

Die technische Basis für das Internet der Dinge

Friedemann Mattern
Institut für Pervasive Computing, ETH Zürich

*Es kommt mir so vor, als sei das rasante Wachstum des WWW
nur der Zündfunke einer viel gewaltigeren Explosion gewesen.
Sie wird losbrechen, sobald die Dinge das Internet nutzen.
Neil Gershenfeld, MIT*

Kurzfassung. Der stete Fortschritt der Mikroelektronik, Kommunikationstechnik und Informationstechnologie hält weiter an. Damit rückt auch die Vision einer umfassenden „Informatisierung“ und Vernetzung der Welt und ihrer vielen Gegenstände immer näher. Funketiketten auf RFID-Basis, multimedialfähige Handys und Chips in Kreditkarten und Ausweispapieren sind dabei nur die ersten Vorboten des kommenden Zeitalters des Ubiquitous Computing: Denn nicht nur Mikroprozessoren und ganze Computer werden immer leistungsfähiger, kleiner und preiswerter, sondern bald lassen sich auch über Funk miteinander kommunizierende Sensoren, die ihre Umgebung erfassen, sehr billig in miniaturisierter Form herstellen und millionenfach in die Umwelt einbringen oder unsichtbar in Gegenstände einbauen. Zusammen mit neuen Technologien zur Ortsbestimmung bekommen so gewöhnliche Dinge eine noch nie da gewesene Qualität – diese können dann wissen, wo sie sich gerade befinden, welche anderen Gegenstände oder Personen in der Nähe sind und was in der Vergangenheit mit ihnen geschah. Aus ihrem Kontext können sie vielleicht sogar einfache Schlüsse über die Situation, in der sie sich befinden, ableiten. Langfristig entsteht so ein „Internet der Dinge“, das gewaltige Auswirkungen auf viele Lebensbereiche haben dürfte.

1 Ubiquitous Computing

Der seit Jahrzehnten zu beobachtende stete Fortschritt der Mikroelektronik und Informationstechnologie hält weiter an und dürfte damit bald einen Punkt erreichen, der eine neue Qualität in der Computeranwendung ermöglicht: Prozessoren, Speicherbausteine und Sensoren können dann aufgrund ihrer winzigen Größe, ihres geringen Energiebedarfs und ihres fast vernachlässigbaren Preises in viele Alltagsdinge eingebaut werden und diesen einen Mehrwert verleihen, indem sie sie zu einem an die jeweilige Situation angepassten Verhalten befähigen. Informationsverarbeitung und drahtlose Kommunikationsfähigkeit dringen so fast überall

Einige Teile dieses Beitrags beruhen auf dem Aufsatz [Mat03] sowie anderen früheren Veröffentlichungen des Autors.

ein, selbst in Gegenstände, die zumindest auf den ersten Blick keine elektrischen Geräte darstellen¹. Damit sind auch die technischen Voraussetzungen für die Kooperationsfähigkeit „smarter“ Dinge untereinander und das Entstehen eines „Internets der Dinge“ gegeben.

Für die zu erwartende Durchdringung der Welt mit Informationstechnologie prägte Mark Weiser, seinerzeit leitender Wissenschaftler am Xerox-Forschungszentrum im Silicon Valley, bereits Anfang der 1990er-Jahre den Begriff „Ubiquitous Computing“. Weiser erkannte früh das Potential, das im nachhaltigen Fortschritt der Mikroelektronik und Informatik liegt, und propagierte in seinem visionären Artikel *The Computer for the 21st Century* [Wei91] den ubiquitären Computer, der den Menschen unsichtbar und unaufdringlich bei seinen Tätigkeiten unterstützt und ihn von lästigen Routineaufgaben weitgehend befreit. Dabei soll der Computer als sichtbares Gerät nach Weisers Auffassung in den Hintergrund treten oder durch Verschmelzen mit den Dingen sogar ganz verschwinden, dessen informationsverarbeitende Funktionalität im Sinne einer „elektronischen Hintergrundassistentz“ aber überall verfügbar sein.

Die visionäre Aussage von Marc Weiser „*in the 21st century the technology revolution will move into the everyday, the small and the invisible*“ kann in Bezug auf die Computertechnik heute auf zwei Arten interpretiert werden: Kleine und preiswerte Prozessoren, Sensoren, Speicher und Kommunikationsmodule lassen sich einerseits in Alltagsgegenstände integrieren, was als *embedded computing* bezeichnet wird. Stattet man andererseits die Umwelt damit aus, dann erhält man sogenannte *Sensornetze*. Auf beide Aspekte wird weiter unten (Kapitel 4) eingegangen.

Während Weiser den Begriff „Ubiquitous Computing“ als eine unaufdringliche, humanzentrierte Technikvision versteht, die sich so erst in der ferneren Zukunft realisieren lässt, hat die Industrie dafür inzwischen den Begriff „Pervasive Computing“ [BHR01, HMN03] mit einer leicht unterschiedlichen Akzentuierung geprägt: Auch hier geht es um die überall eindringende und omniprésente Informationsverarbeitung, allerdings mit dem primären Ziel, diese schon kurzfristig im Rahmen von Mobile-Commerce-Szenarien und Web-basierten Geschäftsprozessen nutzbar zu machen. Die sich damit ergebenden Perspektiven (und kommerziellen Hoffnungen) wurden vor einigen Jahren von Lou Gerstner, seinerzeit Chairman von IBM, fast schwärmerisch so beschrieben: „*A billion people interacting with a million e-businesses through a trillion interconnected intelligent devices.*“

Als Reaktion auf die weitgehend US-amerikanisch geprägte Szene um die Begriffe „Ubiquitous Computing“ und „Pervasive Computing“ ist in Europa in den letzten Jahren der Terminus „Ambient Intelligence“ [AHS02, AaM03, DBS04, Mat04] entstanden, der verstärkt auch Aspekte der Mensch-Maschine-Interaktion und der künstlichen Intelligenz umfasst. Man stellt sich dabei vor, dass eine „intel-

¹ „*Es wird in wenigen Jahrzehnten kaum mehr Industrieprodukte geben, in welche die Computer nicht hineingewoben sind, etwa so, wie das Nervensystem in Organismen hineingewoben ist*“, schrieb Karl Steinbuch schon 1966 in seinem vielbeachteten Buch „Die informierte Gesellschaft“ [Ste66].

ligente“ Technologie den Menschen über intuitive Schnittstellen unterstützend zur Verfügung steht, die Technik selbst jedoch zurückgezogen und nur auf eine behutsame und nahezu unmerkliche Weise wirkt. Eine räumliche Umgebung soll zum Beispiel fähig werden, die Anwesenheit unterschiedlicher Personen zu erkennen und mit diesen individuell in unaufdringlicher Weise zu interagieren. Auch Alltagsgegenstände sollen sich von passiven Objekten zu aktiven, kommunikationsfähigen Subjekten wandeln und der dinglichen Welt eine ganz neue Eigenschaft verleihen: Diese wird „sensibel“ und reaktionsfähig, passt sich den aktuellen Bedürfnissen des Menschen an und steigert damit dessen Leistungsfähigkeit und Lebensqualität.

Langfristig soll Ambient Intelligence praktisch alle Lebensbereiche umfassen: Ein mit Ambient Intelligence ausgestattetes Haus erhöht Komfort und Sicherheit und trägt zur automatischen Energieeinsparung bei; im Bürobereich wird die Arbeitseffizienz durch eine aufmerksame, lernfähige und personalisierte Assistenz gesteigert; der Verkehr wird durch intelligente Autos, Straßen und Züge sicherer, ressourcenschonender und stressfreier; und auch der medizinische Bereich soll durch die neue Technik revolutioniert werden – Sensoren in der Kleidung erstellen Langzeitdiagnosen, und kommunikationsfähige Implantate adaptieren sich an die aktuelle Situation.

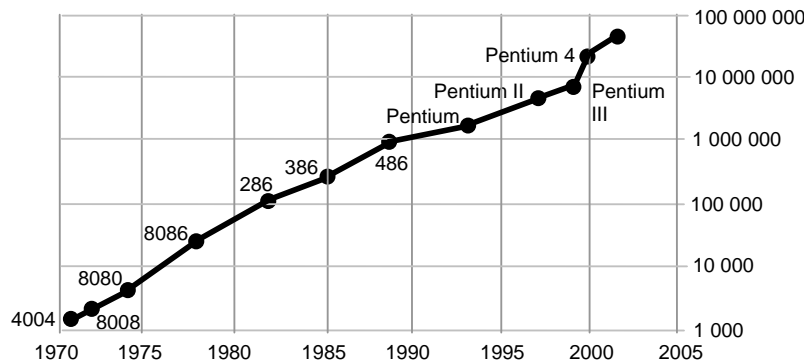


Abb. 1. Anzahl integrierter Transistoren ausgewählter Mikroprozessoren

Noch stecken allerdings die Technologien zur Realisierung solcher Zukunftsträume in den Kinderschuhen, und es besteht ein erheblicher Forschungsbedarf beispielsweise bei neuartigen Nutzungsschnittstellen wie der Sprach- und Gestenerkennung sowie bei der Realisierung eines adaptiven und lernfähigen Verhaltens „smarter“ Dinge. Konkreter sind hier die Szenarien aus dem Bereich des Ubiquitous und Pervasive Computing, die im Wesentlichen nur inkrementelle Verbesserungen bereits etablierter Technologien, wie sie weiter unten beschrieben werden, voraussetzen. In vielerlei Hinsicht bleibt die Unterscheidung zwischen den drei Begriffen „Ubiquitous Computing“, „Pervasive Computing“ und „Ambient Intelligence“ indes eher akademisch. Gemeinsam ist allen das Ziel einer unaufdringlichen, aber nachhaltigen Unterstützung des Menschen im Alltag sowie einer

durchgängigen Automatisierung und Optimierung wirtschaftlicher Prozesse. Erreicht werden soll dies durch die Integration einer Vielzahl von miniaturisierten Prozessoren, Sensoren und Funkmodulen in Räumen, Umgebungen und Alltagsdingen, ergänzt durch unterstützende Infrastruktursysteme.

2 Das Gesetz von Moore

Im Computerbereich hat in den letzten Jahrzehnten eine dramatische technische Entwicklung stattgefunden, einhergehend mit einer substantiellen Veränderung der Kostenrelationen, die aus dem teuren wissenschaftlichen Instrument „Rechner“ das Massenprodukt „PC“ gemacht hat und damit die Informationsverarbeitung im wahrsten Sinne des Wortes popularisiert hat. Ursache hierfür ist der stete Fortschritt in der Mikroelektronik, welcher weiterhin andauert und uns inzwischen fast zur Selbstverständlichkeit geworden ist: Mit erstaunlicher Präzision und Konstanz scheint das bereits Mitte der 1960er-Jahre von Gordon Moore aufgestellte „Gesetz“ zu gelten [Moo65], welches besagt, dass sich die Zahl der auf einen Chip integrierbaren elektronischen Komponenten (wie z.B. Transistoren) alle 18 bis 24 Monate verdoppelt (Abb. 1, Quelle: Intel).

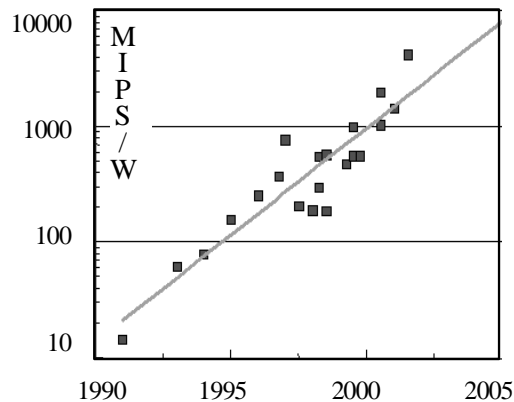


Abb. 2. Leistungsentwicklung von Prozessoren in MIPS/W

Populärer ist eine Kurzform des mooreschen Gesetzes, welches ausdrückt, dass sich die *Leistungsfähigkeit* von Prozessoren (bei konstanter oder sogar eher abnehmender Größe und Preis) etwa alle anderthalb Jahre verdoppelt. Dies ist aber eher eine Konsequenz aus der ursprünglichen Fassung, wobei neben den niedrigeren Schaltzeiten der kleineren Transistoren, die eine höhere Taktrate ermöglichen, auch Architekturprinzipien wie Pipelining, Parallelität und Cachegrößen ins Spiel kommen, mit denen die größeren Transistorzahlen in eine höhere Prozessorgeschwindigkeit umgesetzt werden.

