

Smart Dust

SEMINARARBEIT

vorgelegt am
Lehrstuhl für Praktische Informatik IV
Prof. Dr. W. Effelsberg
Universität Mannheim

im
April 2002

von

Thorsten Stetter
aus Mannheim

Inhaltsverzeichnis

ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	II
TABELLENVERZEICHNIS	III
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....	IV
1. EINLEITUNG.....	1
1.1. EINFÜHRUNG	1
1.2. ZIELSETZUNG UND GANG DER UNTERSUCHUNG	2
2. ARCHITEKTUR EINES DUST MOTES	3
2.1. ANFORDERUNGEN	3
2.2. KONZEPTION.....	4
2.2.1. <i>Energieversorgung</i>	4
2.2.2. <i>Prozessor</i>	5
2.2.3. <i>Sensoren</i>	6
2.2.4. <i>Kommunikationseinheit</i>	7
3. KOMMUNIKATION.....	10
3.1. FUNKÜBERTRAGUNG	10
3.2. OPTISCHE ÜBERTRAGUNG	10
3.3. KOMMUNIKATIONSKOMPONENTEN.....	12
3.3.1. <i>Dust Mote</i>	12
3.3.2. <i>Basisstation</i>	13
3.4. KOMMUNIKATIONSDESIGN	15
4. ANWENDUNGEN.....	17
4.1. ANWENDUNGSGEBIETE.....	17
4.2. PROTOTYPEN	18
5. ZUSAMMENFASSUNG.....	20
LITERATURVERZEICHNIS	22

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung des Konzept eines Smart Dust Motes	3
Abbildung 2: Corner Cube Retroreflector	8
Abbildung 3: Schematische Darstellung der Funktionsweise eines Integrierten Image Receivers.....	13
Abbildung 4: Schematische Darstellung des Aufbaus eines Smart Pixel Imaging Arrays.....	15
Abbildung 5: Schematische Darstellung der Kommunikation zwischen einem Base- Station Transceiver und eines Dust Motes	16
Abbildung 6: Unidirektionaler 138mm ³ Dust Mote Prototyp.....	19
Abbildung 7: Bidirektionaler 63mm ³ Dust Mote Prototyp.....	19

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Anvisierter Energieverbrauch einzelner Bauteile5

Abkürzungsverzeichnis

ASIC	Application Specific Integrated Circuit
BTS	Base-Station Transceiver
CCR	Corner Cube Retroreflector
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency
J	Joule
LED	Light Emitting Diode
MEMS	Microelectro-mechanical Systems
mm	Millimeter
mJ	Millijoule
μqm	Quadratmikrometer
nJ	Nanojoule
pJ	Picojoule
PDA	Personal Digital Assistent
SDMA	Space Division Multiple Access
W	Watt = 1 J/s

1. Einleitung

1.1. Einführung

Die verstärkt auftretende Allgegenwärtigkeit der Informationsverarbeitung mit ihren immer kleiner werdenden Rechnern führt dazu, dass Rechner als solche in Zukunft nicht mehr wahrgenommen werden. Für diese Entwicklung führte Marc Weiser den Begriff „Ubiquitous Computing“ ein [1].

Ermöglicht wurde diese Entwicklung der letzten Jahre, die sicherlich in Zukunft verstärkt weitergehen wird, durch eine erhöhte Leistungsfähigkeit und einer direkt damit einhergehenden Verkleinerung von mikroelektronischen Bauteilen, wie z.B. Prozessor und Speicher. Fortschritte in der Materialwissenschaft, insbesondere im Bereich Mikroelektro-mechanischer Systeme (MEMS), die wesentlich kleinere mechanische Bauteile (z.B. Spiegel, Sensoren) ermöglichen, führen ebenso zu der von Marc Weiser beschriebenen Allgegenwärtigkeit der Informationsverarbeitung. Neben der Miniaturisierung ist es weiterhin notwendig, dass diese „Kleinst-Computer“ möglichst unauffällig miteinander kommunizieren. Erhebliche Weiterentwicklungen in der Kommunikationstechnik, vorzugsweise auf dem Gebiet drahtloser Kommunikation, bereiten den Weg für eine Verschmelzung von Rechnern mit ihrer Umgebung.

In diesem Kontext ist auch das Thema dieser Arbeit einzuordnen. „Smart Dust“ zu deutsch „Intelligenter Staub“ ist der Name eines Forschungsprojektes am Department of Electrical Engineering and Computer Sciences an der University of California, Berkeley (USA). Im Rahmen des Projektes soll erforscht werden, inwieweit es möglich ist einen Sensorknoten auf die Größe von einem Kubikmillimeter, vergleichbar der Größe eines Sandkorns, zu verkleinern. Der Sensorknoten, auch Mote (dt. Splitter) bzw. Dust Mote (dt. Staubsplitter) genannt, soll ein autonomes Sensor-, Rechner- und Kommunikationssystem beinhalten. Der Dust Mote soll die Grundlage für massiv verteilte Sensor-Netzwerke bilden [3], bestehend aus hunderten bis tausenden Dust Motes und nur wenigen Basisstationen. Somit verfolgt das Smart-Dust Projekt ähnliche Ziele wie Ubiquitous Computing, nämlich: Miniaturisierung, autonome Minirechner Systeme und massiv verteilte Netzwerke.

1.2. Zielsetzung und Gang der Untersuchung

Ziel dieser Arbeit ist es, einen umfassenden Einblick in das Projekt „Smart Dust“ zu geben. Im zweiten Kapitel wird dazu zunächst auf die Konzeption und insbesondere die Architektur von Smart Dust eingegangen. Im Weiteren werden dann die einzelnen Bausteine eines Dust Motes im Detail beschrieben.

Um die von den Dust Motes ermittelten Daten auch an die Umwelt weiterzugeben, müssen diese kommunizieren. Die Kommunikation von Dust Motes, einerseits untereinander, andererseits mit einer Basisstation, wird im dritten Kapitel behandelt. Neben einer Analyse der gewählten Übertragungsmethode wird der Aufbau der Basisstation detailliert erläutert. Abschließend wird die Konzeption einer Basisstation vorgestellt.

Um die Betrachtung abzuschließen ist es schließlich nötig, mögliche Einsatzgebiete dieser Technologie aufzuzeigen sowie die Konzeption kritisch zu würdigen.

2. Architektur eines Dust Motes

2.1. Anforderungen

Um das Ziel des Projektes „Smart Dust“ zu erreichen, mit herkömmlicher, d.h. nicht zukünftiger, Technologie einen autonomen Sensor-, Rechner- und Kommunikationsknoten zu entwickeln, sind evolutionäre und revolutionäre Schritte in verschiedensten Gebieten unterschiedlicher Fachbereiche notwendig [4].

Im Fachgebiet Mikroelektro-mechanischer Systeme (MEMS) sind miniaturisierte Sensoren, optische Kommunikationskomponenten und Stromversorgungen zu entwickeln. Zudem muss durch die Mikroelektronik eine ansteigende Funktionalität mit geringerem Platzverbrauch und einem geminderten Energieverbrauch angeboten werden. Aber auch neue Technologien im Energiemanagement müssen erforscht werden, um zum einen den Dust Mote besonders kompakt zu halten und zum anderen diesem eine lange Lebensdauer zu ermöglichen.

