naher Zukunft bevor.

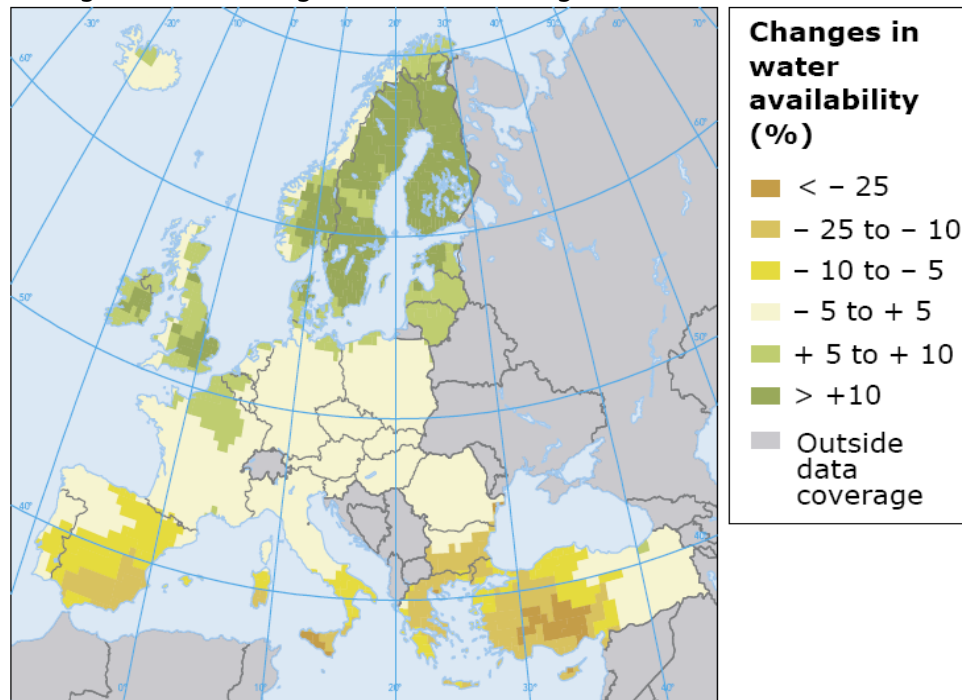
Ökonomische Wasserknappheit: Industrielles, finanzielles und Humankapital begrenzen den Zugang zu Wasser, obwohl Wasser vorhanden ist. Wasser ist in Bezug auf den Wasserverbrauch reichlich vorhanden. Weniger als 25% der Oberflächenwasserressourcen werden für menschliche Zwecke verbraucht.

Geringe oder keine Wasserknappheit: Reichlich vorhandene Wasservorkommen im Vergleich zur Nutzung, weniger als 25% des Oberflächenwassers werden für menschliche Nutzung herangezogen.

In großen Gebieten mit intensiver Landwirtschaft und hoher Bevölkerung, besonders in Nordamerika, Asien und fast im gesamten Afrika, besteht oder droht Süßwasserknappheit. Damit einhergehen werden zukünftig steigende Wasserpreise und ein deutlicher Druck zur Effizienzsteigerung der Wasserwirtschaft in Landwirtschaft, Industrie und Haushalten zur Vermeidung von Verlusten. Aber auch in Teilen Europas sieht die Zukunft eher trocken aus (Abbildung 18).

¹⁸² FAO, UN: World Water Day 2007 – coping with scarcity. Online unter www.unwater.org vom 16.1.2008

Abbildung 18: Veränderungen der Wasserverfügbarkeit nach dem LREM-E Szenario bis 2030¹⁸³



Fast im gesamten Südeuropa sieht die Klimafolgenforschung ein um teilweise mehr als 25% zurückgehendes Wasserangebot. Aber auch in Mitteleuropa sieht die Lage nicht völlig unkritisch aus, denn es werden auch Verschiebungen in der jahreszeitlichen Niederschlagsmenge erwartet. In Deutschland sind beispielhaft regenreichere Winter und trockenere Sommer zu erwarten.

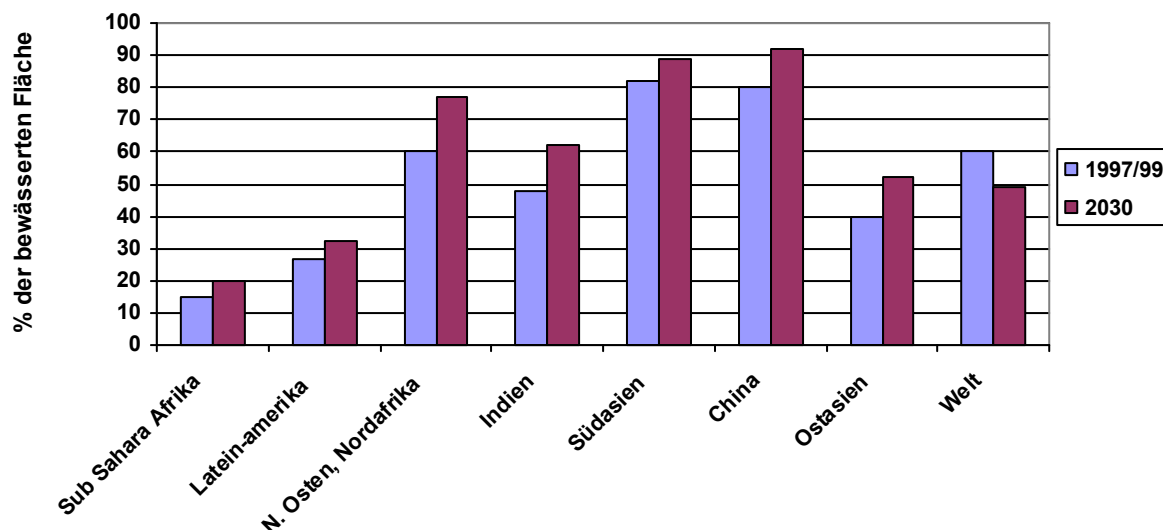
Insgesamt ist die bewässerte Landwirtschaftsfläche von ca. 140 Mio. ha in 1961 auf ca. 280 Mio. ha im Jahr 2002 gestiegen. Bezogen auf eine gesamte Ackerlandfläche im Jahr 2000 von 1.397 Mrd. ha sowie eine Fläche von Dauerkulturen (Wein, Obst, Oliven) von 135 Mio. ha¹⁸⁴ ist dies immerhin ein Anteil von 18% - Tendenz deutlich steigend. Bis 2030 erwartet die FAO eine weitere, deutliche Zunahme der bewässerten Flächen¹⁸⁵ (Abbildung 19).

¹⁸³ European Environment Agency: European Environment Outlook, 2005, Kopenhagen, online unter http://reports.eea.europa.eu/eea_report_2005_4/en (17.1.2008)

¹⁸⁴ www.faostat.fao.org (29.1.2008)

¹⁸⁵ FAO (Food and Agriculture Organisation): The use of water in agriculture, 2004, <ftp://ftp.fao.org/agl/aglw/docs/agricfoodwater.pdf> (06.10.08)

Abbildung 19: Anteil der realen Bewässerungsfläche an der potenziellen Bewässerungsfläche in Entwicklungsländern



Hinsichtlich der mit Kreisberegnungsanlagen bewässerten landwirtschaftlichen Fläche sind keine unabhängigen statistischen Erhebungen verfügbar; die Firma Valmont Irrigation – der weltweit führende Anbieter – gibt jedoch an, „weltweit mehr als 145.000 Center Pivots, linearen Anlagen und Eckenberegnern, durch die ungefähr 6 Millionen Hektar auf der ganzen Welt beregnet werden“¹⁸⁶ verkauft zu haben. In den USA alleine werden rund 8,5 Millionen Hektar mit Kreisberegnungsanlagen bewässert¹⁸⁷. Aufgrund dieser Eckdaten lässt die die weltweit mit Kreisberegnungsanlagen bewirtschaftete Fläche mit **10-20 Millionen Hektar** weltweit abschätzen, Tendenz steigend.

Die FAO erwartet bis 2030 eine langsamere Zunahme der Bewässerungsflächen als in den letzten 30 Jahren¹⁸⁸:

In particular in developing countries, the area equipped for irrigation is expected to have expanded by 20 percent (40 million ha) by 2030. This means that 20 percent of total land with irrigation potential but not yet equipped will be brought under irrigation, and that 60 percent of all land with irrigation po-

¹⁸⁶ Valmont Irrigation: Valley®-Produktkatalog, http://www.valley-fr.com/userfiles/file/ProdCat08%20German_scr.pdf; verglichen mit Kreisberegnungsanlagen haben Linearberegnungsanlagen ein vergleichsweise kleinen Marktanteil von ca. 5% (R. Hauser: Bewässerung immer lohnender, RWZ-agrarReport 3/2008)

¹⁸⁷ Perry, C.; Pocknee, S.; Hansen, O.: Variable-rate irrigation: water savings and increased yields? Engineering & Technology for a Sustainable World, 1. Januar 2003

¹⁸⁸ FAO (Food and Agriculture Organisation): The use of water in agriculture, 2004, <ftp://ftp.fao.org/agl/aglw/docs/agricfoodwater.pdf> (06.10.08)

tential (402 million ha) will be in use by 2030. The net increase in irrigated land (40 million ha, 0.6 percent per year) projected to 2030 is less than half the increase over the preceding 36 years (99 million ha, 1.9 percent per year). The projected slowdown in irrigation development reflects the projected lower growth rate of food demand, combined with the increasing scarcity of suitable areas for irrigation and of water resources in some countries, as well as the rising cost of irrigation investment. The first selection of economically attractive irrigation projects has already been implemented, and prices for agricultural commodities have not risen to encourage investment in a second selection of more expensive irrigation projects. Most of the expansion in irrigated land is achieved by converting land in use in rainfed agriculture or land with rainfed production potential but not yet in use into irrigated land. The expansion of irrigation is projected to be strongest in South Asia, East Asia and Near East/North Africa. These regions have limited or no potential for expansion of non-irrigated agriculture. Arable land expansion will nevertheless remain an important factor in crop production growth in many countries in sub-Saharan Africa, Latin America and some countries in East Asia, although to a much smaller extent than in the past. The growth in wheat and rice production in the developing countries will increasingly come from gains in yield, while expansion of harvested land will continue to be a major contributor to the growth in production of maize.

Technische Fortschritte der Bewässerungstechnologie sind damit dringend geboten und ein Beitrag der AVM-Technologie zum effizienten Wassermanagement im Kontext von Precision-Irrigation-Systemen wäre nützlich.

4.2.2 Treibhausgasemissionen

Die Landwirtschaft ist nach Schätzung des aktuellen Greenpeace-Reports „Cool Farming“¹⁸⁹ für einen Anteil von 17% bis 32 % der menschengemachten Treibhausgasemissionen verantwortlich (Tabelle 25). Wesentliche Beiträge beruhen auf der Nutzbarmachung von Land für die Landwirtschaft, z.B. durch die Brandrodung von Wäldern, durch Stickoxidemissionen aus dem Boden, aus Methanemissionen der Viehherden sowie diversen anderen Feldern.

¹⁸⁹ Greenpeace: Cool Farming: Climate impacts of agriculture and mitigation potential, 2008, online unter www.greenpeace.org (16.1.2008)

Tabelle 25: Quellen direkter und indirekter Treibhausgasemissionen aus der Landwirtschaft

Quellen von Treibhausgasen in der Landwirtschaft	Millionen t CO₂-äq
Landrodung für landwirtschaftliche Nutzung	5900
Stickoxidemissionen aus dem Boden	2128
Methan von Kühen und aus Fermentationsprozessen	1792
Verbrennung von Biomasse	672
Reisanbau	616
Düngung mit Wirtschaftsdünger	413
Düngerproduktion	410
Bewässerung	369
Nutzung landwirtschaftlicher Maschinen	158
Pestizidproduktion	72

Die N₂O-Emissionen aus der Landwirtschaft werden voraussichtlich bis 2030 um 35- 60% aufgrund erhöhten Düngereinsatzes sowie steigender Viehhaltung stiegen¹⁹⁰, was wiederum zu erhöhtem Beitrag zum Treibhauseffekt resultiert. In mehreren Handlungsfeldern könnte Precision Farming Fortschritte bringen:

- Reduzierte Düngermengen durch bessere raum-zeitliche Ausbringung und damit Auswirkungen auf die notwendige Düngemittelmenge sowie die Bodenemissionen.
- Reduzierter Energieverbrauch von landwirtschaftlichen Maschinen durch die Vermeidung unnötiger Bearbeitungsgänge.
- Reduzierter Energieverbrauch aufgrund effizienterer und damit reduzierter Bewässerung.

Aber nicht nur in Precision Farming liegen Potenziale. Der ökologische Landbau leistet ebenfalls Beiträge. Ökologisch bewirtschaftete Böden binden mehr CO₂ als konventionell bewirtschaftete^{191,192}. Auch insgesamt ist das Treibhauspotenzial der ökologischen Landwirtschaft pro Tonne Produkte deutlich, um ca. ein Drittel, niedriger, als das konventioneller Betriebe (Hülsbergen und Küstermann 2008). AVM-Technologien sollten daher von Anfang an mit Blick auf beide Landbausysteme (ökologisch und konventionell) entwickelt werden.

¹⁹⁰ FAO (Food and Agriculture Organisation): World Agriculture: towards 2015/2030, 2002

¹⁹¹ Greenpeace: Cool Farming: Climate impacts of agriculture and mitigation potential, 2008, online unter www.greenpeace.org (16.1.2008)

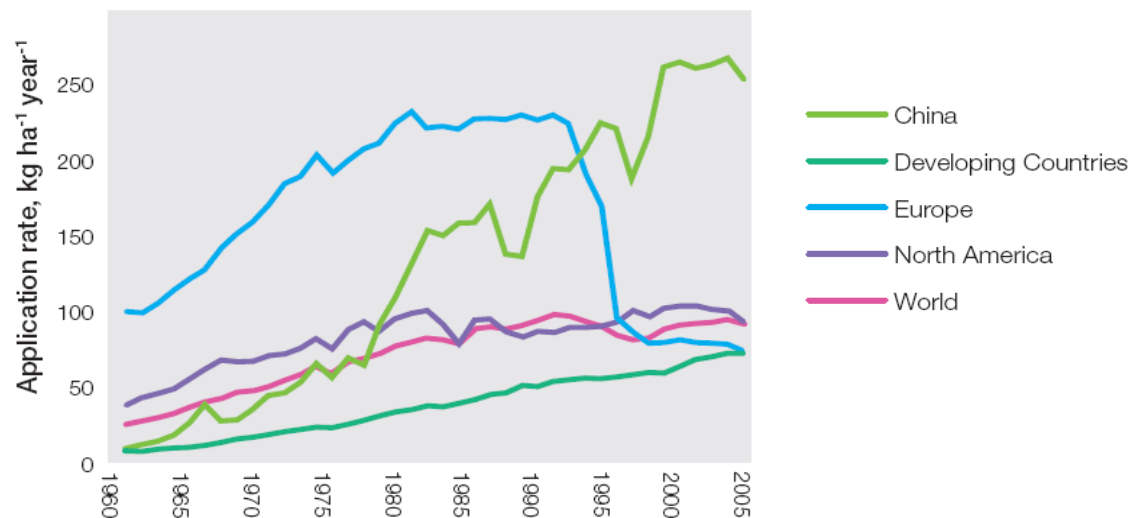
¹⁹² Hülsbergen, K.-J.; Küstermann, B.: Optimierung der Kohlenstoffkreisläufe in Öko-Betrieben. In: Ökologie und Landbau 145, 1/2008 S. 20-22

4.2.3 Überdüngung

Die Produktion, Ausbringung und weitere stoffliche Umsetzung mineralischer Dünger, aber auch von Mist und Gülle, trägt nicht nur, wie oben beschrieben, zum Treibhauseffekt bei, sondern verändert auch die Nährstoffversorgung von Boden, Grund- und Oberflächengewässern. Nachdem die mineralische Düngung im 19. Jahrhundert eingeführt wurde, wurden Düngemittel zunächst recht sparsam verwendet, da sie in Gewinnung und Transport mit den damalig verfügbaren Techniken aufwendig und teuer waren.

Dies hat sich in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts in Westeuropa grundlegend verändert. Die ausgebrachten Mengen – nach der Devise „viel hilft viel“ – wuchsen und führten besonders im Grund- und Oberflächenwasser zu deutlichen Umweltwirkungen. Es kam zu Bemühungen, die Düngermengen zu reduzieren. Aber erst in den 90er Jahren resultierten diese Bemühungen in Erfolgen. „Cool Farming“¹⁹³ dokumentiert die in Europa eingesetzte Düngermenge im globalen Kontext der letzten Jahrzehnte (Abbildung 20).

Abbildung 20: Ausbringung von chemischen Düngemitteln auf Ackerland in kg pro ha und Jahr



Interessant ist nun die Gegenüberstellung des Outputs an Nährstoff - Überschüssen. Für die Bilanz von Phosphor zeigt sich ein Rückgang der Überschüsse seit 1990 von 17 kgP/ha auf 10 kgP/ha um rund 40 %, während im gleichen Zeitraum der Stickstoff - Überschuss auf nahezu unverändert hohem

¹⁹³ Greenpeace: Cool Farming: Climate impacts of agriculture and mitigation potential, 2008, online unter www.greenpeace.org (16.1.2008)

Niveau von 120 bis 130 kgH/ha verharnt und insgesamt nur um 0,5 % zurückgegangen ist¹⁹⁴. Es zeigt sich ein deutlicher, paralleler Verlauf des Inputs und des Outputs von Stickstoff und Phosphor über die Zeit für beide Stoffe. Dies ist so zu interpretieren, dass insbesondere der Verbrauch von Stickstoff noch weit über dem Bedarf liegt, was einen hohen Überschuss bedingt und deutlich macht, dass noch deutlich effizienter gewirtschaftet werden könnte.

Viele Seen sind, wie die aktuelle Umweltforschung zumindest in Deutschland zeigt, weiterhin überdüngt¹⁹⁵. Vor allem aus der Landwirtschaft kommen zuviel Phosphat und Stickstoff in die Gewässer. Dort sorgt der Überfluss an Nährstoffen für ein starkes Pflanzen- und Algenwachstum. Die Folgen sind Sauerstoffmangel, Seen können kippen und Fische sterben. Deshalb muss der Eintrag von Phosphat und Stickstoffen in die Seen deutlich verringert werden. Dies wird in den nächsten Jahren ein wesentliches Anliegen der Umsetzung der EG-Wasserrahmenrichtlinie sein.

4.3 Entwicklungen in der Landwirtschaftspolitik

Die ökonomischen Randbedingungen sind eine wichtige Steuergröße für die landwirtschaftliche Praxis. Von der gemeinsamen Agrarpolitik der EU sowie von den weltweiten Verhandlungen der WTO gehen deutliche Preissignale auf einer Reihe bedeutender Märkte aus. Die European Environment Agency¹⁹⁶ schätzt die Auswirkungen verschiedener Varianten ökonomischer Szenarien auf die Stoffströme der Landwirtschaft ab.

Ein Szenario baut auf der **Weiterführung der Reform der gemeinsamen Agrarpolitik** auf. Der wesentliche Wirkungsweg wird hier über die langsame Einführung von Weltmarktpreisen für sämtliche tierischen Produkte gesehen, was 2020 in zu 40% niedrigeren Milchpreisen und 9% kleineren Milchviehbeständen, genauso kleineren Schweine- und Geflügelbeständen führt. Aufgrund der kleineren Nachfrage nach Futter sinkt die Anbaufläche für Futter. Die N, P und K Überschüsse sinken um 4 bis 5%, die Gasemissionen um 2 bis 5%.

Ein zweites **Szenario um einen stärkeren Euro** führt nach Annahme der EEA nicht zu wesentlichen Auswirkungen in der Landwirtschaft oder ihren Umweltwirkungen.

¹⁹⁴ Naturschutzbund Deutschland: Landwirtschaft 2015 - Perspektiven und Anforderungen aus Sicht des Naturschutzes, 2006, Berlin, online unter www.nabu.de (17.1.2008)

¹⁹⁵ Wöbbecke, K.; Klett, G.; Rechenberg, B.: Wasserbeschaffenheit der wichtigsten Seen in der Bundesrepublik Deutschland, Reihe TEXTE des Umweltbundesamtes 36/2003, Berlin

¹⁹⁶ European Environment Agency: European Environment Outlook, 2005, Kopenhagen, online unter http://reports.eea.europa.eu/eea_report_2005_4/en (17.1.2008)

Das **Best Practice Szenario der Düngewirtschaft**¹⁹⁷ führt als einziges zu relevanten Reduktionen der Umweltwirkungen und ist letztlich mit den anderen beiden Szenarien kompatibel. Das Szenario sieht technische Möglichkeiten der besseren Abstimmung von pflanzlichen Nährstoffbedarfen und dem Nährstoffangebot, sowohl in Bezug auf das Handling von Wirtschaftsdünger als auch von Kunstdünger. Bei letzterem nimmt es die Reduktion der Überschussmengen von N, P und K um 25%, 70% und 57% bis 2020 an. Weiter findet eine Verschiebung vom Mineraldünger (minus 30 bis 60%) zu organischen Düngern (Zunahme um 60 bis 80%) statt. Precision Farming stünde sicher im Zentrum vieler Best Practice Elemente.

Der Naturschutzbund Deutschland¹⁹⁸ stellt ebenfalls eine Reihe Szenarien nebeneinander und bewertet sie mit Blick auf ihre Auswirkungen auf den Naturschutz. Zunächst wird dabei ein Blick auf das **Szenario Totalliberalisierung** geworfen, welches für alle landwirtschaftlichen Produkte Weltmarktpreise annimmt und damit zu einem mehr oder weniger kompletten Zusammenbruch der EU-Landwirtschaft führt, sofern sie sich nicht ohnehin bereits mit „Urlaub auf dem Bauernhof“ oder „Direktvermarktung“ erfolgreich vom Weltmarkt entkoppelt hat.

Das **Szenario Beschränkung auf Erste-Säule-Agrarmittel** führt zu einem Wegbrechen der Landwirtschaft in Ungunstlagen (Berggebiete, magere Böden) und einer Zunahme der Intensivlandwirtschaft der großen Betriebe sowie der Low-Input-Betriebe, z.B. großflächige Weidekuhhaltung. Ein Wachstum der Großbetriebe könnte wiederum zu einer Ausbreitung von Precision Farming führen.

Große Chancen für die Umwelt sieht der NABU im **Szenario Beschränkung auf Zweite-Säule-Agrarmittel**. Von der direkten Bezahlung von Umwelt- und Landschaftspflegeleistungen könnten nicht nur die Landwirte in Ungunstlagen sondern auch Intensivbetriebe profitieren, wenn sie die für sie rentablen Maßnahmen nutzen. Auch im Rahmen dieses Szenarios finden Effizienzmaßnahmen damit ihren Platz.

Negative Auswirkungen auf den Naturschutz verbindet der NABU mit dem **Szenario Weiterführung der Agrarpolitik des Status Quo**. Durch die geplanten Mittelkürzungen werden sich besonders gefährdete Arten und Populationen von Tieren und Pflanzen der Agrarlandschaft sowie die Vielfalt der Habi-

¹⁹⁷ Aus dem European Environment Outlook 2005 (EEA 2005) geht nicht deutlich hervor, warum ein Best-Practice-Szenario in Fertilizer-Handling überhaupt entwickelt wurde. Aus der Tatsache, dass es aber überhaupt entwickelt wurde, lässt sich die besondere Bedeutung schließen, die die Düngewirtschaft aus Sicht der EU für die Zukunft der Landwirtschaft wie auch ihrer Umweltwirkungen hat.

¹⁹⁸ Naturschutzbund Deutschland: Landwirtschaft 2015 - Perspektiven und Anforderungen aus Sicht des Naturschutzes, 2006, Berlin, online unter www.nabu.de (17.1.2008)

tate und der Nutztierassen und Kulturpflanzensorten mit diesem Szenario nicht erhalten lassen.

Schon 1997 stellte das Umweltbundesamt im Band „Nachhaltiges Deutschland“¹⁹⁹ ebenfalls drei landwirtschaftliche Szenarien vor. Das **Status-Quo-Szenario** geht im wesentlichen von weiterer Liberalisierung der Märkte sowie einer hohen Rate des technischen Fortschritts aus. Bei einer moderaten Ausdehnung der ökologisch bewirtschafteten Flächen auf ca. 10% in 2010 lässt das Szenario Zweifel in Bezug auf die Reduzierung von Nährstoffüberschüssen erkennen.

Das **Effizienz-Szenario** mit starken Verbesserungen der technischen Effizienz der Prozesse. Bei Stickstoff sieht das Szenario hohe Potenziale der Substitution von Mineraldünger durch Wirtschaftsdünger. Auch bei Pflanzenschutzmitteln werden hohe Effizienzpotenziale vermutet.

Im **Szenario Struktur- und Bewusstseinswandel** kommen letztlich mehr ökologischer Landbau, veränderte Ernährungsmuster (z.B. weniger Fleisch) und eine regionalere Wirtschaftsstruktur hinzu. Dies Szenario erreicht technische Effizienz, ohne dass dies explizit erwähnt wird, vermutlich über die Ausrichtung der Fördermittelvergabe an Umweltmaßnahmen, also z.B. der effizienten Ausbringung von Dünger.

Letztlich weisen alle drei Szenario-Typologien mit Blick auf die hier vorliegende Fragestellung einige Übereinstimmungen auf:

- Ein in fast allen Szenarien mehr oder weniger ausgeprägter Kostendruck dürfte erreichen, das ökonomisch erschließbare Effizienzpotenziale der Ausbringung von Dünger und Pflanzenschutzmitteln auch erschlossen werden.
- Über Agrarumweltmaßnahmen der zweiten Säule der EU-Agrarpolitik könnte dabei das Niveau der Wirtschaftlichkeit u.U. deutlich abgesenkt werden.
- Bei technisch effizienterer Ausbringung von Wirtschaftsdünger (Gülle und Mist), dessen Verfügbarkeit mit dem Nutztierbestand quasi vorgegeben ist, reduziert sich der Bedarf an Mineraldünger u.U. ganz erheblich.
- Probleme in der Verfügbarkeit oder Fortschritte bei der effizienten Ausbringung von Wasser sind in keinem der Szenarien Thema.

¹⁹⁹ Umweltbundesamt: Nachhaltiges Deutschland, Wege zu einer dauerhaft umweltgerechten Entwicklung, 1997, Berlin

Effizienztechnologien und Precision Farming stehen damit kaum in einem Widerspruch zu einer der denkbaren Zukunftsszenarien der Landwirtschaft. Je nach Entwicklung der ökologischen Landwirtschaft, des Fleischkonsums und anderer Variablen (aus heutiger Sicht wäre hier auch der Fortschritt des Klimawandels zu nennen) rücken dabei unterschiedliche Detailtechnologien in den Mittelpunkt. Und auch der Frage, wie Precision Farming aus Sicht des ökologischen Landbaus beurteilt wird, kommt Bedeutung zu. Zunächst jedoch soll im folgenden Abschnitt das Konzept des Precision Farming kurz vorgestellt werden.

4.4 Rahmenszenario Precision Farming 2020

Die Niederschlagsmenge ist in vielen Gebieten Deutschlands nach wie vor ausreichend für gute Erträge, so dass vielfach auf Bewässerung noch verzichtet werden kann. In Südeuropa, dem Nahen Osten (Israel, Jordanien, Türkei, etc.), vielen Staaten der USA und auch in vielen Entwicklungs- und Schwellenländern hat die Bewässerung mit niedrigsten Wassermengen aber extrem an Bedeutung gewonnen. Treibender Faktor sind hierbei die aufgrund von Wirkungen des Klimawandels sinkenden Niederschlagsmengen in Verbindung mit nach wie vor hohem Bedarf an landwirtschaftlichen Produkten. Die verfügbare Wassermenge geht in einigen Gebieten um über 25% zurück. Zunehmend wird künstlich entsalztes und damit sehr teures Wasser auch in der Landwirtschaft eingesetzt werden, Dies zwingt zu rigiden Wassersparmaßnahmen gerade in der Landwirtschaft, die vielerorts schon gesetzlich vorgeschrieben sind.

Ökonomisch treibender Faktor ist dabei nicht die Erhöhung der Erträge auf der bewässerten Fläche aufgrund der Vermeidung zu trockener oder zu nasser Zustände, sondern der Effekt, dass mit einer fixen Wassermenge mit effizientesten Technologien eine größere Fläche bebaut werden kann und somit der landwirtschaftliche Ertrag höher ausfällt.

Überall dort, wo rigides Wassersparen erforderlich ist, haben sich daher Technologien des Precision Farming vergleichsweise stark durchgesetzt. Dies gilt in Industrienationen genauso wie in Entwicklungs- und Schwellenländern, in denen aber etwas einfachere Technologien dominieren. Im Jahr 2020 ist die kontinuierliche Erfassung von Bodenfeuchtigkeit über elektronische Bodensensoren Standardelement im Precision Farming. Auch präzise Bewässerungsgeräte, oft auf Basis der Tropfbewässerung, haben sich durchgesetzt. Bei der Erfassung der Bodenfeuchte konkurrieren abhängig von der Variabilität des Bodens die Lanzentechnologie und das AVM-System.

4.5 Precision Farming

Die teilflächenspezifische Bewirtschaftung – allgemein Precision Farming genannt – unterstützt das Erfahrungswissen der Landwirte durch detaillierte

Messdaten und geographische Informationssysteme. Denn das Erfahrungswissen der Landwirte stößt an Grenzen wenn²⁰⁰:

- neue Flächen in die Bewirtschaftung genommen werden,
- Fremde, Fahrer oder Dienstleister mit der Bewirtschaftung betraut werden oder
- der eigene Betrieb so groß oder so vielfältig wird, dass das Erfahrungswissen nicht mehr ausreicht.

Die KTBL definiert Precision Farming als „die zielgerichtete und ortsdifferenzierte Bewirtschaftung landwirtschaftlicher Nutzflächen unter Berücksichtigung kleinräumiger natürlicher Wachstumsbedingungen und aktueller Zustände.“

4.5.1 Technologie

Precision Farming setzt an verschiedenen Punkten des Ackerbauzyklus an. So werden zum einen für die „Schlagkartei“ Bodendaten erhoben, Nährstoffuntersuchungen gemacht und über Luftbilder und Infrarotaufnahmen fließen Daten der sogenannten „Fernerkundung“ ein. Aus den Daten werden Hinweise für Aussaat, Pflanzenschutz und Düngung abgeleitet. Bei der Ernte erfolgt eine teilflächenspezifische Ertragsmessung, mit der die Daten abgeglichen werden und auf deren Basis das System von Jahr zu Jahr lernt.

In der noch verhältnismäßig kurzen Zeit der Entwicklung von Precision Farming wurden eine ganze Reihe von Methoden entwickelt, Daten zu verschiedenen Faktoren zu gewinnen, die den landwirtschaftlichen Ertrag beeinflussen.

²⁰⁰ Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V.: Precision Farming in der Praxis – Technik und Anwendungsmöglichkeiten, Folienserie, 2007, online unter www.ktbl.de (5.10.2007)

Tabelle 26: Übersicht über Methoden der Boden- und Bestandserhebung²⁰¹

Methode	Informationen	Kosten	Bemerkungen
Ertragskartierung	Ertrag, Feuchte	0–15 €/ha	Ertrag als Summe aller Einflüsse, derzeit nur bei Druschfrüchten verbreitet
Karte der Bodenschätzung	Bodenart, Humusgehalt, Schichtung	15 €/ha	ungenau Grenzen, Digitalisierung und Aktualisierung meist erforderlich
Leitfähigkeitsmessung (EM38)	Ton- bzw. Sandgehalt	5–10 €/ha	Vorinformationen für Flächenunterschiede
Bodenbeprobung Grundnährstoffe	Bodenart, pH-Wert, Gehalt an P, K, Mg	10 €/Probe	bei Rasterbeprobung keine ausreichende Information über Nährstoffverteilung
Bodenbeprobung Stickstoff	Nmin im Boden	22 €/Probe	lediglich Momentaufnahme
Hofbodenkarte	Bodenart, Humusgehalt, Schichtung	20–50 €/ha	langfristige Nutzung möglich
Luftbild	Bodenunterschiede, Bewuchs	10–15 €/ha	Mischinformation, gibt Momentaufnahme wieder
Satellitenbild	Bodenunterschiede, Bewuchs	20–40 €/ha	Mischinformation, gibt Momentaufnahmen wieder, nur für ganze Regionen erhältlich

Für den Einsatz von Precision Farming ist es erforderlich, einerseits Computerprogramme zu erarbeiten und Erfahrung zu gewinnen, mit der aus den verfügbaren Messdaten wirksame Anleitungen für teilflächenspezifische Bearbeitungsdifferenzierungen gewonnen werden können. Auch ist es erforderlich, über die Einführung von GPS-Systemen die genaue Ansteuerung bestimmter Punkte zu realisieren und über eine Dosierfähigkeit der Maschinerie zu erreichen, dass während der Bearbeitung die Intensität der Düngung, Aussaat oder Bewässerung überhaupt darstellbar wird. Der technische Aufwand ist somit erheblich.

Im Rahmen des Projektes „pre agro“ wurde ermittelt, dass der Anteil der Anwender 2001 bei etwa 10,8% (davon 3,5% beginnende Nutzer), 2005 schon bei etwa 12% (davon 4,1% beginnende Nutzer) der landwirtschaftlichen Betriebe lag. In 2007 stieg der Anteil auf 15,6% (davon 6,3 % beginnende Nutzer)²⁰². In den Befragung 2005 bis 2007 wurden für die Nutzer durchschnittlich

²⁰¹ Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V.: Precision Farming in der Praxis – Technik und Anwendungsmöglichkeiten, Folienserie, 2007, online unter www.ktbl.de (5.10.2007)

²⁰² Werner, A.; Dreger, F.; Schwarz, J.: Informationsgeleitete Pflanzenproduktion mit Precision Farming als zentrale inhaltliche und technische Voraussetzung für eine nachhaltige Entwicklung der landwirtschaftlichen Landnutzung – preagro II, 2008, Münchenberg, s. 583

che Betriebsgrößen von ca. 350 ha ermittelt, für die beginnenden Nutzer in 2005 noch 160 ha, in 2007 schon 120 ha. PF wird also langsam auch für etwas kleinere Betriebe interessant. Mit einem weiteren Wachstum der Anwendung gerade in Bereich der kleineren Betriebe kann also gerechnet werden²⁰³.

Precision Farming steht aber letztlich erst am Anfang. Das von der NASA entworfene „Digital Farm Scenario“ sieht über die gegenwärtigen Möglichkeiten hinaus eine Fülle zusätzlicher Daten in die Steuerung einfließen²⁰⁴. Generell steigt die Bedeutung flächenspezifischer Sensoren gegenüber der Fernerkundung. Hierdurch wird quasi die Kalibrierung der Fernerkundungsdaten mit lokalen Ist-Werten möglich. Als Kommunikationskanal bekommt die Funkübertragung eine höhere Bedeutung und die Häufigkeit der Datenerhebung nimmt zu, die Begriffe „täglich“ und „aktuell“ werden häufig verwendet.

4.5.2 Ergebnisse

Die Erwartung daran, mit reduzierten Mengen mineralischer **Stickstoffdünger** gleiche Erträge bzw. bei im Mittel annähernd gleicher Düngermenge höhere Erträge zu erzielen, hat sich nach Angabe des Deutschen Bundestages (2006) bestätigt. „Die Einsparungen bewegen sich dabei in der Größenordnung von 14 kg N/ha bzw. 7 Prozent der N-Düngung bei einem um bis zu 6 Prozent höheren Ertrag“²⁰⁵. Hierdurch werden sowohl die zu hohen Stickstoffüberschüsse reduziert als auch die Nitratauswaschungen in das Grundwasser vermindert. Theoretisch bestünde die Möglichkeit, eine lokal zu hohe Belastung des Grundwassers in die Düngerdosierung einzurechnen und so mit (zu) niedriger Menge, aber grundwasserschonend zu düngen. Mit Hilfe der Datensätze der Deckungsbeitragsrechnung der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft²⁰⁶ lässt sich aus diesen Daten die Kostendimension am Beispiel Weizen ableiten.

²⁰³ Jürgens, C.; Reichardt, M.: Precision Farming in der Praxis, Teilprojekt 6, 2006, Projektinformation online unter www.preagro.de (22.1.2008)

²⁰⁴ Harberts, R.; Roelofs, I.: Intelligent Archive Visionary Use Case: Precision Agriculture Scenario, NASA-Publication, 2003, online unter daac.gsfc.nasa.gov/intelligent_archive/VirtualFarms_v1.pdf (23.1.2008)

²⁰⁵ Deutscher Bundestag: Drucksache 16/3218 16. Wahlperiode, Bericht des Ausschusses für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung (18. Ausschuss) gemäß § 56a der Geschäftsordnung, Moderne Agrartechniken und Produktionsmethoden – ökonomische und ökologische Potenziale 2. Bericht: Precision Agriculture, 2006

²⁰⁶ Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) : www.lfl.bayern.de/ilb/pflanze/28073/index.php

Tabelle 27: Deckungsbeiträge und Kalkulationsdaten für den Anbau von Winterweizen

	Einheit	Winterweizen A-Weizen
Ertrag	dt/ha	68.8
Verkaufsware	%	98
Futterware	%	2
Preis (brutto)	€/dt	23.56
Marktleistung	€/ha	1621
Saat- bzw. Pflanzgutkosten	€/ha	66
Pflanzenschutz	€/ha	113
Eigenmechanisierung, variable Maschinenkosten	€/ha	164
Maschinenring/Ernte	€/ha	115
Düngung (nach Entzug)	€/ha	229
Hagelversicherung	€/ha	28
Trocknung	€/ha	35
Aufbereitung/Sortierung	€/ha	0
sonstige variable Kosten	€/ha	0
Summe variable Kosten	€/ha	750
Deckungsbeitrag	€/ha	871
Prämie (Eiweiß-/Energiepflanzen)	€/ha	0
Deckungsbeitrag inkl. evtl. Prämie	€/ha	871

Ein 6% höherer Ertrag würde für Winter-A-Weizen die Marktleistung um 97 € erhöhen. Eine um 7% geringere Düngermenge würde ca. 16 € einsparen. Die Einführung der „Präzisionsdüngung“ würde sich also bei Gesamtkosten unter 110 € pro Jahr und Hektar rentieren. Bei den anderen Kulturen wäre es aufgrund der sowohl geringeren Markterträge wie auch der geringeren Düngemittelkosten entsprechend weniger.

Ein Beitrag zur Reduzierung der **Treibhausgasemissionen** ist durch Precision Farming in erster Linie indirekt über die Verringerung der Mineraldüngermengen zu erwarten (vgl. zu dem Zusammenhang den Abschnitt „Treibhausgasemissionen“). Weitere Beiträge könnten über die Verringerung der Zahl der Schlepperüberfahrten möglich werden, wie es z.B. möglich würde, falls nicht nur die Menge des Düngers oder Pflanzenschutzmittels reduziert werden könnte, sondern der Einsatz von Precision Farming auch die Zahl der Applikationen reduzierte. Besonders wirksam wäre eine Reduzierung des Pflügens, was mit besonders hohem Kraftstoffverbrauch der Schlepper verbunden ist.

Untersuchungen und Ergebnisse zur **Reduzierung des Süßwasserverbrauchs** durch Precision Farming liegen in Deutschland nicht vor. Das Thema war offen-

bar bisher kaum interessant. Auf Basis einer langjährigen Analyse der Bewässerungstechniken und des Wasserverbrauchs in verschiedenen Kulturen in Kalifornien kommen Schoengold et al.²⁰⁷ zu dem Ergebnis, dass die Unterschiede im Wasserverbrauch zwischen konventionellen Technologien und präziser Bewässerung enorm sind. So sank der Wasserbedarf bei Wechsel von Gravitationsbewässerung zu Tropfbewässerung in Zitruskulturen um 46%, in Weingärten um 30% und in Mandel- und Obstkulturen um 43%. Bei Feldfrüchten erwies sich die Gravitationsbewässerung als um 41% effizienter als der Sprinkler.²⁰⁸

4.5.3 Die Möglichkeiten von Precision Farming aus Sicht des ökologischen Landbaus

Auch der ökologische Landbau verzeichnet eine zunehmende Betriebsgröße und gerade auch durch die Listung ökologischer Produkte in Supermärkten und Discountern wächst mit der Produktionsmenge auch der Kostendruck. Effizienztechnologien sind damit prinzipiell auch für den Ökolandbau von Interesse. Wichtig ist auch die weltweit wachsende, biologisch bewirtschaftete Fläche, die mittlerweile rund 31 Mio. ha beträgt. Global arbeiten derzeit mehr als 630.000 Betriebe nach den Regeln des Biolandbaus.²⁰⁹

Fricke und Heß²¹⁰ geben in Abgrenzung vom konventionellen Einsatz einen Überblick über die Einsatzgebiete von Precision Farming im Ökolandbau (Tabelle 28).

²⁰⁷ Schoengold, K.; Sunding, D.L.; Moreno, G.: Agricultural Water Demand and the Gains from Precision Irrigation Technology, 2004, online unter www.agecon.ucdavis.edu/extension/update/articles/v7n5_2.pdf (29.1.2008)

²⁰⁸ Die Untersuchung war angestrengt worden, um Auswirkungen eines steigenden Wasserpreinsniveaus zu untersuchen. Als Auswirkung des steigenden Wasserpreises findet die Untersuchung allerdings im wesentlichen verbessertes Management, nur 17% der real erreichten Reduktionen gehen auf einen Wechsel des Bewässerungssystems zurück. Dieser erweist sich aber, wie oben dargestellt, als besonders effektiv.

²⁰⁹ Vgl. <http://land.lebensministerium.at/article/articleview/54761/1/4955/> vom 28.1.2008.

²¹⁰ Fricke, T. ; Heß, J.: Perspektiven einer teilflächenspezifischen Bewirtschaftung im Ökologischen Landbau. In: Verbundprojekt preagro: Managementsystem für den ortsspezifischen Pflanzenbau. Tagungsband 13-15. März 2002

Tabelle 28: Mögliche Einsatzgebiete des Precision Farming im Ökologischen Landbau

Perspektiven für den ökologischen Landbau	Einsatzbesonderheiten	Entwicklungsbedarfe
Organische Düngung	Düngung von Mist, Kompost, Gülle, Berücksichtigung der Nährstofffreisetzung	Bewertung der Nährstoffverträglichkeit aus Düngemitteln und Boden, Verbesserung der Ausbringung der Verteilgenauigkeit bei Ausbringung
Ertrags- und Qualitätserfassung von Futterpflanzen	Messung der Erntemenge, des Legumioseanteils und N-Gehaltes zur Kalkulation des N-Transfers	Mengensensorik, für Erntegeräte, Mustererkennungverfahren für Leguminosen, Online-Spektralanalyse für N-Gehalte
Biosensorik im Pflanzenschutz	Früherkennung von Pflanzenkrankheiten und -schädlingen zum Einsatz gering wirkender biologischer Mittel	Praxiserprobung für Kartoffeln(Phytophthora), Analyse und Entwicklung weiterer sensitiver Verfahren
Selektive Ernte von Qualitätspartien	Aus Standortdaten, Nährstoffhaushalt und NIR-Befliegung selektiver Flächen für ausgewählte Qualitätsmerkmale	Prüfung von standortgebundener Qualitätsheterogenität
Flexible Ansaatmischungen	Angepasste Etablierung von Leguminosen durch Variation des Saatgutanteils, Optimierung des N-Imports ü. Legumin.	Prüfung der Standortspezifischen Bestandesetablierung versch. Leguminosenanteile i.d. Saatgutmischung

Mit Blick auf den Fokus AVM im vorliegenden Projekt scheint zum einen von Bedeutung, dass auch im Ökolandbau der Nährstoffkreislauf höchste ökologische wie ökonomische Bedeutung hat. Zwar wird kein mineralischer (Stickstoff-)Dünger eingesetzt, wodurch die möglichen klimaschädlichen Emissionen über die Bodenatmung erst mal nicht so hoch ausfallen. Aber dem optimalen Einsatz der Wirtschaftsdünger kommt gerade mit Blick auf die Ertragsgesichtspunkte hohe Bedeutung zu²¹¹. Die optimale Mineraldüngung durch Precision Farming führt (s.o.) zur Ertragssteigerung um einige Prozent. Diese Reserve für den Ökolandbau zu erschließen, wäre hilfreich, zumal auch über die teilflächenspezifisch optimale Ausbringung zu erwarten wäre, dass auch im Ökolandbau die Auswaschung von Stickstoff noch reduziert werden könnte. Da Dünger und Stickstoff im Ökolandbau ein objektiv knappes Gut sind, kommt ihrer effizienten Bewirtschaftung höchste Bedeutung zu. Für Precision Farming stellen sich hier die Detailaufgaben der zeitnahen Erfassung des Stickstoffangebots im Boden, der kontinuierlichen Messung des Stickstoffgehalts des Wirtschaftsdünger bei der Beladung der Ausbringgeräte sowie die räumlich exakte Ausbringung

²¹¹ Dusseldorp, M.; Rösch, C.: Stand und Perspektiven des Einsatzes von moderner Agrartechnik im Ökologischen Landbau, Hintergrundpapier Nr. 12 des Büros für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag, 2004, S. 64

des Düngers. Mit Blick auf den Fokus AVM käme der Messung des Stickstoffangebotes, u.U. auch anderer Mineralien, Bedeutung zu.

Mit Blick auf die aus Tierschutzgründen wünschenswerte und im Rahmen des Ökolandbaus deswegen besonders verbreitete Freilandhaltung von Nutztieren wäre darüber hinaus denkbar, über AVMs auch den Stickstoffgehalt in denjenigen Weidebereichen zu überwachen, die von den Tieren vermehrt zum Kotabsetzen genutzt werden. Überstiege an diesen leicht erkennbaren Stellen der Stickstoffgehalt des Bodens bestimmte Grenzwerte, würde vom Precision Farming System ein Umtrieb der Herde oder eine Absperrung dieses Kotbereichs zeitnah angeregt.