Die Verkleinerung der Strukturbreiten elektronischer Komponenten auf den Mikrochips hat weitere interessante Konsequenzen. Moore meint dazu in [Moo95]: „*By making things smaller, everything gets better simultaneously. There is little need for tradeoffs. The speed of our products goes up, the power consumption goes down, system reliability improves, ... the cost drops.*“ Abbildung 2 zeigt beispielhaft den Effizienzgewinn beim Energiebedarf pro Computerinstruktion (angegeben als Reziprokwert „MIPS pro Watt“ für ausgewählte Prozessoren) – ein wichtiges Ergebnis, da die Energiedichte von Batterien leider relativ zu den Steigerungsraten, die man in der Mikroelektronik gewohnt ist, nur langsam anwächst.

Auch wenn immer wieder vor Fehlinterpretationen und dem baldigen Ende des mooreschen Gesetzes gewarnt wird (vgl. z.B. [Tuo02]), scheint kein unmittelbarer Anlass zu Fortschrittspessimismus gegeben zu sein: Noch während einer ganzen Reihe von Jahren dürften Prozessoren und Speicherkomponenten immer leistungsfähiger, kleiner und billiger werden. Bei vielen Anwendungen aus dem Bereich des Ubiquitous Computing geht es auch nicht primär um höchste Rechenleistung, vielmehr stehen billige Herstellungsverfahren und ein niedriger Energiebedarf im Vordergrund.

Das mooresche Gesetz ist übrigens nicht nur durch physikalische Grenzen bedroht, sondern auch durch ökonomische, da die Kosten für die innerhalb weniger Jahre abzuschreibenden Produktionsstätten laufend steigen und bereits mehrere Milliarden US-Dollar betragen. Aber selbst wenn die Chipindustrie die exponentielle Zunahme von integrierten Komponenten auf Mikroprozessoren nicht mehr lange garantieren kann, dürfte aufgrund anderer Faktoren die tatsächlich spürbare Computerleistung in nächster Zeit insgesamt dennoch weiter stark anwachsen. Hierfür sorgen neben neuen Architektur- und Verarbeitungsprinzipien auch die zu erwartenden Leistungssteigerungen bei der Kommunikation und dem Speichervermögen.

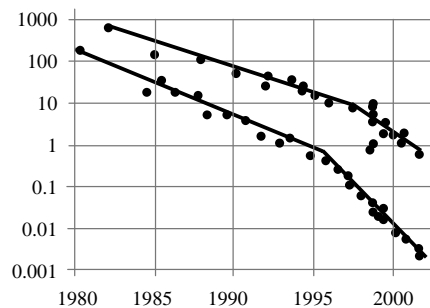


Abb. 3. Preisentwicklung Speicher (RAM bzw. Festplatten in US-Dollar/MByte)

Interessanterweise lässt sich das mooresche Gesetz auf andere wichtige Technologieparameter ausdehnen. So verdoppelte sich Ende der 1990er-Jahre die Bandbreite von Glasfaserverbindungen etwa jährlich. Erstaunlich ist ferner die

Entwicklung bei Speichern, für die das „verallgemeinerte“ mooresche Gesetz² voll zutrifft. Abbildung 3 [Hay02] zeigt die Kosten bei konkreten Festplatten und Halbleiterspeichern. In den letzten zwei Jahrzehnten fiel bei Magnetplatten (3,5-Zoll, untere Linie) der Preis für 1 MByte von ca. 100 US-Dollar auf einige zehntel Cent. Die Datendichte verdoppelte sich über lange Zeit etwa alle 2 Jahre, ab 1997 aber sogar jährlich, was sich in der Abbildung im Preisknick widerspiegelt – dieser Trend scheint momentan ungebrochen [GrH03]. Abbildung 4 illustriert, wie klein Festplatten hoher Kapazität, die sich in mobilen Geräten wie Handys oder MP3-Playern finden, inzwischen geworden sind.

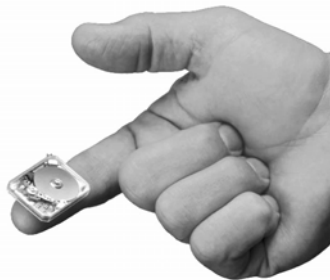


Abb. 4. Eine 4-GB/0,85-Zoll-Harddisk von Toshiba (2004)

Halbleiterspeicher (RAM) wurden, wie die obere Linie von Abb. 3 zeigt, ebenfalls laufend billiger – wenn auch nicht mit der gleichen Rate wie Magnetplattenspeicher. Bei RAM erwartet man in nächster Zeit übrigens einen Qualitätssprung, wenn MRAM (Magnetic Random Access Memory) in hohen Stückzahlen erhältlich wird, denn MRAM kombiniert die besten Eigenschaften derzeit verfügbarer Halbleiter-Speichertechnologien: die Geschwindigkeit von statischem RAM (SRAM), die Speicherdichte und die niedrigen Kosten von DRAM und die Persistenz von Flash-Memory. Letzteres bedeutet, dass der Speicherinhalt beim Ausschalten nicht verloren geht, und ist daher vor allem für portable Geräte von Bedeutung, da dies ein Instant-on-Verhalten und damit einen Hot-stand-by-Betrieb ermöglicht. Da außerdem der Stromverbrauch von MRAM sehr niedrig ist (im Unterschied zu DRAM ist kein Refreshing nötig), halten auch die Akkumulatoren in Mobiltelefonen, PDAs und Laptops deutlich länger.

Längerfristig erwartet man von Technologien, die heute eher exotisch erscheinen, wie beispielsweise der Holographie, nochmals deutlich höhere Speicherdichten.

² „For some reason anything that changes exponentially in the technology world now gets lumped under Moore’s Law – but I’m happy to take credit for all of it“, sagte der 74-jährige Gordon Moore im Februar 2003 anlässlich der International Solid-State Circuits Conference – und verlängerte gleichzeitig die Gültigkeit seines Gesetzes um weitere 10 Jahre.

3 Weitere technologische Treiber

Vieles treibt den Fortschritt der Informationstechnik auf ganz unterschiedlichen Ebenen voran: technische Perfektionierungen von Lasern und Displays, effizientere Methoden zum Erstellen von Software, bessere Programmiersprachen und Betriebssysteme, neue physikalisch-chemische Prozesse für Batterien, innovative Konzepte für die Mensch-Maschine-Interaktion, flexiblere Fertigungsverfahren und noch manches mehr. Das alles wiederum beruht wesentlich auf dem kontinuierlichen Zuwachs an Erfahrung und Wissen sowie einem steten Erkenntnisgewinn in der grundlagenorientierten Forschung.

Der Fortschritt ist im Detail nicht planbar, und einzelne Entdeckungen geschehen eher zufällig. Dennoch lassen sich auf hoher Ebene, wo viele Einzelbeiträge zusammenfließen, klare Trends ausmachen, die über lange Zeit anhalten. Durch Extrapolation solcher Trends kann mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit darauf geschlossen werden, was in näherer Zukunft möglich ist. Das oben diskutierte Mooresche Gesetz stellt einen solchen Trend dar – die Mikroelektronik, die in den letzten Jahrzehnten bezüglich ihres Leistungszuwachses diesem Gesetz treu geblieben ist, ist die wohl wichtigste treibende Kraft hinter den Visionen des Ubiquitous Computing.

Für das sich abzeichnende Internet der Dinge sind aber auch andere Technologiebereiche sowie indirekte Konsequenzen des mikroelektronischen Fortschritts wichtig. So sollten smarte Dinge zum Beispiel untereinander und eventuell sogar mit Nutzern kommunizieren können. Einige Dinge wollen vielleicht außerdem etwas über ihre Umgebung erfahren, ihre Identität weitermelden oder wissen, wo sie sich befinden. Auf diese Aspekte und die dabei erkennbaren technischen Trends soll nachfolgend kurz eingegangen werden.

3.1 Neue Materialien und Ausgabemedien

Schon immer haben Werkstoffe ganze Zeitalter geprägt, denken wir nur an Bezeichnungen wie *Steinzeit* oder *Eisenzeit*. Die zweite Hälfte des letzten Jahrhunderts war wesentlich durch Silizium bestimmt – das Grundmaterial der Halbleiterindustrie und der Stoff, aus dem der Mikroprozessor besteht.

Jetzt aber, zu Beginn des einundzwanzigsten Jahrhunderts, zeichnet sich etwas Neues ab: Es sieht so aus, als ob demnächst Polymere, also „Plastik“, eine wesentliche Rolle spielen werden und – etwa im Bereich der Polymerelektronik – Dinge ermöglichen, die man früher nie erwartet hätte. Hier wären unter anderem *lichtemittierende Polymere* („leuchtendes Plastik“) zu nennen, die Displays aus dünnen und hochflexiblen Plastikfolien ermöglichen.

Es wird auch an *elektronischer Tinte* gearbeitet, welche Papier und Stift zum vollwertigen, interaktiven und hoch mobilen Ein- und Ausgabemedium mit einer uns wohlvertrauten Nutzungsschnittstelle erheben. Hier gibt es verschiedene technische Möglichkeiten, wovon eine auf folgendem Prinzip beruht: Eingeschlossen in Mikrokapseln, die etwa den Durchmesser eines menschlichen Haares haben, „schwimmen“ weiße und schwarze, elektrisch unterschiedlich geladene Pigmente.

Diese „Tinte“ wird auf eine sehr dünne Plastikfolie aufgetragen. Legt man an einer Stelle der Folie eine positive oder negative Spannung an, dann fließen entweder die weißen oder respektive die schwarzen Pigmente an die Oberfläche und erzeugen an dieser Stelle einen kleinen Punkt. Auf diese Weise kann dynamisch etwas geschrieben und später wieder gelöscht werden. Werden zudem Farbfilter eingesetzt, ist sogar eine farbige Darstellung möglich.

Da eine Energiezufuhr lediglich zur Änderung, nicht aber für die Aufrechterhaltung des Bildes nötig ist, dieses nicht flimmert und die Substratfolien nur ca. 0,2 mm dünn sind, bietet sich diese Technologie für roll- und faltbare Bildschirme geradezu an. Prototypen existieren bereits, und an der Behebung diverser Mängel bezüglich Haltbarkeit, Pixelgröße oder Preis wird gearbeitet. Die Bedeutung für die Praxis kann wohl kaum hoch genug eingeschätzt werden, wenn durch elektronische Tinte die Vorteile von Bildschirm und Papier verschmelzen und damit letztlich Papier, ein uns auch kulturell wohl vertrautes und klassisches Medium, quasi zum Computer mutiert oder umgekehrt der Computer als Papier daherkommt!

Laserprojektionen aus einer Brille direkt in das Auge stellen eine weitere gegenwärtig untersuchte Möglichkeit zur Substitution klassischer Ausgabemedien von Computern dar. Bei diesen sogenannte *Retinaldisplays* erzeugt ein im Brillengestell eingebauter Laser ein computergeneriertes Bild, das auf ein kleines Prisma im Brillenglas gelenkt wird. Von dort wird es in das Auge gespiegelt und auf die Retina projiziert. Das Bild entsteht also nicht auf einem „Schirm“, sondern wird Punkt für Punkt direkt ins Auge geschrieben.

Solche Brillen eröffnen nun ganz neue Möglichkeiten zur Informationsdarstellung – Computer (und vielleicht auch Fernseher) könnten damit z.B. auf ihre Bildschirme verzichten. Richtig interessant wird es dann, wenn der Brillenträger Informationen eingblendet bekommt, die in der jeweiligen Situation für ihn nützlich sind. Dies hat Mahadev Satyanarayanan auf nette (und vielleicht nicht so ganz ernst gemeinte) Weise einmal wie folgt beschrieben [Sat01], wobei er davon ausgeht, dass neben einer kleinen Kamera, wie man sie bei Foto-Handys ja bereits findet, zukünftig auch ein Softwaresystem zur visuellen Objekterkennung in Brillen eingebaut werden kann: *„You could wear a pair of glasses with a small amount of face recognition built-in, look at a person, and his name would pop up in a balloon above his head. You could know instantly who the person is, even if you don't immediately recognize him. I look at my tree, and a little balloon pops up saying, ‘Water me,’ I look at my dog, it says, ‘Take me out,’ or I look at my wife, it says, ‘Don't forget my birthday!’”*

Generell kann man sich leicht vorstellen, dass in Zukunft immer mehr elektronisches Gerät in miniaturisierter Form in Kleidung, Armbanduhren und Schmuckstücke eingebaut wird. Letztlich geht es beim sogenannten *wearable computing* allerdings weniger darum, medienwirksame Cyborg-Phantasien oder Jacken mit eingebautem MP3-Player zu realisieren, sondern langfristig dem einzelnen Menschen in persönlicher Weise zu dienen: seinen Gesundheitszustand zu überwachen, seine Sinne zu schärfen und ihn jederzeit mit Informationen zu versorgen – ihn also sicherer und mächtiger zu machen – zwei bedeutende Triebkräfte!

