

Smart Dust

Fachseminar „Mobile Computing“
Sommersemester 2001 ETH Zürich

Peter Matter
pmatter@student.ethz.ch

Einführung

Neue Entwicklungen schaffen Möglichkeiten für neue technische Konzepte. Durch grosse Fortschritte im Bereich der Miniaturisierung entstand, unter der Leitung von Professor Pister an der University of California in Berkeley, ein neues Konzept, das sie Smart Dust nannten. Der Name verrät bei diesem Projekt eigentlich schon worum es geht. Ziel ist es, kleinste Geräte zu entwickeln, die mit Sensoren bestückt werden können. Die Geräte sollen wie Staub in einem Gebiet verteilt werden, wo sie dann die gewünschten Informationen und Daten sammeln und weiter leiten sollen. Diese schlaunen Staubkörner sollen etwa eine Grösse von 1 mm^3 haben, möglichst lange autonom funktionieren können, in grossen Stückzahlen produzierbar und mit einem geeigneten Kommunikationsmittel ausgestattet sein.

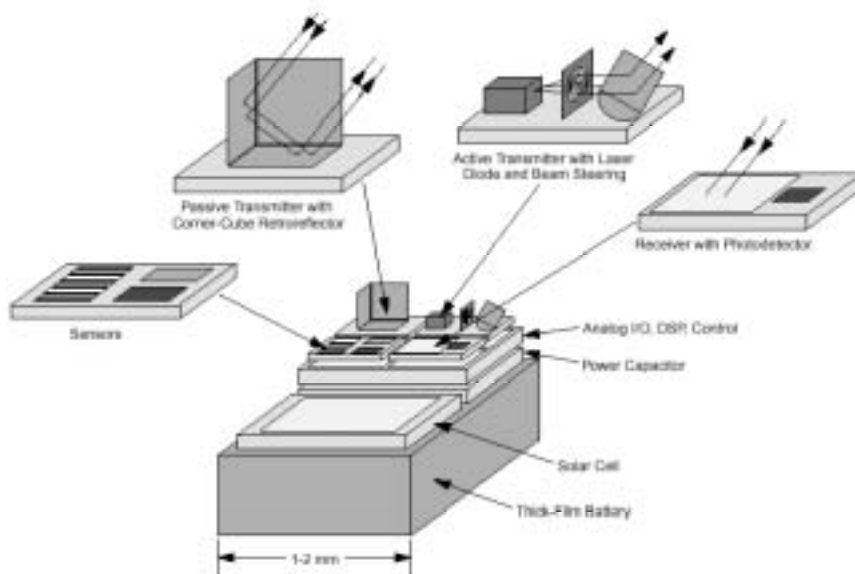


Bild1:Komponenten eines Smart Dust Kornes

Anwendungen

Für Smart Dust gibt es viele Anwendungsmöglichkeiten im zivilen sowohl als auch im militärischen Bereich:

- System für Waldbrandwarnungen
- Untersuchungen in der Biologie z.B. Bewegungen von Insekten und kleinen Tieren
- Im militärischen Bereich ist die Überwachung und die Spionage in feindlichen Gebieten möglich, ohne Risiko für die eigenen Truppen

Fähigkeiten

Um in den oben genannten Anwendungsszenarien bestehen zu können brauchen die Smart Dust Körner folgende grundlegende Fähigkeiten:

