

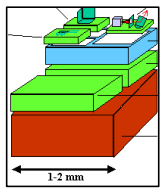
# Mikrosysteme am Beispiel Smart Dust

The background image shows a person in profile on the right, looking at a large, glowing blue microsystem structure. The structure features concentric circular patterns and a grid-like surface. A hand is reaching out from the bottom center towards the structure. The overall scene is set against a dark background with a starry pattern.

Erarbeitet von  
Sven Meyer und  
Lorenz Knies

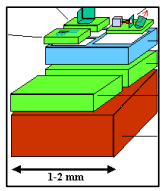
# Smart Dust

---



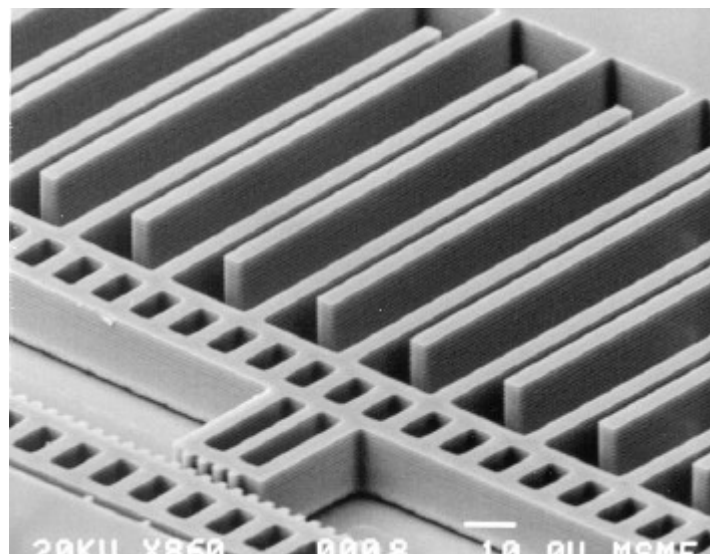
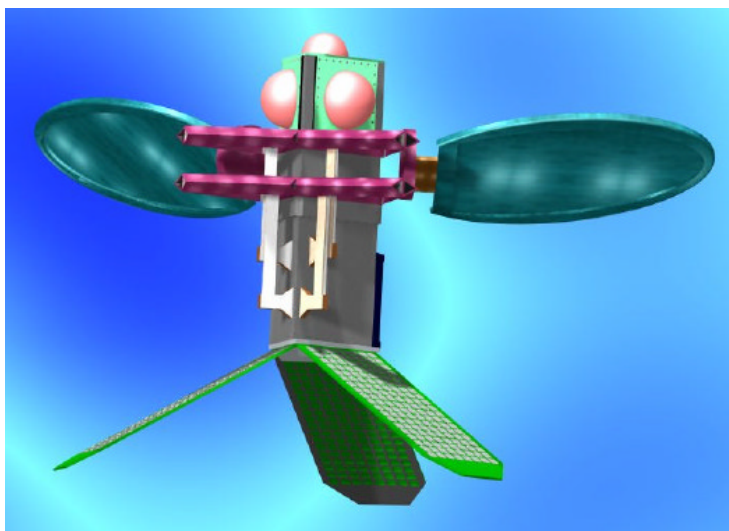
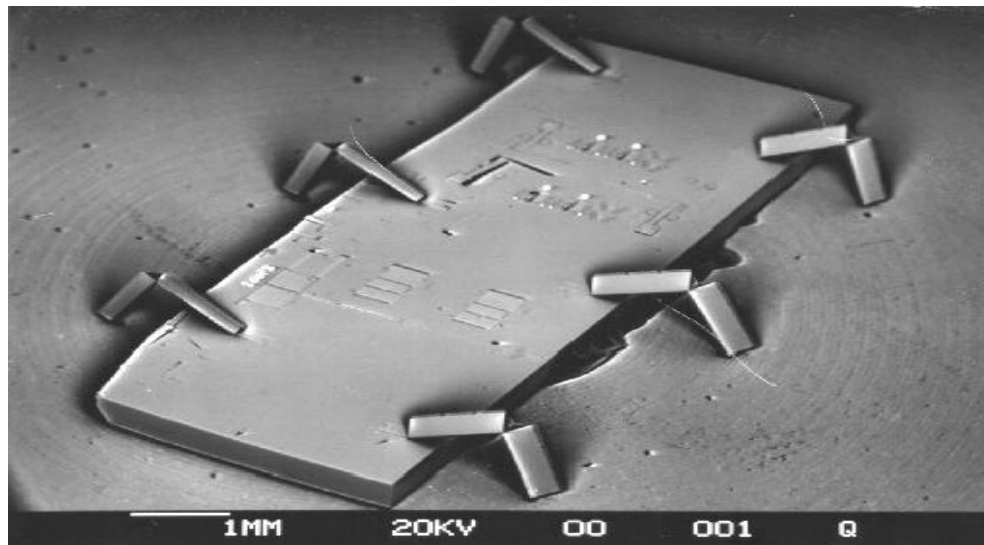
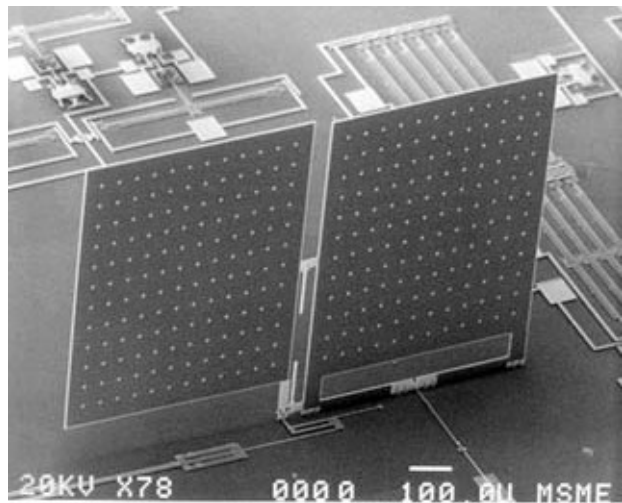
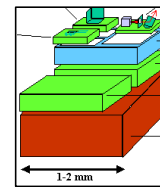
- **Einführung**
- Aufbau
- Funktion
- COTS-Dust

# MEMS



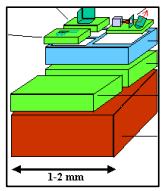
- Micro ElectroMechanical Systems
- ermöglichen Systeme bestehend aus Sensoren, Aktoren und digitalen Schaltungen auf einem Chip
- Größe: im bis mm Bereich
- Elektronik wird mit herkömmlichen Prozessen (z.B. CMOS) hergestellt
- mit kompatiblen Prozessen (ätzen oder auftragen zusätzlicher Schichten) werden die mikromechanischen Komponenten geformt
- Niedrige Herstellungskosten

# MEMS



# Einführung

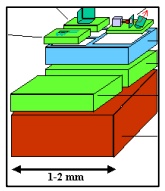
---



- **Einrichtung:** Department of Electrical Engineering and Computer Sciences an der University of California, Berkeley
- **Projektteam:** Kristofer S.J. Pister, Joseph M. Kahn, Bernhard Boser, R.H. Katz
- **Förderung:** Defense Advanced Research Projects Agency's Microsystems Technology (DARPA)

# Zielsetzung

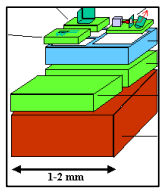
---



- Entwicklung von selbständigen Einheiten (Motes) mit Sensor-, Rechen- und Kommunikationsfähigkeiten, die ein verteiltes Sensornetzwerk bilden können.
- nur so groß wie ein Sandkorn ( $1 \text{ mm}^3$ )
- können gewonnene Informationen verarbeiten, speichern und an Basisstation (BTS) übermitteln.
- sind so günstig herzustellen, dass man Hunderte davon gleichzeitig verwenden kann.

# Anwendung

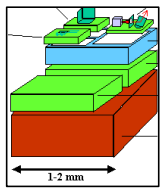
---



- Überwachung:  
Lagerbedingungen von Lebensmitteln
- Wetterbeobachtung
- Übersetzung von Gebärden in  
Schriftsprache
- virtuelle Tastaturen
- Smart Office
- militärische/spionage Anwendungen