Mit Blick auf den Ökolandbau in wärmeren Regionen wäre aber auch die Bedeutung der Feuchtigkeitsmessung im Kontext Precision Irrigation von Belang.

4.6 Messparameter und Stand der Messtechnik

Die landwirtschaftliche Pflanzenproduktion kann untergliedert werden in:

- **Marktfruchtbetriebe:** der betriebliche Schwerpunkt liegt auf dem Anbau von Marktfrüchten wie Weizen, Gerste, Zuckerrüben, Kartoffeln, Ölfrüchten, Tabak oder Feldgemüse;
- **Sonderkulturbetriebe:** der Schwerpunkt liegt auf Wein, Hopfen- oder Obstanbau;
- **Gartenbaubetriebe:** Gärtnereien, Obst-, Gemüse-, Schnittblumen-, Nutz- und Zierpflanzenanbau.
- **Kombinationsbetriebe:** die Anteile von Landwirtschaft, Gartenbau oder Forstwirtschaft liegen bei unter 75 %, wobei eine dieser Produktionsrichtungen auf über 50 % kommt.
- Hinzu kommt in den mediterranen Gebieten und in den Tropen die **Plantagenbetriebe:** Landwirtschaftliche Großbetriebe, die sich auf die Erzeugung eines Produktes (Monokultur) für den Weltmarkt spezialisiert haben, und zu denen oft auch Aufbereitungsanlagen gehören, in denen das Erzeugnis für den Markt vorverarbeitet wird. Typische Produkte von Plantagen sind mehrjährige Pflanzen oder Dauerkulturen wie Bananen, Baumwolle, Holz, Palmöl, Kaffee, Kakao, Tee, Obst, Sisal, Naturkautschuk, aber auch einjährige Pflanzen wie Zuckerrohr.
- Von zunehmender Bedeutung weltweit ist der Anbau von nachwachsenden Energieträgern (Raps, Mais, Soja...) sowie Pflanzen aus denen Rohstoffe für die Erzeugung von Biokunststoffen gewonnen werden können (Rizinus, Mais.....)

Für den Einsatz von Sensoren in der Landwirtschaft ist zusätzlich die Frage, ob die angebauten Pflanzen einjährig (Markfrüchte, Gemüseanbau, Zuckerrohr) oder mehrjährig sind (Obst, Wein, Oliven) ein weiteres Unterscheidungsmerkmal.

- Bei einjährigen Pflanzen wird der Boden in der Regel zwischen den Fruchtfolgen gepflügt und neu aufgearbeitet. Ein Sensor vor Ort würde davon stark beeinträchtigt werden und muss demnach periodisch entfernt und wieder installiert werden.
- Bei mehrjährigen Pflanzen ist eine kontinuierlich stationäre Nutzung möglich.

4.7 Potenziale des AVM-Einsatzes im Anwendungsfeld Bewässerung

Sourell²¹² hält zukünftig eine Verbesserung und Effizienzsteigerung der Bewässerungstechniken für geboten. Gründe dafür sind das nur begrenzt vorhandene Wasser, die Risiken der Erosion durch Überbewässerung sowie die - mit steigendem Wasserpreis – möglichen finanziellen Einsparungen. Sourell führt zur Verbesserung der Effizienz der Bewässerung drei Denkansätze auf:

- Verbessertes Maschinenmanagement,
- Verbesserung der Steuerung durch klimatische Wasserbilanz sowie
- Bodenfeuchtemessung.

Insbesondere die Bodenfeuchtemessung stellt ein potenzielles Anwendungsgebiet für AVM dar.

Die genaue Kenntnis der Bodenfeuchte erlaubt jedoch nicht nur eine präzisere Bewässerung, sondern auch²¹³

- (1) in Verbindung mit der Präzisionsdüngung eine Bestimmung geeigneter Düngerzeitpunkte (Düngeraufnahme nur bei ausreichend feuchtem Boden)
- (2) die bessere Planung des Einsatzes schwerer Landmaschinen (Mähdrescher, Rübenernter, da bei hoher Bodenfeuchte eine nachteilige Bodenverdichtung erfolgt)

²¹² Sourell, H.: Effektiver Wassereinsatz im Ackerbau durch Beregnungssteuerung, Präsentation auf dem Internationalen DWA-Symposium zur Wasserwirtschaft, 5. April 2006, Berlin

²¹³ benannt bei einem Expertenworkshop am Fraunhofer IZM, 17. März 2009

Entscheidende Größen für die Versorgung von Pflanzen mit Wasser sind der im Boden vorhandene Wassergehalt und (bodenabhängig) die nutzbare Wassermenge in Abhängigkeit von der Energie, die für den Transport der nötigen Wassermenge von den Bodenporen (Kapillardruck) in die Wurzeln der Pflanzen nötig ist. Dabei ist ein zu hoher Wassergehalt des Bodens nicht förderlich: Wasserstau, Bodenverschlammung und Bodenverdichtung verursachen die Anreicherung von CO₂, bzw. einen Mangel an Sauerstoff, wodurch in der Folge beispielsweise Eisenmangel verursacht werden kann. Darüber hinaus wird das Bodenleben und der Stoffwechsel der Pflanzen negativ beeinflusst.²¹⁴

Der Wassergehalt des Bodens kann sowohl gewichtsbezogen als auch volumenbezogen angegeben werden:

- der **gravimetrische Wassergehalt** ist das Gewicht des in der Probe enthaltenen Wassers bezogen auf das Gesamtgewicht der Probe, angegeben in Prozent.
- der **volumetrische Wassergehalt** wird entsprechend bezogen auf das Volumen der Boden- und Wasseranteile definiert.

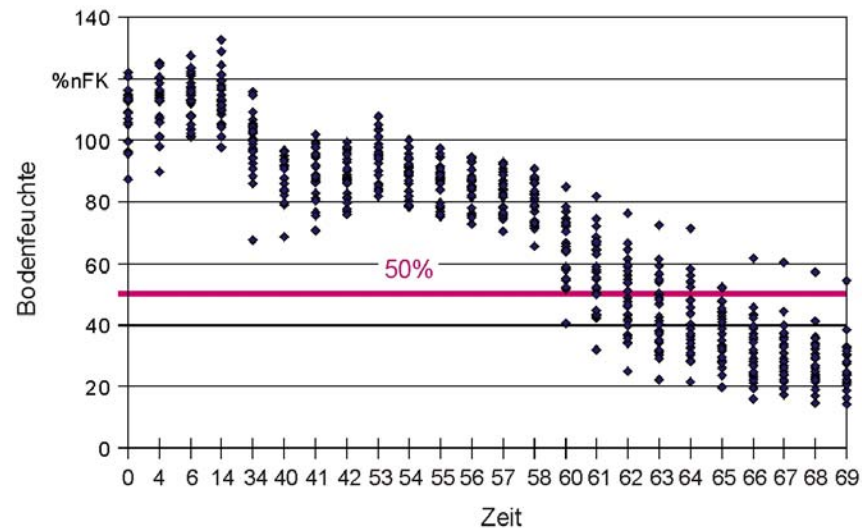
Eine Zusammenfassung zu Methoden und Sensorik zur Bestimmung der Bodenfeuchte, sowie die zugrundeliegenden Kennzahlen enthält Anhang 9.2.

Für die auf aktuellen und ortsspezifischen Daten basierende Beregnungssteuerung sind die derzeit verfügbaren Sensoren nur bedingt geeignet, beispielhaft erläutert an einer Messreihe von Sourell²¹⁵: Für einen gegebenen Boden ist nur der Messbereich zwischen 13,4 Vol % Feuchtigkeit (entsprechend 50% nFK) und 18,4 Vol % Feuchtigkeit (entspr. 80 % nFK) messtechnisch interessant ist, da die Feuchtigkeit in diesem Bereich zwischen 50 und 80% nutzbarer Feldkapazität – also pflanzenverfügbarer Feuchtigkeit - gehalten werden sollte. Eine Messreihe mit 25 TDR-Sensoren auf 9 m² erbrachte, dass die Streuung bei etwa +/- 15% nFK liegt. Zu Beginn liegen die Messwerte zwischen 90% und 120% nFK, zum Ende zwischen 10% und 40% nFK. Damit weiß man letztlich nicht, ob man nun bewässern soll oder nicht und die Messtechnik ist kaum besser als der „grüne Daumen“.

²¹⁴ Dr. Echim, Beratungsteam Gartenbau, Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen, Internet: www.llh-hessen.de

²¹⁵ Sourell, H.: Effektiver Wassereinsatz im Ackerbau durch Beregnungssteuerung. Präsentation auf dem Internationalen DWA-Symposium zur Wasserwirtschaft, 5. April 2006, Berlin

Abbildung 21: Versuchsreihe zur Entwicklung der Bodenfeuchte einer landwirtschaftlichen Fläche



Letztlich sieht Sourell²¹⁶ die Messtechnik aber doch als aussichtsreichsten Weg an. Anforderungen an eine bessere Methode werden von Sourell wie folgt formuliert²¹⁷:

- „Wirtschaftlichkeit. Die erwarteten Einsparungen an Wasser und Energie decken derzeit nicht die Gerätekosten.
- Räumliche Mittlung: Das vermessene Bodenvolumen ist meist zu klein; dies erfordert eine große Anzahl an Messstellen (was sich mit preiswerten AVM-Sensoren realisieren ließe).
- Genauigkeit. Durch Inhomogenität, Handhabungsfehler und generell eine große Zahl von Einflüssen auf das Messergebnis entstehen große Messfehler.“

Möglicherweise braucht es pro Messpunkt mehrere Sensoren, um nicht zu sehr von einzelnen Messfehlern abzuhängen. Die Messgenauigkeit sollte bei +/- 1 Vol-% liegen. Z. Zt. sind +/- 2 Vol-% üblich. AVMs könnten dann einen Beitrag zur Bodenfeuchtemessung leisten, wenn sie die o.a. Forderungen in besserer Weise erfüllen als die bisherigen Technologien.

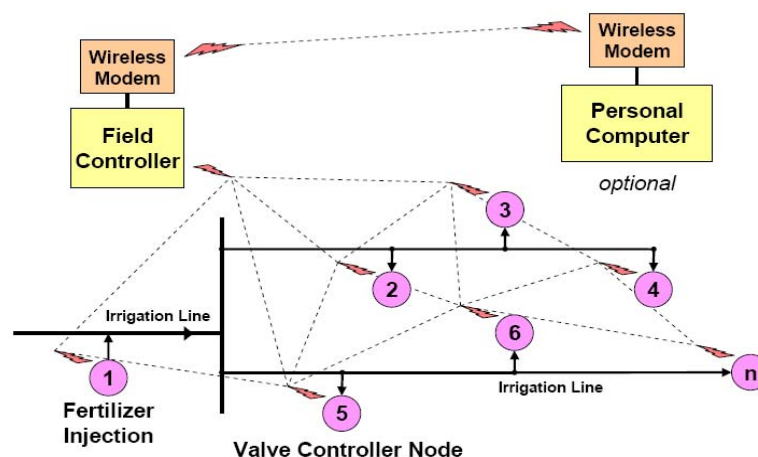
²¹⁶ Sourell, H.: Persönliches Gespräch, 9. April 2008, Braunschweig

²¹⁷ Sourell, H.: Effektiver Wassereinsatz im Ackerbau durch Beregnungssteuerung. Präsentation auf dem Internationalen DWA-Symposium zur Wasserwirtschaft, 5. April 2006, Berlin

Auch Delwiche et al.²¹⁸ führen Gründe dafür auf, Bewässerung nicht nur zeitabhängig sondern, wie im Precision Farming üblich, auch ortsabhängig zu steuern. Sie argumentieren, dass in einer durchschnittlich optimal bewässerten Fläche jede einzelne Pflanze unter- oder überbewässert sein kann, was von ihrer Spezies, Größe, Wasserspeicherkapazität sowie von der Wasserspeicherkapazität des lokalen Bodens abhängig sei.

Delwiche et al. experimentieren z.Zt. mit einem Bewässerungssystem mit AVM-Valve-Controllern, welches auf Funkdatenübertragung und netzwerkartige Kommunikation über die einzelnen Bauteile beruht. Die zentrale Steuerung funkt den Feldcontroller an, der wiederum mit dem Ventilnetzwerk kommuniziert.

Abbildung 22: Struktur des Ventilnetzes von Delwiche



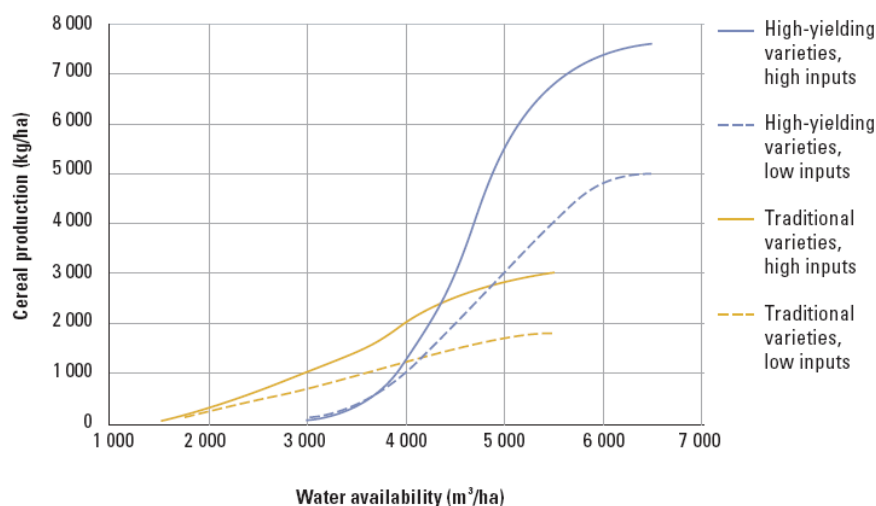
Gegenwärtig setzt Delwiche allerdings noch keine Sensoren in seinem AVM-Netzwerk ein. Seine Arbeit weist allerdings auf die Möglichkeit hin, dass Netzwerk aktiver Kommunikationsknoten dadurch zu verdichten, dass nicht nur Sensoren, sondern auch Ventilsteuerungen in das Netzwerk eingebunden werden. Der Ansatz von Delwiche macht auch deutlich, dass die beiden im ITA-AVM-Projekt verfolgten Innovationsrichtungen „Landwirtschaft“ und „Automatisierung“ auch integriert denkbar sind.

Eine besondere Bedeutung könnte die Präzisionsbewässerung dabei für entwickelte Länder bekommen, da in diesen fast durchgängig Hochzuchtsorten ein-

²¹⁸ Delwiche, M.; Coates, R.: Precision Irrigation in Landscapes by Wireless Network, Progress Report for Slosson Endowment, 2007, online unter <http://groups.ucanr.org/slosson/documents/2006-200712577.pdf> (29.1.2008)

gesetzt werden. Wie Abbildung 23 der FAO²¹⁹ deutlich macht, steigt der Ertrag traditioneller Sorten mit verbesserter Wasserverfügbarkeit linear, wenn auch langsam, an. Insbesondere bei geringer Wasserverfügbarkeit ist dabei der Ertragsunterschied zwischen guter (high inputs) und schlechter (low inputs) Versorgung nicht so groß. Bei den Hochertragsorten setzen zum einen die hohen Erträge erst bei hoher Wasserverfügbarkeit überhaupt ein, zum anderen sind die Erträge bei schlechter Wasserverfügbarkeit sogar geringer als die der traditionellen Sorten.

Abbildung 23: Zusammenhang von Wasserverfügbarkeit und Ertrag für Getreide



Die Graphik zeigt den Zusammenhang von Wasserverfügbarkeit und Ernteertrag. Bei den Hochertragsorten kann das hohe Ertragspotential nur mit einem hohen Input an Wasser erzielt werden.

4.8 Das Anwendungsfeld Düngung

Die zentrale Variable in der Pflanzenernährung ist der für die Pflanze verfügbare Stickstoff. Ist zu wenig Stickstoff verfügbar, wächst die Pflanze nicht so stark wie möglich und der Hektarertrag ist niedrig. Eine zu hohe Verfügbarkeit von Stickstoff kann sich dagegen negativ auf die Qualität der Produkte auswirken.

Die Pflanzenanalyse gilt als die beste fachliche Praxis zur Bestimmung der optimalen Düngung²²⁰, ist aber nicht zur Erlangung hochauflösender räumlicher Informationen einsetzbar. Letztlich erfolgt z.Zt. die N-Bestimmung nach zwei indirekten Methoden:

²¹⁹ FAO (Food and Agriculture Organisation): The use of water in agriculture, 2004, <ftp://ftp.fao.org/agl/aglw/docs/agricfoodwater.pdf> (06.10.08)

²²⁰ Link, A.: Sensorkonzepte für die teilflächenspezifische N-Düngung, online unter www.agricon.de (7.2.2008)

1. Auf dem Traktordach montierte N-Sensoren messen die Pflanzenfarbe optisch und schließen so auf den N-Versorgungsgrad zurück. Daraus wiederum werden Rückschlüsse auf den Bodenstickstoff und die notwendige Düngemittelgabe gezogen.
2. Pendelnd am Traktor montierte Crop-Meter messen die Halmfestigkeit mechanisch und bestimmen relative Unterschiede in der Pflanzenmasse. Zur Steuerung einer variablen Düngung ist das System deswegen nur eingeschränkt geeignet, da es erst dann eingesetzt werden kann, wenn der Halm eine gewisse Größe erreicht hat. In den ersten Wochen des Pflanzenwachses ist das Crop-Meter damit nicht einsetzbar.

Beide Systeme scheinen mehr oder weniger genau das zu messen, wofür es geht, nämlich den Ernährungszustand der Pflanze und nicht die Verfügbarkeit von Bodenstickstoff. Empirisch ist aber dieser Zusammenhang umstritten. Agricon als ein Vermarkter von N-Sensoren argumentiert: „In N-Steigerungsversuchen konnte wiederholt nachgewiesen werden, dass die Methoden der Ableitung der Höhe der Düngung vom Ernährungszustand, mit +/- 2% zum jeweiligen Ertragsoptimum führen. Es ist weltweit derzeit keine einzige andere Methode bekannt, die mit ähnlicher Präzision zum Ertragsoptimum führt“²²¹. Schnug²²² betrachtet dagegen spöttisch „1001 Gründe warum Pflanzen nicht grün sind“ und betont, das Prinzip des N-Sensors bestehe in Wahrheit darin, während der Düngerausbringung den Chlorophyllgehalt der Pflanzen, d.h. ihre Grünfärbung und ihre Biomasse berührungslos über optische Sensoren zu messen. Unwahr dagegen sei, das Chlorophyllgehalt und Biomasse den N-Ernährungszustand zuverlässig anzeigten. Schnug erklärt: „Die bisher mit räumlich variabler N-Düngung erzielten Ergebnisse hinsichtlich höherer N-Effizienz haben bei weitem nicht die Erwartungen erfüllt und sind ökonomisch nicht selbsttragend. Wahrscheinlicher Grund: Die Referenzmengen an N sind immer noch viel zu hoch, die N-Pufferkapazität der Böden zu groß und/oder Variablen und Algorithmen der variablen Düngung falsch. Methoden der Fernerkundung und unspezifische Sensorik am Boden sind ohne sorgfältige „Ground Truth“ nicht nur unwirksam, sondern können im Gegenteil zur Verschlechterung der N-Effizienz beitragen.“

Auch Lilienthal²²³ sieht die Reflexion (Absorption) des Chlorophylls nicht nur vom N-Status abhängig: „Andere Phänomene führen zu einer ähnlichen Spekt-ralsignatur (Staunässe, S-Mangel, Krankheiten).“ Die Aussagekraft aktueller op-

²²¹ Agricon: Werden bei der N-Sensordüngung die hohen Erträge ausgedüngt oder weggedüngt? Online unter www.agricon.de (7.2.2008)

²²² Schnug, E.: Beitrag von Precision Agriculture zu mehr N-Effizienz, Workshop 'Roadmaps zu mehr N-Effizienz', FAL Braunschweig, 22.5.2005

²²³ Lilienthal, H.: Einsatz von Sensoren in der Landwirtschaft, Workshop 'Informationstag zur Nährstoffanalytik', FAL Braunschweig, 23.11.2006

tischer N-Sensoren sei damit begrenzt. Als Zukunftsvision stellt Lilienthal unter Verwies auf die RFID-Technik die Frage: „Geht das Labor direkt auf das Feld?“ Hierfür liegen zwar noch keine Messkonzepte vor und genauso ist nicht abschließend geklärt, anhand welchen Leitindikators die Stickstoffverfügbarkeit im Boden gemessen werden könnte, dennoch legt Lilienthal einige Hoffnung in einen solchen Weg. Er schlägt als Leitindikator die Nitratkonzentration im Boden vor²²⁴.

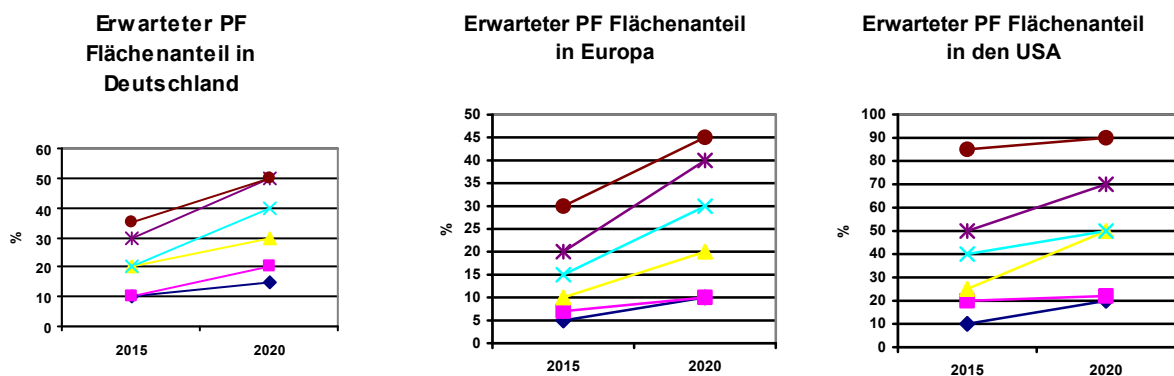
4.9 Ergebnisse der Expertenbefragung zur weiteren Entwicklung der Sensortechnik rund um Precision Farming

Die Expertenbefragung wurde mit Hilfe eines Fragebogens durchgeführt, der an 28 Experten in Deutschland, Europa, den USA und Australien verschickt wurde. Geantwortet haben 10 Experten aus der Forschung rund um Precision Farming sowie Entwickler von Technologien des Precision Farming und der nötigen Messsysteme. Die Rücklaufquote belief sich damit auf 36%.

4.9.1 Precision Farming generell

Die erste Frage bezog sich darauf, welcher Flächenanteil zukünftig mit Precision Farming (PF) bewirtschaftet werden wird. Die Erwartungen der Experten unterschieden sich hier deutlich, in der Tendenz werden jedoch in den USA und (bei einer Nennung) auch in Australien deutlich höhere Flächenanteile des Precision Farming erwartet.

Abbildung 24: Welcher Flächeanteil wird zukünftig mit Precision Farming (PF) bewirtschaftet werden?



²²⁴ Lilienthal, H.: Persönliches Gespräch, 9.4.2008, Braunschweig

Legende: Jede Gerade steht für die je zwei Antworten eines Experten.

Die im weltweiten Mittel erwarteten Werte liegen mit 5 bis 15% in 2020 deutlich unterhalb dieser Werte.

Als wesentliche Randbedingung für die Realisierbarkeit wurde nach den erwarteten Preissteigerungen gefragt. Auch hier eine extreme Spreizung der Ergebnisse, aus denen zumindest eine erhebliche Unsicherheit deutlich wird, die sich mit der zukünftigen Preisentwicklung verbindet.

Tabelle 29: Auf das wievielfache werden folgende Preise in der Landwirtschaft bis 2015 steigen?

	Preis bleibt gleich	Steigerung um bis zu 25%	Steigerung um bis zu 50%	Steigerung um das 2-fache	Steigerung um das 4-fache
Wasser	2	4	2	0	1
Dünger	0	5	0	3	1
Energie	0	3	1	2	3
Weizen	0	5	1	2	1

Deutliche Preissteigerungen um mindestens 25% werden aber von allen erwartet, womit sich die Finanzierbarkeit von Einspartechnologien grundsätzlich positiv entwickeln dürfte.

Über die Prioritäten der wichtigsten Anforderungen an Technik im Kontext Precision Farming scheint Einigkeit zu bestehen. Einfache Bedienbarkeit wurde gleich neunmal genannt, niedrige Kosten sowie Haltbarkeit und Robustheit jeweils fünfmal. Technische Exzellenz erschien nur einem Befragten eine wichtige Anforderung. Unter dem Strich wird robuste und preiswerte Technik gefordert, die einfach bedienbar ist.

Ein großes Hindernis ist dabei generell die Kosten-Nutzen-Relation. Ein Experte merkte an, dass dabei die Diversität der landwirtschaftlichen Produkte und Flächen eine wesentliche Schwierigkeit für die Anbieter neuer Technologien darstellt. Letztlich ist der Nachweis der Rentabilität nur dann für den einzelnen Landwirt überzeugend, wenn er auf einem vergleichbaren Boden und mit der richtigen Feldfrucht geführt wurde. In Anbetracht der großen Unterschiedlichkeit der Böden und der Zahl unterschiedlicher Feldfrüchte, von der Zahl der angebotenen Sorten ganz zu schweigen, wird dabei der Nachweis eine Sisyphusarbeit.

Tabelle 30: Wie bedeutend sind die folgenden Hindernisse für die breitere Anwendung von Precision Farming?

	Kein Hindernis	Kleines Hindernis	Mittleres Hindernis	Großes Hindernis	Keine Lösung möglich	Nicht relevant für PF
Kosten-Nutzen Relation für Precision Farming	1	2	2	5	0	0
Aufgeschlossenheit der Landwirte gegenüber Innovationen	0	3	7	0	0	0

Parallel dazu wird aber auch die Aufgeschlossenheit der Landwirte gegenüber Innovationen generell als nicht eben groß eingeschätzt.

4.9.2 Präzisionsbewässerung

Die durch AVMs angestrebte Verbesserung der Verfügbarkeit zeitnaher und kleinräumig aufgelöster Daten wird von den befragten Experten durchaus als Möglichkeit zur Steigerung der Effizienz der Landwirtschaft gesehen. Die relative Steigerung des Ertrags dürfte dabei kleiner ausfallen als die Reduzierung des Wasserverbrauchs.

Tabelle 31: Welchen Nutzen würde die Kenntnis von Zeitreihen bzw. zeitnahe Messungen und/oder kleinräumige Differenzierung folgender Daten haben?

Zeitreihen / zeitnahe Messungen	Einsparung von Wasser		Steigerung des Ertrags	
	Bodenfeuchtigkeit	Erheblich (>2%): 9 Nennungen	Etwas (<2%): 0 Nennungen	Erheblich (>2%): 6 Nennungen
		Gar nicht: 0 Nennungen	Gar nicht: 1 Nennung	
Kleinräumige Differenzierung	Einsparung von Wasser		Steigerung des Ertrags	
	Bodenfeuchtigkeit	Erheblich (>2%): 8 Nennungen	Etwas (<2%): 1 Nennungen	Erheblich (>2%): 5 Nennungen
		Gar nicht: 0 Nennungen	Gar nicht: 0 Nennungen	

Dies ist insoweit wenig verwunderlich, als die Steigerung der Flächenerträge seit Anfang des 20. Jahrhunderts erklärtes Ziel der landwirtschaftlichen Forschung ist, die Senkung des Verbrauchs an Wasser für Bewässerungszwecke aber bisher nur in ariden Regionen seit einigen Jahrzehnten angestrebt wird. Wobei mit Blick auf den Ertrag aber von einem Experten eingeworfen wurde, dass er zwar keine Steigerung des Ertrages erwarte, eine hocheffiziente Bewässerungstechnologie aber zur Ertragssicherung für sehr wichtig hält.

Das Spektrum der Kulturen, für die die Experten einen „erheblichen Nutzen“ erwarten würden, ist groß. Genannt wurden:

- Landwirtschaftliche Feldfrüchte wie Mais, Getreide, Kartoffeln, Zuckerrüben,
- Gartenbau mit Obstbau, Nüssen, Gemüse und Hackfrüchten, Wein,
- Trockengebiete und leichtere wechselnde Standorte in Deutschland,
- Generell intensiv bewirtschaftete Kulturen,
- Alle Kulturen in entwickelten warmen Ländern, aber auch generell in Trockenregionen weltweit (Südeuropa, Afrika, Teile Nordamerikas, Kasachstan, Australien).

Verschiedene Befragte unterstützen die Vermutung, dass Maßnahmen der effizienten Bewässerung zukünftig gesetzlich vorgeschrieben werden könnten. In Südeuropa und einigen Staaten der USA meinen dies jeweils 5 Befragte, in weiteren trockenen Ländern vermuten dies 4 und sogar für Nordeuropa vermutet dies ein Befragter.

Das durchaus wesentliche Ziel niedriger Kosten wird sowohl bei der Messtechnik als auch bei der Bewässerungstechnik als größtes Hindernis der weiteren Verbreitung der Technologie gesehen, was letztlich auch weitgehend unabhängig von der Möglichkeit einer gesetzlichen Verpflichtung zum Einsatz von Effizienztechnologien in der Bewässerung wichtig sein dürfte. Über den Status der Entwicklung der Messtechnik gehen dagegen die Meinungen stark auseinander. Während eine Gruppe zu wissen meint, welche Messparameter von Bedeutung sind, die Frage der Messgenauigkeit für geklärt und die Messtechnik insgesamt für verfügbar hält, hat eine andere Gruppe noch Zweifel an den geeigneten Parametern, hält die Messgenauigkeit noch nicht für befriedigend und sieht damit auch die Messtechnik noch nicht als verfügbar an. Dementsprechend gehen auch die Angaben auseinander, wann Sensoren für Bodenfeuchtigkeit mit ausreichender Messgenauigkeit für Precision Farming Anwendung zur Verfügung stehen werden. Während ein Experte meint, es sei alles schon heute vorhanden und müsse nur genutzt werden, rechnen nochmals 4 bis 2010 und weitere 4 bis 2015 mit der Verfügbarkeit der Technik. Nur einer erwartet die Verfügbarkeit der Technologie erst 2020.

Robustheit und Wartungsfreundlichkeit dürften in letzter Konsequenz Hindernisse sein, die mit dem Kostenproblem in Verbindung stehen. Zumindest den preiswerten Lösungen dürfte es an Robustheit u.U. mangeln.

Tabelle 32: Wie bedeutend sind die folgenden Hindernisse für die breitere Anwendung der Präzisionsbewässerung?

Messtechnik zur Bestimmung der Bodenfeuchte						
	Kein Hindernis	Kleines Hindernis	Mittleres Hindernis	Großes Hindernis	Keine Lösung möglich	Nicht relevant für PF
Kenntnis der geeigneten Messparameter	4	2	4	0	0	0
Verfügbarkeit der Messtechnik	2	4	1	3	0	0
Messgenauigkeit	3	4	2	1	0	0
Möglichkeit der Fernabfrage von Daten	5	1	4	0	0	0
Kosten	1	2	2	5	0	0
Robustheit	3	1	4	2	0	0
Wartungsfreundlichkeit	2	2	4	2	0	0
Bewässerungstechnik für die kleinräumig differenzierte Bewässerung						
	Kein Hindernis	Kleines Hindernis	Mittleres Hindernis	Großes Hindernis	Keine Lösung möglich	Nicht relevant für PF
Verfügbarkeit der Steuerungstechnik / Dosierung	2	5	2	1	0	0
Kosten der Steuerungstechnik	2	1	3	4	0	0
Robustheit	2	2	4	1	0	0
Wartungsfreundlichkeit	1	2	6	1	0	0

Ähnlich scheint es auch bei der Bewässerungstechnik zu sein. Hier ist die Steuerungs- und Dosierungstechnik nach allgemeiner Meinung kein wesentliches Hindernis mehr. Als kritisch gelten jedoch auch hier Kosten, Robustheit und Wartungsfreundlichkeit.

4.9.3 Präzisionsdüngung

Auch im Kontext der Präzisionsdüngung wird durch die Experten ein deutlicher, effizienzsteigernder Effekt zeitnaher und kleinräumiger Messwerte eher bei der Einsparung von Dünger als im Bereich des Ertrags gesehen. Mit Blick auf die kostenseitigen Effekte sieht es allerdings so aus, dass selbst eine kleine Ertragssteigerung größere Kostenvorteile liefert als eine erhebliche Einsparung an Dünger.

Tabelle 33: Welchen Nutzen würde die Kenntnis von Zeitreihen bzw. zeitnahe Messungen und/oder kleinräumige Differenzierung folgender Daten haben?

Zeitreihen / zeitnahe Messungen	Einsparung von Dünger		Steigerung des Ertrags	
Nitrat im Boden	Erheblich (>2%):	9 Nennungen	Erheblich (>2%)	5 Nennungen
	Etwas (<2%):	0 Nennungen	Etwas (<2%)	4 Nennungen
	Gar nicht:	0 Nennungen	Gar nicht	0 Nennungen
Kleinräumige Differenzierung	Einsparung von Dünger		Steigerung des Ertrags	
Nitrat im Boden	Erheblich (>2%):	9 Nennungen	Erheblich (>2%)	5 Nennungen
	Etwas (<2%):	0 Nennungen	Etwas (<2%)	4 Nennungen
	Gar nicht:	0 Nennungen	Gar nicht	0 Nennungen

Das Spektrum der Kulturen, für die die Experten einen „erheblichen Nutzen“ erwarten würden, ist auch für die Präzisionsdüngung groß. Genannt wurden:

- Landwirtschaftliche Feldfrüchte wie z.B. alle Getreidesorten, deren Verkaufspreis sich am Proteingehalt orientiert (Nordeuropa, Regionen, die bereits einen N-Überschuss aufweisen), Kartoffeln, Zuckerrüben,
- Gartenbau mit Obstbau, Nüssen, Gemüse und Hackfrüchten, Wein,
- Generell große Flächen und überhaupt alle Standorte und alle Kulturen, da es immer erhebliche Heterogenitäten in der Ertragsbildung (auch auf homogenen Böden (Schwarzerde)) gibt,
- alle Kulturen in entwickelten Ländern, besonders Regionen: z.B. mit trockenem Vorsommer wie die Gebiete der neuen Bundesländer, da Düngung nur funktioniert, wenn genügend Bodenwasser verfügbar ist,
- alle Kulturen und Anbauregionen.

Als größte Herausforderung der Nährstoffbewirtschaftung bis 2015 wird die Präzisionsdüngung mit mineralischem Stickstoff von 6 Befragten benannt, die Präzisionsdüngung mit Wirtschaftsdünger sowie die weitgehende Substitution des mineralischen Düngers durch Wirtschaftsdünger, wie sie aus Kreisen des ökologischen Landbaus angemahnt werden, werden jeweils von 2 Befragten als größte Herausforderung gesehen.

Im Bereich der Präzisionsdüngung konzentrieren sich die technologischen Hindernisse auf die Messtechnik. Nur sieben Experten trauten sich die Beurteilung zu, ob langfristig Bodenstickstoffsensoren oder die optische Messung bessere Aussichten haben. Dabei werden die optischen Sensoren mit 5 Nennungen klar gegenüber den Bodenstickstoffsensoren mit 2 Nennungen favorisiert.

Insgesamt werden aber reichlich Aufgaben für die Weiterentwicklung der Messtechnik gesehen. Zum einen sind die Messparameter noch umstritten. Weiter werden Probleme bei der Messgenauigkeit befürchtet. Insgesamt stellt die Verfügbarkeit der Messtechnik ein mittleres bis großes Hindernis dar. Weiter werden hohe Kosten befürchtet und auch Robustheit und Wartungsfreund-

lichkeit müssen erst noch demonstriert werden. Die Verfügbarkeit von Sensoren für Nitratmessungen im Boden mit ausreichender Messgenauigkeit für Precision Farming Anwendung wird so bald noch nicht erwartet. Nur ein Experte rechnet um 2010 mit dieser Verfügbarkeit, weitere 5 bis 2015 und zwei erst 2020.

Tabelle 34: Experteneinschätzungen zur Nährstoffversorgung

Messtechnik zur Bestimmung des Nährstoffgehalts im Boden						
	Kein Hindernis	Kleines Hindernis	Mittleres Hindernis	Großes Hindernis	Keine Lösung möglich	Nicht relevant für PF
Kenntnis der geeigneten Messparameter	1	3	4	1	0	0
Verfügbarkeit der Messtechnik	0	2	3	4	0	0
Messgenauigkeit	1	2	4	1	0	0
Möglichkeit der Fernabfrage von Daten	4	1	1	2	0	1
Kosten	1	1	1	6	0	0
Robustheit	2	0	7	0	0	0
Wartungsfreundlichkeit	2	0	6	1	0	0
Techniken für die kleinräumig differenzierte Nährstoffausbringung						
	Kein Hindernis	Kleines Hindernis	Mittleres Hindernis	Großes Hindernis	Keine Lösung möglich	Nicht relevant für PF
Verfügbarkeit der Steuerungstechnik / Dosierung	5	3	0	1	0	0
Kosten der Steuerungstechnik	0	5	3	1	0	0
Robustheit	3	4	1	1	0	0
Wartungsfreundlichkeit	2	4	2	1	0	0

Techniken für die kleinräumig differenzierte Nährstoffausbringung sind dagegen vorhanden. Auch in den Kosten, der Robustheit oder der Wartungsfreundlichkeit werden keine wesentlichen Hindernisse gesehen.

4.10 Szenario Bodensensoreinsatz im Precision Farming 2020

Abhängig von der Variabilität des Bodens konkurrieren die Lanzentechnologie und ein AVM-System. Die Daten werden in der Lanzentechnologie nur für wenige Messpunkte pro Acker, in der AVM-Technologie an jeweils bis zu 5 Messpunkten je Hektar z.B. bei Überfahrt der Beregnungsbrücke per Funk an die Bearbeitungsmaschine oder die Zentralstation gemeldet. Diese verfügt über das bereits vorhandene Informationsspektrum aus Bodenanalysen, Daten aus Luftbildanalyse, Wetterdaten und steuert autonom teilschlagspezifische Bewässe-

rungs- und Düngemaßnahmen. Der Landwirt hat Zugriff auf alle relevanten Informationen und kann bei Bedarf steuernd eingreifen.

Rückgrat der Datenerfassung sind Autonome Verteilte Mikrosysteme (AVM), die die Funktionen Sensorik, Energieversorgung und Datenübertragung in sich vereinen. Die Fortschritte der Mikroelektronik spiegeln sich in den Systemen dadurch wieder, dass die elektronischen Bauteile – insbesondere die Sensoren – sowohl klein wie auch extrem energieeffizient sind. Batterien können dadurch klein gehalten werden, was die Kosten senkt und die Standzeit erhöht. Die Verbreitung der Systeme begann im Jahre 2012, als die ersten preisgünstigen Feuchtigkeitssensoren auf Basis mikroelektronischer Elemente am Markt angeboten wurden für die bereits der Nachweis der Wirtschaftlichkeit durch unabhängige Prüfinstitute für verschiedene Kulturen und Standorte geführt worden war.

Gedüngt wird überwiegend mit Wirtschaftsdünger, da Mineraldünger aufgrund steigender Energiepreise sehr teuer geworden ist und aufgrund des hohen Anteils der Biolandwirtschaft von über 50% der bewirtschafteten Fläche auch vielfach nicht mehr eingesetzt werden darf. Darüber hinaus hat sich erwiesen, dass bei präziser Düngung die Wirtschaftsdüngermenge zur Befriedigung des Nährstoffbedarfs ausreicht, seit durch PF die Düngermenge stark gesenkt werden konnte, was auch zur Reduktion der Überdüngung von Grund- und Oberflächenwasser führte. Ergänzt wird das System daher über Sensoren, die den Nährstoffgehalt des mechanisch vorhomogenisierten Wirtschaftsdüngers während der Ausbringung messen, so dass die ausgebrachte Menge dem Nährstoffgehalt und dem teilschlagspezifischen Bedarf des Bodens angepasst werden kann. AVMs für die Präzisionsdüngung kommen allerdings erst deutlich nach denen für die Bewässerungstechnologie auf den Markt.

4.10.1 Grobkonzept

Einsatzgebiet: Bewässerungslandwirtschaft mit Beregnungsbrücken (aride / semi-aride Gebiete)

[Ausbaustufe 1:] Feuchtesensoren werden in den Boden eingebracht und kommunizieren mit der Beregnungsbrücke, die alle zwei bis drei Tage einmal 360° abfährt und bewässert. Bewässerung erfolgt – um Verdunstungsverluste zu minimieren - über Schläuche, die rund 2 bis 5 Meter hinter der Brücke das Wasser direkt auf die Erde aufbringen. Entsprechend der ermittelten Bodenfeuchte wird bewässert, entweder über eine zentrale Steuerung der Gesamtwasserzufuhr über die Beregnungsanlage oder Geschwindigkeitssteuerung der gesamten Brücke oder **[Ausbaustufe 2:]** individuelle / bereichsweise Steuerung von Ventilen zur Wasserdosierung.

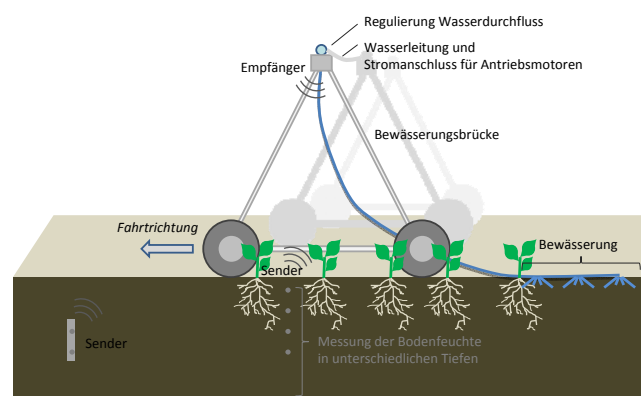
Die Abbildungen unten illustrieren schematisch das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten: Eine mögliche Realisierung erfolgt mittels Messlanze mit Solarzellen. Alternativ können AVM-Bodensensoren über Batterien mehrere Jahre mit Strom versorgt werden: Sie werden unterhalb der Pflugtiefe in ca. 40 cm eingesetzt und verbleiben dort. Ihre Wiederfindbarkeit mit einem einfachen Metallsuchgerät wird über Reflektoren sichergestellt. Abbildung 26 zeigt für eine Kreisberegnungsfläche eine beispielhafte Konfiguration mit bis zu 10 repräsentativen Messpunkten auf einem Schlag mit bis zu 750 m Radius. Grundsätzlich gilt: Es ist weitgehend unklar, welchen Zusatznutzen zeitaufgelöste und kleinräumige Ermittlung von Bodendaten liefert (Forschung erforderlich) und damit ist auch das erforderliche Raster und die Erstellung eines Lastenhefts nur auf Basis beispielhaft gewählter Randbedingungen möglich.

[Ausbaustufe 3:] Die Kopplung mit optischen Sensoren an der Kreisberegnungsbrücke ist denkbar, die den Zustand der Pflanzen detektieren und **[Ausbaustufe 4:]** damit auch die Zudosierung von Dünger steuern. Bislang erfolgt die Düngung immer getrennt von der Bewässerung und nicht über die Beregnungsbrücke.

Nur die Kommunikation zwischen Feuchtesensoren im Boden und Empfänger an der Brücke ist drahtlos, alle anderen Komponenten (Steuerung der Bewässerung, optische Sensoren, Steuerung Düngung) kann über die Brücke verkabelt und mit Energie versorgt werden.

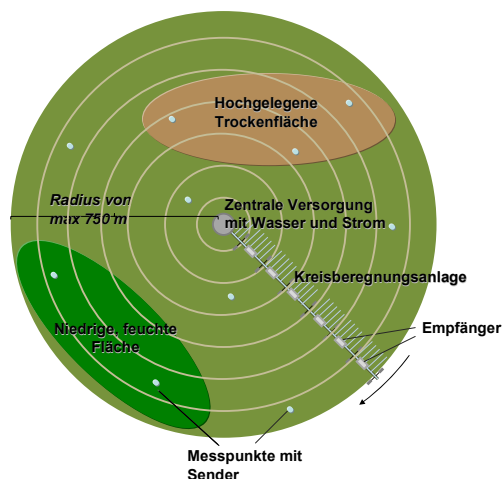
Prinzipiell kann das AVM-gestützte System in etwa aus den in der Abbildung gezeigten Komponenten bestehen.

Abbildung 25: Drahtlose Erfassung der Bodenfeuchte durch AVM mit Regulierung des Wasserdurchflusses



Dabei sind die Sensoren nicht zufällig auf dem Feld verteilt, sondern werden planmäßig an denjenigen Stellen eingesetzt, die für bestimmte Schläge charakteristisch sind, wie es in der nächsten Abbildung gezeigt wird.

Abbildung 26: Positionierung der Sensoren innerhalb der Schläge



Für den Einsatz in der Präzisionsbewässerungstechnologie werden, AVM eingesetzt, die folgende Spezifikation erfüllen (entsprechend Ausbaustufe 1, siehe oben):

- Messparameter Bodenfeuchtigkeit (in Relation zur **nutzbaren Feldkapazität**),
- Genauigkeit +/- 1 % Vol % Feuchtigkeit,
- Datenaufnahme und Weitergabe zwischen 2 mal täglich oder nur bei Durchgang der Bewässerungsbrücke, d.h. **alle 2-3 Tage** (einmalige Übermittlung),
- Funkstrecke Boden - Luft 100 m (möglicherweise aber befinden sich in der Sichtachse zwischen Sender und Empfänger **feuchte Biomasse**), Funkstrecke im Boden 40 cm,
- Lebensdauer 5 Jahre,
- Gesamtkosten incl. notwendiger Peripherie unter 100 €/ha*a.

