

Energy Harvesting

Oder die Reichweitenangst der Sensoren

Frank Dittmann

»Eine fesselnde Szene im Film *Air Force One* zeigt den Präsidenten der Vereinigten Staaten, der über ein Handy technische Hinweise erhält, um Treibstoff aus seinem Flugzeug abzulassen und so seine Entführer zur Landung zu zwingen. In einem kritischen Moment, als ihm klar zu werden beginnt, welchen Draht er durchschneiden muss, versagt sein Handy-Akku. Selbst der Präsident kann sich der unbarmherzigen Ökonomie der Akkulaufzeit nicht entziehen!«¹

1. Strom für Menschen und autonome Elektronik

Mit der oben beschriebenen Szene aus dem Film *Air Force One* von 1997 mit Harrison Ford als Präsident James Marshall führte im Januar 2005 der US-amerikanische Informatiker und Herausgeber des IEEE-Fachjournals *Pervasive Computing* Mahadev Satyanarayanan in das Themenheft *Energy Harvesting and Conservation* ein. Nun sei durchaus auch der Speicherplatz begrenzt, führte er weiter aus, aber die Begrenzung habe »nicht die düstere Endgültigkeit einer leeren Batterie.«² Zwar hätte die Batterieforschung der letzten Jahre große Fortschritte gemacht, aber die Geräte müssten auch viele Stunden mit Strom versorgt werden. Weitere Verbesserungen seien zwar möglich, würden jedoch zumindest zum Teil durch den größeren Energiebedarf aufgrund erhöhter Funktionalität wieder aufgezehrt: »Daher ist es

1 Satyanarayanan, Mahadev: »Avoiding Dead Batteries«, in: IEEE Pervasive Computing 4/1 (2005), S. 2-3, <http://dx.doi.org/10.1109/MPRV.2005.5> (Übers. d. Verf.).

2 Ebd., S. 2.

unerlässlich, alternative Ansätze zur Verlängerung der Batterielebensdauer zu prüfen.«³ Die hier angesprochene Reichweitenangst wurde vielerorts beschrieben, in diesem Fall ist aber entscheidend, dass der Herausgeber des Fachjournals nicht etwa die üblichen, von Menschen genutzten mobilen Geräte im Blick hatte, sondern die verteilten smarten Komponenten von Computernetzwerken, wofür sich mittlerweile die Bezeichnung »Internet der Dinge« (auch »Internet of Things«, IoT) eingebürgert hat.⁴ So gesehen führte Satyanarayanan in seinem Editorial vom Januar 2005 die »Reichweitenangst der Sensoren« ein. Lösungsstrategien sah er (1) in der Verbesserung der Energieeffizienz der Hardware, (2) in der energiebewussten Programmierung von Software, (3) in der Auslagerung energieintensiver Rechenprozesse auf externe Server und schließlich (4) in der Nutzung der vor Ort vorhandenen Energie, um die Akkumulatoren wieder aufzufüllen. Vermutlich lägen praktikable Lösungen in einer Kombination aller dieser Ansätze, so der Herausgeber von *Pervasive Computing*.⁵

Im Oktober 2005 erschien in einem weiteren IEEE-Fachjournal ein Themenheft zu Energy Harvesting. Weniger prosaisch als Satyanarayanan in seinem Editorial verweist der Gasteditor William W. Clark von der University of Pittsburgh hier darauf, dass Ingenieur*innen in den vergangenen Jahren eine Menge kleiner Elektronikkomponenten entwickelt hätten.⁶ Viele davon benötigten lediglich Energie von wenigen Milliwatt, was die Option eröffnet, diese geringe Energiemenge direkt aus der Umgebung der Geräte zu gewinnen. Damit wären Funkmodule möglich, die keine Zuleitung bräuchten und über lange Zeiträume funktionsfähig blieben. Aus dieser Perspektive scheint es, dass die Aufgabe, kleine, autarke, elektronische Komponenten kostengünstig mit Energie zu versorgen, erst mit den verstärkten Digitalisierungstendenzen nach der Jahrtausendwende aufkam. Der Aufsatz geht auf die Spurensuche nach den Ursachen und Vorläufern dieser Entwicklung. Ideengeschichtlich liegt der Ausgangspunkt in der Vision des Ubiquitous Computing, die Mark Weiser, Cheftechnologe am Xerox Palo Alto Research Center (PARC), Ende der 1980er Jahre als Gegenentwurf zu den zentralisierten Mainframe-Computern entwickelt hatte. Technisch gesehen tauchte das Problem der netzunabhängigen Stromversorgung elektronischer Geräte aber bereits drei Jahrzehnte

3 Ebd.

4 Vgl. Mattern, Friedemann/Flörkemeier, Christian: »Vom Internet der Computer zum Internet der Dinge«, in: Informatik Spektrum 33/2 (2010), S. 107-121, <http://dx.doi.org/10.1007/s00287-010-0417-7>; Sprenger, Florian/Engemann, Christoph (Hg.): Internet der Dinge. Über smarte Objekte, intelligente Umgebungen und die technische Durchdringung der Welt, Bielefeld: transcript 2015, <http://dx.doi.org/10.14361/9783839430460>.

5 Vgl. M. Satyanarayanan: »Avoiding Dead Batteries«, S. 2.

6 Vgl. Clark, William W.: »Special Issue on Energy Harvesting. Preface«, in: Journal of Intelligent Material Systems and Structures 16/10 (2005), S. 783, <http://dx.doi.org/10.1177/1045389X05056683>.

zuvor in der Medizintechnik mit den implantierbaren Herzschrittmachern auf. Auch Uhren sind hier zu nennen, aber deren Energieversorgung war längst nicht so virulent wie jene von implantierten medizintechnischen Geräten.

Dieser Beitrag versteht sich als erste Annäherung an das komplexe Thema der »Reichweitenangst der Sensoren«, das bisher kaum in den Blick genommen wurde. Dabei werden die ideengeschichtlichen und hardwaretechnischen Wurzeln offengelegt und die Entwicklungsstränge bis heute verfolgt. Die Entwicklung beschleunigte sich nach der Jahrtausendwende, da einerseits die Forschungsfinanzierung auf eine wesentlich breitere Basis gestellt werden konnte und andererseits die verbesserten Herstellungstechnologien im Bereich der Halbleiterproduktion viele neue Möglichkeiten boten. Ein durchaus erstaunliches Ergebnis ist dabei, dass die physikalischen Effekte, auf denen die Elektrizitätserzeugung letztlich beruht, seit den ersten Versuchen in den 1960er Jahren kaum erweitert werden konnten. Trotz intensiver Forschung und neuen Herstellungstechnologien harren immer noch viele der bereits vor Jahrzehnten gestellten Fragen einer Lösung.⁷

2. Das Energieproblem: Smart Dust, Wearable Computer und andere Kleinstverbraucher brauchen Energie

Das Faktum, dass 2005 mindestens zwei Hefte in unterschiedlichen Ingenieurzeitschriften zum gleichen Thema erschienen, verweist auf ein virulentes Problem. Die Herausforderung der hier angesprochenen Energieversorgung von verteilten Komponenten soll ein – zugegebenermaßen spezielles – Beispiel anschaulich vor Augen führen: Im Rahmen eines DARPA-Projekts 1997 an der University of California, Berkeley, wurde in der Arbeitsgruppe um Kristopher Pister die Idee des »Smart Dust« entwickelt.⁸ Das sind winzige Mikrocomputer, ausgerüstet mit Sensoren, Aktoren und einer Kommunikationseinheit, die unbemerkt in der Umwelt verteilt werden. Die einzelnen Partikel würden selbstständig ein Netzwerk bilden, mit ihren Sensoren Daten sammeln und an eine Zentrale weiterleiten. Die intelligenten Staubkörner sollten eine Größe von etwa einem Kubikmillimeter haben, in großer Stückzahl produzierbar sein und möglichst lange autonom arbeiten. Finanziert

7 Vgl. die einschlägigen Projekte in VDE Verlag (Hg.): MikroSystemTechnik Kongress 2007. 15.-17. Oktober, Dresden. Proceedings, Berlin: VDE 2007.

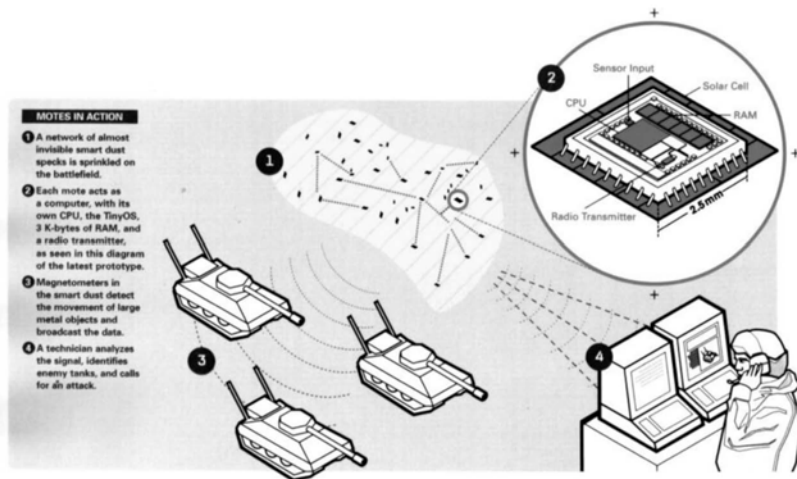
8 Den Begriff prägte Kristofer Pister, Professor an der University of California, Berkeley. Vgl. Warneke, Brett/Last, Matt/Liebowitz, Brian/Pister, Kristofer S. J.: »Smart Dust: Communicating with a Cubic-Millimeter Computer«, in: IEEE Computer Magazin 34/1 (2001), S. 44-51, <http://dx.doi.org/10.1109/2.895117>; Stieler, Wolfgang: »Smarte Begleitung. Pervasive Computing durchdringen den Alltag«, in: c't 16 (2004), 78-83, hier: S. 81.

von der DARPA⁹ hatte man selbstredend militärische Anwendungen im Blick, wie ein Artikel im US-amerikanischen Technik-Magazin *Wired* beschreibt.¹⁰ Im Gelände verstreut, könnte der intelligente Staub etwa den Einsatz von Giftgas oder die Bewegungen feindlicher Fahrzeuge bzw. einzelner Kämpfer anzeigen. Gegnerische Schützen könnten mit hoher Genauigkeit lokalisiert werden; sogar Angaben über die Schussrichtung und ob die Person steht oder kniet, wären möglich. Aber selbst die ständige lokale Wetterbeobachtung wäre ein großer Gewinn in militärischen Konflikten. Zwar lässt sich einmal ausgestreuter Smart Dust kaum wieder einsammeln, aber eventuell ließe sich nach dem Ende eines Krieges das System in eine zivile Überwachungstechnologie für Waldbrände, Erdbeben, Umweltdaten oder auch Anwendungen in der Transportlogistik umwandeln. Allerdings ist auch der umgekehrte Weg denkbar!¹¹