# Smart Dust

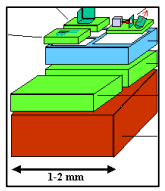
---



- Einführung
- **Aufbau**
- Funktion
- COTS-Dust

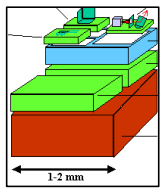


# Aufbau



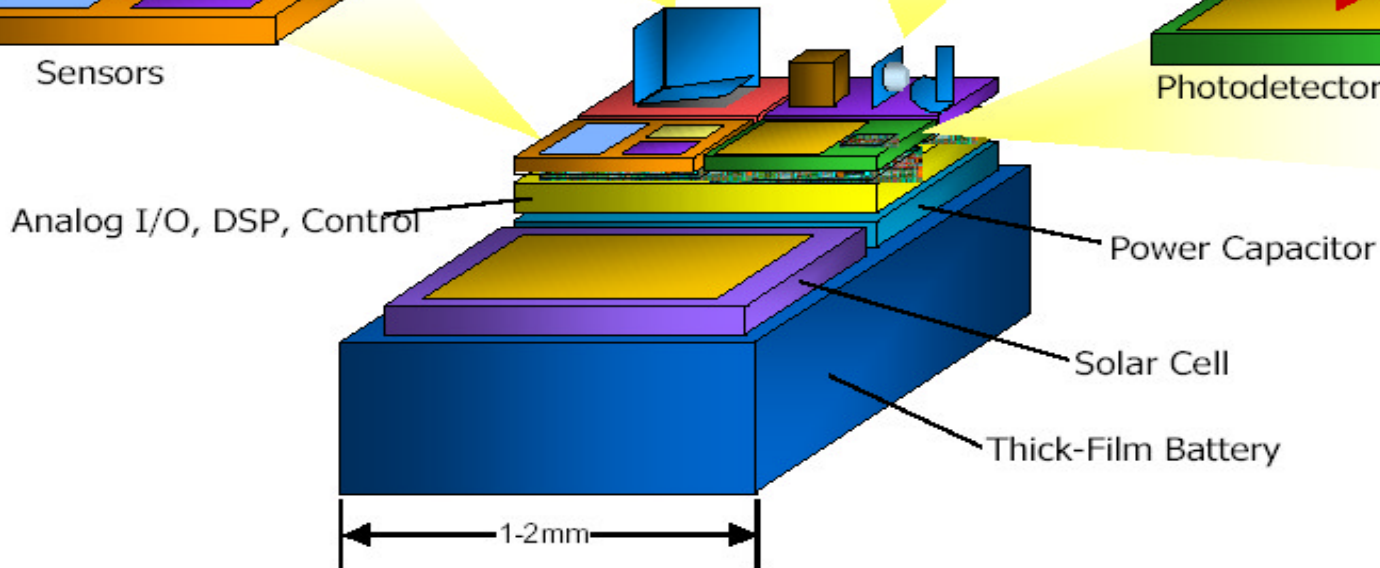
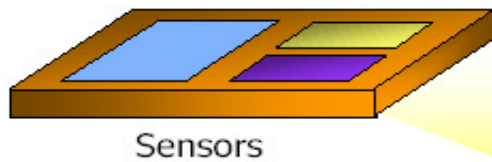
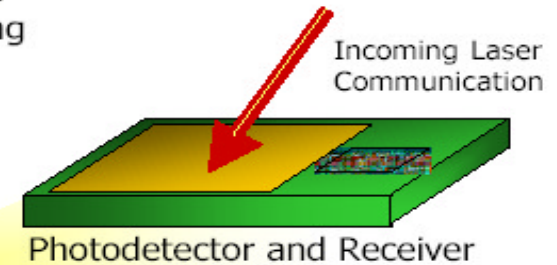
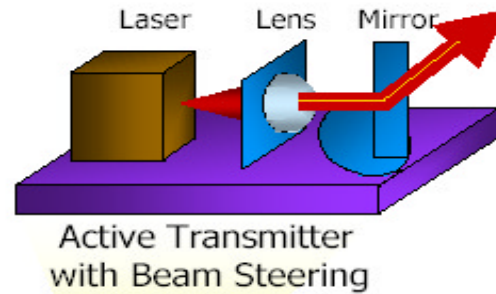
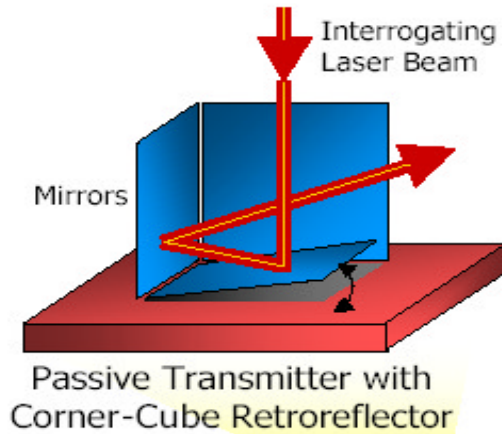
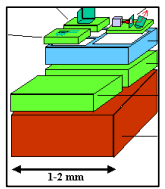
- **Sensoren:** Verschiedenste Sensoren, abhängig vom Zweck. z.B. Licht-, Temperatur-, Beschleunigungs-, Magnetfeldstärke-, Feuchtigkeits-, Akustiksensoren.
- **Fotodiode** ermöglicht optischen Datenempfang.
- **Corner-Cube Retroreflector (CCR)** für passive Übertragung.
- **Laser Diode** und **steuerbare Spiegel** für eine aktive Übertragung.

# Aufbau



- **Integrierte Halbleiterschaltung**, die die Sensorsignal-Verarbeitung, Kommunikationskontrolle, Datenspeicherung und das Energiemanagement bereitstellt.
- **Stromversorgung:**
  - Dickschicht-Batterie
  - Kondensator
  - Solarzellen, mit der Möglichkeit die Batterie aufzuladen

# Aufbau



# Smart Dust

---



ENERGIE

- Einführung
- Aufbau
- Funktion
  - **Energieversorgung**
  - Prozessor
  - Kommunikation
- COTS-Dust

# Komponenten



ENERGIE

Thick-Film-Batterie	1 mm <sup>3</sup>	1 J
Solarzelle	1 x 1 x 0.1 mm <sup>3</sup>	1 J
Kondensator	1 x 1 x 0.1 mm <sup>3</sup>	1 mJ
CMOS Controller	1 x 1 x 0.1 mm <sup>3</sup>	
Sensor	0.5 x 0.5 x 0.1 mm <sup>3</sup>	
passive CCR Comm.	0.5 x 0.5 x 0.1 mm <sup>3</sup>	1 μW
aktive Laser Comm.	1 x 0.5 x 0.1 mm <sup>3</sup>	10 mW
Gesamtvolumen	<1.5 mm <sup>3</sup>	
Gesamtmasse	< 5 mg	



ENERGIE

# Thick-Film bzw. Dickschicht Batterie

---

- Dickschichttechnik ist eine Technik zur Herstellung integrierter Schaltkreise.
- es 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.

# Energieversorgung



Solarzelle	1 J im Sonnenlicht /mm <sup>2</sup> 1-10 mJ in künstlichem Licht
opt. Receiver	0.1 nJ / Bit
Transmitter	1 nJ / Bit
A/D	1 nJ / sample (Datenwort)
CPU	<1 pJ / Instruction

# Energieversorgung



Solarzelle	1 J im Sonnenlicht /mm <sup>2</sup> 1-10 mJ in künstlichem Licht
opt. Receiver	0.1 nJ / Bit
Transmitter	1 nJ / Bit
A/D	1 nJ / sample (Datenwort)
CPU	<1 pJ / Instruction

➡ für jede Messung eines Sensors oder jede A/D-Wandlung können also ca. 1000 8-Bit Operationen

➡ angen.: 1 mJ pro Tag aus Innenraumbeleuchtung  
dann kann jede Sekunde eine Sensorabfrage stattfinden, das Resultat begutachtet werden und zudem noch einige Daten übertragen werden.



# Energieversorgung



- $1 \text{ J} = 1 \text{ Nm} = 1 \text{ kg m}^2/\text{s}^2$
- $1 \text{ J} = 1 \text{ Ws}$
- $1 \text{ J} = 0.278 \cdot 10^{-6} \text{ kW h}$
  
- $1 \text{ cal} = 4.2 \text{ J}$  entspricht der Wärmeenergie, um 1 Gramm Wasser um 1 K zu erwärmen  
(bei durchschnittlichem atmosphärischen Druck)

# Energieversorgung

---



- Smart-Dust-Projekt befasst sich nur am Rande mit neuen Technologien der Energieversorgung
- d.h. es werden Standard-Batterien und Solarzellen verwendet
- neue Ansatzpunkte sind hingegen die energieverbrauchenden Bauteile sowie das Energiemanagement