3.2 Sensoren

Entwicklungen der Mikrosystemtechnik und vermehrt auch die Nanotechnik ermöglichen kleinste Sensoren, die unterschiedlichste Parameter der Umwelt aufnehmen und die gemessenen Werte in elektrischer Form weitermelden. Sensoren stellen gewissermaßen die „Sinnesorgane“ smarterer Dinge dar, mit denen diese ihre Umwelt wahrnehmen können. Bei der Sensortechnik wurden in den letzten Jahren bedeutende Fortschritte erzielt; neuere Sensoren reagieren nicht nur auf die klassischen Größen Licht, Beschleunigung, Temperatur, Feuchtigkeit, Druck, Magnetfeld etc., sondern können durch integrierte Rechenleistung auch Gase und Flüssigkeiten analysieren und den sensorischen Input vorverarbeiten.

In etwas verallgemeinerter Form kann man auch Kameras zu den Sensoren rechnen – diese sind mittlerweile ja so klein, dass sie problemlos in Handys eingebaut werden können. Vor allem aber sind sie auch so billig, dass sich nicht nur James Bond eine Spezialanfertigung leisten kann. Und auch hier ist das Ende des technisch Möglichen noch nicht erreicht – so bemüht man sich derzeit, neben dem CCD-Element auch die zugehörige Elektronik und die Linse auf einem einzigen Chip zu integrieren. Physikalisch spricht auch nichts dagegen, dass Kameras in Zukunft so weit verkleinert werden können, dass sie mit bloßem Auge praktisch nicht mehr zu erkennen sind.

Eine interessante Entwicklung sind ferner Funksensoren, die ohne explizite Energieversorgung ihre Messwerte einige Meter weit melden können. Die dazu nötige Energie beziehen sie aus der Umgebung oder direkt aus dem Messvorgang, indem beispielsweise piezoelektrische oder pyroelektrische Materialien bei Druck bzw. Temperaturmessungen eingesetzt werden. Andere Typen batterieloser Funksensoren beruhen auf einer Variante der RFID-Technik, bei der der Sensor in Abhängigkeit vom gemessenen Wert ein jeweils spezifisches Funkecho zurücksendet, wenn er mit einem Hochfrequenzsignal bestrahlt wird.

Funksensoren mit einer akkumulatorbetriebenen Stromversorgung, die ihre Messwerte via GSM-Mobilfunknetz über größere Distanzen weitermelden, werden im Logistikbereich vereinzelt bereits eingesetzt, so etwa zur Überwachung von Containern oder Eisenbahn-Güterwagen und oft in Verbindung mit GPS-basierten Lokalisatoren. Kürzlich hat Siemens unter dem Namen „MyAy“ aber auch für den Consumer-Markt ein eiförmiges Gerät vorgestellt, das diverse Sensoren besitzt und vielfältige Fernüberwachungsfunktionen wahrnehmen kann. So erkennt beispielsweise ein Infrarotsensor, wenn sich in der Umgebung etwas rührt, und ein Beschleunigungssensor registriert, wenn das Gerät selbst bewegt wird. Eingebaut sind auch ein Temperatur- und ein Geräuschsensor. Konfiguriert wird MyAy via Handy oder Internet. Es kann dann, wenn sich in seiner Umgebung etwas Ungewöhnliches tut, per SMS mit dem Handy des Besitzers Kontakt aufnehmen oder ihn auf andere Weise alarmieren. Im Unterschied zu einem Mobiltelefon ist ein solches Gerät also nützlich, wenn man es *nicht* mit sich herumträgt. Propagiert werden Anwendungsmöglichkeiten als mobiles Babyphon oder als Alarmanlage im Urlaub, etwa um das Zelt auf dem Campingplatz zu schützen.

Ob die Sensor- und Kommunikationstechnik bereits weit genug fortgeschritten ist, um Systemen wie MyAy einen Markterfolg zu bescheren, wird sich noch zei-

gen müssen. Langfristig darf man aber davon ausgehen, dass Funksensoren eine wichtige Rolle spielen werden, z.B. in Form von Sensornetzen, die weiter unten (Kapitel 4.1) thematisiert werden.

3.3 Kommunikationstechnik

Wenn man das Internet aus historischer Perspektive betrachtet und die dabei erkennbaren Trends extrapoliert, erscheint das Entstehen eines „Internets der Dinge“ konsequent und fast unvermeidlich. Tatsächlich ist die Geschichte des Internets nicht nur durch einen stürmischen, exponentiell verlaufenden Zuwachs hinsichtlich der angeschlossenen Rechner charakterisiert. Interessanter ist in diesem Kontext die damit einhergehende *qualitative* Entwicklung: War das Internet in den 1970er-Jahren zunächst noch ein Experimentier- und Forschungsnetz, das Nutzer im Wesentlichen für remote login und Dateitransfer, also den entfernten Zugriff auf Computerressourcen, verwendeten, so wurde es in den 1980er-Jahren zunehmend als Kommunikationsmedium von *Mensch zu Mensch* benutzt – E-Mail entwickelte sich zur dominierenden Anwendung. Die 1990er-Jahre brachten mit dem WWW dann aber eine ganz andere Nutzungsform hervor: Nun kommunizierten *Menschen* via Browser auf der einen Seite mit *Maschinen*, nämlich WWW-Servern, auf der anderen Seite. Dies hatte eine Vervielfachung des Datenverkehrs zur Folge und stellte gleichzeitig die Voraussetzung für die schnelle Kommerzialisierung und Popularisierung des Internets dar. Die gegenwärtige Dekade lässt sich dadurch charakterisieren, dass mit internetfähigen Mobiltelefonen und PDAs, aber auch mit neueren Fernsehgeräten, Fotokopierern und anderen elektronischen Medien und Geräten das Internet sich über seine klassische Domäne hinaus ausbreitet und einen ganz neuen Markt und Tummelplatz für innovative Anwendungen erschließt.

Nun zeichnet sich am Horizont aber bereits ein weiterer Qualitätssprung ab, der die Internetnutzung der kommenden Dekade bestimmen dürfte und völlig neue Möglichkeiten eröffnet: Das Internet wird bald auch für die autonome Kommunikation von *Maschine zu Maschine* und schließlich sogar von *Ding zu Ding* verwendet werden. Kommunikationsprotokolle und Infrastrukturdienste, die Web-Informationen maschinenlesbar machen, wie beispielsweise XML und Web-Services, sind erste Anzeichen dafür. Auch das Semantic Web und die Bemühungen, geeignete Ontologien zur Klassifikation und Strukturierung von Daten im Web zu erhalten, dienen letztlich dem Zweck, kooperative Prozesse im Internet automatisch ausführbar zu machen. Vor allem aber werden in Zukunft viele in Alltagsgegenständen eingebettete Prozessoren und Sensoren im Verbund mit neuen technischen Möglichkeiten der drahtlosen Datenkommunikation dafür sorgen, dass gewöhnliche Dinge miteinander kommunizieren können und diese z.B. ihren Aufenthaltsort oder ihre Sensorwerte anderen interessierten und dazu befugten Dingen mitteilen.

Damit dürfte das Internet einen weiteren drastischen Wandel erleben: Nachdem mittlerweile so gut wie alle Computer der Welt daran angeschlossen sind, steht nun quasi seine Verlängerung bis in die letzten Alltagsgegenstände hinein an – es

entsteht ein *Internet der Dinge*! Tatsächlich hat Neil Gershenfeld vom MIT im Rahmen seines „Internet 0“-Projekts eine Leichtgewichtsimplementierung des IP-Internetprotokolls realisiert, welche auf kleinen Hardware-Knoten zum Preis von etwa 3 US-Dollar ausführbar sein soll [GKC04]. Dabei wurde aber viel Funktionalität abgespeckt, so dass nur noch einfachste Anwendungen (wie z.B. Lichtschalter) möglich sind. Generell ist wohl eher nicht davon auszugehen, dass bei der Vernetzung smarterer Dinge überall das klassische Internet-Protokoll zum Einsatz kommt – da die Implementierung dieses Protokolls für banale Dinge geringer Funktionalität nicht adäquat sein mag, könnte die konkrete Internetanbindung stattdessen von einem in der Nähe befindlichen „Proxy“ (Mobiltelefon, RFID-Lesegerät, WLAN-Hotspot etc.) übernommen werden, welcher dann in geeigneter Weise mit den smarten Dingen kommuniziert.

Für die Realisierung der Vision vom Internet der Dinge ist – insbesondere zur Überbrückung der letzten Meter – vor allem die drahtlose Kommunikation von großer Bedeutung. Auf diesem Gebiet werden anhaltende technische Erfolge erzielt. Interessant sind, neben Fortschritten hinsichtlich höherer Datenraten bei der mittlerweile großflächig etablierten und auf teurer Infrastruktur beruhenden Handy-Technik (GSM, UMTS) und der eher dezentral wachsenden WLAN-Technik (WiFi, IEEE802.11), insbesondere neuere Kommunikationstechniken im Nahbereich.

Mit *ZigBee* (IEEE802.15.4), in gewisser Weise eine Fortentwicklung der bekannten Bluetooth-Kurzstreckenfunktechnik im 2,4-GHz-Band mit Übertragungsraten von bis zu 250 kbit/s, können in einem Bereich von einigen zig Metern dichte Netze aus mehreren hundert Knoten aufgebaut werden. ZigBee benötigt sehr wenig Energie und ermöglicht kleine und billige Bauformen der Kommunikationsmodule. Vorrangiges Anwendungsgebiet ist die drahtlose Vernetzung im Bereich der „consumer electronics“. Aber auch bei der Gebäudeautomation und im medizinischen Bereich ergeben sich interessante Einsatzmöglichkeiten.

Ultra Wide Band (UWB, IEEE802.15.3) andererseits ermöglicht hohe Datenraten. Das verwendete Prinzip basiert auf extrem kurzen Energieimpulsen, die über ein breites Frequenzspektrum ausgesandt werden. Dadurch ist UWB nicht nur relativ störungsunempfindlich und durchdringt Hindernisse besser als andere Funktechnologien, sondern kann auch ähnlich wie Radar benutzt werden und erlaubt damit prinzipiell die Lokalisierung von Objekten mit einer Präzision im Zentimeterbereich.

Interessant im Hinblick auf eine intuitive Nutzerinteraktion mit Geräten und smarten Dingen ist auch die *Near Field Communication*³ (NFC), ein Standard, der im Jahr 2004 von Nokia, Philips und Sony etabliert wurde. Technisch gesehen handelt es sich um ein Kommunikationsprinzip, das die induktive Kopplung verwendet und analog zu RFID (bzw. kontaktlosen Chipkarten), allerdings nur über Distanzen von wenigen Zentimetern, funktioniert. Es wird der 13,56-MHz-Frequenzbereich mit eher geringen Datenraten von 106, 212 oder 424 kbit/s genutzt, wobei nur sehr wenig Energie benötigt wird. Bei der Kommunikation ist ein Partner im sogenannten aktiven Modus, der andere kann im aktiven oder passiven

³ www.nfc-forum.org

Modus sein. Aktive Geräte generieren ein Magnetfeld (ähnlich zu RFID-Lesegeräten), mit dem die Daten übertragen werden, während passive Geräte sich als batterielose RFID-Transponder verhalten und ihre Daten nach dem Prinzip der Lastmodulation übermitteln.

Verfügen bei NFC die beiden Kommunikationspartner zusätzlich über drahtlose Kommunikationsschnittstellen höherer Übertragungsleistung, wie z.B. WLAN oder Bluetooth, so kann NFC auch lediglich zur Herstellung des Kontaktes, zur Identifikation der Geräte und zum Austausch der Parameter für die automatische Konfiguration des schnelleren Mediums genutzt werden. Die eigentliche Datenkommunikation erfolgt dann in transparenter Weise über die so eingerichtete leistungsfähigere Verbindung.

Aktive NFC-Einheiten sind klein genug, um beispielsweise in einem Mobiltelefon untergebracht zu werden; passive Einheiten sind als RFID-Tags noch wesentlich kleiner und vor allem sehr billig. Damit ermöglicht NFC ein neues Kommunikationsparadigma: Kommunikation durch physische Nähe. Aus Nutzersicht sieht es dabei so aus, als ob sich zwei benachbarte Geräte erkennen und miteinander kommunizieren, sobald sie sich berühren oder zumindest sehr nahe kommen. Auf diese Weise soll eine mühelose und intuitive Datenübertragung zwischen den vielen persönlichen (und meist kleinen und mobilen) „information appliances“ eines Nutzers wie Digitalkamera, Mobiltelefon, PDA, Spielkonsole, Fernseher oder PC möglich werden. Das Problem der Sicherheit und Authentifikation wird alleine dadurch wesentlich entschärft, dass NFC nur über sehr kurze Distanzen wirkt und praktisch ein physischer Kontakt hergestellt werden muss.