Die Idee des Smart Dust wurde prototypisch realisiert (Abb. 1). Die Kommunikation mit der Basisstation erfolgt dabei optisch: Diese sendete einen Laserstrahl aus, der mittels eines winzigen Spiegels vom Smart-Dust-Korn reflektiert und dabei ähnlich wie beim Morse-Code moduliert wurde. Die Größe des beweglichen Spiegels mit der notwendigen Ansteuereinheit lag im Millimeterbereich. Um eine direkte Kommunikation zwischen den Partikeln zu ermöglichen, wurde eine aktive Kommunikationseinheit mit Lasern auf den intelligenten Körnern getestet. Es zeigte sich, dass die Smart-Dust-Körner untereinander kommunizieren und die Verbindung auch ohne Basisstation starten konnten, allerdings stieg dann der Energiebedarf erheblich. Überhaupt setzte letztlich die Energieversorgung die entscheidenden Grenzen. Abb. 2 zeigt den winzigen Chip mit Sensoren und Kommunikationseinheit auf einer kleinen Knopfzelle. Das Bild demonstriert augenscheinlich den unterschiedlichen Entwicklungsstand der Halbleitertechnologie im Vergleich zur Batterietechnik. Folgerichtig wandte sich die Arbeitsgruppe um Christopher Pister auch der Suche nach einer geeigneten Energiequelle zu.¹²

-
- 9 Die Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) wurde nach dem Sputnik-Schock 1958 als Advanced Research Project Agency (ARPA) gegründet. Die Behörde des US-Verteidigungsministeriums finanziert militärisch relevante Forschungsprojekte, behält dabei aber auch die wirtschaftliche Verwertung im Blick. Die Ergebnisse können deshalb öffentlich publiziert werden. Zur Geschichte der DARPA vgl.: Jacobsen, Annie: *The Pentagon's brain. An uncensored history of DARPA America's top secret military research agency*, New York: Little, Brown & Company 2015; Weinberger, Sharon: *Imagineers of war. The untold history of DARPA, the Pentagon agency that changed the world*, New York: Alfred A. Knopf 2017.
- 10 Vgl. Koerner, Brendan I.: »What Is Smart Dust, Anyway?«, in: www.wired.com, Online-Artikel vom 1.06.2003, <https://www.wired.com/2003/06/what-is-smart-dust-anyway/>, aufgerufen am 01.08.2021.
- 11 Vgl. Rötzer, Florian: »Feinkörnige Überwachung«, in: heise.de, Online-Artikel vom 12.12.2003, <https://heise.de/-3432497>, aufgerufen am 24.11.2019.
- 12 Vgl. Doherty, Lance et al.: »Energy and Performance Considerations for Smart Dust«, in: *International Journal of Parallel and Distributed Systems and Networks* 4/3 (2001), S. 121-133.

Abb. 1: Illustration eines Netzwerks aus Smart Dust-Partikeln im militärischen Einsatz.



Quelle: Koerner, Brendan I.: »What Is Smart Dust, Anyway?«, Online-Artikel vom 1.06.2003, <https://www.wired.com/2003/06/what-is-smart-dust-anyway/>, aufgerufen am 01.08.2021.

Aber nicht nur der winzige Smart Dust (Abb. 3 zeigt den Chip ohne Batterie) fand nach der Jahrtausendwende Interesse bei den Militärs, sondern auch tragbare Computer, sog. »Wearable Computer«.¹³ Der Begriff wurde 1991 in einer Forschungsgruppe der Carnegie Mellon University geprägt. Viele Forschungsinstitutionen sprangen auf den Zug auf, darunter auch das MIT Media Laboratory. So wurden Computer entwickelt, die Menschen den ganzen Tag begleiten und sie bei der Arbeit unterstützen. Am bekanntesten dürften tragbare Brillen sein, die zusätzliche Informationen einspiegeln. Aber auch Sensoren, die verschiedene Körperfunktionen überwachen, gehören zum Repertoire oder GPS-Empfänger, die über Funkmodul ständig die aktuelle Position der Person senden. Mit derartiger Technik ausgerüstete Soldat*innen verfügen stets über aktuelle Informationen, etwa Karten, erhalten Sprachnachrichten bzw. können diese jederzeit absetzen. Schließlich ist stets auch deren letzte Position bekannt.¹⁴ Auch die Energieversorgung war ein Thema: Ein spezieller Rucksack, der die Ausrüstung aufnimmt,

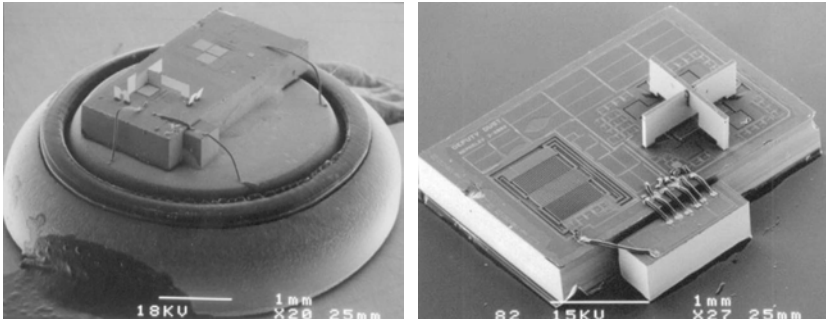
13 Vgl. Pentland, Alex: »Guest Editor's Introduction: Wearable Information Devices«, in: IEEE Micro 21/3 (2001), S. 12-15; Rieger, Stefan: Die Enden des Körpers. Versuch einer negativen Prothetik, Wiesbaden: Springer VS 2019, S. 73-98.

14 Vgl. Zieniewicz, Matthew J. et al.: »The Evolution of Army Wearable Computers«, in: Pervasive Computing 1/4 (2002), S. 30-40, <http://dx.doi.org/10.1109/mprv.2002.1158276>.

könnte durch die Bewegung beim Laufen den zum Betrieb notwendige Strom erzeugen.¹⁵

Abb. 2: Smart Dust-Chip mit Sensoren und Kommunikationseinheit auf einer kleinen Hörgerätebatterie.

Abb. 3: Vergrößerter Smart Dust-Chip mit Sensoren und Kommunikationseinheit.



Quelle: Warneke, Brett: »Smart Dust«, Website vom 30.04.2004, <http://www-bsac.eecs.berkeley.edu/smartdust/>, aufgerufen am 20.09.2021.

Für Wearable Computer werden auch im zivilen Bereich große Potenziale vorhergesagt. So könnten sie etwa Wartungspersonal bei der Arbeit an komplizierten Anlagen oder Rettungskräfte im Außendienst unterstützen. Wenn Sensoren in Stoff eingearbeitet sind oder im besten Fall das Gewebe selbst Funktionen zur Daten- bzw. Energiegewinnung besitzt, lassen sich noch viele weitere Anwendungen vorstellen, bei denen Vitaldaten im Mittelpunkt stehen. Damit ließe sich die Meldung von instabilen oder lebensbedrohlichen Zuständen von betagten bzw. kranken Menschen einfach realisieren. Wird neben den Körperdaten auch die aktuelle Position an eine Zentrale gesendet, erleichtert dies einen Rettungseinsatz beträchtlich. So wurde bereits ein »vernetzter Gehstock« vorgestellt, der diese Funktionalitäten vereint.¹⁶

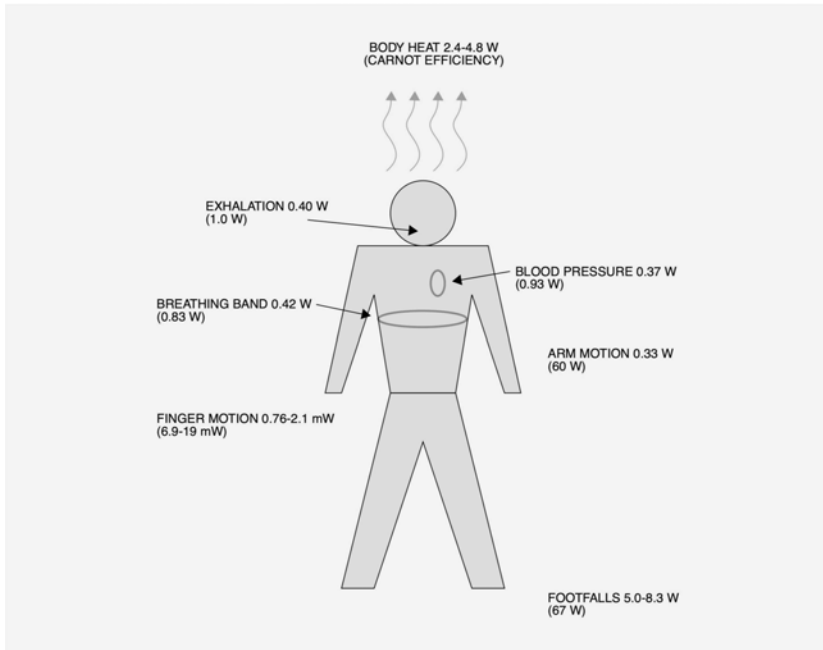
Welche konkreten Komponenten auch immer zum Einsatz kommen, in jedem Fall brauchen sie Elektrizität. Batterien bzw. Akkumulatoren haben aber nicht nur ein erhebliches Gewicht, sondern sind auch in ihrer Energiekapazität begrenzt und zudem wartungsintensiv. Eine bessere Lösung wäre es, wenn die Geräte ihre meist geringen Energiemengen aus der unmittelbaren Umgebung gewinnen könnten.

15 Vgl. Rome, Lawrence C. et al.: »Generating electricity while walking with loads«, in: Science 309 (2005), S. 1725-1728, <http://dx.doi.org/10.1126/science.1111063>.

16 Vgl. Deichl, Katja: »Ein vernetzter Gehstock unterstützt Senioren im Alltag«, in: Elektronik-praxis 9 (2018), S. 30-31.

Bereits 1996 kam eine Studie zu dem Ergebnis, dass dies durchaus möglich sei.¹⁷ Solche Vorhaben standen in direktem Zusammenhang mit einer anderen Idee, die wenige Jahre zuvor aufgekommen war und im folgenden Abschnitt vorgestellt wird: Die Verteilung vieler kleiner Computer in der Lebenswelt mit dem Ziel, Menschen unauffällig zu dienen.

Abb. 4: Grafische Darstellung von »Stromquellen aus Körperbewegungen«.