# Energiemanagement



alles ausgeschaltet bis auf Clock und einige Timer

timer läuft ab

entsprechenden Bereich mit Strom versorgen

im Falle eines  
Sensors

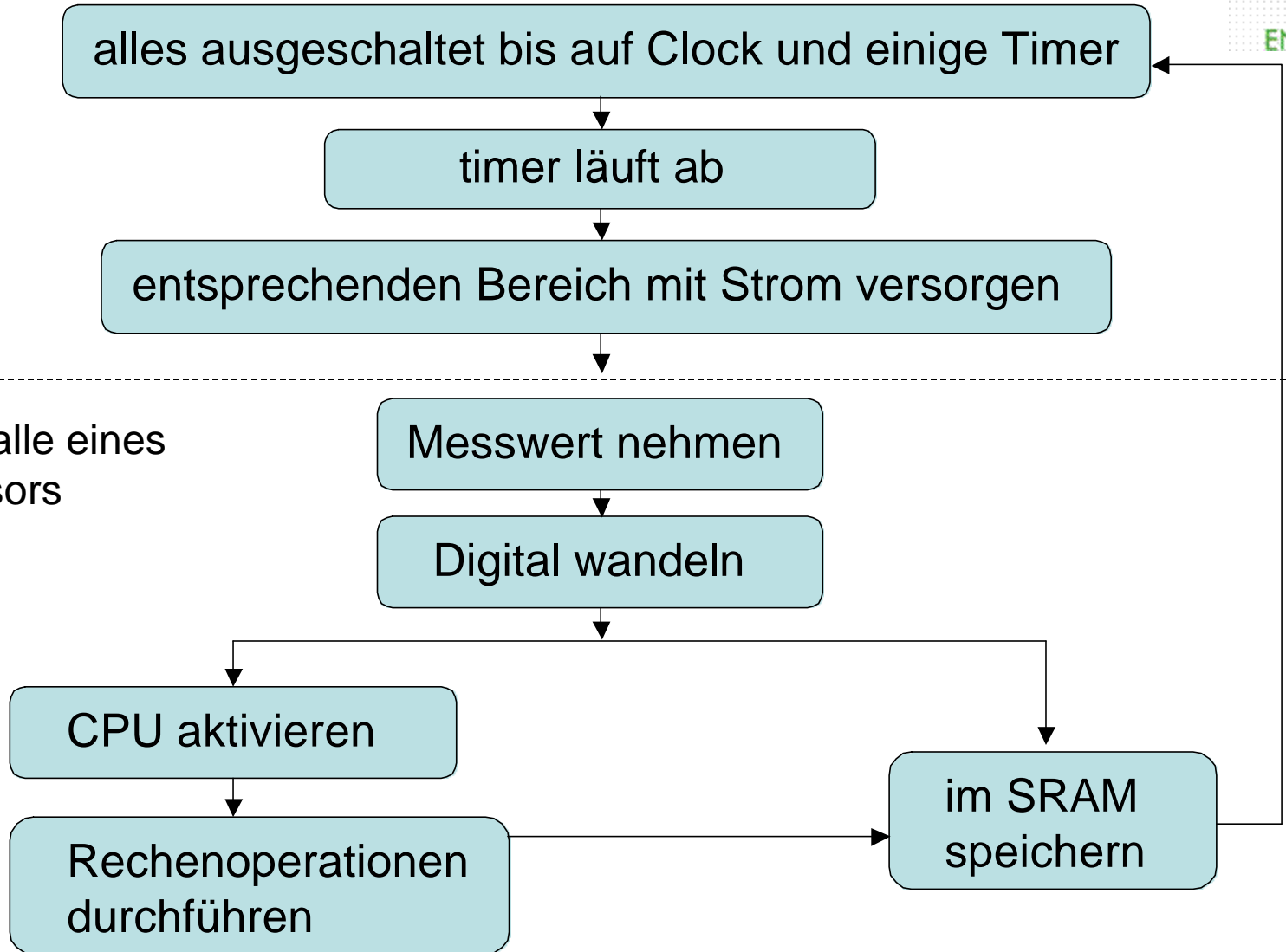
Messwert nehmen

Digital wandeln

CPU aktivieren

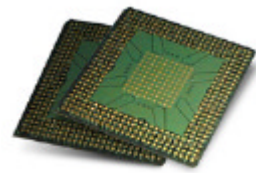
Rechenoperationen  
durchführen

im SRAM  
speichern



# Smart Dust

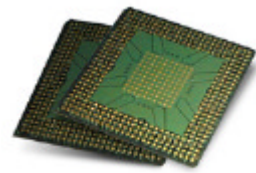
---



- Einführung
- Aufbau
- Funktion
  - Energieversorgung
  - **Prozessor**
  - Kommunikation
- COTS-Dust

# Prozessor

---

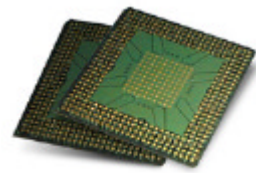


- **Aufgaben der CPU**

- ✓ Sensorsignalverarbeitung
- ✓ Kommunikation abzuwickeln bzw. zu steuern
- ✓ die Datenspeicherung durchzuführen
- ✓ gesamte Kontrolle des Dust Motes und
- ✓ das Energiemanagement abwickeln

# Prozessor

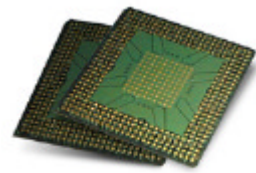
---



- **CPU soll „Remote“ programmierbar sein**
  - für diesen Zweck enthalten die Prozessoren eine **On-Chip-Fotodiode**, die die Stromspannungen eines ankommenden Laserstrahl in einen Datenstrom umwandelt,  
um das Mote abzufragen oder zu rekonfigurieren

# Prozessor

---



## **klassischer Ansatz:**

Ausführungszeit von Befehlen minimieren, um schnellere Rechner zu konstruieren

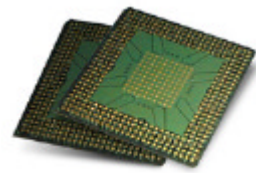
## **rechnen im autonomen 1 mm<sup>3</sup> Knoten:**

Reduktion des Energieverbrauchs für eine bestimmte Aufgabe

(Performance nicht MIPS, sondern hinsichtlich des Verbrauchs von Joule)

# Prozessor

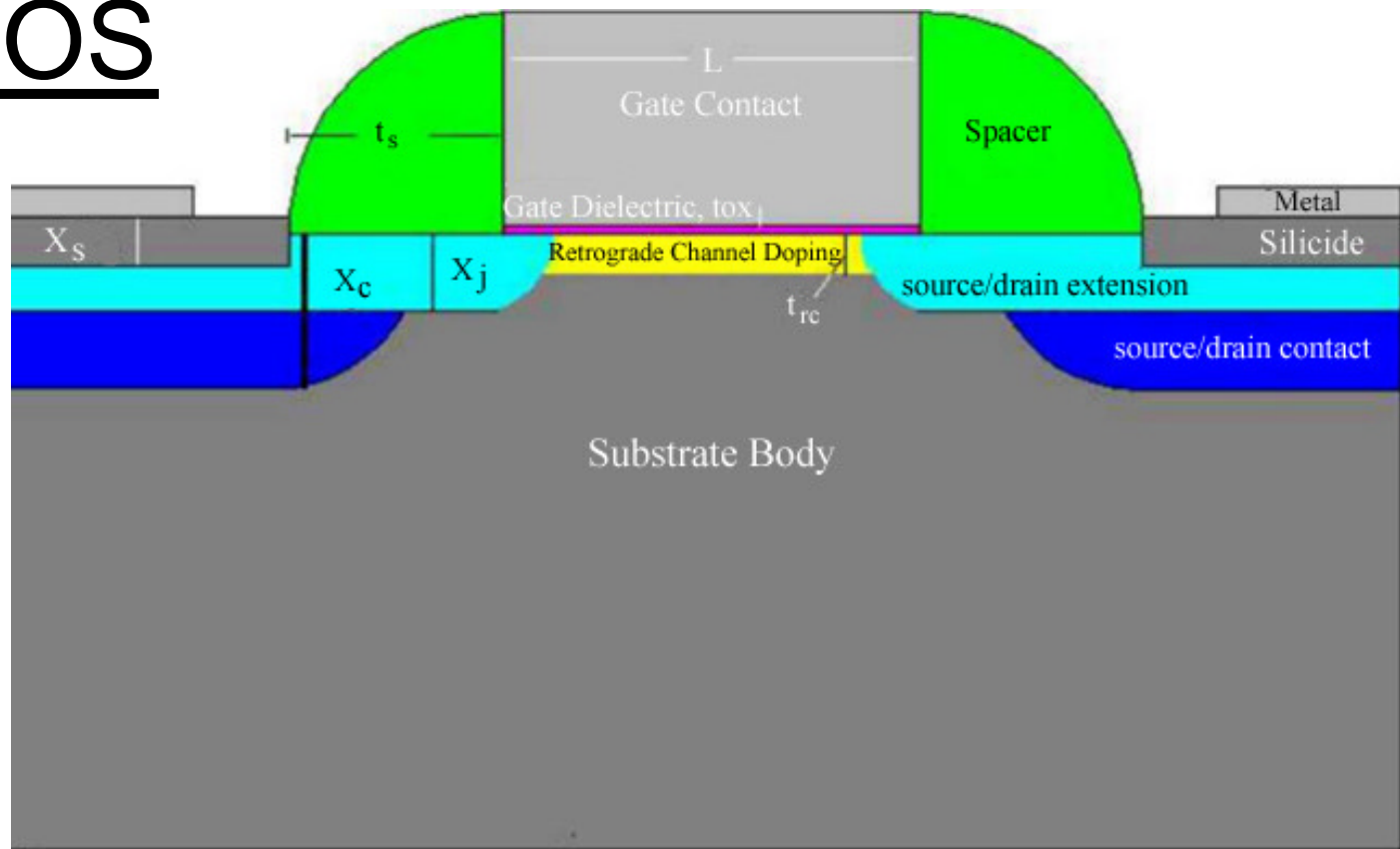
---



- ✓ Im Smart Dust Projekt sind die Prozessoren in **CMOS-Technologie** gefertigt
- ✓ Für das CPU-Design wird **ASIC** (Application Specific Integrated Circuit) verwendet

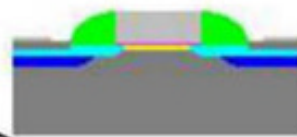


# CMOS



Today's CMOS

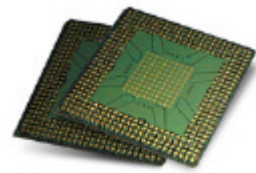
100 nm



2014 CMOS

# ASIC

---



## ASICs (Application Specific Integrated Circuits)

- sind Spezialchips, die auf den konkreten Einsatz hin konzipiert und optimiert werden.
- finden beispielsweise in der Automobil-Industrie sowie im gesamten Feld der Telekommunikation Einsatz.
- Internet-Endgeräte wie Palmtops, Webpads, WAP-Handys tragen ebenso ASICs in sich wie die Switches und Routers in der Internet-Infrastruktur.