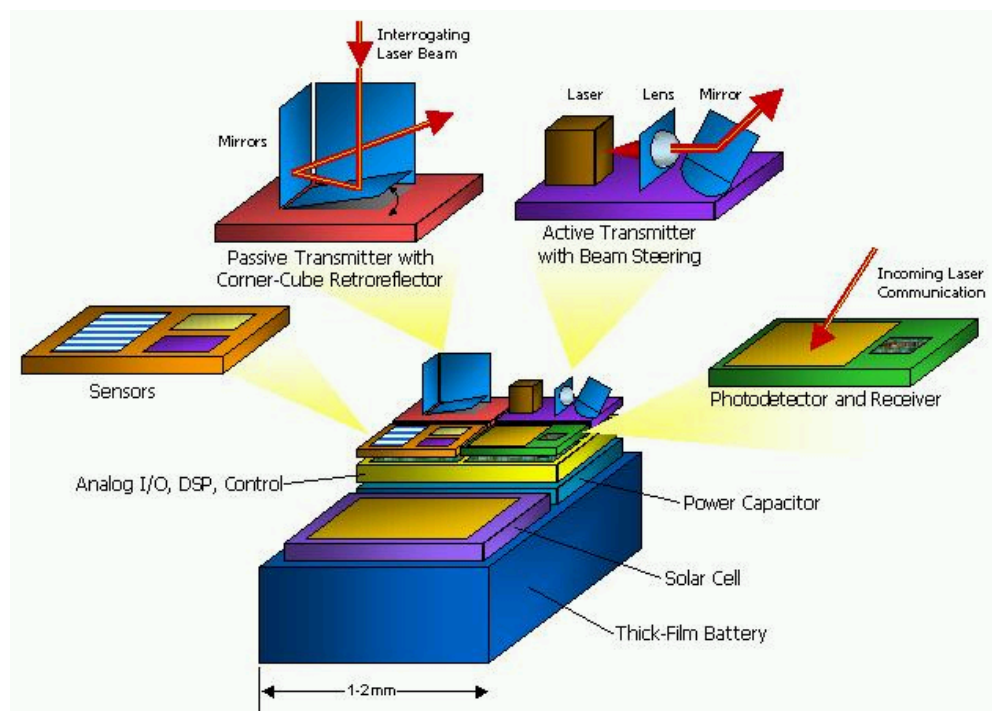


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Konzepts eines Smart Dust Motes

Quelle: [6].

2.2. Konzeption

Die Zielvorgabe macht deutlich, welche Bausteine ein solcher autonomer Sensor-, Rechner- und Kommunikationsknoten umfassen muss. Als erstes ist hierbei eine eigenständige Energieversorgung zu nennen, damit der Dust Mote autonom arbeiten kann. Zur Ermittlung von Umgebungsdaten ist weiterhin ein Sensor nötig. Für die Verarbeitung der vom Sensor gewonnenen Daten muss ein Prozessor vorhanden sein [5]. Schließlich benötigt der Dust Mote Komponenten, um mit seiner Umgebung zu kommunizieren. Nachdem nun die Eckpunkte eines Dust Mote Designs aus der Zielvorgabe entwickelt wurden, wird im Folgenden auf die einzelnen Komponenten näher eingegangen. Bei der Beschreibung der einzelnen Bausteine wird der Einteilung in die vier Subsysteme gefolgt [3]: Stromversorgung, Sensoren und analoge Signalaufbereitung, Sende- und Empfangsgerät und Prozessor (sog. Core).

2.2.1. Energieversorgung

Zur autonomen Stromversorgung eines Dust Motes wird eine eigenständige Energieversorgung benötigt. Dieser, wie in der Abbildung 1 zu sehen, größte Bauteil-Komplex umfasst folgende Einzelkomponenten: Solarzelle, Kondensator und eine Thick-Film Batterie [6]. Die Spannungsversorgung wird zum einen von einer Thick-Film Batterie¹ (dt. Dickschicht Batterie) und zum anderen von einer Solarzelle übernommen, womit auch eine erneuerbare Energiequelle zur Verfügung steht. Der Kondensator dient ebenfalls zur Stromspeicherung und gibt bei kurzzeitigen Ladungsspitzen seine Energie ab.

Mit heutiger Technologie haben Batterien ungefähr eine Ladekapazität von 1 J/mm^3 , moderne Kondensatoren erreichen mehr als 10 mJ/mm^3 [3]. Dagegen können Solarzellen 1 J/Tag/mm^2 im Sonnenlicht und $1\text{-}10 \text{ mJ/Tag/mm}^2$ bei Kunstlicht produzie

¹ Batterie, die in Dickschichttechnik produziert wird. Dickschichttechnik ist eine Technologie zur Herstellung integrierter Schaltkreise. Bei der Dickfilm-Herstellung werden im sog. Foto-Siebdruck mit Hilfe von Schablonen mehrere Schichten aus speziellen Pasten auf ein Keramiksubstrat aufgebracht. Die verschiedenen passiven Bauelemente (Leiterbahnen, Widerstände und Kondensatoren) realisiert man mit Pasten unterschiedlicher Eigenschaften (leitfähig, isolierend oder widerstandsbehaftet) in mehreren Schichten (Filmen), die entsprechend strukturiert sind. Quelle: (<http://www.hirzel.org/book/d.htm#3641>).

ren. Durch diese Daten wird deutlich, dass der Energieverbrauch aller Bauteile wesentlich reduziert werden muss [6].

Tabelle 1: Anvisierter Energieverbrauch einzelner Bauteile

	Energieverbrauch
Optischer Empfänger	0.1 nJ/bit
Sender	1 nJ/bit
Berechnungen	weniger als 1pJ/Anweisung
Analog-Digital Konverter	1 nJ/Sample

Quelle: [5,6].

Die Erwartungen über den Stromverbrauch in Tabelle 1 zeigen auf, dass für jede Sensorübertragung bzw. jedes A-D-Sample ungefähr tausend 8-Bit Operationen ausgeführt werden können. Es ist also vorteilhafter zusätzliche Berechnungen auszuführen, um weniger Samples zu erhalten oder um weniger Daten zu übertragen [5]. Angenommen es steht ein Millijoule pro Tag aus der Innenraumbelichtung zur Verfügung, dann kann jede Sekunde eine Sensorabfrage stattfinden, das Resultat begutachtet werden und zudem können noch einige Daten übertragen werden [5].

Die größte Einschränkung beim Smart Dust Design ist die hinsichtlich des minimalen Energieverbrauchs, der notwendig ist, um die Schaltkreise und die MEMS Geräte anzutreiben. Das Projekt Smart Dust befasst sich jedoch nur am Rande mit neuen Technologien der Energieversorgung, d.h. es werden Standard-Batterien und Solarzellen verwendet. Neuere Ansatzpunkte im Rahmen des Smart Dust Projektes sind hingegen die energieverbrauchenden Bauteile sowie das Energiemanagement.