- **Energie:** Die Körner sollen unabhängig möglichst lange funktionieren und brauchen dazu eine Energiequelle wie eine Batterie oder Solarzellen. Der Energieverbrauch ist eine der wichtigsten Vorgaben beim Design des Smart Dust, da durch das angestrebte kleine Volumen nur sehr wenig Platz für Batterien und Solarzellen vorhanden ist. Beim heutigen Stand der Technik kann eine Batterie ca. 1 J pro mm^3 speichern, ein Kondensator der selben Masse nur noch gerade 10 mJ. Ähnlich ist die Situation bei den Solarzellen. Sie können im Tageslicht pro Tag und mm^2 ca. 1 Joule produzieren, bei künstlichem Licht sinkt dieser Wert auf 1 bis 10 mJ. Der tägliche Energiekonsum eines Smart Dust Kornes muss sich also in dieser Größenordnung befinden, wenn es über längere Zeit funktionstüchtig bleiben soll.
- **Rechenkapazität:** Smart Dust Körner müssen die Daten der Sensoren verarbeiten und weiterleiten können. Dieser Rechenaufwand ist relativ gering und stellt bei der Implementierung weiter kein Problem dar.
- **Sensoren:** Sie bilden die Schnittstelle zwischen den Smart Dust Körnern und ihrer Umwelt. Vorstellbar sind alle möglichen Sensoren wie Temperatur, Druck, Feuchtigkeit, Licht, Beschleunigung usw.
- **Kommunikation:** Die gemessenen Daten müssen natürlich auch jemandem mitgeteilt werden. Die Kommunikation ist sehr eng mit dem Energieverbrauch verknüpft, da sie die Tätigkeit ist, die am meisten davon konsumieren wird. Es ist also unerlässlich, eine Art der Kommunikation zu finden, die möglichst wenig Energie braucht. Die Entwickler des Projektes setzen aus diesen Gründen auf die optische Kommunikation. Dabei werden zwei Arten unterschieden, die passive und die aktive optische Kommunikation.

Optische Kommunikation:

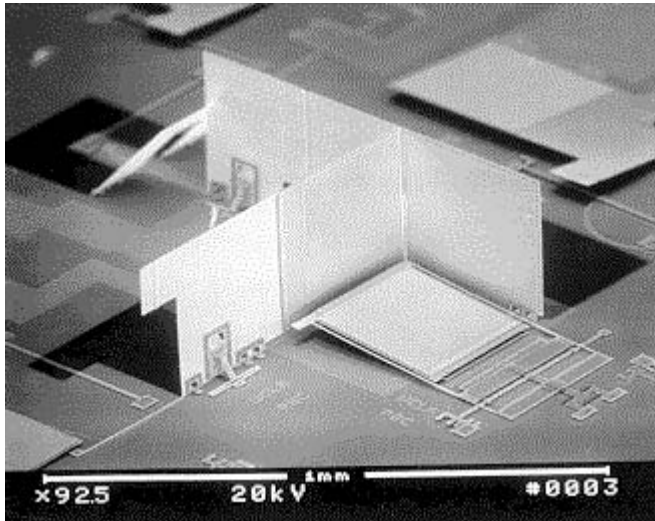
Passive optische Kommunikation

Das Grundprinzip der passiven optischen Kommunikation ist recht einfach und wurde bereits im 5. Jahrhundert v. Chr von den griechischen Seefahrern angewendet. Sie benutzten Spiegel um das Sonnenlicht zu reflektieren und dadurch mit einer Art Morse-Code Nachrichten unter den Schiffen auszutauschen.

Ähnlich funktioniert die passive optische Kommunikation, nur mit dem Unterschied, dass anstelle der Sonne eine künstliche Lichtquelle der Basisstation verwendet wird. Wichtig ist, dass die passive optische Kommunikation bei Smart Dust nur zwischen der Basisstation und den Dust Körnern erfolgen kann. Eine Kommunikation zwischen den Smart Dust Körnern ist nicht möglich. Für die Basisstation gelten besondere Bedingungen, d.h. es gibt für sie keine Beschränkungen bezüglich der Grösse oder des Energieverbrauchs.