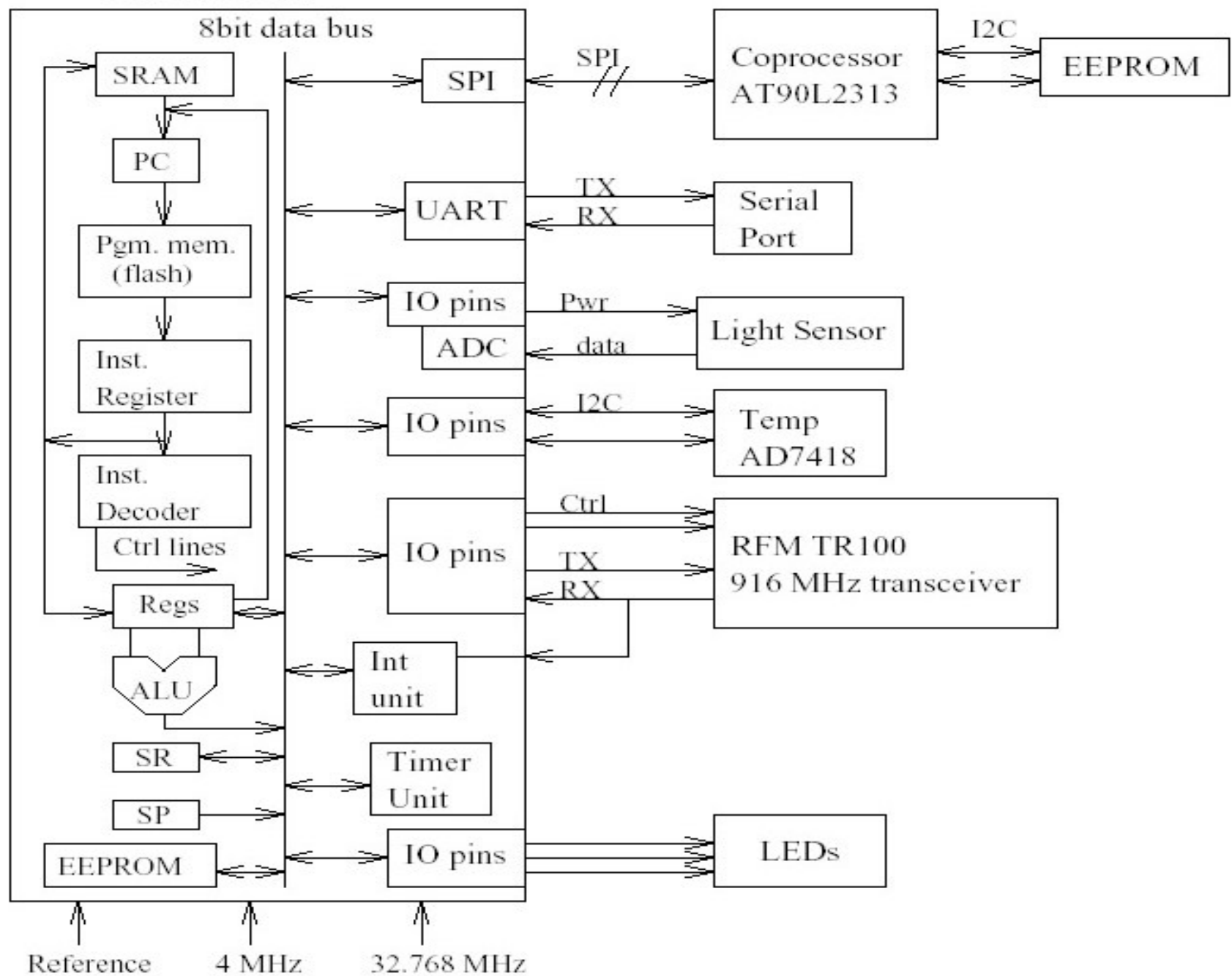
# Features

# CPU

- **AVR<sup>®</sup> – High-performance and Low-power RISC Architecture**
  - 118 Powerful Instructions – Most Single Clock Cycle Execution
  - 32 x 8 General-purpose Working Registers
  - Up to 8 MIPS Throughput at 8 MHz
- **Data and Nonvolatile Program Memories**
  - 8K Bytes of In-System Programmable Flash
    - SPI Serial Interface for In-System Programming
    - Endurance: 1,000 Write/Erase Cycles
  - 512 Bytes EEPROM
    - Endurance: 100,000 Write/Erase Cycles
  - 512 Bytes Internal SRAM
  - Programming Lock for Software Security
- **Peripheral Features**
  - 8-channel, 10-bit ADC
  - Programmable UART
  - Master/Slave SPI Serial Interface
  - Two 8-bit Timer/Counters with Separate Prescaler and Compare Mode
  - One 16-bit Timer/Counter with Separate Prescaler, Compare and Capture Modes and Dual 8-, 9-, or 10-bit PWM
  - Programmable Watchdog Timer with On-chip Oscillator
  - On-chip Analog Comparator
- **Special Microcontroller Features**

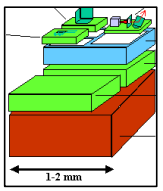
# CPU

- **Special Microcontroller Features**
  - Power-on Reset Circuit
  - Real-time Clock (RTC) with Separate Oscillator and Counter Mod
  - External and Internal Interrupt Sources
  - Three Sleep Modes: Idle, Power Save and Power-down
- **Power Consumption at 4 MHz, 3V, 20°C**
  - Active: 6.4 mA
  - Idle Mode: 1.9 mA
  - Power-down Mode: <1  $\mu$ A
- **I/O and Packages**
  - 32 Programmable I/O Lines
  - 40-lead PDIP, 44-lead PLCC, 44-lead TQFP, and 44-pad MLF
- **Operating Voltages**
  - $V_{CC}$ : 4.0 - 6.0V AT90S8535
  - $V_{CC}$ : 2.7 - 6.0V AT90LS8535
- **Speed Grades:**
  - 0 - 8 MHz for the AT90S8535
  - 0 - 4 MHz for the AT90LS8535



# Smart Dust

---



- Einführung
- Aufbau
- Funktion
  - Energieversorgung
  - Prozessor
  - **Kommunikation**
- COTS-Dust

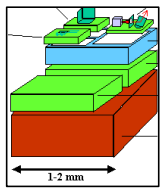
# Kommunikation

---

- größten Anteil am Energieverbrauch
- Zwei Kandidaten
  - RF Kommunikation
  - optische Kommunikation
- optische Micro-Laser Kommunikation muß extra entwickelt werden

# Smart Dust

---



- Einführung
- Aufbau
- Funktion
  - Energieversorgung
  - Prozessor
  - Kommunikation
    - **RF-Kommunikation**
    - Optische Laser Kommunikation
- COTS-Dust



# RF - Kommunikation

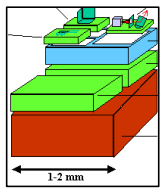
---

- + gut erforscht und einsatzbereit
- + richtungsunabhängig
- + benötigt keine Sichtverbindung
  
- hoher Energieverbrauch
- bei 1mm Antenne -> 75 Ghz Trägerfrequenz
- Schaltungen sind komplex