Sehr interessant ist aber auch noch eine andere potentielle Nutzungsart von NFC: Indem beispielsweise ein mit einer aktiven NFC-Einheit ausgestattetes Mobiltelefon an ein Objekt gehalten wird, das einen RFID-Chip enthält, kann dieser ausgelesen werden. Das Handy kann die gelesenen Daten dann entweder direkt interpretieren und anzeigen oder ergänzende Information über das Mobilnetz besorgen bzw. sogar mit einem zugehörigen Server im Internet interagieren, dessen Internetadresse auf dem RFID-Chip gespeichert ist. Dadurch sind etwa Szenarien denkbar, wo man mit einer Reklametafel oder einem Filmplakat interagiert und dabei Videoclips zugespielt bekommt, Kinokarten reserviert oder Musik herunterlädt und dies mit der Telefonrechnung bezahlt.

Die fernere Zukunft lässt über UWB, ZigBee und NFC hinaus noch wesentlich weitergehende Möglichkeiten bei der drahtlosen Kommunikation erwarten. Einerseits etwa WLAN-Hotspots mit Datenraten von über 1 Gbit/s, andererseits extrem kleine und energiesparsame Funktechnologien für Sensornetze, bei denen nur sehr geringe Datenraten erforderlich sind. Indem Sender und Empfänger mit mehr „Intelligenz“ ausgestattet werden, um sich an die momentane Situation anzupassen, kann das verfügbare Frequenzspektrum auch wesentlich ökonomischer genutzt werden, als es mit den bisherigen, auf analoger Technik beruhenden Verfahren möglich war, so dass insgesamt in viel größerem Umfang als heute „gefunkt“ werden kann.

3.4 Lokalisierung

Damit „smarte“ Alltagsdinge sich situationsangepasst verhalten können, ist der Kontext, in dem sie sich befinden, von großer Relevanz. Zu den wichtigsten Kontextaspekten eines Gegenstandes gehört sein momentaner Ort (bei fast allen Dingen, die wir besitzen und die uns wichtig sind, handelt es sich schließlich nicht um „Immobilien“, sondern um prinzipiell bewegliche Objekte) und seine Nähe zu anderen Dingen. Festzustellen, wo sich ein Gegenstand befindet, ist daher eine wichtige Aufgabe für viele Anwendungen im „Internet der Dinge“.

Zur Lokalisierung mobiler Objekte existieren verschiedene technische Ansätze [HiB01]. Eine einfache – wenn auch etwas grobe – Möglichkeit besteht darin festzustellen, in welchen Empfangsbereichen bzw. Funkzellen von Sendern man sich befindet, deren Positionen bekannt sind. Da die Signalstärke mit zunehmender Entfernung von Sender und Empfänger abnimmt, kann dieser Faktor ebenfalls berücksichtigt werden; allerdings ist dieses Prinzip ungenau, da die Signalstärke durch viele Störeffekte beeinflusst wird. Eine etwas aufwendigere aber präzisere Methode besteht in der Laufzeitmessung von Funksignalen und daraus abgeleitet der Entfernungsbestimmung, wobei im Allgemeinen der Abstand zu drei oder mehr Punkten bekannt sein muss, um die Position im Raum festlegen zu können. Das „Global Positioning System“ (GPS) und das ähnlich konzipierte europäische Galileo-System, das zwischen 2009 und 2011 einsatzbereit sein soll, beruhen beispielsweise auf einer solchen Entfernungsmessung zu momentan sichtbaren Satelliten – eine Einschränkung stellt dabei allerdings die Tatsache dar, dass dies bisher nur bei „Sichtkontakt“ zu den Satelliten, also im Freien, funktioniert.

An verbesserten Möglichkeiten zur Positionsbestimmung mobiler Objekte wird derzeit intensiv gearbeitet. Neben einer Erhöhung der Genauigkeit (derzeit einige Meter beim GPS-System) besteht das Ziel vor allem in einer deutlichen Verkleinerung der Module (einige passive Bauelemente und vor allem die Antenne stellen bei GPS-ähnlichen Systemen noch eine Herausforderung dar), einer Reduktion des Energiebedarfs sowie der Entwicklung von Techniken, die auch in geschlossenen Räumen funktionieren. Es wird erwartet, dass schon 2006 Chips für die satellitenbasierte Positionsbestimmung auf den Markt kommen, die wesentlich schwächere Signale verarbeiten können und deutlich weniger Energie benötigen, womit die Verwendung in Mobiltelefonen und ähnlichen Geräten möglich wird. Außerdem sollte so auch im Fall einer nicht vorhandenen Sichtverbindung zu einem Satelliten oftmals noch eine Ortsbestimmung durchführbar sein.

Zur Ortung von Handys (oder Dingen, die sich diesbezüglich wie ein Handy verhalten) kann auch das Mobilfunknetz verwendet werden, das in vielen Ländern flächendeckend vorhanden ist. Beispielsweise ist bei GSM die Funkzelle bekannt, in der sich ein Handy aufhält. Zwar ist die Funkzellendichte nur in Agglomerationsbereichen relativ hoch (mit typischerweise einigen wenigen hundert Metern Abstand zwischen den Antennen) und beträgt im ländlichen Raum bis zu 35 km, allerdings kennt die Basisstation einer Funkzelle die Entfernung der Handys zu ihrer Sendeantenne mit einer Granularität von etwa 550 m. Dies ist aus technischen Gründen (Synchronisation) notwendig und wird durch Laufzeitmessungen des Funksignals ermittelt. Befindet sich ein Handy im Überlappungsbereich meh-

rerer Funkzellen, kann die Position durch Messung der Laufzeitunterschiede im Prinzip auf etwa 300 m genau ermittelt werden. Bei UMTS, dem Mobilfunksystem der nächsten Generation, das zurzeit eingeführt wird, wäre in technischer Hinsicht sogar eine bis zu 10 Mal genauere Lokalisierung möglich.

Interessant ist eine neuere Lokalisierungsmöglichkeit, die auf WLAN-Zugangspunkten beruht: In vielen städtischen Gebieten sind WLAN-Basisstationen schon sehr dicht vorhanden, so dass man sich fast überall im Bereich eines oder mehrerer solcher Funknetze mit typischen Zellengrößen von einigen zig Metern befindet. Für Seattle wurde zum Beispiel im Herbst 2004 eine Dichte von ca. 1200 Stationen pro Quadratkilometer gemessen. Kennt man die Ortskoordinaten der festen Stationen (öffentlich zugängliche Datenbanken enthalten bereits über eine Million Netze mit deren eindeutiger Kennung und Ortskoordinaten), so kann damit eine Lokalisierungsgenauigkeit von 20 bis 40 Meter erreicht werden – auch in Gebäuden, wo GPS bisher versagt [LCC05]. Städtische Bereiche können damit schon zu fast hundert Prozent abgedeckt werden.

Je genauer und einfacher der Ort eines kleinen, preiswerten Gerätes ermittelt werden kann, umso vielfältiger und interessanter sind natürlich die möglichen Anwendungen. Manch einer mag davon träumen, in Zukunft kaum mehr etwas zu verlieren bzw. das Verlorene fast immer wiederzufinden, weil ein Gegenstand stets weiß, wo er ist, und dies bei Bedarf mitteilen kann – das ist beim jetzigen Stand der Technik allerdings unrealistisch. Noch sind Lokalisierungsmodule für viele Anwendungen zu groß, zu teuer, zu ungenau und zu energiehungrig. Bei allen vier Parametern erzielt man allerdings kontinuierliche Fortschritte. Für größere und wertvolle Dinge wie beispielsweise Mietautos rechnet sich die Verwendung von Lokalisierungstechnologien schon heute, und mit dem Fortschritt der Technik werden nach und nach dann auch einfachere Gegenstände von dieser Möglichkeit profitieren.

Damit ist vorstellbar, dass sich in Zukunft für viele Dinge eine Art „Fahrten-schreiber“ realisieren lässt: Weiß ein Gegenstand, wo er sich befindet, dann braucht er dies nur regelmäßig zusammen mit der momentanen Uhrzeit abzuspeichern oder weiterzumelden, womit sich auch im Nachhinein die „Lebensspur“ des Gegenstandes einfach rekonstruieren lässt. Durch den Abgleich mehrerer solcher Lebensspuren kann der gemeinsame Kontext verschiedener Dinge ermittelt werden, oder es kann über diese Historie einfach Zugang zu damit assoziierten Informationen (z.B. das Hotel, in dem sich eine ortsbewusste Reisetasche befand) erlangt werden.

Ist eine Lokalisierung von Dingen zukünftig einfach, billig und genau machbar, dann finden sich dafür vielfältige Verwendungsmöglichkeiten. Nicht nur Schlüssel, Haustiere, Koffer, Postsendungen, Container, Waffen, mautpflichtige Fahrzeuge, diebstahlgefährdete Objekte, umweltschädliche Stoffe und untreue Ehepartner wollen oder sollen lokalisiert werden, sondern auch Eltern könnten es sehr schätzen, wenn Kleidungsstücke der Kinder ihren Aufenthaltsort verraten oder wenn sogar Alarm ausgelöst wird, falls sich außer Haus die Jacke zu weit vom Schuh entfernt. Ein Vorbote einer solchen Möglichkeit ist ein seit einiger Zeit in

Deutschland angebotener Lokalisierungsdienst für Mobiltelefone⁴, über den im März 2004 „Bild.de“ folgendermaßen berichtete: *Neuer Handy-Dienst sagt Ihnen immer, wo Ihr Kind ist. Ist es auch wirklich in der Schule? Mit „Track your kid“ finden Sie es heraus. Deutschlandweit können Sie so bis auf 250 m genau feststellen, wo sich der Nachwuchs aufhält. Das kann gerade für berufstätige Eltern oder Alleinerziehende eine Erleichterung sein. Denn diese sanfte Kontrolle verschafft Ihnen Sicherheit – und das Kind merkt gar nichts davon!* Rechtlich ist an diesem Dienst übrigens nichts auszusetzen, da das Telekommunikationsgesetz die Weitergabe der Standortinformation zulässt, wenn der Handybesitzer dem zustimmt. Vermutlich wird aber einen kritischen Zeitgenossen oder einen Bürger in einem totalitären Staat eine solche Zustimmungspflicht nicht ganz beruhigen können...

Tatsächlich dürfte in Zukunft der „location privacy“ besondere Beachtung zukommen [Mat05]. Denn wissen Dinge, wo sie sind oder wo sie waren, dann kann damit leicht auf den Aufenthaltsort einer Person geschlossen werden, wenn die persönlichen Gegenstände dies „ausplaudern“. Lokalisierungstechnologien bergen also einiges an sozialem Sprengstoff: nicht nur, weil man damit Leuten hinterherespionieren kann, sondern weil dies auch ein bewusst eingesetztes Kontrollinstrument werden kann. Dobson und Fisher drücken dies in ihrem Artikel „Geoslavery“ [DoF03] mit drastischen Worten so aus: *„Society must contemplate a new form of slavery, characterized by location control.“* Andererseits kann das Wissen um den Aufenthaltsort anderer oder gar die Kontrolle darüber manchmal natürlich auch nützlich und sozial akzeptabel sein – nicht nur bei Kindern, sondern zum Beispiel auch bei zeitweilig geistig verwirrten Personen, wie dies etwa im Bereich der Altenpflege gehäuft vorkommt: Statt solche Personen vorsichtshalber einzuschließen, kann man z.B. virtuelle Sicherheitszonen definieren, bei deren Verlassen Alarm geschlagen wird. Dies ermöglicht es den Betroffenen, innerhalb gewisser Grenzen ein selbstbestimmteres Leben zu führen – auch wenn die Trennlinie zwischen Schutz und Freiheit einerseits und Überwachung und Eingriff in die Privatsphäre andererseits dabei einen diffizilen Verlauf annehmen kann.