Die Anzahl der Sensorknoten / Messpunkte ist auch abhängig von der Messgenauigkeit: bei großen Unsicherheiten (sensorbedingt und/oder bedingt durch

kleinsträumige Inhomogenität des Bodens) sind ggf. Messwerte mehrerer Sensoren zu mitteln, folglich ist eine größere Anzahl Sensoren erforderlich

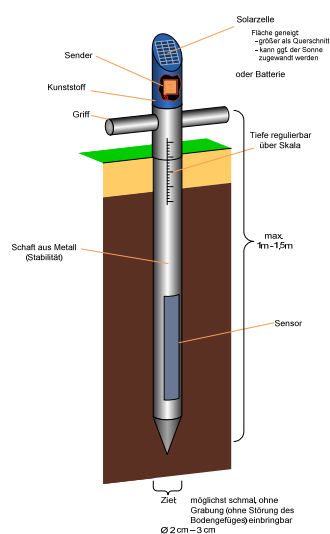
In Ausbaustufe 2 (Steuerung der Bewässerung) gibt es zwei grundsätzliche Varianten: Der Empfänger **reguliert direkt den Wasserdurchfluss** für „sein“ Segment oder Daten werden **zentral** für die gesamte von der Bewässerungsanlage erfasste Fläche zusammengefasst und die Bewässerung zentral gesteuert (am zentralen Versorgungspunkt oder ferngesteuert). Eine zentrale Messwertfassung zur sporadischen Überprüfung und für Nachjustierung ist wahrscheinlich erforderlich.

Außerdem ist ein **Modell erforderlich** zur Berechnung der erforderlichen Bewässerungsmenge in Abhängigkeit der gemessenen Bodenfeuchte in den verschiedenen Tiefen, Reifegrad (d.h. zeitlich variierender Bedarf der Pflanzen), Bodenbeschaffenheit (ggf. kleinräumig differenziert) und ggf. gekoppelt mit Wettervorhersagen.

4.11 Umsetzungskonzept: Diskussion der Systemkomponenten

Zunächst sollen die Entwurfswahlgrade der einzelnen Funksensorknoten bei der Auswahl von geeigneten Architekturen und Schaltungskonzepten erläutert werden. Im Rahmen einer Systempartitionierung von energieautarken Funksensorknoten kann man die Funktionseinheiten Funkschnittstelle, Umgebungsschnittstelle, Datenverarbeitung und Energieversorgung unterscheiden.

Abbildung 27: Messlanzenkonzept



4.11.1 Umgebungsschnittstelle

Funksensorknoten können zum Erfassen vielfältiger Phänomene eingesetzt werden. Hier lag der Schwerpunkt auf einer Betrachtung der Prinzipien zur Bodenfeuchte-Messung. Typische Signalamplituden von Sensoren liegen im Bereich von wenigen Mikrovolt bis zu mehreren 100 Millivolt. Die Kalibrierungsaufwände hängen erheblich von der erforderlichen Messgenauigkeit ab. So können entsprechende Montagefehler nach der Fertigung oder Installation zu korrigieren sein. Ebenso sind oftmals Alterungseffekte zu berücksichtigen, die beispielsweise unter thermischen Belastungen auftreten. Die Parameteränderungen können meist durch Kennlinien beschrieben und rechnerisch kompensiert werden.

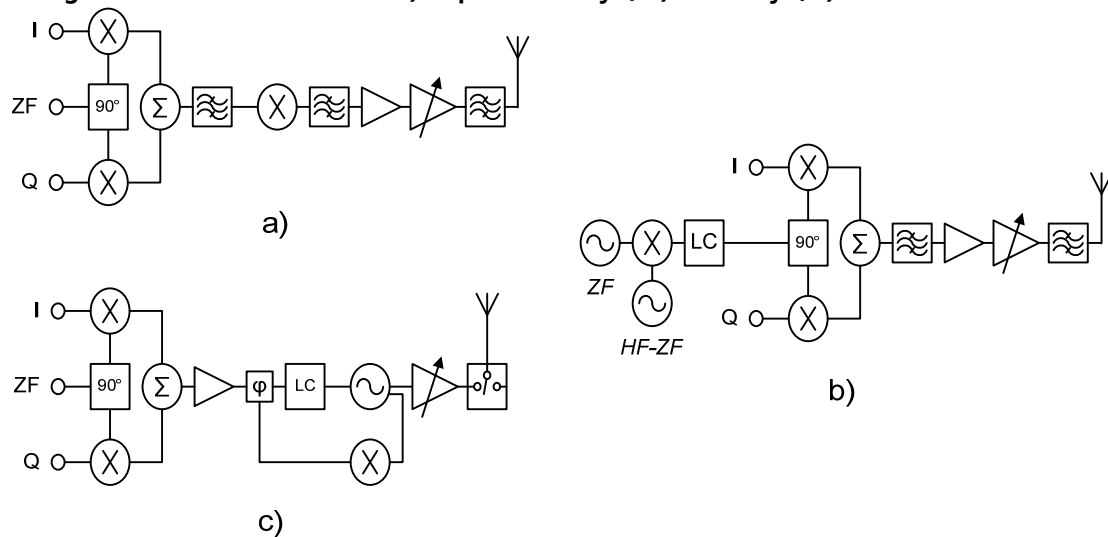
4.11.2 Funkschnittstelle

Moderne Funkarchitekturen nutzen die Vorteile der digitalen Signalverarbeitung hinsichtlich der geringeren Störempfindlichkeit und flexibleren Konfigurationsmöglichkeit, in dem das empfangene Funksignal digitalisiert wird. Je nach Stadium der Digitalisierung können verschiedene Schaltungskonzepte vom Superheterodyn-Empfänger bis zum Digitalen Zwischenfrequenz-Empfänger unterschieden werden. Sofern man auf eine regelmäßige Konfigurierung der Funksensoren verzichtet, wird kein Funkempfänger sondern lediglich ein Funk-sendesaltung benötigt. Die Beregnungsbrücke hingegen verfügt über eine Funkempfangsschaltung.

Beim *superheterodynen Sender*²²⁵ wird das Basisbandsignal in mehreren Stufen in das Funksignal konvertiert (Abbildung 28a). Auf den Zwischenfrequenzstufen werden Störanteile aus dem Basisband entsprechend gefiltert. Der *homodyne Sender* hingegen konvertiert das Basisbandsignal direkt in das Funksignal (Abbildung 28b). Um Interferenzen des spannungsgesteuerten Oszillators am Sendeausgang zu vermeiden, wird die erforderliche Trägerfrequenz durch zwei spannungsgesteuerte Oszillatoren erzeugt, die auf zwei verschiedenen Frequenzen arbeiten. Im Vergleich zum superheterodynen Sender führt der homodyne Sender zu weniger störenden Nebenwellen, da keine Zwischenfrequenzen erforderlich sind. Aufgrund der deutlich höheren Signalpegel sind Signalgleichanteile und Funkelrauschen ein deutlich geringeres Problem als beim homodynem Empfänger. Nachteilig ist jedoch, dass zwei besonders lineare Mischerstufen erforderlich sind.

²²⁵ Bensky, A.: Short-range Wireless Communication, LLH Technology Publishing, Eagle Rock, VA, USA, 2000, S. 139-144

Abbildung 28: Senderarchitekturen a) Superheterodyn, b) Homodyn, c) Offset-PLL²²⁶



Eine alternative Senderarchitektur mit geringerem Ausgangsrauschen und hoher Energieeffizienz ist die *Modulationsschleife*²²⁷. Dabei wird nach Modulation der Zwischenfrequenz eine phasenrastende Regelschleife (engl. Phase Locked Loop, PLL) verwendet, um das Funksignal zu erzeugen (Abbildung 28c). Ein weiterer Ansatz mit recht hoher Energieeffizienz basiert auf einer direkten Modulation des spannungsgesteuerten Oszillators, bei welchem die Schleife nach dem Einschwingen der PLL geöffnet wird²²⁸. Die Instabilität des Oszillators erfordert jedoch eine Außenbeschaltung mit Passiven hoher Güte, was das Miniaturisierungspotential entsprechend einschränkt.

Zu den zentralen Parametern bei der Auswahl der Funkarchitektur zählen Empfangsempfindlichkeit, Frequenzselektivität, Sendeleistung, Datenrate und Trägerfrequenz. Während bei der typischen Funkkommunikation die zu empfangenen Funksignale im Picowatt-Bereich (-130dBm ... -70dBm) liegen, kann das Rauschen den Milliwatt-Bereich (-20dBm ... 0dBm) erreichen. Die untere Schranke der Empfindlichkeit für das schwächste noch empfangbare Signal resultiert aus dem thermischen Rauschen in Abhängigkeit von der Signalbandbreite je nach gewählter Frequenzselektivität.

²²⁶ Paradiso, J.; Starner, T.: Energy Scavenging for Mobile and Wireless Electronics, IEEE Pervasive Computing, Vol.4, No.3, 01–03/2005, S. 18-27

²²⁷ Scheiter, T.: Integration mikromechanischer Sensoren in einer CMOS/ BICMOS – Prozeßumgebung, Dissertation, TU München, 1996

²²⁸ Gilileo, K.: Area Array Package Design - Techniques in High-Density Electronics, McGraw-Hill, 2002, S.64 ff.

Der Optimierungsfokus hinsichtlich der Leistungsaufnahme liegt meist auf der Empfangsarchitektur. Dies kann bedeuten, dass lieber die senderseitige Funkleistung angehoben und dafür die Leistungsaufnahme durch eine reduzierte Empfangsempfindlichkeit verringert wird. Ein alternativer Ansatz ist die Verwendung eines besonders leistungsarmen Empfängers, der nur sehr starke Funksignale empfangen kann und den empfindlichen Funkempfänger zur eigentlichen Kommunikation aktiviert (engl. wakeup radio). Recht unempfindliche Empfänger können eine um mindestens 2 Größenordnungen geringere Leistungsaufnahme erreichen.

Bei der Wahl der Datenrate suggerieren oft Metriken zur Energieeffizienz, welche lediglich die Leistungsaufnahme pro Bit betrachten, eine deutlich höhere Datenrate als erforderlich zu wählen. Auf diese Weise können die Schaltkreise zur Funkkommunikation über längere Intervalle deaktiviert werden. Die Ursache liegt darin, dass die Leistungsaufnahme der digitalen Basisbandverarbeitung relativ linear mit der Datenrate steigt, während die Hochfrequenzschaltungen im Sende- und Empfangsteil nur marginale Abhängigkeiten zur Datenrate je nach Modulationsschema aufweisen. Bei sehr kleinen und häufigen Datenpaketen ist die optimale Datenrate jedoch deutlich geringer, da das Einschwingverhalten von Sender- und Empfänger hinsichtlich der Leistungsaufnahme dominiert. Dies führt für verschiedene Paketlängen zu unterschiedlichen optimalen Datenraten, da ein schnelleres Einschwingen meist durch ein leichtes Anheben der Leistungsaufnahme im Funkbetrieb erreicht wird, um die Dynamik der einzelnen Komponenten zu verbessern.

Bei der Festlegung der Trägerfrequenzen wird die Verwendung besonders hoher Funkfrequenzen oberhalb von 24 Gigahertz mit entsprechend kleiner Wellenlänge zur Erreichung besonders kleiner Antennen diskutiert. Die höhere Dämpfung der Funkwellen gemäß Gleichung bedeutet einerseits eine deutlich größere Funkleistung für eine vergleichbare Funkübertragung. Andererseits führt die höhere Übertragungstreckendämpfung dazu, dass Interferenzen unkritischer sind. Die dominierenden Verluste im Bereich der Hochfrequenzkomponenten können nur kompensiert werden, wenn die Anwendung über höhere Datenraten eine deutliche Reduktion der Betriebszyklen erlaubt. Dies hängt auch erheblich vom notwendigen Synchronisationsaufwand ab. Daher wird man lange und seltene Datenübertragungen lieber bei höheren Trägerfrequenzen realisieren, während kurze und häufige Datenpakete mit etwas geringeren Trägerfrequenzen zu übermitteln sind. Eine erste Abschätzung ergab, dass hier aufgrund der Reichweite von bis zu einigen 100 Metern eine Trägerfrequenz von 433 bis 868 Megahertz energetisch die meisten Vorteile bietet. Einen weiteren Freiheitsgrad bildet die Wahl der Kanalkodierung bei der Festlegung der Funksendeleistung. So erlaubt ein aufwendigerer Fehlerkorrekturmechanismus eine geringere Leistungsaufnahme der Senderausgangsstufe für eine festgelegte Fehlerbitrate. Dafür steigt jedoch der Anteil der Verlustleistung für die digitale Basisbandverarbeitung.

Mittlererweile kann der größte Teile der Sende- und Empfangsschaltung sehr platzsparend auf einem Mikrochip mit wenigen Millimeter Kantenlänge realisiert werden. Dabei werden Antennen immer öfter zum größtenbestimmenden Bauteil. Die Möglichkeiten zur Realisierung von Antennen sind vielfältig. Zu den einfachsten Antennenstrukturen zählen Monopol-, Ring- und Patch-Antennen. Planare Antennenkonzepte wie Patchantennen sind besonders beliebt, da diese Antennen gut in die Fertigungskonzepte integriert werden können – beispielsweise als SMD-Antennen oder im Substrat eingebettete Antennenstrukturen. Daher hier die Platzbeschränkungen nicht besonders kritisch sind, ist die Antennenauswahl kaum beschränkt. Aus Kostengründen wären zunächst Monopol- oder Patch-Antennen zu prüfen.

Die Reichweite ist abhängig von der Sendefeldstärke, der Empfangsempfindlichkeit und der Übertragungsstreckendämpfung. Die Übertragungsstreckendämpfung ist deutlich geringer bei niedrigen Trägerfrequenzen (z.B. 433 MHz). Die typische Leistungsaufnahme auf der Sender- und Empfängerseite liegt bei 30 Milliwatt während der Funkkommunikation. Deutlich mehr Energie wird benötigt, wenn die Funksensorik in feuchter Erde vergraben ist. Im ungünstigsten Fall führt eine hohe Leitfähigkeit im Boden dann dazu, dass die Reichweite selbst bei einer hohen Sendefeldstärke nur noch wenige Zentimeter beträgt. Daher sollte die Antenne am besten nicht im Boden vergraben werden bzw. es ist durch entsprechende Feldversuche sicherzustellen, dass die Mindestreichweite im ungünstigsten Fall erreicht werden kann. Zur Realisierung der Funkstrecke wurden folgende Topologien diskutiert:

- Variante 1: ein Receiver / Gateway im Mittelpunkt der Kreisbewässerungsanlage (max. 750 m Luftlinie) bzw. auf halber Strecke der Beregnungsbrücke (max. 375 m Luftlinie)
- Variante 2: Mehrere Receiver / Gateways auf der Beregnungsbrücke (bei 4 Stück max. 100 m Luftlinie)
- Variante 3: Platzierung Receiver / Gateway auf der Beregnungsbrücke an Stellen, die immer direkt über den Sensoren passieren (Abstimmung Platzierung der Sensoren mit den Receivern auf der Brücke erforderlich; 5 Receiver sind wahrscheinlich ausreichend um eine Funkstrecke von 5 m zu realisieren - Luftlinie)

Sofern man das Aufbaukonzept gemäß Abbildung 27 umsetzt, können recht große Antennen überirdisch realisiert werden, so dass die Reichweite von 750m bei moderaten Datenraten gut realisierbar ist. Daher erscheint dann Variante 1 mit lediglich einem Gateway als besonders kostengünstig zu implementieren. Wird jedoch ein Vergraben der Funksensor-Antenne erwogen, ist Variante 3 mit entsprechend mehreren Empfängern zur Absicherung kurzer Reichweiten zu wählen.

Während die Reichweite die maximal erforderliche Leistungsaufnahme bestimmt, hängt der durchschnittliche Energiebedarf wesentlich von der Häufigkeit der Datenübertragung ab. Sollte die Datenübermittlung statt zweimal täglich lediglich alle 3 Tage durchgeführt werden, dann wird nur ein Sechstel der durchschnittlichen Leistungsaufnahme für den Funktrakt erforderlich. Je nach Energiebedarf für die Bodenfeuchtesensorik sind daher die Intervalle für die Funkkommunikation ein wesentlicher Optimierungsparameter mit entsprechender Hebelwirkung auf die Miniaturisierung.

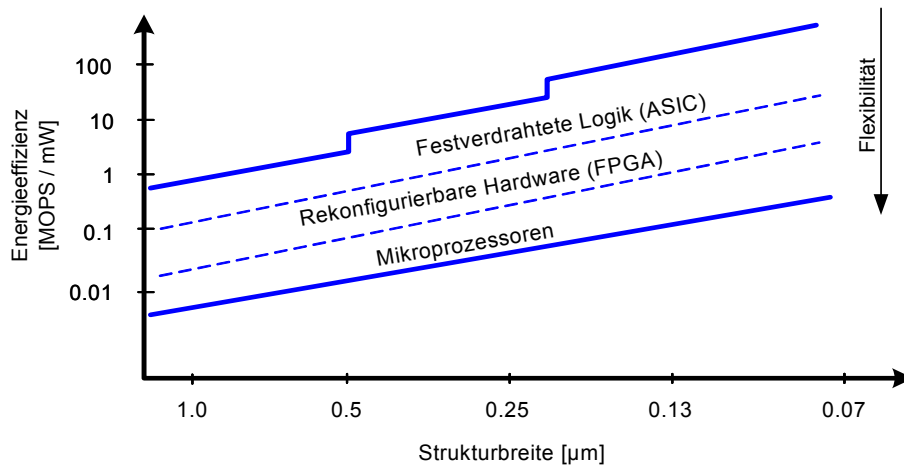
4.11.3 Datenverarbeitung

Zur Verarbeitung der Sensordaten und zur Steuerung der Kommunikation sind einige Algorithmen notwendig, die mit Hilfe von digitalen Rechenarchitekturen implementiert werden. Bei der Auswahl einer geeigneten Rechenarchitektur vom universellen Mikroprozessor bis zum festverdrahteten Schaltkreis (engl. Application Specific Integrated Circuit, ASIC) steht man dem Zielkonflikt von Flexibilität und Effizienz gegenüber²²⁹. Mikroprozessoren mit vielseitigen Befehlssätzen sind in der Lage nahezu jeden Rechenprozess zu bearbeiten. Festverdrahtete Logikschaltungen sind nur für sehr spezifische Anwendungen ausgelegt und erreichen durch wesentlich weniger erforderliche Transistorschaltvorgänge eine deutlich schnellere Erledigung einer Aufgabe. Für eine Implementierung konkreter Algorithmen ist durch festverdrahtete Schaltkreise eine um vier Größenordnungen höhere Energieeffizienz gegenüber Mikroprozessoren durchaus realistisch (Abbildung 29). Die Wurzeln dieser großen Effizienzvariation liegen in den unterschiedlichen Rechenparadigmen. So weisen Prozessoren eine allgemeine feste Architektur auf, die Algorithmen über eine zeitliche Abfolge von Rechenoperationen mit einem Rechenkern (engl. arithmetic and logic unit, ALU) umsetzt. Die zeitliche Abfolgen der Rechenoperationen und damit die Verhaltensmuster von Mikroprozessoren werden über Programme (Software) bestimmt. Bei festverdrahteten Schaltkreisen hingegen werden die Rechenvorschriften über räumlich angeordnete Logikgatter realisiert, so dass die spezifischen Recheneinheiten wie Multiplizierer und Addierer direkt auf den Algorithmus angepasst sind.

Während aus Effizienzgründen der Einsatz von universellen Mikroprozessoren für miniaturisierte, energieautarke Funksensorknoten meist ausscheidet, kommen spezialisierte Prozessoren (engl. Application Specific Processors, ASIP) wie Mikrocontroller und digitale Signalprozessoren in Frage. Diese besitzen neben dem Rechenkern festverdrahtete Peripherie-Einheiten für bestimmte Anwendungsklassen, so dass die Energieeffizienz über den Flexibilitätsgewinn vertretbar wird.

²²⁹ Strohhöfer, C.; Klink, G.; Feil, M.; Drost, A.; Bollmann, D.; Hemmetzberger, D.; Bock, K.: Roll-to-roll microfabrication of polymer systems, *Journal Measurement and Control*, Bd. 40, Nr. 3, 2007, S. 80-83

Abbildung 29: Effizienz und Flexibilität verschiedener Rechenarchitekturen



Bestimmt die Leistungsaufnahme maßgeblich das Miniaturisierungspotential, so werden festverdrahtete Logikschaltungen beim Architekturentwurf vorgezogen. Es existiert eine recht hohe Vielfalt an festverdrahtete Standardschaltungen, so dass für breite Anwendungsbereiche eine ASIC-Entwicklung nicht immer erforderlich ist. Andernfalls ist ein Chipentwurf zu erwägen. Der beträchtliche Aufwand für einen ASIC-Entwurf kann durch eine sogenannte halbkundenspezifische (engl. semi-custom) Chipentwicklung deutlich reduziert werden, in dem vorgefertigte Funktionseinheiten wie Zellen oder Logik-Gatter lediglich anwendungsspezifisch verdrahtet werden.

Rekonfigurierbare Rechenarchitekturen kombinieren die beiden Paradigmen der räumlichen und zeitlichen Datenverarbeitung, da die Algorithmen sowohl mit verteilten Logikeinheiten als auch über Sequenzen – sogenannte Konfigurationen – implementiert werden. Die Wurzeln rekonfigurierbarer Systeme bilden CPLD- (engl. Complex Programmable Logic Device) und FPGA-Bausteine (engl. Field-Programmable Gate Array), die ursprünglich nur zur Prototypentwicklung gedacht waren. Mit heutigen Integrationsdichten können mehrere Millionen Logikgatter auf einem Mikrochip realisiert werden, so dass sich auf einem FPGA-Baustein auch ganze Computersysteme umsetzen lassen. Inzwischen existieren auch hybride Rechenarchitekturen wie rekonfigurierbare Prozessoren, die einen Standard-Rechenkern eines Mikroprozessors mit FPGA-Elementen kombinieren.

Mikroprozessoren wie auch rekonfigurierbare Bausteine benötigen Speicher zur Ablage von Daten, Programmen und Konfigurationen. Auch festverdrahtete Schaltkreise benötigen Speicherzellen zur Sicherung von Zuständen. Die einzelnen Speichertechnologien unterscheiden sich deutlich hinsichtlich des Platzbedarfs, der Leistungsaufnahme und der Zugriffsgeschwindigkeit. Bei moderaten

Anforderungen sind die Speicherzellen zusammen mit den Adressdekodern und den Logikbausteinen auf einem Mikrochip integriert. Für anwendungsspezifische Prozessoren sind hier eingebettete Datenspeicher als SRAM (engl. Static Random Access Memory) und Programmspeicher als EEPROM (engl. Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory) in der Größe von 4 bis 128 Kilo-byte nötig.

Je nach IC-Technologie wird die Chipfläche für einen ASIP eine Größe zwischen 4x4mm² und 7x7mm² aufweisen, wenn der Funktransceiver, der Speicher und eine Leitfähigkeitsmessung zur Bodenfeuchtebestimmung integriert werden sollen. Eine ASIC-Implementierung würde Einsparung der Chipfläche in der Größenordnung von ca. 30% ermöglichen.

4.11.4 Energieversorgung

Zur Dimensionierung der Energieversorgung ist die Leistungsaufnahme des Funksensorknotens abzuschätzen. Die Leistungsaufnahme für die Datenverarbeitung, Funkkommunikation und Messdatenerfassung liegt hier bei 10 bis 100 Milliwatt, sofern von einem 100 %igen Betriebszyklus ausgegangen wird. Im Ruhezustand erreicht der Energiebedarf wenige Mikrowatt. Da im diskutierten Szenario die Betriebsbereitschaft auch unter 1 % liegen darf, ist von einer durchschnittlichen Leistungsaufnahme von 100 Mikrowatt auszugehen. Tabelle 35 listet einige generelle Maßnahmen zur Realisierung einer besonders effizienten Rechenarchitektur auf. In Abhängigkeit von den Randbedingungen (Mess- und Funkintervalle, ASIC-Design oder Standard-IC-Beschaffung) ist zu prüfen, welche der Methoden im konkreten Anwendungsfall praktikabel sind.

Tabelle 35: Maßnahmen zur Optimierung von Rechenarchitekturen

Abstraktionsebene	Optimierungsverfahren
Logik- und Schaltkreisebene	Logiktransformation; Bauelementoptimierung
Architekturebene	Anpassung der Rechengenauigkeit und der Störimpfindlichkeit; Dynamische Spannungsskalierung; Systemtaktreduktion; Pipelining & Retiming; Gemeinsame Ressourcennutzung; Angepasste Analog- / Digitalschnittstelle
System und Algorithmusebene	Abschaltung von Systemeinheiten; Geeignete Einteilung in Systemblöcke; Reduktion der Algorithmenkomplexität

Einfachere Schemen zur Leistungsüberwachung (engl. Power Management) basieren auf der Abkopplung der Versorgungsspannung von analogen und digitalen Komponenten, um die Leistungsaufnahme wirkungsvoll abzusenken und unnötige, statische als auch dynamische Verluste zu vermeiden. Dazu werden entsprechende Betriebsmodi festgelegt. Fortgeschrittene Konzepte passen die Last flexibel an. Durch Reduktion der Taktfrequenz kann eine höhere Energieeffizienz bei den digitalen Schaltungen auf Kosten eines geringeren Datendurchsatzes erreicht werden, sofern die Versorgungsspannung und gegebenenfalls

die Schwellenspannung entsprechend nachgeführt werden. Es existieren sogar Konzepte, welche die Versorgungsspannung unterhalb der Schwelle fehlerfreier Signalverarbeitung absenken, um durch zusätzlichen Schaltungsaufwand die Rechenfehler zu kompensieren. Im Bereich der analogen Komponenten ist teilweise eine verringerte Leistungsaufnahme möglich, wenn beispielsweise für Messungen mit reduzierter Auflösung die geringere Dynamik und der geringere Störabstand toleriert werden kann.

Als Energiespeicher dienen meist Batterien aufgrund ihrer relativ hohen Energiedichte im Bereich von 100 bis 1300mW/cm³ oder Kondensatoren mit ca. 1 bis 5 mW/cm³. Neben hohen Energiedichten für kleine Baugrößen sind Zellspannungen, Entladungsströme und Leistungsdichten zum Treiben der entsprechenden Spitzenströme bei der Materialauswahl zu beachten. Je nach Stromspitzen, beispielsweise sind beim Senden Amplituden von 100 Milliwatt zu erwarten, kann die effektive Energiekapazität erheblich sinken, weshalb ausreichend groß dimensionierte Pufferkondensatoren erforderlich werden.

Für die hier betrachteten Sensornetzwerke sollte eine Wandlung von Licht in Betracht gezogen werden. Solarzellen, die eine Energieeffizienz in der Größenordnung von 20 Prozent erreichen, können bei direkter Sonneneinstrahlung 100 Milliwatt pro Quadratzentimeter bereitstellen, wobei dieser Wert bei starker Bewölkung auf 100 Mikrowatt pro Quadratzentimeter sinken kann. Allerdings muss man beachten, dass durch Verschmutzung sich die Energieausbeute deutlich reduziert. Alternative Verfahren zur Energiewandlung durch Temperaturgradienten oder Vibrationen erscheinen weniger praktikabel. Analog zu den Technologien der Funkidentifikation (engl. Radio Frequency Identification – RFID) können mit induktiver, kapazitiver oder elektromagnetischer Kopplung auch Energien von mehreren 100 Mikrowatt bei kurzen Abständen übertragen werden. Dies bedeutet jedoch eine entsprechende Wartungsausrüstung, um in regelmäßigen Abständen die Funksensoren aufzuladen.

Für das Anwendungsszenario mit oberirdischer Antenne wäre eine Solarmodulfläche von 0,5 bis 1 cm² ausreichend, um den Funksensor mit einer durchschnittlichen Leistungsaufnahme von 100 Mikrowatt zu betreiben. Für eine unterirdisch verlegte Antenne ist eine Aussage schwer abzuschätzen, da die Leistungsaufnahme dann deutlich größer werden kann und um diesen Faktor sich die erforderliche Solarfläche vergrößert.

5 Ökonomische Potenziale

In den folgenden Kapiteln werden die wirtschaftlichen Potenziale der ausgewählten AVM-Anwendungsfelder Automatisierungstechnik und Landwirtschaft abgeschätzt. Dazu werden zunächst die grundlegenden Marktpotenziale von AVM bzw. drahtlosen Sensornetzwerken in dem jeweiligen Anwendungsfeld skizziert, bevor auf detailliertere Schätzungen von Potenzialen in spezifischen Anwendungen eingegangen wird.

5.1 Automatisierungstechnik

5.1.1 Generelles Marktpotenzial für Anwendungen drahtloser Sensornetzwerke in der Automatisierungstechnik

Das Marktpotenzial für industrielle Anwendungen drahtloser Sensornetzwerke wird von dem amerikanischen Marktforschungsinstitut On World auf ca. US-\$ 4,6 Mrd. im Jahr 2011²³⁰ geschätzt. Dieses umfasst mögliche Anwendungen drahtloser Sensornetzwerke in einer Vielzahl von Branchen und sieht vor allem das Monitoring und die Verbesserung der Prozesseffizienz als eine Hauptmotivation für deren zukünftigen Einsatz. Die Untersuchung sieht zudem die Zustandsüberwachung von Maschinen und Prozessen als eine Schlüsselanwendung für drahtlose Sensornetzwerke.

Die Potenziale für die Zustandsüberwachung von Maschinen und Prozessen werden auch durch andere Quellen gestützt²³¹ und mit Energie- und Kosteneinsparzielen hinterlegt. Beispielsweise zeigen Abschätzungen aus spezifischen Branchen, dass durch den Einsatz von Technik zur Zustandsüberwachung von Produktionsprozessen 25 bis 40 % der Instandhaltungskosten reduziert werden könnten²³².

²³⁰ ON World Inc.: WSN for Smart Industries, 2007, veröffentlichte Synopsis; "Smart Industries" umfasst die Bereiche Chemie / Petrochemie, Elektro / Elektronik, Nahrungsmittel und Getränke, Maschinenbau, Transport und Kunststoffe, Metallindustrie, Mineralien, Öl / Gas / Bergbau, Papier, Pharmazeutische Industrie / Laboratorien / Medizingeräte, Energieerzeugung und -übertragung, Wasserversorgung / Abwasserentsorgung

²³¹ Siehe z.B. Sexton, D.: Distributed Wireless Multi-Sensor Technologies, GE Global Research, 2008, Marrón et al.: Embedded Wisenets Research Rodamap, Logos Verlag Berlin, 2006 und The Econmoist: When everything connects. A 14-page special report on the coming wirelsee revolution, April 2007

²³² Siehe z.B. Binasch, A.: Abnutzungsvorrat optimal ausgenutzt - CMS im Einsatz bei einem Konfitüren- und Süßwarenhersteller, Der Betriebsleiter, 5/2005

5.1.2 Marktpotenzial für die Zustandsüberwachung von elektrischen Antrieben und Motoren in der Automatisierungstechnik

5.1.2.1 Anzahl elektrischer Antriebe und Motoren in der Automatisierungstechnik

Jährlich werden in Deutschland ca. 150 Mio. Elektromotoren hergestellt²³³, die als Gleichstrom- oder Drehstrommotoren in den unterschiedlichsten Leistungsklassen zum Einsatz kommen. Wenngleich längst nicht alle dieser Motoren in der Automatisierungstechnik genutzt werden, weist die hohe Stückzahl doch auf ein erhebliches Potenzial hin, dass im Folgenden näher analysiert werden soll. Nach einer aktuellen Studie des VDE sind die in der Industrie eingesetzten Elektromotoren zudem für mehr als die Hälfte des deutschen Stromverbrauchs verantwortlich²³⁴. Insbesondere die Leistungsklasse bis 10 kW wird hierbei hervorgehoben, da sich in ihr bis zu 30 % Einsparpotenziale realisieren lassen.

Elektrische Antrieben und Motoren stellen somit eine Schlüsselkomponente der Automatisierungstechnik in der Industrie dar. Ein Einsatz von drahtlosen Sensoren bzw. AVM würde aber nicht nur zur Steuerung des Motors im energieeffizienten Optimum Sinn machen, sondern könnte vor allem die Zustandsüberwachung vieler kleiner Motoren erleichtern und somit Wartungs- und Stillstandszeiten verringern (siehe Kap. 3.5.2).

Eine genaue Anzahl der in der Industrie eingesetzten elektrischen Antriebe und Motoren ist nicht bekannt und aufgrund der Vielzahl der eingesetzten Motortypen nur schwer zu differenzieren. Die folgenden Zahlen nehmen eine Eingrenzung auf die Leistungsklassen vor, die für die Automatisierungstechnik von besonderer Relevanz sind:

- In der Leistungsklasse bis 7,5 kW wurden in Deutschland im Jahr 2007 ca. 220.000 Gleichstrommotoren sowie ca. 30.000 Drehstrommotoren in der Leistungsklasse bis 750 kW hergestellt. Diese Motoren können in unterschiedlichsten Anwendungen der Automatisierungstechnik zum Einsatz kommen. Hinzu kommt eine große Anzahl von ca. 140 Mio. Kleinmotoren bis mehrer hundert W Leistung, die in Form von Gleich- oder Wechselstrommotoren in verschiedensten Anwendungen und Endprodukten, aber auch der Automatisierungstechnik eingesetzt werden können²³⁵.

²³³ Daten beruhen auf Informationen des Fachverbandes Automation des Zentralverbandes Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. (ZVEI) vom November 2008.

²³⁴ Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. (VDE): Effizienz- und Einsparpotentiale elektrischer Energie in Deutschland. Perspektive bis 2025 und Handlungsbedarfe, Frankfurt a.M., 2008

²³⁵ Daten beruhen auf Informationen des Fachverbandes Automation des Zentralverbandes Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. (ZVEI) vom November 2008.

- Ein relativ gut untersuchtes Segment stellen z.B. Druckluftanlagen dar. In produzierenden Unternehmen in Deutschland sind rund 62.000 Druckluftanlagen im Einsatz, die mit elektrischen Motoren betrieben werden. Durch drehzahlvariable Antriebe und eine effiziente Steuerung, z.B. auf Basis von AVM, könnten die Gesamteffizienz der Druckluftanlagen um über 6 % verbessert und dadurch erhebliche Energieeinsparpotenziale realisiert werden ²³⁶.

5.1.2.2 Abschätzung von Marktpreisen zukünftiger AVM-Anwendungen in der Automatisierungstechnik

Das Einsatzpotenzial von AVMs in der Automatisierungstechnik hängt von den zu erwartenden Marktpreisen und Systemkosten konkreter AVM-Anwendungen sowie den durch sie erzielbaren Einsparungen ab. Der Marktpreis der AVM setzt sich aus dem Deckungsbeitrag, den Kosten der Einzelkomponenten eines AVM sowie den Fertigungskosten für die Montage zusammen.

Hinzu kommen im konkreten Anwendungsfall des AVM in der Automatisierungstechnik weitere Systemkosten, z.B. für die Installation, die Netzintegration, eventuell benötigte Software, etc. Hierfür können zum jetzigen Zeitpunkt keine verlässlichen Abschätzungen getroffen werden können, da diese zu stark von dem jeweiligen Einsatzfeld und dessen Anforderungen abhängen.

Um eine Vorstellung über die Kosten der Einzelkomponenten eines AVM zu erhalten werden diese zunächst auf Basis aktueller Kostenstrukturen die Preisspanne von Funktionskomponenten aus der Mikroelektronik erfasst. Diese sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt (siehe Tabelle 36). Die Erhebung realer Preise einzelner Funktionskomponenten ist jedoch schwierig, da die Hersteller bei hohen Stückzahlen die Komponentenpreise mit dem jeweiligen Kunden verhandeln.

²³⁶ Alle Daten siehe Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. (VDE): Effizienz- und Einsparpotentiale elektrischer Energie in Deutschland. Perspektive bis 2025 und Handlungsbedarfe, Frankfurt a.M., 2008

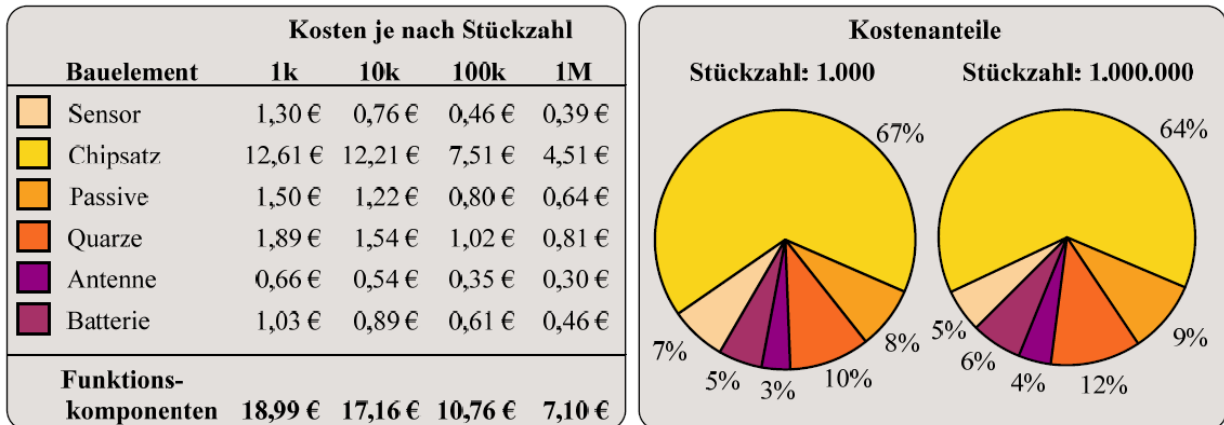
Tabelle 36: Liste der Funktionskomponenten für einen beispielhaften Sensorknoten

Komponente	Funktion	Bauformen	Anzahl	Kosten
 <p>Mikrocontroller</p>	Datenverarbeitung, Ablaufsteuerung, Energiemanagement	QFP, MLF*, unehäuster Chip*, gedünnter Chip*	1	1 ... 20€
 <p>Funk-Transceiver</p>	Funkkommunikation	TSSOP*, MLF*, CSP*, unehäuster Chip*, gedünnter Chip*	1	1 ... 12€
 <p>Sensorik</p>	Messdatenerfassung	Eingebettete Schicht*, Sonderbauformen	1 ... 3	0,1 ... 15 €
 <p>Quarze</p>	Frequenzerzeugung, Zeitreferenz	Sonderbauformen	1 ... 2	0,4 ... 3€
 <p>Leuchtdiode</p>	Statusanzeige	Sonderbauformen	1 ... 3	0,5 ... 1,3€
 <p>Batterie</p>	Energieversorgung	AA, AAA, Knopfzellen	1 ... 2	0,1 ... 3,2€
 <p>Antenne</p>	Funkübertragung	Eingebettete Schicht*, Sonderbauformen	1	0,1 ... 1,5€
 <p>Filter</p>	Störkopplung	Eingebettete Schicht*, 0201*, 0402, 0603	1	0,1 ... 0,5€
 <p>Passive</p>	Signalanpassung, Störkopplung, Energiespeicher	Eingebettete Schicht*, 01005*, 0201, 0402, 0603, 0805	20 ... 30	0,1 ... 0,8€

*Verfügbarkeit ist an Restriktionen hinsichtlich der Fertigungsprozesse bzw. an Bauteil-Eigenschaften gekoppelt.

In Abbildung 30 wurden die aktuellen Kosten für einen beispielhaften Funksensorknoten zur Messung von Temperatur und Beschleunigung zusammengestellt, um die aktuellen Kostenanteile zu verdeutlichen. Die Beschaffungskosten unterliegen der Marktentwicklung. Daher können sich die Absolutwerte verändert, die relativen Kostenanteile in Abhängigkeit von der Stückzahl, sind jedoch für die Komponentenkosten von Sensorknoten mit moderater Funktionalität sehr typisch.

Abbildung 30: Kostenübersicht der Funktionskomponenten eines typischen Funksensorknotens zur Messung von Temperatur und Beschleunigung



Generell ist zu beachten, dass konkrete Bedingungen im Industriefeld schnell zu einer Kostenexplosion führen können. So basiert die Kostenbetrachtung in Abbildung 30 auf einem Temperaturbereich von -40° bis 85°C . Muss der Temperaturbereich auf 125°C ausgedehnt werden, liegt die Kostensteigerung bei ca. 15 %. Sind noch größere Temperaturen (z.B. 135°C) zu tolerieren, vervielfachen sich die Kosten, weil in diesem Temperaturbereich viele Standardtechnologien nicht mehr zur Verfügung stehen. Dieses Beispiel verdeutlicht, warum aktuelle Funksensorsysteme im Industriefeld meist Preise im dreistelligen Euro-Bereich aufweisen.

Der dominierende Kostenanteil von über 60 % an den Kosten der Funktionskomponenten und von ca. 40 Prozent an den Gesamtkosten wird durch den Chipsatz, bestehend aus dem Mikrocontroller und dem Funktransceiver, verursacht. Recht dominante Chipkosten sind auch weiterhin wahrscheinlich, weil die Silizium-Integration noch auf absehbare Zeit die kostengünstigste Technologie darstellen wird. Die Chipfläche liegt hier zwischen 0,25 und 1 Quadratzentimeter. Um die Flächenkosten der Mikroelektronik deutlich zu reduzieren, wird oft die Polymerelektronik auf der Basis von Rolle-zu-Rolle-Prozessen diskutiert²³⁷. Sicherlich hat diese Technologie das Potenzial, insbesondere im Bereich der Etiketten besonders kostengünstige Systemlösungen zu erlauben. Bis zum jetzigen Zeitpunkt ist jedoch nicht absehbar, dass sich eine signifikante Kostensenkung ergibt. Die gegenüber einer Siliziumintegration deutlich größeren Strukturbreiten haben einen zu hohen Platzbedarf für alle digitalen Systemkomponenten eines Funksensorknotens zur Folge. Sobald die Marktreife der

²³⁷ Strohhöfer, C.; Klink, G.; Feil, M.; Drost, A.; Bollmann, D.; Hemmetzberger, D.; Bock, K.: Roll-to-roll microfabrication of polymer systems, Journal Measurement and Control, Bd. 40, Nr. 3, 2007, S. 80-83

Polymerelektronik erreicht ist, wäre eine Senkung der aktuellen Kostenschranke für minimalistische Funksensorknoten zu prüfen, indem lediglich die Analogkomponenten auf einem Polymersubstrat integriert werden. Für den Digitalteil wäre dann ein Siliziumchip in Quadratmillimetergröße wahrscheinlich kostengünstiger.

Zur Vorhersage der zukünftigen Kostenentwicklung kann man die Kostendynamik im Elektronik-Bereich aus der Vergangenheit heranziehen. Seit 1948 hat die Mikroelektronik ein enormes Wachstum erfahren. Die technische Entwicklung im Bereich der Mikrosystemtechnik ist ebenfalls beachtlich. Sie hinkt jedoch der Dynamik bei den integrierten Schaltkreisen deutlich hinterher. So fiel beispielsweise in den 25 Jahren von 1970 bis 1995 das Preis-Leistungsverhältnis bei Mikroprozessoren auf 0,01%, während die entsprechenden Kostenreduktionen bei Sensoren lediglich 33% und bei Aktoren 10% betragen²³⁸. Die dynamische Entwicklung bei den Komponententechnologien führte auch zu einer erheblichen Steigerung der Integrationsdichte im Bereich der Aufbau- und Verbindungstechnik. Besonders anschaulich ist die technologische Entwicklung im Bereich der Mobiltelefone, in dem bei einer Reduktion der belegten Leiterplattenfläche um 15% die Kosten jährlich um 25% sinken²³⁹. Daher wäre eine Kostensenkung von ca. 10% p.a. für die einzelnen Funktionskomponenten im Durchschnitt zu erwarten.

5.1.2.3 Abschätzung von Marktpotenzialen zukünftiger AVM-Anwendungen in der Automatisierungstechnik

In Verbindung mit den in Kap. 5.1.2 genannten Zahlen zu den in Deutschland produzierten Elektromotoren können grobe Abschätzungen über Marktpotenziale von AVM-Anwendungen in der Automatisierungstechnik getroffen werden. Dazu werden zunächst die Kostenentwicklungen der in Abbildung 30 genannten Funktionskomponenten abgeschätzt. Es wird davon ausgegangen, dass die Kosten der Komponenten Chipsatz, Passive und Quarze bis zum Jahr 2015 um 10% und bis zum Jahr 2020 um weitere 10% sinken. Es wird davon ausgegangen, dass sich die Komponenten Sensor, Antenne und Energieversorgung (z.B. Batterie) stark weiterentwickeln, die Kosten aber aufgrund der neuen angewendeten Technologien gleich bleiben.

²³⁸ Scheiter, T.: Integration mikromechanischer Sensoren in einer CMOS/ BICMOS – Prozeßumgebung, Dissertation, TU München, 1996

²³⁹ Gilleo, K.: Area Array Package Design - Techniques in High-Density Electronics, McGraw-Hill, 2002, S.64 ff.

Tabelle 37: Kosten der Funktionskomponenten in den Jahren 2015 und 2020

Kosten je nach Stückzahl im Jahr 2015				
Komponente	1k	10k	100k	1M
Sensor	1,30	0,76	0,46	0,39
Chipsatz (-10%)	11,34	10,99	6,76	4,06
Passive (-10%)	1,35	1,10	0,72	0,58
Quarze (-10%)	1,70	1,39	0,92	0,73
Antenne	0,66	0,54	0,35	0,30
Batterie	1,03	0,89	0,61	0,46
Gesamt	17,38	15,67	9,82	6,52
Kosten je nach Stückzahl im Jahr 2020				
Komponente	1k	10k	100k	1M
Sensor	1,30	0,76	0,46	0,39
Chipsatz (-10%)	10,21	9,89	6,08	3,65
Passive (-10%)	1,22	0,99	0,65	0,52
Quarze (-10%)	1,53	1,25	0,83	0,66
Antenne	0,66	0,54	0,35	0,30
Batterie	1,03	0,89	0,61	0,46
Gesamt	15,95	14,32	8,98	5,98

Zusätzlich werden folgenden für die Abschätzung des Marktpotenzials folgende, stark vereinfachende Annahmen getroffen:

- Die Marktpreise für AVM-Systeme werden mit dem fünffachen Preis der in Abbildung 30 angegebenen Preise für die Funktionskomponenten in den Jahren 2015 und 2020 angenommen. Darin sind neben den Funktionskomponenten die Kosten für weitere Komponenten (Platine, Gehäuse, etc.), die Fertigungskosten sowie ein Gewinnaufschlag enthalten. Inflationsbedingte Preissteigerungen werden für die Abschätzung vernachlässigt. Das Marktwachstum zwischen den Jahren 2010 und 2015 sowie zwischen 2015 und 2020 wird mit jeweils 5% angenommen.
- Es wird davon ausgegangen, dass alle Gleich- und Drehstrommotoren in der Leistungsklasse bis 750 kW, d.h. rund 250.000 Stück, in der Automatisierungstechnik eingesetzt werden und standardmäßig mit AVM zur Messung von Temperatur und Beschleunigung ausgerüstet werden.
- Im Falle der Kleinmotoren wird davon ausgegangen, dass ca. 10 % (d.h. 14 Mio.) standardmäßig mit AVM zur Messung von Temperatur und

Beschleunigung ausgerüstet werden, da sie ebenfalls in der Automatisierungstechnik zum Einsatz kommen.