Für den Datentransfer von der Basisstation zum Smart Dust Korn wird von der Basis ein Laserstrahl ausgesendet, der mit den Daten für das Dust Korn moduliert wurde. Das Smart Dust Korn kann diesen Lichtstrahl mit einem Sensor detektieren und so die Daten auswerten, die in ihm moduliert sind. Für den Transfer vom Smart Dust Korn zur Basisstation wird wieder ein Laserstrahl von der Basisstation ausgesendet, dieses Mal jedoch unmoduliert. Wenn der Strahl auf das Smart Dust Korn auftrifft, wird er dort in einem Spiegelsystem reflektiert und zugleich mit den Daten moduliert, die zur Basisstation übermittelt werden sollen. Um das Licht auf die Basisstation zurück zu reflektieren wird eine Spiegelanordnung gewählt, die englisch Corner Cube Retroreflector genannt wird. Ein solcher CCR besteht im Wesentlichen aus 3 senkrecht aufeinander angeordneten Spiegeln. Es kann geometrisch gezeigt werden, dass ein zufällig einfallender Strahl parallel zur einfallenden Achse zurückfällt. Dabei kann der Strahl je nach Ausrichtung an 1, 2 oder, was meistens der Fall ist, an allen 3 Spiegeln reflektiert werden. Um mit einer solchen Anordnung den einfallenden Lichtstrahl modulieren zu können, dürfen natürlich nicht alle 3 Spiegel fest montiert werden. Einer der 3 Spiegel sitzt auf einer

Feder, die den Spiegel so hält, dass er nicht senkrecht auf den beiden anderen Spiegeln steht. Ein einfallender Strahl wird also nicht zur Basisstation zurückgeleitet. Dies kann man als eine digitale 0 interpretieren. Auf der Grundplatte sowie auf der Unterseite des beweglichen Spiegels befinden sich 2 Elektroden. Setzt man diese unter Spannung, resultiert daraus eine Kraft, die den Spiegel nach unten zieht. Das System ist nun so ausgerichtet, dass in dieser Lage alle 3 Spiegel wieder senkrecht aufeinander stehen. Einfallendes Licht wird also wieder reflektiert und somit eine digitale 1 dargestellt. Das ganze System ist sehr klein, und somit auch die Masse des bewegten Spiegels. Dies erlaubt ein Wechseln der Zustände im Kilohertz Bereich. Der grosse Vorteil dieses Systems liegt im Stromverbrauch: Der Wechsel von einer digitalen 0 auf ein 1 kostet weniger als 1 Nanojoule, der Wechsel von 1 auf 0 ist sogar fast ganz gratis, weil der Spiegel ja von der Feder wieder in seine Ausgangsposition zurück getrieben wird. Die Hauptlast des Energieverbrauches wird somit auf die



Corner Cube Retroreflector

Basisstation abgeschoben, sie muss in beiden Fällen (Down /Up-Link) den Laserstrahl aussenden. Bei den meisten Smart Dust Szenarien, soll die Basisstation mit vielen Dust Körnern, also einem ganzen Smart Dust Feld, gleichzeitig kommunizieren. Da die Körner auf einem Gebiet verteilt sind, können sie von der Basisstation aus, so lange die einzelnen Körner genügend weit von einander entfernt sind, gut von einander unterschieden werden. Es handelt sich also um ein Space Division Multiple Access (SDMA). Nimmt die Basisstation die Umgebung mit einer Kamera auf, kann das Bild mit relativ geringem Aufwand gerastert werden, so dass sich in jedem Bildausschnitt nur noch ein Smart Dust Korn befindet, dessen Signal dann unabhängig von allen anderen Smart Dust Körnern analysiert werden kann. Um einen Datentransfer von einigen hundert Bit pro Sekunde zu ermöglichen, sollte die Kamera in der Lage sein, ca. 1000 Bilder pro Sekunde aufzunehmen. Diese Übertragungsrate kann auf einige Megabit pro Sekunde gesteigert werden, wenn man anstelle der Kamera einen integrierten CMOS Chip benützt, der speziell für diese Anwendung entwickelt wird („Smart Pixel“).