Quelle: Starner, Thad E.: »Human powered wearable computing«, in: IBM Systems Journal 35/3-4 (1996), S. 618-629, hier: S. 627.

3. Der computergeschichtliche Kontext: Die Vision des Ubiquitous Computing

Smart Dust ist – ebenso wie das Einbringen einer Vielzahl elektronischer Klein-
geräte in unsere Lebenswelt – die konsequente Fortführung der Ende der 1980er

17 Vgl. Starner, Thad: »Human powered wearable computing«, in: IBM Systems Journal 35/3-4 (1996), S. 618-629, <http://dx.doi.org/10.1147/sj.353.0618>.

Jahre aufkommenden Vision des »Ubiquitous Computing«.¹⁸ Entwickelt wurde sie von Mark Weiser, der bis zu seinem frühen Tod 1999 als Cheftechnologe am Xerox Palo Alto Research Center (PARC) arbeitete.¹⁹ In einem programmatischen Aufsatz in *Scientific American* beschrieb er die Vision einer allgegenwärtigen Computertechnik, die unsichtbar und unaufdringlich den Menschen bei seinen Tätigkeiten unterstützen und ihn von lästigen Routineaufgaben befreien soll.²⁰ Es sei der falsche Ansatz, so Weiser, mit dem PC ein Universalwerkzeug anzubieten, das die menschliche Aufmerksamkeit aufgrund seiner Komplexität zu stark in Anspruch nimmt. Computer dürften nur wenige, einfache Aufgaben übernehmen; sie müssten in den Hintergrund rücken und damit wieder Platz für den Menschen schaffen. Dazu sei es unabdingbar, dass die Computer ihr Aussehen völlig verändern – auch gegenwärtig noch sind Computer oft genug »graue Kisten« – und gewissermaßen mit der Umwelt verschmelzen. Die klassischen Mensch-Maschine-Interfaces wie Tastatur oder Bildschirm, aber auch Kabel sollten verschwinden, was wiederum den bis heute üblichen Umgang mit der Maschine völlig verändern würde.

Um seine Idee plausibel zu machen, argumentierte Weiser mit einer Entwicklungskontinuität der Computertechnik:²¹ In der Mainframe-Ära seien die schrankgroßen Rechenmaschinen von »Männern in weißen Kitteln« hinter verschlossenen Türen beaufsichtigt worden. Viele Nutzer*innen hätten sich *einen* Rechner teilen müssen. In der zweiten Entwicklungsstufe der 1980er Jahre habe der PC – Personal Computer – die uneingeschränkte Herrschaft des Menschen über sein Werkzeug versprochen. Jeder Mensch sollte nun über einen eigenen Computer mit eigenen Programmen verfügen, auf dem die persönlichen Daten gespeichert wurden. Leider hätten sich die Hoffnungen auf Vereinfachung nicht erfüllt, denn

-
- 18 Vgl. die umfangreiche Studie: Friedewald, Michael et al.: *Ubiquitäres Computing*. Das »Internet der Dinge«. Grundlagen, Anwendungen, Folgen, Berlin: edition sigma 2010, <http://dx.doi.org/10.5771/9783845269955>; Auch: Mattern, Friedemann: »Vom Verschwinden des Computers. Die Vision des Ubiquitous Computing«, in: Ders. (Hg.): *Total vernetzt. Szenarien einer informatisierten Welt*, Berlin, Heidelberg, New York: Springer 2003, S. 1-41, http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-55550-3_1.
- 19 Biografische Angaben vgl.: Want, Roy: »Remembering Mark Weiser. Chief Technologist, Xerox PARC«, in: *IEEE Personal Communications* 7/1 (2000), S. 8-10, <http://dx.doi.org/10.1109/mpc.2000.824564>.
- 20 Vgl. Weiser, Mark: »The Computer for the 21st Century«, in: *Scientific American* Vol. 265/3 (1991), S. 66-75, Wiederabdruck in: *Pervasive Computing* 1/1 (2002), S. 19-25. Das erste Heft der Zeitschrift *Pervasive Computing* beschreibt Weisers Vision und die weitergehenden Arbeiten zu diesem Zeitpunkt. Vgl.: Satyanarayanan, Mahadev: »A Catalyst for Mobil and Ubiquitous Computing«, in: *Pervasive Computing* 1/1 (2002), S. 2-5; auch: Weiser, Mark: »Ubiquitous Computing«, in: *IEEE Computer* 26/10 (1993), S. 71-72.
- 21 Vgl. Weiser, Mark/Brown, John S.: »The Coming Age of Calm Technology«, in: Peter J. Denning/Robert M. Metcalfe (Hg.), *Beyond Calculation*, New York: Springer 1997, S. 75-85, hier: S. 76f, <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4612-0685-9>.

man war nun damit beschäftigt, sich selbst und den Rechner zu administrieren. Nicht zuletzt habe der Preisverfall massenhaft hergestellter Prozessoren und Speicher aufgrund des Mooreschen Gesetzes²² dazu geführt, dass viele Menschen bald nicht nur einen, sondern mehrere Computer besaßen. Diese Entwicklung weitergedacht, schlussfolgerte Weiser, würde in einem nächsten Schritt jeder Mensch Zugriff auf viele Computer haben, die sich quasi überall in seiner Umgebung befänden. Sie wären demnach allgegenwärtig. Ziel des Ubiquitous Computing sei also eine unauffällige und unbewusste Nutzung einer Vielzahl unsichtbarer Computer, ähnlich selbstverständlich wie Menschen es gewohnt sind, mit Schrift oder Elektrizität umgehen. Da die verteilten Geräte nach Weisers Vorstellung eine geringe Komplexität aufweisen sollten, war für ihre Funktion die Verbindung mit einem drahtlosen Netzwerk unabdingbar, etwa um aufwendigere Berechnungen und Funktionen an einen Server auszulagern.

Heute – nach 30 Jahren – kann man konstatieren, dass die um 1990 entwickelte Vision des Ubiquitous Computing zumindest bezüglich der Durchdringung unserer Lebenswelt mit Minicomputern Realität geworden ist. So spricht man heute fast selbstverständlich von Sensornetzwerken, von Cyber Physical Systems oder vom Internet der Dinge. Deren Einsatzfälle sind vielfältig und reichen von verteilten Sensoren z.B. im Gebäudemanagement und in dezentralen Überwachungssystemen in der Medizin über neue Produkte der sog. smarten Technologien (Smart Home, Smart Health, Smart City usw.) bis zur Industrie 4.0, also der Einführung von intelligenten, digital vernetzten Systemen mit dem Ziel einer Individualisierung der Produktion hinsichtlich Produkten und Arbeitsabläufen. Alle diese Systeme bestehen aus einer Vielzahl von elektronischen Komponenten, die sich selbst vernetzen. Meist benötigen sie nur wenig Energie, da sie aber an vielen, auch unzugänglichen Stellen Daten sammeln, ist eine zuverlässige, langlebige und technisch

22 Aufgestellt wurde dieses »Gesetz« im Jahr 1965 von Gordon Moore, einem der Gründungsväter des Halbleiterunternehmens Intel, und seither richtet sich die Branche weitgehend danach. Nach dieser Regel verdoppelt sich alle 15 bis 18 Monate die Packungsdichte und damit die Leistungsfähigkeit von Mikrochips, während sich der Preis halbiert. Vgl.: Moore, Gordon E.: »Cramming more components onto integrated circuits«, in: *Electronics* 38/8 (1965), S. 114–117. Seither war das Mooresche Gesetz Gegenstand einer Fülle von Aufsätzen, auf die hier nicht eingegangen werden kann. Vgl. z.B.: Schaller, R. R.: »Moore's law: past, present and future«, in: *IEEE Spectrum* 34/6 (1997), S. 52–59; Golio, Mike: »Fifty Years of Moore's Law«, in: *Proceedings of the IEEE* 103/10 (2015), S. 1932–1937, <http://dx.doi.org/10.1109/jproc.2015.2473896>; Ceruzzi, Paul E.: »Moore's law and technological determinism. Reflections on the history of technology«, in: *Technology and Culture* 46/3 (2005), S. 584–593, <http://dx.doi.org/10.1353/tech.2005.0116>; Rupp, Karl/Selberherr, Siegfried: »The Economic Limit to Moore's Law«, in: *Proceedings of the IEEE* 98/3 (2010), S. 351–353; Mody, Cyrus C.M.: *The long arm of Moore's law. Microelectronics and American science*, Cambridge, MA: The MIT Press 2017.

einfache und damit wirtschaftliche Bereitstellung kleiner Energiemengen von entscheidender Bedeutung. Klassischen Lösungen mit Energiespeichern, wie Batterien, Akkumulatoren, aber auch Flüssigkeitsbehälter zur Versorgung von Brennstoffzellen, besitzen nur eine begrenzte Kapazität, sind außerdem wartungsbedürftig und deshalb aus wirtschaftlicher Sicht ungünstig. Somit ist es naheliegend, die notwendige Energie aus der lokalen Umgebung der entsprechenden Systemelemente zu gewinnen – eine Idee, welche im Folgenden näher beleuchtet werden soll.

4. Die hoffnungsbeladene Lösung: Energy Harvesting

Als »Energy Harvesting« wird die Gewinnung elektrischer Energie in kleinen bis kleinsten Mengen aus der Umgebung elektronischer Geräte bezeichnet. Zuweilen werden dafür auch die Begriffe »Power Harvesting« oder »Energy Scavenging« verwendet.²³ Da manche Autor*innen die Energiegewinnung aus Wind- und Solaranlagen sowie aus Biomasse im großen Umfang einbeziehen, hat sich für den kleinen Leistungsbereich der Begriff »Micro Energy Harvesting« eingebürgert.²⁴ Entscheidend ist dabei nicht, möglichst große Energiemengen zu »ernten«, sondern die Komponenten, etwa Funksensoren, effizient mit der vor Ort zur Verfügung stehenden Energie zu versorgen, sodass keine Kabel zur Stromversorgung notwendig sind. Das ist besonders wichtig, wenn die Sensoren an schwer zugänglichen Stellen platziert sind, etwa im unzugänglichen Gelände, in Getrieben von Maschinen oder im bzw. am Körper von Menschen oder Tieren. Die erwähnten drahtlosen Sensoren nehmen aber nicht nur die Messwerte auf, sondern überwachen ihre eigene Funktion und reduzieren die Datenmenge durch eine umfangreiche Signalverarbeitung. So gesehen können sie als Computer im Sinne Weisers Vision verstanden werden. Entscheidend ist dabei, dass die einzelnen Baugruppen der Einheit, d.h. Sensoren, Prozessor, Kommunikationseinheit usw., als Ganzes bezüglich Einsatzzweck und Leistungsverbrauch analysiert und auf Energy Harvester abgestimmt sind.²⁵ So muss man zunächst die Energieform analysieren, die aus der Umgebung »eingefangen« werden kann. Steht diese nicht ständig zur Verfügung, wie z.B. Wärme oder Vibration, sind Speicher notwendig. In vielen

23 Vgl. Kanoun, Olfa (Hg.): Energy Harvesting. Grundlagen und Praxis energieautarker Systeme, Renningen: Expert-Verl. 2008; Bouchaud, Jérémie: »Micro-energy harvesters: overview, applications and market«, in: VDE Verlag (Hg.): MikroSystemTechnik (2007), S. 105-107.