Im Moment in Mikromotes nicht einsetzbar

# Smart Dust

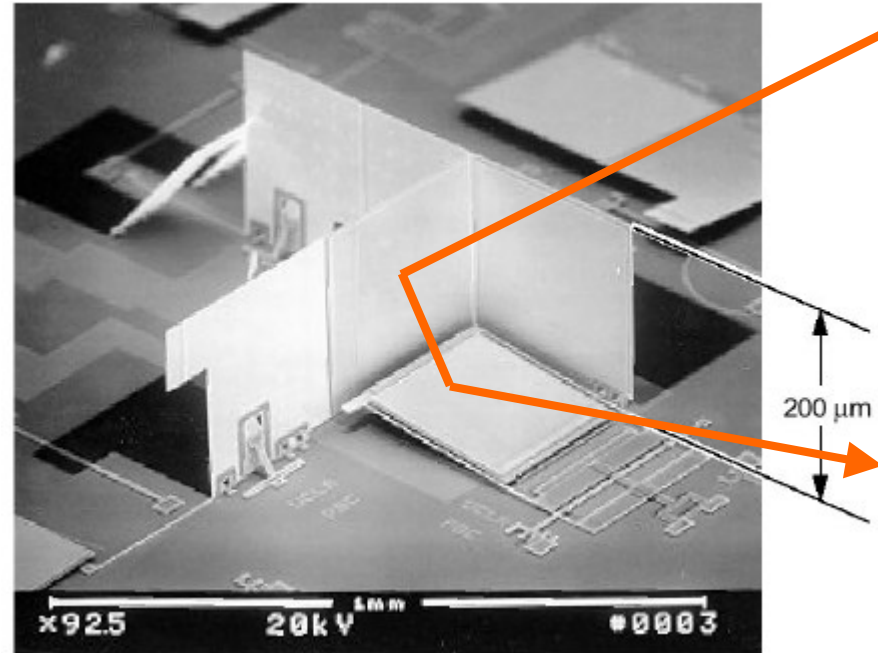
---



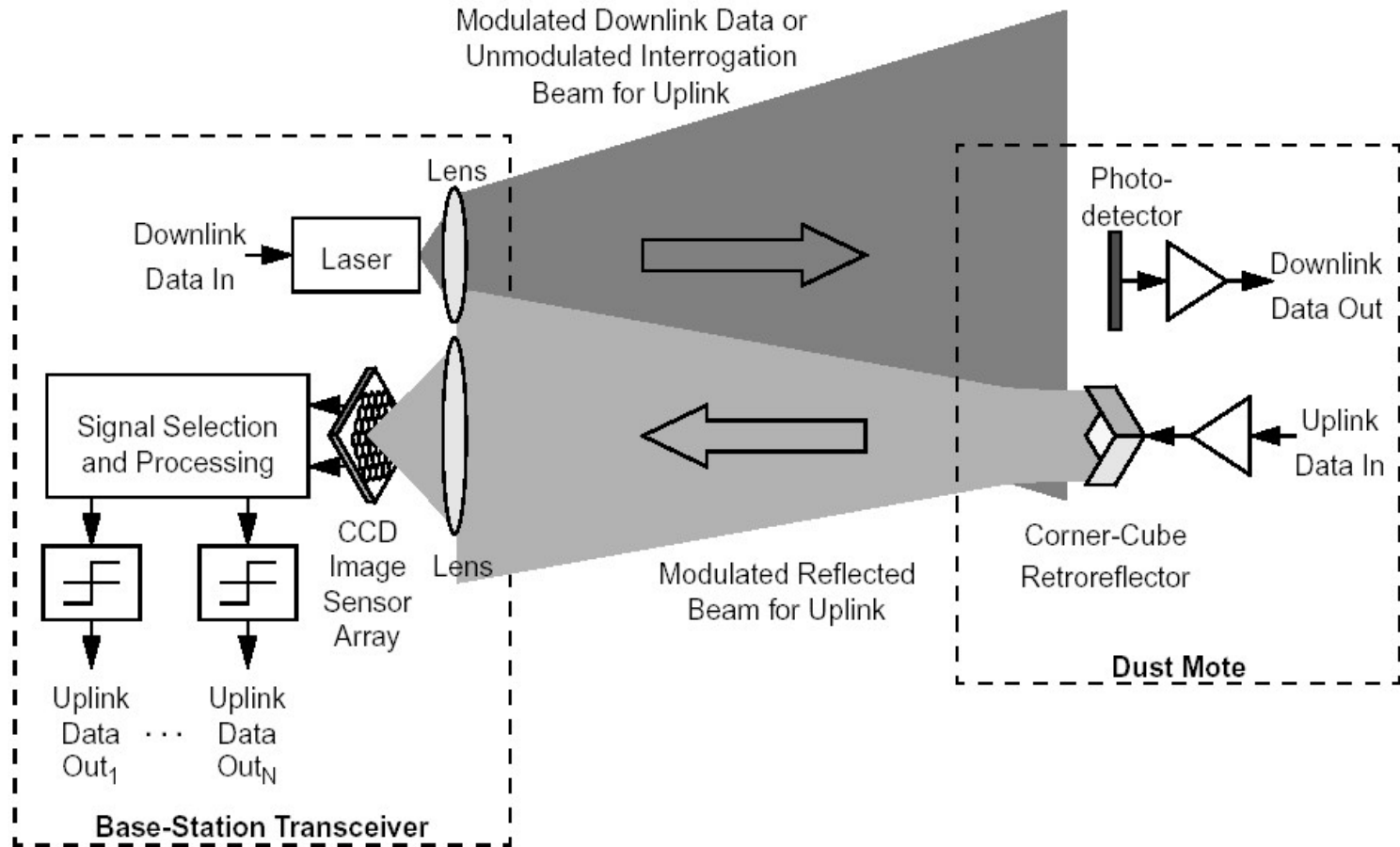
- Einführung
- Aufbau
- Funktion
  - Energieversorgung
  - Prozessor
  - Kommunikation
    - RF-Kommunikation
    - **Optische Laser Kommunikation**
- COTS-Dust

# CCR

- 3 orthogonale Spiegel
- unten liegender Spiegel beweglich
- bei orthogonaler Ausrichtung parallele Reflexion des Lichts => Licht wird dorthin reflektiert, woher es kam



# Passive Kommunikation

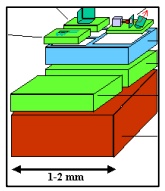


# Passive Kommunikation

---

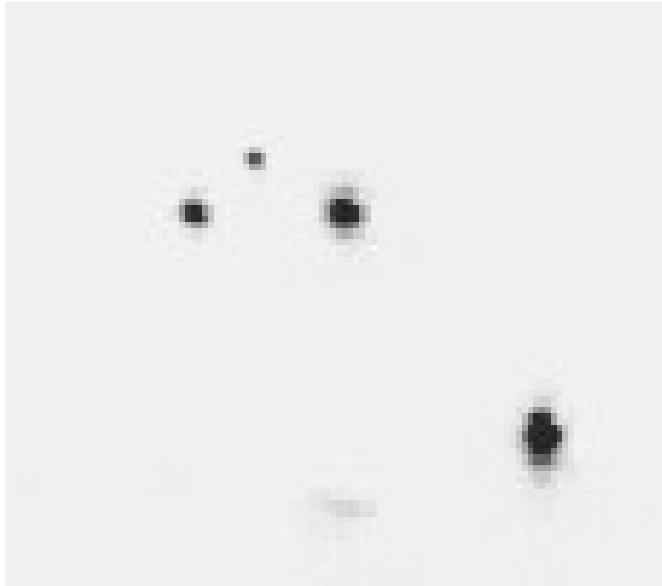
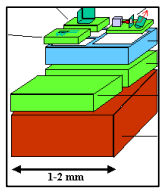
- Datenrate bis zu 1 kbit/s
  - Bis zu 150 m mit 5 mW Laser
- + Energiebedarf  $< 1$  nJ/bit
- Stark gerichtet -> mehrere CCR pro Mote
  - Nur zwischen BTS und Mote
  - Muß von BTS gestartet werden

# Laser Theorie

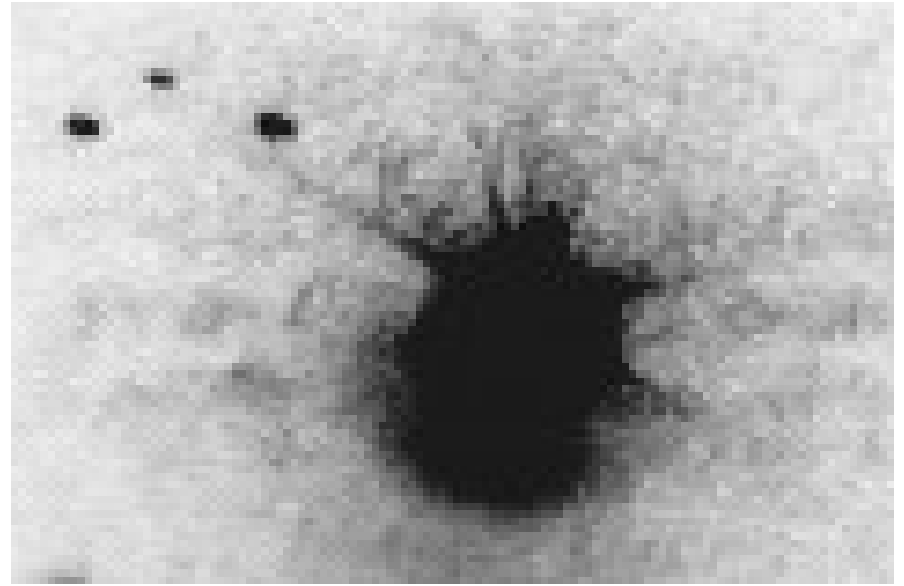


<b>Link budget to Low Earth Orbit</b>		
<b>Parameter</b>	<b>Description</b>	<b>Value</b>
<b>Transmit Power</b>	532nm (green) laser	1mW
<b>Diffraction Limit of Beam coming off of 1/2mm dia circular mirror</b>	milliradians	Jan 30
<b>Solid Angle of Beam</b>	Steradians	$5.3 * 10^{-6}$
<b>Power per Steradian</b>	Watts/steradian	188.7
<b>Diameter of Spot</b>	at range of 300km	780m
<b>Power per square meter at receiver</b>	Range = 300km	2.1 nanowatts
<b>Power collected by receiver</b>	15cm radius Receiver	148pW

# Laser Kommunikation



**14  $\mu$ W**



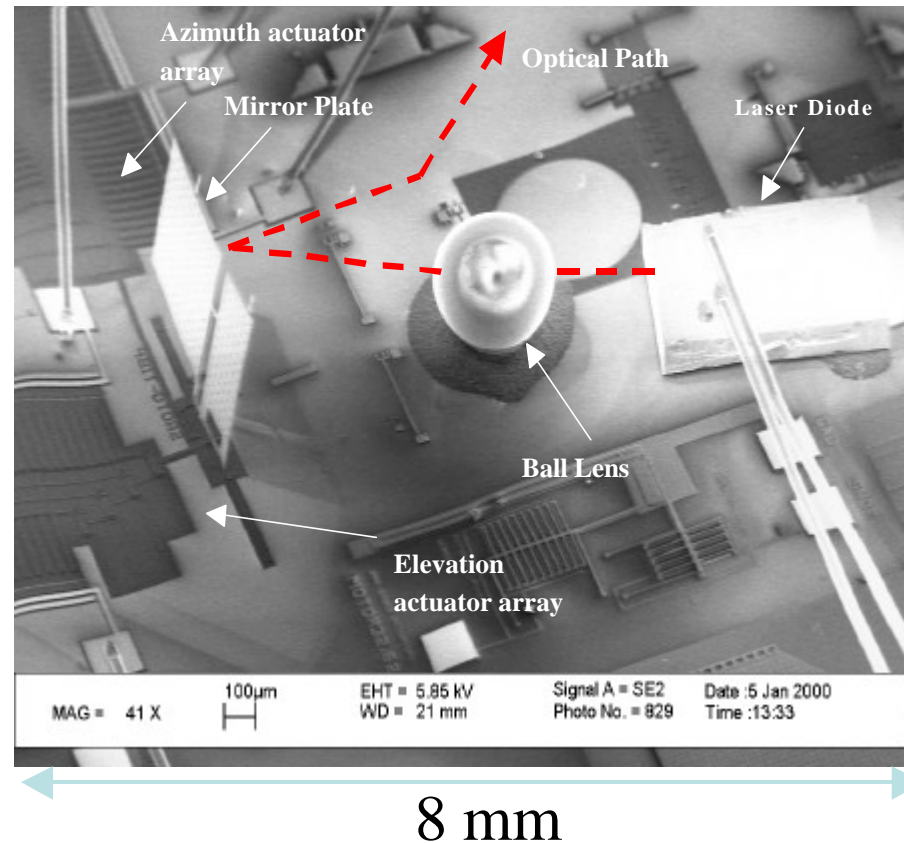
**8 mW**

unmodulierter Laser 532 nm

mit CCD Camera empfangen, Entfernung 5.2 km

# Aktive Kommunikation

- Laserdiode sendet modulierten Strahl aus
- beweglicher Spiegel lenkt den Strahl auf das Ziel