2.2.2. *Prozessor*

Der Prozessor hat neben der Sensorsignalverarbeitung noch die Aufgaben, die Kommunikation abzuwickeln bzw. zu steuern, die Datenspeicherung durchzuführen, sowie die gesamte Kontrolle des Dust Motes und das Energiemanagement abzuwickeln. Die Prozessoren müssen auch „Remote“ programmierbar sein, d.h. ohne dass eine direkte Verbindung besteht. Somit können die Dust Motes auch nachdem sie verteilt wurden, einfach neuprogrammiert werden [3,5]. Für diesen Zweck enthalten

die Prozessoren eine On-Chip-Fotodiode, die die Stromspannungen eines ankommenden Laserstrahls in einen Datenstrom umwandelt, um das Mote abzufragen oder zu rekonfigurieren.

Der traditionelle Ansatz in der Prozessorarchitektur ist es, die Ausführungszeit von Befehlen zu minimieren, und somit schnellere Rechner zu konstruieren. Im Gegensatz dazu steht das Rechnen in einem autonomen Kubikmillimeter großen Sensor-knoten. Der Fokus liegt hier auf einer Reduktion des Energieverbrauchs für eine bestimmte Aufgabe. Die Performance eines Dust Motes wird nicht in Befehlen pro Sekunde, sondern hinsichtlich des Verbrauchs von Joules, also Energie, gemessen [7].

Im Smart Dust Projekt sind die Prozessoren in CMOS-Technologie gefertigt. Für das Prozessoren-Design wird ASIC (Application Specific Integrated Circuit) verwendet [3]. Durch die Nutzung fortschrittlicher Mikrofabrikationstechnologien bei der Herstellung und dem Arbeiten mit niedrigen Geschwindigkeiten (Taktraten), kann die Versorgungsspannung des Prozessors auf das Minimumniveau, bei dem das Gerät noch arbeitet, gesenkt werden [5]. Die Reduzierung der Stromspannung führt zu einer Energiereduzierung.

2.2.3. Sensoren

Der Sensor-Technologie galt zunächst das Hauptinteresse der DARPA² in ihrem Forschungsprogramm. Nachdem die Fähigkeiten von Sensoren erheblich durch MEMS-Technologie erweitert wurden, verlagerte sich das Gewicht auf die Entwicklung von ganzen Sensor-Systemen, wie auch im Smart Dust Projekt [8]. Aus diesem Grunde ist die Entwicklung neuartiger Sensoren, wie auch die Entwicklung von Batterien heute kein eigenständiges Ziel des Smart Dust Projektes mehr. Es wird auf bereits entwickelte Sensoren aufgebaut. Die verwendeten Bauteile sind demnach Standardbauteile, deren Änderungen nur den Stromverbrauch betreffen. Zum Einsatz in den Dust Motes sind Sensoren für folgende Merkmale vorgesehen: Temperatur, Druck,

² Das Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) ist die zentrale Forschungseinrichtung des Verteidigungsministeriums der USA und Hauptfinanzier des Smart Dust Projekts.

Feuchtigkeit, Vibration, Geräusche (benötigt einige Kubikmillimeter), Magnetismus und Licht [6, 8].

2.2.4. *Kommunikationseinheit*

Die von den Sensoren gewonnen Informationen müssen zur Weiterverarbeitung an die Umwelt übertragen werden, d.h. die Dust Motes müssen mit einer Basisstation kommunizieren. Zur Kommunikation dienen insgesamt drei Bausteine: ein Empfänger, in Gestalt einer Fotodiode und zwei Sendereinheiten, ein aktiver Sender (Active Steering Laser) und eine passive Sendereinheit (Corner Cube Retroreflector), die ein ankommendes Trägersignal moduliert zurücksendet. Auf die Kommunikationseinheit (Basisstation) und die Wahl des Verfahrens zur drahtlosen Übertragung wird in Abschnitt drei genauer eingegangen.

2.2.4.1. Corner Cube Retroreflector (CCR)

Der Corner Cube Retroreflector wird für die optische Übertragung im freien Raum verwendet, d.h. ohne eine Verwendung von z.B. Glasfaserkabeln. Der Corner Cube Retroreflector (siehe Abbildung 2) ist ein in MEMS-Technologie gefertigtes Bauteil, welches aus drei orthogonalen 250 μm großen Mikrospiegeln besteht [11], zwei davon sind unbeweglich. Der dritte Spiegel, der an einer Feder in einem leicht schiefen Winkel zur senkrechten Position zu den anderen Spiegeln befestigt ist, kann durch Anlegen einer Spannung bewegt werden. In der schiefen Position, da das einfallende Licht vom CCR nicht genau auf dem Eintrittspfad zurückgeworfen wird, wird nur wenig Licht zur Quelle zurückgeworfen – und erzeugt eine digitale Null.³ Wenn ein Strom zwischen Spiegel und einer Elektrode angelegt wird, wechselt der Spiegel in eine senkrechte Position zu den anderen Spiegeln, somit wird das einfallende Licht zur Quelle zurückgeworfen – es entsteht eine digitale Eins. Die geringe Masse des Spiegels erlaubt es den Spiegel zwischen den beiden Zuständen bis zu tausendmal in der Sekunde wechseln zu lassen, unter Aufwendung von weniger als

³ Diese Vorgehensweise ähnelt der eines Heliografen, bei dem Sonnenlicht zurückgeworfen wird um per Morsecode Nachrichten an andere Schiffe weiterzugeben. Diese Idee wurde bereits im fünften Jahrhundert v.Chr. von den Griechen genutzt [5].

einem Nanojoule pro $0 \rightarrow 1$ Übergang. Der $1 \rightarrow 0$ Übergang ist praktisch energiefrei, da nur die auf der Elektrode gespeicherte Ladung entladen werden muss, welches fast keine Energie benötigt. Der Energieverbrauch wird bei ca. 670 pJ/bit liegen, dahingegen benötigt die Kommunikation bei z.B. Bluetooth 100 nJ/bit [6]. In Versuchen wurde gezeigt, dass ein durch eine externe Lichtquelle beleuchteter CCR ein modulierte Signal im Kilobit/s Bereich erzeugen kann [10, 11, 12]. Da der Mote selbst kein Licht emittiert, ist der Stromverbrauch dabei sehr gering.

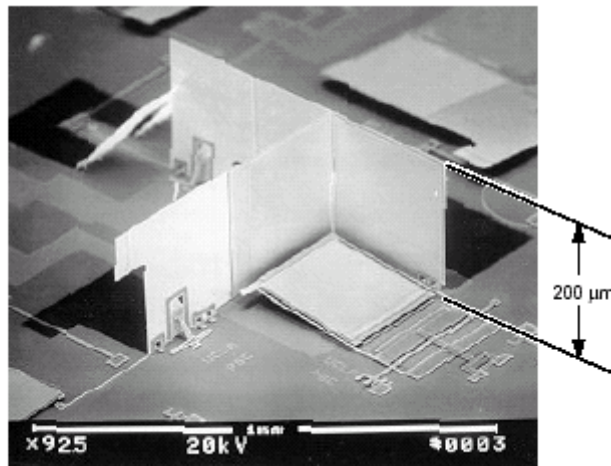


Abbildung 2: Corner Cube Retroreflector

Quelle: [9].