24 Vgl. Briand, Danick/Yeatman, Eric/Roundy, Shad (Hg.): Micro Energy Harvesting, Weinheim: Wiley-VCH 2015.

25 Vgl. Dembowski, Klaus: Energy-Harvesting für die Mikroelektronik. Energieeffiziente und -autarke Lösungen für drahtlose Sensorsysteme, Berlin u.a.: VDE-Verl. 2011, Vorwort.

Fällen ist die Energieernte erst ab einem bestimmten Schwellwert sinnvoll, sodass eine Elektronik diesen bestimmen muss und dafür ebenfalls Energie verbraucht. In Fällen von sehr hohen Eingangsleistungen sind dagegen Schutzeinrichtungen gegen Überlastung unabdingbar. Häufig ist auch der verfügbare Platz begrenzt. Bei manchen Micro-Harvesting-Verfahren ist die Spannung so gering, dass diese mit speziellen Schaltungen oder durch Kaskadierung in Bereiche gebracht werden muss, in denen elektronische Schaltungen arbeiten können.²⁶ Eine Kaskadierung der Quelle ist heute in vielen Fällen mittels halbleitertechnologischer Verfahren leicht möglich. So erzeugen etwa thermoelektrische Elemente lediglich eine geringe Spannung, die sich einfach durch Reihenschaltung vieler solcher Zellen erhöhen lässt.

Aus ökonomischer Sicht ist es ein wichtiges Ziel, alle Komponenten mit halbleitertechnologischen Verfahren auf einem Chip zu integrieren. Halbleiterchips, die Logikelemente und mikromechanische Strukturen vereinen, werden als MEMS bezeichnet – Micro-Electro-Mechanical Systems.²⁷ Nachdem der integrierte Schaltkreis, bei dem alle Bauelemente auf einem Halbleitersubstrat gefertigt werden, bereits 1958/59 parallel von Jack Kilby, Texas Instruments, und dem Intel-Mitbegründer Robert Noyce vorgestellt worden war,²⁸ dauerte es fast 30 Jahre, bis auch mechanische Komponenten auf Halbleiterchips integriert werden konnten. So entsteht etwa ein Beschleunigungssensor, wenn eine kleine Masse am Ende einer dünnen Zunge schwingen kann, deren Verformung gemessen wird. Solche Sensoren befinden sich heute in jedem Smartphone, um etwa dessen Lage zu bestimmen und das Display entsprechend auszurichten. Für einen Drucksensor wird an einer Stelle der Halbleiterwafer so geätzt, dass eine dünne Schicht entsteht. Bei Druckdifferenzen verformt sich die Membran, was wiederum leicht gemessen werden kann.²⁹

Die meisten Sensoren werden heute als MEMS hergestellt. Die Strukturen können kleiner als ein Mikrometer sein und lassen sich – wie Halbleiterbauelemente generell – äußerst preiswert herstellen. Um Kosten zu senken und die Betriebszuverlässigkeit zu erhöhen, sollen sämtliche Schaltungsteile auf einem Chip integriert werden – also neben den mikromechanischen Strukturen der Sensoren und

26 Vgl. O. Kanoun (Hg.): Energy Harvesting, 13f.

27 Vgl. z.B. Gad-el-Hak, Mohamed (Hg.): The MEMS Handbook. Second Edition, Boca Raton, Fla.: Taylor & Francis 2006.

28 Vgl. Noyce, Robert N.: »Semiconductor Device-and-Lead Structure«, U.S. Patent 2981877, eingereicht am 30. Juli 1959 und genehmigt am 25. April 1961.

29 Vgl. die frühen Publikationen dazu: Petersen, Kurt E.: »Silicon as a Mechanical Material«, in: Proceedings of the IEEE 70/5 (1982), S. 420-457; Angell, James B./Terry, Stephen C./Barth, Phillip W.: »Silicon Micromechanical Devices«, in: Scientific American 248/4 (1983), S. 44-55, <http://dx.doi.org/10.1038/scientificamerican0483-44>.

der Signalverarbeitung auch die Sendeeinheit sowie die Komponenten zur »Energieernte« und die zugehörige Stromversorgungselektronik. Dazu stehen heute ausgereifte technologische Möglichkeiten der Mikrosystemtechnik zur Verfügung.³⁰

5. Ausgewählte physikalische Effekte: Verfahren und Herausforderungen der Energieernte

Beim Energy Harvesting ist es wichtig, zwischen dem Energiereservoir in der Umgebung einerseits und dem genutzten physikalischen Effekt andererseits zu unterscheiden. Ist bspw. Licht vorhanden, kann eine Solarzelle daraus Elektrizität erzeugen. Ebenso lassen sich elektromagnetische Wellen leicht mittels Antennen einfangen. Für Temperaturdifferenzen gibt es zwei Möglichkeiten. Diese können entweder mit einem Thermoelement direkt in Elektroenergie oder mittels eines Stirling- oder Heißluftmotors zunächst in Bewegungsenergie und diese dann in Strom umgewandelt werden.³¹ Aus mechanischer Energie wiederum, etwa Rotation bzw. Vibration, aber auch aus Volumenströmen von Flüssigkeiten oder Gasen, lässt sich Elektrizität induktiv mittels Mikrogeneratoren, piezoelektrischen Elementen oder auch elektrostatisch gewinnen. Um einen Eindruck über die Möglichkeiten zu vermitteln, werden im Folgenden einige wichtige Energiewandler im Überblick vorgestellt.

5.1 Piezoelektrische Generatoren

Piezoelektrische Wandler werden als eingeführte Technologie relativ häufig verwendet.³² Allgemein bekannt ist die Technik durch die verbreiteten Feuerzeuge mit

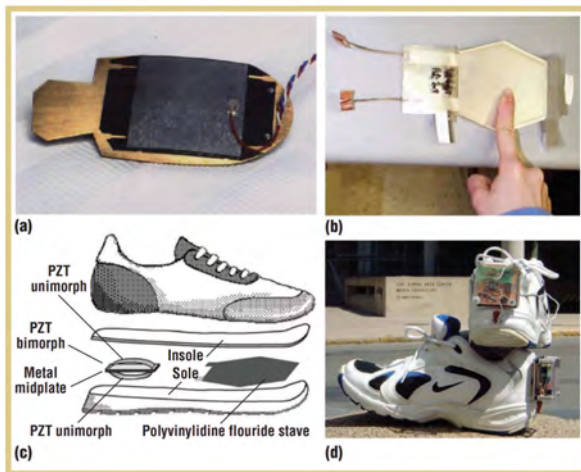
30 Vgl. Pan, C. T.: Design and Fabrication of Self-Powered Micro-Harvesters. Rotating and Vibrating Micro-Power Systems, Singapur: Wiley-IEEE Press 2014.

31 Der Heißluftmotor wurde 1816 von dem schottischen Pfarrer Robert Stirling entwickelt und nach ihm benannt. Bei dieser Wärmekraftmaschine pendelt ein Arbeitsmedium (meist ein Gas) zwischen einem abgeschlossenen Raum, dem Wärme zugeführt wird, und einem gekühlten Raum. Die ständige Temperaturänderung bewirkt eine Expansion bzw. Kompression des Mediums, die in Bewegung umgesetzt wird. Manchen Bauformen können sehr geringe Temperaturdifferenzen nutzen, z.B. jene zwischen menschlichem Körper und der Umgebung. Da der Stirlingmotor derzeit eine Renaissance erlebt, ist die Literatur entsprechend breit. Einen guten Überblick geben: Steimle, Fritz/Lamprichs, Jürgen/Beck, Peter: Stirling-Maschinen-Technik. Grundlagen, Konzepte, Entwicklungen, Anwendungen. 2. Aufl., Heidelberg: C. F. Müller 2007; Werdich, Martin/Kübler, Kuno: Stirling-Maschinen. Grundlagen – Technik – Anwendung. 7. Aufl., Staufen bei Freiburg: ökobuch 1999.

32 So beschäftigen sich von den zehn Artikeln im Themenheft *Energy Harvesting* des IEEE-Fachblattes *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 16/10 (2005) neun mit piezoelektrischen Wandlern.

Piezozündern. Piezo-Materialien erzeugen bei einer mechanischen Verformung (Druck oder Biegung) eine elektrische Ladung. Dabei entstehen Spannungen bis zu 100 Volt, was im Vergleich zu anderen genutzten physikalischen Effekten relativ hoch ist. In einem Projekt am Medienlabor des MIT wurden bereits 1998 solche Elemente in Schuhe eingebaut (Abb. 5). Die Kräfte, die beim Gehen auf einen Schuh ausgeübt werden, wirken auf eine piezoelektrische Folie. So kann aus der Biegung der Sohle Elektrizität für tragbare Sensoren und andere Elektronikkomponenten gewonnen werden.³³ Aber auch eine kleine Windmühle wurde bereits mit piezoelektrischen Elementen realisiert.³⁴

Abb. 5: Energy Harvesting im Schuh.



Quelle: Paradiso, Joseph A./Starner, Thad: »Energy Scavenging for Mobile and Wireless Electronics«, in: IEEE Pervasive Computing 4/1 (2005), S. 18-27, hier: S. 24.

5.2 Elektromagnetische Generatoren

Solche Generatoren sind gut geeignet, mechanische Energie, etwa Vibration oder Rotation, zu nutzen.³⁵ Dabei wird ein kleiner Permanentmagnet in einer Spule

33 Vgl. Shenck, Nathan S./Paradiso, Joseph A.: »Energy Scavenging with Shoe-Mounted Piezo-electrics«, in: IEEE Micro 21/3 (2001), S. 30-40; S. Rieger: Die Enden des Körpers, S. 121-128.

34 Vgl. Myers, Robert et al.: »Small scale windmill«, in: Applied Physics Letters 90/054106 (2007), <http://dx.doi.org/10.1063/1.2435346>.