Solange nur einfache Handys lokalisierbar sind, wie zum Beispiel beim oben erwähnten „Track your kid“-System, kann man dies (wenn man daran denkt!) als Betroffener noch kontrollieren und das Gerät notfalls – allerdings zum Preis der Nicht-Erreichbarkeit – ausschalten. Schon gibt es aber erste Produkte in Form von Armbanduhren⁵, mit denen man aus der Ferne den Aufenthaltsort seiner Kinder feststellen kann. Diese Uhren sind noch nicht so bequem, genau und energiesparend, wie man es sich wünscht, aber die Technik macht ja Fortschritte! Nun mag ein 8-Jähriger das Tragen einer solchen Uhr „cool“ finden. Aber ist auch die 15-jährige Tochter bereit, sich damit auf Schritt und Tritt verfolgen zu lassen? Muss sie sich rechtfertigen, wenn sie die Fernlokalisierungsmöglichkeit einmal abschaltet – sofern dies überhaupt geht? Sollte man nicht „vorsichtshalber“ auch auf Bewährung freigelassene Sträflinge verpflichten, eine solche Uhr zu tragen? Oder, falls die Technik zukünftig klein genug wird, Ausländern („zum eigenen Schutz“) in das Visum integrieren?

⁴ www.trackyourkid.de

⁵ www.wherify.com

Die Lokalisierung von Strafgefangenen und Kindern wird in ersten Projekten jedenfalls bereits betrieben. Die Firma Technology Systems International in Arizona hatte beispielsweise im Sommer 2004 schon vier Gefängnisse mit Lokalisierungstechnologie und Armbändern für die Insassen, die alle zwei Sekunden die Position melden, ausgestattet. Angeblich nahmen dadurch die Gewalttaten um 60 % ab, und Greg Oester, der Präsident der Firma, begründete dies so [Kan04]: *„Inmates know they are being monitored and know they will get caught. The word spreads very quickly. It increases the safety in facilities.“* Ebenfalls ein ortsbewusstes Armband bekommen die Kinder beim „Kidspotter“-System⁶ im dänischen Legoland. Damit können Eltern im Falle eines Falles eine SMS-Nachricht an das System schicken und bekommen als Antwort die Ortskoordinaten ihres Kindes, welches sie dann mittels einer Karte lokalisieren können. Nebenbei erfährt Legoland so auch, mit welchen Attraktionen sich ihre jungen Besucher vorwiegend vergnügen und welche Teile des Parks eher übersehen werden.

3.5 Energie

Im Vergleich zur rasanten Effizienzsteigerung bei Prozessorleistung, Kommunikationsbandbreite und Speicherdichte macht die Batterietechnik eher langsame Fortschritte. Immerhin konnte die Kapazität jedoch durchschnittlich um ca. 5 % pro Jahr gesteigert werden; bei den verbreiteten AA-Mignonzellen in den letzten 20 Jahren beispielsweise von ca. 0,6 auf 1,8 Wattstunden [Est02]. Batterien lassen sich mittlerweile in dünner (0,5 mm) und biegsamer Bauform herstellen und können in ihrer Gestalt daher den jeweiligen Gegebenheiten angepasst werden.

Der Energiehunger elektronisch realisierter Funktionalität und der Wunsch, Batterien nicht oder möglichst selten wechseln zu müssen (was praktisch unabdingbar für die Realisierung der Vision autonomer smarterer Alltagsgegenstände ist), hat zur intensiven Suche nach alternativen Energiequellen geführt. Brennstoffzellen haben hinsichtlich ihres Energieträgers (z.B. Methanol) eine 10 bis 40fach höhere Energiedichte als Batterien, allerdings lassen sie sich derzeit nicht beliebig klein verwirklichen, und es tritt bei der Umwandlung in elektrische Energie ein Verlust von ca. 50–80 % auf. Typische Solarzellen erreichen bei Sonnenschein maximal 10 mW/cm², bei Kunstlicht ist die Ausbeute leider um fast 3 Größenordnungen kleiner. Weitere Möglichkeiten, Energie in geringem Umfang aus der Umwelt abzuschöpfen, bestehen z.B. bei mechanischer Energie (vibrierende Fensterscheiben, Körperbewegungen etc.). Dies mag in Zukunft zumindest in einigen spezifischen Anwendungskontexten sinnvoll sein, wenn Prozessoren, Speicher und Kommunikationsmodule dann deutlich weniger Energie als heute benötigen. Eine explizite drahtlose Energieversorgung ist zwar prinzipiell auch möglich, funktioniert aber nur über kurze Distanzen – immerhin nutzen jedoch kontaktlose Chipkarten, RFID-Chips sowie die passiven Komponenten von NFC das Prinzip der magnetischen Induktion erfolgreich zu diesem Zweck.

⁶ http://blogger.iff.org/Future/cat_rfid.html

Eine noch nicht voll ausgeschöpfte Option im Umgang mit dem Energieproblem besteht auch im Energiesparen. Dies betrifft nicht nur schaltungstechnische Maßnahmen in der Hardware, sondern auch energiebewusste Software, die auf „intelligente“ Weise mit Energie verantwortungsvoll umgehen und einzelne Systemkomponenten zeitweise abschalten oder mit reduzierter Leistung betreiben kann. Hier dürften in nächster Zeit noch einige Fortschritte zu erwarten sein.

Da Energie generell eine sehr kostbare Ressource ist – für kleine und portable Geräte ist vor allem die Maßeinheit „Energie pro Gewicht“ relevant – und sich nur beschränkt speichern lässt, macht ein sparsamer Umgang damit ausgeklügelte Maßnahmen im Bereich der Kommunikationsprotokolle sowie der Soft- und Hardwarearchitekturen notwendig und erfordert im Allgemeinen eine verteilte Bearbeitung der Anwendung auf unterschiedlich ausgestatteten Geräten. Grob kann man in einem solchen vernetzten Systemverbund drei Klassen von Geräten unterscheiden: Zum einen „Mikrowattknoten“, die über Monate hinweg autonom betrieben werden können und nur einfachste sensorische Aufgaben wahrnehmen. Sie sind im Wesentlichen für die „awareness“ umgebungsbewusster Systeme zuständig, verbringen lange Zeit im energiesparenden Tiefschlaf und melden ihre Erkenntnisse nur sporadisch über kurze Funkdistanzen weiter. Des Weiteren lassen sich „Milliwattknoten“ identifizieren, die einige Tage mit einer Batterie oder Akkuladung auskommen. Und schließlich gibt es „Wattknoten“, welche an das Stromnetz angeschlossen sind und Serverfunktionen wahrnehmen oder Gateways zum Internet darstellen. Die Milliwattknoten sind in der Form von Mobiltelefonen, PDAs, Retinaldisplays und ähnlichen mobilen und persönlichen Geräten für die Nutzungsschnittstelle und den ubiquitären Audio- und Video-Zugang zuständig, kommunizieren über größere Funkdistanzen mit Wattknoten und können (z.B. im Bereich des wearable computings) auch Daten von nahe gelegenen Mikrowattknoten entgegennehmen. Während Wattknoten und Milliwattknoten technisch bereits gut beherrscht werden und etabliert sind, ist die Mikroelektronik erst jetzt so weit, dass langsam auch Mikrowattknoten (und zugehörige Kommunikationstechnologien wie z.B. ZigBee) möglich werden – Anwendungsmöglichkeiten dafür werden weiter unten im Kapitel über Sensornetze diskutiert.

3.6 RFID

Bei RFID („Radio Frequency Identification“) handelt es sich um eine Technologie, um Dinge aus der Ferne zu identifizieren. Bekannt geworden sind in letzter Zeit vor allem die ohne eigene Energieversorgung funktionierenden elektronischen Etiketten. Dabei verwendet man technisch gesehen Transponder, die mit einem Hochfrequenzsignal bestrahlt werden, dieses Signal decodieren, aus ihm (z.B. nach dem Prinzip der magnetischen Induktion) auch die Energie für sich selbst beziehen und eine Antwortnachricht (etwa eine eindeutige Identifikationsnummer) als Funksignal zurücksenden. In gewisser Weise handelt es sich bei dieser Technik um eine Weiterentwicklung der bekannten Türschleusen zur Diebstahlsicherung von Kaufhäusern und Boutiquen. Allerdings geht es hier nicht mehr nur um eine binäre Information „bezahlt/gestohlen“, sondern es können

„durch die Luft“ innerhalb von Sekundenbruchteilen einige hundert Bits gelesen und bei manchen Typen sogar geschrieben werden – je nach Bauform und zugrundeliegender Technik bis zu einer Distanz von einigen wenigen Metern.

RFID-Chips sind typischerweise weniger als ein Quadratmillimeter groß und dünner als ein Blatt Papier. Die meist flache Antenne kann aus sehr dünnem Kupfer oder auch aus leitfähiger Tinte bestehen. In der Form von flexiblen Selbstklebeetiketten („smart labels“) kosten sie mit fallender Tendenz derzeit zwischen 10 Cent und 1 Euro pro Stück und haben dadurch das Potential, in manchen Anwendungsbereichen die klassischen Strichcodeetiketten zur Identifikation von Waren abzulösen. Von Vorteil ist dabei vor allem, dass im Unterschied zu anderen Technologien, wie etwa den aus dem Supermarkt bekannten Laserscannern, keine Sichtverbindung zum Lesegerät bestehen muss. Neben den für den Masseneinsatz geeigneten passiven RFID-Transpondern existieren auch batteriegespeiste *aktive* Transponder mit wesentlich größeren Reichweiten, die z.B. in regelmäßigen Zeitabständen ein eindeutiges Funksignal aussenden, das von der Umgebung erkannt wird. Aktive Transponder sind allerdings wesentlich größer und teurer als die passiven RFID-Labels.

Wir gehen an dieser Stelle nicht näher auf die Funktionsweise der RFID-Technik ein; genauere Erläuterungen dazu finden sich im Beitrag von Lampe, Flörkemeier und Haller [LFH05] sowie im Buch von Finkenzeller [Fin02]. Es sei nur noch bemerkt, dass die Idee an sich zwar schon über 50 Jahre alt ist [Sto48], die Technik aber erst in den 1980er-Jahren weit genug fortgeschritten war, um erste kommerzielle Anwendungen wie kontaktlose Zugangskontrollsysteme, Maut-Systeme oder die Markierung von Tieren zu ermöglichen. Erst in den 1990er-Jahren standen dann preiswerte Realisierungen für Massenapplikationen wie Skipässe, elektronische Wegfahrsperrungen und Artikel-Diebstahlsicherungen sowie RFID-Transponder in Form von elektronischen Etiketten (etwa für Bibliotheksanwendungen) zur Verfügung.

Konkrete Anwendungsmöglichkeiten der RFID-Technik ergeben sich zunächst vor allem im Bereich der Logistik: Wenn Produkte oder zumindest ganze Paletten ihre Identität jedes Mal automatisch preisgeben, wenn sie das Tor einer Lagerhalle oder die Laderampe eines LKW passieren, dann kann ohne manuelles Zutun eine lückenlose Verfolgung der Warenströme über die gesamte Lieferkette hinweg sichergestellt werden. Dies ist natürlich von erheblicher wirtschaftlicher Bedeutung. Andererseits muss man sich bewusst sein, dass es bei dieser prinzipiell empfindlichen und für den Masseneinsatz relativ „billig“ konzipierten Technik vielfältige Störeinflüsse wie Beeinflussungen durch benachbarte Funkgeräte, Frequenzverschiebungen, nicht ausreichende Lesedistanzen, abträgliche Umgebungsbedingungen (Reflexionen, Absorptionen, Abschattungen), defekte Labels etc. geben kann. Daher gelingt insbesondere das gleichzeitige Auslesen vieler Transponder (Pulkerfassung) nicht immer zu 100%, was Szenarien wie den kassenlosen Supermarkt-Check-out derzeit noch in Frage stellt, da man dort aus wirtschaftlichen Gründen auf Erkennungsraten von über 99% angewiesen ist.

Mit preiswerten RFID-Labels sind allerdings auch Anwendungen jenseits des Logistikbereichs vorstellbar, wo ein gelegentliches Misslingen des Lesevorgangs eher unkritisch ist. Enthält beispielsweise die Bordkarte eines Flugreisenden einen

RFID-Chip, so kann beim Passieren geeignet instrumentierter Stellen automatisch festgestellt werden, in welchem Flughafenbereich sich dieser befindet. Ein säumiger Fluggast braucht dann nicht mehr überall per Lautsprecher ausgerufen zu werden, und die Airline kann entscheiden, ob es sich lohnt, die Maschine noch einige Minuten warten zu lassen – nämlich dann, wenn der Fluggast nicht mehr weit vom Gate entfernt ist, und es sich um einen guten Kunden handelt...

Da über die eindeutige Identifikation von RFID-Labels Objekte in Echtzeit mit einem im Internet oder in einer entfernten Datenbank residierenden Datensatz verknüpft werden können, kann letztendlich beliebigen Dingen eine spezifische Information zugeordnet werden. Wenn Alltagsgegenstände auf diese Weise flexibel mit Information angereichert werden können, eröffnet dies in Zukunft aber Anwendungsmöglichkeiten, die weit über den vordergründigen Zweck der automatisierten Lagerhaltung oder des kassenlosen Supermarktes hinausgehen. Eine nette Einsatzmöglichkeit stellen beispielsweise RFID-Chips im Abfall dar: Hier kann ein Produkt der Müllsortieranlage in einer „letzten Willensmitteilung“ kundtun, aus was es besteht und wie seine Überreste behandelt werden sollen [SaT03].