Hervorzuheben ist aber, dass um Daten auszutauschen, eine ununterbrochene direkte Sichtverbindung benötigt wird. Zudem ist eine solche Verbindung von Natur aus direktional. Ein CCR kann nur Daten zur Basisstation senden, wenn er in einer korrekten Ausrichtung zur Basisstation ist, dieser Bereich beträgt ungefähr 80 Grad. Jedoch kann durch mehrere CCRs auf einem Dust Mote dieser Bereich wesentlich erhöht werden [4, 11, 12].

2.2.4.2. Aktiv gesteuerter Laser (Active Steering Laser)

Für eine Kommunikation zwischen den Motes, z.B. zur Bildung von ad hoc multi-hop-Netzwerken [9], ist ein passives Kommunikationssystem wie der CCR nicht geeignet [5]. Es wird somit noch ein zweites aktives Kommunikationssystem benötigt, welches eine eigene (Laser-)Lichtquelle besitzt. Im Konzept eines Dust Motes ist

dafür ein aktiv gesteuertes Lasersystem vorgesehen. Neben der Kommunikation zwischen den Motes kann das Lasersystem auch dazu genutzt werden eine Übertragung selbständig zu starten oder Daten schnell über besonders weite Distanzen zu übertragen. Die Übertragung über große Distanzen ist mit einem aktiv gesteuerten Lasersystem möglich, da der eigene Laserstrahl eine besonders hohe Energiedichte und geringe Divergenz hat. Das aktiv gesteuerte Lasersystem besteht aus einer Halbleiter Laserdiode gepaart mit einer richtenden Linse und einer MEMS strahlsteuernden Optik. Ein Testsystem integriert alle optischen Komponenten auf 8 mm^3 . Den hier bisher genannten Vorteilen steht aber der Nachteil eines hohen Stromverbrauchs (ca. 1 Milliwatt) entgegen [5]. Aus diesem Grunde sollte der Einsatz des aktiv gesteuerten Lasersystems auf ein Minimum reduziert werden.

2.2.4.3. Optischer Empfänger beim Dust Mote

Der Dust Mote soll aber nicht nur Daten senden, sondern – wie oben schon erwähnt – auch empfangen. Benötigt wird diese Empfangseinheit zum einen für Kommandos von außen, um z.B. eine Übertragung zu starten, zum zweiten um einen Dust Mote remote neu zu programmieren [5] und zum dritten, damit auch Netzwerke zwischen Dust Motes aufgebaut werden können. Da hier eine optische Übertragung verwendet wird, genügt dazu eine Fotodiode als Empfänger. Das pulsierende Lasersignal (einer Basisstation oder eines anderen Dust Motes) wird von einer integrierten $0,04 \text{ mm}^2$ Fotodiode mit einer Empfindlichkeit von ca. $0,5 \text{ A/W}$ empfangen. Das ankommende Signal wird dann durch einen sogenannten „Smart Pixel“ verstärkt, der auch im Empfänger der Basisstation verwendet wird. Die Fotodiode ist auf der Platine des Halbleiterprozessors integriert [7].

3. Kommunikation

3.1. Funkübertragung

Während die Techniken für Sensoren und Rechner, die bei sehr geringem Energieverbrauch arbeiten, mittlerweile gut verstanden werden, ist die Kommunikation bei geringem Energieverbrauch bislang kaum erforscht [4]. Als heute gebräuchlichste Form der drahtlosen Kommunikation ist die Funkübertragung erste Wahl. Die Kommunikation über Funk ist zwar sehr gut erforscht, die Sender bzw. Empfänger müssen jedoch über relativ komplexe Schaltkreise verfügen, die es schwierig machen, den Energieverbrauch auf das benötigte Mikrowatt-Niveau zu reduzieren. Modulations-, Bandpass-Filter-, Demodulations- sowie weitere Schaltkreise sind erforderlich, wenn Übertragungen von einer großen Zahl von Dust Motes gemultiplexed erfolgen sollen [4]. Auch die zweite wichtige Ressource eines Dust Motes, der Platzverbrauch, schränkt den Einsatz der Funkübertragung ein. Die Antennengrößen für die Kurzwellenübertragung bewegen sich im Zentimeterbereich und sind damit für ein Millimeterobjekt wesentlich zu groß. Zur Zeit haben die kleinsten Sender/Empfänger noch eine Größenordnung von einigen wenigen hundert Kubikmillimetern. Es wird aber aktiv an Kubikmillimeter-Radios geforscht [5]. Die Funkübertragung ist somit nicht ideal für die Bedürfnisse des Smart Dust Projekts [15].

3.2. Optische Übertragung

Eine attraktive Alternative zur Funkübertragung stellt die optische Übertragung im freien Raum dar. Studien haben gezeigt dass, wenn eine direkte Sichtverbindung vorhanden ist, gut aufgebaute optische Verbindungen im freien Raum erheblich weniger Energie pro übertragenem Bit erfordern als herkömmliche Funkverbindungen [14, 15]. Ein Grund für den niedrigen Energieverbrauch optischer Verbindungen ist darin zu sehen, dass optische Transceiver (Sender und Empfänger) nur einfache analoge und digitale Schaltkreise benötigen; Modulatoren, aktive Bandpassfilter oder Demodulatoren werden nicht benötigt. Die kurze Wellenlänge ($1\mu\text{m}$) macht es möglich für ein millimetergroßes Gerät einen begrenzten Laserstrahl auszusenden, z.B.

ein Laserpointer [14]. Die Entfernung zwischen Sender und Empfänger kann dabei von wenigen Metern bis hin zu vielen Kilometern betragen. Um eine ähnliche Beugung für ein 1GHz Radio zu erreichen, würde eine Antenne mit 100 Meter Durchmesser benötigt. Aus der kurzen Wellenlänge resultiert in der weiteren Konsequenz, dass ein Base-Station Transceiver (BTS) ausgerüstet mit einem kompakten Bildempfänger die simultanen Übertragungen einer großen Anzahl von Dust Motes an verschiedenen Orten im Blickfeld des Empfängers dekodieren kann. Dies ist eine Form des Space-Division Multiplexing (SDMA) auf die später genauer eingegangen wird [4].

Als weiteren Vorteil der optischen Übertragung im freien Raum sind die speziellen MEMS Strukturen zu nennen. Sie ermöglichen es auch eine passive Kommunikation vorzunehmen, d.h. ein optisches Signal zu modulieren ohne eigene optische Quelle. Diese Struktur ist der Corner Cube Retroreflektor (CCR), der schon in Abschnitt 2.2.4.1 erläutert wurde [4]. Der Empfänger (Halbleiter-Fotodiode) ist zudem sehr klein und die korrespondierende Übertragung und Dekodierung für On/Off Keying passt zu einer Niedrigenergie-Kommunikation besser als die meisten Funkübertragungsschemata.

Die optische Kommunikation hat trotz dieser Vorteile zwei gravierende Nachteile: einerseits ist eine direkte Sichtverbindung zwingend und andererseits wird für kurze Distanzen eine genaue Ausrichtung des Laserstrahls auf den Empfänger benötigt. Das Problem einer genauen Ausrichtung kann aber durch heutige MEMS-Technologie und gute Algorithmen gelöst werden. Hingegen kann ein optischer Sender, wenn er z.B. von einem Blatt verdeckt ist oder in einer Tasche steckt, keine Daten übertragen [4]. Der Dust Mote ist dann von seiner Außenwelt abgeschnitten.