# Aktive Kommunikation

---

- Datenrate im Mbit/s Bereich
  - Entfernungen bis zu mehreren Kilometern
- + Mote zu Mote Kommunikation möglich
- erhöhter Energieverbrauch (mW)
  - Ausrichtungsprobleme
- zum kurzzeitigen Übertragen der Daten im burst-mode

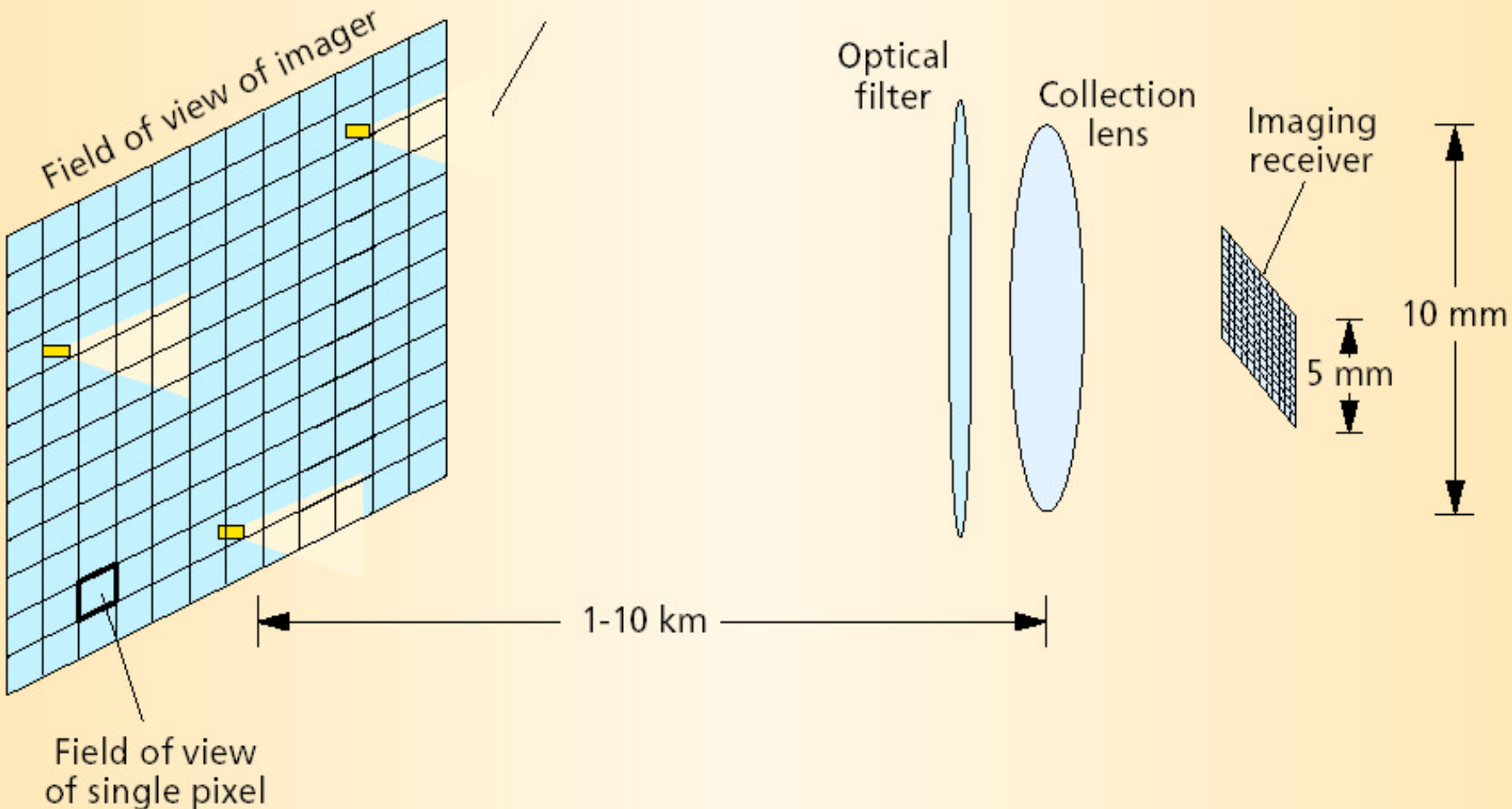
# Überblick

---

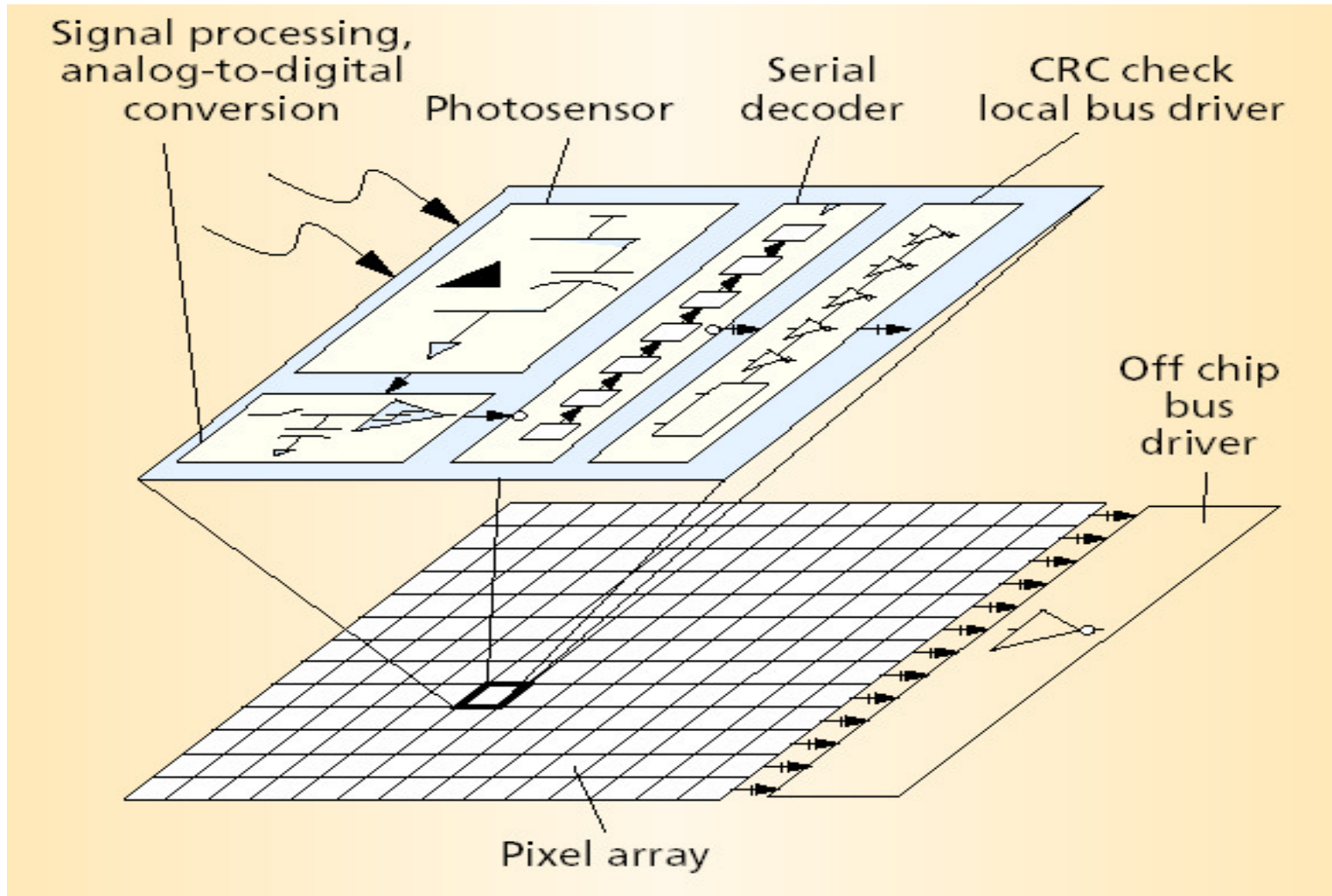
Komm.technik	RF	passiv opt.	aktiv opt.
Energieverbrauch	Bluetooth 100 nJ/bit	< 1J/bit	mW (Laser)
Reichweite	-	150 m	mehrere km
Datenrate	-	kbit/s	mbit/s

# BTS Empfang

5 mW, 1 mrad, 1 Mbps



# Smart Pixel Imaging Receiver



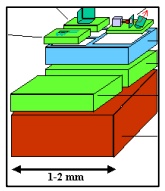
# Imaging Receiver

---

- mit modernen Kameras und speziellem DSP-Chip sind bis zu 1kbit/s möglich
- Space Division Multiple Access (SDMA)
- Smart Pixel IR können:
  - Mbit/s empfangen
  - benötigen nur mW empfangene Energie
  - ermöglichen Kommunikation mit Satelliten

