*Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät* *90(2007), 169–180*

Bernd Junghans

# Sensorsysteme lösen eine neue Ära der Produktivitätsentwicklung aus

Seit etwa zwei Jahrzehnten wird immer deutlicher erkennbar, dass sich Sensorsysteme zum Schlüsselelement einer neuen technischen Revolution mit weit reichenden Konsequenzen für alle Bereiche der Gesellschaft entwickeln. Ungeachtet der fundamentalen Bedeutung von Sensorsystemen für die künftige Entwicklung der Gesellschaft ist die Wahrnehmung dieser neuen Technologie im Wesentlichen auf die beteiligten Akteure und professionelle Beobachter der Technikszene beschränkt. Der dringend gebotene gesellschaftliche Diskurs über die Auswirkungen dieser Entwicklung findet kaum statt.

Mit dem Ziel, eine breitere Auseinandersetzung über dieses Thema in der Öffentlichkeit zu befördern, hat das Leibniz-Institut für interdisziplinäre Studien in Zusammenarbeit mit dem Silicon Saxony e.V. im Oktober 2006 in Lichtenwalde die Leibniz-Konferenz „Sensorsysteme 2006“ ausgerichtet. Die dort von führenden Vertretern involvierter Wissenschaftsbereiche gemeinsam mit Industriepartnern diskutierten aktuellen Ergebnisse haben die Tiefe und Breite dieser weitgehend unbemerkt von der Öffentlichkeit in Gang gesetzten Revolution deutlich gemacht.

Im Folgenden soll der Stand dieser Entwicklung im Überblick dargestellt werden. Zu drei besonders interessanten Themen, die auf der Leibniz-Konferenz diskutiert wurden, haben die Autoren nachfolgend eigene Beiträge verfasst (siehe Meyendorf [1], De Man [2], Fischer [3]).

## 1. Ubiquitäre Elektronik und Sensorsysteme

Elektronik, die allgegenwärtig und kontinuierlich Informationen über ihre Umgebung gewinnt, diese Informationen geeignet verarbeitet und wo nötig eigenständig zum Auslösen notwendiger Reaktionen weiterleitet, aber auch Informationen aus anderen Teilen eines nahezu unbegrenzten Informations-

netzes empfangen und verarbeiten kann, wird als ubiquitäre Elektronik bezeichnet. Sensornetzwerke sind Kernbestandteil dieser Vision, die auch als „ubiquitous computing“ oder „ambient intelligence“ bezeichnet wird. Die technische Zielstellung einer solchen Vernetzung der Welt mit Sensoren hat einer der Pioniere dieser Technologie, K.A. Delin, im Jahr 2004 wie folgt formuliert:

„The ultimate goal of a sensor network system is to extract knowledge from the data it collects and to use their information to intelligently react and adapt to its surroundings”.[4]

Die gesellschaftliche Relevanz einer solchen Technologie ist jedoch viel dramatischer, als diese nüchterne technische Zielstellung auf den ersten Blick vermuten lässt. Sie ist der Schlüssel zu einem fundamentalen Produktivitätsschub in allen Bereichen menschlicher Tätigkeit.

Hatte die Erfindung der Kraftmaschinen die körperlichen Kräfte des Menschen in der Produktion über alle Maßen gesteigert und damit die erste industrielle Revolution ausgelöst, hat die Erfindung und praktischen Einführung der modernen Kommunikations- und Informationstechnologien im vergangenen Jahrhundert zu einer weiteren industriellen Revolution geführt, die dank effizienterer Ausführung geistiger Routineaufgaben durch elektronische Rechner nicht nur zu einer unerhörten Steigerung der Arbeitsproduktivität in der Produktion geführt hat, sondern auch in vielen Dienstleistungsbereichen menschliche Tätigkeiten sehr viel produktiver oder gar überflüssig gemacht hat. Schließlich hat diese vor allem von den allgegenwärtigen Computern und deren Vernetzung (Internet) getragene Revolution auch über das Eindringen in den privaten Bereich unseren Lebensstil wesentlich verändert.