Damit können folgende grobe Marktpotenziale für die Jahre 2015 und 2020 abgeschätzt werden:

Tabelle 38: Abschätzung von Marktpotenzialen für AVM-Anwendungen zur Messung von Temperatur und Beschleunigung in Elektromotoren

	2015			2020		
	Anzahl Motoren	Marktpreis je AVM [€/Stück]	Marktpotenzial [Mio. €]	Anzahl Motoren	Marktpreis je AVM [€/Stück]	Marktpotenzial [Mio. €]
Gleich- und Drehstrommotoren bis 750 kW Leistung	262.500	ca. 50,-	13,13	275.100	ca. 45,-	12,38
Kleinmotoren (Gleich- und Drehstrom) bis zu mehreren 100 W Leistung	14.700.000	ca. 33,-	485,1	15.435.000	ca. 30,-	463,05

Geht man von einer gleichbleibenden Marktdurchdringung zwischen 2015 und 2020 aus (10% Kleinmotoren), weil damit die wesentlichen sinnvollen Einsatzfälle erschlossen sind, bleibt das 2015 erreichte Marktpotenzial langfristig in etwa stabil; weiteres Wachstum ist dann eher in anderen industriellen Anwendungsbereichen zu erwarten.

Obwohl bezogen auf den Motorenpreis die Kosten für AVM-Anwendungen in Kleinmotoren höher sind, kann aufgrund ihrer hohen Stückzahl und der in diesem Segment realisierbaren Energieeinsparpotenziale von bis zu 30 % (siehe Kap. 3.5.1), die Anwendung von AVM in den innerhalb der Automatisierungstechnik genutzten Kleinmotoren ein relevantes Marktpotenzial beinhalten.

5.2 Landwirtschaft

5.2.1 Wasserbedarf und Preis des Wassers

Der durchschnittliche Zusatzwasserbedarf von Getreide beträgt in Deutschland pro Anbauperiode beispielsweise 0-900 m³/ha. Rüben (600-1600 m³/ha), Kartoffeln (600-1200 m³/ha) und Tomaten (600-1200 m³/ha) benötigen, abhängig von der Bodenbeschaffenheit mindestens 60 mm an Zusatzwasser^{240,241}.

²⁴⁰ Bramm, A.: Beregnung. In: Hydro Agri Dülmen GmbH: Faustzahlen für Landwirtschaft und Gartenbau. Landwirtschaftsverlag GmbH, Bochum, 1993, 12. Auflage, S. 520-530.

Für die Entnahme des Wassers für Bewässerungszwecke ist in vielen Regionen ein Entnahmeentgelt zu zahlen. Im Gesetz über die Erhebung eines Grundwasserentnahmeentgelts des Saarlandes ist hierfür ein sehr niedriger Satz vorgesehen. Zum Zweck der Bewässerung land- und forstwirtschaftlicher Nutzflächen beträgt dieser gerade einmal $0,006 \text{ €/m}^3$ ²⁴².

Msangi und Howitt²⁴³ spielen in einer Arbeit über ökonomische Externalitäten am Beispiel eines kalifornischen Distrikts verschiedene Möglichkeiten der Regulierung des Grundwasserverbrauchs durch: „The second policy considered is the imposition of a per-unit-volume groundwater pumping tax on the downslope player, for any quantity in excess of the historical average of pumping, prior to the operation of the water market. The pump tax is fixed at an amount that is roughly 3 times the normal pumping cost at the initial depth to water ($\$1.50$ per acre-foot). Damit würde das „historische Niveau“ kostenlos zur Verfügung gestellt. Darüber hinaus benötigtes Wasser würde mit ca. $4,5 \text{ \$}$ pro acre-foot zu Buche schlagen. Nun sind ein acre-foot 1233 m^3 , so dass sich Kosten von $0,0026 \text{ €}$ pro m^3 ergäben, ein für ein unter hoher Trockenheit leidendes Land wie Kalifornien kaum vorstellbar niedriger Wert.

Historisch sind auch in Kalifornien schon höhere Preise für Grundwasser zu Bewässerungszwecken erhoben worden. O'Mara²⁴⁴ berichtet aus den 80er Jahren über drei kalifornische Distrikte: „When it also became clear that control over groundwater pumping was required, a pumping tax was imposed. In 1983, this tax was $\$54$ per acre-foot to municipal and industrial users and $\$13.50$ per acre-foot to agricultural users.“ In den beiden anderen Distrikten lagen die Werte zwischen $0,006$ und $0,0088 \text{ €/m}^3$.

Spielt man auf Basis von Wasserkosten von $0,006 \text{ €/m}^3$ sowie des oben angegebenen Wasserbedarfs für Getreide von maximal $900 \text{ m}^3/\text{ha}$ einmal die Kostenbelastung der Getreideproduktion durch Wasserentnahmeentgelt durch, dann ergeben sich gerade einmal $5,4 \text{ €}$ pro ha. Der Wert des Ertrags von Winterweizen (s.o.) beträgt ca. 1.500 €/ha , schon die Kosten für Getreidetrocknung mit 35 €/ha und Hagelschlagversicherung mit 28 €/ha liegen mehrfach höher. Ein Lenkungseffekt kann von einem solchen Preis nicht erwartet wer-

²⁴¹ 1 mm Wassersäule entspricht auf die Fläche bezogen 10 m^3 pro Hektar

²⁴² Für Betriebe mit einem Umweltmanagementsystem nach EMAS (Eco-Management and Audit Scheme, freiwilliges europäische Umweltmanagement- und Umweltbetriebsprüfungssystem) und ISO 14 001 (Anforderungen an Umweltmanagementsysteme) ermäßigt sich das Entgelt auf $0,005 \text{ €/m}^3$

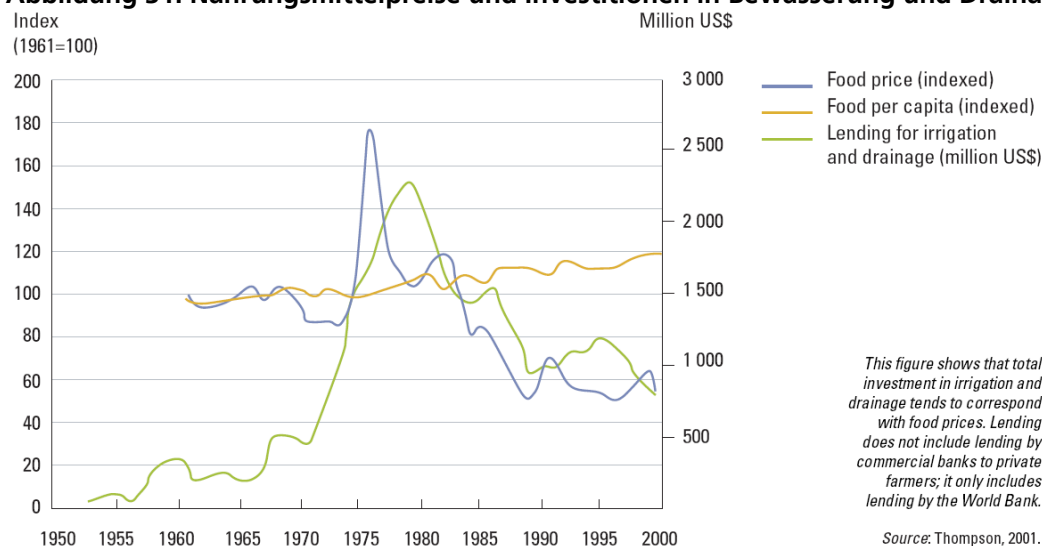
²⁴³ Msangi, S.; Howitt, R.E.: Third Party Effects and Asymmetric Externalities in Groundwater Extraction: The Case of Cherokee Strip in Butte County, California, International Association of Agricultural Economists Conference, Gold Coast, Australia, 12.-18.August, 2006

²⁴⁴ O'Mara, G.T.: Issues in the Efficient Use of Surface and Groundwater in Irrigation, World Bank Staff Working Papers, Number 707, 1984

den. Erst wenn das Wasserentnahmeentgelt mindestens verzehnfacht würde, kann realistisch von einer Reaktion der Landwirtschaft ausgegangen werden.

Ein weiterer, den Preis steigernder Effekt liegt natürlich auch im absoluten Wasserbedarf. Je höher die absolute Wassermenge, die für eine bestimmte Kultur benötigt wird, desto höher die Kosten für Pumpe und Wasserentnahmeentgelt. Eine weitere Variable liegt in der Frage, aus welcher Tiefe das Wasser an die Oberfläche gepumpt werden muss. Letztlich dürften aber die Kosten für Energie und Wasser nicht die entscheidenden sein.

Abbildung 31: Nahrungsmittelpreise und Investitionen in Bewässerung und Drainage



Anders sieht die Rechnung aus, wenn die Wasserverfügbarkeit begrenzt ist. Gesetzt den Fall, der Landwirt hat eine bestimmte Menge Wasser zur Verfügung und nun die Wahl zwischen einer Standard-Bewässerungstechnologie und einer, die 15% effizienter ist, dann kann er entweder auf 10 oder auf 11,5 ha Getreide anbauen. Der Zusatzertrag betrüge ca. 2.250 €, bezogen auf den ha immer noch 225 €.

Es wird damit klar, dass Investitionen in Bewässerung eher vom Marktwert der verkauften Produkte abhängen als vom Preis des Wassers. Dies macht auch die FAO²⁴⁵ deutlich (Abbildung 31). Es ist zu erkennen, dass die Kredite für Bewässerungsanlagen dem Nahrungsmittelpreis mit ein bis zwei Jahren Verzögerung folgen.

²⁴⁵ FAO (Food and Agriculture Organisation): The use of water in agriculture, 2004, <ftp://ftp.fao.org/agl/aglw/docs/agricfoodwater.pdf> (06.10.08)

5.2.2 Investitionskosten für Bewässerungstechnik

Die FAO kommentiert die Investitionen in Bewässerungstechnik wie folgt²⁴⁶:

In many developing countries, investments in irrigated infrastructures have represented a significant share of the overall agricultural budget during the second half of the twentieth century. The unit cost of irrigation development varies with countries and types of irrigated infrastructures, ranging typically from US \$ 1.000 to US \$ 10.000 per hectare, with extreme cases reaching US\$ 25.000 per hectare (these costs do not include the cost of water storage as the cost of dam construction varies on a case-by-case basis). The lowest investment costs in irrigation are in Asia, which has the bulk of irrigation and where scale economies are possible. The most expensive irrigation schemes are found in sub-Saharan Africa, where irrigation systems are usually smaller and developing land and water resources is costly.

In the future, the estimates of expansion in land under irrigation will represent an annual investment of about US\$ 5 billion, but most investment in irrigation, between US\$ 10 and 12 billion per year, will certainly come from the needed rehabilitation and modernization of aging irrigated schemes built during the years 1960-1980. Typically, investment figures in irrigation do not include that part of the investment provided by the farmer in land improvement and on-farm irrigation that can represent up to 50 percent of the overall investment. In total, it is estimated that annual investment in irrigated agriculture will therefore range between US\$ 25 and 30 billion, about 15 percent of annual expected investments in the water sector.

Sourell²⁴⁷ dokumentiert Anschaffungspreise, die eher im unteren Bereich der von der FAO benannten Spanne liegen. Für Kreisberechnungsmaschinen gibt er zwischen 1.875 €/ha (Radius 208 m) und 850 €/ha (Radius 526 m) an, für Linearberechnungsmaschinen 1.320 €/ha (Länge 400 m).

In diesem Kontext ist wichtig zu wissen, dass zumindest innerhalb der EU die oben genannten Investitionskosten für Bewässerungssysteme zu einem hohen Anteil subventioniert wurden. Dieses Subventionssystem geht allerdings zu Ende. Die neue Wasserrahmenrichtlinie der EU (EU-WRRRL) sieht vor, dass solche Kosten internalisiert werden müssen. Nach ihr sind alle Umwelt- und Ressourcenkosten (hier werden auch Investitionen in Bewässerungssysteme zugeordnet) bis 2010 in die kostendeckende Wasserpreisgestaltung der EU-Mitgliedsstaaten zu integrieren. Die EU begründet diese Vorschrift umweltökonomisch indem sie darauf setzt, dass wenn „die Preise die ökologische Wahrheit sagen“ auch

²⁴⁶ FAO (Food and Agriculture Organisation): The use of water in agriculture, 2004, <ftp://ftp.fao.org/agl/aglw/docs/agricfoodwater.pdf> (06.10.08)

²⁴⁷ Demmel, M.: Bewässerung – Eine Strategie zur Verstetigung von Menge und Qualität im Kartoffelanbau und der Kartoffelvermarktung. Vortrag aus der 37. Woche der bayerischen Erzeugergemeinschaften Haus der bayerischen Landwirtschaft in Herrsching am 19. November 2007

Fehlallokationen vermieden werden. Konkret wird dies bedeuten, dass besonders die hoch subventionierten Bewässerungssysteme in Spanien sich sukzessive selbst tragen müssen und damit eine Reihe intensiv bewässerter Agrarprodukte aus Spanien deutlich teurer werden dürften²⁴⁸.

Kosten der Bewässerungstechnologie vergleichen Thörmann und Sourell²⁴⁹. Mit einem Fokus auf Anlagen, die zwischen 16 und 87 ha bewässern können, geben sie Kostenspannen an:

Tabelle 39: Kosten verschiedener Beregnungsverfahren

System	Flächenleistung in ha	Gesamtkosten in € / ha*a	Davon Wasserkosten (€/ha* a)	Davon Energiekosten (€/ha*a)
Mobile Beregnungsmaschine mit Regner	22	220	5	95
	39	230	5	105
Mobile Beregnungsmaschine mit Düsenwagen	22	240	5	75
	37	310	5	60
Kreisberegnungsmaschine	16	280	5	28
	87	160	5	45
Linearberegnungsmaschine	22	330	5	30
	55	270	5	50

Mit Blick auf Precision Agriculture sind hier besonders die Kreis- und die Linearberegnung von Interesse, da in diesen beiden Technologien die Zuordnung von Position und Wassermenge am ehesten möglich scheint. Bei beiden Technologien liegen die mengenabhängigen Kosten für Wasser und (Pump-)Energie zwischen 33 und 55 €/ha*a, im folgenden wird ein Mittel von $40 + 5 = 45$ €/ha*a veranschlagt.

²⁴⁸ Messner, F.: Die Bedeutung von Umwelt- und Ressourcenkosten aus umweltökonomischer Sicht am Beispiel der Flussauen. In: D. Petry et al.: Die Relevanz der EU-Wasserrahmenrichtlinie für den Naturschutz in Auen, 2002, Leipzig, S. 75 – 85

²⁴⁹ Thörmann, H.-H.; Sourell, H.: Kosten verschiedener Beregnungsverfahren. Vortrag auf der DLG Fachtagung Feldberegnung 2007, www.dlg.org/de/landwirtschaft/fachgremien/feldberegnung/fachtagung07.html

Tabelle 40: Kosteneffekte verschiedener kostensenkender Wirkungen des AVM-Einsatzes

Wirkungsprinzip	Kostenbasis pro Jahr ²⁵⁰	Kosteneffekt
Reduktion des Wasserverbrauchs durch verbesserte Effizienz über das sonst durch Präzisionsbewässerung hinaus Erreichbare um 15%.	Verbrauch 900 m ³ /ha, Kosten der (Pump-)Energie von ca. 40 €/ha, Wasserentnahmeentgelt 5 €/ha, zusammen 45 €/ha	6,75 €/ha* a
Ertragssteigerung durch noch bessere Vermeidung zu trockener oder zu feuchter Zustände um 2%.	Ertrag Winterweizen 70 dt zu 22 €/dt ergibt pro ha 1.540 €	30,8 €/ha* a
Ertragssteigerung durch die Ermöglichung zusätzlicher Anbaufläche bei begrenzter, absoluter Wasserverfügbarkeit. Wird durch die AVM-Steuerung der Wasserverbrauch um zusätzliche 15% reduziert, ermöglicht dies die Bewirtschaftung von zusätzlichen 15% Fläche.	Ertrag Winterweizen 70 dt zu 22 €/dt ergibt pro ha 1.540 €	231 €/ha* a

In der Zusammenschau ergibt sich ein differenziertes Bild möglicher Kostenwirkungen einer Verbesserung der Effizienz von Bewässerungssystemen durch AVM.

Es wird transparent, dass die Finanzierbarkeit einer zusätzlichen Effizienztechnologie bei gegenwärtigen Wasserentnahmepreisen ausschließlich durch die Produktseite bestimmt wird. Selbst bei Verzehnfachung des Wasserentnahmeentgelts wäre dieses ökonomisch immer noch quasi bedeutungslos. Und auch eine weitere Verdoppelung der Energiepreise (hier nur bezogen auf die Bewässerung) würde die Gesamtkosten der landwirtschaftlichen Produktion nur wenig erhöhen.

Auf der Produktseite wiederum sind die durch Wassereffizienz zusätzlich erzielbaren Einnahmen besonders dann groß, wenn die absolute Wassermenge begrenzt ist und durch Effizienzgewinne die Produktion ausgeweitet werden kann. Dass sich genau dann teure Bewässerungssystem rechnen geht auch aus den Zahlen der FAO²⁵¹ hervor, wenn sie Höchstwerte der Investitionskosten von 10.000 \$ bis 25.000 \$ pro ha dokumentiert. In Regionen, in denen solch aufwendige Systeme installiert und finanziert werden, sind vermutlich zusätzliche Kosten in Höhe von bis zu 1.000 \$/ha denkbar wenn es damit gelingt, den Wasserverbrauch durch höhere Effizienz nachweisbar weiter abzusinken.

Allein in den europäischen Staaten Portugal, Spanien, Italien, Griechenland sowie in der Türkei wird ein Absinken der Wasserverfügbarkeit bis 2030 über 25% erwartet. Im mittleren Westen der USA sinken die Grundwasserstände

²⁵⁰ dt:Dezitonne (100 kg)

²⁵¹ FAO (Food and Agriculture Organisation): The use of water in agriculture, 2004, <ftp://ftp.fao.org/agl/aglw/docs/agricfoodwater.pdf> (06.10.08)

jährlich um bis zu einen Meter. Letztlich ist damit zu rechnen, dass überall dort, wo bewässert wird, die Wasserressourcen in wenigen Jahren oder bestenfalls Jahrzehnten extrem knapp werden. Damit aber wird ein Impuls nicht vom Markt, sondern eher zunächst von der absoluten Wasserknappheit und danach u.U. vom Gesetzgeber ausgehen. Dieser kann handeln, in dem er:

- technische Richtlinien beschließt, die bestimmte Technologien vorschreiben oder
- ökonomische Instrumente einsetzt, die die Anwendung effizienter Technologien besonders attraktiv machen.

Mit Blick auf die in der Tabelle oben genannten Kosteneffekte pro Hektar und Jahr wird veranschlagt, dass eine AVM-Technologie mit dem (noch nachzuweisenden) Effizienzeffekt den flächenspezifischen Wasserverbrauch um ca. 15% zu reduzieren, Kosten von 100 €/ha * a verursachen darf, um sich am Markt durchzusetzen.

5.2.3 Abschätzung des Marktvolumens für Messtechnik in der Präzisionsbewässerung

Der Markt für die Anwendung von Bodensensoren wird vor diesem Hintergrund wie folgt abgeschätzt:

- Ausgangspunkt ist die bewässerte Landwirtschaftsfläche,
- die zusätzlichen Systemkosten für Bodenfeuchtesensoren werden auf 100 €/ha*a veranschlagt,
- die für Bewässerung mit Precision Irrigation zugängliche Fläche wird unter Zugrundelegung der Zahlen aus der Expertenbefragung mit steigenden Flächenanteilen angenommen.

Damit ergeben sich folgende Marktvolumina für 2015 und 2020:

Tabelle 41: Marktvolumina für Bodenfeuchtesensoren

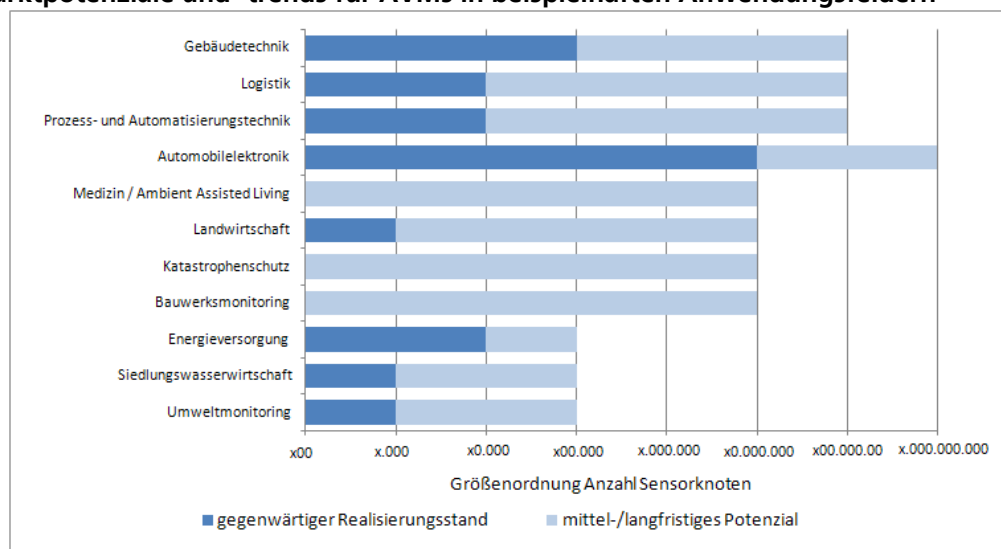
Region	Bewässerungsfläche in Mio ha	Systemkosten pro ha in €	Flächenanteil AVM 2015 in %	Marktvolumen 2015 in Mio €	Flächenanteil AVM 2020 in %	Marktvolumen 2020 in Mio €
Deutschland	0,5	100	20	10	30	15
EU 27	11,5	100	15	172	25	290
USA	21	100	35	735	50	1.050
Rest der Welt	250	100	3	740	8	1.970
Summe ca.	280			1.657		3.325

5.3 Zusammenfassung Marktpotenziale

Unter Abwägung der möglichen Einsatzzwecke und Einsatzbarrieren lässt sich für die in Kapitel 1.4 skizzierten Anwendungsfelder das weitere mittel- bis langfristige Marktpotenzial grob in Größenordnungen abschätzen. Für bestimmte Anwendungen, die heute bereits realisiert sind, wie z.B. das Umweltmonitoring, ist das Wachstumspotenzial nur mäßig, weil z.B. Forschungsanwendungen absehbar der wesentliche Einsatzbereich sind. Dagegen ist für die Gebäudetechnik oder den Automobilbereich davon auszugehen, dass mittelfristig jedes Fahrzeug, bzw. jedes Gebäude in industrialisierten Ländern mit zahlreichen drahtlosen Sensorknoten ausgerüstet sein wird – und somit jeweils eine Größenordnung von mehreren hundert Millionen Sensorknoten weltweit realistisch ist.

Diese Einschätzungen decken sich auch weitgehend mit Marktstudien²⁵².

Abbildung 32: Marktpotenziale und -trends für AVMs in beispielhaften Anwendungsfeldern



²⁵² z.B.: ON World: WSN for Smart Industries, September 2007

6 Umweltauswirkungen

Bei der Bewertung der Auswirkungen von AVMs auf die Umwelt sind zwei Perspektiven zu unterscheiden:

- direkte Umweltauswirkungen durch die AVM-Komponenten, d.h. deren Herstellung, Energie und ggf. Medienverbrauch in der Nutzung sowie die Entsorgung
- indirekte Umweltauswirkungen, die sich aus dem Einsatzzweck des AVM-Netzwerks ergeben

Je nach Anwendungsfall können die indirekten Umweltauswirkungen die direkten Auswirkungen aufwiegen. Insbesondere bei den Beispielanwendungen Landwirtschaft und Prozess- und Automatisierungstechnik ist eine positive Umweltbilanz zu erwarten.

6.1 Direkte Umweltauswirkungen

6.1.1 Herstellung und Materialien

Für die direkten Umweltauswirkungen der Herstellung, sind insbesondere der Bedarf an prozessiertem Silizium und Leiterplattenmaterial ausschlaggebend, sowie spezifische Materialverbräuche der unterschiedlichen Energieversorgungsoptionen. Die relevanten Eckdaten für die Bewertung der direkten Umweltauswirkungen sind zusammengefasst in Anhang 9.2. Darüberhinaus sind ggf. Massenmaterialien für Gehäuse, Verkapselungen, Messlanzen o.ä. relevant, aber nicht verallgemeinerbar quantifizierbar. Mit der Fokussierung auf die aufgeführten Schlüsselparameter sind folglich ausreichend genaue Abschätzungen möglich.

6.1.1.1 Ressourcenverbrauch

Der Ressourcenverbrauch für AVM resultiert insbesondere aus den Materialien für einzelne Schlüsselkomponenten und –technologien. Potenziell gehören dazu Mikrobrennstoffzellen und langfristig ggf. auch neue Solarzellentechnologien zur Energieversorgung von AVM:

Mikrobrennstoffzellen enthalten Edelmetalle als Elektrodenmaterial bzw. Katalysator, üblicherweise Platin. Die in Anhang 9.2 aufgeführten Eckdaten beruhen auf Gold. Darüberhinaus gibt es auch Konzepte, den Wasserstoffspeicher bei Chip-integrierten Mikrobrennstoffzellen in Palladium auszuführen. Auch bei

dieser Variante ist der Edelmetallgehalt erheblich mit mindestens 25 mg Palladium pro Zelle²⁵³.

Edelmetalle finden häufig bei innovativen Technologien Verwendung, so auch z.B. bei sogenannten Farbstoffsolarzellen, die auf nanokristallinesinteren Halbleitern beruhen, und derzeit einen solaren Wirkungsgrad von 8% aufweisen. Aufgrund der potenziell einfacheren Herstellung im Siebdruckverfahren können mit dieser Technologie mittelfristig low-cost-Solarzellen u.a. für autonome verteilte Mikrosysteme hergestellt werden, jedoch sind Silber, Platin und Ruthenium enthalten²⁵⁴.

Ein typischer Mikrocontroller als Schlüsselkomponente eines AVMs hat beispielhaft die in Tabelle 42 dargestellten besonders relevanten Inhaltsstoffe²⁵⁵. Die enthaltenen Edelmetalle sind in jedem Falle nachrangig im Vergleich zum Edelmetallgehalt einer Brennstoffzellen-basierten Energieversorgung für AVM-Komponenten.

Tabelle 42: Relevante Materialien Mikrocontroller für AVM-Anwendungen

Material	Menge je Mikrocontroller
Gold	0,9 mg
Indium	0,000025 mg
Palladium	0,3 mg
Silber	0,42 mg

Insbesondere die prognostizierten Wachstumsraten für drahtlose Sensornetze erfordern ein frühzeitiges Monitoring möglicher Ressourceneffekte bei bestimmten kritischen Materialien. In Tabelle 43 sind die wesentlichen Materialien aufgeführt, die für AVMs relevant sind und zugleich bei massenhafter Verbreitung ressourcenseitig problematisch werden können. Mittelfristige technologische Entwicklungen sollten auf eine Minimierung des Einsatzes dieser Materialien oder deren Ersatz durch weniger kritische Materialien abzielen. Außer den in der Tabelle gelisteten Materialien beruhen insbesondere verschiedene Sensoren und Energy Harvesting Komponenten auf sehr spezifischen Materialien (Bismut, Antimon, ...), die bislang von geringem wirtschaftlichem Interesse sind und daher nur in geringen Mengen gefördert werden. Auch sind für viele

²⁵³ 4 x 4 mm² Fläche, 80 µm Pd-gefüllte Kavität, siehe u.a.: Frank, M.; Erdler, G.; Frerichs, H.-P., Müller, C.; Reinecke, H.: Chip integrated fuel cell accumulator, *Journal of Power Sources* 181 (2008), S. 371–377

²⁵⁴ Heubach, D.: Einbeziehung von Umweltschutzanforderungen in Innovationsprozesse der Solarwirtschaft am Beispiel des Verbundprojekts »ColorSol@«, Expertenworkshop nova-net - Entstehungspfade von Nachhaltigkeitsinnovationen, 13. Februar 2007, Berlin

²⁵⁵ Mikrocontroller MSP430F5437IPN von Texas Instruments, Komponenten der MSP430-Familie wurden auch von GE im Projekt „Distributed Wireless Multi-Sensor Technologies“ als Vorzugsvariante ausgewählt

dieser Materialien bislang keine relevanten Auswirkungen auf Mensch und Umwelt bekannt.

Tantal ist aufgrund seines Vorkommens in Bürgerkriegsregionen ein kritisches Material²⁵⁶: Der weltweite Markt für Tantalkondensatoren beläuft sich derzeit auf rund 6 Milliarden Stück pro Jahr²⁵⁷. Da sich Tantalkondensatoren durch besonders hohe Energiedichten im Vergleich zu anderen Kondensatortypen auszeichnen, bieten sie sich in miniaturisierter Bauform insbesondere für AVM-Anwendungen an, die unter besonderen Volumenrestriktionen stehen. Bei einem prognostizierten AVM-Markt im Bereich mehrerer 100 Millionen Stück mittelfristig kann der Trend zu AVM-Anwendungen erheblich zu einem gesteigerten Bedarf in der Größenordnung von 10% des Weltmarkts beitragen.

Tabelle 43: Kritische Materialien für AVM-Komponenten

Substanz	Einsatz	Nachhaltigkeitsaspekte
Tantal	Tantal-Kondensatoren: Maximale Kapazität bei minimaler Komponentengröße, daher bei hohem Miniaturisierungsbedarf ggf. unabdingbar für minimale Systemgröße	Förderung in Bürgerkriegsgebieten (Kongo); deutlicher Anstieg des Ressourcenverbrauchs in miniaturisierten Elektronikanwendungen prognostiziert ²⁵⁸ ; kein Recycling bei üblicher Elektronikschrottbehandlung
Niob	Niob-Kondensatoren: Teils als Ersatz für Tantal-Kondensatoren geeignet	gemeinsames Vorkommen mit Tantal; kein Recyclingprozess verfügbar
Cadmium	CdTe-Solarzellen	toxisches Schwermetall, aber siehe positive Gesamtbilanz im Vergleich zu Si-basierten Solarzellen
Tellur	CdTe-Solarzellen; Bi ₂ Te ₃ in Thermoelementen	begrenzte Ressourcen; Nutzungskonkurrenz zu Anwendungen von Thermoelektrischen Generatoren in nicht-AVM-Anwendungen absehbar
Indium	Solarzellen (durchsichtige leitfähige Schichten), Photodioden	begrenzte Ressourcen, Nutzungskonkurrenz zu Anwendungen für LCD Panels (erheblicher Anstieg des Ressourcenverbrauchs prognostiziert ²⁵⁹)

²⁵⁶ Siehe z.B.: Seefeldt, K.: Tantalusqualen beim Kauf eines Mobiltelefons? Was der weltweite Handy-Boom mit dem Metall Tantal und den Rebellenregionen in der Demokratischen Republik Kongo zu tun hat, 7.April 2001, heise-online, <http://www.heise.de/tp/r4/artikel/7/7318/1.html>

²⁵⁷ Roos, G.: Expect mixed prices, slow growth for tantalum capacitors, Reed Business Information, purchasing.com, 15.November 2007

²⁵⁸ Angerer, G.; Marscheider-Weidemann, F.; Lüllmann, A.; Erdmann, L.; Scharp, M.; Handke, V.; Marwede, M.: Rohstoffe für Zukunftstechnologien – Einfluss des branchenspezifischen Rohstoffbedarfs in rohstoffintensiven Zukunftstechnologien auf die zukünftige Rohstoffnachfrage, Schlussbericht, 2.Februar 2009, Karlsruhe / Berlin, S. 103ff.

²⁵⁹ Angerer, G.; Marscheider-Weidemann, F.; Lüllmann, A.; Erdmann, L.; Scharp, M.; Handke, V.; Marwede, M.: Rohstoffe für Zukunftstechnologien – Einfluss des branchenspezifischen Rohstoffbedarfs in rohstoffintensiven Zukunftstechnologien auf die zukünftige Rohstoffnachfrage, Schlussbericht, 2.Februar 2009, Karlsruhe / Berlin, S. 82ff.

Substanz	Einsatz	Nachhaltigkeitsaspekte
Neodym	Magnetmaterial (Nd ₂ Fe ₁₄ B) für elektromagnetische Mikrogeneratoren ²⁶⁰	kein Recyclingprozess verfügbar
Silber	RF Antennen (beste elektrische Leitfähigkeit aller Elemente), Legierungsmetall für bleifreie Lote (SnCuAg), Farbstoffsolarzelle	großer „ökologischer Fußabdruck“; bei massenhafter Anwendung für (aktive/passive) RFIDs erheblicher Beitrag zum weltweiten Silberbedarf ^{261,262}
Gold	Bonddrähte, Oberflächenfinish, Mikrobrennstoffzellen	großer „ökologischer Fußabdruck“
Platin	Mikrobrennstoffzellen, Farbstoffsolarzelle	großer „ökologischer Fußabdruck“
Palladium	Mikrobrennstoffzellen, Keramikkondensatoren	großer „ökologischer Fußabdruck“
Ruthenium	Farbstoffsolarzelle	großer „ökologischer Fußabdruck“
Kobalt	LiCoO ₂ in wiederaufladbaren Batterien	Selten, strategisch relevant (Hauptförderland: Kongo), gesundheitsschädlich
Blei	Lotmaterial (ausgenommen vom Stoffverbot für bestimmte Anwendungen, denen AVMs üblicherweise zuzuordnen sind)	toxisches Schwermetall
Beryllium	Kupferlegierungen	giftig und karzinogen

Abbildung 33 zeigt die rechnerischen, statischen Reichweiten von Metallen auf, die in der Elektronik – aber auch anderen Bereichen - zur Anwendung kommen. Dargestellt sind die Reichweiten sowohl für die Reserven als auch die Ressourcen. Ressourcen sind diejenigen Mengen eines Rohstoffs, die zwar nachgewiesen sind, deren Extraktion jedoch gegenwärtig wirtschaftlich oder technologisch noch nicht angezeigt oder möglich sein muss. Die Reserven bilden jene Teilmenge der Ressourcen, die gegenwärtig bereits wirtschaftlich gewinnbar ist.²⁶³ Die Daten basieren etwa auf dem Stand 2005.

Betrachtet man eine **Ressourcenreichweite** von 100 Jahren oder weniger als kritisch, so ist insbesondere die Verfügbarkeit von Tantal, Indium, Germanium, Antimon, Silber, Gold, Zinn und Nickel sehr begrenzt. Ein erheblicher Beitrag von AVMs zur Ressourcenverknappung ist insbesondere für **Tantal** und **Silber**

²⁶⁰ Siehe z.B. Torah, R.N.; Tudor, M.J.; Patel, K.; Garcia, I.N.; Beeby, S.P.: Autonomous Low Power Microsystem Powered by Vibration Energy Harvesting, IEEE SENSORS 2007 Conference

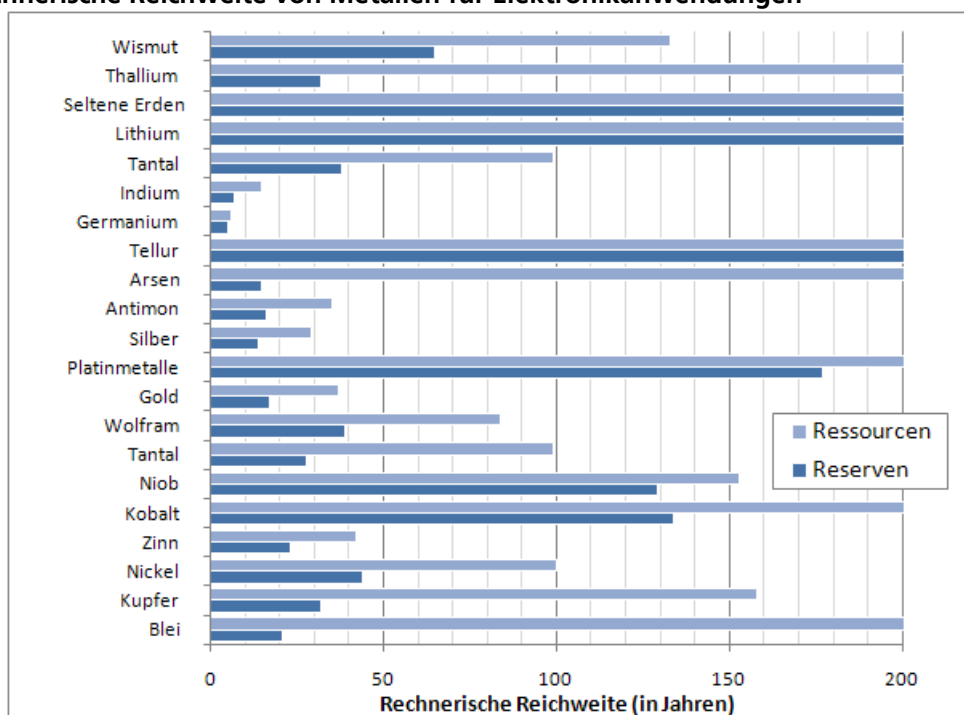
²⁶¹ Schischke, K.; Pötter, H.; Zuber, K. H.; Middendorf, A.; Griese, H: Environmental Challenges of Future ICT Trends –Creating a Green Backbone for the Information Society, Side event „Sustainability in the Information Society“ at the World Summit on the Information Society, 10. Dezember, 2003, Genf

²⁶² Angerer, G.; Marscheider-Weidemann, F.; Lüllmann, A.; Erdmann, L.; Scharp, M.; Handke, V.; Marwede, M.: Rohstoffe für Zukunftstechnologien – Einfluss des branchenspezifischen Rohstoffbedarfs in rohstoffintensiven Zukunftstechnologien auf die zukünftige Rohstoffnachfrage, Schlussbericht, 2. Februar 2009, Karlsruhe / Berlin, S. 69ff.

²⁶³ Darstellung basiert auf Zusammenstellung in: Frondel, M.; Grösche, P.; Huchtemann, D.; Oberheitmann, A.; Peters, J.; Angerer, G.; Sartorius, C.; Buchholz, P.; Röhling, S.; Wagner, M.: Trends der Angebots- und Nachfragesituation bei mineralischen Rohstoffen, Endbericht, 2007, Essen/Karlsruhe/Hannover, S.

absehbar, gegebenenfalls auch Gold. Bei den weiteren kritischen Metallen ist davon auszugehen, dass der Beitrag von AVMs zur Ressourcenverknappung gegenüber anderen Einsatzzwecken vernachlässigbar ist – jedoch ist in jedem Falle die Nutzungskonkurrenz zu beachten.

Abbildung 33: Rechnerische Reichweite von Metallen für Elektronikanwendungen



Eine grobe Abschätzung des Verbrauchs bestimmter kritischer Materialien ist in Tabelle 44 aufgelistet, basierend auf exemplarischen Daten für Energy Harvesting Technologien²⁶⁴ (ein beispielhaftes Anwendungsszenario liegt der Dimensionierung der Energieversorgung zugrunde), der typischen Zusammensetzung von ICs, sowie Antennen basierend auf Silberlotpasten²⁶⁵. Die Hochrechnung basiert auf dem mittel- bis langfristig erwarteten Marktvolumen von

²⁶⁴ Benecke, S.; Nissen, N.F.; Reichl, H.: Environmental Comparison of Energy Scavenging Technologies for Self-Sufficient Micro System Applications, 2009 ISSST International Symposium on Sustainable Systems and Technology, 18.-20.Mai 2009, Phoenix, Arizona

²⁶⁵ Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration, Hueck-Foils, Motorola & Zeiler: Analysis Methods and First Results of Si-based Transponders. PolyApply IST-IP-507143, WP D5.1.1 final, 2006

500 Mio. Sensorknoten weltweit, sowie groben Annahmen der Marktanteile für einzelne Energieversorgungskonzepte²⁶⁶.

Tabelle 44: Ressourcenverbrauch für 500 Mio. Sensorknoten (überschlägige Abschätzung)

	Schlüsselmetall	m (g/Einheit)	Annahme Marktanteil (langfristig)	Ressourcenverbrauch bei 500 Mio. Sensorknoten pro Jahr (t)	gegenwärtige Förderung (t)	Vergleich langfristiger Bedarf zu gegenwärtiger Förderung
Energieversorgung						
Primärbatterie	Li	6,45	40%	1290	20200	6,4%
amorphe Si-Solarzelle	Ag	0,059	30%	8,85	19700	0,04%
thermoelektrischer Wandler	Bi	0,0001	10%	0,005	5100	0,0001%
	Te	0,0001	10%	0,005	100	0,01%
induktiver Wandler	Nd	1,713	10%	85,65	7273	1,2%
	W	4,469	10%	223,45	73700	1,0%
piezoelektrischer Wandler	W	9,899	10%	494,96		
	Zr	0,016	10%	0,818	920000	0,0001%
Mikroelektronik						
2 ICs	Au	0,0018	100%	0,9	2430	0,04%
	In	0,000000025	100%	0,0000125	405	0,000003%
Antenne						
	Ag	0,031	10%	1,55	19700	0,01%
Sensorik / Aktorik						
<i>(sehr individuell auf die Messaufgabe anzupassen)</i>						

Im Ergebnis zeigt sich, dass der massenhafte Einsatz von AVM nicht zu einem erheblich gesteigerten Bedarf bestimmter Schlüsselemente beiträgt, mit einer Ausnahme: Der Bedarf an Lithium für konventionelle Primärbatterien bewegt sich im einstelligen Prozentbereich verglichen mit der gegenwärtigen Förderung. Dieser Anteil ist durchaus als signifikant und kritisch anzusehen – es leitet sich daraus der dringende Bedarf nach Forschung und Entwicklung alternativer Energy Harvesting Technologien ab.

²⁶⁶ Unberücksichtigt bleibt die Vielzahl möglicher Aufbauvarianten bzw. Integrationslevel, ebenso ist lediglich die Materialzusammensetzung der fertigen Komponente berücksichtigt, nicht jedoch herstellungsbedingte Stoffverlust – die je nach Verfahren erheblich sein können.

6.1.1.2 Schadstoffpotenzial

Schadstoffe, insbesondere Schwermetalle, finden sich potenziell in einigen der Systemkomponenten für AVM:

Als potenzielle Schadstoffe sind in AVM-Komponenten **Nickel** in Beschichtungen und **Blei** als Lotmaterial enthalten. Nach der gegenwärtigen Rechtslage fallen die AVM-Komponenten nicht unter die europäische RoHS-Richtlinie, so dass von Gesetzeswegen nicht auf bleihaltige Lote verzichtet werden muss – je nach Anwendungsfall und Rückholbarkeit (siehe Landwirtschaft) ist es ratsam, bleifreie Lote einzusetzen. Bei bestimmten Hochtemperaturanwendungen (Beispiel: Nähe zu Verbrennungsmotoren) werden aus technischen Gründen hochbleihaltige Lote eingesetzt – dies kann auch für AVM-Anwendungen im Einzelfall erforderlich sein.

CdTe-Solarzellen – als eine mögliche Variante zur Energieversorgung von AVM – können aufgrund des **Cadmium**gehalts problematisch in der Umwelt sein, wenn eine geregelte Rückführung in das Recycling nicht gegeben ist. Folglich ist für den Anwendungsfall Landwirtschaft in jedem Fall eine Rückholbarkeit der Solarzellen zu gewährleisten. Herstellungsseitig schneiden CdTe-Solarzellen hinsichtlich der Schwermetall-Emissionen – auch in Bezug auf Cadmium – besser ab, als Silizium-basierte Solarzellen, da diese erheblich mehr Strom in der Herstellung verbrauchen mit den damit einhergehenden höheren Schwermetallemissionen der Kraftwerke²⁶⁷.

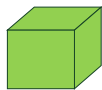




Benecke²⁶⁸ vergleicht mehrere Energieversorgungsoptionen für autarke Sensorknoten hinsichtlich ihrer Umwelteigenschaften (potenzielle Toxizität der Basismaterialien): Für eine exemplarische Anwendung zur Temperaturüberwachung in Innenräumen mit regelmäßiger Messwerterfassung und Datenübertragung (technische Anforderungen: Durchschnittliche Leistung $P' \leq 500 \mu\text{W}$ bei einer Messrate von 1Hz, $U_b = 3 \text{VDC}$, Betriebsdauer: 10 Jahre; siehe Abbildung 34) gibt Benecke folgende Rangliste an (aufsteigende potenzielle Toxizität): Thermoelektrischer Wandler < Solarzelle < Induktiver Wandler < Piezoelektrischer Wandler < Solarzelle mit Speicherkondensator < Primärbatterie. Selbst bei einer Betriebsdauer von lediglich einem Jahr (entsprechend 1 Primärbatterie statt 10) ändert sich an dieser Reihenfolge nichts. Tendenziell lässt sich daraus ableiten, dass Energy Harvesting Technologien verglichen mit „konventionellen“ Energieversorgungskonzepten (Primärbatterien) eher den Einsatz kritischer Materia-

²⁶⁷ Fthenakis, V. M.; Kim, H. C.; Alsema, E.: Emissions from Photovoltaic Life Cycles, Environmental Science & Technology, 2008, 42 (6), S. 2168-2174

²⁶⁸ Benecke, S.; Nissen, N.F.; Reichl, H.: Environmental Comparison of Energy Scavenging Technologies for Self-Sufficient Micro System Applications, 2009 ISSST International Symposium on Sustainable Systems and Technology, 18.-20. Mai 2009, Phoenix, Arizona

lien reduzieren. Nicht im Detail untersucht sind jedoch bislang die Herstellungsprozesse der verschiedenen Energy Harvesting Technologien (s.u.).