35 Vgl. Woias, Peter/Huesgen, Till/Wischke, Martin: »Micro Energy Harvesting«, in: O. Kanoun (Hg.): Energy Harvesting (2008), S. 1-17, hier: S. 6.

bewegt, in der dadurch eine Spannung induziert wird. Die nötigen Elemente sind verfügbar und lassen sich in Fällen, in denen genügend Raum vorhanden ist, auch einfach einsetzen. Mit Mikrospulen wurden bereits Wandler für Rotationsenergie realisiert.³⁶ Die erzeugte elektrische Leistung liegt im Bereich bis zu einigen Milliwatt, die Spannung kann bis in den Volt-Bereich gehen. Bereits 1989 hatte die japanische Firma Seiko eine energieautonome elektromechanische Armbanduhr entwickelt, bei der eine oszillierende Masse bei Bewegung Energie erzeugt.³⁷ Auch Systeme, die z.B. die Bewegung des Knies ausnutzen, wurden bereits getestet.³⁸

5.3 Thermoelektrische Generatoren

Existiert zwischen den Enden eines thermoelektrischen Materials eine Temperaturdifferenz, entsteht nach dem Seebeck-Effekt eine Spannung im Bereich von 100 Millivolt.³⁹ Die Spannung lässt sich vervielfachen, indem mehrere Elemente in Reihe geschaltet werden. Vorteilhaft ist, dass thermoelektrische Wandler keine beweglichen Teile besitzen, sodass diese Generatoren wartungsfrei arbeiten. Weiterhin lassen sich die Strukturen gut mit den Technologien der Mikroelektronik fertigen, sodass die stromerzeugenden Komponenten gemeinsam mit anderen elektronischen Schaltungsteilen sehr wirtschaftlich auf einem Chip gefertigt werden können. Der wohl erste mikrominiaturisierte thermoelektrische Generator wurde von Seiko entwickelt und 1998 zur Energieversorgung einer elektromechanischen Uhr eingesetzt, die aber – im Gegensatz zur oben genannten Uhr mit einer oszillierenden Masse – nur in geringen Stückzahlen produziert wurde.⁴⁰

-
- 36 Vgl. Pan, C. T./Wu, T. T.: »Development of a rotary electromagnetic microgenerator«, in: Journal of Micromechanics and Microengineering 17 (2007), S. 120-128; Suzuki, Shin-nosuke et al.: »A proposal of electric power generating system for implanted medical devices«, in: IEEE Transactions on Magnetics 35/5 (1999), S. 3586-3588, <http://dx.doi.org/10.1109/20.800598>.
 - 37 Vgl. Mitcheson, Paul D. et al.: »Energy Harvesting From Human and Machine Motion for Wireless Electronic Devices«, in: Proceedings of the IEEE 96/9 (2008), S. 1457-1486, hier: S. 1468, <http://dx.doi.org/10.1109/jproc.2008.927494>; Hayakawa, Motomu: »Electronic wristwatch with generator«, U.S. Patent 5001685, eingereicht am 24.01.1989 und genehmigt am 19.03.1991.
 - 38 Vgl. Donelan, J. M. et al.: »Biomechanical energy harvesting: Generating electricity during walking with minimal user effort«, in: Science 319 (2008), S. 807-81, <http://dx.doi.org/10.1126/science.1149860>.
 - 39 Vgl. P. Woias/T. Huesgen/M. Wischke: »Micro Energy Harvesting«, S. 5; Kiely, J. et al.: »Low cost miniature thermoelectric«, in: Electronics Letters 27/25 (1991), S. 2332-2334, <http://dx.doi.org/10.1049/el:19911444>.
 - 40 Kotanagi, Susumu et al.: »Power Generation Block with Thermoelectric Power Generation unit«, JP Patent 10249329A, eingereicht am 03.09.1998.

5.4 Kapazitive Generatoren

Kapazitive oder elektrostatische Generatoren nutzen die Änderung der Kapazität von schwingungsabhängigen Kondensatoren.⁴¹ Damit kann insbesondere aus Vibration effizient Elektrizität gewonnen werden. Allerdings benötigen elektrostatische Energieerzeuger eine beträchtliche Spannung, was deren Einsatz erschwert. Man kann dieses Problem durch »Elektrete«⁴² lösen. Das sind elektrisch geladene Dielektrika, die im elektrischen Feld ähnlich wirken wie Dauermagneten im Magnetfeld. Sie können die Polarisierung am Kondensator aufrechterhalten, insbesondere lassen sich damit kapazitive Wandler sehr gut mit den Fertigungsmethoden der Halbleiter- und Mikrosystemtechnik herstellen.⁴³

5.5 Mikro-Brennstoffzellen

Für eine autonome Energieerzeugung sind Brennstoffzellen gut geeignet. Sie erzeugen Energie aus einer chemischen Reaktion.⁴⁴ Dabei wird vor allem der Einsatz im Körper von Menschen bzw. Tieren als erfolgversprechend angesehen. Solche Systeme wurden bereits in den 1960er Jahren u.a. zur Versorgung von Herzschrittmachern entwickelt und getestet, hatten sich allerdings nicht bewährt.⁴⁵ Brennstoffzellen sind relativ einfach aufgebaut, bestehen sie doch lediglich aus zwei Elektroden, getrennt von einem Elektrolyten. Die Elektroden sind mit einem Katalysator beschichtet. Voraussetzung für die Anwendung im menschlichen Körper ist, dass Bio-Brennstoffzellen bei Raumtemperatur arbeiten können. Eine direkte Glukose-Sauerstoff-Zelle etwa würde das menschliche Glukosereservoir anzapfen und dadurch eine lebenslange Energieversorgung für Implantate garantieren.

41 Vgl. P. Woias/T. Huesgen/M. Wischke: »Micro Energy Harvesting«, S. 7.

42 Jefimenko, Oleg D./Walker, David K.: »Electrets«, in: The Physics Teacher 18/9 (1980), S. 651-659, <http://dx.doi.org/10.1119/1.2340651>.

43 Vgl. Meninger, Scott et al.: »Vibration-to-electric energy conversion«, in: IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems 9/1 (2001), S. 64-76, <http://dx.doi.org/10.1109/92.920820>; Mitcheson, P. D. et al.: »MEMS electrostatic micropower generator for low frequency operation«, in: Sensors and Actuators A: Physical 115/2-3 (2004), S. 523-529, <http://dx.doi.org/10.1109/92.920820>.

44 Vgl. P. Woias/T. Huesgen/M. Wischke: »Micro Energy Harvesting«, S. 8; Chen, Ting et al.: »A Miniature Biofuel Cell«, in: Journal of the American Chemical Society 123 (2001), S. 8630-8631, <http://dx.doi.org/10.1021/ja0163164>.

45 Vgl. Strohl, Clair L. Jr. Et al.: »Studies of bioelectric power sources for cardiac pacemakers«, in: Transactions of the American Society for Artificial Internal Organs 12/1 (1966), S. 318-326; Drake, R. F./Kusserow, B. K./Messinger, S./Matsuda, S.: »A Tissue Implantable Fuel Cell Power Supply«, in: Transactions of the American Society for Artificial Internal Organs 16/1 (1970), S. 199-205.

5.6 Fotovoltaik und Solarzellen

Die Erzeugung von Elektroenergie aus Licht mittels Solarzellen ist allgemein bekannt, wird sie doch auch im großen Leistungsbereich eingesetzt. Für Energy-Harvesting-Anwendungen sind vor allem flexible Solarzellen interessant, die wegen ihrer Biegsamkeit und hohen mechanischen Stabilität bei geringen Herstellungskosten etwa in »intelligenter« Kleidung bzw. bei Wearable Computern Anwendung finden könnten. Der relativ geringe Wirkungsgrad spielt dabei nur eine untergeordnete Rolle, da die bereitzustellenden Energiemengen meist unerheblich sind.⁴⁶

5.7 Elektromagnetische Wellen

Treffen elektromagnetische Wellen auf eine Antenne, kann dieser Energie entnommen werden. Die Elektrizitätsmenge hängt von der Feldstärke der Radiowellen sowie von der Fläche ab, die die Antenne umspannt.⁴⁷ Dieser Effekt wird in der klassischen RFID-Technologie genutzt. Die Technik zur Radio Frequency Identification (RFID) kann als Pioniertechnologie des von Mark Weiser formulierten Konzepts des Ubiquitous Computing betrachtet werden.⁴⁸ Erste Anwendungen gab es bereits am Ende des Zweiten Weltkriegs im militärischen Bereich zur Freund-Feind-Erkennung. In ihrer einfachen Form wird die Funkchip-Technologie in Form von Transpondern – ein Kunstwort aus transmit und response – seit mehreren Jahrzehnten bspw. im Handel zur Diebstahlsicherung eingesetzt.⁴⁹ Moderne RFID-Tags oder Smart Label, deren Einsatz seit der Jahrtausendwende rasant zunahm, können zwischen wenigen Byte und mehreren Kilobyte speichern, viele enthalten einen Prozessor, der z.B. Daten verschlüsseln kann, manche auch Sensoren, etwa um die Unterbrechung der Kühlkette von Nahrungsmitteln oder Medikamenten zu registrieren – dann benötigen sie allerdings eine Energieversorgung. Die meist verwendeten passiven Label werden mit einem Hochfrequenzsignal aktiviert, aus dem sie die Energie für die Informationsverarbeitung und das Senden eines Antwortsignals beziehen. Je nach Bauform sind die Funkchips etwa ein Quadratmillimeter groß. Die Antenne ist zwar wesentlich größer, kann jedoch aus dünner Folie bestehen. Je größer die Antennenfläche ist, desto mehr Energie wird empfangen

46 Vgl. P. Woias/T. Huesgen/M. Wischke: »Micro Energy Harvesting«, S. 11.

47 Vgl. Mickle, M. H. et al.: »Energy Harvesting, Profiles, and Potential Sources«, in: International Journal of Parallel and Distributed Systems and Networks 4/3 (2001), S. 150-160.

48 RFID wird als Schlüsseltechnologie des Pervasive Computing angesehen. Vgl. Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (Hg.): Risiken und Chancen des Einsatzes von RFID-Systemen, Bonn: SecuMedia Verl. Ingelheim 2004, hier: S. 22.