Was den derart mit „Intelligenz“ ausgestatteten Maschinen bisher noch fehlte, waren Sinne zur Erfassung ihrer Umgebung und eine darauf aufbauende aktive Kommunikation und Reaktion. Genau das leisten aber zunehmend die Sensorsysteme: Die „Dinge“ erhalten in Gestalt von Sensoren geeignete Sinne und können über die Auslegung der Sensorsysteme wo nötig auch untereinander kommunizieren, weshalb Sensornetzwerke auch als „Internet der Dinge“ bezeichnet werden. Sie erhalten technisch damit auch die Möglichkeiten, Entscheidungen zu treffen. Mit solchen Systemen ist eine sprunghafte Produktivitätssteigerung in nahezu allen Bereichen der Produktion und Dienstleistungen möglich. Meyendorf [1] sieht damit nach dem Zeitalter der Industrialisierung (19. Jahrhundert) und dem Zeitalter der Information (20. Jahrhundert) das von entscheidungsfähigen Maschinen geprägte „Age of Decision“ (21. Jahrhundert) voraus.

In viele Bereiche unseres Lebens haben solche Systeme bereits heute weitgehend unbemerkt Einzug gehalten oder stehen kurz vor der massenhaften Anwendung. Dazu gehören:

- Hausautomatisierung (u.a. Heizung, Lüftung, Beleuchtung, Sonnenschutz, Kommunikation, Unterhaltung, Überwachung und Zugangskontrolle),
- Industrieautomatisierung („menschenleere“ Fabriken, Roboter, Logistik, Überwachung usw.),
- Präzisionslandwirtschaft und Umweltmonitoring (Boden-, Luft-, und Gewässerüberwachung, aktive Steuerung von Bodenparametern),
- Transportautomatisierung (Kommunikation der Autos untereinander sowie mit der Infrastruktur, Leitsysteme, Kontrolle- und Steuerung aller Verkehrsmittel),
- Gesundheitswesen (Telemedizin, elektronische Prothesen u.a.),
- Militärwesen (automatisch gesteuerte Fahrzeuge, Aufklärungsdienste durch Tausende im Feld verstreute „Silicon dust“-Sensoren usw.),
- Automatisierung aller Arten von Dienstleistung (E-Banking, Wartung, Logistik, Einzelhandel, wie etwa mit automatischen Kassen auf Basis von RFID-Systemen, usw.).

Viele dieser Anwendungen entwickeln sich eher unspektakulär als Insellösungen und auf Basis herkömmlicher Systeme. Einige Millionen drahtloser Sensorknoten überwachen bereits heute Heizung, Hausgeräte, Beleuchtung, Türen und Fenster in Häusern oder steuern Industrieanlagen; einige Milliarden können es demnächst werden. Allein 16 Milliarden Sensorgeräte sind in Gebäuden derzeit weltweit installiert, die ein offenkundiges Potential für die neuen drahtlose Sensorknoten sind [5].

Neue Sensorsysteme werden zumeist nicht schlagartig eingeführt, vielmehr lösen sie ältere Systeme schrittweise ab oder ergänzen diese qualitativ. Sie heben die älteren Systeme im dialektischen Sinne auf. Die neue Qualität entsteht vor allem durch die massenhafte Verbreitung und Vernetzung von Sensorsystemen. Es vollzieht sich ein bemerkenswerter Umschlag von Quantität in eine neue Qualität. Das heißt natürlich nicht, dass nicht auch die Qualität der technischen Lösungen für diese Sensorsysteme eine faszinierende und stürmische Entwicklung erfährt.

Im Folgenden sollen deshalb zunächst einige aktuelle Entwicklungsaspekte der Sensorsysteme zusammengefasst werden. Eine tiefgehende Analyse der wissenschaftlich-technischen Aspekte dieser Entwicklung wurde von einem Pionier dieser Entwicklung vom renommierten IMEC, Hugo De Man, auf der 3. Leibniz-Konferenz in seinem Eröffnungsvortrag vorgenom-

men und kann auch in diesem Band in einem von ihm zusammengestellten Überblick [2] nachgelesen werden.