Aktive optische Kommunikation

Die passive optische Kommunikation hat zwei bedeutende Nachteile:

1. Datentransfer kann nur zwischen Basisstation und Smart Dust erfolgen und nicht zwischen den Smart Dust Körnern untereinander.
2. Dust Körner können nicht von sich aus kommunizieren, sondern müssen warten, bis dies von der Basisstation initiiert wird.

Diese Nachteile können mit der aktiven optischen Kommunikation behoben werden. Dazu muss jedes Dust Korn selber eine Laserdiode besitzen, die einen modulierten Strahl aussenden kann. Anders als bei der Basisstation kann der Laserstrahl nicht einfach gestreut werden um ein gewisses Gebiet zu beleuchten, das würde viel zu viel Energie benötigen, sondern muss gebündelt ausgesendet werden. Das bedeutet, dass der ausgehende Laserstrahl aktiv auf den Kommunikationspartner ausgerichtet werden muss. Dies geschieht mit Hilfe eines kleinen, beweglichen Spiegels, über den der Laserstrahl

gelenkt wird. Zwei kritische Punkte, die bei der aktiven optischen Kommunikation berücksichtigt werden müssen, ist einerseits der erhöhte Energieaufwand, der nötig ist weil der Laserstrahl auf dem Dust Korn selber erzeugt werden muss und andererseits die Ausrichtung des Laserstrahls die sich als sehr schwierig erweist, weil unter Umständen ein grosses Gebiet systematisch abgesucht werden muss, bis man auf einen Kommunikationspartner stösst.

Optische vs. HF Communication

Es stellt sich die berechnete Frage, warum man bei Smart Dust eine Technik zur Kommunikation verwendet, die noch so viel Entwicklungsaufwand benötigt wie dies bei der optischen Kommunikation der Fall ist. Warum benutzt man nicht einfach eine Übertragung mit Funkwellen, die gut erforscht ist, sofort auf dem Markt zur Verfügung steht und, der wichtigste Vorteil, keine Sichtverbindung zwischen den Kommunikationspartnern benötigt. Diesen Vorteilen stehen jedoch einige gewichtige Nachteile gegenüber:

- Energieverbrauch: Der Energieverbrauch ist mit einer auf HF Kommunikation basierenden Technik um einiges höher. Im Vergleich zur passiven optischen Kommunikation ist dies besonders deutlich, da die Smart Dust Körner selber kein Trägersignal aussenden müssen. Aber auch im Vergleich zur aktiven optischen Kommunikation schneidet die Funk Technik schlechter ab. Funksignale breiten sich in alle Richtungen aus, es wird also viel Energie an Orte verteilt, wo sie gar keine Nutzen bringt. Ein Laserstrahl hingegen kann relativ stark gebündelt werden, die Energie wird auf eine kleine Fläche konzentriert. Ausserdem sind Funkempfänger und Sender relativ komplexe Schaltungen im Vergleich zu denjenigen, die bei der optischen Kommunikation eingesetzt werden.
- Antenne: Die Länge der Antenne ist proportional zur Wellenlänge des Trägersignals. Wenn die Antenne die Kantenlänge von 1 mm eines typischen Smart Dust Kornes nicht überschreiten soll, ergibt sich daraus, eine Frequenz des Trägersignals von ca. 75 GHz, was mit heutiger HF Elektronik insbesondere im Low-Power Bereich nicht möglich ist.