Abbildung 34: Technologischer Vergleich unterschiedlicher Energieversorgungsoptionen für ein exemplarisches Anforderungsprofil²⁶⁹

Systembeschreibung	Eingangsgröße	Volumen und Gewicht
Primäre Batterie (Betriebsdauer 10 Jahre) Li-MnO ₂ in zylindrischer Bauform (10x Typ AA)	-	 V=86cm ³ m=214g
Solarzelle Amorphes Silizium auf Glassubstrat	200lux (Fluoreszierende Beleuchtung)	 A=170cm ² m=39g
Thermoelement Mikrotechnisch mit Al-Kühlkörper	T _U =25°C, T _H =67°C, v=0m/s ²	 V=3cm ³ m=2g
Induktiver Wandler Makrotechnisch, Biegebalken mit inertialer Masse und fixierter Mikrospule	f=52Hz, A=0,59m/s ²	 V=1,6cm ³ m=7,3g
Piezoelektrischer Wandler Makrotechnisch, Biegebalken mit PZT-Funktionsschicht und inertialer Masse	f=120Hz, A=2,25m/s ²	 V=1,3cm ³ m=11g

6.1.1.3 Fertigung

Die Chip-Fläche eines typischen Mikrocontrollers beträgt zwischen 0,15 und 0,5 cm² (siehe Ausführungen zu ASICs unter 4.1.1.3), entsprechend einem Primärenergieverbrauch von 5-17 MJ, 150-500 g CO₂-eq. Treibhauspotenzial und einem Wasserverbrauch von 1,5-5 Litern. Eine weitere Halbleiter-Schlüsselkomponente ist der Funktransceiver, der eine ähnliche Siliziumfläche aufweist wie der Mikrocontroller.

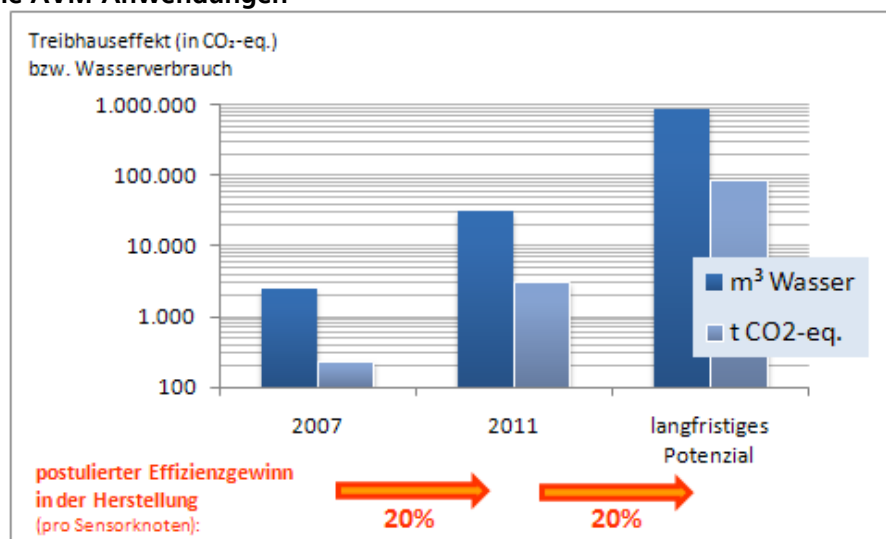
Hochgerechnet auf aktuelle Marktzahlen und Prognosen, sowie das weltweite Gesamtpotenzial für drahtlose Sensornetzwerke im Bereich industrieller Anwendungen, ergibt sich **langfristig** ein zusätzliches Treibhauspotenzial von rund **90.000 t CO₂-eq.** bzw. **900.000 m³ Wasserverbrauch** durch „AVM Fabs“ (siehe Abbildung 35)²⁷⁰. Bis **2011** ist zunächst noch von moderaten zu-

²⁶⁹ Benecke, S.: Energy Harvesting in der Mikrosystemtechnik - Technische Möglichkeiten und Grenzen unter Berücksichtigung nachhaltiger Aspekte, AVT-Seminar, Technische Universität Berlin, Forschungsschwerpunkt Technologien der Mikroperipherik, 6.November 2008, Berlin

²⁷⁰ Abschätzung beruht auf der Anzahl an Sensorknoten für 2007, der Prognose für 2011 sowie dem maximalen Potenzial (Anzahl industrieller Einrichtungen weltweit) entsprechend ON World Inc.: WSN for Smart Industries, September 2007, sowie der Annahme einer 20% (Umwelt-)Effizienzsteigerung von 2007 bis 2011, sowie weiteren 20% für die Realisierung des langfristigen Potenzials.

sätzlichen Umweltauswirkungen der AVM-Halbleiterfertigung von rund **3.000 t CO₂-eq.** bzw. **30.000 m³ Wasserverbrauch** auszugehen. Zum Vergleich: Der gesamte von der Halbleiterindustrie weltweit verursachte Beitrag zum Treibhauseffekt beläuft sich auf rund 100 Mio t CO₂-eq. jährlich²⁷¹. Der massenhafte Einsatz von AVM in industriellen Anwendungen wird folglich langfristig **im Prozentbereich zum von der Halbleiterindustrie bedingten weltweiten Treibhausgasausstoß beitragen.**

Abbildung 35: Hochrechnung des Treibhauseffekts und des Wasserverbrauchs der Chipherstellung für industrielle AVM-Anwendungen



Ein wesentlicher Unsicherheitsfaktor dieser Abschätzung betrifft die Chip-Integration von Sensorik oder Energy Harvesting Technologien: Die Fertigung von Durchflusssensoren in Mikrosystemtechnik benötigt rund die 10-fache Siliziumfläche der Elektronikkomponenten (Beispiel: 1,7 – 3,6 cm² je nach Integrationsvariante), bei zwar deutlich verkürzter Prozesskette (20-25 Einzelprozesse), jedoch langen Prozesszeiten durch z.B. Materialabtrag im Bereich 100-500 nm²⁷². Exemplarische Ökobilanzen für Sensorik oder Energy Harvesting in Mikrosystemtechnik sind bislang nicht verfügbar, so dass erhebliche Unsicherheit hinsichtlich der dadurch herstellungsseitig bedingten Umweltlasten bleibt.

²⁷¹ 34,5 Mio t CO₂-eq. aus den Emissionen von Perfluorkohlenwasserstoffen (PFC, Prognose für 2010); siehe: Bartos, S. C.; Lieberman, D.; Burton, C. S.: Estimating the Impact of Migration to Asian Foundry Production on Attaining the WSC 2010 PFC Reduction Goal, 2004; Treibhauseffekt durch CO₂-Emissionen der Energiebereitstellung für die Halbleiterherstellung beläuft sich auf etwa das 2- bis 3-fache der PFC-verursachten Treibhausgasemissionen, siehe u.a. Texas Instruments: Climate change / 2007 performance, und Intel: 2006 Corporate Responsibility Report; zum Vergleich: 100 Mio t CO₂-eq. entsprechen etwa 1% der gesamten weltweiten Treibhausgas-Emissionen

²⁷² Exemplarisch in: Krusemark, O.; Schischke, K.: MST-Entwurf eines Flussreglers, unveröffentlichtes Arbeitspapier im Projekt Mikro-Netz, Berlin/Hamburg, 2005

Wenn als Worst-Case-Abschätzung die ursprünglich bereits für 2010 prognostizierte Zahl von knapp 500 Mio. Sensorknoten herangezogen wird²⁷³ (Tabelle 45), so ergibt sich ein Herstellungsaufwand von ca. **9,6 PJ Primärenergieverbrauch** und einem Treibhauspotential von **300.000 t CO₂-eq.** für die Elektronik. Der Wasserverbrauch beläuft sich auf rund **3,6 Mio. m³**. Die Komponenten zur Energieversorgung verursachen eine ebenfalls signifikante Umweltlast, jedoch um den Faktor 5 bis 8 geringer als die der Elektronik. Der zusätzliche Bedarf an Edelmetallen für die Brennstoffzelle ist mit **8,5 t Gold** erheblich (Extrem Szenario mit 100% Ausrüstung der Sensorknoten mit Mikrobrennstoffzellen). Zum Vergleich: Die weltweite Produktion beläuft sich derzeit auf 2.500 t Gold und 210 t Platin pro Jahr.

Tabelle 45: Herstellungsbedingte Umweltauswirkungen von AVMs

Komponente	Indikator	Einheit	Annahme	Auswirkung 500 Mio Einheiten
Elektronik				
Halbleiter	Primärenergieverbrauch	34 MJ / cm ² Si	0,25 cm ² Mikrocontroller + 0,25 cm ² Transceiver und andere ICs	8,5 PJ
	Treibhauseffekt	1 kg CO ₂ -eq./cm ² Si		250.000 t CO ₂ -eq.
	Wasserverbrauch	10 L/cm ² Si		2.500.000 m ³
Leiterplatte	Primärenergieverbrauch	0,22 MJ / cm ² Substrat	10 cm ² je Sensorknoten (mäßiger Miniaturisierungsgrad)	1,1 PJ
	Treibhauseffekt	0,01 kg CO ₂ -eq./cm ² Substrat		50.000 t CO ₂ -eq.
	Wasserverbrauch	0,22 L/cm ² Substrat		1.100.000 m ³
Energieversorgung				
Batterie (Alkali AA)	Primärenergieverbrauch	4 MJ / Batterie	Szenario 1: 100% batteriebasiert – 1 Batterie je Sensorknoten	2,0 PJ
	Treibhauseffekt	0,2 kg CO ₂ -eq./Batterie		100.000 t CO ₂ -eq.
Mikrobrennstoffzelle: Edelmetallgehalt	Primärenergieverbrauch	2,4 MJ / µ-BZ	Szenario 2: 100% mikrobrennstoffzellenbasiert – 1 Mikrobrennstoffzelle je Sensorknoten	1,2 PJ
	Treibhauseffekt	0,23 kg CO ₂ -eq./µ-BZ		115.000 t CO ₂ -eq.
	Ressourcenverbrauch (Gold, exemplarisch)	17 mg (Gold) / µ-BZ		8,5 t

²⁷³ Anders, A. (enOcean): Digital Networks for the Future – Wireless Sensors / Actuators / Controls, Juli 2007, Bezug auf: OnWorld Marktbericht vom Februar 2004; später veröffentlichte Marktprognosen gehen von deutlich geringeren Zuwachsraten bis 2010 aus

6.1.2 Nutzungsphase

In der Nutzungsphase ist hinsichtlich der Umweltauswirkungen der Energieverbrauch der Infrastruktur, insbesondere Gateway, Router und ggf. „das Internet“ relevant, da diese Geräte ggf. üblicherweise nicht gleichermaßen energieminiert sind wie die Sensorknoten.

Der Stromverbrauch der IKT-Infrastruktur, d.h. von Rechenzentren, Servern und dem Mobilfunknetz beläuft sich auf rund 12,2 TWh/a und wird bis 2020 auf etwa 15,5 TWh/a ansteigen²⁷⁴ (Tabelle 46). Der Internet-Protokoll-(IP)-basierte Datenverkehr in Westeuropa wird für 2007 mit rund 16,2 ExaByte (d.h. 10^{18}) angegeben, rund ein Siebtel entfällt davon auf Deutschland (2,3 EB). Getrieben wird der zunehmende Datenverkehr insbesondere von Videoanwendungen, die ein erhebliches Datenvolumen ausmachen. AVM sind jedoch gerade aus energetischen Gründen auf minimalen Datenverkehr (Datenreduktion) ausgelegt, so dass der Übergang zum „Internet der Dinge“²⁷⁵ zwar eine dramatische Zunahme verknüpfter Objekte mit sich bringen wird, jedoch der Datenverkehr absehbar bei weitem nicht in gleichem Maße ansteigen wird – gleiches gilt somit auch für den Stromverbrauch der IT-Infrastruktur für das „Internet der Dinge“ bzw. für AVM-basierte Systeme. Je größer die Datenmenge ist, die von AVM-Sensorknoten weitergeleitet werden und internet-basiert abrufbar sind, desto größer wird auch der zusätzliche, anteilige Bedarf an IT-Infrastruktur: Gelegentliche Messung einfacher Parameter (z.B. Bodenfeuchte einmal am Tag) ist für den Stromverbrauch der IT-Infrastruktur irrelevant (sofern eine vorhandene Infrastruktur mitgenutzt werden kann); werden jedoch zur Prozesssteuerung in Echtzeit Daten erhoben und übermittelt, steigt auch die anteilige Beanspruchung der IT-Infrastruktur. Ein wesentlicher Beitrag von AVM zum Energieverbrauch des Internets ist jedoch erst zu erwarten, wenn hochaufgelöste Bilddaten in großer Zahl übertragen werden sollten – eine bislang nicht absehbare Anwendung.

²⁷⁴ Stobbe, L.; Schломann, B.; Friedewald, M.; Georgieff, P.; Leimbach, T.; Nissen, N.F.; Proske, M.: Abschätzung des Energiebedarfs der weiteren Entwicklung der Informationsgesellschaft, Studie des Fraunhofer IZM und des Fraunhofer ISI für das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Abschlussbericht, 12. März 2009, Berlin/Karlsruhe (unveröffentlicht)

²⁷⁵ Bullinger, H.-J.; ten Hompel, M. (Hrsg.): Internet der Dinge, VDI-Buch, 2007

Tabelle 46: Stromverbrauch der IKT-Infrastruktur in Deutschland

		Status 2007	Basisprognose 2020
Rechenzentren	TWh	5,4	6,1
Server	TWh	3,7	6,2
Mobilfunknetz	TWh	3,1	3,2
Summe IKT-Infrastruktur Deutsch- land (ohne Festnetztelefonie)	TWh	12,2	15,5

Batteriebetriebene Sensorknoten erfordern gegebenenfalls den regelmäßigen Austausch der Batterien – mit entsprechendem Abfallaufkommen.

6.1.3 Entsorgung

Sofern AVM als Bestandteile technischer Systeme (maschinen- / anlagenintegriert) eingesetzt werden, kann von einer weitgehend geregelten Entsorgung ausgegangen werden. Aufgrund der Materialzusammensetzung sind AVM-Komponenten auch durchaus werthaltig (Edelmetallgehalt), jedoch ist bei verteilten Komponenten eine gezielte Entnahme von AVMs aus technischen Systemen arbeitsaufwändig und daher in der Regel nicht lohnend. Zum Vergleich der reine Materialwert von Handys – die als besonders werthaltiger Elektronikschrott angesehen werden – beläuft sich auf weniger als 1 Euro für ein Mobiltelefon (100g). Nimmt man einen in etwa vergleichbaren Metallgehalt für AVM-Komponenten an und einen moderaten Miniaturisierungsgrad von 5g Sensorknotengewicht, so beläuft sich der Materialwert eines Sensorknotens im Bereich einiger Euro-Cents; ein manuelles „Einsammeln“ von AVM-Komponenten wird so schnell unökonomisch, so dass von einem weitgehenden Verlust der enthaltenen Materialien auszugehen ist (z.B. als Verunreinigung von Stahlfractionen). Lediglich wenn system- und einsatzbedingt eine Sammlung von AVM weitgehend automatisch erfolgt (z.B. Ausieben am Ende eine Prozesskolonne), erscheint eine wirtschaftliche Separierung der Sensorknoten für ein hochwertiges Recycling möglich, oder wenn eine Separierung ohnehin zu erfolgen hat (Beispiel Medizintechnik, Einschränkung für implantierte Sensorik²⁷⁶).

Die wesentliche Umweltbelastung, die aus der mangelhaften Möglichkeit zu getrenntem Recycling resultiert, ist folglich der **Verlust an Materialien mit großem „ökologischen Rucksack“**, sprich den Edelmetallen.

²⁷⁶ Siehe zum Vergleich die Quecksilberbelastung durch Krematorien, bedingt durch Amalgam-Zahnfüllungen

Ein weiterer Aspekt ist die **Kontaminierung von Materialfraktionen** mit Fremdstoffen (AVM-Komponenten), so dass deren Recycling behindert wird. Beispiele sind Bauwerksmonitoring und die Überwachung von Abwasserkanälen, wenn Sensorknoten direkt in den Beton eingegossen werden und somit Fremdbestandteile im späteren Bauabfall darstellen. Gleiches gilt für Logistik-anwendungen, wenn es nicht gelingt AVM-Komponenten von Verpackungs- und Transportmaterialien zu trennen.

An dritter Stelle steht die direkte Belastung der Umwelt mit **Schadstoffen**, wenn eine Rückholbarkeit nicht gegeben ist und die Sensorknoten in der Umwelt verbleiben (Beispiel Umweltmonitoring und Katastrophenschutz durch Ausstreuen von Sensorknoten in der Umwelt).

Aus diesen Betrachtungen folgern als grundsätzliche Ansatzpunkte für eine Reduzierung von Umweltbelastungen beim „End-of-Life“:

- Rückholbarkeit / Separierung von AVM-Komponenten ermöglichen
- Reduzierung des Materialeinsatzes von Stoffen mit großem „ökologischen Rucksack“
- Schadstoffe (insbes. Schwermetalle) in Anwendungen mit geringer Rückholbarkeit / Recyclingquote vermeiden
- Recyclingkompatibilität mit Hauptabfallströmen beachten

6.2 Anwendungsfall Landwirtschaft

Die Umweltentlastungseffekte durch den Einsatz von AVM betreffen:

- **Geringerer Wasserverbrauch** pro Hektar landwirtschaftlicher Fläche (gezielte Bewässerung), somit
 - Einsparung an Wasser
 - Zusatzeffekt: Anpassung der Pumpenleistung möglich (geringerer Energieverbrauch)
 - Verringerung der Bodenversalzung in ariden Gebieten
- **Effizienzsteigerung**: Mehr Ertrag pro Fläche, Wasser- und Düngemiteinsatz

- **Geringere Ausbringung von Düngemitteln** pro Hektar landwirtschaftlicher Fläche (gezieltere Düngung und Abstimmung der Düngung auf den Bodenfeuchtegehalt), somit
 - Einsparung an Düngemittel
 - Verringerung der Auswaschung (Eutrophierung von Gewässern, Grundwasserbelastung)

Folgt man der Experteneinschätzung (siehe 4.9.2), so ermöglicht eine Erfassung von Zeitreihen bzw. zeitnahe Messungen der *Bodenfeuchte*, sowie eine kleinräumige Differenzierung der Messwerte eine erhebliche **Wassereinsparung**, in der Expertenbefragung quantifiziert mit „>2%“. Ebenso erwarten die befragten Experten mehrheitlich (wenn auch nicht ganz so eindeutig) eine erhebliche **Ertragssteigerung** – ebenfalls gleichzusetzen mit „>2%“. Die **Effizienzsteigerung** beträgt damit (Ertrag pro Wassereinsatz) mindestens **4%** nach Expertenmeinung.

Ein vergleichbares Bild ergab die Expertenbefragung zum Nutzen von Zeitreihen bzw. zeitnahe Messungen des *Nitratgehalts im Boden*, sowie eine kleinräumige Differenzierung (siehe 4.9.3): Die potenzielle **Düngereinsparung** wird einstimmig als erheblich (>2%) angesehen, ebenso mit knapper Mehrheit die **Ertragssteigerung**.

Der Wasserverbrauch in der Landwirtschaft beläuft sich auf rund 2.800 km³/a, bezogen auf 280 Mio. ha bewässerte landwirtschaftliche Fläche errechnet sich ein durchschnittlicher Verbrauch von 10.000 m³/ha,a. Dieser Verbrauch schließt jedoch auch traditionelle Flutungsbewässerung ein, die eher nicht für den AVM-Einsatz geeignet ist. In der EU beläuft sich der Wasserverbrauch auf etwa 3.000 m³/ha,a²⁷⁷ (siehe auch Zahlen für verschiedene Kulturen in Deutschland, 5.2.1). Auf dieser Basis ergeben sich die in Tabelle 47 abgeschätzten Einsparpotenziale: Für das Jahr 2015 errechnet sich ein weltweites Einsparpotenzial von rund **1 Mrd. m³/a Wasser**, davon 10% in der EU, für 2020 von **3,6 Mrd. m³/a** gegenüber dem Status-Quo. Zum Vergleich: Die Industrie in Deutschland verbraucht jährlich etwa 4 Mrd. m³/a.

²⁷⁷ European Environmental Agency: Water resources across Europe — confronting water scarcity and drought, 2009, Kopenhagen

Tabelle 47: Wassereinsparpotenzial

Region	Bewässerungsfläche in Mio ha	Flächenanteil AVM in %	Fläche AVM in Mio. ha	2% Wassereinsparung in Mio. m³/a	Flächenanteil AVM 2020 in %	Fläche AVM in Mio. ha	2% Wassereinsparung in Mio. m³/a
	2005		2015			2020	
Deutschland	0,5	20	0,1	6	30	0,15	9
Rest EU 27	11,5	15	1,7	100	25	29	1.800
USA	21	35	7,4	450	50	10,5	600
Rest der Welt	250	3	7,4	450	8	19,7	1.200
Summe ca.	280		16,6	1.006		59,35	3.609

Hinsichtlich des Wassereinsparpotenzials bleibt jedoch festzuhalten, dass wesentlich größere Spareffekte alleine schon durch die Wahl einer geeigneten Bewässerungstechnik erzielt werden können: So beziffern Dworak et al.²⁷⁸ die Effizienz (Anteil des von der Pflanze aufgenommenen Wassers zur gesamten auf das Feld aufgetragenen Wassermenge) unterschiedlicher Bewässerungsmethoden mit 55% für Furchenbewässerung (Flutung), 75% für Sprinkler und 90% für Tropfbewässerung²⁷⁹. Damit ist das Einsparpotenzial einer besseren Bewässerungstechnik um etwa eine Größenordnung größer als das des AVM-basierten Precision Farming.

Zu berücksichtigen ist ein **Reboundeffekt**, wenn – wie im Landwirtschaftsszenario beschrieben und als ökonomischer Hauptnutzen identifiziert – statt absoluten Einsparungen eine Ausweitung der landwirtschaftlich genutzten - bewässerten - Flächen bei gleichem absoluten Wasserverbrauch in einer Region erfolgt. Mit Blick auf das Ziel der Landwirtschaft, Nahrung für immer mehr Menschen und Tiere zu produzieren, stellt sich dies allerdings nicht als Reboundeffekt, sondern als ursprünglich intendierter Effekt dar. Die Effizienzsteigerung hat insoweit positive Auswirkungen auf das Ertragsvermögen der Landwirtschaft, wahrscheinlich ist dabei eine Steigerung des Düngemitelesatzes: Wird die landwirtschaftliche Fläche bei verringertem Wasserverbrauch je Hektar ausgeweitet, kann jedoch der Düngemitelesatz nicht mindestens um den gleichen Beitrag reduziert werden, so steigt die Gesamtmenge an eingesetztem Dünger in einer Region sogar an.

Ebenso ist zu beachten, dass die wesentliche Ursache für Treibhausgasemissionen aus der Landwirtschaft auf die Landrodung für neue Anbauflächen entfällt

²⁷⁸ Dworak, T.; Berglund, M.; Laaser, C.; Strosser, P.; Roussard, J.; Grandmougin, B.; Kossida, M.; Kyriazopoulou, I.; Berbel, J.; Kolberg, S.; Rodríguez-Díaz, J. A.; Montesinos, P., 2007. EU Water Saving Potential. European Commission report ENV.D.2/ETU/2007/0001r.

²⁷⁹ Tropfbewässerung ist nicht für alle Kulturen geeignet

(siehe 4.2.2). Führt folglich der sparsamere Einsatz von Wasser zur Ausweitung der landwirtschaftlich genutzten Fläche, so kann es zu zusätzlichen Treibhausgasemissionen kommen und einem nachteiligen Effekt auf die CO₂-Bilanz der weltweiten Landwirtschaft.

Der **Energiebedarf** zur Bewässerung für den Weizenanbau ist in Tabelle 48 nach Standorten in der EU aufgeführt: An günstigen und mittleren Standorten besteht nahezu kein Bewässerungsbedarf, dementsprechend kaum Energiebedarf zur Bewässerung. Dagegen erfordert der Weizenanbau insbesondere in mediterranen Regionen einen Energiebedarf zur Bewässerung von rund 1.600 MJ/ha²⁸⁰. Bei einem konservativ geschätzten Energieeinsparpotenzial von 1% durch optimierte Bewässerung und somit verringerte Pumpenleistung bezogen auf den Weizenanbau in einigen europäischen Schlüsselstaaten, insbesondere einschließlich mediterraner Länder ergibt sich ein jährliches **Energieeinsparpotenzial** von etwa **114 TJ** (elektrischer Strom und Dieselaggregate). Nur geringe Anteile dieses Einsparpotenzials lassen sich in Deutschland realisieren, zusätzliche erhebliche Einsparungen können dagegen aus dem Einsatz von AVMs für Präzisionslandwirtschaft außerhalb Europas realisiert werden.

Tabelle 48: Energiebedarf zur Bewässerung im Weizenanbau

	Günstige Standorte	Mittlere Standorte	Ungünstige Standorte
Beispielregionen	Brandenburg, Sachsen-Anhalt, Mecklenburg-Vorpommern, Thüringen Dänemark	Niedersachsen, Hessen, Bayern, Sachsen Südengland Litauen Tschechien	Baden Mittel- und Süditalien Andalusien, Katalonien Portugal Franz. Mittelmeerküste Polen
Energiebedarf Bewässerung (MJ/ha)	61,96	50,74	1.632,78
Summe Anbaufläche 2006 ²⁸¹ (Italien, Spanien, Polen, Portugal, Estland, Lettland)			7 Mio. ha
Abschätzung: Energieeinsparpotenzial von 1% durch optimierte Bewässerung			0,114 PJ/a

Die **Bodenversalzung** ist insbesondere in den mediterranen Ländern Spanien, Italien, Griechenland und Türkei problematisch²⁸²: Grundwasserentnahme zur Trinkwassergewinnung und für die Bewässerung in der Landwirtschaft hat in küstennahen Bereichen bereits verbreitet zu einem Einströmen von salzhaltigem Meerwasser in den Grundwasserleiter geführt, so dass die Landwirtschaft aber auch die Trinkwassergewinnung ernsthaft behindert wird. Eine Verringerung der Wasserentnahme für die Landwirtschaft kann diesen Prozess verlangsamen

²⁸⁰ Kränzlein, T.; Kempen, M.; Mack, G.: Energiebedarf der landwirtschaftlichen Produktion in Europa: Regionale Unterschiede und Bestimmungsgründe, Agrarwirtschaft und Agrarsoziologie, Nr.2/2007

²⁸¹ Eurostat: Landwirtschaft - Landwirtschaftliche Erzeugnisse - Pflanzliche Erzeugnisse - Weizen, Anbaufläche, 2006
http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page?_pageid=1996,39140985&_dad=portal&_schema=PORTAL&screen=detailref&language=de&product=REF_TB_agriculture&root=REF_TB_agriculture/t_agri/t_apro/t_apro_cp/tag00105

²⁸² European Environmental Agency: Water resources across Europe — confronting water scarcity and drought, 2009, Kopenhagen

– eine Umkehrung wäre nur bedingt möglich wenn die Wasserbilanz positiv ist (mehr Grundwasserneubildung als Entnahme).

Hinsichtlich der **Überdüngung** von Gewässern sind **Phosphate** meistens der limitierende Faktor im Süßwasser, **Stickstoff** dagegen in marinen Ökosystemen²⁸³. Zudem beeinträchtigen Nitrate Grund- und Oberflächengewässer als Trinkwasserressource. Eine Düngereinsparung von 2% (siehe oben) resultiert in einer deutlich höheren Reduzierung des Stickstoffaustrags (und ggf. Phosphat- austrags) in Gewässer, da der Anwendungsfall Precision Farming lediglich die Menge des überschüssigen Düngers reduzieren soll, nicht die Menge des von der Pflanzen aufgenommenen Nährstoffs. Eine genauere Quantifizierung des Effekts einer präziseren, bedarfsgerechten Düngung auf die Eutrophierung von Gewässern steht noch aus und muss durch Feldversuche ermittelt werden.

6.3 Anwendungsfall Prozess- und Automatisierungstechnik

Das U.S. Department of Energy schätzt das Energieeinsparpotenzial durch drahtlose verteilte Sensornetzwerke für alle Arten **industrieller Anwendungen** grob auf **100 PJ** pro Jahr in den USA²⁸⁴, bedingt durch on-line Prozessmonitoring und Überwachung von Produktqualitätskriterien – und damit ein etwa um den Faktor 1.000 größeres Energieeinsparpotenzial als der Landwirtschaftsbereich.

Das Energieeinsparpotenzial im Bereich der **Prozess- und Automatisierungstechnik** ist sehr vom konkreten Anwendungsfall abhängig. Sexton²⁸⁵ schätzt für den Einsatz drahtloser Sensornetzwerke zur Zustandsüberwachung von Motoren für Industrieanwendungen in den USA mit einer Energieeinsparung von 15% durch verbesserte Instandhaltung, einschließlich

- angepasste Dimensionierung der Motoren
- Monitoring der Auswirkungen von Motorreparaturen und –reinigung
- Instandhaltung der mechanischen Systemkomponenten.

15% Energieeinsparung entsprechen **373 PJ**.

Übertragen auf Deutschland ergibt sich bei einem Gesamtverbrauch von 165 TWh für elektrische Antriebe bzw. elektromotorisch angetriebene Systeme in

²⁸³ European Environmental Agency: Europe's water: An indicator-based assessment, 2003, Kopenhagen

²⁸⁴ Bennett, B. et al.: Assessment Study on Sensors and Automation in the Industries of the Future: Reports on Industrial Controls, Information Processing, Automation, and Robotics, 2004, S. 27

²⁸⁵ Sexton, D.: Distributed Wireless Multi-Sensor Technologies, GE Global Research, 2008; und: Jannatec, Newtrax and Simsmart join forces to provide an optimized real-time ventilation-on-demand solution for underground mines, Pressemitteilung, 25.2.2008

der Industrie²⁸⁶ ein Einsparpotenzial von rund 25 TWh pro Jahr, entsprechend **15 Mio t CO₂-eq. pro Jahr**^{287,288}. Zu berücksichtigen ist jedoch, dass die wesentlichen Einsparungen erreicht werden können durch die Primärmaßnahmen

- Vermehrten Einsatz von Energiesparmotoren
- Elektronische Drehzahlregelung
- Mechanische Systemoptimierung

und der Einsatz von drahtlosen Sensornetzwerken eine Hilfsfunktion im Rahmen des Monitorings übernimmt, und somit hilft, die Potenziale der oben aufgeführten Maßnahmen auszuschöpfen.

Der direkte Beitrag von drahtlosen Sensornetzwerken beschränkt sich auf:

- **Zustandsüberwachung** von Motoren,
 - um Verschleiß, der zu **abnehmendem Wirkungsgrad** führt, rechtzeitig zu detektieren
 - um **Instandhaltungsmaßnahmen** bedarfsorientiert rechtzeitig vor Ausfällen zu planen
 - als **Erfolgskontrolle** nach Reparaturen
- **Prozesskontrolle** zur **angepassten Steuerung** von Motoren
- **Messung des Energieverbrauchs** einzelner Motoren im Rahmen eines fabrikweiten Energiemanagements (verursachergerechte Verbrauchszuordnung, Systemoptimierung)
- **Überwachung der tatsächlichen Lastbedingungen** von Motorsystemen und entsprechende Systemanpassung

Der Einsatz von drahtlosen Sensornetzwerken ermöglicht eine bessere **Überwachung der tatsächlichen Lastbedingungen** von Motorsystemen und kann somit genutzt werden, um besser dimensionierte Motoren einzusetzen:

²⁸⁶ ZVEI Automation: Energiesparen mit elektrischen Antrieben, Frankfurt am Main, 2006

²⁸⁷ Umrechnungsfaktor: 0,613 kg CO₂/kWh

²⁸⁸ diese Summe stimmt jedoch nicht mit den Angaben des US Energieministeriums überein, das den Einspareffekt, der sich aufgrund drahtloser Sensorsysteme für die Zustandsüberwachung von Motoren im Jahr 2020 in den USA realisieren lässt, auf 0,6 Mio t CO₂-eq. pro Jahr beziffert (I. Chan: ITP Technology Development: Innovations to Capture New Opportunities in Energy Efficiency, U.S. Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy, 2007)

Eine erheblicher Anteil der Motoren in industriellen Anwendungen wird unterhalb 50% der Maximallast betrieben²⁸⁹ – in diesem Zustand ist üblicherweise der Motorwirkungsgrad deutlich geringer als bei einem optimal dimensionierten Motor. Der Energieverbrauch lässt sich je nach Anwendungsfall im Prozentbereich verringern.

Gutierrez beziffert den Effekt eines **fabrikweiten Energiemanagements** gestützt auf drahtlose Sensornetzwerke mit Effizienzgewinnen von 4,5% bezogen auf Motoren²⁹⁰.

Die **Zustandsüberwachung** im Betrieb ist insbesondere bei energieeffizienten Motoren angeraten, da diese nach Reparaturen häufig geringere Wirkungsgrade aufgrund zahlreicher Fehlermöglichkeiten aufweisen. Im einzelnen werden als Fehlermöglichkeiten, die zu geringeren Wirkungsgraden führen, genannt²⁹¹:

- Kupferverluste im Stator: Verminderung des Drahtdurchmessers, Verlängerung der mittleren Windungslänge (z.B. Wahl einer ungeeigneten Schablone), Änderung der Wicklungsart (z.B. Ein- statt Zweischichtwicklung, andere Sehnung), Erhöhung des Leerlaufstroms (z.B. durch Vergrößerung des Luftspalts)
- Reibungsverluste: Anderer Eigenlüfter (Durchmesser, Flügelzahl), Änderung der Lagerart und Schmierung
- Rotorverluste: Wiederverwendung eines offensichtlich thermisch stark überlasteten Rotors
- Zusatzverluste: Mechanische Beschädigung des Blechpaketes, Unsymmetrischer Luftspalt
- Eisenverluste: Ungeeignete Ausziehmethode für defekte Wicklung, Mechanische Beschädigung der Paketkante (Feilen, Schleifen, Sandstrahlen)

Untersuchungen in den USA haben bereits Anfang der 90er Jahre Wirkungsgradeinbußen von ca. 1% durch diese Fehlerquellen in der Praxis nachgewiesen. Sofern AVMs für die Zustandsüberwachung in Bezug auf diese Fehlerquellen eingesetzt werden (andere Maßnahmen zur Abhilfe sind alternativ möglich,

²⁸⁹ Agamloh, E.; Butler, K.; Kaufman, N., Kellum, Z.; Morrison, J.; Welch, D.: Achieving More with Less: Efficiency and Economics of Motor Decision Tools, 2006

²⁹⁰ Gutierrez, J.A.: IEEE Std. 802.15.4 – Enabling Pervasive Wireless Sensor Networks, 2006; siehe auch: Gutierrez, J.A.; Durocher, D.B.; Lu, B.; Harley, R.G.; Habetler, T.G.: Applying Wireless Sensor Networks in Industrial Plant Energy Evaluation and Planning Systems, IEEE IAS Pulp and Paper Industry Conference, 2006, Appleton, WI, USA

²⁹¹ Schweizerischer Verband der Elektromaschinenbauern: Energiesparmotoren und Umrichter, o.J.

z.B. Verbesserung der Reparaturen, bessere Erfolgskontrolle / Testmessungen direkt nach Durchführung der Reparaturen – aber längeres Einfahren erforderlich, bevor belastbare Vergleichsmessungen möglich sind) ergibt sich in Bezug auf den Gesamtverbrauch von 165 TWh in Deutschland ein unmittelbares Einsparpotenzial von 1,65 TWh pro Jahr, entsprechend **1 Mio t CO₂-eq.**

Die **zustandsorientierte Instandhaltung** bietet neben direkten Korrekturen hinsichtlich der Motoreffizienz auch weitere Potenziale, die sich positiv auf die Umweltbilanz des Einsatzes von AVM auswirken, im einzelnen aber schwer zu quantifizieren sind:

- Verringerung von Ausschussproduktion durch Maschinendefekte
- Planbares Herunterfahren von Anlagen zwecks Instandhaltung vermeidet bei der Chargenfertigung Ausschussproduktion
- Vermeidung von Folgeschäden an anderen Anlagenteilen
- Erhöhung der Produktivität durch minimierte Stillstandszeiten – damit je Produkt eine bessere Umweltbilanz, insbesondere z.B. bei Fertigung in Reinräumen, bei denen die Reinraumklimatisierung auch während der Stillstandszeiten energieverbrauchend zu Buch schlägt.

6.4 Generalisierung und Zusammenfassung der Umweltbewertung

Neben der Landwirtschaft und der Prozess- und Automatisierungstechnik zeichnen sich für eine Reihe weiterer Anwendungsfelder erhebliche Umweltentlastungspotenziale durch den Einsatz von AVM an:

- Etwa 8% des Energieverbrauchs im **Bergbau (Untertage)** entfallen auf Be- und Entlüftungssysteme. Beispielanwendungen von AVM mit Entwicklungen der Firma NewTrax Technologies zur optimierten und bedarfsangepassten Be- und Entlüftung haben zu rund 65% Energieeinsparung des Lüftungssystems einer australischen Mine geführt²⁹². In Deutschland verursacht der Steinkohlebergbau rund 2 Mio. t CO₂-eq. bedingt durch Stromverbrauch (weiteres Treibhauspotenzial durch Grubengas)²⁹³. Legt man ein Optimierungspotenzial von 5% des Energieverbrauchs durch den Einsatz von drahtlosen Sensornetzwerken zugrunde, ergibt sich ein **Einsparpotenzial** von rund **100.000 t CO₂-eq. pro Jahr**.

²⁹² Sexton, D.: Distributed Wireless Multi-Sensor Technologies, GE Global Research, 2008; und: Jannatec, Newtrax and Simsmart join forces to provide an optimized real-time ventilation-on-demand solution for underground mines, Pressemitteilung, 25.2.2008

²⁹³ McKinsey & Co.: Kosten und Potenziale der Vermeidung von Treibhausgasemissionen in Deutschland, 2007

- Nach Industrieerschätzung²⁹⁴ lassen sich durch das „**intelligente digitale Ölfeld**“ - zu realisieren durch drahtlose Sensornetzwerke - folgende Verbesserungen erreichen, die zwar vor allem betriebswirtschaftlich relevant sind, aber auch mit ambivalenten Umweltauswirkungen verbunden sind – einerseits nimmt die Ressourcenverfügbarkeit zu, andererseits auch die Gesamt-Treibhausgasemissionen und die Wettbewerbsfähigkeit fossiler Brennstoffe gegenüber regenerativen Energien:
 - 1-5% höhere Ausbeutung der Ölquellen
 - 2-8% schnellere Produktion / Förderung
 - 3-10% Reduktion der Stillstandszeiten
 - 5-20% höhere Effizienz des Betriebs
- **Druckluftsysteme** sind einer der wesentlichen Energieverbraucher in der Industrie. Messaufgaben zur Optimierung von Druckluftsystemen umfassen insbesondere Volumenstrommessungen (Temperatur- und Druckkompensation erforderlich) zur Luftverbrauchsmessung und zur Bestimmung der Leistungsdaten von Kompressoren. Ebenso können auch die Betriebszustände der Kompressoren direkt an diesen abgegriffen und zur Systemoptimierung genutzt werden. Über Drucksensoren lassen sich Leckagen – 15-50% der bereitgestellten Druckluft geht durch Leckagen verloren – detektieren²⁹⁵. In Tabelle 49 sind die Maßnahmen zur Verbesserung von Druckluftsystemen nach Radgen im Einzelnen aufgeschlüsselt und Ansatzpunkte für den unterstützenden Einsatz von drahtlosen Sensornetzwerken aufgeführt: Im Ergebnis können bis zu 23,7% des Energieverbrauchs von Druckluftsystemen durch Sensornetzwerke erschlossen werden. Ausgehend von einem Verbrauch von 14 TWh Strom für Druckluftsysteme in Deutschland (Kompressor- und Aufbereitungsanlagen)²⁹⁶ ergibt sich ein durch AVM erschließbares Potenzial von 3,3 TWh jährlich, entsprechend rund **2 Mio t CO₂-eq. pro Jahr**.

²⁹⁴ Nasr, H.; Rincon, J.; Clinton, R.: Remote monitoring, control enable smart-field in Gabon, OIL & GAS JOURNAL, PennWell, 5.März 2007

²⁹⁵ weitere Details: Messtechnik im Bereich der Druckluft, Projekt Druckluft effizient, 2003

²⁹⁶ Deutsche Energie-Agentur: Druckluftsysteme: Mehr Energieeffizienz, weniger Kosten, 2006

Tabelle 49: Energieeinsparpotenziale bei der Druckluftversorgung²⁹⁷

Energieeinsparmaßnahme	Anwendbarkeit ²⁹⁸	Effizienzgewinn ²⁹⁹	Resultierendes Einsparpotenzial	Erschließbar durch den Einsatz drahtloser Sensornetzwerke
Neuanlagen oder Ersatzinvestitionen				
Hocheffiziente Motoren	25 %	2 %	0,5 %	
Drehzahlvariable Antriebe	25 %	15 %	3,8 %	
Technische Optimierung des Kompressors	30 %	7 %	2,1 %	
Effiziente übergeordnete Steuerungen	20 %	12 %	2,4 %	+ (Steuerung basierend auf Monitoring der Einzelkomponenten)
Wärmerückgewinnung	20 %	20 %	4,0 %	
Verbesserte Druckluftaufbereitung	10 %	5 %	0,5 %	
Gesamtanlagenauslegung (inklusive Mehrdruckanlagen)	50 %	9 %	4,5 %	+ (Gesamtsystemmonitoring)
Druckverlustminderung im Verteilsystem	50 %	3 %	1,5 %	
Optimierung von Druckluftgeräten	5 %	40 %	2,0 %	
Anlagenbetrieb und Instandhaltung				
Verminderung der Leckageverluste	80 %	20 %	16,0 %	+ (Detektierung von Leckagen)
Häufigerer Filterwechsel	40 %	2 %	0,8 %	+ (bedarfsangepasste Wechselintervalle)
		Summe	32,9 %	max. 23,7 %

- Ein bedarfsangepasste, sensorgesteuerte Klimatisierung von **Rechenzentren** ermöglicht bis zu 60% Energieeinsparung bezogen auf die Klimatechnik³⁰⁰. Da rund die Hälfte des heutigen Stromverbrauchs von Rechenzentren auf deren Infrastruktur entfällt³⁰¹ (dabei dominierend die

²⁹⁷ Radgen, P.: Effiziente Druckluftversorgung - Vom Frosch zum König, BWK Bd. 57 (2005) Nr. 6; eigene Ergänzungen zum Einsatz drahtloser Sensornetzwerke

²⁹⁸ Druckluftanlagen, bei denen diese Maßnahme anwendbar und rentabel ist

²⁹⁹ Energieeinsparung des jährlichen Energieverbrauchs

³⁰⁰ Sencast Systems Inc.: Wireless Sensor Network Solutions for Data Center Applications, White Paper, 2007

³⁰¹ Stobbe, L.; Schломann, B.; Friedewald, M.; Georgieff, P.; Leimbach, T.; Nissen, N.F.; Proske, M.: Abschätzung des Energiebedarfs der weiteren Entwicklung der Informationsgesellschaft, Studie des Fraunhofer IZM und des Fraunhofer ISI für das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Abschlussbericht, 2. Februar 2009, Berlin/Karlsruhe (unveröffentlicht)

Klimatechnik), ergibt sich ein Einsparpotenzial in Deutschland von etwa 2,3 TWh, entsprechend rund **1,4 Mio t CO₂-eq. pro Jahr**.

„**Smart Systems**“, denen AVMs zuzurechnen sind, haben das Potenzial, bis 2020 den Ausstoß an Treibhausgasen weltweit um **9,2 Gt CO₂-eq.** zu verringern durch intelligente Lösungen im Bereich Energiemanagement und –verteilung, intelligente Kontrolle elektrischer Antriebe, Optimierung der Logistik oder energie-effizientes Gebäudemanagement³⁰².

Theisen et al.³⁰³ beziffern in einer als konservativ bezeichneten Schätzung das Energieeinsparpotenzial durch drahtlose Sensornetzwerke für die Automatisierung und Prozesskontrolle mit rund 10% des Energieverbrauchs für die besonders energieintensiven Branchen (siehe auch Abbildung 9, S. 77): Überträgt man diese Annahme auf Deutschland, so ergeben sich die in Tabelle 50 dargestellten Einsparpotenziale³⁰⁴.

Tabelle 50: Überschlägige Abschätzung der Einsparpotenziale durch drahtlose Sensornetzwerke in industriellen Anwendungen in Deutschland

	Energieverbrauch insgesamt (GJ)	10% Energieeinsparung
Verarbeitendes Gewerbe insgesamt	3.971.163.870,00	397.116.387,00
<i>davon:</i>		
Nahrungsmittel	221.639.925,00	22.163.992,50
Papier	302.470.515,00	30.247.051,50
Kokereien, Mineralöl	389.012.784,00	38.901.278,40
chemische Erzeugnisse	1.073.418.579,00	107.341.857,90
Glas, Keramik, Verarb. Steine u. Erden	316.774.962,00	31.677.496,20
Metallerzeugung und -bearbeitung	1.008.325.385,00	100.832.538,50
Automobilbau	121.136.063,00	12.113.606,30

Zusammenfassend sind die perspektivischen Umweltauswirkungen von AVMs auf drei Ebenen zu diskutieren³⁰⁵:

- *Primäre Effekte:* Umweltbelastung durch die AVM-Komponenten und erforderliche Infrastruktur (ggf. anteilig) über den Lebensweg von der

³⁰² EPoSS: Strategic Research Agenda 2009, EPoSs Office / VDI/WDE-IT, Berlin

³⁰³ Theisen, P.; Luebke, C.; Marshall, P.: Eaton Wireless Sensor Network for Advanced Energy Management Solutions Phase 2 - Advanced Pervasive Wireless Energy Sensing, DOE Sensors & Automation 2006 Annual Portfolio Review

³⁰⁴ Energieverbrauch basierend auf: Statistisches Bundesamt: Energieverbrauch des Verarbeitenden Gewerbes nach ausgewählten Wirtschaftszweigen 2007

Herstellung über Distribution, Nutzung (direkte Umweltbelastung durch z.B. den Energieverbrauch der Komponenten) bis zur Entsorgung.