3.3. Kommunikationskomponenten

3.3.1. *Dust Mote*

Wie schon weiter oben mehrfach erwähnt, stehen dem Dust Mote zwei Ansätze für eine optische Kommunikation zur Verfügung: ein passiv reflektierendes System (Corner Cube Retroreflector) und ein aktiv gesteuertes Lasersystem [5].

Das passive Kommunikationssystem (CCR) hat den sehr bedeutenden Vorteil eines sehr geringen Energieverbrauchs auf Seiten des Dust Motes. Die passive Kommunikation impliziert aber auch einige Nachteile. Aufgrund der Unfähigkeit untereinander kommunizieren zu können, müssen die Motes über eine zentrale Station (BTS), die mit einer Lichtquelle ausgestattet ist, kommunizieren. Eine Kommunikation zwischen Motes ist nur indirekt über die Basisstation möglich. Wenn ein Mote keine direkte Sichtverbindung zur BTS hat, dann ist er vom Netzwerk isoliert. Ein CCR reflektiert zudem nur einen geringen Bruchteil des Lichts, der von der BTS emittiert wurde, dadurch kann die Reichweite des Systems nicht einfach über 1 Kilometer erweitert werden [5]. Um diese Beschränkungen zu umgehen, müssen die Dust Motes aktiv kommunizieren können und benötigen somit ihre eigene onboard Lichtquelle.

Ein aktiv gesteuertes Laser-Kommunikationssystem gibt den Dust Motes die Möglichkeit mit einem gerichteten Laserstrahl aktiv zu einem Empfänger zu senden. Die aktive Laserkommunikation hat weiterhin durch die eigene Laserquelle den Vorteil einer hohen Energiedichte. Dieser vom Smart Dust Mote emittierte Strahl hat zudem nur eine Streuung von ungefähr 1 Milli-Radian, dies erlaubt Übertragungen über enorme Distanzen unter Verwendung von wenigen Milliwatt Energie. Die Verwendung eines aktiven Laserstrahls gestattet zusätzlich die Übertragung von Daten im Burst-Mode. In diesem Modus kann der Mote bis zu einigen dutzend Megabits pro Sekunde übertragen. Dieser Modus kann aber nur für kurze Zeit aufgrund des extrem hohen Stromverbrauchs genutzt werden.

3.3.2. Basisstation

Viele Smart Dust Anwendungen stützen sich auf eine optische Kommunikation von einem ganzen Feld von Dust Motes zu einer oder mehreren Basisstationen. Die Basisstationen müssen deshalb imstande sein, mehrere simultane optische Übertragungen von verschiedenen Quellen empfangen zu können. Weiterhin muss die Kommunikation auch in freier Natur bei Sonnenlicht (1 Kilowatt/m^2) möglich sein, obwohl Dust Motes ihre Informationen nur mit wenigen Milliwatt Energie übertragen. Durch die Verwendung von niederfrequenten optischen Filtern kann man das Sonnenlicht eliminieren [5]. Eine Übertragung ist dann auch bei starkem Sonnenlicht möglich, obwohl das Umgebungslicht trotzdem meist wesentlich stärker bleibt, als das empfangene Lichtsignal.

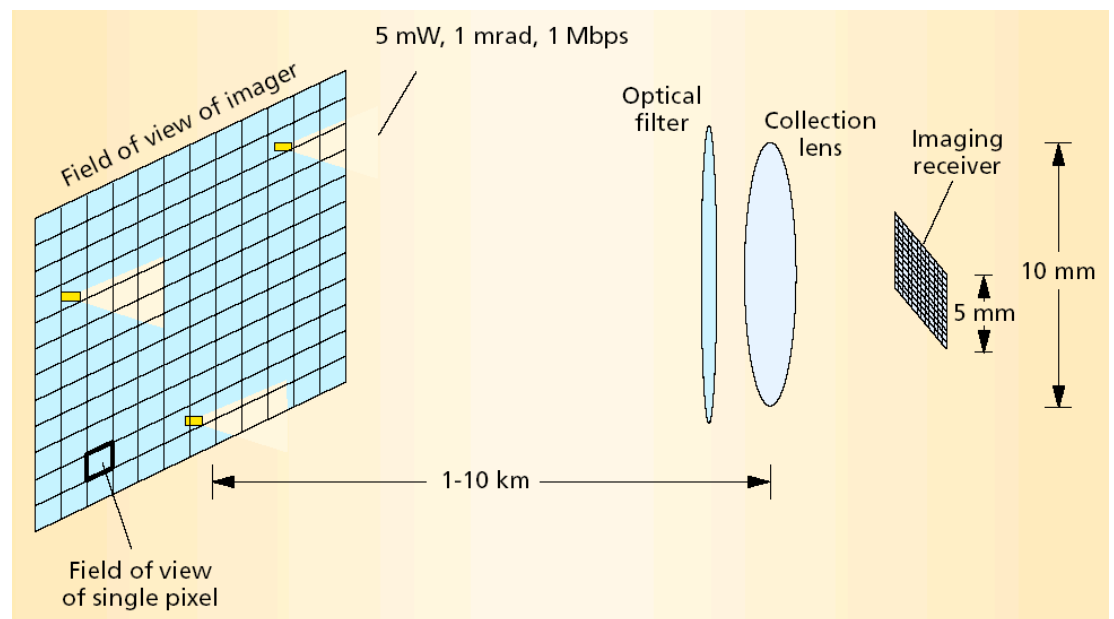


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Funktionsweise eines Integrierten Image Receivers

Quelle: [5].

Die Basisstation besteht dabei grundsätzlich aus folgenden Komponenten: einem aktiven Laser, einem integrierten Bildempfänger (Integrated Imaging Receiver) und einer Verarbeitungseinheit [13]. Die Abbildung 3 zeigt die schematische Funktionsweise des integrierten Bildempfängers.

Für eine erfolgreiche Dekodierung der simultanen Übertragungen zur Basisstation ist es erforderlich, dass Dust Motes nicht die direkte Sichtverbindung eines anderen Dust Motes blocken. Eine solche Blockade ist aber wegen der geringen Größe der Motes unwahrscheinlich. Als weitere Voraussetzung zum Dekodieren von simultanen Übertragungen ist das Erscheinen der Signale verschiedener Dust Motes auf unterschiedlichen Pixeln des Bildempfängers nötig. Der Bildempfänger ist selber grundsätzlich ein CMOS Bildsensor, wie er auch z.B. in Videokameras verwendet wird. Er besteht aus hunderten einzelner Photosensoren (Pixeln). Zwei Dust Motes, die von dem gleichen Pixel erfasst werden, können nicht dekodiert werden. Um eine Vorstellung über die benötigte Auflösung des Empfängers zu bekommen, betrachte man das folgende Beispiel. Angenommen das BTS sieht einen 17 m x 17 m großen Bereich und es wird ein Bildsensor mit einem 256x256 Pixel Imaging Array benutzt. Jeder Pixel beobachtet dann ein Fläche von ungefähr 6,6 cm². Infolgedessen können simultane Übertragungen von Smart Dusts so lange dekodiert werden, wie diese mindestens 6,6 cm voneinander entfernt sind [4]. Weil der Bildempfänger ein Pixelarray (Bildsensor) benutzt, um die Übertragungen von Motes an verschiedenen Orten zu separieren, wird diese Technik Space-Division Multiplexing (SDMA) genannt. Die Fähigkeit eines CMOS Bildsensors die verschiedenen Verbindungen aufzulösen, ist eine Konsequenz der kurzen Wellenlänge der verwendeten Lichtquelle. Somit wird für die simultane Übertragung der Daten von mehreren Motes zur Basisstation auch keine Koordination zwischen den Motes benötigt. Dies vereinfacht das Kommunikationsdesign erheblich.