## 2. Entwicklungstendenzen von Sensorsystemen

### 2.1. Systemanforderungen und -konzepte

So vielseitig wie die Anwendungsgebiete von Sensorsystemen, sind auch die Anforderungen an diese Systeme. Unterschiedliche Einsatzgebiete erfordern häufig spezielle Sensoren, die ihrerseits natürlich auch die Systemlösung stark beeinflussen können. Dennoch lassen sich einige allgemeine Forderungen an diese Systeme formulieren, für die bereits heute tragfähige Lösungsansätze existieren:

- Sensorsysteme müssen zu niedrigen Kosten hergestellt werden können; woraus die Notwendigkeit von Massenfertigungen folgt.
- Sensorsysteme dürfen nur geringe Installationskosten erfordern; dazu werden zunehmend Methoden der Selbstkonfigurierung entwickelt – „plug and play“.
- Sensorsysteme müssen weitgehend wartungsfrei und extrem zuverlässig sein; das macht Selbstdiagnose und Selbstreparatur erforderlich - „place and forget“.
- Der Datenaustausch in Sensorsystemen muss störungsfrei und sicher sein; was den verschlüsselten Datenaustausch insbesondere bei drahtlosen Netzen notwendig macht.
- In der Mehrzahl der Anwendungen müssen die Systemkomponenten von geringen Abmessungen sein; weshalb die Miniaturisierung in Form von Mikrosystemen stark vorangetrieben wird.
- Viele neue Anwendungsgebiete von Sensorsystemen erfordern drahtlose Sensorelemente, was zur Entwicklung energieautarker, funkbasierter Sensorknoten führt.

Diese Systemanforderungen haben weltweit zu umfangreichen Forschungs- und Entwicklungsprojekten mit beachtlichen Fortschritten auf allen Teilaspekten geführt.

Die Forderung nach geringen Produktionskosten und Abmessungen der Sensorkomponenten hat die Entwicklung von Mikrosystemen unter Anlehnung an die technologischen Prinzipien der Mikroelektronik stark vorangetrieben [2].

Die Notwendigkeit von energieautarken Systemelementen hat sowohl zur Entwicklung extrem energiesparender Schaltungstechniken („low power“)

und effizienten Softwarelösungen (Betriebssysteme und Operationsmodi), als auch zu neuen Methoden der autarken Energieversorgung für die Sensorknoten („energy harvesting“) geführt.

Einige Anforderungen an die Sensorsysteme lassen sich jedoch nur durch geeignete Lösungen auf der Systemebene lösen (Wolisz [6]). So hat die notwendige hohe Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit der Systeme bei geringen Installations- und Wartungskosten auch zu innovativen Lösungen auf der Komponentenebene (Michel [7]), vor allem aber zur Entwicklung neuer Systemkonzepte geführt, die die Funktion des Sensorsystems auch dann gewährleisten, wenn einzelne Elemente ausfallen.

Ein viel versprechendes Konzept sind Maschennetze (im Gegensatz zu den heute weit verbreiteten Stern-, Baum-, Ring oder Bus-Strukturen). In solchen Netzen wird die Information von Knoten zu Knoten weitergegeben, ohne dass eine genaue Route vorgegeben wird (Abb. 1).