- *Sekundäre Effekte*: Die Anwendung von AVM hat Auswirkungen auf andere Prozesse („Anwendungen“), deren Auswirkungen auf die Umwelt sich dadurch positiv oder negativ verändern ("indirekte Effekte").
- *Tertiäre Effekte*: Verhaltensweisen und Strukturen passen sich an die durch den Einsatz von AVM bzw. drahtlosen Sensornetzwerken veränderten Bedingungen an (Veränderungen der Konsummuster, neue Formen der Arbeitsorganisation, ökonomischer Strukturwandel, ebenfalls als "indirekte Effekte" oder als "Folgeeffekte" bezeichnet); Rebound-Effekte sind diesen tertiären Effekten ebenfalls zuzurechnen, wenn Prozesse zwar durch AVM effizienter werden, dadurch aber massenhaft eingesetzt werden, so dass die Gesamtumweltbelastung zunimmt.

Abbildung 36: Qualitative Zusammenfassung der Umweltbewertung

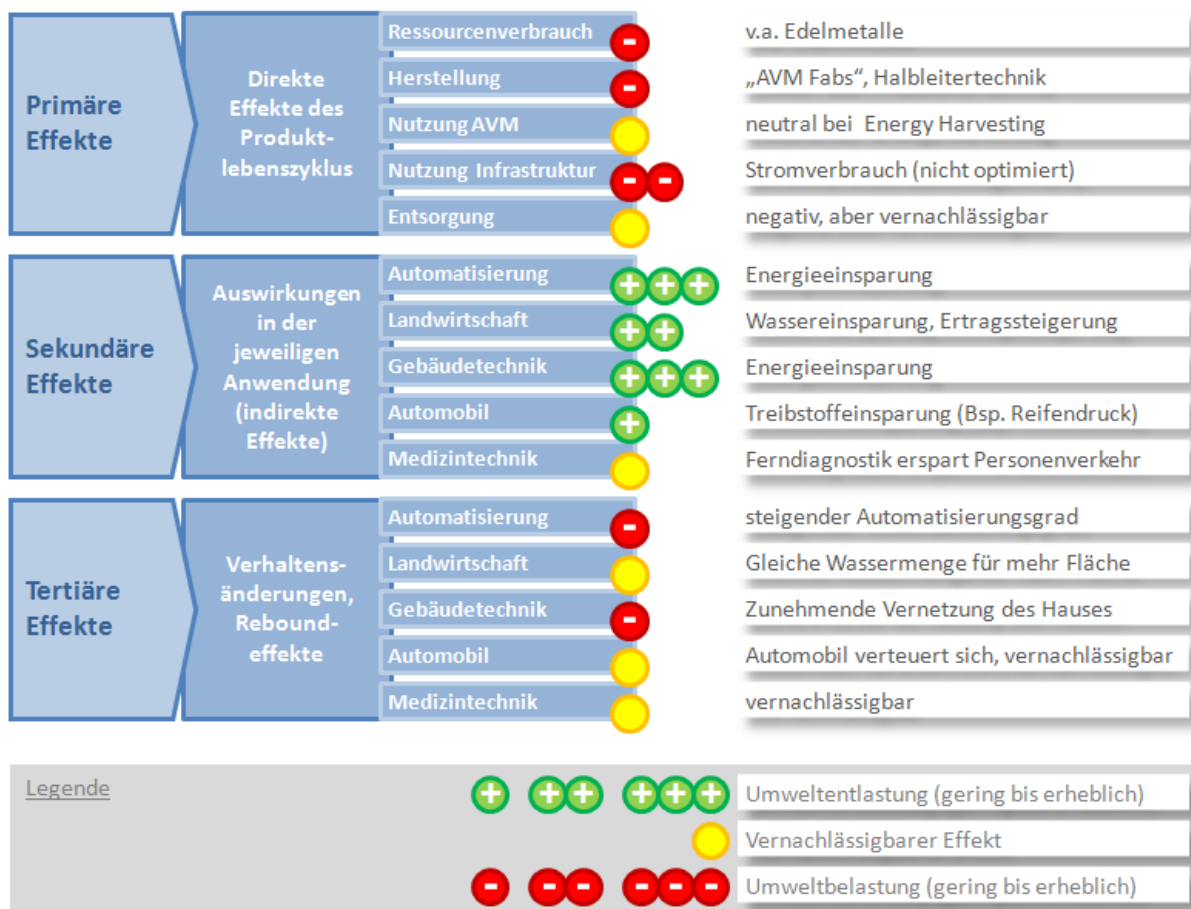


Abbildung 36 fasst in einer qualitativen Bewertung die perspektivischen Umweltauswirkungen von Autonomen Verteilten Mikrosystemen zusammen: Während die primären Effekte durchweg negativ zu bewerten sind, und ebenso in den meisten Anwendungsfällen die tertiären Effekte – dominiert durch Reboundeffekte –, so weisen die sekundären Effekte ein erhebliches Umweltentlastungspotential auf – zumindest für die betrachteten Anwendungsfelder. Die positiven sekundären Effekte überwiegen in der Regel die negativen Umweltauswirkungen.

7 Roadmapping, Umsetzungsstrategien, Handlungsempfehlungen

7.1 Technologievisionen

Langfristig vereinen sich in den Autonomen Verteilten Mikrosystemen zwei Technologievisionen. Zum einen die Miniaturisierung in Form von **staubkorn-großer intelligenter Elektronik** und zum anderen die Vernetzung einzelner, intelligenter Mikrosysteme und damit Objekte zu einem ubiquitär verbreiteten **„Internet der Dinge“**³⁰⁶. Erstere Vision zielt auf die Fortschreibung gegenwärtiger Entwicklungstrends der Miniaturisierung ab; die zweite Vision adressiert die Erwartung, dass zukünftig Objekte einzeln adressierbar und weltweit miteinander vernetzt werden können. Die bisherige Grundlage des „Internet der Dinge“ ist die RFID-Technologie, die wiederum die drahtlose Kommunikation voraussetzt. Wird die reine Identifikation von Objekten um die Erfassung von Umweltdaten und -zuständen erweitert, so wird sich das „Internet der Dinge“ langfristig zu einem Großteil aus AVM-Sensorknoten aufbauen. Treiber für das „Internet der Dinge“ sind derzeit Logistikanwendungen: Dieser Bereich bietet sich auch für das Monitoring von Umweltparametern bzw. dem Zustand der Ware an – siehe das Beispiel der Kühlkettenüberwachung -, so dass das „Internet der eGrains“ eine durchaus realistische Zukunftsvision darstellt.

7.2 Roadmaps für die Entwicklung von AVM-Anwendungen

Im folgenden Abschnitt werden zunächst existierende, übergreifende Roadmaps vorgestellt, die drahtlose Sensornetze behandeln. In den darauf folgenden Kapiteln wird dann die zukünftige Entwicklung von Teilkomponenten von AVMs in spezifischen Roadmaps mit einem Zeithorizont bis zum Jahr 2020 abgeschätzt. Ausgangspunkt für das Roadmapping bildet der in den Anwendungsfeldern Automatisierungstechnik und Landwirtschaft geschilderte Stand der Technik. Der Zielpunkt der jeweiligen Roadmaps wird durch die in den Kapitel 3 und 4 entwickelten Rahmen und Anwendungsszenarien vorgegeben.

7.2.1 Entwicklung von Roadmaps für Anwendungen von Autonomen Verteilten Mikrosystemen

Die nachfolgenden Roadmaps fassen die Ergebnisse aus den innerhalb der Anwendungsfelder geführten Experteninterviews zusammen, ergänzen sie um ei-

³⁰⁶ Bullinger, H.-J.; ten Hompel, M. (Hrsg.): Internet der Dinge, VDI-Buch, 2007

gene technologische Expertise des Fraunhofer IZM insbesondere in den Bereichen Energy Harvesting und Aufbau- und Verbindungstechnik, und gleichen sie mit Roadmaps in angrenzenden bzw. übergreifenden Themengebieten aus dem Bereich drahtloser Sensornetzwerke ab. Berücksichtigt wurden dabei insbesondere die Ergebnisse von:

- EPoSS: Strategic Research Agenda
- International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS)
- Embedded WiSeNts Research Roadmap
- e-Grain Roadmap des Fraunhofer IZM
- NAMUR Technologie-Roadmap Prozess-Sensoren

Der Entwicklungsstand und weitere Entwicklungsbedarf wird dreistufig dargestellt:

Bereits erreichter Entwicklungsstand

derzeit verfügbare Technologien für AVM, bzw. Grundlagentechnologien, die für AVM eingesetzt werden können; teilweise – je nach Angabe – bereits in Serie verfügbar oder noch im F&E-Stadium

Kurzfristige Entwicklungen bzw. Entwicklungsziele

sich abzeichnende F&E-Themen und Technologieziele, die innerhalb der nächsten 5 Jahre einen Schwerpunkt darstellen oder darstellen sollten, um AVM-spezifische Weiterentwicklungen zu ermöglichen; sich verändernde Rahmenbedingungen (siehe auch Rahmen- und Anwendungsszenarien in den Kapiteln 3 und 4)

Mittel- bis langfristige Entwicklungen bzw. Entwicklungsziele

mit einem Zeithorizont von 5-10 Jahren sich abzeichnende Trends, bzw. erforderliche Entwicklungsschwerpunkte; sich mittel- bis langfristig verändernde Rahmenbedingungen (siehe auch Rahmen- und Anwendungsszenarien in den Kapiteln 3 und 4)

Darüber hinaus werden einzelne langfristige **Visionen** in den Roadmaps bereits perspektivisch eingeordnet, ohne dass sich im Detail die Realisierung bereits vorzeichnen lässt.

Als übergreifende Roadmaps, die mehrere Teilaspekte von AVMs tangieren, sind insbesondere die EPoSS Forschungsagenda und die WiSeNts Forschungsroadmap zu benennen. Beide werden zunächst mit einigen AVM-relevanten Aspekten umrissen:

7.2.2 EPoSS Forschungsagenda

Die European Technology Platform on Smart Systems Integration (EPoSS) ist eine industriegetriebene Initiative zur Abstimmung des Forschungs-, Entwicklungs- und Innovationsbedarfs für die Integration von Smart Systems sowie Mikro- und Nanosystemen.

Die EPoSS Forschungsagenda identifiziert insbesondere anhand des Anwendungsfeldes Medizintechnik eine Reihe von Entwicklungsanforderungen, um vernetzten Sensorsystemen für die Patientenüberwachung zum Durchbruch zu verhelfen³⁰⁷ – vielfach gilt der identifizierte F&E-Bedarf auch für die weitere Entwicklung von AVM:

- Vollintegrierte CMOS³⁰⁸-basierte, programmierbare Plattform für kosteneffiziente ultra-low-power Komponenten
- Implementierung von ultra-low-power Rechenleistung, um Datenprozessierung und –reduzierung im Sensorknoten zu ermöglichen, statt große Datenmengen (bei hohem Energieverbrauch) zu übertragen
- Optimierung der Funktechnologie über kurze Distanzen (Body-Area-Network und Personal-Area-Network; Funk- und Netzwerkprotokolle, verbessertes Antennendesign für körpernahe und körperferne Kommunikation) mit Implementierung energiesparender Aufweck-Mechanismen

Festzuhalten bleibt, dass die Forschungsagenda für „Smart Systems Integration“ drahtlosen Sensornetzwerken eine Schlüsselrolle in den verschiedenen Anwendungsfeldern zuspricht, und auch explizit „ein hohes Maß an Miniaturisierung und Integration“ als Entwicklungsziel festschreibt, zu realisieren unter anderem durch System on Chip (SoC) als auch System in Package (SiP) Integrationsansätze. „Autonomen Verteilten Mikrosystemen“ kommt folglich eine Schlüsselrolle für die „Smart Systems Integration“ Strategie zu.

7.2.3 WiSeNts Forschungsroadmap

Die 2006 entwickelte WiSeNts Forschungsroadmap³⁰⁹ benennt eine Reihe von Forschungsfeldern und Herausforderungen für die Weiterentwicklung von drahtlosen Sensornetzen, insbesondere:

³⁰⁷ EPoSS: Strategic Research Agenda 2009, EPoSS Office / VDI/VDE-IT, Berlin

³⁰⁸ Complementary Metal Oxide Semiconductor, dominierende Halbleitertechnologie

- *Hardware*: Sensorkalibrierung, Energieeffizienz, Energy Harvesting Technologien, neue Sensorik, kostengünstige Komponenten, Miniaturisierung;
- *Algorithmen*: Lokalisierung/Ortsbestimmung, Kontextsensitivität, Clustering, Datenspeicherung und –suche, Bewegungsplanung;
- *Übergreifende Aspekte*: Skalierbarkeit, Quality of Service, Robustheit, Mobilität, Sicherheit, Heterogenität, Echtzeitfähigkeit;
- *Systeme*: Adaptive Systeme, Betriebssysteme, Programmierungsmodelle, Systemintegration;

sowie die Querschnittsthemen Modellierung und Analyse drahtloser Sensornetzwerke, Versuchsdurchführung und soziale Aspekte.

7.2.3.1 Roadmap: Aufbau- und Verbindungstechnik, Komponenten

Die Aufbau- und Verbindungstechnik ist insbesondere dann ein kritischer Aspekt für den Einsatz von AVM, wenn eine Anwendung besondere Miniaturisierungsanforderungen stellt oder langfristig Kosteneinsparungen durch miniaturisierte Aufbauten realisierbar erscheinen.

Zahlreiche Grundlagentechnologien für den miniaturisierten Aufbau von Funk-sensorknoten sind verfügbar, dennoch steht die 3D-Integration noch vor erheblichen Herausforderungen. Ansätze sind

- *System-on-Chip (SoC)* mit der Integration von Komponenten auf der Waferenebene in einem möglichst durchgängigen Prozess oder
- *System-in-Package (SiP)* mit der Kombination heterogener Komponenten in einem Package, sowie
- *System-on-Package (SoP)*, bei dem das System auf der Basisarchitektur eines Mehrlagenssubstrats aufgebaut wird.

Für alle drei Ansätze besteht noch erheblicher Entwicklungsbedarf, um die Grenzen der jeweiligen Technologien weiter hinauszuschieben und eine kosteneffiziente Umsetzung zu ermöglichen, aber auch zur Entwicklung geeigneter Entwurfswerkzeuge.

³⁰⁹ erläutert in: Marrón, P.J.; Minder D. et al.: Embedded WiSeNts Research Roadmap, November 2006

Vielversprechend ist die Komponentenintegration auf Waferebene³¹⁰, die jedoch nicht zwangsläufig auf kleinstmögliche Aufbauten hinauslaufen muss: „Derzeit sind noch massive Forschungsaktivitäten erforderlich, bevor die Miniaturisierungstechnologien auf Waferebene für die Mehrzahl miniaturisierter Funksensorknoten praktikabel werden“³¹¹. Das Stapeln von Wafern ermöglicht die Nutzung von Halbleiterprozessen zur Fertigung der wesentlichen Komponenten, ist aber hinsichtlich der Durchkontaktierung und des Wafer-to-Wafer-Bonding anspruchsvoll³¹².

Auch Batterien können auf Waferebene integriert werden; entsprechende Prozesse befinden sich in der Entwicklung³¹³: Ziele sind kleine geometrische Abmessungen, geringe Selbstentladung, lange Lebensdauer, kurze Ladezeiten, kostengünstige Fertigungstechnik.

Für mittelfristig absehbare Miniaturisierungsstufen durch Komponenteneinbettung und Waferintegration sind Modulgrößen mit 5 mm Kantenlänge realistisch. Dieses entspricht bereits den heutigen Abmessungen eines Mikrocontrollers für AVM, so dass eine weitere Miniaturisierung nur möglich ist, wenn die Strukturweiten weiter verringert wird³¹⁴. Dies entspricht jedoch auch Moore's Law und der ITRS Roadmap, die Strukturweiten³¹⁵ für Mikroprozessoren bzw. ASICs von 52 nm für 2009 und weitere Reduzierungen bis zu 11 nm im Jahr 2022 vorzeichnen^{316,317}.

Die eGrain-Roadmap³¹⁸ zielt für 2012 auf autarke Sensorknoten mit einer Größe von 1-16 mm³ ab. Auch die SAND-Roadmap von Philips für „Small Autonomous Network Devices“³¹⁹ adressiert die 3D-Integration für die weitere Miniaturisierung von AVM für Anwendungen in der Medizintechnik.

³¹⁰ Reichl, H.; Wolf, M.J.: Electronic Dust and e-Grains; in: Aarts, E.H.L.; Encarnaçao, J.L. (Hrsg.): True Visions - The Emergence of Ambient Intelligenc, Springer-Verlag, 2006, Berlin/Heidelberg

³¹¹ Niedermayer, M.: Methodik zum Entwurf von miniaturisierten, energieautarken, verteilten Funksensorknoten, Dissertation, Berlin, 2008

³¹² Wolf, M. J.; Michel, B.; Ramm, P.; Reichl, H.: System Integration on Wafer Level - Requirements and Technical Solutions, Micromaterials and Nanomaterials, 1st Wolrd Congress MicroNanoreliability, 2.-5. September 2007, Berlin

³¹³ Reichl, H.; Wolf, M.J.: Electronic Dust and e-Grains; in: Aarts, E.H.L.; Encarnaçao, J.L. (Hrsg.): True Visions - The Emergence of Ambient Intelligenc, Springer-Verlag, 2006, Berlin/Heidelberg

³¹⁴ Niedermayer, M.: Methodik zum Entwurf von miniaturisierten, energieautarken, verteilten Funksensorknoten, Dissertation, Berlin, 2008

³¹⁵ bezeichnet als "MPU/ASIC stagger-contacted Metal 1 (M1)½ Pitch", d.h. halber Abstand zwischen Leiterbahnen auf der ersten Metallisierungsebene

³¹⁶ International Technology Roadmap for Semiconductors, 2007 Edition, Executive Summary

³¹⁷ International Technology Roadmap for Semiconductors, 2007 Edition, Process Integration, Devices & Structures

³¹⁸ Reichl, H.; Wolf, M.J.: Electronic Dust and e-Grains; in: Aarts, E.H.L.; Encarnaçao, J.L. (Hrsg.): True Visions - The Emergence of Ambient Intelligenc, Springer-Verlag, 2006, Berlin/Heidelberg

³¹⁹ Ouwerkerk, M.: Miniature wireless sensor devices, 11.Oktober 2005

Langfristig werden auch völlig neue Konzepte der Verbindungstechnik, wie z.B. „Self Assembly“ relevant werden.

Der Energieverbrauch der Hardware ist ein wesentliches limitierendes Moment für den breiten Einsatz von AVM³²⁰: Verfügbar sind 2,4-GHz-Transceivereinheiten mit einem Stromverbrauch von 20-25 mA (bei 1,8V, 0dBm), absehbar werden Komponenten mit 10-15 mA verfügbar sein. Für UWB-Transceiver zeichnet sich die Verfügbarkeit von Sendern mit 0,4 mW und Empfängern mit 0,6 mW Leistungsaufnahme ab. Mikrocontroller mit minimalem Energieverbrauch in den verschiedenen Betriebsmodi (und ein entsprechendes Powermanagement) sind ebenso wichtige Entwicklungsziele.

Die Integration von multiplen Funktionen (Sensorik, Logik, drahtlose Kommunikation) in herkömmliche Materialien, wie z.B. in Textilien³²¹ wird u.a. vom ICT Arbeitsbeisprogramm der Europäischen Kommission als wichtiges Forschungsthema der nächsten Jahre benannt³²².

Die Kosten für derzeit kommerziell erhältliche Sensorknoten belaufen sich auf eine Größenordnung von 50 – 250 Euro³²³. Kurzfristig ist für einen breiteren Einsatz ein Kostenziel von unter 50 Euro je Sensorknoten anzustreben, mittel- bis langfristig von unter 10 Euro. Für einfache „smart tag“ Anwendungen ist der Euro-Cent-Bereich die Zielgröße (nur durch große Stückzahlen erreichbar).

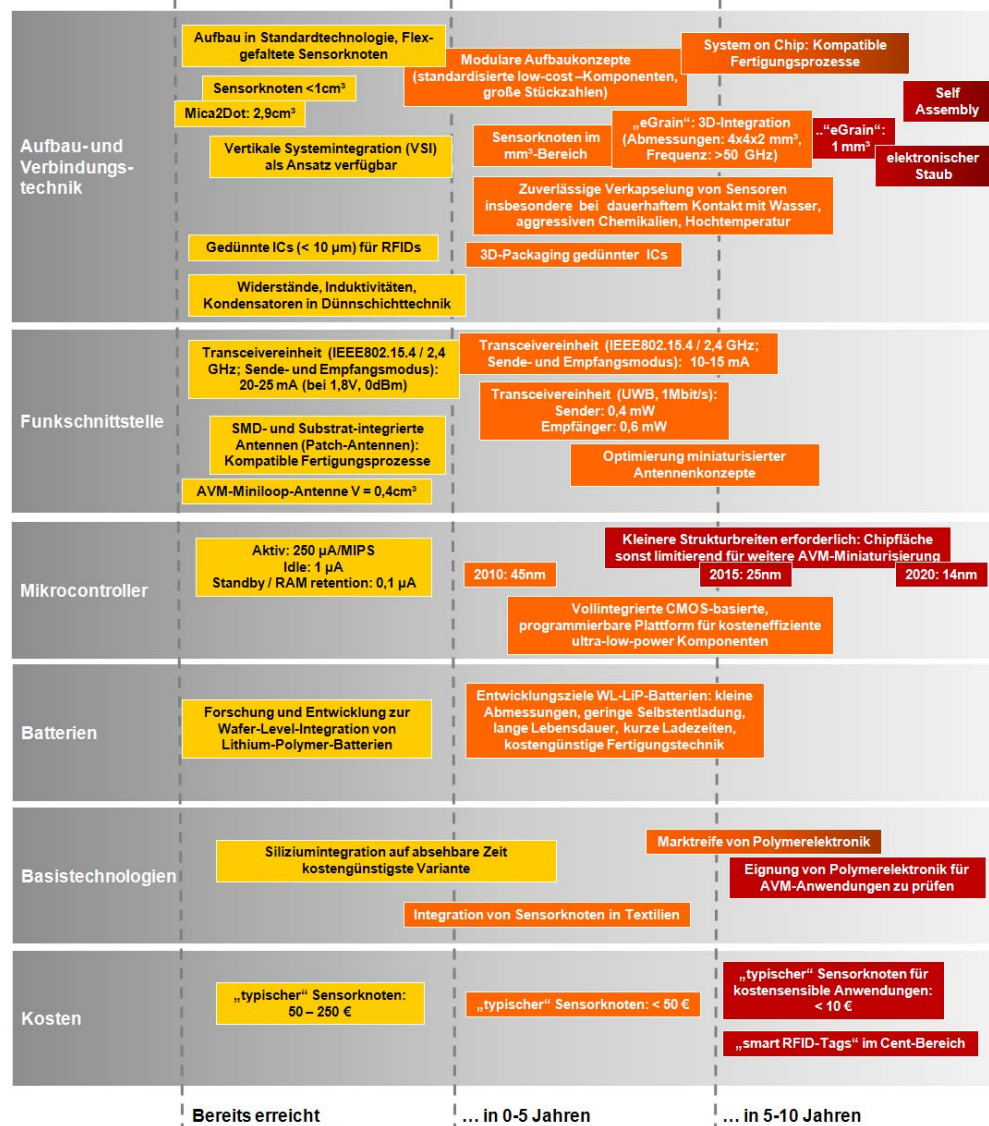
³²⁰ Chalard, L.; Helal, D.; Verbaere, L.; Wellig, A.; Zory, J.: Wireless Sensor Networks Devices: Overview, Issues, State-of-the-Art and Promising Technologies, ST Journal of Research, Vol. 4, No. 1, 2007

³²¹ siehe auch: Reichl, H.; Kallmayer, C.; Linz, T.: Electronic Textiles; in: Aarts, E.H.L.; Encarnaçao, J.L. (Hrsg.): True Visions - The Emergence of Ambient Intelligenc, Springer-Verlag, 2006, Berlin/Heidelberg

³²² Europäische Kommission: ICT – Information and Communication Technologies, Work Programme 2009-10 unter dem 7. Forschungsrahmenprogramm, Brüssel, S. 32

³²³ grobe Orientierungsgröße, deutliche Abweichungen sind im Einzelfall gegeben (niedrigere Kosten bei großen Stückzahlen von Sensorknoten mit sehr reduziertem Funktionsumfang; erheblich höhere Kosten bei anwendungsspezifischen Entwicklungen)

Abbildung 37: Aufbau- und Verbindungstechnik, Komponenten



Komponenten für das Energy Harvesting sowie die Sensorik werden in den nachfolgenden Abschnitten separat behandelt.

7.2.3.2 Roadmap: Energy Harvesting Technologien

Im Bereich industrieller Anwendungen, genauer der M2M³²⁴-Kommunikation, benennt die EPoSS Forschungsagenda das Energy Harvesting als Forschungsthema erst ab etwa 2015³²⁵, was jedoch im Widerspruch zu bereits laufenden F&E-Aktivitäten und der führenden Rolle steht, die industrielle Anwendungen bei der Markteinführung von AVM kurz- und mittelfristig spielen, wenn zunächst auch nur batteriebasiert.

Die in Abbildung 38 dargestellte Roadmap für den Bereich Energy Harvesting für AVM basiert insbesondere auf der detaillierten Analyse von Benecke^{326,327}.

Grundsätzlich ist das Thema Energy Harvesting als ein wesentlicher limitierender Faktor für den breiteren AVM-Einsatz anzusehen: Solarzellen haben bereits einen vielfach akzeptablen Entwicklungsstand erreicht, weitere Wirkungsgrad- und Kostenoptimierungen sind für eine breitere AVM-Anwendung noch unerlässlich. Mikrobrennstoffzellen können eine Option zur Energieversorgung darstellen; die Größe des erforderlichen Treibstoffspeichers kann jedoch kritisch sein, wenn besonders kleine Bauformen gefordert sind. Wafer-Level-Prozesse zur Fertigung von Polymer-Elektrolyt-Membran (PEM) Brennstoffzellen sind bereits entwickelt worden³²⁸.

Für die unterschiedlichen Wandlerprinzipien bestehen insbesondere zwei wesentliche Entwicklungsaufgaben:

1. Erhöhung der Energieausbeute (bei akzeptablen Baugrößen), sowie
2. Realisierung einer durchgängigen Fertigung mit Prozessen der Mikrosystemtechnik, v.a. Dünnschichtverfahren

Wesentliche MST-Fertigungsprozesse sind verfügbar, in Einzelfällen jedoch nicht für bestimmte Materialien: So ist z.B. die Schichtabscheidung und Strukturierung magnetischer Materialien nicht ausgereift, so dass zum gegenwärtigen Stand eine durchgängige mikrosystemtechnische Fertigung induktiver Wandler noch nicht verfügbar ist.

³²⁴ Machine-to-Machine

³²⁵ EPoSS: Strategic Research Agenda 2009, EPoSS Office / VDI/VDE-IT, Berlin

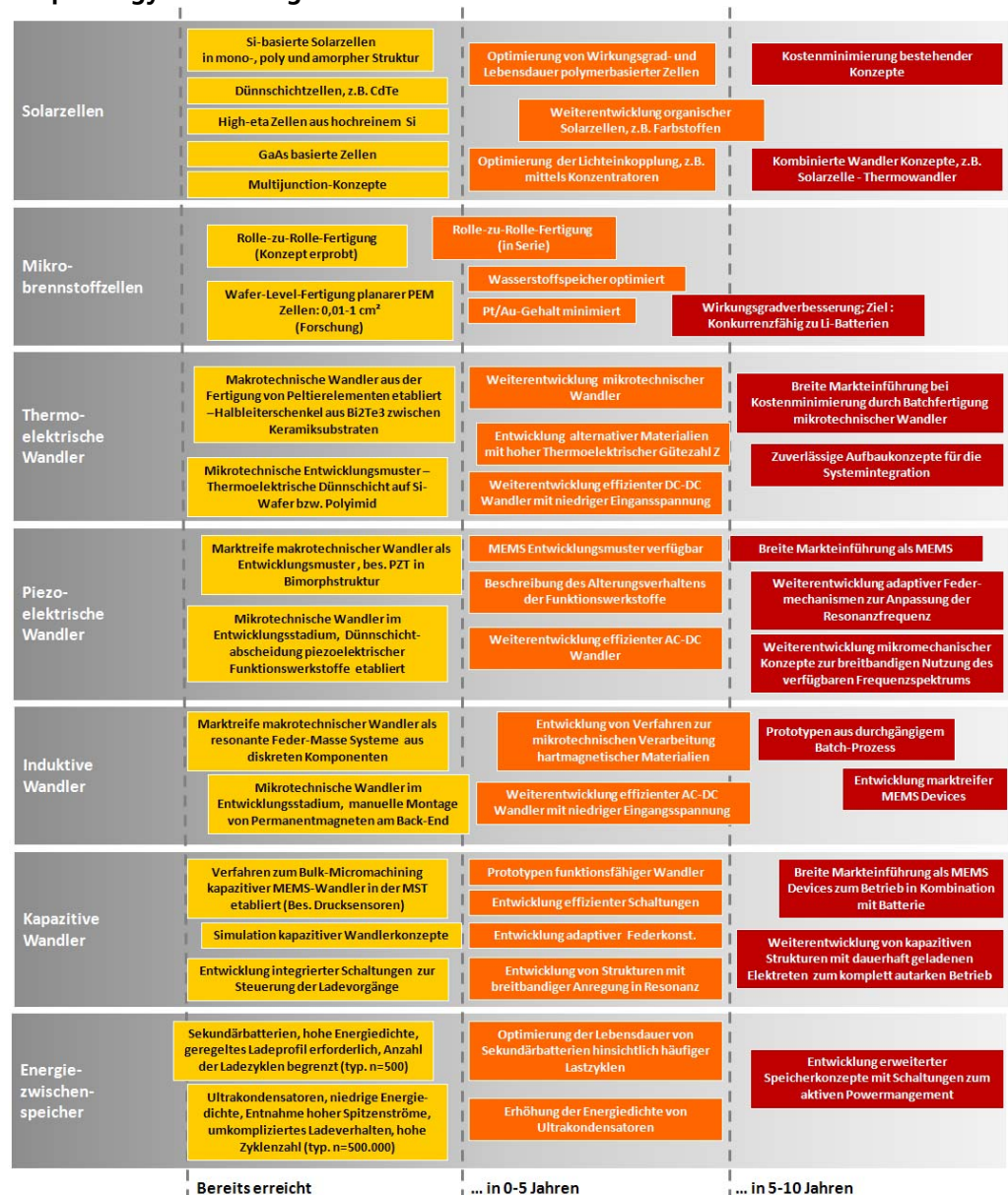
³²⁶ Benecke, S.; Nissen, N.F.; Reichl, H.: Environmental Comparison of Energy Scavenging Technologies for Self-Sufficient Micro System Applications, 2009 ISSST International Symposium on Sustainable Systems and Technology, 18.-20.Mai 2009, Phoenix, Arizona

³²⁷ Benecke, S.: Energy Harvesting in der Mikrosystemtechnik – Technische Möglichkeiten und Grenzen unter Berücksichtigung nachhaltiger Aspekte, Diplomarbeit an der Technischen Universität Berlin, 2008

³²⁸ Reichl, H.; Wolf, M.J.: Electronic Dust and e-Grains; in: Aarts, E.H.L.; Encarnaçao, J.L. (Hrsg.): True Visions - The Emergence of Ambient Intelligenc, Springer-Verlag, 2006, Berlin/Heidelberg

Die Leistung von mikrosystemtechnisch aufgebauten Wandlern bewegt sich durchgängig im Mikrowatt-Bereich, für zahlreiche Anwendungen ist jedoch der Milliwatt-Bereich anzustreben.

Abbildung 38: Roadmap Energy Harvesting

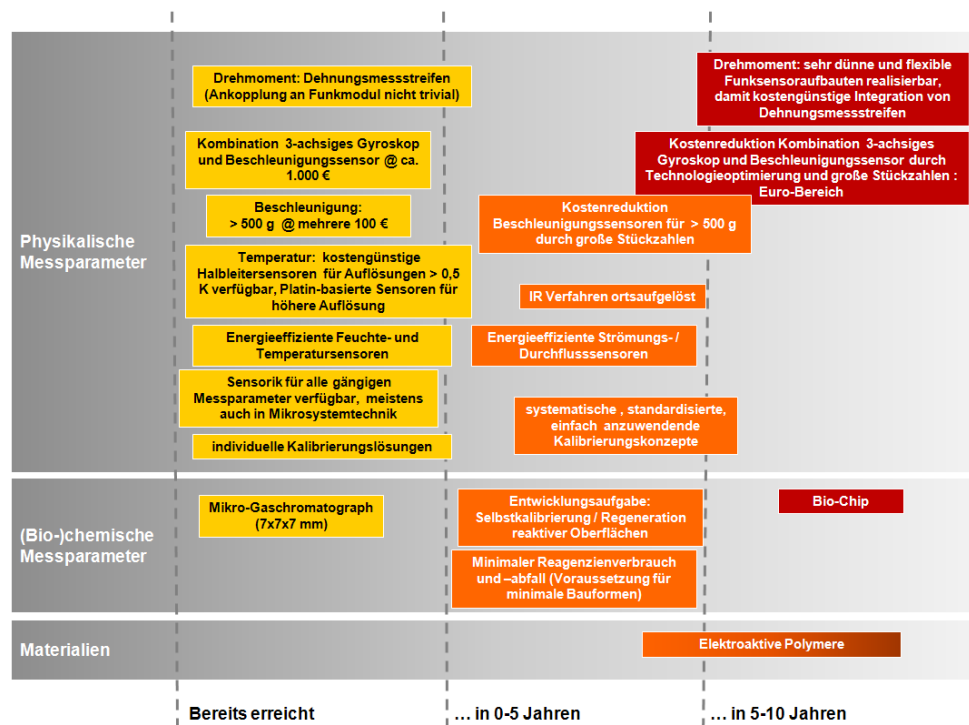


Für viele Anwendungsfälle wird auch ein Energiezwischenspeicher erforderlich sein, so z.B. um mit Solarzellen betriebene AVM bei Dunkelheit mit Energie zu versorgen – wenn erforderlich. Für den Einsatz von aufladbaren Batterien ist die Anzahl der Ladezyklen (500 bei gängigen Typen) häufig limitierend: Tägliche Aufladung bedeutet eine Lebensdauer von unter 2 Jahren. Doppelschichtkondensatoren dagegen erlauben zwar deutlich mehr Ladezyklen, weisen aber nach gegenwärtigem Entwicklungsstand eine erheblich geringere Energiedichte auf.

7.2.3.3 Roadmap: Sensorik

Aufgrund der extremen Breite möglicher zu erfassender Parameter geht die Roadmap nur auf einige ausgewählte Messparameter ein, die jedoch für einen massenhaften künftigen Einsatz von AVM besondere Relevanz haben. Unterschieden wird nach physikalischen und chemischen bzw. biochemischen Messparametern.

Abbildung 39: Roadmap Sensorik



In jüngster Vergangenheit sind bereits hoch-miniaturisierte Analyse- und Sensoren entwickelt worden, wie z.B. TNOs Mikro-Gaschromatograph³²⁹ mit Abmessungen von 7x7x7 mm³.

Als Anforderung aus der Prozessindustrie (v.a. Chemie und Pharmazie) identifiziert die NAMUR-Roadmap³³⁰ Entwicklungsziele, die für die Umsetzung in AVM relevant werden können, insbesondere orts aufgelöste IR Verfahren (ca. ab 2010) und Bio-Chips (ca. ab 2015).

Elektroaktive Polymere können durch das Anlegen einer Spannung ihre Form ändern und so als Sensoren oder Aktuatoren dienen (gegebenenfalls auch als Material für Energy Harvester³³¹).

7.2.3.4 Roadmap: Netzwerk

Die WiSeNts Research Roadmap benennt insbesondere die Ortsbestimmung von (mobilen) Sensorknoten als wichtige Forschungsaufgabe: Zwar existieren einige konzeptionelle Ansätze (Abstandsbestimmung aufgrund Funksignalstärke, Laufzeit von Signalen zwischen Sensorknoten...), die jedoch in der praktischen Umsetzung bislang noch auf erhebliche Probleme stoßen³³². Für den Bereich der Ultrabreitbandtechnologie (UWB) propagiert Ubisense eine kommerzielle Lösung zur Ortsbestimmung mit einer Genauigkeit von 15 cm³³³.

Die Entwicklung kontextsensitiver Ansätze für die Datenerfassung, -verarbeitung und -verbreitung über das Netzwerk wird als eines der vielversprechendsten, aber auch herausforderndsten Probleme gesehen³³⁴.

Herausforderungen an die Forschung umfassen in den nächsten Jahren für den Bereich drahtloser Sensornetzwerke u.a.³³⁵:

- Methoden und Algorithmen für spontane ad-hoc Kooperation zwischen Objekten,

³²⁹ Simonis, F.: Sensors; TNO, Future Technology Center, 18. Mai 2005, <http://www.futuretechnologycenter.eu/downloads/sensors.pdf>

³³⁰ NAMUR, VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (GMA), Fraunhofer IPA: Technologie-Roadmap Prozess-Sensoren 2005 – 2015

³³¹ Marrón, P.J.; Minder, D. et al.: Embedded WiSeNts Research Roadmap, November 2006

³³² Marrón, P.J.; Minder, D. et al.: Embedded WiSeNts Research Roadmap, November 2006

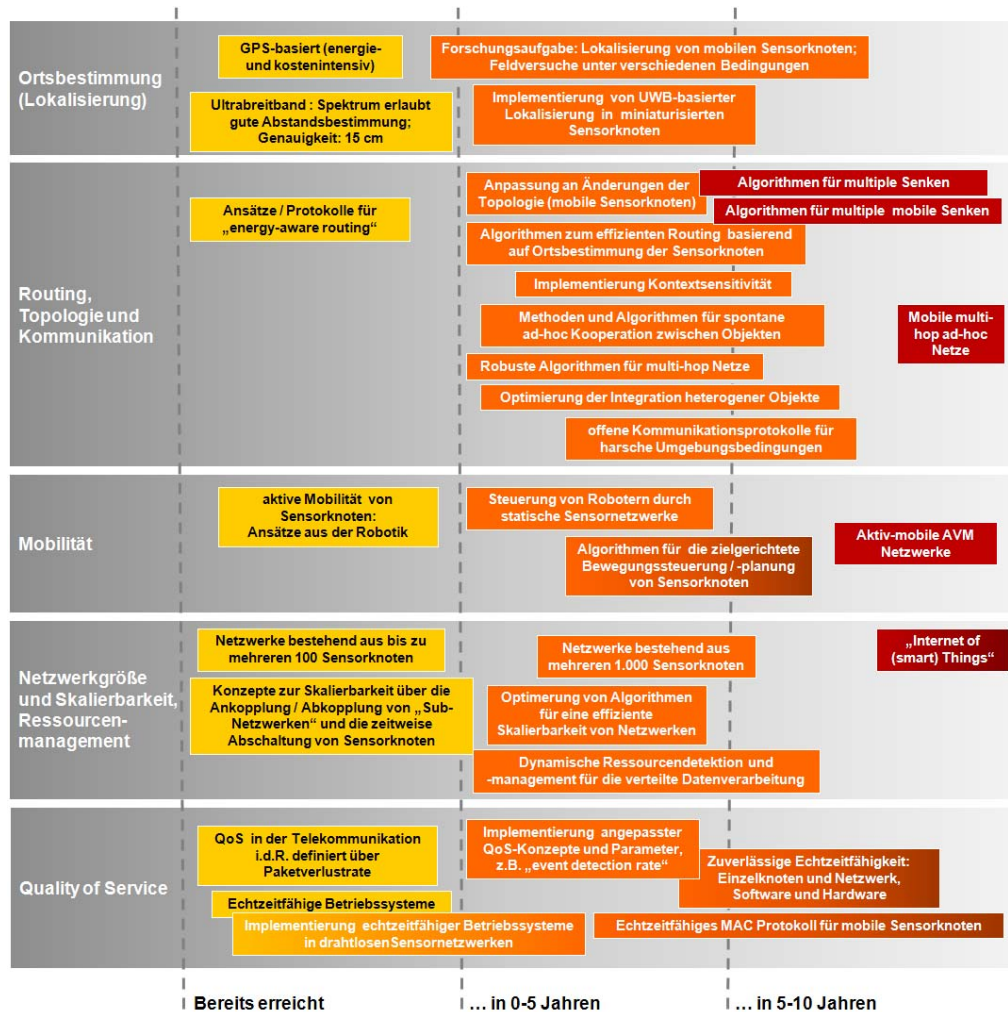
³³³ Ubisense: Ortrander Eisenhütte und das Fraunhofer ALL integrieren Echtzeit-Ortungssystem der Ubisense AG in Forschungsprojekt für RFID-Anwendungen in rauen Industrieumgebungen, 2. Oktober 2008, Ortrand, Dortmund (Pressemitteilung)

³³⁴ Fasolo, E.; Prehofer, C.; Rossi, M.; Wei, Q.; Widmer, J.; Zanella, A.; Zorzi, M.: Challenges and new approaches for efficient data gathering and dissemination in pervasive wireless networks; Integrated Internet Ad hoc and Sensor Networks, 30-31.Mai 2006, Nizza / Frankreich

³³⁵ Europäische Kommission: ICT – Information and Communication Technologies, Work Programme 2009-10 unter dem 7. Forschungsrahmenprogramm, Brüssel, S. 40

- Dynamische Ressourcendetektion und –management für die verteilte Datenverarbeitung innerhalb eines Netzwerks,
- offene Kommunikationsprotokolle für harsche Umgebungsbedingungen (industrielle Anwendungen und „outdoor“).

Abbildung 40: Roadmap Netzwerk



Eine besondere Herausforderung in der Umsetzung stellen Sensorknoten dar, die sich aktiv bewegen sollen, um Aufgaben auszuführen³³⁶: Aus dem Bereich der Robotik sind solche Ansätze bekannt, adaptiert auf Sensornetzwerke gibt

³³⁶ Marrón, P.J.; Minder D. et al.: Embedded WiSeNts Research Roadmap, November 2006

es Bestrebungen, (mobile) Roboter durch statische drahtlose Sensornetzwerke zu steuern und ggf. die Sensorik vollständig von den Netzwerken als Aufgabe übernehmen zu lassen. Perspektivisch sind auf dieser Grundlage Algorithmen anzupassen, so dass sich Sensorknoten selbst mobil durch das Netzwerk steuern können.

7.2.4 Besonderheiten und Rahmenbedingungen AVM-Einsatz in der Landwirtschaft

Die Vision für AVMs im Anwendungsfeld Precision Farming ist ein „Labor im Feld“, das alle für eine optimale Flächenbewirtschaftung erforderlichen Parameter regelmäßig monitort, der einfachen Handhabung wegen „ausgesät“ werden kann und über mehrere Jahre zuverlässig Messwerte liefert. Eine solche Vision wird sich jedoch absehbar nicht vor 2020 – eher nach 2025 – realisieren lassen und erfordert neben der Technikentwicklung (v.a. Sensorik) auch Grundlagenforschung der Agrarwissenschaften für ein ausreichendes Verständnis der zu erfassenden Parameter sowie die Verfügbarkeit entweder biologisch abbaubarer³³⁷ oder mineralisch inerte AVM.

Nach gegenwärtigem Entwicklungsstand sind für das Precision Farming Sensorknoten mit einem umschreibenden Volumen von 2.257 cm³ und 544 g Gewicht kommerziell verfügbar³³⁸.

An Funk- und Kommunikationstechnik stellt der Anwendungsfall Precision Farming keine besonderen Anforderungen, solange die Sensorknoten nicht untergepflügt werden und somit die Antenne eine Funkverbindung durch bis zu 1 m Bodenbedeckung ermöglichen muss.