Längerfristig lassen RFID und andere Verfahren zur Identifikation von Objekten zusammen mit Techniken der Mobilkommunikation und des entfernten Informationszugriffs Möglichkeiten zu, die auf eine umfassende Informatisierung der Welt hinauslaufen. Insbesondere kann auf diese Weise mit Dingen „kommuniziert“ werden, wie es weiter oben bei der Diskussion von NFC schon angedeutet wurde: Es ist z.B. vorstellbar, dass fast jedes Produkt ein Web-Portal oder eine Homepage im Internet hat, die der Hersteller gleich mit eingerichtet hat. Die zugehörige Internetadresse ließe sich mit einem handlichen Gerät – man denke an ein Handy in Form eines Stiftes – ermitteln, indem man damit auf den Gegenstand zeigt und auf diese Weise dessen Identität bzw. die darin kodierte Internetadresse ausliest. So kann dieser „Handystift“ von sich aus und ohne weitere Zuhilfenahme des anvisierten Objektes die entsprechende Homepage über das Funknetz besorgen und anzeigen [Kin02]. Zur Darstellung der Information mag in Zukunft vielleicht ein Retinaldisplay genutzt werden – oder der Zeigestift fungiert gleich auch als Laserbeamer, mit dem man die Information einfach auf eine beliebige Fläche projizieren kann [Zac04].

Für den Nutzer entsteht so jedenfalls der Eindruck, als habe ihm der Gegenstand selbst eine Information „zugefunkt“, obwohl diese tatsächlich vom Zeigegerät aus dem Internet besorgt wurde [BaM98]. Bei der Information kann es sich beispielsweise um eine Gebrauchsanweisung handeln, um ein Kochrezept für ein Fertiggericht oder auch um den Beipackzettel eines Arzneimittels. Was im Einzelnen angezeigt wird, mag vom Kontext abhängen – also etwa davon, ob der Nutzer ein guter Kunde ist und viel für das Produkt bezahlt hat, ob er über oder unter 18 Jahre alt ist, welche Sprache er spricht, wo er sich gerade befindet oder welchen „Welterklärungsservice“ eines Lexikonverlags er abonniert hat.

3.7 Was noch?

Im Rahmen dieses Beitrages kann nicht näher auf jede einzelne der vielen „enabling technologies“ eingegangen werden, die zum Internet der Dinge beitragen. Ein wichtiges zu diskutierendes Gebiet wären zum Beispiel noch „intelligente“ *Mensch-Maschine-Schnittstellen* – schließlich ist ja a priori nicht klar, wie wir in intuitiver Weise mit unsichtbaren Computern und smarten Dingen in unserer Umgebung interagieren sollen. Gefragt sind hier Ergebnisse aus den Bereichen Bild- und Gestenerkennung, Sprachverstehen, Nutzermodellierung, kognitive Psychologie etc., die teilweise eng mit dem Gebiet der Künstlichen Intelligenz zusammenhängen. Fortschritte in der Künstlichen Intelligenz sind aber hinsichtlich der Modellierung und partiellen Simulation der menschlichen Intelligenz notorisch zäh; hier sind vor allem Erkenntnisse grundlegender Forschung gefragt. Gelegentlich helfen im Bereich von Mensch-Maschine-Schnittstellen aber auch schon gute „Engineering“-Lösungen weiter, wie z.B. das „PenPhone“ von Siemens, das ein Handy in Form eines Stiftes mit Handschriftenerkennung darstellt. Platz für Tasten gibt es nicht – um einen Anruf zu tätigen, wird die Telefonnummer einfach auf eine beliebige Unterlage geschrieben.

Eine Herausforderung stellt auch vieles dar, was mit dem Begriff des „*context computing*“ zusammenhängt. Einerseits sollen sich smarte Dinge typischerweise kontextbezogen verhalten, andererseits gelingt dies bisher nur gut bei einem recht eingeschränkten Verständnis von „Kontext“. So lässt sich etwa, wie oben diskutiert, der Ort eines mobilen Gerätes innerhalb gewisser Grenzen relativ eindeutig ermitteln. Viel schwieriger ist es aber, aus einigen wenigen Sensorwerten auf die momentan relevante *Situation* zu schließen und situationsadäquat zu reagieren. Einen Koffer, der beim Packen an wichtige vergessene Utensilien erinnert, darf man sich wünschen – aber kann man ihn auch realisieren? Welches Weltwissen benötigt er, um zu erkennen, dass bei einer Geschäftsreise nach Florida auch im Februar an die Badehose erinnert werden sollte? „Intelligente“ Vermutungen über die Absichten eines Nutzers anzustellen, aus früheren Situationen zu lernen und sich adaptiv zu verhalten, scheint inhärent schwierig [Lue02]. Hier zeichnet sich keine generelle Lösung ab, auch wenn in den Bereichen Nutzer-, Kontext- und Weltmodellierung intensiv geforscht wird.

Schließlich gäbe es auch zu den Forschungen aus den Bereichen *Middleware* und *Infrastrukturen zur Kooperation smarter Objekte* einiges zu berichten. Hier geht es darum, dass alles zusammenpasst, dass die vielen smarten Dinge sich verstehen und aufeinander verlassen können und dass ihnen die Grunddienste bereitgestellt werden, die sie typischerweise zur Erfüllung ihrer Aufgaben erwarten oder benötigen. Dazu gehören Protokolle und Standards wie XML, UDDI, OSGI, UPnP, Jini, HAVi etc. Zum Thema „Middleware“ sei auf den Beitrag von Thomas Schoch [Sch05] verwiesen.

4 Die Informatisierung und Instrumentierung der Welt

Fasst man die oben skizzierten Techniktrends und Entwicklungen zusammen – extrem miniaturisierte Sensoren, die vielfältige Umgebungsinformation erfassen, stecknadelgroße Kameras hoher Auflösung, allerkleinste, energieeffiziente und preiswerte Prozessoren mit integrierter drahtloser Kommunikationsfähigkeit, Fernidentifikation von Dingen durch passive und praktisch unsichtbare Elektronik, präzise Lokalisierung von Gegenständen, flexible Displays auf Polymerbasis, elektronische Tinte etc. – so wird deutlich, dass damit die technischen Grundlagen für eine spannende Zukunft gelegt sind. Dies auch ungeachtet der Tatsache, dass etwa hinsichtlich der adäquaten Verarbeitung von Kontextinformation oder einer „intelligenten“ Mensch-Maschine-Interaktion noch viele grundlegende und schwierige Fragen ungelöst sind. Die Devise für die von der Ubiquitous-Computing-Gemeinde propagierten smarten Alltagsdinge und Umgebungen heißt, sich „schlau“, also situationsangepasst, zu verhalten, ohne tatsächlich „intelligent“ im Sinne von „vernunftbegabt“ zu sein.⁷

Konkret schälen sich zurzeit zwei unterschiedliche Stoßrichtungen heraus, die durch den massiven Einsatz von Mikroelektronik die Welt informatisieren und – im wörtlichen Sinne – instrumentieren wollen: Zum einen sind es die Sensornetze, bei denen eine große Zahl kleinster und sich typischerweise zu drahtlosen Ad-hoc-Netzen formierender Sensoren in die Umwelt eingebracht wird, um diese im weitesten Sinne zu überwachen. Zum anderen sind es smarte Alltagsgegenstände, die ihren Nutzern aufgrund autonomer „Intelligenz“ (oder besser „Smartness“) und der Kooperationsfähigkeit mit anderen smarten Dingen und Hintergrundservices einen Zusatznutzen stiften. Beide Aspekte sollen nachfolgend diskutiert werden.

4.1 Sensornetze

Mit miniaturisierten und energieeffizienten Sensoren, die ihre Werte vorverarbeiten und – zumindest über kurze Distanzen – drahtlos übermitteln können, wird es möglich, vielfältige Phänomene der Welt in bisher nie da gewesener Genauigkeit zu beobachten [Aky02, CES04]. Indem viele solche Sensoren großflächig in die Umwelt oder in physische Strukturen wie Brücken, Straßen oder Wasserversorgungssysteme eingebracht werden, erhält man dichte Überwachungsnetze für unterschiedlichste Zwecke.

Die Aufgabe eines einzelnen Sensorknotens in einem solchen Verbund besteht zunächst nur darin, seine unmittelbare Umgebung zu beobachten. Die Sensoren können sich aber mit benachbarten Sensoren vernetzen, ihre Arbeit untereinander abstimmen und relevante Beobachtungen austauschen. Die Kooperation der Sensoren ist entscheidend, denn nur dadurch ist es im Allgemeinen möglich, wesentliche Eigenschaften eines Phänomens (wie Aufenthaltsort, räumliche Orientierung, Bewegungsrichtung- und Geschwindigkeit, Größe und Form von Objekten) zu

⁷ Matthias Horx bringt dies in netter Form auf den Punkt: „*Ich will nicht, dass mein Kühlschrank intelligent wird. Ich will, dass er blöd ist, aber schlau funktioniert.*“

erkennen und über die Zeit hinweg zu beobachten. Wird es bei einem Sensor zum Beispiel heiß, kurze Zeit später bei einem benachbarten Sensor, und wieder etwas später bei einem dritten Sensor, so lässt sich daraus auf ein Feuer schließen, und es kann mit weiteren geeigneten Daten der Umfang sowie die Ausbreitungsrichtung und -geschwindigkeit des Brandes berechnet werden.

Durch die geringe Größe der Sensoren und dadurch, dass sie keine physische Infrastruktur wie Verkabelung und Stromanschlüsse benötigen, kann die Instrumentierung in flexibler und nahezu unsichtbarer Weise geschehen, ohne die beobachteten Aspekte wesentlich zu beeinflussen. In gewisser Weise handelt es sich dabei um einen Paradigmenwechsel im Einsatz von Computern: Verarbeitete man früher (mit einer „EDV-Anlage“) Daten, die typischerweise manuell eingegeben wurden, so erfasst man jetzt, wo Computer Augen, Ohren und andere Sinnesorgane bekommen, die physischen Phänomene unmittelbar – und zwar automatisch, online und in Realzeit. Tatsächlich sendet die Umwelt eine Vielzahl von Signalen unterschiedlicher „Modalitäten“ aus; messen oder beobachten kann man akustische Phänomene, visuelle Phänomene wie die Bewegung von Objekten oder aber einfach nur Helligkeit, Beschleunigung, Temperatur, Feuchtigkeit und viele andere Parameter.

Hinsichtlich der technischen Aspekte und der Informatikkonzepte, die für einen großräumigen Einsatz vernetzter Sensoren notwendig sind, zeichnet sich die Machbarkeit inzwischen ab, auch wenn noch eine Vielzahl von Problemen auf der Ebene der Hardware und der Softwarearchitektur zu lösen ist, bevor Sensornetze einfach angewendet werden können. Estrin et al. [Est02] schreiben dazu: „*Interfacing to the physical world is arguably the single most important challenge in computer science today.*“

Letztendlich erwartet man von Sensornetzen in Zukunft Gewaltiges: Statt Experimente in einem Labor voller Instrumente durchzuführen, soll es dann – quasi umgekehrt – oft möglich sein, die extrem miniaturisierten Beobachtungsinstrumente am Vorgang in der Natur selbst anzubringen. Ökosysteme beispielsweise sollten sich so viel leichter und umfassender beobachten lassen. Allgemein dürften die stark sinkenden Kosten zur Überwachung und Informationsgewinnung viele Anwendungen ermöglichen, die bisher unwirtschaftlich gewesen wären – vor allem im industriellen Bereich. William A. Wulf, Präsident der US-amerikanischen Academy of Engineering, meinte kürzlich zum Beispiel [Wul04]: „*Over the life of a bridge, it costs more to check for corrosion than to build the bridge itself. So we built a chip that had a small amount of computing power, a corrosion sensor, and a radio transceiver. The idea was to put a shovel-load of these chips in every mix of concrete, so that you'd be able to ask the sensors whether or not the reinforcing bars were corroding. It's hard to think of a more mundane product than a concrete bridge; yet we're talking about how to make it smart.*“ Andere, wie Priscilla Nelson von der US-amerikanischen National Science Foundation sprechen sogar von einer „Revolution“ [Nel04]: „*Distributed sensing is about being able to observe freshly and innovatively the world around us, both the constructed and the natural environments, and indeed our own organizational and social environments. We're right on the edge of what I think of as the Sensing Revolution, and it's very exciting.*“ Selbstverständlich ist auch das Militär an sich autonom konfi-

gurierenden Sensornetzen – insbesondere in der Form von „smart dust“ [Kah99] – sehr interessiert, da diese ein ideales Aufklärungsmittel darstellen.