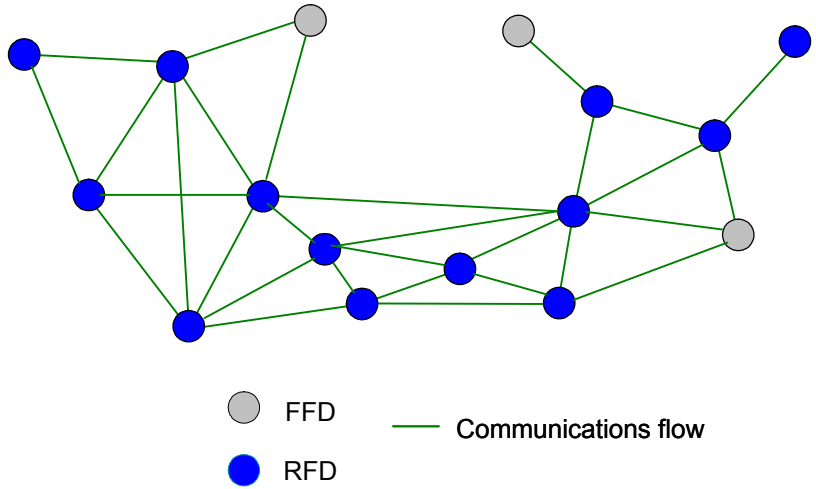


*Abb. 1: Topologie eines Maschennetzwerkes*

Bei Ausfall eines Knotens wird die Informationsweiterleitung über benachbarte FF-Knoten (full function knots) gewährleistet; RF-Knoten (reduced function knots) dienen lediglich der Aufnahme und Abgabe von Informationen, haben also nicht die Funktion einer Relaisstation. Der eigens für Sensornetzwerke entwickelte Kommunikationsstandard IEEE 802.15.4 ermöglicht den Aufbau derartiger Maschennetze mit bis zu 64.000 Knoten.

Um die Installations- und Wartungskosten gering zu halten, müssen Sensorknoten im System selbst konfiguriert werden, selbständig Software-Updates durchführen und sich selbst neu kalibrieren oder gar reparieren [8].

Selbst Probleme der Energieversorgung einzelner Knoten können durch Lösungen auf Systemebene entschärft werden. Z.B. kann das System selbständig in die Informationsweiterleitung eingreifen, um bestimmte Knoten energieseitig zu entlasten, wenn diese einen niedrigen Stand an verfügbarer Energie melden. Dann werden Routingvorgaben gemacht, die diese Knoten entlasten [9][10].

Die Struktur der Sensorknoten hängt stark von den eigentlichen Sensoren ab. Sensorsysteme auf Basis von optischen Fasern (R. Willsch, W. Ecke [11]) haben dank des angewandten Wirkprinzips eine völlig andere Auslegung als etwa Systeme, die auf traditionellen Sensoren aufbauen. Drahtlose Sensorknoten verkörpern nahezu alle Herausforderungen, die an die Entwicklung von modernen Sensorknoten gerichtet sind (Abb. 2).

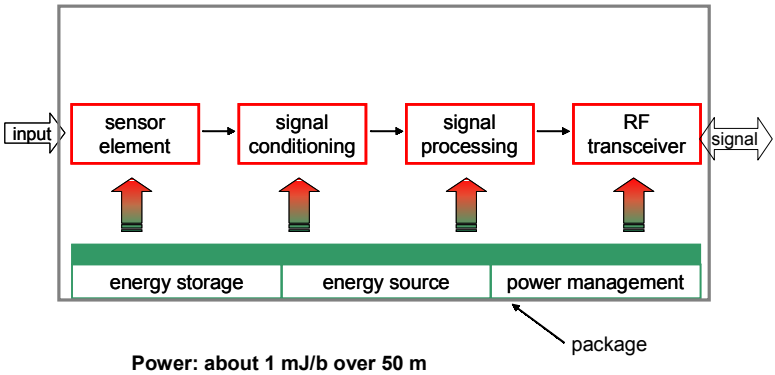


*Abb. 2: Sensorknoten*

Diese Sensorknoten enthalten typischerweise

- das (ggf. die) Sensorelement(e),
- eine nachgeschaltete Elektronikschaltung zur Signalkonditionierung,
- eine Schaltung zur Signalverarbeitung und Netzwerksteuerung,
- eine Hochfrequenzschnittstelle zur drahtlosen Kommunikation,
- eine Antenne, sowie
- Elemente zu Speicherung, Management und ggf. Gewinnung der elektrischen Energie.

Im Idealfall, sind alle diese Komponenten in einem Mikromodul platz- und energiesparend untergebracht. Ein Beispiel für einen solchen kompakten

Knoten hat das IMEC mit dem „System-in-a-cube (SiC)“-Konzept demonstriert [12], bei dem der Sensor, die Signalverarbeitung, die Signalübertragung und die Energieversorgungseinheit in einem Würfel von 1 ccm integriert wurden, und mit dem das Potential für weitere Miniaturisierung aufgezeigt wurde.

Zu jeder dieser Komponenten eines solchen Sensorknotens gibt es derzeit hohe Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten [2].