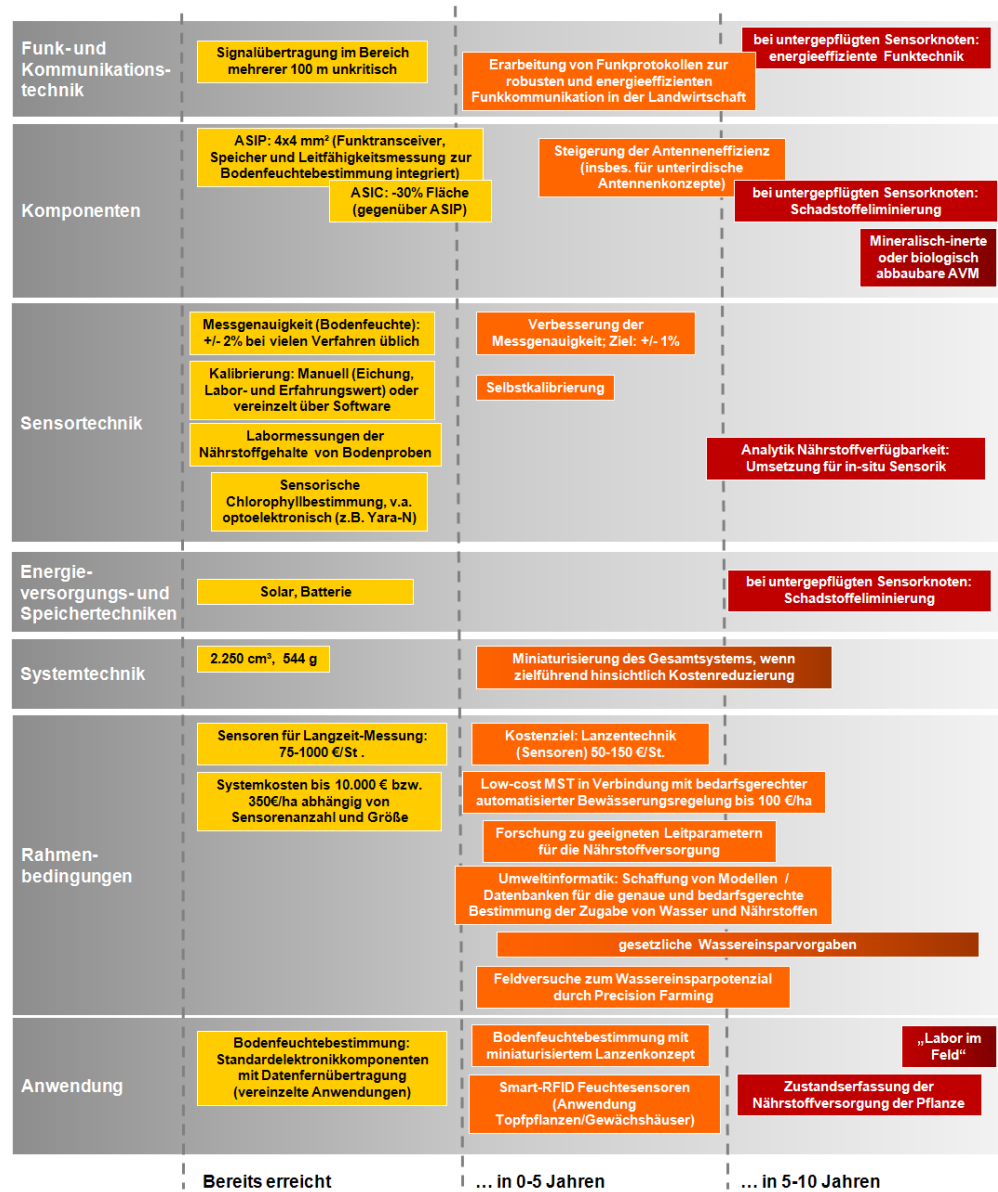
Auch Energieversorgungs- und Speichertechnik sind als unkritisch anzusehen, da Lösungen verfügbar sind (Solarzellen, Batterien) – jedoch ein Bedarf an Kostoptimierung besteht um das Gesamtkostenziel zu erreichen.

Die Schadstoffeliminierung für sämtliche Komponenten von AVM, die langfristig im Boden verbleiben, ist ein grundlegendes Entwicklungsziel. In der grafischen Darstellung der Roadmap ist diese Anforderung explizit der Komponente „Energieversorgungs- und Speichertechniken“ zugeordnet, weil insbesondere Energiespeicher bzw. Batterien potenziell Schadstoffe enthalten.

³³⁷ „biologisch abbaubar“ stellt einen deutlichen Zielkonflikt zur Forderung nach zuverlässigen, langlebigen (mehreren Jahren) Sensorknoten dar, deren Eigenschaft es sein muss, gegenüber allen Umwelteinflüssen im Boden unempfindlich zu sein; folglich wäre ein „programmierter“ Beginn des Abbaus nach einer vorgegebenen Nutzungsdauer zu implementieren

³³⁸ Crossbow Technology Inc.: eKo Components for Environmental Monitoring, Produktdatenblatt, Document Part Number: 6020-0138-01, Rev A, 2008/09, San Jose, USA

Abbildung 41: Roadmap Anwendungsfall Precision Farming



7.2.5 Besonderheiten und Rahmenbedingungen AVM-Einsatz in der Automatisierungstechnik

Zur Beseitigung der vielfältigen Anwendungshemmnisse für industrielle Funksensorik können folgende Forschungsschwerpunkte benannt werden

- **Leistungsarme Vibrations- und Drehzahlmessungen:** Messgrößen basierend auf Beschleunigungsmessungen müssen recht häufig abgetastet werden, so dass der Energiebedarf für die Sensorik erheblich das Systemvolumen bestimmt. Daher sind Verfahren zu entwickeln, die eine durchschnittliche Leistungsaufnahme im unteren Mikrowatt-Bereich erlauben.
- **Maschinendiagnose:** Es sind Algorithmen zu entwickeln, die anstatt einer ineffizienten Funkübertragung von Rohdaten, die Messdaten auswerten (Smart Sensor) und auf wenige technische Parameter (z.B. Index für Getriebealterung) verdichten.
- **Robuste Funkkommunikation:** Massive Interferenzen im Industrieumfeld bedingen zusätzlichen Energiebedarf zur Reduktion der Paketfehlerrate bei der Funkkommunikation. Es werden Verfahren gesucht, um diese zusätzliche Leistungsaufnahme zu minimieren. Weiterhin sind Konzepte zum senderseitigen Wake-Up zu entwickeln, da dies ein deutliches Energieeinsparpotenzial erwarten lässt.
- **Hocheffiziente Energiewandlung und -aufbereitung:** Es werden Architekturkonzepte für autarke Energieversorgungen benötigt, die eine Systemgröße unter einem Kubikzentimeter erlauben.
- **Modulare Aufbau- und Verbindungstechnik:** Zur Sicherung größerer Stückzahlen von Teilmodulen und zur effizienten Anpassung an die geforderten Leistungsparameter sind Modulkonzepte zu entwickeln, die neben einer hohen Zuverlässigkeit in rauen Umgebungen auch kostengünstig gefertigt werden können und dabei Systemgrößen unter einem 1 Kubikzentimeter unterstützen.

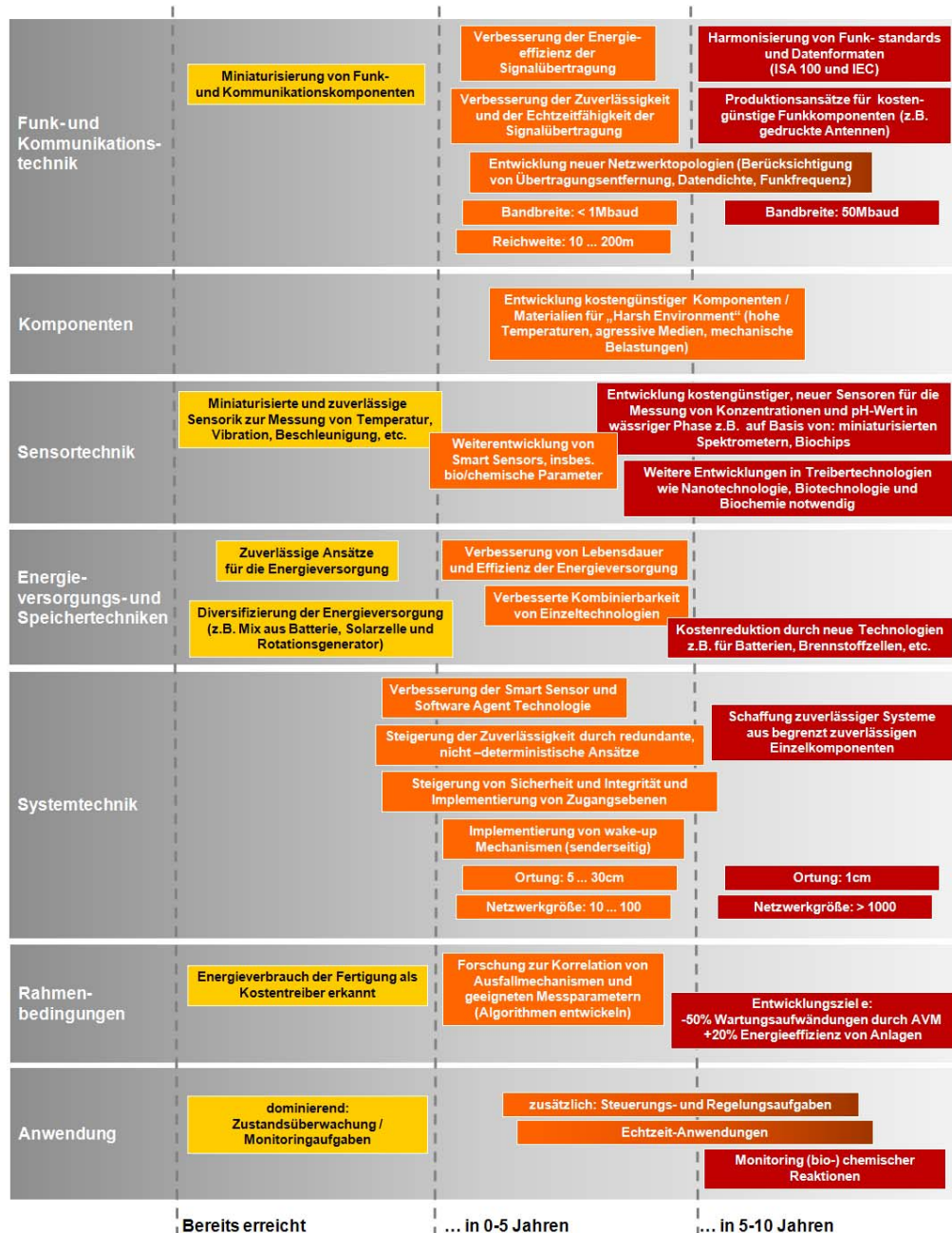
Die breite Verfügbarkeit von energie- und kommunikationsautonomen Sensorelementen für die Prozessführung in der chemischen und pharmazeutischen Industrie wird für das Jahr 2015 erwartet³³⁹.

Entwicklungsziele für den Einsatz von AVMs in der Automatisierungstechnik sind:

- Deutliche Reduktion der Wartungsaufwendungen für Produktions- und Automatisierungstechnik (ca. 50%)
- Deutliche Kostenersparnis durch vereinfachte Installation und Steigerung der Prozess- und Produktqualität
- Steigerung der Energieeffizienz von Produktions- und Automatisierungstechnik (ca. 20%)

³³⁹ NAMUR, VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (GMA), Fraunhofer IPA: Technologie-Roadmap Prozess-Sensoren 2005 – 2015

Abbildung 42: Roadmap Anwendungsfall Automatisierungstechnik



Grundsätzlich lässt sich zusammenfassen, dass die Entwicklung zuverlässiger Anwendungen von AVMs in der Automatisierungstechnik neben der der Ent-

wicklung einzelner Teilkomponenten wie z.B. Sensoren und der Energieversorgung vor allem eine systemtechnische Herausforderung ist. Ein Entwicklungsziel sollte daher auch in der Schaffung zuverlässiger AVM-Systeme aus weniger zuverlässigen Einzelkomponenten sein. Lösungsstrategien können daher auch in der redundanten und robusten Absicherung zentraler Funktionen wie z.B. der Energieversorgung aus mehreren Quellen liegen.

Die **Funk- und Kommunikationstechnik** steht mittelfristig vor der Aufgabe die Energieeffizienz der Signalübertragung zu verbessern. Eine besondere Herausforderung stellen hohe Übertragungssicherheit und –leistung bei niedrigem Energieverbrauch dar. Auch die Zuverlässigkeit und Echtzeitfähigkeit der Signalübertragung sind mittelfristig deutlich zu verbessern: Gegenwärtig ist die erreichte Zuverlässigkeit mit ca. 80% zu niedrig und muss an Anforderungen aus der Praxis angepasst werden. Insbesondere die Koexistenz verschiedener Standards muss robust möglich sein. Langfristig ist die Harmonisierung von Funkstandards und Datenformaten (ISA 100 und IEC) zwingend erforderlich, um verschiedene Komponenten der Automatisierungstechnik miteinander vernetzen zu können.

Die erforderliche **Sensortechnik** für viele Standardparameter wie z.B. Temperatur, Vibration, Beschleunigung, etc. ist weitgehend als zuverlässige und miniaturisierte Sensoren verfügbar. Langfristig stellt die Entwicklung von kostengünstigen und neuen Sensoren eine Herausforderung dar: Für die Messung von Konzentrationen und pH-Wert in wässriger Phase ist die Entwicklung vollständig neuer Sensoren notwendig, vielversprechende Ansätze könnten z.B. miniaturisierte Spektrometer und Biochips sein. Für die Weiterentwicklung der Sensortechnik sind Entwicklungen in Schlüsseltechnologien wie z.B. Nanotechnologie, Biotechnologie und Biochemie notwendig.

Hinsichtlich der **Energieversorgungs- und Speichertechniken** sind mittelfristig eine Verbesserung von Lebensdauer und Effizienz der Energieversorgung notwendig um die Vorteile der Kabelfreiheit auszuspielen. Ebenso ist die Kombinierbarkeit verschiedener Energiequellen anzustreben.

Mittel- bis langfristig erfordert die **Systemtechnik** eine Verbesserung der Smart Sensor und Software Agent Technologie in Richtung intelligenter, ausfallssicherer und energieeffizienter Signalauswertung. Eine Steigerung der Zuverlässigkeit durch redundante, nicht –deterministische Ansätze ist anzustreben, insbesondere sind langfristig zuverlässige Systeme aus begrenzt zuverlässigen Einzelkomponenten zu schaffen.

7.3 Stärken-Schwächen-Analyse

In Anlehnung an die SWOT-Analyse der Bundesregierung zum Innovationsfeld IKT³⁴⁰ zeigt die Matrix in Tabelle 51 die Konkretisierung dieses Stärken-Schwächen-Profiles für Autonome Verteilte Mikrosysteme auf.

Auffällig ist die führende Position der deutschen Industrie sowohl im Bereich wichtiger AVM-Anwendungsfelder (Maschinen- und Anlagenbau, Automobilbau, Medizintechnik etc.) als auch bei den relevanten IKT-Basistechnologien, so dass durch Abdeckung der kompletten Wertschöpfungskette die Voraussetzungen für AVM als Innovationstreiber „Made in Germany“ als sehr gut einzuschätzen sind.

Aus der SWOT-Analyse ergeben sich direkt Handlungsempfehlungen für die weitere Forschung und Entwicklung:

Technologisch ist ein Schwerpunkt zu legen auf

1. **Energieeffizienz und Powermanagement von AVM-Komponenten**, da die Energieversorgung häufig limitierender Faktor für Lebensdauer und/oder Miniaturisierung sind,
2. **Technologien der Miniaturisierung und Systemintegration**; jedoch ist ein hoher Miniaturisierungsgrad bei weitem nicht für alle Anwendungsfälle zwingend erforderlich,
3. **Sensorik für (bio-)chemische Analytik** mit der Fähigkeit zur Regeneration der reaktiven Flächen und zur Selbstkalibrierung
4. Optimierung der Netzwerkprotokolle für **multi-hop Netzwerke und Selbstorganisation**, sowie vorausschauende und reaktive Systeme, Netzwerke mit mehreren hundert Sensorknoten

Aus der Sicht *gesellschaftlicher Anforderungen* sind insbesondere Sicherheits- und Akzeptanzfragen als kritisch einzustufen und durch begleitende Maßnahmen zu adressieren – wenn auch für die hier im Detail untersuchten Anwendungsfelder diese Problematik von untergeordneter Bedeutung ist.

Wesentlicher Handlungsbedarf von Seiten *ökologischer Anforderungen* lässt sich mit folgenden Schwerpunkten umreißen:

³⁴⁰ Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF): IKT 2020 - Forschung für Innovationen, Hightech-Strategie, Bonn/Berlin, 2007

1. **Vermeidung von besonders seltenen Basismetallen**, sofern Massen Anwendungen von AVM adressiert sind,
2. **Vermeidung von Schadstoffen in den Komponenten**, insbesondere für schwer bzw. nicht rückholbare Sensorknoten,
3. **Vorantreiben von „Grünen“ AVM-Anwendungen**, d.h. Entwicklung von Lösungen für Anwendungsfelder, in denen Monitoring durch Sensorknoten zu erheblichen Effizienzsteigerungen und Umweltentlastungen führen können, einschließlich der Begleitforschung zu den erzielbaren Effekten und deren Maximierung – zumal der Einsatz von AVM vielfach eine flankierende Maßnahme im Rahmen von Prozess- und Anlagenoptimierungen darstellt und somit eine Gesamtsystembetrachtung erforderlich ist.

Eine erhebliche Lücke ist zudem zu konstatieren zwischen den technischen Möglichkeiten, die Sensornetzwerke bereits heute und in naher Zukunft ermöglichen, und der Kenntnis über diese Möglichkeiten in den potenziellen Anwendungsbereichen: Hier ist eine verstärkte **interdisziplinäre Kooperation** anzustreben, z.B. im Rahmen von Expertenworkshops, die die AVM-Experten zusammenbringen mit Experten aus verschiedenen potenziellen Anwendungsbereichen. Nur so lassen sich technologisches „Angebot“ und die Nachfrage zusammenbringen und Anwendungskonzepte gemeinsam entwickeln.

Tabelle 51: SWOT-Analyse zum Innovationsfeld Autonomer Verteilter Mikrosysteme

Stärken	Chancen
<ul style="list-style-type: none"> ■ Maschinen- und Anlagenbau: Schwerpunkt der deutschen Exportwirtschaft, Technologieführerschaft ■ Automobilbau, Medizintechnik, Chemie: Führende Position der deutschen Industrie ■ Informations- und Kommunikationstechnologie: Kompetenzen im Bereich der Elektronikfertigung und der Systemintegration, Embedded Systems, RFID als Basistechnologie ■ Drahtlosen Sensornetzwerke in industriellen Anwendungen: Weltmarktanteil Europas steigt bis 2011 von 24% auf 32% ■ Forschungslandschaft: Hoher Grad an Vernetzung; FhG ist die größte IKT-Forschungseinrichtung Europas; Forschung zu drahtlosen Sensornetzwerken an zahlreichen deutschen Universitäten ■ Hightech-Strategie: Ausrichtung (u.a.) auf Innovationsfelder IKT und Mikrosystemtechnik 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Wachstumsmärkte: Prognostiziertes mittelfristiges Marktvolumen für drahtlose Sensornetzwerke im Bereich mehrerer 100 Millionen Sensorknoten ■ Zunehmende Komplexität des Einsatzes: kurzfristig Fokus auf Monitoringaufgaben, mittel- bis langfristig Steuerungs- und Regelungsaufgaben ■ „Grüne“ AVM: Beitrag von AVM in zahlreichen Anwendungsfeldern kann zu erheblichen Umweltentlastungen bzw. Effizienzgewinnen beitragen, Folgen des Klimawandels mindern ■ Produktivitätssteigerung: Prozessoptimierungen, Produktion in Deutschland wird wettbewerbsfähiger ■ Beschäftigungssicherung: Hightech-Bereiche ■ Exponierte Rolle für KMU: möglich als Systemanbieter, für Systemimplementierung und Serviceaufgaben, Komponententechnologien (MST), Spezialisierung auf neue Marktnischen (Anwendungsfelder)
Schwächen	Herausforderungen
<ul style="list-style-type: none"> ■ Reboundeffekte: Personaleinsparung durch zunehmende Automatisierung, verstärkter Einsatz technischer Systeme ■ Präzisionslandwirtschaft: Führende Systemanbieter in USA, Australien; begrenztes Einsatzpotenzial im Bereich Bewässerung in Deutschland ■ Nischenmärkte: einige Anwendungsfelder mit hohem Optimierungspotenzial durch AVM lassen sich absehbar aufgrund der spezifischen Anforderungen nicht mit kostengünstigen Komponenten bedienen ■ Standardisierung / Kompatibilität: insbesondere im industriellen Umfeld sehr begrenzte Harmonisierung gegenwärtig, mangelnde internationale Harmonisierung ■ Forschungskonkurrenz zu den USA: Entwicklungen im Bereich „smart dust“ u.ä. in den USA getrieben durch Militärforschung und Heimatschutz 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Sicherheitsaspekte / Akzeptanz: Datensicherheit, „gläserner Bürger“, Nähe zur Militärtechnik und Schutz der Netze vor Angriffen und Manipulation ■ Miniaturisierung von AVM erfordert wiederholte Technologiewechsel: Übergang von Standardaufbauten zu Flex-basierten 2,5-D-Aufbauten zur Vertikalen Systemintegration ■ Energieeffizienz von AVM-Komponenten: Schlüsselfragen der Energieversorgung (Energy Harvesting) und dem möglichst effizienten Betrieb von Sensorknoten (Algorithmen, Betriebssystem, Komponenten, Funkkonzept etc.) ■ Sensorentwicklung: insbesondere für kontinuierliche (bio-)chemische Analytik, Selbstkalibrierung ■ Ressourceneffizienz: weitgehende Reduktion der Verwendung seltener Rohstoffe, da sonst die Rohstoffbasis für die großzahlige Produktion fehlt ■ Schadstoffeliminierung: Entwicklung von Materialalternativen für potenziell nicht rückholbare AVM ■ Standard-AVM versus anwendungsspezifische AVM: Kostenreduktion braucht Massenmärkte (Standard-Komponenten), Widerspruch zu anwendungsspezifischer Systemoptimierung (z.B. Energieeffizienz) ■ Einsatz in nicht-technologieaffinen Anwendungsfeldern: Implementierungsbarriere für AVM senken (anwenderfreundlich)

8 Literatur

- Aad, I.; Hubaux, J.-P.; Knightly, E.: Denial of Service Resilience in Ad Hoc Networks. In: Proc. of the 10th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, ACM Press, Philadelphia, PA, USA (2004), pp. 202–215.
- Agamloh, E.; Butler, K.; Kaufman, N., Kellum, Z.; Morrison, J.; Welch, D.: Achieving More with Less: Efficiency and Economics of Motor Decision Tools, 2006
- Agricon: Werden bei der N-Sensordüngung die hohen Erträge ausgedüngt oder weggedüngt? 2008
- Al-Shurman, M.; Yoo, S.-M.; Park, S.: Black Hole Attack in Mobile Ad Hoc Networks. In: Proc. of the 42nd Annual ACM Southeast Regional Conference, ACM Press, Huntsville, AL, USA (2004), S. 96–97.;
- Anders, A.: Digital Networks for the Future – Wireless Sensors / Actuators / Controls, Juli 2007, Bezug auf: OnWorld Marktbericht vom Februar 2004
- Anders, A.; Schmidt, F.: Entscheidungshilfe Funkstandards – Welches Funksystem wann einsetzen?, perpetuum 10/2007
- Angerer, G.; Marscheider-Weidemann, F.; Lüllmann, A.; Erdmann, L.; Scharp, M.; Handke, V.; Marwede, M.: Rohstoffe für Zukunftstechnologien – Einfluss des branchenspezifischen Rohstoffbedarfs in rohstoffintensiven Zukunftstechnologien auf die zukünftige Rohstoffnachfrage, Schlussbericht, 2. Februar 2009, Karlsruhe / Berlin, S. 82ff.
- Automatisierungstechnik 2010. Thesen der Task-Force „Automatisierungstechnik 2010“ der VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (GMA), 3. Juni 2003
- Banker, S.: Dow's RFID Journey, Insight # 2008-23ELMP, 5. Juni 2008
- Bartos, S. C.; Lieberman, D.; Burton, C. S.: Estimating the Impact of Migration to Asian Foundry Production on Attaining the WSC 2010 PFC Reduction Goal, 2004
- Beigl, M.: Ubiquitous Computing (Ubiquitäre Informationstechnologien), 2006
- Benecke, S.: Energy Harvesting in der Mikrosystemtechnik – Technische Möglichkeiten und Grenzen unter Berücksichtigung nachhaltiger Aspekte, AVT-Seminar, Technische Universität Berlin, Forschungsschwerpunkt Technologien der Mikroperipherik, 6. November 2008, Berlin
- Benecke, S.: Energy Harvesting in der Mikrosystemtechnik – Technische Möglichkeiten und Grenzen unter Berücksichtigung nachhaltiger Aspekte, Diplomarbeit an der Technischen Universität Berlin, 2008
- Benecke, S.; Nissen, N.F.; Reichl, H.: Environmental Comparison of Energy Scavenging Technologies for Self-Sufficient Micro System Applications, 2009 ISSST International Symposium on Sustainable Systems and Technology, 18.-20. Mai 2009, Phoenix, Arizona
- Bennett, B. et al.: Assessment Study on Sensors and Automation in the Industries of the Future: Reports on Industrial Controls, Information Processing, Automation, and Robotics, 2004
- Bensky, A.: Short-range Wireless Communication, LLH Technology Publishing, Eagle Rock, VA, USA, 2000
- Beucker, S.; Clausen, J.; Schischke, K.; Mwanza, J.; Altendorf, P.; Reichl, H.: Wireless Sensor Networks for Agriculture and Automation: Challenges and Chances for Sustainability, Electronics Goes Green, 8.-10. September 2008, Berlin
- Biniasch, A.: Abnutzungsvorrat optimal ausgenutzt - CMS im Einsatz bei einem Konfitüren- und Süßwarenhersteller, Der Betriebsleiter, 5/2005
- Bramm, A.: Berechnung. In: Hydro Agri Dülmen GmbH: Faustzahlen für Landwirtschaft und Gartenbau. Landwirtschaftsverlag GmbH, Bochum, 1993, 12. Auflage, S. 520-530.
- Brooke, T.; Burrell, J.; Teibel, D.: Proactive Computing in Agriculture, www.intel.com/research
- Bucher, T.: Modellierung und Analyse von Angriffen auf Routingverfahren in mobilen Ad-hoc-Netzen. Diplomarbeit, Technische Universität Darmstadt, 2005
- Building Wireless Sensor Networks: A variety of factors contributes to the successful design and operation of a wireless sensor network (WSN), including propagation conditions and requirements for size and power consumption, 2006

- Bullinger, H.-J.; ten Hompel, M. (Hrsg.): Internet der Dinge, VDI-Buch, 2007
- Bundesamt für Umwelt BAfU: Graue Treibhausgas-Emissionen der Schweiz 1990-2004, 2007
- Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF): Die Hightech-Strategie für Deutschland, Bonn / Berlin, 2006
- Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF): IKT 2020 - Forschung für Innovationen, Hightech-Strategie, Bonn/Berlin, 2007
- Bundesnetzagentur: Allgemeinzuteilung von Frequenzen in den Frequenzbereichen 868 – 870 MHz und 169 MHz für nichtöffentliche Funkanwendungen für Alarmierungszwecke (Vfg. 20/2006)
- Burrel, J.; Brooke, T.; Beckwith, R.: Vineyard Computing: sensor Networks in Agricultural Production, Pervasiv Computing, IEEE CS and IEEE ComSoc, January-March 2004, p. 38-45
- Cerpa, A., Elson, J., Estrin, D., Girod, L., Hamilton, M., and Zhao, J. Habitat monitoring: application driver for wireless communication technology. In Proceedings of the ACM Sigcomm Workshop on Data Communication (San Jose, Costa Rica, April 2001).
- Chalard, L.; Helal, D.; Verbaere, L.; Wellig, A.; Zory, J.: Wireless Sensor Networks Devices: Overview, Issues, State-of-the-Art and Promising Technologies, ST Journal of Research, Vol. 4, No. 1, 2007
- Chan, I.: ITP Technology Development: Innovations to Capture New Opportunities in Energy Efficiency, U.S. Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy, 2007
- Clausen, J.; Walter, S.: Marktsituation und Anreizstrukturen. In: Institut für ökologische Wirtschaftsforschung, Öko-Institut e.V., Schweisfurth-Stiftung, Freie Universität Berlin, Landesanstalt für Großschutzgebiete (Hrsg.): Agrobiodiversität entwickeln! Handlungsstrategien für eine nachhaltige Tier- und Pflanzenzucht, Endbericht, Berlin, 2004, Online unter www.agrobiodiversitaet.net vom 16.1.2008
- Crossbow Technology Inc.: eKo Components for Environmental Monitoring, Produktdatenblatt, Document Part Number: 6020-0138-01, Rev A, 2008/09, San Jose, USA
- Das, R.; Harrop, P. (IDTechEx): RFID Forecasts, Players & Opportunities 2008-2018, 2008, Cambridge, MA
- Delwiche, M.; Coates, R.: Precision Irrigation in Landscapes by Wireless Network, Progress Report for Slosson Endowment, 2007
- Demmel, M.: Bewässerung – Eine Strategie zur Verstetigung von Menge und Qualität im Kartoffelanbau und der Kartoffelvermarktung. Vortrag aus der 37. Woche der bayerischen Erzeugergemeinschaften Haus der bayerischen Landwirtschaft in Herrsching am 19. November 2007
- Deutsche Energie-Agentur: Druckluftsysteme: Mehr Energieeffizienz, weniger Kosten, 2006
- Deutsche Energie-Agentur: Wartung und Instandhaltung von Pumpen und Pumpensystemen, o.J.
- Deutscher Bundestag: Drucksache 16/3218 16. Wahlperiode, Bericht des Ausschusses für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung (18. Ausschuss) gemäß § 56a der Geschäftsordnung, Moderne Agrartechniken und Produktionsmethoden – ökonomische und ökologische Potenziale 2. Bericht: Precision Agriculture, 2006
- Diamond, D.: Energy Consumption Issues in Chemo/Biosensing Using WSNs, Workshop "Energy and Materials: Critical Issues for Wireless Sensor Networks", 30. Juni 2006, Dublin
- Diestch, Ahrens: Deliktrecht, 4 Aufl. 2002
- Dilba, D.: Prinzip Porsche, in Technology Review Mai 2009
- Dizikes, P.; Honsel, G.: Multi-Hopping mit dem Gegenverkehr. In: Technology Review, Nr.5 Mai 2006, Seiten 10-12, Heise Zeitschriften Verlag GmbH & Co. KG, S. 10–12
- Dubberley, M.; Agogino, A. M.; Horvath, A.: Life-cycle Assessment of an Intelligent Lighting System Using a Distributed Wireless Mote Network, 2004
- Düsseldorf, M.; Rösch, C.: Stand und Perspektiven des Einsatzes von moderner Agrartechnik im Ökologischen Landbau, Hintergrundpapier Nr. 12 des Büros für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag, 2004
- Dworak, T.; Berglund, M.; Laaser, C.; Strosser, P.; Roussard, J.; Grandmougin, B.; Kossida, M.; Kyriazopoulou, I.; Berbel, J.; Kolberg, S.; Rodríguez-Díaz, J. A.; Montesinos, P., 2007. EU Water Saving Potential. European Commission report ENV.D.2/ ETU/2007/0001r.
- Eckert, C.: IT-Sicherheit. Konzepte, Verfahren, Protokolle . 3. Auflage. Oldenburg Verlag, 2004
- e-CUBES Projekt: 3-D-Integrated Micro/Nano Modules for Easily Adapted Applications, Deliverable Report D1.1.1: Aeronautical applications preliminary specifications report, Juli 2006

- e-CUBES Projekt: 3-D-Integrated Micro/Nano Modules for Easily Adapted Applications, Deliverable Report D1.S.1: Space applications preliminary specifications report, Juli 2006
- Elektromagnetische Verträglichkeit Richtlinie 2004/108/EG (01. März 2005)
- Endler, S.; Ebinger, P.: Konzeption und Implementierung von Angreifermodellen und verbesserten Methoden für die Angriffserkennung in mobilen Ad-hoc-Netzen Master Thesis. 1/2008
- EPoSS: Strategic Research Agenda 2009, EPoSs Office / VDI/VDE-IT, Berlin
- Europäische Kommission: ICT – Information and Communication Technologies, Work Programme 2009-10 unter dem 7. Forschungsrahmenprogramm, Brüssel
- Europäische Kommission: Mitteilung über künftige Netze und das Internet, Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen, KOM(2008) 594, 29.9.2008, Brüssel
- European Environment Agency: European Environment Outlook, 2005, Kopenhagen
- European Environmental Agency: Europe's water: An indicator-based assessment, 2003, Kopenhagen
- European Environmental Agency: Water resources across Europe — confronting water scarcity and drought, 2009, Kopenhagen
- Eurostat: Landwirtschaft - Landwirtschaftliche Erzeugnisse - Pflanzliche Erzeugnisse - Weizen, Anbaufläche, 2006
- Exploratory Workshop on Wireless Sensor Networks, April 2004, gefördert der European Science Foundation, durchgeführt von der ETH Zürich
- FAO (Food and Agriculture Organisation): The use of water in agriculture, 2004,
- FAO (Food and Agriculture Organisation): World Agriculture: towards 2015/2030, 2002
- FAO, UN: World Water Day 2007 – coping with scarcity.
- Fasasi, T.; Maynard, D.; Nasr, H.; Patwari, R.; Mashetti, S.: Wireless sensors remotely monitor wells in Nigeria swamps, OIL & GAS JOURNAL, PennWell, 9.Mai 2005
- Fasolo, E.; Prehofer, C.; Rossi, M.; Wei, Q.; Widmer, J.; Zanella, A.; Zorzi, M.: Challenges and new approaches for efficient data gathering and dissemination in pervasive wireless networks; Integrated Internet Ad hoc and Sensor Networks, 30-31.Mai 2006, Nizza / Frankreich
- Frank, M.; Erdler, G.; Frerichs, H.-P., Müller, C.; Reinecke, H.: Chip integrated fuel cell accumulator, Journal of Power Sources 181 (2008), S. 371–377
- Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration, Hueck-Foils, Motorola & Zeiler: Analysis Methods and First Results of Si-based Transponders. PolyApply IST-IP-507143, WP D5.1.1 final, 2006
- Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration: Condition Monitoring - Integration von Sensoren mit autarker Energieversorgung in einen Simmerring, Produktblatt, Berlin, 2009
- Fricke, T. ; Heß, J.: Perspektiven einer teilflächenspezifischen Bewirtschaftung im Ökologischen Landbau. In: Verbundprojekt preagro: Managementsystem für den ortsspezifischen Pflanzenbau. Tagungsband 13-15. März 2002
- Frondel, M.; Grösche, P.; Huchtemann, D.; Oberheitmann, A.; Peters, J.; Angerer, G.; Sartorius, C.; Buchholz, P.; Röhling, S.; Wagner, M.: Trends der Angebots- und Nachfragesituation bei mineralischen Rohstoffen, Endbericht, 2007, Essen/Karlsruhe/Hannover
- Fthenakis, V. M.; Kim, H. C.; Alsema, E.: Emissions from Photovoltaic Life Cycles, Environmental Science & Technology, 2008, 42 (6), S. 2168-2174
- Gao, T.; Greenspan, D.; Welsh, M.; Juang, R. R.; Alm A.: Vital Signs Monitoring and Patient Tracking Over a Wireless Network. In Proceedings of the 27th IEEE EMBS Annual International Conference, September 2005
- Gilleo, K.: Area Array Package Design - Techniques in High-Density Electronics, McGraw-Hill, 2002
- Gola, P.; Schomerus, R.: BDSG, Bundesdatenschutzgesetz, Kommentar, § 4 Rn. 3
- Greenpeace: Cool Farming: Climate impacts of agriculture and mitigation potential, 2008
- Gutierrez, J.A.: On the Use of IEEE Std. 802.15.4 to Enable Wireless Sensor Networks in Building Automation, International Journal of Wireless Information Networks, Vol. 14, No. 4, December 2007
- Gutierrez, J.A.: IEEE Std. 802.15.4 – Enabling Pervasive Wireless Sensor Networks, 2006
- Gutierrez, J.A.; Durocher, D.B.; Lu, B.; Harley, R.G.; Habetler, T.G.: Applying Wireless Sensor Networks in Industrial Plant Energy Evaluation and Planning Systems, IEEE IAS Pulp and Paper Industry Conference, 2006, Appleton, WI, USA

- Harberts, R.; Roelofs, I.: Intelligent Archive Visionary Use Case: Precision Agriculture Scenario, NASA-Publication, 2003
- Hauser, R.: Bewässerung immer lohnender, RWZ-agrarReport 3/2008
- Heubach, D.: Einbeziehung von Umweltschutzanforderungen in Innovationsprozesse der Solarwirtschaft am Beispiel des Verbundprojekts »ColorSol®«, Expertenworkshop nova-net - Entstehungspfade von Nachhaltigkeitsinnovationen, 13. Februar 2007, Berlin
- Hoeren, T.; Sieber, U.: Handbuch Multimedia-Recht 13 Ergänzungslieferung, München 2006
- Holst, A.; Hariri, K.; Wichmann, H.-J.; Budelmann, H.: Innovative Non-Destructive Techniques for the Monitoring of Prestressed Concrete Structures. 2nd International Workshop on Structural Health Monitoring of Innovative Civil Engineering Structures, September 22-23, 2004, Fort Garry Hotel, Winnipeg, Manitoba, Canada, pp. 513-523
- Honeywell Webseite: <http://hpsweb.honeywell.com/Cultures/en-US/Products/Wireless/ProvenSuccess/default.htm>
- Hsu, V.; Kahn, J. M.; Pister, K. S. J.: Wireless Communications for Smart Dust, Electronics Research Laboratory Technical Memorandum Number M98/2, Februar, 1998
- Huang, Yi an, Lee, Wenke: A Cooperative Intrusion Detection System for Ad Hoc Networks. In: SASN '03: Proceedings of the 1st ACM workshop on Security of ad hoc and sensor networks. New York, NY, USA : ACM Press, 2003, S. 135-147
- Hübner, C.: Entwicklung hochfrequenter Messverfahren zur Boden- und Schneefeuchtebestimmung, Dissertation, 1999 Fakultät für Elektrotechnik der Universität Karlsruhe (TH), Institut für Meteorologie und Klimaforschung, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe, Wissenschaftliche Berichte FZKA 6329
- Hülsbergen, K.-J.; Küstermann, B.: Optimierung der Kohlenstoffkreisläufe in Öko-Betrieben. In: Ökologie und Landbau 145, 1/2008 S. 20-22
- Humphrey, D. W.: Die drahtlosen Sensoren, 2005
- Hurley, B.: Strategy in Ireland for SME, MNC and Academic Teams in the Realisation of WSN Deployments, AIC Energy and Materials Workshop, 30. Juni 2006, Dublin Niedermayer, M.; Thomasius, R.; Polityko, D.-D.; Schrank, K.; Hefer, J.; Guttowski, S.; Reichl, H.: Design for Miniaturization of Wireless Sensor Nodes Based on 3D Packaging, Smart Systems Integration 2007, 27.-28. Februar 2007, Paris
- Ihringer, J.; Becker, R.; Schädel, W.: Entwicklung eines Verfahrens zur Hochwasserfrühwarnung in kleinen und mittleren Einzugsgebieten auf der Grundlage von verteilten Online-Bodenfeuchtemessungen. Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, Universität Karlsruhe, Programm Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung (BWPLUS) Abschlussbericht, Mai 2004, Vorhabensnummer BWC 21014
- Industrial Wireless Community (IWC), U.S. Department of Energy: Industrial Wireless Technology for the 21st Century, Dezember 2002
- Intel: 2006 Corporate Responsibility Report
- International Technology Roadmap for Semiconductors, 2007 Edition, Executive Summary
- International Technology Roadmap for Semiconductors, 2007 Edition, Process Integration, Devices & Structures
- Jannatec, Newtrax and Simsmart join forces to provide an optimized real-time ventilation-on-demand solution for underground mines, Pressemitteilung, 25.2.2008
- Jürgens, C.; Reichardt, M.: Precision Farming in der Praxis, Teilprojekt 6, 2006
- Kalp, D.; Tauche, W.; Newman, J.: Sensicast Chiller Monitoring Application Reduces Cost, Case Study, 2006
- Karlof, C.; Wagner, D.: Secure Routing in Wireless Sensor Networks: Attacks and Countermeasures University of California at Berkeley
- Kemna, R. et al.: MEEuP Methodology Report, Delft, 28. November 2005
- Kiel, E.: Eine Frage der Wirkung. Elektrische Antriebe bieten viele Möglichkeiten, Energie zu sparen, in: Driveln 20, 2008
- Kinkel, S.; Som, O.: Struktur du Treiber des Innovationserfolgs im deutschen Maschinenbau, Mitteilungen aus der ISI-Erhebung zur Modernisierung der Produktion, Nummer 41, Fraunhofer Institut System- und Innovationsforschung, Karlsruhe, 2007
- Klüh, M.: Auf dem Weg zur zweiten Generation – Integration drahtloser Systeme in Industrieanlagen, P&A, April 2007
- Kränzlein, T.; Kempen, M.; Mack, G.: Energiebedarf der landwirtschaftlichen Produktion in Europa: Regionale Unterschiede und Bestimmungsgründe, Agrarwirtschaft und Agrarsoziologie, Nr.2/2007
- Krusemark, O.; Schischke, K.: MST-Entwurf eines Flussreglers, unveröffentlichtes Arbeitspapier im Projekt MikroNetz, Berlin/Hamburg, 2005

- Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V.: Precision Farming in der Praxis – Technik und Anwendungsmöglichkeiten, Folienserie, 2007
- Landesanstalt für Pflanzenbau, Baden-Württemberg (Hrsg.): Beregnung und Bewässerung landwirtschaftlicher und gärtnerischer Kulturen, 2002
- Leitfaden für die Anwendung der Richtlinie 89/336/EWG des Rates, geändert durch die Richtlinien 91/263/EWG, 92/31/EWG, 93/68/EWG und 93/97/EWG in der Fassung vom 28. Mai 1997 Punkt 6.5.2.1; S. 38
- Li, L.; Wang, F.-Y.: Advanced Motion Control and Sensing for Intelligent Vehicles, Springer, 2007
- Lilienthal, H.: Einsatz von Sensoren in der Landwirtschaft, Workshop 'Informationstag zur Nährstoffanalytik', FAL Braunschweig, 23.11.2006
- Lilienthal, H.: Persönliches Gespräch, 9.4.2008, Braunschweig
- Lindsay Corp., <http://www.lindsayfieldnet.com/>
- Link, A.: Sensorkonzepte für die teilflächenspezifische N-Düngung, 2008
- Lunze, J.: Automatisierungstechnik, 2. Aufl., Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München, 2007
- Malinowski, M. K.: CargoNet: Micropower Sensate Tags for Supply-Chain Management and Security, Master Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Februar 2007
- Marrón, P.J.; Minder, D. et al.: Embedded WiSeNts Research Roadmap, November 2006
- McKinsey & Co.: Kosten und Potenziale der Vermeidung von Treibhausgasemissionen in Deutschland, 2007
- Merriall, W.M. et al.: Collaborative Networking Requirements for Unattended Ground Sensor Systems, in: Proc. IEEE Aerospace Conference, März 2003
- Messner, F.: Die Bedeutung von Umwelt- und Ressourcenkosten aus umweltökonomischer Sicht am Beispiel der Flussaue. In: D. Petry et al.: Die Relevanz der EU-Wasserrahmenrichtlinie für den Naturschutz in Auen, 2002, Leipzig, S. 75 – 85
- Messtechnik im Bereich der Druckluft, Projekt Druckluft effizient, 2003
- Michahelles, F.; Matter, P.; Schmidt, A.; Schiele, B.: Applying Wearable Sensors to Avalanche Rescue: First Experiences with a Novel Avalanche Beacon. In Computers and Graphics, Jg. 27, Nr. 6, Dezember 2003, S. 839-847
- Michiardi, P.; Molva, R.: CORE: A Collaborative Reputation Mechanism to enforce node cooperation in Mobile Ad hoc Networks / Institut Eur'ecom, Sophia-Antipolis, France – Research Report (RR-02-062), Dezember 2001
- Montague, J.: Wireless aids molding machine ERP, Industrial Networking, ControlDesign.com, 2006
- Msangi, S.; Howitt, R.E.: Third Party Effects and Asymmetric Externalities in Groundwater Extraction: The Case of Cherokee Strip in Butte County, California, International Association of Agricultural Economists Conference, Gold Coast, Australia, 12.-18.August, 2006
- MünchKomm-Cahn, § 3 ProdHaftG
- Myers, N.; Kent, J.: Die neuen Konsumenten in Entwicklungs- und Transformationsländern und der Einfluss ihres Wohlstands auf die Umwelt, in: Natur und Kultur, 2005, 6/1, 3-22
- NAMUR – Interessengemeinschaft Automatisierungstechnik der Prozessindustrie; VDI/VDE Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik; Fraunhofer Institut Produktionstechnik und Automatisierung: Abschlussbericht Technologie-Roadmap Prozess-Sensoren 2005 – 2015, Leverkusen, 2006
- Nasr, H.; Rincon, J.; Clinton, R.: Remote monitoring, control enable smart-field in Gabon, OIL & GAS JOURNAL, Penn-Well, 5.März 2007
- Naturschutzbund Deutschland: Landwirtschaft 2015 - Perspektiven und Anforderungen aus Sicht des Naturschutzes, 2006, Berlin
- Neumann, P.: Wireless Sensor Networks in der Prozessautomation – Übersicht und Standardisierungsaktivitäten, Tagung Wireless Automation 2007, 28. Februar – 1. März 2007, Magdeburg
- Newsome, J.; Shi, E.; Song, D.; Perrig, A.: The Sybil Attack In Sensor Networks: Analysis & Defences. In: IPSN '04: Proceedings of the third International symposium on Information processing in sensor networks. New York, NY, USA : ACM Press, 2004, S. 259–268
- Niedermayer, M.: Methodik zum Entwurf von miniaturisierten, energieautarken, verteilten Funksensorknoten, Dissertation, Berlin, 2008
- OGI Karlsruhe VersR. 2003, Zitiert bei Bamber/Roth/Spindler Kommentar zum BGB 2. Aufl. § 823 Rn.508