49 Einen Überblick zur Entwicklung dieser Technologie gibt: Rosol, Christoph: RFID. Vom Ursprung einer (all)gegenwärtigen Kulturtechnologie, Berlin: Kadmos 2007.

und steht somit für die Informationsverarbeitung sowie das Senden eines Signals zur Verfügung. Passive Funkchips haben eine Reichweite bis zu einem Meter. Die Reichweite aktiver RFID-Tags ist zwar viel höher, sie sind aber erheblich teurer und vor allem wartungsaufwendiger, da sie eine Batterie besitzen, die turnusmäßig gewechselt werden muss.⁵⁰

6. Von Herzschrittmachern und Turnschuhen: Eine kurze Geschichte des Energy Harvesting

Bereits die gelegentliche Ausweitung des Begriffs Energy Harvesting auf die Erzeugung großer Energiemengen aus der Umgebung verweist darauf, dass der Grundgedanke keineswegs neu ist. Fast die ganze Menschheitsgeschichte über nutzten die Menschen jene Energie, auf die sie in ihrer unmittelbaren Umgebung Zugriff hatten, etwa die Muskelkraft von Menschen und Tieren, Wind und Wasser oder auch Biomasse zum Heizen. Mobile elektrische Geräte dagegen sind gerade knapp 200 Jahre alt. Dabei waren Batterien die ersten Stromlieferanten, Akkumulatoren sind erst seit gut 150 Jahren verfügbar. So wurden bereits vor 1900 Batterien und Akkumulatoren eingesetzt, etwa in mobilen Beleuchtungen, z.B. Grubenlampen, als Pufferbatterien in frühen Elektrizitätszentralen und bekanntermaßen auch in Elektrofahrzeugen. Viele Anwendungen sind bis heute aktuell, etwa Speicherbatterien in Notstromsystemen oder in unterbrechungsfreien Stromversorgungsanlagen. Andere Nutzungsszenarien werden derzeit wieder massiv vorangetrieben, etwa Energiespeicher für die Elektromobilität. Seit den 1950er Jahren entstand durch die Ausbreitung mobiler Geräte im Bereich der Unterhaltungselektronik,⁵¹ der Medizintechnik (Hörgeräte und Herzschrittmacher) aber auch mobiler elektrischer Mess- und Prüfgeräte eine wachsende Nachfrage nach mobilen Stromversorgungseinheiten hoher Energiedichte. Später kamen Elektrowerkzeuge, ferngesteuertes Spielzeug, Digitalkameras, Mobiltelefone, Smartphones u.v.a.m. hinzu.⁵² Standardlösung blieben stets die chemischen Energiespeicher in Form von Batterien und Akkumulatoren. Letztere haben zwar meist eine deutlich geringere Energiedichte als Primärzellen, die Nutzungsdauer kann aber durch Wiederaufladen vervielfacht werden. Letztlich sind aber alle chemischen Stromspeicher teuer,

50 Vgl. Dittmann, Frank: »Was ist, wenn alles denkt? Eine historische Annäherung«, in: Malte-Christian Gruber/Jochen Bung/Sascha Ziemann (Hg.): *Autonome Automaten. Künstliche Körper und artifizielle Agenten in der technisierten Gesellschaft*, Berlin: Trafo-Verlag 2014, S. 137-154.

51 Vgl. Weber, Heike: *Das Versprechen mobiler Freiheit. Zur Kultur- und Technikgeschichte von Kofferradio, Walkman und Handy*, Bielefeld: transcript 2008, <http://dx.doi.org/10.14361/9783839408711>.

52 Vgl. den Beitrag von Monique Miggelbrink in diesem Sammelband.

wartungsbedürftig und haben nur eine begrenzte Lebensdauer.⁵³ Es lag also nahe, nach einer Energiequelle zu suchen, die aus einem Energiereservoir in der unmittelbaren Umgebung schöpfen kann.

Die Vorstellung, in der Umgebung vorhandene Energie zu »ernten«, tauchte bereits in den 1950er Jahren auf. Ein früher Bericht in einem US-Fachjournal etwa stellt unter dem Titel *Silicon Cells Harvest Sun's Energy* die damals völlig neuen Solarzellen vor, welche Satelliten im Weltraum mit Strom versorgen, indem sie die dortige intensive Sonnenstrahlung nutzen. Der Aufsatz verweist aber auch auf irdische Einsatzfälle, wie die Versorgung einer »automatic radio repeater station« oder von Kofferradios.⁵⁴ Dieser Text steht am Beginn einer Entwicklung, die später als Energy Harvesting bezeichnet werden soll. Im Rückblick kann man konstatieren, dass die avisierten ehrgeizigen Ziele nicht erreicht wurden. Ab Mitte des 20. Jahrhunderts stand vor allem die zuverlässige Versorgung von medizintechnischen Geräten, insbesondere Herzschrittmachern, im Mittelpunkt. Als Mitte der 1970er Jahre verbesserte Batterien mit einer Lebensdauer von fünf Jahren allgemein verfügbar waren, kamen diese als eingeführte Technik zum Einsatz, während die Entwicklung von Alternativen nur noch in geringem Umfang weiter betrieben wurde. Ein nächster Entwicklungsschub ist für die beiden Jahrzehnte nach der Jahrtausendwende zu konstatieren. So war im Anschluss an die Vision des Ubiquitous Computing tatsächlich eine fast unübersehbare Zahl von elektronischen Geräten auf den Markt gekommen, die alle nach einer zuverlässigen und preiswerten Stromquelle verlangten. Auch der Trend zu immer mehr kleineren, autarken Computern in unserer Umgebung setzt sich fort und die damit verbundenen technologischen Visionen können wohl nur erreicht werden, wenn entsprechende Stromversorgungseinheiten zur Verfügung stehen. Wie realistisch das ist, kann derzeit kaum abgeschätzt werden, aber zumindest ein wesentlicher Faktor hat sich seit dem ersten Entwicklungsschub in den 1960er Jahren geändert: Die moderne Halbleiterfertigung bietet heute Möglichkeiten, eine Fülle von verschiedenen Einzelkomponenten preiswert zusammen auf winzigen Chips zu integrieren. Ob das Potenzial dieser Technologie ausreicht oder sich möglicherweise ganz neue Lösungsmöglichkeiten eröffnen, wird die Zukunft zeigen. Zudem hat die Forschung zum Energy Harvesting enorm an Breite zugenommen.

53 Auf die Geschichte der Batterietechnik kann hier nicht eingegangen werden. Es sei lediglich verwiesen auf: Jäger, Kurt (Hg.): *Gespeicherte Energie: Geschichte der elektrochemischen Energiespeicher*, Berlin, Offenbach: VDE-Verl. 1994; Trueb, Lucien F./Rüetschi, Paul (Hg.): *Batterien und Akkumulatoren. Mobile Energiequellen für heute und morgen*, Berlin u.a.: Springer 1998, <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-58741-2>.

54 Eine frühe Erwähnung findet die Idee der Ernte von Energie in: IEEE (Hg.): »Silicon Cells Harvest Sun's Energy«, in: *Electrical Engineering* 77/11 (1958), S. 1073-1074. <http://dx.doi.org/10.1109/ee.1958.6445475>.

Neben der Raumfahrt war vor allem die Medizintechnik an einer wartungs-freien Energiequelle mit möglichst langer Standzeit interessiert. 1958 implantierte Åke Senning in Stockholm erstmals einem Menschen einen Herzschrittmacher, den der schwedische Arzt gemeinsam mit dem Elektroingenieur Rune Elmqvist auf der Basis der damals neuen Transistoren entwickelt hatte.⁵⁵ Die notwendige Elektroenergie lieferte ein Nickel-Cadmium-Akkumulator, der mittels einer Induktionsspule aufgeladen wurde.⁵⁶ Die in den USA implantierten Herzschrittmacher verwendeten leistungsfähige Quecksilberoxid-Zink-Batterien.⁵⁷ Allerdings lösten diese die Erwartung an eine Lebensdauer von etwa fünf Jahren nicht ein. In der Praxis zeigte sich nämlich rasch, dass viele Batterien bereits nach etwa zwei Jahren getauscht werden mussten. Die Energieversorgung von Herzschrittmachern war also von Beginn an ein Problem,⁵⁸ das ein ingenieurwissenschaftlicher Fachaufsatz wie folgt auf den Punkt brachte: »With cardiac pacemakers, many people with heart trouble are able to lead lives that are normal in many respects except one – fear that the pacemaker battery may fail.«⁵⁹

Um Abhilfe zu schaffen, konzentrierten sich die Entwicklungsaktivitäten auf zwei Schwerpunkte: Zum einen sollte die Elektronik effizienter gestaltet werden, so sollte sie sich nur im Bedarfsfall einschalten. Zum anderen suchte man seit Beginn der 1960er Jahre nach alternativen Energiequellen, die im menschlichen Körper eingesetzt werden können.⁶⁰ Eine Möglichkeit sah man in galvanischen

-
- 55 Zur Geschichte des Herzschrittmachers vgl. Jeffrey, Kirk: *Machines in our Hearts. The Cardiac Pacemaker, the Implantable Defibrillator, and American Health Care*, Baltimore: Johns Hopkins University Press 2001.
- 56 Senning schreibt dazu: »Um den Nachteil der begrenzten Lebensdauer der Batterie zu umgehen, wurden wiederaufladbare Akkumulatoren als Energiequelle verwendet...«, Senning, Åke: »Problems in the use of pacemakers«, in: *Journal of Cardiovascular Surgery* 5 (1964), S. 651-656, hier: S. 651 (Übers. d. Verf.).
- 57 Diese Batterien hatte zehn Jahre zuvor Samuel Ruben, wissenschaftlicher Leiter beim amerikanischen Unternehmen Duracell, entwickelt. Vgl. Bullock, Kathryn R.: »Samuel Ruben. Inventor, Scholar, and Benefactor«, in: (The Electrochemical Society) *Interface* 15/3 (2006), S. 16-17; vgl. außerdem den Beitrag von Eric Hintz in diesem Sammelband.
- 58 Der Pionier dieser Technik Wilson Greatbatch schreibt im Rückblick: »Die Stromversorgung war wahrscheinlich unser größtes Problem.« Greatbatch, Wilson: »Implantable Pacemakers. A Twenty Five Year Journey«, in: *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine* 3/4 (1984), S. 24-26 (Übers. d. Verf.), <http://dx.doi.org/10.1109/memb.1984.5006107>. In seiner Autobiografie widmet er der Stromversorgung ein eigenes Kapitel, vgl. Greatbatch, Wilson: *The making of the pacemaker. Celebrating a lifesaving invention*, New York: Prometheus Books 2000, S. 119-147.
- 59 Roy, O. Z./Wehnelt, R. W.: »Keeping the heart alive with a biological battery«, in: *Electronics* 39/6 (1966), p. 105-107. Vgl. außerdem den Beitrag von Lisa Wiedemann in diesem Sammelband.
- 60 Einen Überblick gibt: Roy, O. Z.: »Biological Energy Sources. A Review«, in: *Biomedical Engineering* 6/6 (1971), S. 250-256.