Christoph Podewils hat die Zukunftsaussichten mit Sensornetzen auf witzige und fast poetische Art unlängst so beschrieben [Pod04]: *„Computer kaufen, das könnte in einigen Jahren so ähnlich sein wie heute Bonbons aussuchen in der Süßwarenabteilung. Der Verkäuferin wird man sagen: ‘50 Gramm von den Temperaturchips, bitte sehr! Und dann geben Sie mir noch ein Pfund von den Feuchtigkeitssensoren, es hat ja schon seit ein paar Wochen nicht mehr geregnet.’ Im Garten wird man dann in die Chipstüte greifen, eine Hand voll Körner herausnehmen und über den Boden verstreuen, ganz so wie Blumensamen. Die winzigen Computer merken dann, dass sie auf den Boden gefallen sind, schalten sich ein und wachen fortan darüber, wie feucht oder wie warm es im Beet oder auf der Wiese ist. Wird es zu trocken oder zu kalt, so alarmieren sie per Funk einen Nachbarcomputer, der seinerseits einen weiteren Nachbarn anfunkelt und so weiter – per Inselfspringen erreicht der Hilferuf schließlich einen Gartenroboter, der sich dann mit der Gießkanne auf den Weg macht oder auch eine Pflanze ins Warme holt.“*

Die Hauptaufgabe von Sensornetzen ist das feinmaschige und umfassende Monitoring. Werden damit nicht Ökosysteme, Produktionsprozesse oder physische Infrastrukturen überwacht, sondern in indirekter oder direkter Weise Menschen, dann zieht eine solche einfach anzuwendende Technik eventuell massive gesellschaftliche Probleme nach sich – es könnte damit die delikate Balance von Freiheit und Sicherheit aus dem Gleichgewicht gebracht werden, weil die qualitativen und quantitativen Möglichkeiten zur Überwachung derart ausgeweitet werden, dass auch Bereiche erfasst werden, die einem dauerhaften und unauffälligen Monitoring bisher nicht zugänglich waren. Viele Wünsche totalitärer Machthaber, staatlicher Institutionen oder neugieriger Zeitgenossen würden damit wohl mehr als zufriedenstellend erfüllt. Insofern erscheinen drahtlos kommunizierende Sensoren langfristig gesehen als viel größere Bedrohung für die Privatsphäre als die in dieser Hinsicht gegenwärtig kontrovers diskutierte RFID-Technologie⁸ [Lan05, The05]. Schließlich handelt es sich bei den Sensoren um nahezu unsichtbare, aber äußerst mitteilsame „Spione“. Wenn diese ein billiges Massenprodukt werden, dann lässt sich ihr Einsatz kaum kontrollieren und ein Missbrauch nur schwer verhindern.

4.2 Smarte Dinge

Smarte Dinge sind Alltagsgegenstände, die mit Informationstechnologie zum Sammeln, Speichern, Verarbeiten und Kommunizieren von Daten „aufgerüstet“ sind. Sie erhalten so eine gegenüber ihrem ursprünglichen Zweck erweiterte Funk-

⁸ „Da der RFID an der Kaugummi-Packung in seiner Jackentasche nicht im Supermarkt zerstört wurde, wird er als Kaugummi-Kauer identifiziert und die Tanksäule spielt ihm während des Wartens Werbespots für Konkurrenz-Kaugummis vor“, so eines der Szenarien, die im Rahmen der Verleihung des „BigBrother Awards“ an die Metro AG für das Projekt „Future Store“ propagiert wurden, siehe www.big-brother-award.de/2003/cop

tionalität und damit eine neue, zusätzliche Qualität. Idealerweise erscheint der informationsverarbeitende Anteil eines smarten Dings dem Nutzer als vollkommen in den Gegenstand und seine herkömmliche Funktionalität integriert, bietet aber darüber hinausgehende Eigenschaften. Um ihre Aufgabe gut zu erfüllen, müssen smarte Dinge typischerweise (z.B. über Sensoren) mit Informationen ihrer Umgebung versorgt werden und kommunizieren können, weil erst dadurch eine Wechselwirkung zwischen Computer und „Cyberspace“ einerseits und der realen Umwelt andererseits möglich wird.

Beispiele für smarte Dinge sind Autoreifen, die den Fahrer benachrichtigen, wenn der Luftdruck abnimmt, oder Medikamente, die sich rechtzeitig bemerkbar machen, bevor ihr Haltbarkeitsdatum abläuft [ScS03]. Idealerweise können smarte Dinge nicht nur mit Menschen und anderen smarten Gegenständen in geeigneter Weise kommunizieren, sondern zum Beispiel auch erfahren, wo sie sich befinden, welche anderen Gegenstände in der Nähe sind, was in der Vergangenheit mit ihnen geschah und was in ihrer Umgebung los ist.

Smarte und kommunikationsfähige Dinge haben ein hohes Anwendungspotential – welche konkreten Ideen wirtschaftlich sinnvoll sind, wird sich aber erst noch zeigen müssen. Zum Beispiel könnte ein Auto das andere auf der Gegenfahrbahn vor einem Stau warnen. Oder mein Mobiltelefon könnte sich daran erinnern, wann und wo es zuletzt in unmittelbarer Nähe meines Schlüsselbundes war. Ferner mag eine Mülltonne neugierig auf die Recyclingfähigkeit ihres Inhaltes sein, ein Arzneyschrank mag um die Verträglichkeit seiner Medikamente und deren Haltbarkeit besorgt sein, und eine Wohnungsheizung könnte mit dem Auto oder anderen persönlichen Gegenständen der Bewohner „kospirieren“ wollen, um zu erfahren, ob mit deren baldiger Rückkehr zu rechnen ist.

Die eben genannten Beispiele sind noch Zukunftsmusik, Vorläufer smarterer Alltagsdinge existieren allerdings bereits und sind unter dem Begriff „eingebettete Systeme“ bekannt. Dabei handelt es sich um Mikroprozessoren und andere Computerelemente, die zu Steuerungsaufgaben in Maschinen und Geräte eingebaut werden. Einfache Prozessoren, die nicht höchste Leistung für Multimedia-PCs erzeugen müssen, können billig und klein hergestellt werden. Über 98 % der vielen Milliarden Mikroprozessoren, die jedes Jahr produziert werden, finden sich auch nicht in PCs oder sonstigen Computern, sondern in irgendwelchen anderen Geräten – Autos, Nähmaschinen, Spielkonsolen, Heimtrainern, elektrischen Zahnbürsten, Waschmaschinen, Verkaufsautomaten und Fotokopiergeräten zum Beispiel [PaM04].

Praktisch alle Geräte, die eine digitale Schnittstelle haben, beruhen auf einem eingebetteten System. Oft ist dessen Steuerung so komplex, dass hierfür ein Betriebssystem notwendig ist. Auf dem Markt gibt es zu diesem Zweck einige Systeme und Sprachplattformen wie zum Beispiel embedded Java, Symbian (das aus dem Bereich der Mobiltelefone stammt), Windows CE oder embedded Linux. Die ersten Versionen von Symbian und vergleichbaren Systemen (z.B. PalmOS) waren aufgrund der anfangs stark beschränkten Hardwareressourcen mit einem sehr reduzierten Funktionsumfang ausgestattet. Erst im Laufe der Zeit gesellten sich Funktionen typischer Betriebssysteme (z.B. Speicherschutz oder multi threading) hinzu, so dass komplexere und portable Anwendungen möglich wurden. Gerade

umgekehrt verläuft die Entwicklung bei Windows und Linux: Diese klassischen Server- und PC-Systeme wurden so weit abgespeckt und adaptiert, dass sie mit reduziertem Funktionsumfang auch auf Hardwareplattformen geringerer Leistung laufen. Die Entwicklung der Softwareplattformen (und der Kampf um Marktanteile) ist noch voll im Gang – insbesondere, was die oben definierten „Milliwattknoten“ betrifft. Für die kommende Generation der „Mikrowattknoten“, also die Systeme für smarte Alltagsdinge und Sensorknoten, existieren erst einige Forschungsprototypen; noch ist weitgehend unklar, welche Anforderungen die zukünftigen Anwendungen smarterer Dinge an die Software-Grunddienste stellen werden.

Was die Hardware eingebetteter Systeme für smarte Dinge betrifft, stellen die verschiedenen Basistechnologien von Sensorik, Verarbeitungseinheit und Kommunikationseinheit, nämlich Analog-, Digital- und Hochfrequenztechnologie, recht unterschiedliche Anforderungen an den Herstellungsprozess. Daher ist eine Integration derzeit noch teuer, technisch aber nicht unmöglich. Ziel ist ein einziger kleiner Chip, der Umgebungsparameter wahrnimmt, diese verarbeitet und gegebenenfalls gleich weitermeldet – an einen Menschen, an ein informationstechnisches System oder an andere smarte Dinge. Da der technische Fortschritt mit seinen Konsequenzen hinsichtlich Energiebedarf, Größe, Leistungsfähigkeit und Kosten der mikroelektronischen Funktionalität auch hier ungebremst ist, darf man erwarten, dass in ferner Zukunft fast beliebige Alltagsgegenstände mit eingebetteter Informationstechnologie „smart gemacht“ werden, sofern dies im jeweiligen Fall einen Nutzen stiftet und einen wirtschaftlichen Sinn ergibt.

Die Zweckmäßigkeit konkreter Anwendungen smarterer Dinge einzuschätzen ist schwierig, und auch Experten⁹ sind sich nicht darüber im Klaren, welche der vielen oft zunächst absurd klingenden Ideen – angefangen vom Fertiggericht, das Rezeptvorschläge (und natürlich Werbung) auf die Kühlschranktür projiziert, bis hin zur schlauen Unterwäsche, die eine kritische, vom individuellen Normalfall abweichende Puls- und Atemfrequenz dem Arzt weitermeldet – letztlich eine wichtige Rolle in der Zukunft spielen könnten. Generell scheint das Potential hinsichtlich sinnvoller Anwendungen jedoch groß, wenn Gegenstände miteinander kooperieren können und drahtlosen Zugriff auf externe Datenbanken haben oder passende Internet-basierte Services nutzen können. So gewinnt offenbar ein automatischer Rasensprinkler nicht nur durch eine Vernetzung mit Feuchtigkeitssensoren im Boden an Effizienz, sondern auch durch die Konsultation der Wetterprognose im Internet.

Viele weitere Anwendungen „schlauer“ und kommunizierender Alltagsdinge sind denkbar. Allgemein ist zu erwarten, dass zunehmend hybride Produkte entstehen werden, die sich aus physischer Leistung (z.B. ein Medikament mit seinen biochemischen und medizinischen Wirkungen) und Informationsleistung (bei diesem Beispiel etwa aktuelle Hinweise zum Verlauf einer Grippeepidemie) zusam-

⁹ „Naturwissenschaftler und Techniker gehen davon aus, dass neue technische Möglichkeiten (für die sie aus ihrer Lebenswelt bestimmte Nutzungsformen sehen) nicht nur genutzt werden, sondern so genutzt werden, wie sie sich das gedacht haben. Dies war – insbesondere was die Geschichte der Informations- und Kommunikationstechnik angeht – häufig genug ein Irrtum.“ Gernot Wersig

mensetzen. Anfangs werden von den Möglichkeiten des Ubiquitous Computing sicherlich eher solche hochpreisigen Geräte und Maschinen profitieren, die durch sensorgestützte Informationsverarbeitung und Kommunikationsfähigkeit einen deutlichen Mehrwert erhalten. Sind die Grundtechniken und zugehörigen Infrastrukturen dann erst einmal eingeführt, könnten bald darauf auch viele andere und eher banale Gegenstände ganz selbstverständlich das Internet mit seinen vielfältigen Ressourcen für die Durchführung ihrer Aufgaben nutzen, selbst wenn dies uns als Anwender gar nicht immer bewusst ist.