Trifft der Lichtstrahl eines Dust Motes auf eine Fotozelle des Bildempfängers, wandelt diese den Impuls in elektrischen Strom um. Das Signal wird analog verstärkt und gefiltert. Eine Schwellenwert-Operation oder eine A/D Konvertierung wandelt das Signal in einen digitalen seriellen Datenstrom.

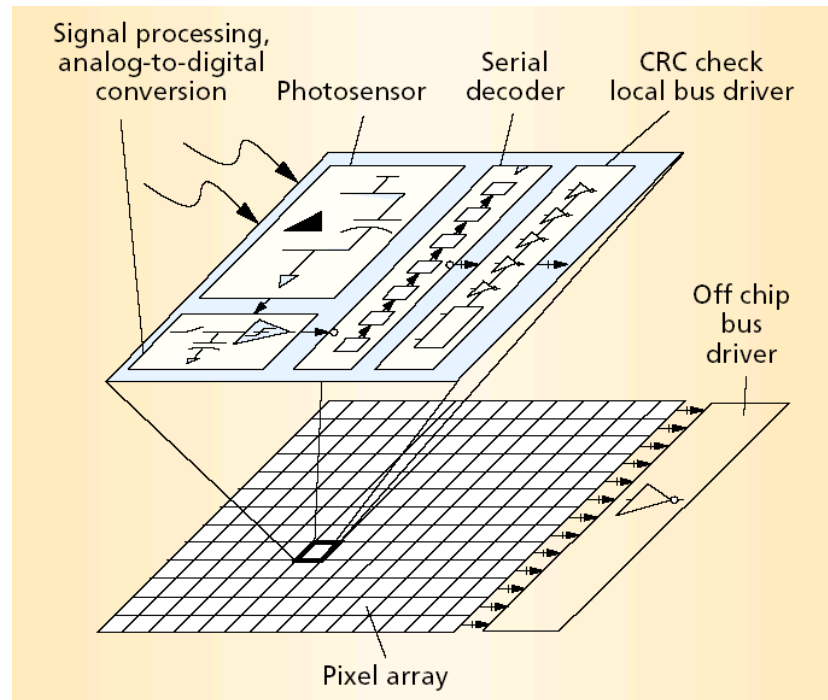


Abbildung 4: Schematische Darstellung des Aufbaus eines Smart Pixel Imaging Arrays

Quelle: [13].

Ein serieller Dekoder puffert die einzelnen Bits bis ein vollständiges Datenpaket von 8-16 Bits erhalten wurde, welches dann von einem CRC-Checker geprüft wird. Wenn ein gültiges Datenpaket dekodiert ist, muss es aus dem Imaging Array heraus geliefert werden. Viele Pixel innerhalb des Bildempfängers können gleichzeitig Daten empfangen und die daraus resultierenden Datenpakete müssen sich eventuell einen einzigen Bus teilen. Die Einschränkungen durch die Chipgröße und den Energieverbrauch verbieten jedoch die Implementierung eines komplexen chip-weiten Kommunikationsnetzwerks.

3.4. Kommunikationsdesign

Der Kommunikationsablauf zwischen einem Mote und einer Basisstation soll in diesem Abschnitt exemplarisch aufgezeigt werden.

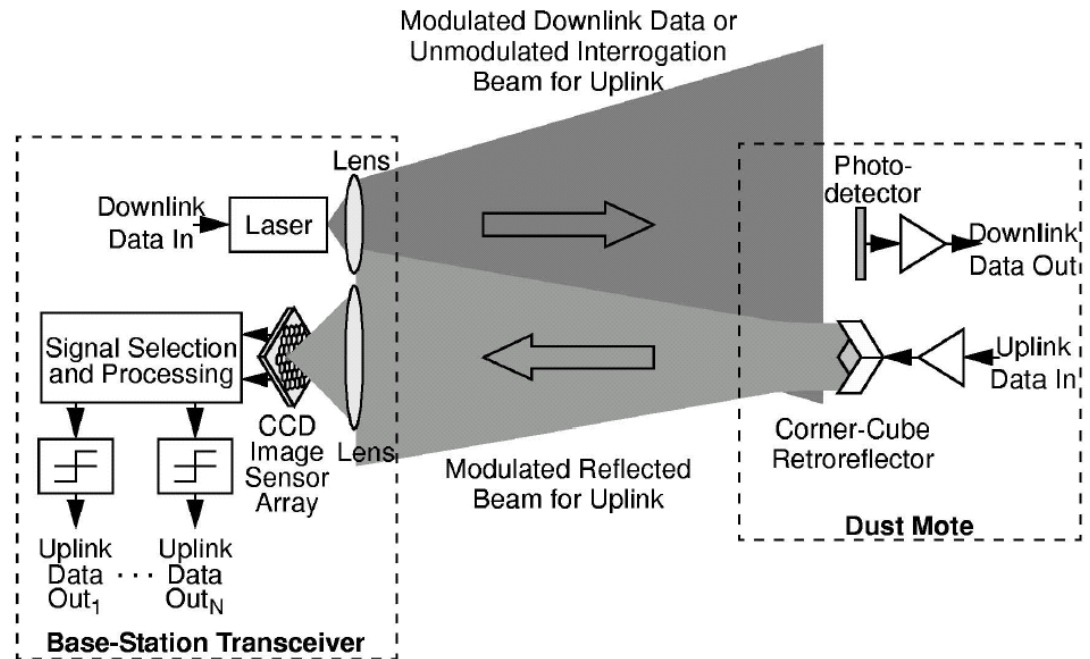


Abbildung 5: Schematische Darstellung der Kommunikation zwischen einem Base-Station Transceiver und eines Dust Motes

Quelle: [4].

Die Basisstation deckt mit ihrem Laserstrahl einen Bereich ab, in dem mehrere Dust Motes vorhanden sind. Der Laserstrahl kann einerseits moduliert sein um Downlink-Daten zu senden, z.B. Kommandos zum Aufwachen und Abfragen der Motes. Wenn der Laserstrahl nicht moduliert ist, können die Motes ihren CCR benutzen, um Uplink-Daten zur BTS zu senden. Der Integrierte Bildempfänger der Basisstation „sieht“ diese CCR-Signale als blinkende Lichter und dekodiert diese um Uplink-Daten zu erhalten. Eine schematische Darstellung einer solchen Kommunikation stellt Abbildung 5 dar. Eine Analyse [15] zeigt, dass dieses Schema einige Kilobits pro Sekunde über mehrere hundert Meter im vollen Sonnenlicht übertragen kann. Bei Dunkelheit und klarer Sicht kann die Entfernung auf einige Kilometer verlängert werden [4].