Zellen (Batterien), bei denen Körperflüssigkeiten das Elektrolyt zwischen beiden Metallelektroden bilden. Als allerdings die Idee einer biogalvanischen Zelle in Tierexperimenten überprüft wurde, zeigte sich, dass Körperflüssigkeiten sehr aggressiv sind und an den Elektroden Korrosion auftrat.⁶¹ Neben galvanischen Zellen wurde ebenfalls die Nutzung der im Körper vorhandenen mechanischen Bewegungen mittels Piezoelementen untersucht. So sollte die Pulsation der Aorta zur Erzeugung von Elektrizität dienen.⁶² Wegen des stark korrosiven Milieus im Körper und einer zu geringen Zuverlässigkeit kamen solche Systeme aber nicht über das Versuchsstadium hinaus.

Erfolgversprechend schien auch das Konzept, kleine preiswerte Brennstoffzellen zu implantieren, die bei Körpertemperatur arbeiten, nicht speziell gekapselt werden müssen und lebenslang im menschlichen Körper verbleiben können. Eine direkte Glukose-Sauerstoff-Zelle würde unmittelbar das menschliche Glukosereservoir nutzen. Solche Systeme wurden seit Ende der 1960er Jahre entwickelt und getestet, bewährten sich jedoch nicht.⁶³ Heute werden sie wieder verstärkt diskutiert, haben aber bisher das Labor noch nicht verlassen.⁶⁴

Eine weitere Lösung bestand in den aus der Weltraumtechnik bekannten Radionuklid-Batterien,⁶⁵ die Elektroenergie aus der Strahlung meist von Plutonium 238 erzeugen; später fand auch Promethium-147 und Tritium Verwendung. Herzschrittmacher mit miniaturisierten Plutoniumbatterien hatten eine Lebensdauer von über 20 Jahren, könnten also im Idealfall das gesamte Leben im Körper verbleiben. Dabei musste jedoch die gesamte Strahlenexposition für alle Beteiligten zuverlässig unter den Grenzwerten bleiben. Die Schwierigkeit lag darin, dass Leckagen im Gehäuse, etwa bei einem Unfall, nicht ausgeschlossen werden konnten und selbst dann garantiert werden musste, dass das hochgiftige

61 Vgl. O.Z. Roy/R.W. Wehnelt: »Keeping the heart alive«; Parsonnet, Victor et al.: »A cardiac pacemaker using biologic energy sources«, in: Transactions – American Society for Artificial Internal Organs 9/1 (1963), S. 174-177.

62 Vgl. V. Parsonnet et al.: »A cardiac pacemaker using biologic energy sources«, S. 174-177; Lewin, G. et al.: »An improved biological power source for cardiac pacemakers«, in: Transactions – American Society for Artificial Internal Organs 14/1 (1968), S. 215-219.

63 Vgl. Wolfson, Sidney K. Jr. et al.: »The bioautofuel cell. A device for pacemaker power from direct energy conversion consuming autogenous fuel«, in: Transactions – American Society for Artificial Internal Organs 14 (1968), S. 198-203; Drake, R. F. et al.: »A Tissue Implantable Fuel Cell Power Supply«, in: Transactions – American Society for Artificial Internal Organs 16/1 (1970), S. 199-205.

64 Vgl. Chen, Ting et al.: »A Miniature Biofuel Cell«, in: Journal of the American Chemical Society 123/35 (2001), S. 8630-8631, <http://dx.doi.org/10.1021/ja0163164>.

65 Vgl. Matheson, W. E.: »Higher Outputs and Efficiencies for Nuclear Batteries«, in: Space Aeronautics. The Magazine of Aerospace Technologies 51/2 (1969), S. 76-79.

und radioaktive Plutonium unter keinen Umständen in die Umwelt gelangt.⁶⁶ So wurde etwa vorgeschlagen, das Gehäuse aus einer Wolfram-Tantal-Legierung zu fertigen, das für 90 Minuten einer Temperatur bis zu 1300 Grad Celsius widersteht. Außerdem sollte ein Crash-Test sicherstellen, dass der Herzschrittmacher – etwa bei Unfällen – Belastungen von einer Tonne Gewicht standhält.⁶⁷

Als zu Beginn der 1970er Jahre die leistungsstärkeren und langlebigen Lithiumbatterien zur Verfügung standen, war damit das Energieproblem zwar nicht grundsätzlich gelöst, hatte sich aber entspannt. So erreichten Lithium-Jod-Zellen mit 5 bis 10 Jahren eine akzeptable Lebensdauer. Zudem bilden sich darin keine gasförmigen Produkte, sodass die Batterie hermetisch abgedichtet werden kann.⁶⁸ In den 1970er und 1980er Jahren kamen verbesserte Systeme auf den Markt, etwa Lithium-Silberchromat- oder Lithium-Kupfersulfid-Zellen.⁶⁹

Im Ergebnis kamen zur Stromversorgung von Herzschrittmachern, später auch von implantierten Insulinpumpen, in einigen Fällen Radionuklid-Batterien zum Einsatz, meistens setzte man aber pragmatisch auf leistungsfähige Batteriesysteme, die alle fünf Jahre getauscht werden mussten. Die Unvollkommenheit von Batterien war bekannt, aber letztlich gab es keine Alternative für ihren Einsatz. Nachdem sich nach der Jahrtausendwende im Zusammenhang mit den »smarten Technologien« die Suche nach geeigneten Technologien zum Energy Harvesting massiv ausgeweitet hatte, versuchten auch die Hersteller von medizinischen Implantaten von diesem Forschungs-Boom zu profitieren. Allerdings erwiesen sich die neuen am Markt angebotenen Komponenten wie Mikrogeneratoren, Akkumulatoren sowie die eingebettete Systemsoftware als ungenügend optimiert für deren spezielle Anwendungsfälle.⁷⁰ Die Hersteller von implantierbaren medizinischen Geräten konnten somit nicht von der Suche nach geeigneten Technologien zum

66 Vgl. Myatt, J.: »Radioisotope-fuelled »Batteries« for Heart Pacemakers«, in: *Biomedical Engineering* 6/5 (1971), S. 192-196.

67 Vgl.: Rowe, D. M.: »Thermoelectric power generation«, in: *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers* 125/11 (1978), S. 1113-1136, hier vor allem S. 1127. Auch heute wird der Einsatz von Plutoniumbatterien in Herzschrittmachern unter Strahlenschutzgesichtspunkten diskutiert. Insbesondere ist die Frage, was damit passiert, wenn die radioaktive Quelle nach dem Tod im Körper verbleibt und etwa in die Einäscherungsanlagen gelangt. Vgl. Meyer, Cordula: »Hurra, der ist noch da!«, in: *Der Spiegel* 48 (2009), S. 140-141.

68 Vgl. Greatbatch, Wilson et al.: »The Solid-State Lithium Battery. A New Improved Chemical Power Source for Implantable Cardiac Pacemakers«, in: *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 18/5 (1971), S. 317-324, <http://dx.doi.org/10.1109/tbme.1971.4502862>; Greatbatch, Wilson: »Pacemaker Power Sources«, in: *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine* 3/2 (1984), S. 15-19.

69 Vgl. Görgе, Günter/Kirstein, Michael/Erbel, Raimund: »Microgenerators for Energy Autarkic Pacemakers and Defibrillators: Fact or Fiction?«, in: *Herz* 26/1 (2001), S. 64-68, hier: S. 65-66, <http://dx.doi.org/10.1007/s00059-001-2263-5>.

70 Vgl. ebd.

Micro Energy Harvesting profitieren, die nach der Jahrtausendwende einsetzte, als immer mehr kleine, autarke Elektronikkomponenten zu »smarten« Lösungen von tatsächlichen oder vermeintlichen Problemen auftauchten.⁷¹

Als Meilenstein für Energy Harvesting gilt der inzwischen fast legendäre Joggingschuh des MIT-Mitarbeiters Joe Paradiso. Ende der 1990er Jahre präsentierte er einen Schuh, in dessen Sohle ein piezoelektrisches Element bei jedem Schritt Energie abgab, die ausreichte, einen GPS-Empfänger zu versorgen.⁷² Ausgangspunkt in einem Aufsatz war ein Vergleich der Innovationsraten bei der Größe von Festplatten- und Arbeitsspeichern, Prozessorgeschwindigkeit, der WLAN-Geschwindigkeit und der Kapazität von Batterien, die in Laptops eingesetzt wurden.⁷³ Am Ende mussten die Autoren konstatieren, dass trotz neuer Materialien die Energiedichte von Akkumulatoren in viel geringerem Maße gewachsen war als die Kenngrößen der anderen untersuchten Komponenten (Abb. 6). Folgerichtig müsse man nach anderen Energiequellen suchen. Als Beispiele nannte Paradiso Mikrobrennstoffzellen, verwies aber auch auf Wasser- und Windmühlen. Nutzbar seien zudem Funkwellen, Temperaturunterschiede und mechanische Energie. Diese Aufzählung enthält – so kann man heute konstatieren – keine Ideen, die nicht bereits in den Jahrzehnten zuvor verfolgt worden wären. Allerdings benötigten die mit Technologien der modernen Halbleiterproduktion hergestellten Komponenten viel weniger Energie als frühere Lösungen. Hinzu kam, dass durch die Förderung militärisch interessanter Projekte nun wesentlich mehr Ressourcen für die Forschung zur Energieversorgung autarker Elektronik bereitstanden, als etwa die Hersteller von medizinischen Implantaten in den 1970er und 1980er Jahren je investieren konnten.

Um das Jahr 2000 legte die DARPA ein entsprechendes Programm für Energy Harvesting auf, nachdem diese Organisation die bereits oben erwähnte Gruppe um Kristofer Pister bei deren Projekt zum Smart Dust unterstützt hatte. Dieser hatte gezeigt, dass moderne Hochleistungsbatterien auf der Basis von Lithium, Vanadiumoxid bzw. Molybdänoxid und auch Supercaps ungeeignet waren, da sie nicht genügend Energie lieferten.⁷⁴ Insgesamt wurde die Mehrzahl der frühen Forschungsprojekte in den USA und in Japan betrieben.⁷⁵ So fanden die einschlägigen Konferenzen zu »PowerMEMS« seit 2001 in Japan statt. Ab 2007 folgte der

71 Einen guten Überblick gibt: Mitcheson: »Energy Harvesting From Human and Machine Motion«.

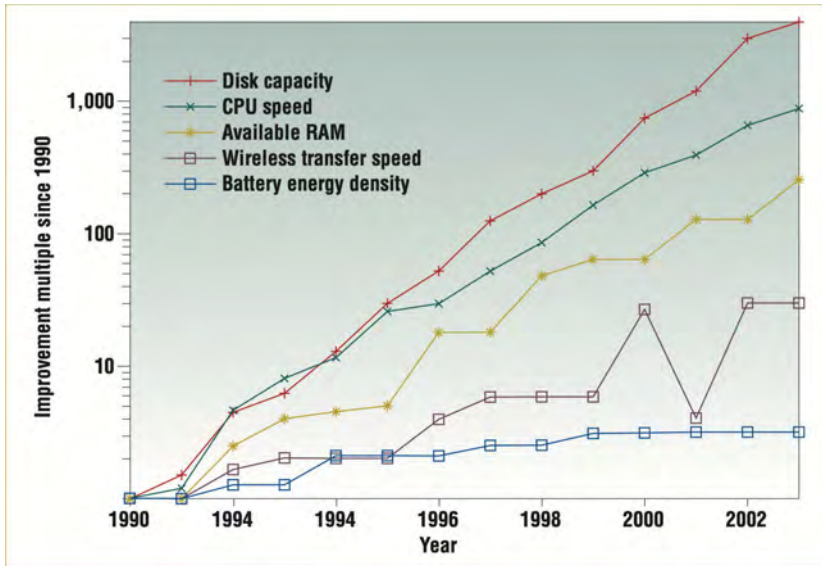
72 Vgl. N.S. Shenck: Energy Scavenging with Shoe-Mounted Piezoelectrics; S. Rieger: Die Enden des Körpers, S. 121-128.