Mittel- und langfristig dürften die diversen Techniken des Ubiquitous Computing sicherlich eine große wirtschaftliche Bedeutung erlangen und zu gravierenden Veränderungen in Geschäftsprozessen führen. Denn werden industrielle Produkte (wie z.B. Haushaltsgeräte, Werkzeuge, Spielzeug oder Kleidungsstücke) durch integrierte Informationsverarbeitung „schlau“, oder erhalten sie auch nur eine fernabfragbare elektronische Identität beziehungsweise Sensoren zur Wahrnehmung des Kontextes (wissen also z.B., wo und in welcher Umgebung sie sich gerade befinden), so sind dadurch nicht nur innovative Produkte, sondern auch zusätzliche Services und neue Geschäftsmodelle möglich: Der digitale Mehrwert eigener Produkte kann diese beispielsweise von physisch ähnlichen Erzeugnissen der Konkurrenz absetzen sowie Kunden stärker an eigene Mehrwertdienste und dazu kompatible Produkte binden. Ferner werden durch technisch ausgefeilte Methoden, welche die tatsächliche Nutzung von physischen Produkten ermitteln und weitermelden, neue Abrechnungs- und Leasingmodelle möglich, wie im Beitrag von Fleisch et al. genauer ausgeführt wird [FCD05]. Generell dürfte die zunehmende Informatisierung von Produkten auch zu einer stärkeren Serviceorientierung führen, denn smarte Dinge können nur dann ihr ganzes Potential ausspielen, wenn sie vernetzt werden und in eine umfassende Struktur von Dienstleistungen eingebunden sind.

5 Fazit

Die durch den Fortschritt der Informationstechnologie induzierten Veränderungen geschehen nicht über Nacht. Vielmehr handelt es sich bei diesem Prozess um eine schleichende Revolution, die immer größere Teilbereiche des täglichen Lebens erfasst und durch die dynamische Entwicklung der Mikroelektronik und der Informatik ständig weiter angetrieben wird. Der allgemeine Technologietrend zeigt dabei eindeutig in Richtung einer umfassenden Informatisierung der Welt, die dadurch ungewohnte oder gar bizarre Formen annehmen kann: Alltagsgegenstände werden kommunikativ, vernetzen sich untereinander, wissen über ihre Situation Bescheid und teilen ihre Erkenntnisse anderen Dingen mit, die daraufhin ihr Verhalten ändern können.

Langfristig mag sich damit auch unser Verhältnis zur Welt wandeln. Mike Kunavsky meint zum Beispiel [Kun04]: *„Once these technologies are widely distributed in everyday objects, the environment they create will become too difficult for us to explain in purely functional ways. When we don't have a good functional*

model to explain how things work, we anthropomorphize them. And when enough things around us recognize us, remember us, and react to our presence I suspect we'll start to anthropomorphize all objects. In other words, because we have no other way to explain how things work, we will see the world as animist. Animism is, in its broadest definition, the belief that all objects have will, intelligence, and memory and that they interact with and affect our lives in a deliberate, intelligent, and (in a sense) conscious way."

Selbst wenn es nicht so weit kommt – die langfristigen Auswirkungen einer tiefgreifenden Integration von Informationstechnologie in unseren Alltag und einer durch smarte Dinge geschaffenen „augmented reality“ dürften jedenfalls gewaltig sein, und es ergeben sich insbesondere im nicht-technischen Bereich viele spannende Herausforderungen [BCL04]. Im Vordergrund steht dabei der Schutz der Privatsphäre [LaM02, Mat05], denn smarte Gegenstände und sensorbestückte Umgebungen häufen potentiell eine große Menge teilweise sensibler und intimer Daten an, um ihren Nutzern jederzeit situationsgerecht dienen zu können. Eine einzelne solche Information mag für sich genommen zwar unscheinbar sein, aber wenn verschiedene an sich harmlose Beobachtungen kombiniert werden, kann dies zu unerwarteten Erkenntnissen führen und eine folgenschwere Verletzung der Privatsphäre nach sich ziehen.

Damit ein Internet der Dinge und eine von Informationstechnik im wahrsten Sinne des Wortes durchdrungene Welt wirklich Nutzen stiften, bedarf es daher mehr als nur mikroelektronisch aufgerüsteter und miteinander kooperierender Gegenstände. Ebenso nötig sind sichere und verlässliche IT-Infrastrukturen, geeignete ökonomische und rechtliche Rahmenbedingungen sowie ein gesellschaftlicher Konsens darüber, wie die neuen technischen Möglichkeiten verwendet werden sollen. Hierin liegt eine große Aufgabe für die Zukunft.

Literatur

- [AHS02] Aarts E, Harwig R, Schuurmans M (2002) Ambient Intelligence. In: Denning PJ (ed) The invisible future – the seamless integration of technology in everyday life, McGraw-Hill, pp 235-250
- [AaM03] Aarts E, Marzano S (2003) The New Everyday – Views on Ambient Intelligence. 010 Publishers
- [Aky02] Akyildiz IF, Su W, Sankarasubramaniam Y, Cayirci E (2002) Wireless sensor networks: a survey. Computer Networks 38: 393-422
- [BaM98] Barrett E, Maglio P (1998) Informative Things: How to Attach Information to the Real World. In: Proceedings UIST '98, pp 81-88
- [BCL04] Bohn J, Coroama V, Langheinrich M, Mattern F, Rohs M (2004) Living in a World of Smart Everyday Objects – Social, Economic, and Ethical Implications. Human and Ecological Risk Assessment 10(5): 763-786
- [BHR01] Burkhardt J, Henn H, Hepper S, Rindtorff K, Schaeck T (2001) Pervasive Computing. Addison Wesley
- [Bre10] Brehmer A (Hrsg) (1910) Die Welt in 100 Jahren. Berlin, Verlagsanstalt Buntdruck GmbH

- [CES04] Culler D, Estrin D, Srivastava M (2004) Overview of Sensor Networks. *Computer*, 37(8): 41-49
- [DBS04] Ducatel K, Bogdanowicz M, Scapolo F, Leijten J, Burgelman J-C (2004) Dafür sind die Freunde da – Ambient Intelligence und die Informationsgesellschaft im Jahre 2010. In: Zerdick A, Picot A, Schrape K, Burgelman J-C, Silverstone R, Feldmann V, Heger DK, Wolff C (Hrsg): *E-Merging Media – Kommunikation und Medienwirtschaft der Zukunft*, Springer-Verlag, S 195-218
- [DoF03] Dobson JE, Fisher PF (2003) Geoslavery. *IEEE Technology and Society Magazine* 22(1): 47-52
- [Est02] Estrin D, Culler D, Pister K, Sukhatme G (2002) Connecting the Physical World with Pervasive Networks. *Pervasive Computing Magazine* 1(1): 59-69
- [Fin02] Finkenzeller K (2002) *RFID-Handbuch*. Hanser-Verlag
- [FCD05] Fleisch E, Christ O, Dierkes M (2005) Die betriebswirtschaftliche Vision des Internets der Dinge. In: Fleisch E, Mattern F (Hrsg) *Das Internet der Dinge – Ubiquitous Computing und RFID in der Praxis*, Springer-Verlag, S 3-37
- [GrH03] Grochowski E, Halem R (2003) Technological impact of magnetic hard disk drives on storage systems. *IBM Systems Journal* 42(2): 338-346
- [GKC04] Gershenfeld N, Krikorian R, Cohen D (2004) The Internet of Things. *Scientific American*, October, 76-81
- [Hay02] Hayes B (2002) Terabyte Territory. *American Scientist* 90(3): 212-216
- [HiB01] Hightower J, Borriello G (2001) Location Systems for Ubiquitous Computing. *IEEE Computer Magazine*, August, 57-66
- [HMN03] Hansmann U, Merk M, Nicklous M, Stober R (2003) *Pervasive Computing Handbook* (2nd ed.). Springer-Verlag
- [Kah99] Kahn JM, Katz RH, Pister KSJ (1999) Mobile Networking for Smart Dust. *ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom '99)*, pp 271-278
- [Kan04] Kanellos M (2004) Human chips more than skin-deep. *CNET News.com*, August 23, <http://zdnet.com.com/2100-1103-5319869.html>
- [Kin02] Kindberg T, Barton J, Morgan J, Becker G, Caswell D, Debaty P, Gopal G, Frid M, Krishnan V, Morris H, Schettino J, Serra B, Spasojevic M (2002) People, Places, Things: Web Presence for the Real World. *Mobile Networks and Applications* 7(5): 365-376
- [Kun04] Kuniavsky M (2004) User Expectations in a World of Smart Devices. www.adaptivepath.com/publications/essays/archives/000272.php
- [LaM02] Langheinrich M, Mattern F (2002) Wenn der Computer verschwindet – Was Datenschutz und Sicherheit in einer Welt intelligenter Alltagsdinge bedeuten. *digma – Zeitschrift für Datenrecht und Informationssicherheit* 2(3): 138-142
- [Lan05] Langheinrich M (2005) Die Privatsphäre im Ubiquitous Computing – Datenschutzaspekte der RFID-Technologie. In: Fleisch E, Mattern F (Hrsg) *Das Internet der Dinge – Ubiquitous Computing und RFID in der Praxis*, Springer-Verlag, S 329-362
- [LCC05] LaMarca A, Chawathe Y, Consolvo S, Hightower J, Smith I, Scott J, Sohn T, Howard J, Hughes J, Potter F, Tabert J, Powledge P, Borriello G, Schilit B (2005) Place Lab: Device Positioning Using Radio Beacons in the Wild. In: *Pervasive 2005*, Springer-Verlag, pp 116-133
- [LFH05] Lampe M, Flörkemeier C, Haller S (2005) Einführung in die RFID-Technologie. In: Fleisch E, Mattern F (Hrsg) *Das Internet der Dinge – Ubiquitous Computing und RFID in der Praxis*, Springer-Verlag, S 69-86

-
- [Lue02] Lueg C (2002) On the Gap between Vision and Feasibility. In: Mattern F, Naghshineh M (eds) Pervasive 2002, Springer-Verlag, pp 45-57
- [Mat03] Mattern F (2003) Vom Verschwinden des Computers – Die Vision des Ubiquitous Computing. In: Mattern F (Hrsg) Total vernetzt – Szenarien einer informatisierten Welt, Springer-Verlag, S 1-41
- [Mat04] Mattern F (2004) Ambient Intelligence. In: Bullinger H-J (Hrsg): Trendbarometer Technik, Hanser-Verlag, S 18-19
- [Mat05] Mattern F (2005) Ubiquitous Computing: Eine Einführung mit Anmerkungen zu den sozialen und rechtlichen Folgen. In: Taeger J, Wiebe A (Hrsg): Mobilität, Telematik, Recht (DGRI-Jahrestagung 2004), Verlag Dr. Otto Schmidt
- [Moo65] Moore G (1965) Cramming more components onto integrated circuits. Electronics 38 (April 1965), pp 114-117
- [Moo95] Moore G (1995) Lithography and the Future of Moore's Law. Proceedings SPIE 2440, pp 2-17
- [Nel04] Nelson PP (2004) In: The View From the Top. IEEE Spectrum, Nov. 2004, pp 36-51
- [PaM04] Payne R, Macdonald B (2004) Ambient technology – now you see it, now you don't. BT Technology Journal 22(3): 119-129
- [Pod04] Podewils C (2004) In: Berliner Zeitung vom 27.03.2004
- [Sat01] Satyanarayanan, M (2001) Interview: M. Satyanarayanan on Mobile and Pervasive Computing. IEEE Distributed Systems Online, Vol. 2, No. 6, http://ads.computer.org/dsonline/0106/departments/int0106_print.htm.
- [SaT03] Saar S, Thomas V (2003) Toward Trash That Thinks – Product Tags for Environmental Management. Journal of Industrial Ecology 6(2): 133-146
- [Sch05] Schoch T (2005) Middleware für Ubiquitous-Computing-Anwendungen. In: Fleisch E, Mattern F (Hrsg) Das Internet der Dinge – Ubiquitous Computing und RFID in der Praxis, Springer-Verlag, S 119-140
- [ScS03] Schoch T, Strassner M (2003) Wie smarte Dinge Prozesse unterstützen. HMD 229: 23-32
- [Ste66] Steinbuch K (1966) Die informierte Gesellschaft – Geschichte und Zukunft der Nachrichtentechnik. DVA
- [Sto48] Stockman H (1948) Communication by Means of Reflected Power. Proceedings of the IRE, 1196-1204
- [The05] Thiesse F (2005) Wahrnehmung und Management RFID-bezogener Risiken für die informationelle Selbstbestimmung. In: Fleisch E, Mattern F (Hrsg) Das Internet der Dinge – Ubiquitous Computing und RFID in der Praxis, Springer-Verlag, S 363-378
- [Tuo02] Tuomi I (2002) The Lives and Death of Moore's Law. First Monday 7(11)
- [Wei91] Weiser M (1991) The Computer for the 21st Century. Scientific American 265(3): 66-75
- [Wul04] Wulf AW (2004) In: The View From the Top. IEEE Spectrum, Nov. 2004, pp 36-51
- [Zac04] Zacks R (2004) Portable Projectors. Technology Review 107(10): 72