## 2.2. Sensoren

Sensoren gibt es heute zu nahezu allen physikalischen und chemischen Parametern bis hin zur Erkennung und Analyse von biologischen Objekten („lab-on-a-chip“ [13][14]). Die am weitesten verbreiteten Sensoren sind solche für

- Temperatur,
- Mechanische Größen (Druck, Dehnung, Winkel, Beschleunigung, Schall, …),
- Elektrische Größen (elektrische und magnetische Felder, Spannungen, …),
- Strahlung (Infrarot, sichtbares Licht, Röntgenstrahlung, Kernstrahlung),
- Chemische Elemente und Verbindungen (Gase, Flüssigkeiten).

Auf der Leibniz-Konferenz wurde der Fortschritt auf diesem Gebiet eindrucksvoll demonstriert. Der Trend zur Miniaturisierung und Einsatzvielfalt wurde besonders deutlich bei Spektralsensoren (F. Kerstan [15]) mit enormen Anwendungsbreite in der Landwirtschaft, im Gesundheitswesen, der Pharmazie oder für Beschichtungsverfahren in der Industrie aber auch bei den sehr vielseitig einsetzbaren Infrarotsensoren (M. Krauss [16]). Selbst vormals sehr aufwändige und großvolumige Geräte sind heute in miniaturisierter Form für Sensorsysteme geeignet, wie etwa zur Ionenbeweglichkeitsspektrometrie (J. Leonhardt [17]), Röntgenfluoreszenzanalyse (N. Langhoff [18]) oder Ramanspektrometrie (J. Popp [19]).

## 2.3 Sensorsignalübertragung

Das vom Sensor bereitgestellte elektrische Signal muss nach einer geeigneten Verarbeitung (Konditionierung) im Sensorknoten an das System weitergeleitet werden, ebenso muss der Sensorknoten in Sensornetzwerken in aller Regel auch Signale aus dem System empfangen können.

Die größte Herausforderung stellt dabei die drahtlose Übertragung dar. Es sind verschiedene Hochfrequenztechnologien für drahtlose Sensornetzwerke

verfügbar. Alle sind Breibandverfahren, da Schmalbandverfahren wegen ihrer Empfindlichkeit gegenüber Interferenzen und Mehrwegempfang (multipath fading) in Netzwerken nicht stabil arbeiten. Die verbreitetsten Breitbandtechniken sind:

- DSSS (direct sequence spread spectrum) und
- OFDM (orthogonal frequency division multiplexing).

Lizenzfreie Frequenzbänder für Netzwerke sind 868 MHz (in Europa), 915 MHz (in den USA) und weltweit 2.4 GHz und 5.8 GHz mit jeweils unterschiedlichen Vor- und Nachteilen für die verschiedenen Anwendungsfälle.

Neben proprietären Kommunikationsprotokollen ist nur der Standard IEEE 802.15.4 derzeit für Sensornetzwerke geeignet. Dieser Standard wird durch neuere Weiterentwicklungen immer attraktiver (A. Wolf [20]). WiFi and Bluetooth sind für DLSN vor allem wegen der begrenzten Netzwerkgröße (7 bis 32 Knoten), ihrer fehlenden Eignung für Echtzeitbetrieb (lange Aufwachzeiten aus dem Schlafzustand) und vor allem wegen ihres hohen Energieverbrauches nicht geeignet.

Aufbauend auf den IEEE Standard 802.15.4 wurde für verschiedene Nutzungsprofile der sogenannte ZigBee-Standard durch eine größere Industrieallianz geschafften. Abbildung 3 zeigt die wesentlichen Parameter im Vergleich mit dem populären Netzwerk-Standard „Bluetooth“.

**ZigBee (IEEE 802.15.4)**

| **Parameter** | **ZigBee** | **Bluetooth** |
|---|---|---|
| Power consumption | µW ... mW | 100 mW |
| Data rate | 20 ... 200 kbit/s | 1 Mbit/s |
| Network size | 65536 | 8 |
| Protocoll stack | 25 Kbyte | 250 Kbyte |
| Network join time | 30 ms | 3 s |
| Wake-up time | 15 ms | 2 s |

*Abb. 3*

Perspektiv ist auch die UWB-Technologie ein ernsthafter Kandidat für drahtlose Sensornetzwerke, die allerdings derzeit nur in den USA zugelassen ist.