73 Vgl. Paradiso, Joseph A./Starnier, Thad: »Energy Scavenging for Mobile and Wireless Electronics«, in: IEEE Pervasive Computing 4/1 (2005), S. 18-27, <http://dx.doi.org/10.1109/mprv.2005.9>.

74 Vgl. L. Doherty et al.: »Energy and Performance Considerations for Smart Dust«.

75 Vgl. O. Kanoun (Hg.): Energy Harvesting, S. 12.

Abb. 6: Entwicklung der Energiedichte von Akkumulatoren im Vergleich zu anderen Verbesserungen im Bereich des Laptop Computing von 1990 bis 2003.



Quelle: Paradiso, Joseph A./Starner, Thad: »Energy Scavenging for Mobile and Wireless Electronics«, in: IEEE Pervasive Computing 4 (2005) Nr. 1, S. 18-27, hier: S. 19, <http://dx.doi.org/10.1109/MPRV.2005.9>.

Wechsel zu internationalen Konferenzorten. Bemerkenswerterweise fand die erste dieser internationalen Konferenzen in Deutschland statt.⁷⁶ Dort hatte die Politik inzwischen die Relevanz des Themas erkannt. Seit 2006 finanzierte die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) zusammen mit Industriepartnern das Graduiertenkolleg GR 1322 Micro Energy Harvesting an der Albert-Ludwigs-Universität in Freiburg, auch das BMBF unterstützte mit seinem Förderschwerpunkt »Energieautonome Mikrosysteme« Forschungsaktivitäten auf diesem Gebiet.⁷⁷ Auch andere

76 The Seventh International Workshop on Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications (PowerMEMS 2007) in Freiburg, 28. und 29. November 2007.

77 Vgl. BMBF: »Bekanntmachung von Förderrichtlinien zum Rahmenprogramm Mikrosysteme (Thematischer Schwerpunkt »Energieautarke Mikrosysteme«)«, Website vom 10. Januar 2006, https://www.bmbf.de/bmbf/shareddocs/bekanntmachungen/de/2006/01/148_bekanntmachung.html;jsessionid=AE73546A2B2AAFC404582D2C1263EAB1.liveo91, aufgerufen am 02.08.2021; Universität Freiburg: »Micro Energy Harvesting«, Website ohne Datum, <https://www.meh.uni-freiburg.de>, aufgerufen am 02.08.2021.

Konferenzen beschäftigten sich mit dem virulenten Thema des Energy Harvesting, etwa der Dresdner Mikrosystemtechnik Kongress vom Oktober 2007.⁷⁸

Das Ergebnis der weltweiten Forschungsaktivitäten nach fast 15 Jahren und den Boom der letzten Zeit mögen einige Zahlen zu publizierten Fachbeiträgen illustrieren. So weist *IEEE Xplore*, eine Datenbank des US-amerikanischen Ingenieur-Berufsverbands Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), zwischen 1958 und 2000 ganze 27 Treffer unter dem Stichwort Energy Harvesting aus; die meisten davon Konferenzbeiträge. Zwischen 2000 und 2010 waren es 1274 Treffer, davon 1042 Beiträge auf Konferenzen, 190 Zeitschriftenaufsätze und zwei Bücher. Im Zeitraum von 2010 bis 2019 weist die genannte Datenbank 14219 Treffen aus, davon 9864 Konferenzbeiträge, 3876 Aufsätze in Fachjournals und 59 Bücher.⁷⁹

Aber auch junge Unternehmensgründer betrachteten Energy Harvesting als lohnendes Marktsegment. So gründeten etwa 2001 ehemalige Siemens-Mitarbeiter um Frank Schmidt in München die *EnOcean GmbH*, die seither expandiert.⁸⁰ Basis für alle weiteren Entwicklungen war ein wartungsfreier, batterieloser Funkschalter, der mittels eines Piezoelements die lineare Bewegung beim Drücken des Lichtschalters zur Energieerzeugung nutzt. Die so erzeugte Elektrizität reicht aus, um ein Funksignal zum Schaltzustand bis zu 300 Meter weit zu senden. Damit ist der Schalter flexibel in einem Gebäude einsetzbar, da er nicht mehr mit dem Hausstromnetz verbunden sein muss. Diese Verbindung benötigt lediglich der Empfänger an der Brennstelle. Die Herausforderung für das Team war zunächst, eine energieoptimierte Elektronik zu entwickeln, die mit sehr kleinen Energiemengen auskommen konnte. Bald wurde an Heizungsventilen gearbeitet, die ihre Energie für den Stellmotor aus der Temperaturdifferenz vom Heizkörper zur Umgebungsluft beziehen.⁸¹

Auch in der Öffentlichkeit kam das Problem der Energieversorgung mobiler Geräte im ersten Jahrzehnt des neuen Jahrtausends an. So thematisierte etwa 2007 Christian Kortmann in der *Süddeutschen Zeitung* das Problem der Akkumulatoren

78 Vgl. VDE Verlag (Hg.): *MikroSystemTechnik*.

79 Für diese Analyse wurde die Datenbank des US-amerikanischen Berufsverbands Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) verwendet, IEEE: »IEEE Explore«, Website ohne Datum, <https://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp>, aufgerufen am 25.11.2019.

80 Vgl. Schneider, Andreas: »10 Jahre EnOcean – 10 Jahre Innovationen«, in: *perpetuum* 8/2 (2011), S. 8–11. In einem Interview sagte Frank Schmidt 2015: »Wir leben in einem Ozean von Energie, wir müssen den nur nutzen. Und das war dann auch der Name, den wir dann der Firma gegeben haben. »EnOcean«, der Energie Ozean.« Heller, Piotr: »Energy Harvesting: Maschinen nabeln sich ab«, in: www.deutschlandfunk.de, Online-Artikel vom 07.06.2015, https://www.deutschlandfunk.de/endlich-ernten-energy-harvesting-maschinen-nabeln-sich-ab.740.de.html?dram:article_id=321169, aufgerufen am 25.11.2019.

81 Vgl. Anders, Armin: »Alles Thermo, oder was? Mit EnOcean funktionieren auch die Aktoren ohne Kabel und Batterien«, in: *perpetuum* 6/1(2009), S. 7–10.

und charakterisiert diese als unvollkommen aber alternativlos. Er schrieb: »Der Akku ist ein Versprechen, das noch nicht eingelöst worden ist. Er treibt uns zur Verzweiflung, weil er uns mit der Aussicht auf Unabhängigkeit den Mund wässrig macht und dann immerfort an die Steckdose, die ungeliebte Tankstelle, drängt.«⁸² Enttäuscht zeigte sich der Autor von den Ergebnissen der expandierenden Forschung. So habe der oben erwähnte Joseph Paradiso vom Media Lab des MIT bereits 1998 den Prototypen eines Turnschuhs vorgestellt, der Strom aus Mini-Generatoren in den Absätzen gewinnen könne. Aber knapp eine Dekade danach sei immer noch kein Serienmodell in Sicht.

Seither nehmen Wissenschaftsjournale das Thema von Zeit zu Zeit auf. 2009 erschien im *Magazin für professionelle Informationstechnik* ein Beitrag, der Sensornetzwerke in der Gebäudeautomatisierung und Medizin sowie deren Energieversorgung thematisiert.⁸³ Während dieser Beitrag lediglich zwei Kommentare hat, wurde ein von der *Deutschen Presse-Agentur* (dpa) übernommener Beitrag auf *heise online* von 2017 bereits 123 Mal kommentiert.⁸⁴ Diese Erweiterung der medialen Öffentlichkeit ist sicherlich nicht nur mit einem gestiegenen Interesse am Thema, sondern auch mit einem veränderten Kommunikationsverhalten der Leser*innen im Netz zu erklären. 2015 – um ein letztes Beispiel zu nennen – widmete der *Deutschlandfunk* eine dreißigminütige Sendung der Reihe »Wissenschaft im Brennpunkt« den verschiedenen Lösungsmöglichkeiten zum Energy Harvesting.⁸⁵ Inwieweit die »Reichweitenangst der Sensoren« die breitere Öffentlichkeit bisher tatsächlich erreicht, muss offen bleiben. Möglicherweise würde sich die Situation ändern, wenn ein fundamentaler Durchbruch zu vermelden wäre, nicht zuletzt, weil dies auch eine Lösung für die menschliche Reichweitenangst sein könnte.

In einer Zeit, in der eine Fülle von winzigen elektronischen Komponenten zur Verfügung steht, die beinahe überall Daten sammeln und über diverse Funknetze kommunizieren können, ist eine autarke Stromquelle zur virulenten Frage geworden. Ohne eine Lösung des Energieproblems können die meisten der heute angepriesenen smarten Technologien, angefangen von Industrie 4.0 über Wearable Computing und Selbstvermessungs- und Optimierungstechniken bis hin zu Smart Home und Smart City kaum ihre avisierten Potentiale entfalten. Die Frage ist, ob ein Durchbruch im Energy Harvesting gelingt oder ob – möglicherweise verbesserte – Batterien weiterhin die Energieversorgung leisten können und müssen.

82 Kortmann, Christian: »Sieger mit Schwächen«, in: *Süddeutsche Zeitung* vom 14./15.04.2007, S. 14.

83 Vgl. Lange, Barbara: »Mühsame Ernte«, in: *iX Magazin für professionelle Informationstechnik* 8 (2009), <https://www.heise.de/-794666>, aufgerufen am 25.11.2019.

84 Vgl. dpa: »Energy Harvesting: Strom erzeugen beim Spazieren gehen«, in: *heise.de*, Online-Artikel vom 17.09.2017, <https://heise.de/-3834331>, aufgerufen am 25.11.2019.

85 Vgl. P. Heller: »Maschinen nabeln sich ab«.