Neben dieser passiven Kommunikation der Dust Motes haben die Dust Motes auch die Möglichkeit selbständig eine aktive peer-to-peer Verbindung zwischen Motes und zur Basisstation aufzubauen, immer vorausgesetzt eine direkte Sichtverbindung existiert. Der relativ hohe Stromverbrauch des Halbleiterlasers (im Bereich von ca. 1 Milliwatt) erzwingt, dass diese Übertragungsform nur für kurze Zeit genutzt wird.

Sensor Netzwerke, die die aktive Übertragung nutzen, benötigen zudem Protokolle, mit denen die Dust Motes ihren Laserstrahl auf den Empfänger ausrichten können [4].

4. Anwendungen

4.1. Anwendungsgebiete

Hauptzweck von Smart Dust ist es, Umweltverhältnisse zu überwachen und zu beobachten, sowohl für militärische als auch für kommerzielle Anwendungen [7]. Abhängig von der Anwendung sind unterschiedlichste Szenarien nötig in denen ein Smart Dust Netzwerk arbeitet. Einerseits können einzelne Motes direkt an den zu überwachenden Objekten fixiert sein, andererseits kann eine große Anzahl von Dust Motes über einem Gebiet frei verteilt werden. Die Motes speichern ihre Sensorinformationen jeweils bis sie abgefragt werden und geben dann die Daten über eine optische Verbindung weiter. In den meisten Anwendungen werden die Motes passiv per CCR mit der BTS kommunizieren, bei anderen Anwendungen hingegen ist es sinnvoller eine aktive peer-to-peer Kommunikation zwischen den Dust Motes zu installieren, um dann die Daten an die BTS weiterzuleiten. In Einzelfällen ist auch eine aktive direkte Kommunikation vom Dust Mote zur BTS nötig. Die Entfernungen, über die ein Dust Mote mit der BTS Daten austauscht, reichen von einigen Metern bis hin zu mehreren Kilometern. Neben diesen variablen Kommunikationsdeterminanten ist auch die Ausgestaltung der BTS unterschiedlich. Die BTS kann z.B. in einem Handheld oder in einem unbemannten Flugobjekt untergebracht sein. Das jeweilige Szenario ist dabei durch die Anwendung vorgegeben. Viele zivile und militärische Anwendungen sind so denkbar. Eine eindeutige Zuordnung in eine zivile oder militärische Anwendung ist dabei oft nicht möglich.

Einige dieser Anwendungen sind z.B. die Überwachung bestimmter Regionen im Hinblick auf meteorologische, geophysikalische Daten oder die Planetenerkundung. Die Dust Motes können auch dort eingesetzt werden, wo verkabelte Sensoren entweder unbrauchbar sind oder aber das Meßergebnis verfälschen. Beispiele dafür sind Räume zur Halbleiterproduktion, rotierende Maschinen, Windkanäle und schalltote

Räume. In der biologischen Forschung kann Smart Dust zur Beobachtung von Bewegungen, Gewohnheiten und der Umgebung von Insekten oder kleinen Tieren genutzt werden.

Als mögliche zivile Anwendungen sind denkbar [6]:

- Bewegungsverfolgung von Vögeln, kleinen Tieren und sogar Insekten.
- Virtuelle Tastaturen, die über Beschleunigungsmesser an den Fingern funktionieren.
- Beobachtung von Umweltbedingungen die Saaten und Tierzucht betreffen.
- Vorratskontrolle
- Produktqualitätskontrolle (Temperatur, Feuchtigkeit, Vibrationen, Sonneneinstrahlung usw.)
- Schnittstellen für Behinderte

Neben diesen zivilen Anwendungen sind auch militärische Verwendungsmöglichkeiten möglich. Die Motes sollen dabei schnell mit Hilfe unbemannter Flugobjekte über einer Region verteilt werden [6]. Smart Dust kann dann in militärischen Verteidigungsnetzwerken dazu genutzt werden, heimlich feindliches Gebiet zu beobachten, z.B. für die Überwachung von Abkommen. Hierbei könnten Akustik-, Vibrations- oder Magnetfeldsensoren die Bewegung von Fahrzeugen und anderen Ausrüstungsgegenständen erkennen. Smart Dust könnte auch zur Grenzüberwachung genutzt werden oder um chemische oder biologische Mittel auf Schlachtfeldern zu entdecken.

4.2. Prototypen

Vom Smart Dust Projektteam wurden bislang mehrere Prototypen entwickelt, um die Konzeption von Smart Dust im Hinblick auf Kommunikationsverbindungen und Integrationsaspekte zu überprüfen. Die beiden aktuellsten Prototypen sind ein uni- und ein bidirektionaler Mote.

Der unidirektionale Sensor Mote hat eine Größe von 138 mm^3 und soll die Übertragung von Sensordaten demonstrieren [6]. Das System besteht aus einem $0,35 \mu\text{m}$ CMOS ASIC mit einer On-chip Fotodiode. Eine LED, die der aktiven Übertragung von Daten vom Mote aus dient, ist als Kommunikationseinheit vorhanden.

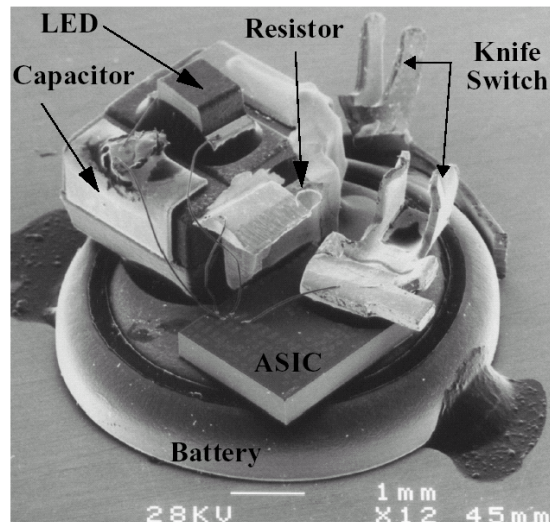


Abbildung 6: Unidirektionaler 138 mm³ Dust Mote Prototyp

Quelle: [6].

Der zweite Smart Dust Prototyp (Bidirektionaler Mote) beinhaltet eine Demonstration einer bidirektionalen Kommunikation in einem 63 mm² Sensorknoten. Das System dekodiert ein ankommendes optisches Signal, generiert simulierte Sensordaten über einen Zufallsgenerator und steuert einen CCR, um die Daten passiv durch die Modulation eines abfragenden Laserstrahls zu übertragen [4, 6]. Somit zeigt dieser Prototyp, dass auch eine bidirektionale Kommunikation von einem autonomen Sensorknoten in der Praxis möglich ist.