Für besondere Anwendungen, wie etwa in Militärbereich oder in speziellen Applikationen (so bei Diehl oder Zensys im Bereich der Hausautomatisierung), werden neben den Standards auch Speziallösungen existieren.

### 2.4. Energieversorgung

Die meisten Anwendungen drahtloser Sensornetzwerke werden autonome Netzknoten erfordern, die mit einer entsprechenden Energieversorgung auszustatten sind. Dazu gibt es zwei Möglichkeiten:

- Batterien mit langer Lebensdauer,
- Energiegeneratoren als Teil des Mikrosystems selbst.

Beide Energiequellen setzen voraus, dass extrem energiesparende Techniken in allen Teilen des Mikrosystems angewandt werden.

Bei beiden Quellen gibt es noch Probleme mit der Baugröße, die bei den Batterien zum Lebensdauerproblem hinzukommen. Wegen der angestrebten Miniaturisierung der Sensorknoten müssen auch die Batterien klein und vorzugsweise sehr flach sein. Auf der Leibniz-Konferenz wurden durch K. Marquardt [21] interessante Lösungen für ultraflache Mikrobatterien vorgestellt.

Für die angestrebten wartungsfreien und langlebigen Sensorsysteme ist zweifellos der Einsatz von Mikrogeneratoren [22][23][24] die Methode der Wahl. So sind Vibrationsgeneratoren sehr gut für bewegte Objekte wie Maschinen, Strassen- und Schienenfahrzeuge, Schiffe und Flugzeuge geeignet. Piezoelektrische Wandler erreichen inzwischen einen Wirkungsgrad von bis zu 90 % für die Umwandlung von mechanischer in elektrische Energie. Für autonome Sensoren sind auch Solarzellen eine attraktive Energiequelle, insbesondere in Kombination mit Superkondensatoren als Energiespeicher.

Der Energiebedarf eines Sensorknotens liegt in Abhängigkeit vom Betriebsmodus im Bereich von Mikrowatt bis zu einigen Milliwatt. Diese Größenordnung wird durch Mikrogeneratoren heute schon erreicht, selbst wenn für einen breiten und effektiven Einsatz weitere Entwicklungsfortschritte notwendig sind. Die derzeit erzielbare Leistung liegt bei

- ca. 10 mW/cm$^2$ für Energiewandler auf Basis von Strahlung (elektromagnetische Felder, Licht, Kernstrahlung),
- ca. 10–100 mW/cm$^3$ für Thermogeneratoren und elektromechanische Wandler (Spannung, Vibration, Bewegung).

Die Wahl der Energieversorgung hängt sehr von den Anwendungsbedingungen ab, wie auch das gesamte Design von Mikrosystemen für drahtlose Sensornetzwerke.

## 3. Anwendungsfelder und gesellschaftliche Konsequenzen

Die Anzahl und Vielfalt von Anwendungen für Sensorsysteme ist nahezu unüberschaubar und wächst ständig.

Heute bereits millionenfach im Einsatz sind Sensorsysteme zum automatischen Ablesen von Verbrauchswerten in Gebäuden (P. Kalisch [25]) oder auch zur Steuerung von Hausgeräten und Sicherheitssystemen („home automation"). Das Potenzial für derartige Sensorsysteme beträgt für die etwa $2{,}7 \cdot 10^8$ Haushalte in Westeuropa und den USA ca. $2 \cdot 10^{10}$ Sensorknoten. Das liegt mehr als eine Größenordnung über der Anzahl der Computer und Mobiltelefone, die bisher die Umsatzvolumentreiber für die Elektronikindustrie waren.