$$L = \frac{\lambda}{4}, f = \frac{c}{\lambda} \Rightarrow f = 75\text{Ghz}$$

Smart Dust in der Praxis

Das Smart Dust Projekt befindet sich zur Zeit noch in der Entwicklungsphase, es gibt kein fertiges Produkt auf dem Markt, das den an Smart Dust gestellten Anforderungen genügt. Es gibt aber einige Projekte, die zumindest einen Teil der Anforderungen erfüllen können, z.B. Körner, die Daten erfassen und weiter geben können, aber noch um ca. den Faktor 50 bis 100 zu gross sind. Oder Experimente mit der optischen Kommunikation zeigen, dass es möglich ist auch bei Tageslicht mit einem modulierten Laserstrahl Daten auch über grössere Distanzen zu versenden (konkret im Experiment ~21 km). Auch zu erwähnen ist das Projekt COTS Dust. COTS steht für Commercial Of The Shell, wie der Name schon sagt wird dabei versucht, die Konzepte von Smart Dust mit Komponenten zu implementieren, die im Moment auf dem Markt zur Verfügung stehen. Das ermöglicht eine relativ kurze Entwicklungszeit, das Volumen der Geräte befindet sich dann jedoch im Kubikzentimeter und nicht im Kubikmillimeter Bereich. Die Geräte eignen sich jedoch hervorragend zur Überprüfung theoretischer Konzepte in der Praxis.

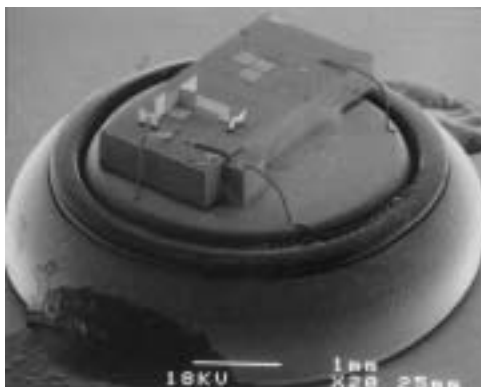


Bild3: Smart Dust Korn mit der Batterie eines Hörgerätes

Schlussfolgerung

Smart Dust ist im Moment noch in einem recht frühen Stadium und braucht noch einiges an Entwicklungsarbeit. Gelingt es aber das Konzept zur technischen Reife zu bringen, eröffnet es ungeahnte neue Möglichkeiten. Aber wie viele neue Techniken, bringt auch diese neben vielen Vorteilen neue Gefahren mit sich. Das Smart Dust Projekt wird von vielen Personen mit gemischten Gefühlen betrachtet. Einige fühlen sich durch Smart Dust bedroht, da er sich neben vielen anderen Anwendungen eben auch hervorragend zur Spionage eignet und fürchten den totalen Verlust der Privatsphäre. Die Zukunft wird zeigen ob sich Smart Dust verwirklichen lässt und wie es eingesetzt wird.

Quellen:

B. Warneke, M. Last, B. Leibowitz, K.S.J. Pister, "Smart Dust: Communicating with a Cubic-Millimeter Computer", *Computer Magazine*, Jan. 2001. IEEE, Piscataway, NJ. pp. 44-51.
<http://ieeexplore.ieee.org/iel5/2/19363/00895117.pdf>

J. M. Kahn, R. H. Katz and K. S. J. Pister, "Mobile Networking for Smart Dust", *ACM/IEEE Intl. Conf. on Mobile Computing and Networking (MobiCom 99)*, Seattle, WA, August 17-19, 1999.
http://robotics.eecs.berkeley.edu/~pister/publications/1999/mobicom_99.pdf

Seth Hollar, "COTS Dust: Large Scale Models for Smart Dust"
http://www-bsac.eecs.berkeley.edu/~shollar/macro_motes/macromotes.html.

B. Warneke, B. Atwood, K.S.J. Pister, "Smart Dust Mote Forerunners," *Proceedings of the Fourteenth Annual International Conference on Microelectromechanical Systems (MEMS 2001)*, Interlaken, Switzerland, January 21-25, 2001, pp. 357-360.
http://bsac.eecs.berkeley.edu/~warneke/pubs/MEMS2001_paper.pdf

Hompages der verschiedenen Projektmitarbeiter:
<http://robotics.eecs.berkeley.edu/~pister/SmartDust/>
<http://bsac.eecs.berkeley.edu/~warneke/SmartDust/>