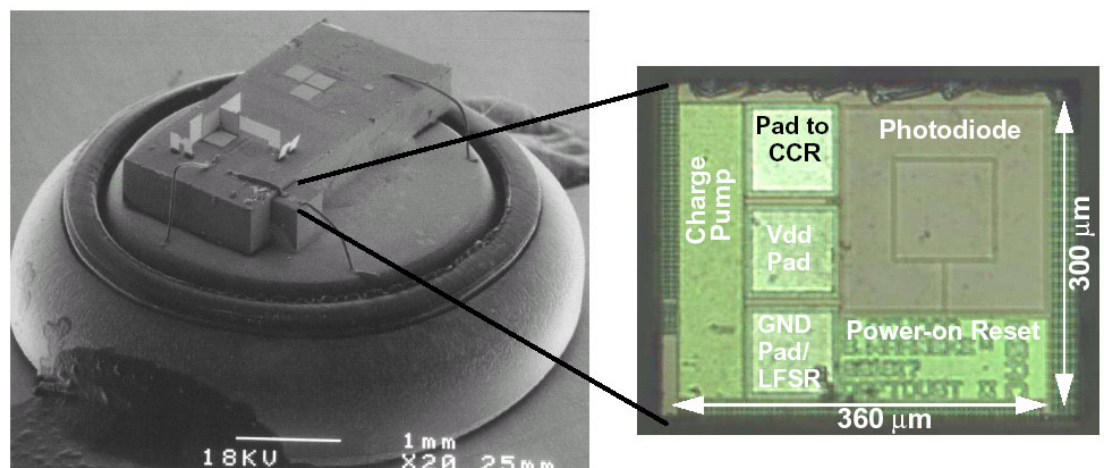


Abbildung 7: Bidirektionaler 63 mm³ Dust Mote Prototyp

Quelle: [6].

5. Zusammenfassung

Smart Dust bezeichnet ein Projekt an der University of California, Berkeley. In diesem Projekt werden im Auftrag des Verteidigungsministeriums der USA millimetergroße autonome Sensorsysteme mit eigener Kommunikations- und Rechereinheit entwickelt, die als Basis für massiv verteilte Sensornetzwerke dienen sollen. Das Ziel des Projekts einen Sensorknoten mit vollem Funktionsumfang von einem Kubikmillimetergröße zu entwickeln ist äußerst anspruchsvoll und bisher noch nicht erreicht worden.

Die im Projekt entwickelten Konzepte und das Aufzeigen der Grenzen der heutigen Mikrofabrikationstechnologie sind dabei aber aufschlussreicher als die Erreichung des konkreten Ziels. Mit den verwendeten Technologien erscheint das Ziel, einen ein Kubikmillimeter großen autonomen Sensorknoten zu entwickeln, durchaus erreichbar. Insbesondere die Verwendung der optischen Übertragung zur drahtlosen Kommunikation erweist sich aufgrund des geringen Energie- und Platzverbrauchs als ein geeigneter Ansatz. Neben dem im Projekt entwickelten Modell einer passiven Kommunikation mit Hilfe des Corner Cube Retroreflector ist auch die Empfangstechnik mit Hilfe des integrierten Bildempfängers ein geeigneter Lösungsansatz für eine energiesparende Multiplex-Kommunikation.

Ob diese Konzepte, die im Labor bisher einwandfrei arbeiten, sich auch unter realen Umweltbedingungen bewähren, erscheint indes fraglich. Die geringe Größe der Dust Motes macht diese besonders empfindlich gegenüber den verschiedensten Umweltbedingungen wie zum Beispiel Regen, Wind und Hitze. Die dadurch entstehenden Probleme betreffen zum einen die allgemeine Funktionalität, die durch Nässe und Hitze eingeschränkt werden kann. Zum anderen entsteht die Problematik, bedingt durch die geringe Größe und der damit verbundenen geringen Masse eines Dust Motes, dass die Motes nicht statisch eine feste Position haben, sondern z.B. durch den Wind dynamisch im Raum bewegt werden. Eine genaue Ausrichtung der Kommunikationskomponenten scheint dann nicht realistisch. Ein Nachweis für die Praxistauglichkeit ist bisher noch nicht erbracht.

Die Forschung an drahtlosen Sensornetzwerken ist ein stark wachsendes Forschungsfeld, die dabei geleisteten Vorarbeiten im Projekt Smart Dust sind der Grundstein für weitergehende Miniaturisierungen.

Literaturverzeichnis

- [1] M. Weiser. "The Computer for the 21st Century". Scientific American, September 1991.
- [2] F. Mattern. "Pervasive/Ubiquitous Computing". Informatik Spektrum, 24. Juni 2001, S.145-147.
- [3] B. Warneke, S. Bhawe. "Smart Dust Mote Core Architecture". CS252, Spring2000: Project Report. Berkeley Sensor and Actuator Center, Berkeley.
(http://www-bsac.eecs.berkeley.edu/~warneke/cs252/Project_Report.pdf)
- [4] J. Kahn, R. Katz, K. Pister. "Emerging Challenges: Mobile Networking for "Smart Dust"". J. of Commun. And Networks, vol. 2, no. 3, September 2000.
- [5] B. Warneke, M. Last, B. Liebowitz, K. Pister. "Smart Dust: Communicating with a Cubic-Millimeter Computer". IEEE Computer Magazine, January 2001, pp. 44-51.
- [6] B. Warneke, B. Atwood, K. 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.
- [7] B. Atwood, B. Warneke, K. Pister. "Preliminary Circuitsw for Smart Dust". Proceedings of the 2000 Southwest Symposium on Mixed-Signal Design,

San Diego, California, February 27-29, 2000, pp. 87-92.

(<http://www-bsac.eecs.berkeley.edu/~warneke/pubs/SSMSD2000.pdf>)

- [8] K. Pister. "On the Limits and Applications of MEMS Sensor Networks". Defense Science Study Group report, Institute for Defense Analysis, Alexandria.
- [9] K. Pister, J. Kahn, B. Boser. "Smart Dust: Wireless Networks of Millimeter-Scale Sensor Nodes". Highlight Article in 1999 Electronics Research Laboratory Research Summary, University of California, Berkeley, USA, 1999.
- [10] L. Zhou, K. Pister, J. Kahn. "Assembled Corner-Cube Retroreflector Quadruplet". Department of Electrical Engineering and Computer Sciences University of California, Berkeley
- [11] Chu, P.B., Lo, N.R., Berg, E., Pister, K.S.J, "Optical Communication Link Using Micromachined Corner Cuber Reflectors", Proc. SPIE vol.3008-20. (<http://robotics.eecs.berkeley.edu/~pister/publications/1997/ChuCCRSPIE97.ps>)
- [12] Chu, P.B., Lo, N.R., Berg, E., Pister, K.S.J, "Optical Communication Using Micro Corner Cuber Reflectors", MEMS 97, Nagoya, Japan, 26-30 Jan 1997, pp. 350-5. (<http://robotics.eecs.berkeley.edu/~pister/publications/1997/ChuCCRMEMS97.ps>)

- [13] B. Leibowitz, B. Boser, K. Pister. "CMOS "smart pixel" for free-space optical communication". Berkeley Sensor and Actuator Center, University of California, Berkeley.
- [14] J. Kahn, R. Katz, K. Pister. "Next Century Challenges: Mobile Networking for Smart Dust". In Proc. of ACM MobiCom '99, Seattle, USA, 1999, pp. 271-278.
- [15] V. Hsu, J. Kahn, K. Pister. "Wireless Communications for Smart Dust". Department of Electrical Engineering and Computer Sciences, Berkeley. Electronics Research Laboratory Memorandum Number M98/2.
- [16] J. Kahn, J. Barry. "Wireless Infrared Communications". Proc. of the IEEE, vol. 85, pp. 265-298, February 1997.