Ein ebenso riesiger Markt zeichnet sich für den Einsatz von Sensorsystemen im Verkehrswesen ab [26][27][28]. Fahrzeuge werden dadurch sicherer und komfortabler, wie das wohl schon fast jeder Kraftfahrer durch seine Erfahrungen mit ABS- und EPS-Systemen zu schätzen weiß. Technisch machbar sind heute bereits vollautomatische Fahrzeuge, wie das von der DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) in der Wüste von Arizona über eine Distanz von 175 Meilen jährlich veranstaltete Wettrennen („Grand Challenge" [29]) automatischer Fahrzeuge zeigt. Die dort installierten Fahrerassistenzsysteme werden mit zahlreichen weiteren Sensoren zur Umfelderkennung und mit dem GPS-System kombiniert, was es ihnen erlaubt, eine beim Start unbekannte Strecke unter Umgehung von Hindernissen sicher zurückzulegen. Diese Entwicklung wirft allerdings eine ganze Reihe juristischer Fragen auf, die vor dem Einsatz auf öffentlichen Straßen geklärt werden müssen. Sollte dieses rechtliche Problem gelöst werden können, ergeben sich dramatische Konsequenzen für einen ganzen Berufsstand, dem der Kraftfahrer, die dann nicht mehr nur in Militärfahrzeugen eingespart werden könnten.

Ein anderer großer Anwendungsbereich mit weitreichenden Folgen für die gesamte Produktions- und Dienstleistungsbranche ist das Structural Health Monitoring, das von Meyendorf [1] ausführlich beschrieben wird.

Ebenso weitreichend sind die Auswirkungen des Einsatzes von Sensorsystemen im Gesundheitswesen [3][30]. Die Diskussion auf der Leibniz-Konferenz hat gerade hier einen Bedarf nach interdisziplinärer Betrachtung des jeweils technisch Machbaren, ethisch Vertretbaren und rechtlich Zulässigen aufgezeigt.

Noch nicht absehbar sind die Konsequenzen aus dem massenhaften Einsatz von Sensorsystemen in der Logistik. Interessante Einblicke in Vielfalt der Anwendungen auf diesem Gebiet wurden von U. Meinberg [31] vermittelt. Aus dem dramatischen Anstieg der Arbeitsproduktivität, der mit dem Einzug von Sensorsystemen in die Logistik möglich wird, lässt sich eine gewaltige Einsparung von gering qualifizierten Arbeitskräften und eine Umwäl-

zung der Arbeitsinhalte auf diesem Gebiet erwarten. Die sich daraus ergebenden gesellschaftlichen Folgen sind bisher kaum untersucht.

Die weitreichendste Frage aus dem allumfassenden Einsatz von Sensorsystemen ist die nach den gesellschaftlichen Folgen dieser neuen Ära der Produktivitätsentwicklung: Wird die enorme Steigerung der Arbeitsproduktivität und damit massenhafte Freisetzung von Arbeitskräften zur allgemeinen Verbesserung der Lebensqualität und des Wohlstandes der Gesellschaft insgesamt führen oder wird sie den Riss in der Gesellschaft zwischen Beteiligten und Ausgeschlossenen vertiefen?

## Literatur

[1] N. Meyendorf, Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät, (dieser Band), Jahrgang 2007; „Neue Konzepte für Bauteil- und Materialüberwachung in der Verkehrstechnik, speziell Bahn und Flugzeug“

[2] H. De Man, Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät (dieser Band), Jahrgang 2007; „Ambient Intelligence: A Giga-Scale Dream Facing Nano-Scale Realities“

[3] W. J. Fischer, H. G. Despang, H. J. Holland, D. Wiedemuth, Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät (dieser Band), Jahrgang 2007; „Body Area Networks – Anwendung in telemedizinischen Systemen“

[4] K. A. Delin, A Distributed Wireless Monitoring System, www.sensormag.com, April 2004

[5] Firmenangaben Zensys, Inc. 2005

[6] A. Wolisz, Sensornetze: Entwicklungstendenzen und Perspektiven, 3. Leibniz-Konferenz, Lichtenwalde 2006, www.leibniz-institut.de

[7] B. Michel, Zuverlässigkeit, Sicherheit und Lebensdauer von Sensornetzwerken im Mikro-Nano-Übergangsbereich, 3. Leibniz-Konferenz, Lichtenwalde 2006, www.leibniz-institut.de

[8] N. Bulusu, T. Bokareva, Sensor Fault Detection and Calibration, in: N. Bulusu, S. Jha, Wireless Sensor Networks, Archtech House, Inc. 2005, p.35

[9] J. Heidemann, W. Ye, Energy Conservation in Sensor Networks at the Link and Network Layers, in: N. Bulusu, S. Jha, Wireless Sensor Networks, Archtech House, Inc. 2005, p.75