# Smart Dust

---



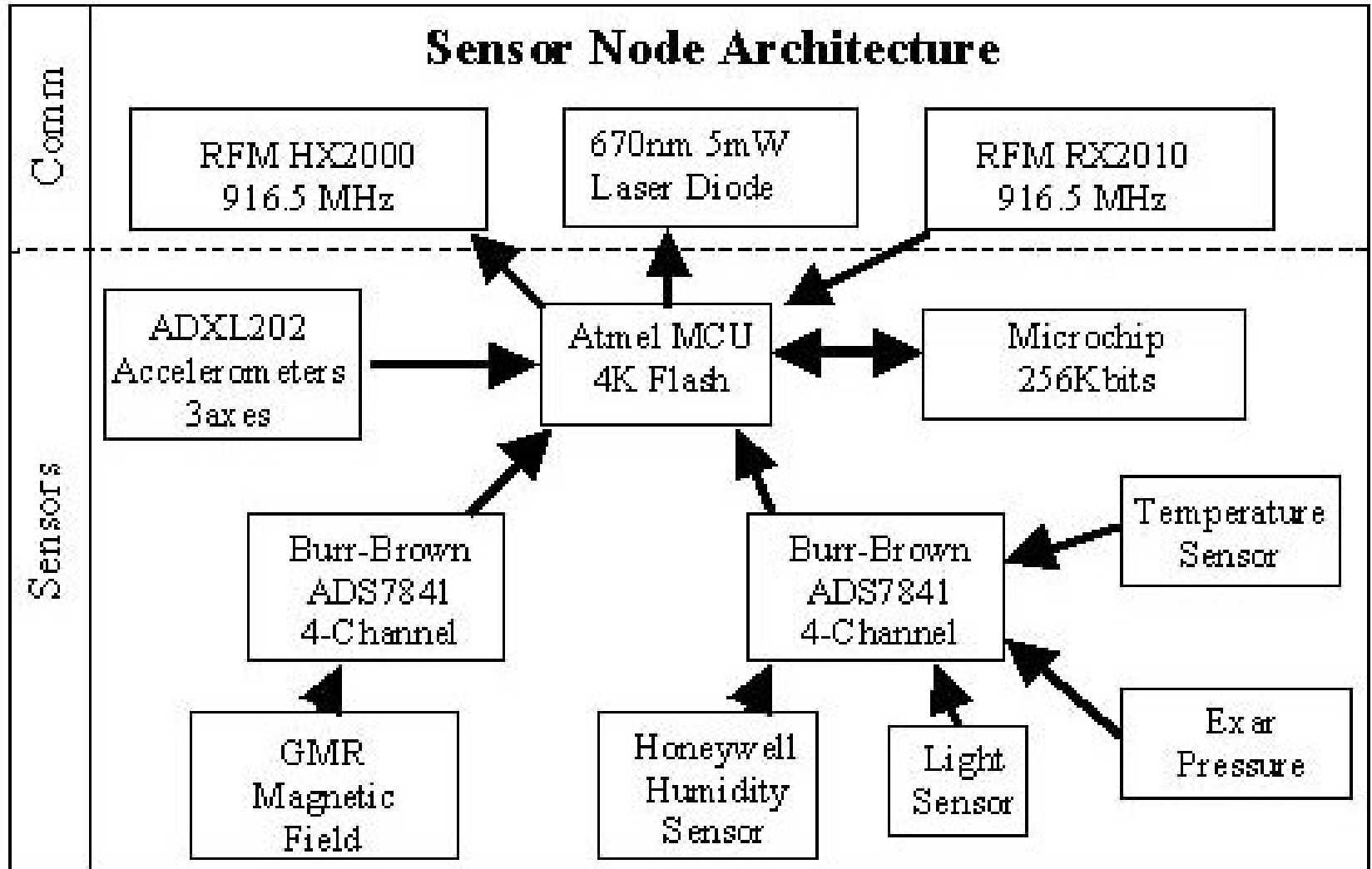
- Einführung
- Aufbau
- Funktion
- **COTS-Dust**

# Cots Dust

---

- Commercial of the Shelf
- Large Scale Models für Smart Dust
- sind Einheiten, die über Kommunikations- und Prozessmöglichkeiten sowie über Sensoren und Batterien verfügen
- sind nicht grösser als ein Kubik-Inch (also ca  $2,54 \text{ cm}^3$ )
- wurden entwickelt, um Sensor- und Kommunikationsmöglichkeiten an einer Vielzahl von **Knoten** zu untersuchen

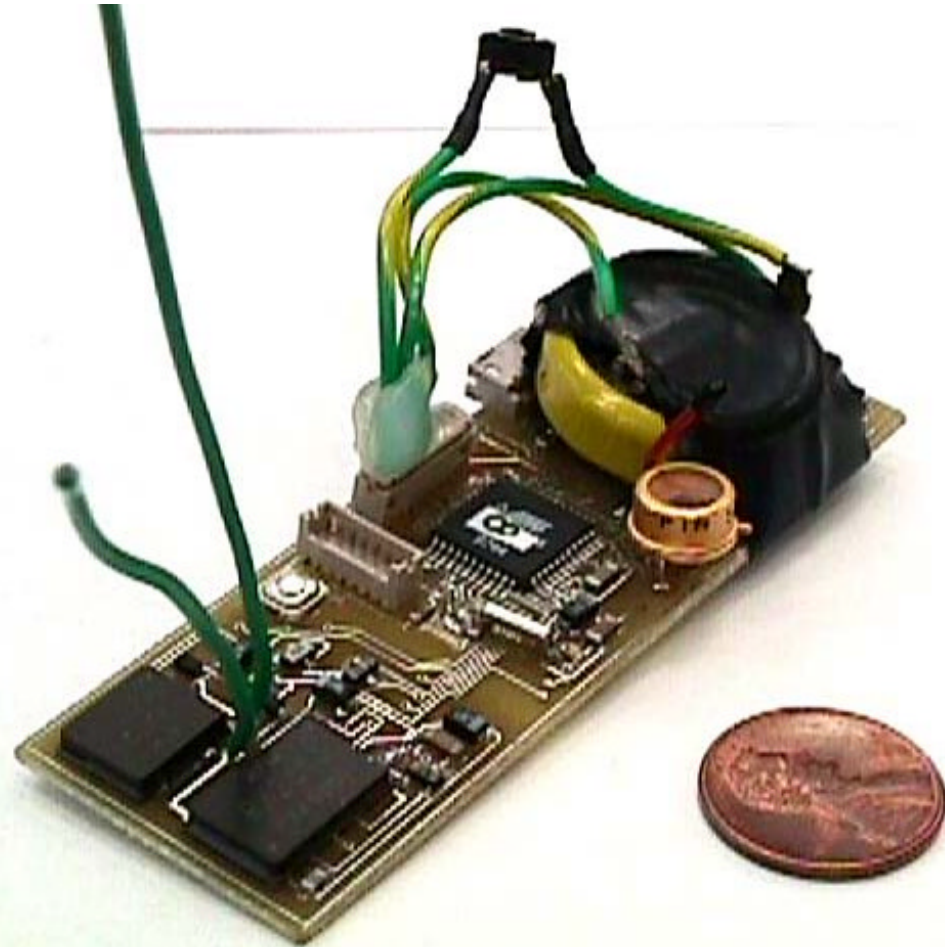
# Cots Dust Aufbau





# RF Mote

---



## **Sensoren:**

Je 2 Achsen Magnetfeldstärke-  
und Beschleunigungsmesser,  
Temperatur, Licht, Druck

## **Komunikation:**

RF 916.5MHz OOK  
5kbps 20 meter range

## **Bemerkungen:**

Frühjar 1999 fertiggestellt

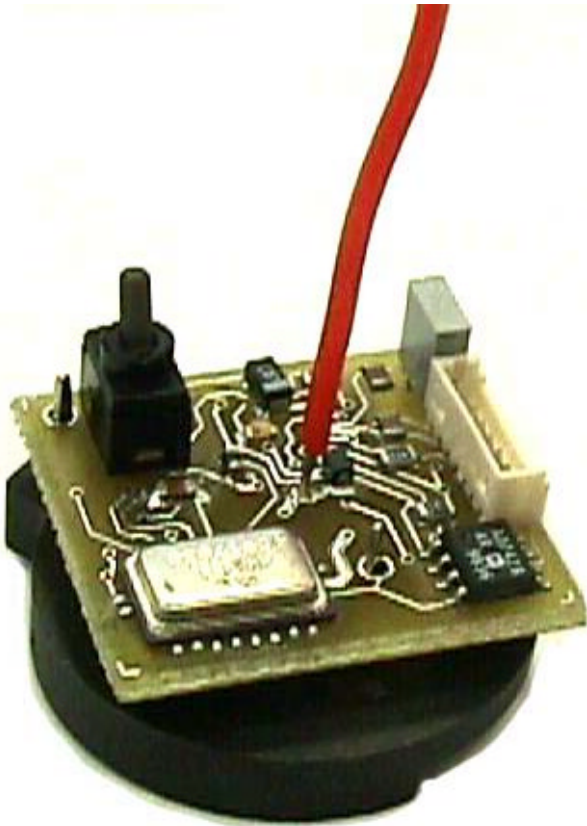
# Mini Mote

---

**Sensoren:**  
Temperatur

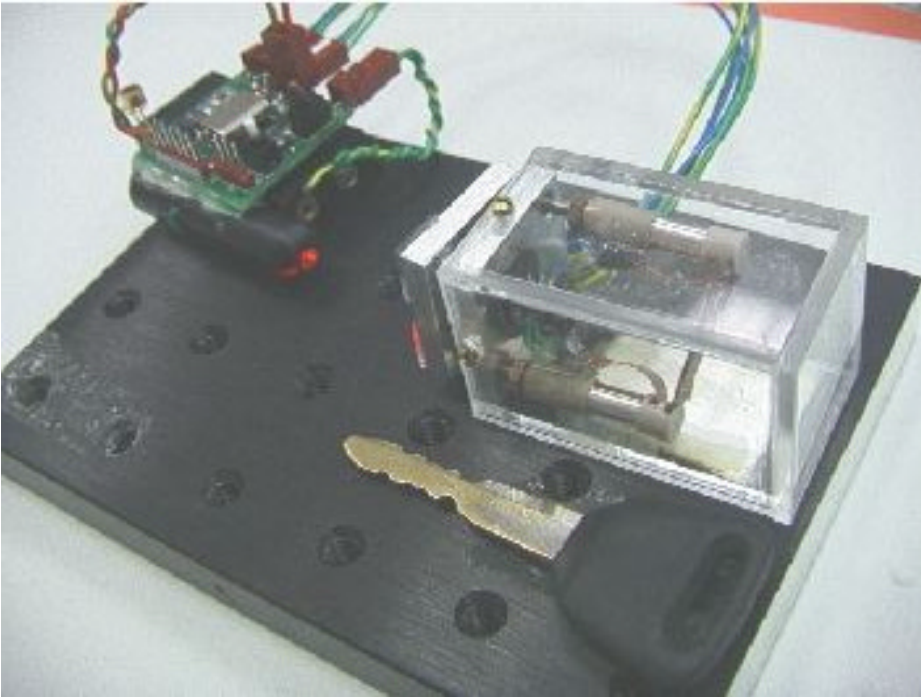
**Kommunikation:**  
RF 916.5 MHz OOK  
10kbps auf 20m Entfernung