- O'Mara, G.T.: Issues in the Efficient Use of Surface and Groundwater in Irrigation, World Bank Staff Working Papers, Number 707, 1984
- ON World Inc.: Wireless Sensor Networks for the Oil & Gas Industry, veröffentlicht 11. Oktober 2005
- ON World Inc.: WSN for Smart Industries, 2007, Pressemitteilung
- ON World Inc.: WSN for Smart Industries, 2007, veröffentlichte Synopsis
- Ota, N., Wright, P.: Trends in wireless sensor networks for manufacturing, Int. J. Manufacturing Research, Vol. 1, No. 1, 2006, S. 3-16
- Ouwerkerk, M.: Miniature wireless sensor devices, 11. Oktober 2005
- Paek, J.; Caffrey, K.C.; Govindan, R.; Masri S.: A wireless sensor network for structural health monitoring: performance and experience. In Proceedings of the Second IEEE Workshop on Embedded Networked Sensors (EmNetS-II), Sydney, Australien, Mai 2005
- Palandt, O.: Bürgerliches Gesetzbuch, 66. Auflage. München 2007
- Paradiso, J.; Starner, T.: Energy Scavenging for Mobile and Wireless Electronics, IEEE Pervasive Computing, Vol.4, No.3, 01-03/2005, S. 18-27
- Peil, U.: Lebensdauerverlängerung von Bauwerken mit Hilfe von Bauwerksüberwachung. Bautechnik 80 (2003), Heft 9, S. 614-630
- Perry, C.; Pocknee, S.; Hansen, O.: Variable-rate irrigation: water savings and increased yields? Engineering & Technology for a Sustainable World, 1. Januar 2003
- Post, P.; Kärcher B.: Erfahrungen bei der Entwicklung eines Drahtlosen Autonomen Sensornetzes für die Automatisierungstechnik, in: Mikrosystemtechnik Kongress 2007, 15.-17. Oktober 2007, Dresden, VDE Verlag GmbH, Berlin / Offenbach
- Projekt μ SWN: Clustering Classification of Application Scenarios, 16. November 2007
- Projekt μ SWN: State of the Art & Technological Assessment, 16. November 2007
- Projekt Lofar Agro, Niederlande, www.lofar.org/p/Agriculture.htm
- Radgen, P.: Effiziente Druckluftversorgung - Vom Frosch zum König, BWK Bd. 57 (2005) Nr. 6
- Reichl, H.: eGrain – Elektronischer Staub, Fraunhofer Magazin 4.2001, S. 22f.
- Reichl, H.; Kallmayer, C.; Linz, T.: Electronic Textiles; in: Aarts, E.H.L.; Encarnação, J.L. (Hrsg.): True Visions - The Emergence of Ambient Intelligence, Springer-Verlag, 2006, Berlin/Heidelberg
- Reichl, H.; Wolf, M.J.: Electronic Dust and e-Grains; in: Aarts, E.H.L.; Encarnação, J.L. (Hrsg.): True Visions - The Emergence of Ambient Intelligence, Springer-Verlag, 2006, Berlin/Heidelberg
- Ricadela, A.: Sensors Everywhere – A „bucket brigade“ of tiny, wirelessly networked sensors someday may be able to track anything, anytime, anywhere, InformationWeek, 24. Januar 2005
- Richtlinie 2002/58/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 12. Juli 2002 über die Verarbeitung personenbezogener Daten und den Schutz der Privatsphäre in der elektronischen Kommunikation (Datenschutzrichtlinie für elektronische Kommunikation), ABl. EG L 201 vom 31.07.2002
- Richtlinie 2002/96/EG über Elektro- und Elektronikaltgeräte (WEEE Richtlinie)
- Richtlinie 95/46/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 24. Oktober 1995 zum Schutz natürlicher Personen bei der Verarbeitung personenbezogener Daten und zum freien Datenverkehr, Nr. L281 vom 23. November 1995, S. 31
- Richtlinie 2002/95/EG über die Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten (RoHS Richtlinie).
- Römer, K.; Mattern, F.: The Design Space of Wireless Sensor Networks, in: IEEE Wireless Communications, Volume 11, Issue 6, pp. 54-61, IEEE, Dezember 2004
- Roos, G.: Expect mixed prices, slow growth for tantalum capacitors, Reed Business Information, purchasing.com, 15. November 2007
- Sadler, C., Zhang, P., Martonosi, M., and Lyon, S. Hardware design experiences in ZebraNet. In Proceedings of the Second ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (Batimore, MD, Nov. 2004).
- Savi Technology, Inc.: Products at a Glance, 2008

- Scheiter, T.: Integration mikromechanischer Sensoren in einer CMOS/ BICMOS – Prozeßumgebung, Dissertation, TU München, 1996
- Scherzer, J.; Schaaf, W.; Hüttl, R.F.: Eignung von FDR- und TDR- Sonden zur Erfassung der Bodenfeuchte in Kippsubstraten mit erhöhter elektrischer Leitfähigkeit. Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, 80, 1996, S. 279 - 282.
- Scheuermann, A.; Schlaeger, S.; Becker, R.; Schädel, W.; Schuhmann, R.: Nutzen der TDR-Meßtechnik zur Beurteilung ungesättigter Böden in der Geotechnik, BAW-Kolloquium: Der Einfluß von Luftfeinschlüssen auf die Strömungs- und Druckdynamik in Erdbauwerken, Karlsruhe, den 23. Oktober 2002
- Schischke, K.: Projekt ReUse – Interner Bericht, 2003
- Schischke, K.; Pötter, H.; Zuber, K. H.; Middendorf, A.; Griese, H: Environmental Challenges of Future ICT Trends – Creating a Green Backbone for the Information Society, Side event „Sustainability in the Information Society“ at the World Summit on the Information Society, 10.Dezember, 2003, Genf
- Schlemmer, H.: Grundlagen der Sensorik. Eine Instrumentenkunde für Vermessungsingenieure, Wichmann Verlag, Heidelberg, 1996
- Schlösser, A.: Simulation von Reputationsberechnungsverfahren in globalen und lokalen Reputations-Systemen., IT Transfer Office, Technische Universität Darmstadt, Diplomarbeit, November 2004.
- Schnug, E.: Beitrag von Precision Agriculture zu mehr N-Effizienz, Workshop 'Roadmaps zu mehr N-Effizienz', FAL Braunschweig, 22.5.2005
- Schoengold, K.; Sunding, D.L.; Moreno, G.: Agricultural Water Demand and the Gains from Precision Irrigation Technology, 2004
- Schweizerischer Verband der Elektromaschinenbauern: Energiesparmotoren und Umrichter, o.J.
- Seefeldt, K.: Tantalusqualen beim Kauf eines Mobiltelefons? Was der weltweite Handy-Boom mit dem Metall Tantal und den Rebellen in der Demokratischen Republik Kongo zu tun hat, 7.April 2001, heise-online
- Selavo, L.; Wood, A.; Cao, Q. et al.: LUSTER: Wireless Sensor Network for Environmental Research, SenSys'07, 6.-9. November 2007, Sydney
- Sensicast Systems Inc.: Sensicast Energy Monitoring Improves Efficiency and Reduces Costs, White Paper, 2006
- Sensicast Systems Inc.: Wireless Sensor Network Solutions for Data Center Applications, White Paper, 2007
- Sensicast Systems Inc.: Wireless Sensor Network Solutions for Data Center Applications, White Paper, 2007
- Sexton, D.: Distributed Wireless Multi-Sensor Technologies, Final report for the U.S. Department of Energy, Contract DE-FC36-04GO14001, prepared by GE Global Research Schenectady, NY, 2008
- Sharma, R.; LeCompte, C.: SK Telecom to roll out Ember-enabled ZigBee “digital smart home” services, 2005
- Shear, R.: start:Building wireless sensor networks – Low-power, high-reliability augment inexpensive installation, DesignLine, 1.Juni 2007, www.industrialcontroldesignline.com
- Shen, X.; Wang, Z.; Sun, Y.: Wireless Sensor Networks for Industrial Applications, IEEE 5th World Congress on Intelligent Control and Automation, 15.-19. Juni 2004, Hangzhou
- Simon, G.; Ledezcki, A.; Maroti M.: Sensor Network-Based Countersniper System, in: Proc. SenSys, Baltimore, USA, November 2004
- Simonis, F.: Sensors; TNO, Future Technology Center, 18. Mai 2005
- SK Telecom: State-of-the-Art Residential Environment - Digital Home Network
- Sonderforschungsbereich 637: Selbststeuerung logistischer Prozesse – Ein Paradigmenwechsel und seine Grenzen, Universität Bremen
- Sourell, H.: Effektiver Wassereinsatz im Ackerbau durch Beregnungssteuerung, Präsentation auf dem Internationalen DWA-Symposium zur Wasserwirtschaft, 5.April 2006, Berlin
- Sourell, H.: Persönliches Gespräch, 9. April 2008, Braunschweig
- Statistisches Bundesamt: Energieverbrauch des Verarbeitenden Gewerbes nach ausgewählten Wirtschaftszweigen 2007
- Stobbe, L.; Schломann, B.; Friedewald, M.; Georgieff, P.; Leimbach, T.; Nissen, N. F.; Proske, M.: Abschätzung des Energiebedarfs der weiteren Entwicklung der Informationsgesellschaft, Studie des Fraunhofer IZM und des Fraunhofer ISI für das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Abschlussbericht, 2009, Berlin/Karlsruhe
- Stoianov, I.; Nachman, L.; Madden, S.; Tokmouline, T.: PIPENET: A Wireless Sensor Network for Pipeline Monitoring, IPSN '07, 25.-27. April 2007, Cambridge, MA

- Strohhöfer, C.; Klink, G.; Feil, M.; Drost, A.; Bollmann, D.; Hemmetzberger, D.; Bock, K.: Roll-to-roll microfabrication of polymer systems, *Journal Measurement and Control*, Bd. 40, Nr. 3, 2007, S. 80-83
- Tenbusch, T.: Anwendungsszenarien für Sensornetze, Freie Universität Berlin, Technische Informatik, Sommersemester 2007
- Texas Instruments: Climate change / 2007 performance
- The Econmoist: When everything connects. A 14-page special report on the coming wiresee revolution, April 2007
- Theisen, P.; Luebke, C.; Marshall, P.: Eaton Wireless Sensor Network for Advanced Energy Management Solutions Phase 2 - Advanced Pervasive Wireless Energy Sensing, DOE Sensors & Automation 2006 Annual Portfolio Review
- Thörmann, H.-H.; Sourell, H.: Kosten verschiedener Berechnungsverfahren. Vortrag auf der DLG Fachtagung Feldberechnung 2007
- Timm-Giel, A.: Visions and Challenges of Wireless Sensor Network, 6. Fachtagung des ITG Fachausschusses 5.2, 2006
- Torah, R.N.; Tudor, M.J.; Patel, K.; Garcia, I.N.; Beeby, S.P.: Autonomous Low Power Microsystem Powered by Vibration Energy Harvesting, IEEE SENSORS 2007 Conference
- Toteda, S.: Reliable Wireless Sensor Network Performance in the Face of Adversity, Dust Networks
- Tracking down leaks, *Fraunhofer magazine* 2.2008, S. 46f.
- Trute, in: Roßnagel, *Handbuch Datenschutzrecht*
- Ubisense: Ortrander Eisenhütte und das Fraunhofer ALI integrieren Echtzeit-Ortungssystem der Ubisense AG in Forschungsprojekt für RFID-Anwendungen in rauen Industrieumgebungen, 2. Oktober 2008, Ortrand, Dortmund (Pressemitteilung)
- Umweltbundesamt: Nachhaltiges Deutschland, Wege zu einer dauerhaft umweltgerechten Entwicklung, 1997, Berlin
- UNEP: Vital Water Graphics, The worlds fresh and marine waters, 2002
- Uniross: Study on the Environmental Impact of Batteries, 2007
- University of Virginia: AlarmNet – Assisted-Living And Residential Monitoring Network, o.J.
- US Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy: Industrial Wireless Technology for the 21st Century, Dezember 2002
- US Department of Energy: Distributed Wireless Multisensor Technologies - A Novel Approach to Reducing Motor Energy Usage, PS # 14226, 2006
- US Department of Energy: Wireless Sensor Network. Advanced Energy Management Solution for Industrial Motors. CPS #14225, 2006
- US Department of Energy: Wireless Success Story Industrial Technologies Program (ITP) Develops Transformational Wireless Technology, 2008
- Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. (VDE): Effizienz- und Einsparpotentiale elektrischer Energie in Deutschland. Perspektive bis 2025 und Handlungsbedarfe, Frankfurt a.M., 2008
- Verbundvorhaben EcoMoS (Energieautarkes Condition Monitoring System), gefördert vom BMBF, Projektträger VDI/VDE-IT, 2008-2011
- Verbundvorhaben: FeuerWhere - Sichere und effiziente Überwachung von Einsatzkräften durch Sensornetze, gefördert vom BMBF, Projektlaufzeit 2008-2010
- Verbundvorhaben: MANET - Beherrschbarkeit von Katastropheneignissen durch Autonome Vernetzte Sensoren, gefördert vom BMBF, Projektlaufzeit 2007-2010
- Verbundvorhaben: RealFlex - Integration zuverlässiger drahtloser Kommunikationssysteme in Sensor-/Aktornetze in Automatisierungsanwendungen -, gefördert vom BMBF, Laufzeit 2007-2010
- Verbundvorhaben: ZESAN - Zuverlässige, energieeffiziente drahtlose Sensor-/ Aktornetze für Gebäudeautomatisierung, Anlagenüberwachung und Prozesssteuerung , gefördert vom BMBF, Projektlaufzeit 2007-2010
- Vermesan, O.: Smart Wireless Identifiable Systems - Connecting the real, virtual and digital worlds, EPoSS Annual Forum 2008, 1.-2. Oktober 2008, Juan-les-Pins, Antibes, Frankreich
- Walters, J.P.; Liang, Z.; Shi, W.; Chaudhary, V.: Wireless Sensor Network Security: A Survey / Department of Computer Science, Wayne State University. – Forschungsbericht.

- Wang, Y.; Zhang, P.; Liu, T.; Sadler, C.; Martonosi, M.: Movement Data Traces from Princeton ZebraNet Deployments, CRAWDDAD Database, 2007
- Werner, A.; Dreger, F.; Schwarz, J.: Informationsgeleitete Pflanzenproduktion mit Precision Farming als zentrale inhaltliche und technische Voraussetzung für eine nachhaltige Entwicklung der landwirtschaftlichen Landnutzung – preagro II, 2008, Müncheberg
- Wilrich: GPSG, 1. Aufl. 2004
- Wöbbcke, K.; Klett, G.; Rechenberg, B.: Wasserbeschaffenheit der wichtigsten Seen in der Bundesrepublik Deutschland, Reihe TEXTE des Umweltbundesamtes 36/2003, Berlin
- Wolf, M. J.; Michel, B.; Ramm, P.; Reichl, H.: System Integration on Wafer Level - Requirements and Technical Solutions, Micromaterials and Nanomaterials, 1st World Congress MicroNanoreliability, 2.-5. September 2007, Berlin
- Wolf, M. J.; Schacht, R.; Reichl, H.: The „eGrain“ Concept: Technologies for Wireless Sensor Networks, SEMICON 2006 und IMAPS 2006
- Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie: Fair Future. Begrenzte Ressourcen und globale Gerechtigkeit, 2005, München
- Xu, N. et al.: A wireless sensor network for structural monitoring, In Proceedings of the Second ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems, Baltimore, MD, November 2004
- Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. (ZVEI) Fachverband Automation; Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (IZT): Integrierte Technologie-Roadmap Automation 2015+, Frankfurt a.M., 2006
- Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. (ZVEI) Fachverband Automation: Energiesparen mit elektrischen Antrieben, Frankfurt am Main, 2006
- Zinaida, B.; Freiling, F.C.: On the Feasibility and Meaning of Security in Sensor Networks in 4. GI/ITG KuVS Fachgespräch „Drahtlose Sensornetze“ ETH Zürich 23.–24. März 2005

9 Anhang

9.1 Teilnehmer Experten-Interviews

Interviewte Experten für das Anwendungsfeld Landwirtschaft:

1. Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft
Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Braunschweig
2. Johann Heinrich von Thünen Institut, Braunschweig
3. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft, Darmstadt
4. Department of Biological and Agricultural Engineering, University of California
5. Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Barnim e.V.
6. agrocom GmbH & Co Agrarsystem KG, Bielefeld
7. AgriCon GmbH, Jahna
8. Crossbow Technology, Inc., San Jose, Kalifornien
9. IMKO Micromodultechnik GmbH, Ettlingen
10. Environment Information Technology (EIT), Alstonville, Australien

Interviewte Experten für das Anwendungsfeld Automatisierungstechnik:

11. Bayer Technology Services GmbH, Leverkusen
12. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Schweiz
13. Endress+Hauser Consult AG, Reinach, Schweiz
14. EnOcean GmbH, Oberhaching
15. Festo AG & Co. KG, Esslingen
16. Helmut-Schmidt-Universität, Elektrische Messtechnik, Hamburg
17. Oak Ridge National Laboratory (ORNL), Oak Ridge TN, USA
18. Siemens AG, Industry Automation, Nürnberg
19. Signatech Systems, Inc., Matthews NC, USA
20. Universität Bonn, Institut für Computerwissenschaften, Bonn
21. U.S. Department of Energy, Industrial Efficiency, Washington, USA
22. Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. (ZVEI),
Frankfurt a. M.
23. GE Global Research, Schenectady, NY, USA
24. Lenze AG, Hameln
25. SEW Eurodrive GmbH & Co KG, Bruchsal

9.2 Überblick: Methoden und Sensorik zur Bestimmung des Wassergehaltes in Böden

9.2.1 Kennzahlen

Zur Beschreibung des Wassergehaltes des Bodens, bzw. um die Pflanzenverfügbarkeit der Feuchte zu bestimmen, werden folgende wichtige Kennzahlen herangezogen und bestimmt:

- **Feldkapazität (FK):**
Die Feldkapazität entspricht der maximalen Wassermenge, die von den Poren des Bodens gegen die Schwerkraft zurückgehalten werden kann; ist folglich bodenabhängig.
- **Saugspannung und Matrixpotential**
Da die meisten Pflanzenwurzeln nur bis zu einer Wasserspannung von 15 bar fähig sind, Wasser aufzunehmen, wird die Pflanzenverfügbarkeit des Wassers im Boden durch die Rückhaltekräfte (Spannungen) in den Bodenporen bedingt. Diese werden in Abhängigkeit von der Bodenfeuchte, durch die Saugspannung und das Matrixpotential beschrieben.
Die Saugspannung entspricht dem **Druck p (in cm Wassersäule bzw. Pa)**, der sich in einem wassergefüllten Rohr einstellt, wenn man dieses über eine wassergesättigte keramische Zelle mit dem Boden in Kontakt bringt. Je trockener der Boden ist, desto kleiner sind die benetzten Porenradien und desto größer ist die Saugspannung.
Das Matrixpotential beschreibt die Kraft, mit der das Wasser an die Oberflächen der Bodenteilchen gebunden ist, entspricht folglich der Saugspannung mit umgekehrtem Vorzeichen. Das Matrixpotential wird als dekadischer Logarithmus des Betrags der Saugspannung, als pF-Wert angegeben. Beide Größen können mit indirekten Methoden ohne Probennahme bestimmt werden, zum Beispiel mit Tensiometern oder anderen Bodensonden.

Ist ein Boden hinsichtlich Saugspannung und Feldkapazität charakterisiert, können diverse Parameter der Pflanzenverfügbarkeit der Bodenfeuchte anhand von Messungen mit einem Tensiometer in Situ bestimmt werden:

- **Permanenter Welkepunkt (PWP):** Tensionsmaß $pF = 4,2$.
Ab einem pF-Wert von 4,2 ist das Wasser im Boden für die Wurzel so schlecht verfügbar, dass viele Kulturarten zu welken beginnen. Der Welkepunkt ist grundsätzlich kulturartspezifisch.
- **Welkepunktwasserkapazität (WWK):** Entspricht dem Wassergehalt θ bei **$pF=4.2$** ; dieser Wassergehalt wird häufig auch als Totwasseranteil bezeichnet. **$WWK = \theta_{pF=4.2}$**
- **Nutzbare Feldkapazität (nFK):** Die Nutzbare Feldkapazität ergibt sich aus der Feldkapazität nach Abzug des Totwasseranteils. **$nFK=FK-WWK$**

- **Luftkapazität (LK):** Entspricht dem Luftgehalt in den Bodenporen bei erreichter Feldkapazität. Sie ergibt sich aus der Porosität P (Porenvolumen, Gesamtporengehalt) des Bodens abzüglich des Wasservolumens, also der Feldkapazität. $LK=P-FK$
- **Nutzbare Feldkapazität des effektiven Wurzelraums (nFK_{We}):** Ein für den Pflanzenanbau wichtiges Maß für die effektiv nutzbare Wassermenge an einem Standort. Sie gibt pflanzenabhängig die nutzbare Feldkapazität bis zu den Bodentiefen an, aus denen die Pflanze noch Wasser nach oben transportieren kann (horizontale Wasserscheide). Die nFK_{We} wird in mm oder in l/m^2 angegeben.

9.2.2 Direkte Methoden

Der Wassergehalt des Bodens kann mit direkten Methoden, also über die Entnahme, Trocknung und Differenzwägung von Bodenproben bestimmt werden. Der gravimetrische Wassergehalt, der volumetrische Wassergehalt, Wasserspannungskurven und die Feldkapazität werden über direkte Methoden bestimmt. Wegen der Probennahme und der Laboruntersuchung sind die direkten Bestimmungsverfahren methodisch für ein Monitoring durch AVM nicht geeignet.

9.2.3 Indirekte Methoden

Die indirekten Bestimmungen der Bodenfeuchte erfolgen in der Regel in-situ, ohne eine Entnahme und Untersuchung von Bodenmaterial. Sie sind also für eine kontinuierliche Bestimmung der Bodenfeuchte im Feld geeignet. Zur Bestimmung der Saugspannung werden folgende Geräte benutzt.³⁴¹

9.2.3.1 Tensiometer

Tensiometer bestehend aus wassergefüllten permeablen Keramiken, die mit dem Bodenwasser in hydraulischem Kontakt stehen, und deren Innendruck mit einem Manometer bestimmt wird. In der Praxis werden häufig sogenannte Einstichtensiometer verwendet. Bei Intensivmeßflächen erfolgt die Datenerfassung über Datalogger.

9.2.3.2 Gipsblock

Es wird der elektrische Widerstand einer Sonde aus Kalziumsulfat (Gips) bestimmt, die sich im Boden befindet. Der elektrische Widerstand der Sonde hängt direkt von der Bodenfeuchte ab. Die Sonde wird über ein Kabel an ein

³⁴¹ IFAS/UFL, University of Florida Virtual Field day, http://vfd.ifas.ufl.edu/gainesville/irrigation/time_domain_reflectometry_probe.html
University of Florida's Institute of Food and Agricultural Sciences, 2006

Messgerät angeschlossen, das den elektrischen Widerstand im Sensorinneren misst und auf einem Display anzeigt. Die Umrechnung der Widerstandswerte in die betreffende Saugspannung erfolgt mit einer Hilfstabelle des Herstellers.³⁴²

9.2.3.3 Granular Matrix Sensoren (GMS), Watermark Sensor

Dieser Sensor stellt eine Weiterentwicklung des Gipsblocks dar. Die Messung der elektrischen Leitfähigkeit erfolgt mit zwei Elektroden, die in einem speziellen Matrixmaterial eingebaut sind. Die Matrix steht mit dem umgebenden Boden im Feuchtgleichgewicht. Die Sensoren werden ebenfalls über Kabel an ein Messgerät angeschlossen, das den elektrischen Widerstand im Inneren des Sensors misst und in Saugspannungswerte umrechnet.

9.2.3.4 Heat Dissipation (Wärmeleitungsmessung)

Prinzip: Die thermische Leitfähigkeit von Wasser führt bei der Erhitzung von porösen Materialien zu Wärmeverlusten und somit, in direkter Abhängigkeit von der Feuchte, zu einer verlangsamten Wärmeleitung.

Der thermische Wärmesensor besteht aus einem porösem Block, in dem eine steuerbare Wärmequelle (Heizung) und ein exakter Temperaturfühler in einem definierten Abstand voneinander eingelassen sind. Der Block wird in den Boden eingebracht und mit der Bodenfeuchte äquilibriert. Während der Block kurzfristig erhitzt wird, zeichnet der Temperaturfühler den Verlauf der Erwärmung des Materials auf. Nach einer Kalibrierung kann so der Wassergehalt des umgebenden Bodens berechnet werden. Der Messbereich erstreckt sich von 0,1 bis 30 bar wobei Werte über 10 bar in der Genauigkeit nachlassen.

9.2.3.5 Boden-Psychrometer

Aus der Temperaturdifferenz zwischen einem "trockenen" Thermometer und einem "Feuchtthermometer" kann der momentan vorherrschende Dampfdruck, und damit die Feuchtigkeit der Umgebungsatmosphäre berechnet werden. In einer Kammer aus porösem Material kann eine solche Messeinrichtung den Feuchtegehalt des Bodens bestimmen, wenn sich das poröse Material in einem Feuchtgleichgewicht mit dem Boden befindet).

9.2.4 Volumetrische Methoden

Neben der Saugspannung, die die Kapillarkräfte des Wassergehalts im Boden beschreibt, können auch andere (meist elektromagnetische) Bodeneigenschaften, die vom Wassergehalt des Bodens abhängig sind, zur Angabe der Boden-

³⁴² Landesanstalt für Pflanzenbau, Baden-Württemberg (Hrsg.): Beregnung und Bewässerung landwirtschaftlicher und gärtnerischer Kulturen, 2002

feuchte in vol-% herangezogen werden. Diese Methoden können teilweise auch miteinander kombiniert werden.³⁴³

9.2.4.1 Neutron-Probe

Das Verfahren der Neutronensondenmessung erfordert das Ausbringen von radioaktiven (ionisierenden) Materialien in die Umwelt, verbietet sich also für Anwendungen in der Landwirtschaft per se.

9.2.4.2 Time Domain Reflectometry (TDR)

Eine TDR- Bodenfeuchtesonde besteht aus einem „Sender“ und einem un abgeschirmter Wellenleiter, der von dem Dielektrikum „Boden“ umgeben ist. Eine sich in diesem Wellenleiter ausbreitende Welle interagiert mit dem umgebenden Boden, der je nach Feuchtegehalt unterschiedliche elektrische Eigenschaften hat. Dadurch wird die Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Welle in Abhängigkeit von der Bodenfeuchte variiert. Bei der TDR wird der Umstand ausgenutzt, dass ein von einem Pulsgenerator abgegebenes Signal sowohl am Anfang einer Sonde als auch an ihrem Ende reflektiert wird. Der Zeitunterschied zwischen den Reflektionen wird mit einem Oszilloskop gemessen und so die Laufzeit bei bekannter Länge der Sonde bestimmt. Aus der Laufzeit der elektromagnetischen Welle entlang des Bodensensors lassen sich zusätzlich (unter Verwendung geeigneter Algorithmen) Bodenfeuchteprofile entlang der Sonde ermitteln. TDR Sonden und Messgeräte werden in verschiedenen Ausführungen angeboten.^{344,345,346,347,348}

9.2.4.3 Frequency Domain Reflectometry (FDR)

Bei der Frequency-Domain-Response (FDR)-Technik wird der Wassergehalt indirekt über die Dielektrizitätskonstante des Bodens bestimmt. Meßgröße ist die

³⁴³ IFAS/UFL, University of Florida Virtual Field day, http://vfd.ifas.ufl.edu/gainesville/irrigation/time_domain_reflectometry_probe.html
University of Florida's Institute of Food and Agricultural Sciences, 2006

³⁴⁴ Ihringer, J.; Becker, R.; Schädel, W.: Entwicklung eines Verfahrens zur Hochwasserfrühwarnung in kleinen und mittleren Einzugsgebieten auf der Grundlage von verteilten Online-Bodenfeuchtemessungen. Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, Universität Karlsruhe, Programm Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung (BWPLUS) Abschlussbericht, Mai 2004, Vorhabensnummer BWC 21014

³⁴⁵ Scheuermann, A.; Schlaeger, S.; Becker, R.; Schädel, W.; Schuhmann, R.: Nutzen der TDR-Meßtechnik zur Beurteilung ungesättigter Böden in der Geotechnik, BAW-Kolloquium: Der Einfluß von Luftporen auf die Strömungs- und Druckdynamik in Erdbauwerken, Karlsruhe, den 23. Oktober 2002

³⁴⁶ Hübner, C.: Entwicklung hochfrequenter Messverfahren zur Boden- und Schneefeuchtebestimmung, Dissertation, 1999 Fakultät für Elektrotechnik der Universität Karlsruhe (TH), Institut für Meteorologie und Klimaforschung, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe, Wissenschaftliche Berichte FZKA 6329

³⁴⁷ IFAS/UFL, University of Florida Virtual Field day, http://vfd.ifas.ufl.edu/gainesville/irrigation/time_domain_reflectometry_probe.html
University of Florida's Institute of Food and Agricultural Sciences, 2006

³⁴⁸ Scherzer, J.; Schaaf, W.; Hüttl, R.F.: Eignung von FDR- und TDR- Sonden zur Erfassung der Bodenfeuchte in Kippsubstraten mit erhöhter elektrischer Leitfähigkeit. Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, 80, 1996, S. 279 - 282.

Impedanz des Bodens, die abhängig vom Wassergehalt eine Frequenzänderung eines oszillierenden Signals bedingt (Resonanz).

9.2.4.4 Time Domain Transmission

Vergleichbar der TDR wird ein elektrischer Impuls durch eine in den Sensor eingebettete geschlossene Leitung ausgesendet. Das daraus entstehende elektrische Feld beeinflusst in Abhängigkeit von der Bodenfeuchte die Laufzeit des Signals. Messwerte werden in Volumenprozent Bodenfeuchte angegeben.

9.2.4.5 Capacitance Probe

Die Kapazität eines Kondensators, dessen Dielektrikum aus dem zu untersuchenden Boden besteht, wird durch die Feuchte des Bodens beeinflusst. Es wird die Zeit gemessen die nötig ist, um einen Kondensator aufzuladen, dessen Elektroden den Boden einschließen.

9.2.4.6 Amplitude Domain Reflectometry

Bei der ADR breitet sich eine elektromagnetische Welle entlang einer Sonde mit einer bestimmten Amplitude A aus. An den Stellen, an denen sich, bedingt durch den Wassergehalt des Bodens die Impedanz ändert, wird diese Welle reflektiert, und der reflektierte Wellenteil interferiert mit der entgegenlaufenden ursprünglichen Welle. Dadurch wird deren Amplitude moduliert, und es bildet sich bezüglich der Spannung eine stehende Welle mit der Amplitude B aus. Aus der Spannungsdifferenz der beiden Amplituden A und B kann dann (bei geeigneter Signalfrequenz) die Impedanz des Bodens in Abhängigkeit vom Wassergehalt bestimmt werden. Die Sonde wird aus einer Anordnung von drei äußeren und einem inneren Stab gebildet; die Dielektrizitätskonstante des Bodens zwischen den äußeren Stäben und dem inneren Stab bestimmt die Impedanz der Anordnung.

9.2.4.7 Phase Transmission

Prinzip: Durch den Feuchtegehalt eines Bodens wird die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer elektromagnetischen Welle verändert. Dies bedingt, nach dem Durchlaufen einer gewissen Strecke, eine messbare Phasenverschiebung der Welle gegenüber dem ursprünglichen Signal. Die Phasenverschiebung wird mit zwei konzentrischen offen ringförmigen Sonden bestimmt, an deren Anfang und Ende sich die elektronischen Messgeräte befinden.

9.2.5 Zusammenfassung der Messmethoden

In der nachfolgenden Tabelle werden die einzelnen verfügbaren Messmethoden zur Bestimmung der Bodenfeuchte zusammengefasst.

Tabelle 52: Vergleich der Methoden zur Bodenfeuchtebestimmung

Bezeichnung der Methode	Tensiometer	Gipsblock	Granular Matrix Sensoren (GMS), Watermark Sensor	Wärmeleitungs-messung g alle Angaben aus (3)	Boden Psychrometer alle Angaben aus (3)	Time Domain Reflectometry (TDR, Bodenradar)	Frequency Domain Reflectometry (FDR)	Time Domain Transmission	FD / Kapazitiv	Amplitude Domain Reflectometry	Phase Transmission
Messgröße	Saugspannung, Druck, in mm Wassersäule (1,2,3)	Elektrischer Widerstand, Umrechnung nötig (2)	Druck (Weiterentwicklung des Gipsblockverfahrens)	Druck in bar	Druck in bar	Volumen %	Volumen %	Volumen %	Volumen %	Volumen %	Volumen %
Grundlage des Verfahrens	Hydrostatischer Druck in einer Keramiksonde im Boden.	elektrischer Widerstand einer Gipsprobe im Boden wird in Abhängigkeit von der Feuchte bestimmt	elektrischer Widerstand eines Keramikgranulates im Boden wird in Abhängigkeit von der Feuchte bestimmt	Wärmeleitung in einer Keramikprobe im Boden wird in Abhängigkeit von der Feuchte gemessen (3)	Bestimmung der Bodenfeuchte durch Messung des Dampfdrucks im Boden mit einem Psychrometer (3)	Bestimmung der Bodenfeuchte durch Bestimmung der Dielektrizitätskonstante anhand der Laufzeit eines elektromagnetischen Signals entlang einer Sonde im Boden	wie bei der TDR Bestimmung über Dielektrizitätskonstante, aber anhand der Frequenzänderung des Signals beim Bodendurchgang	wie bei der TDR Bestimmung über Dielektrizitätskonstante, aber anhand der Laufzeit des Signals in einem geschlossenen Leiter.	Dielektrizitätskonstante des Bodens wird über Aufladezeit eines Kondensators bestimmt, dessen Elektroden sich im Boden befinden	feuchteabhängige Impedanz des Bodens wird über Größenänderungen der Amplitude eines reflektierten Signals gemessen	feuchteabhängige Ausbreitungsgeschwindigkeit eines elektromagnetischen Signals wird anhand der Phasenverschiebung der Welle beim Bodendurchgang bestimmt
Messbereich	0 – 800 hPa (1)	500 – 15.000 hPa (2)	100 – 2.000 hPa (2)	0,1 bis 30 bar (3)	0,5 bis 30 bar (3)	0-95 Vol% [6]	0-50% (6)	0-60% (6)	0-55Vol% (6)	/	/
Genauigkeit	0,2 % (4) ± 0,5-1hPa durch Temperaturabhängigkeit, langfristiger in-situ Einsatz vergrößert Ungenauigkeit	Eichung notwendig	± 5% (6)		2 % 3 bis 5% relative Feuchte (6)	1 bis 2 vol% (4) (6)	2 vol% (5) 2 bis 5% je nach Kalibrierungsverfahren Thetaprobe: 2vol% (6)	0,02 % (4) (6)	1% Können für spezielle Böden kalibriert werden	1 vol% nach Kalibrierung (4)	Geringe Präzision, da Signal durch die Ausbreitung stark geschwächt wird
Reichweite der Messung	Radius ~ 10 cm um die Sonde (3)	Radius ~ 10 cm (3)	Radius ~ 10 cm (3)		gering	geringes Volumen, Radius ~5 cm	geringes Volumen, Radius 4 cm	800-6400 cm ³ (4)	Kleiner Messbereich, zwischen den Elektroden	Geringes Erfassungsvolumen. ~4,5 cm ³	Großes Messvolumen 15000 bis 25000 cm ³
Verfahrenseinschränkungen: Leitfähigkeit des Bodens bzw. Salinität	Nein (3)	Unempfindlich gegen Bodenversalzung bis zu 6 dS/m (3)	Änderungen der elektrischen Leitfähigkeit des Bodens wirken sich auf Ergebnisse aus (1) Geringe Empfindlichkeit gegen Bodenversalzung bis 6 dS/m (3)	Unempfindlich gegen Bodenversalzung (3)	/	Bei Böden mit hoher elektrischer Leitfähigkeit (Salzgehalt) sind Messungen nicht mehr linear (5)	Ermöglicht Messungen in stark salzhaltigen Böden (5)	/	Die Messungen werden durch salzhaltige Böden weniger beeinträchtigt als bei der TDR	Unempfindlich gegen hohe Salzgehalte	Beeinflussung durch Salzgehalt/Leitfähigkeit <3 dS/m
Verfahrenseinschränkungen Bodenfeuchte	Bei starker Trockenheit reißt Wassersäule im Tensiometer ab (1) Nur bis 0,7 bis 0,8 bar (6)	Keine Messung bei Trockenheit, keine Messung bei annähernd wassergesättigten Böden möglich (Kurzschluss)	Kann auch bei hoher Wassersättigung des Bodens eingesetzt werden (3)	Werte über 10 bar ungenau	Für sehr trockene Bedingungen geeignet. Aber: Werte über 10 bar ungenau	Bei hohem Wassergehalt < 30% sind die Messungen nicht mehr linear. (5)		/			/
Verfahrenseinschränkungen Temperatur	Beeinflussung der Messwerte durch Temperaturschwankungen (1)	Messwerte sind temperaturabhängig, gleichzeitige Erfassung der Bodentemperatur nötig (3)	Messwerte sind temperaturabhängig, gleichzeitige Erfassung der Bodentemperatur nötig (3), frostsicher		Empfindlich auf Temperaturschwankungen in Nähe der Bodenoberfläche	/	Beeinträchtigungen der Messungen durch Temperatur (4)	/	Messungen werden durch Temperaturschwankungen stärker beeinträchtigt, als bei der TDR	Keine Temperaturbeeinflussungen	/
Verfahrenseinschränkungen: Bodenart	Ungenau bei grobkörnigen Böden und in Böden, die stark aufquellen (3)	in sandigen Böden versickert das Wasser schneller, als sich ein Gleichgewicht bilden kann. Nur für einige landwirtschaftliche Nutzpflanzen auf mittleren und schweren Böden geeignet, ungeeignet für aufquellende Böden (2)	in sandigen Böden versickert das Wasser schneller, als sich ein Gleichgewicht bilden kann; ungeeignet für aufquellende Böden (2)	in sandigen Böden versickert das Wasser schneller, als sich ein Gleichgewicht bilden kann (3)	/	bei Lehmböden, Böden mit hohem Anteil an organischem Kohlenstoff sind die Messungen nicht mehr linear. substratspezifische Kalibrierung ist nötig (5)	substratspezifische Kalibrierung ist nötig (5) Beeinträchtigungen der Messungen durch Bodendichte, Lehmgehalt und Lufteinschlüsse (4)	/	Beeinflussung durch Bodendichte, den organischen und Tongehalt des Bodens und durch Lufteinschlüsse im Boden. Stärker als bei der TDR (4)	Beeinträchtigungen durch Lufteinschlüsse, Steine oder direkten Wasserkontakt.	Benötigt bodenspezifische Kalibrierung
Ansprechzeit	relativ lange bis sich ein Gleichgewicht zwischen Keramik und Boden eingestellt hat (3)	träge (1)	träge (1)	träge	träge, wg. Äquilibration		Höhere zeitliche Auflösung des Signals als bei TDR Messungen (5)				

Reproduzierbarkeit	gut (1)	/	Messwerte im oberen und unteren Messbereich schlecht reproduzierbar (1)			genaue reproduzierbare Messungen (1)					
Messung mit Datenlogger	Ja (3)	/	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja				
Kontinuierliche Messung	Ja (2, 3)	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja				
Vorteile	Geringer Bedarf an elektronischer Ausrüstung, geringer Stromverbrauch Gut geeignet für häufige Messungen bzw. eine Bewässerungssteuerung.	Sensoren sind einfach, preiswert und wartungsfrei (2)	Sensoren sind einfach, preiswert und wartungsfrei (2) Auch bei hoher Wassersättigung einsetzbar (2, 3)	Weiter Messbereich Wartungsfrei	Hohe Empfindlichkeit. Für sehr trockene Bedingungen geeignet	Keine bodenspezifische Kalibrierung nötig. Zusätzliche Bestimmung der elektrischen Bodenleitfähigkeit simultan möglich. (3)		Exakt Großes Volumen des Messbereiches. Preisgünstiger im Vergleich zu TDR-Messungen (4) Drahtlose Verbindung möglich. (1)	Bessere Auflösung als TDR; kann mit gewöhnlichen Aufzeichnungsgeräten ausgelesen werden; verschiedene Sondentypen möglich	In situ Bestimmung der Bodendichte möglich (Wijaya et al., 2002)	Kostengünstig Kann dauerhaft im Boden verbleiben
Nachteile	Gerät muss gewartet werden; wenn Wassersäule reißt (Trockenheit), ist Sonde neu zu installieren; enger Bodenkontakt der Keramik erforderlich	Austausch ist, abhängig von Bauart und Boden nach spätestens zwei Jahren nötig	wenn Poren der Sonde trocken fallen, muss Sensor ausgegraben und neu gewässert werden.	Aufwändiges Equipment erforderlich. Hoher Energieverbrauch.	Nicht für oberflächennahe Messungen geeignet. Aufwändiges Equipment erforderlich.	Messwerte sagen wenig zum pflanzenverfügbaren Wassergehalt im Boden aus. Eichung z. B. mit Tensiometer sinnvoll. (1)	Guter Kontakt zwischen Sonde und Boden Bedingung (4)	Wegen der Größe der Sonde Starke Beeinträchtigung des Bodens (4)	Bodenspezifische Kalibrierung ist nötig.(4)	Bodenspezifische Kalibrierung nötig (4)	Benötigt bodenspezifische Kalibrierung. Starke Beeinträchtigung des Bodengefüges durch die konzentrischen Ringe der Sonde
Kosten pro Sonde	ab 20 € (2)	10 – 15 € je Sensor (2)	ca. 30 € je Sensor (2)	/	/	75€ (4)		preisgünstiger als TDR (4) 75€ (6), 700€ (6)	preisgünstiger als TDR (4) 75€ (6)		
Kosten pro Messgerät	Druckwandlertensiometer 500€ (6)	350 € für das Messgerät (2)	350 € für das Messgerät (2)	/	/	3600-4000€ (4) (6)	300-1500€ (6)	/	1000€ Zusätzliche Datenübertragung per Funk + Software ~ 6000€ (6)		

Quellen:

- (1) P.-J. Paschold, J. Kleber: Vergleich von Bodenfeuchte-Sensoren, Forschungsanstalt Geisenheim - Fachgebiet Gemüsebau, o.J.
- (2) Landesanstalt für Pflanzenbau, Baden-Württemberg (Hrsg.): Beregnung und Bewässerung landwirtschaftlicher und gärtnerischer Kulturen, 2002
- (3) IFAS/UFL, University of Florida Virtual Field day, http://vfd.ifas.ufl.edu/gainesville/irrigation/time_domain_reflectometry_probe.html University of Florida's Institute of Food and Agricultural Sciences, 2006
- (4) H. Sourell: Effektiver Wassereinsatz im Ackerbau durch Beregnungssteuerung. Präsentation auf dem Internationalen DWA-Symposium zur Wasserwirtschaft, 5. April 2006, Berlin
- (5) J. Scherzer, W. Schaaf, R.F. Hüttl: Eignung von FDR- und TDR- Sonden zur Erfassung der Bodenfeuchte in Kippsubstraten mit erhöhter elektrischer Leitfähigkeit. Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, 80, 1996, S. 279 – 282
- (6) Marktrecherche, Angaben einzelner Hersteller

9.3 Umweltauswirkungen der AVM-Herstellung - Schlüsselparameter

Tabelle 53: Direkte Umweltauswirkungen von AVMs – Eckdaten Herstellung

Komponente	Indikator		Einheit	Quelle
Elektronik				
Halbleiter	Primärenergieverbrauch	34	MJ / cm ² Si	349
	Treibhauseffekt	1	kg CO ₂ -eq./cm ² Si	350
	Wasserverbrauch	10	L/cm ² Si	351
Leiterplatte	Primärenergieverbrauch	0,22	MJ / cm ² Substrat	352
	Treibhauseffekt	0,01	kg CO ₂ -eq./cm ² Substrat	dito
	Wasserverbrauch	0,22	L/cm ² Substrat	dito
Energieversorgung				
Solarzellen (polykristallin Si)	Primärenergieverbrauch	0,22	MJ / cm ² Si	353
	Treibhauseffekt	0,01	kg CO ₂ -eq./cm ² Si	dito
	Wasserverbrauch	0,02	L/cm ² Si	dito
Solarzellen (CdTe)	Primärenergieverbrauch	0,06	MJ / cm ² CdTe	dito
	Treibhauseffekt	0,003	kg CO ₂ -eq./cm ² CdTe	dito
	Wasserverbrauch	0,0004	L/cm ² CdTe	dito
Batterie (Alkali AA) ³⁵⁴	Primärenergieverbrauch	4	MJ / Batterie	355
	Treibhauseffekt	0,2	kg CO ₂ -eq./Batterie	356
	Wasserverbrauch	n.a.	L / Batterie	
Mikrobrennstoffzelle ³⁵⁷ : Edelmetallgehalt	Primärenergieverbrauch	2,4	MJ / μ-BZ	358
	Treibhauseffekt	0,23	kg CO ₂ -eq. / μ-BZ	359
	Wasserverbrauch	n.a.	L / μ-BZ	
	Ressourcenverbrauch (exemplarisch)	17	mg (Gold) / μ-BZ	

³⁴⁹ Schischke, K.; Kohlmeyer, R.; Griese, H.; Reichl, H.: Life Cycle Energy Analysis of PCs – Environmental Consequences of Lifetime Extension through Reuse, 11th LCA Case Studies Symposium, December 3-4, 2003, Lausanne

³⁵⁰ Schischke, K.: Projekt ReUse – Interner Bericht, 2003

³⁵¹ Eigene Abschätzung

³⁵² Kemna, R. et al.: MEEuP Methodology Report, Delft, 28. November 2005

³⁵³ Fthenakis, V. M.; Kim, H. C.; Alsema, E.: Emissions from Photovoltaic Life Cycles, Environmental Science & Technology, 2008, 42 (6), S. 2168-2174; Stromverbrauch umgerechnet mit europäischem Strommix

³⁵⁴ Standardbatterie einer Kapazität von 2500 mAh, entsprechend ca. 2,7 Wh

³⁵⁵ Uniross: Study on the Environmental Impact of Batteries, 2007; abgeschätzt aus CO₂-Daten

³⁵⁶ Uniross: Study on the Environmental Impact of Batteries, 2007

³⁵⁷ Leistungsdichte etwa 80 mW/cm², ca. 3 cm²

³⁵⁸ Berechnungsgrundlage: 17 mg für eine Mikrobrennstoffzelle mit den Abmessungen einer Mignon-Knopfbatterie (ohne Wasserstofftank / -erzeugung), Quelle: Projekt ProZell

³⁵⁹ Bundesamt für Umwelt BAFU: Graue Treibhausgas-Emissionen der Schweiz 1990-2004, 2007