[10] M. Welsh, S. Madden, A whole-Network Approach to Sensor-network Programming, in: N. Bulusu, S. Jha, Wireless Sensor Networks, Archtech House, Inc. 2005, p.191

[11] R. Willsch, W. Ecke, Optische Fasersensorsysteme für die strukturintegrierte Überwachung technischer Anlagen; 3. Leibniz-Konferenz, Lichtenwalde 2006; www.leibniz-institut.de

[12] IMEC NEWSLETTER, 1cm$^3$ system-in-a-cube: any sensor, anytime, anywhere! July 2004

[13]S. Smith, D.J. Nagel, Nanotechnology-Enabled Sensors: Possibilities, Realities, and Applications, www.sensormag.com, November 2003
[14]P. Singer, Silicon "Nanograss" Provides Precise Fluid Control, Semiconductor International 6/1/04
[15]F. Kerstan, Spektroskopische Prozessüberwachung unter Einsatz miniaturisierter Spektralsensoren, Anwendungen vom Kraftwerk bis zum Krankenbett; 3. Leibniz-Konferenz, Lichtenwalde 2006, www.leibniz-institut.de
[16]M. Krauss, Thermografie als Mess- und Monitoringverfahren – Stand und Tendenzen; 3. Leibniz-Konferenz, Lichtenwalde 2006, www.leibniz-institut.de
[17]J. Leonhardt, Industriefeste IMS-Systeme für Industrie- und Umweltmonitoring im unteren ppm-Bereich; 3. Leibniz-Konferenz, Lichtenwalde 2006, www.leibniz-institut.de
[18]N. Langhoff, On-line Röntgenfluoreszenzanalyse zur Bestimmung des Zn-Gehaltes von Konverterstaub bei Temoeraturen bis 250 grad Celsius; 3. Leibniz-Konferenz, Lichtenwalde 2006, www.leibniz-institut.de
[19]J. Popp. Miniaturisierte Raman-Sensoren zur Überwachung chemischer und biologischer Vorgänge; 3. Leibniz-Konferenz, Lichtenwalde 2006, www.leibniz-institut.de
[20]A. Wolf, New IEEE Standards for Wireless Sensor Networks; 3. Leibniz-Konferenz, Lichtenwalde 2006, www.leibniz-institut.de
[21]K. Marquardt, Ultraflache Mikrobatterien; 3. Leibniz-Konferenz, Lichtenwalde 2006, www.leibniz-institut.de
[22]T. Riedel, Power Considerations for Wireless Sensor Networks, www.sensormag.com, March 2004
[23]A. Kansal, M. Srivastava, Energy-Harvesting-Aware Power Management, in: Wireless Sensor Networks, Archtech House, Inc. 2005, p.119
[24]M. Ashauer, Energiegewinnung für autarke Mikrosysteme; 3. Leibniz-Konferenz, Lichtenwalde 2006, www.leibniz-institut.de
[25]P. Kalisch, Funksysteme zur automatischen Ablesung von Verbrauchswerten in Wohnungen und Gebäuden; 3. Leibniz-Konferenz, Lichtenwalde 2006, www.leibniz-institut.de
[26]H. Winter, Kamerabasierte Sensorik für Fahrerassistenzsysteme; 3. Leibniz- Konferenz, Lichtenwalde 2006, www.leibniz-institut.de
[27]W. König, P. Knoll, Intelligente Sensoren in prädikativen Fahrerassistenzsystemen. Bevormundung des Fahrers oder realer Kundenutzen?; 3. Leibniz-Konferenz, Lichtenwalde 2006, www.leibniz-institut.de
[28]J. Apitz, Lasersensoren für Verkehrstechnik, Kfz und industrielle Anlagen;, 3. Leibniz-Konferenz, Lichtenwalde 2006, www.leibniz-institut.de
[29]www.darpagrandchallenge.com/
[30]R. Kraemer, Sensornetze im medizinischen Umfeld; 3. Leibniz-Konferenz, Lichtenwalde 2006, www.leibniz-institut.de
[31]U. Meinberg, Sensorsysteme in Wertschöpfungsketten; 3. Leibniz-Konferenz, Lichtenwalde 2006, www.leibniz-institut.de