**Bemerkung:**  
Miniaturisierte Version des RF Motes



# MALT (Macro Active Laser Transmission)

---



**Sensoren:** Licht

**Kommunikation:**

- Laserkommunikation
- Integrierte CCD Kamera

(Steerable Laser Beam  
Communication)

**Bemerkung:**

Anhand des MALT werden Algorithmen entwickelt, mit denen die Motes befähigt werden, sich gegenseitig zu lokalisieren und zu „verständigen“, auch ohne von vornherein zu wissen, wo sich die jeweils andere Einheit befindet.

# Laser Mote

---

## Sensoren:

Temperatur, Licht, Druck, Feuchtigkeit

## Kommunikation:

Über Laser Modul:

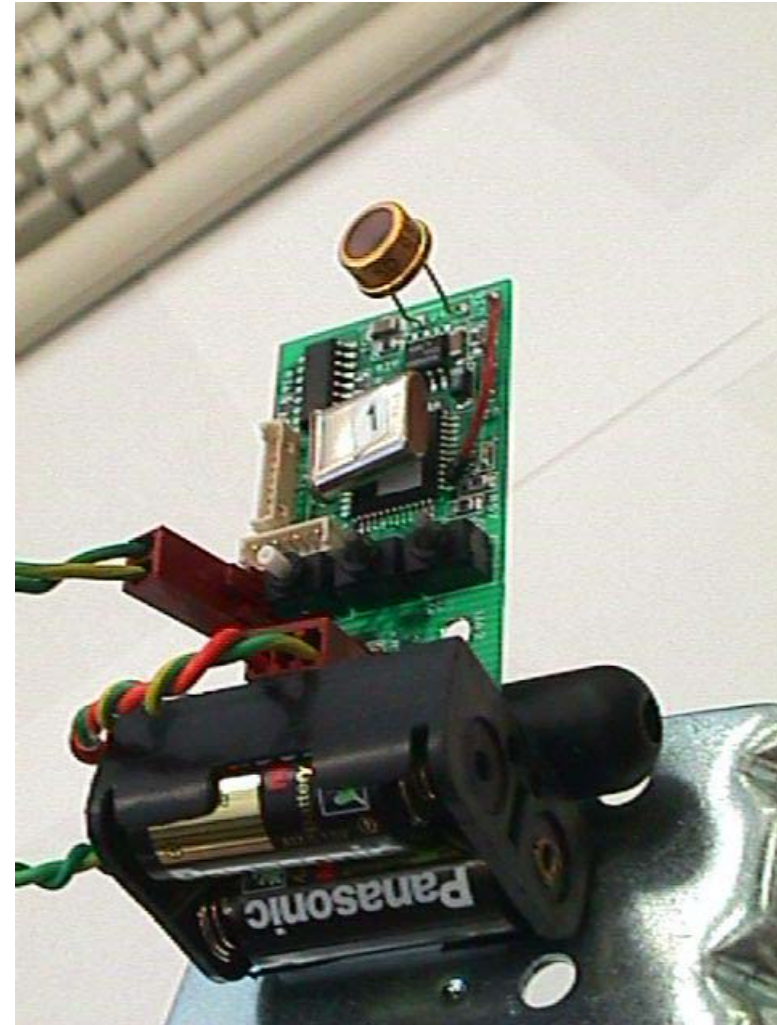
-3 mW optische Übertragung

-150 mW elektrische Leistung

-Momentan bis zu 21 km Reichweite

## Besonderheiten:

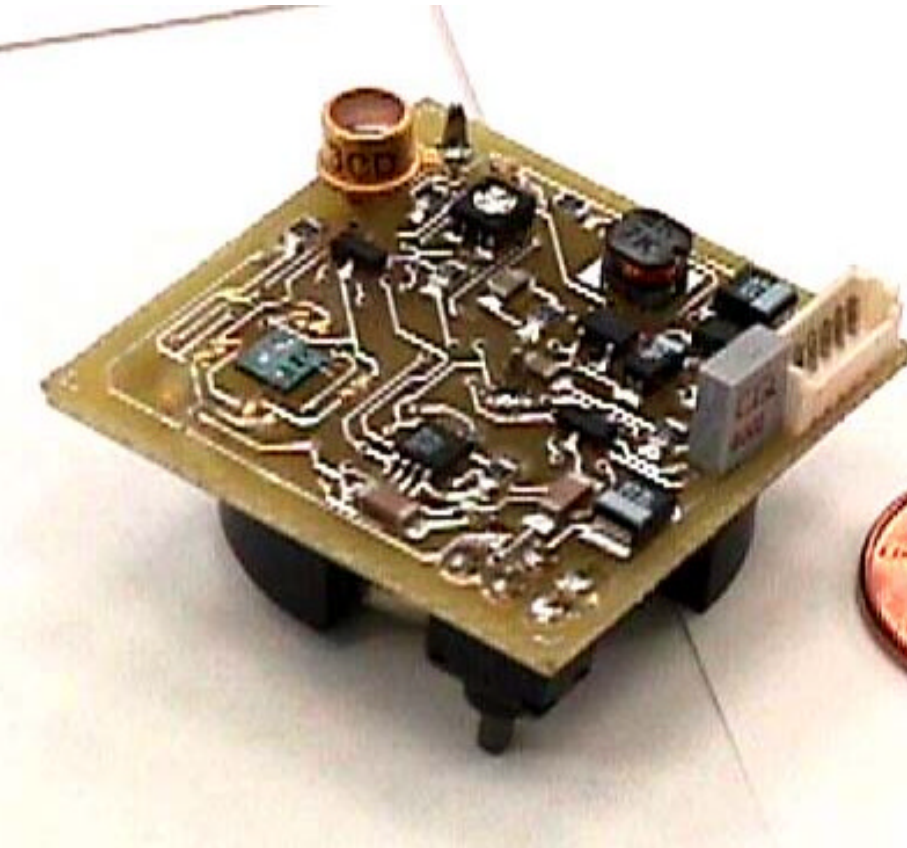
entwickelt um die Kommunikation auf langen Reichweiten zu demonstrieren



# CCR Mote

---

**Sensoren:** Temperatur



**Kommunikation:**

Corner Cube Reflector (CCR) /  
Light Receiver Communication.  
Die Reichweite wird als Funktion  
durch die Lichtintensität des  
Lasers bestimmt



**Bemerkungen:**

Testplattform, um  
Kommunikations-  
algorithmus zu  
demonstrieren

# weC Mote

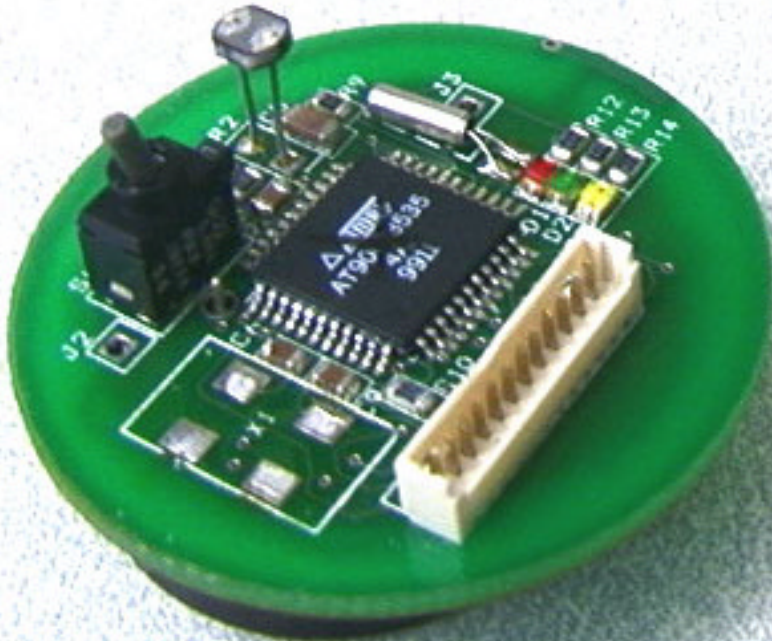
---

**Sensoren:** Licht, Temperatur

**Kommunikation:**

RF 916.5 MHz OOK

10kbps auf 20m Entfernung



**Besonderheiten:**  
Kann über Funk  
neu programmiert  
werden

# IrDA Mote

---

**Sensoren:** Temperatur

**Kommunikation:** IrDA

**Besonderheiten:**

entwickelt, um mit anderen  
(kommerziellen) Geräten  
über die Infrarotschnittstelle  
Daten auszutauschen

