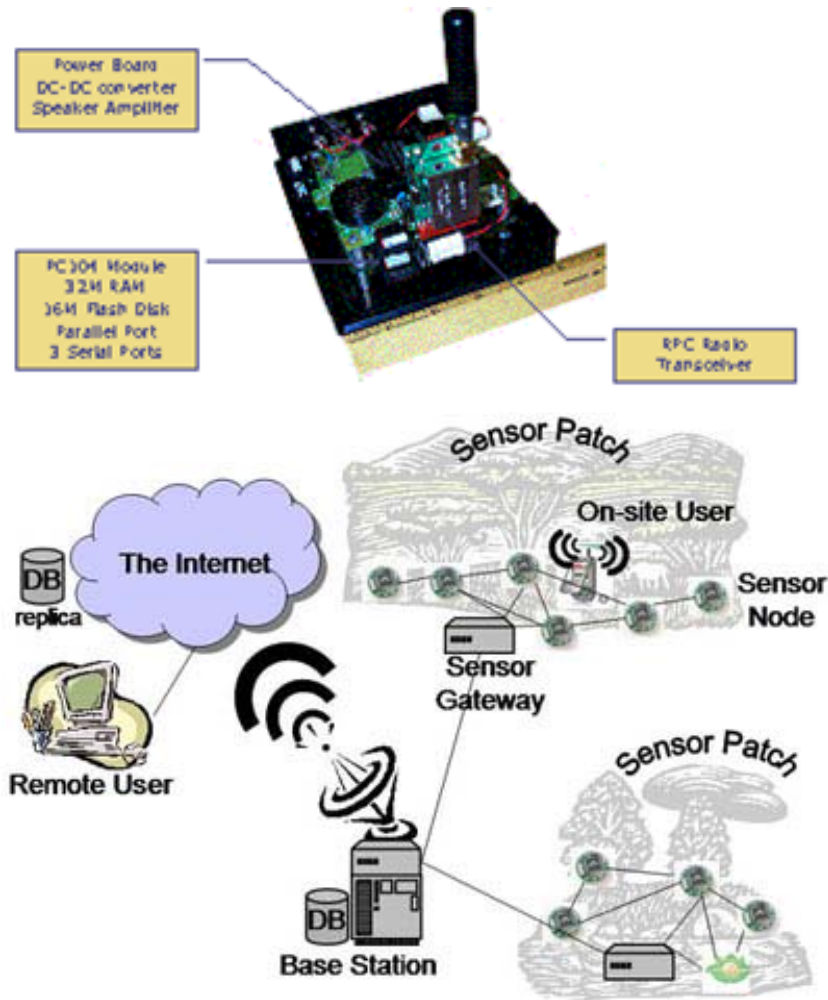


# Energieeffiziente, drahtlose Sensornetze

## Auswirkung der Hardware auf das Protokolldesign

Hao ZHOU

April 2003



- Motivation
- Energiemodell
- Node-level Energieoptimierung
  - Radiotechnologie
  - MCU
  - Optimierungsalgorithmus
- Netzwerk-level Energieoptimierung
  - Netzwerktopologie
  - Routingalgorithmus
- Frage

## Motivation

### Batteriebetriebene Systeme:

- Batterie besitzt begrenzte Menge an Energievorrat
- Unmöglichkeit des Nachladens der Batterie

Batterie-/Akkutyp	Energiedichte
Nonrechargeable lithium	2880 J/cm <sup>3</sup>
Zinc-air	3780 J/cm <sup>3</sup>
Alkaline	1190 J/cm <sup>3</sup>
Rechargeable lithium	1080 J/cm <sup>3</sup>
Nickel metal hydride (NiMHd)	864 J/cm <sup>3</sup>
Fuel cells (based on methanol)	8900 J/cm <sup>3</sup>
Hydrocarbon fuels	10500 J/cm <sup>3</sup>

*Neben der Größe ist der geringe  
Energieverbrauch die bedeutendste  
Herausforderung bei der Entwicklung  
von drahtlosen Sensornetzwerken:*

L. Doherty et al., "Energy and Performance Considerations for Smart Dust," *Int'l J. Parallel Distributed Systems and Networks*, vol. 4, no. 3, 2001, pp. 121–133.

## Alternative Lösung: Energy Harvesting

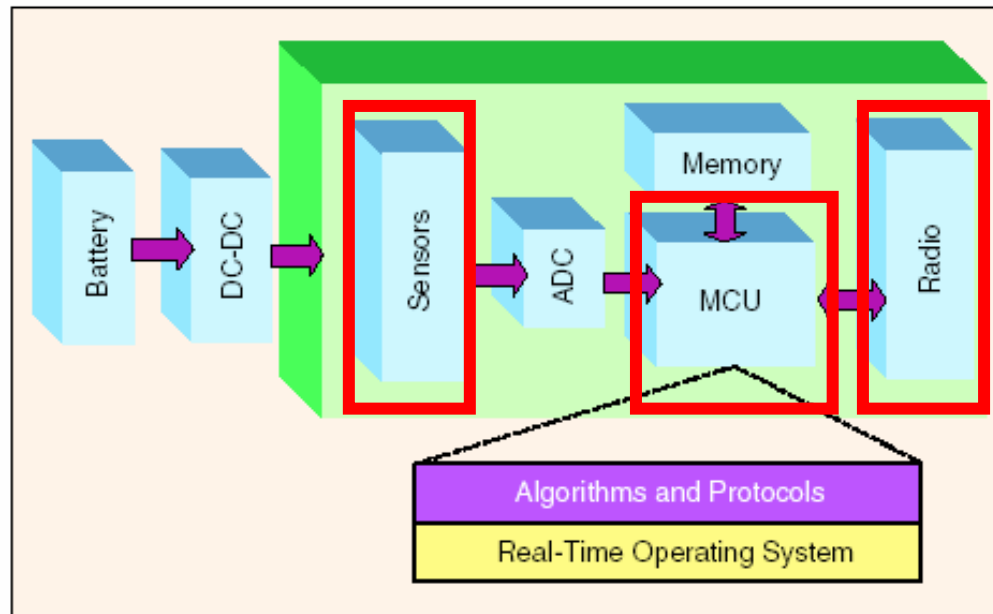
- Low Power Ansatz
- Idealfall: Sensorknoten erzeugen sich benötigte Energie selbst

Energiequelle	Leistungsdichte
Solar (outdoors, midday)	15 mW/cm <sup>2</sup>
Vibrations (from microwave oven casing)	200 uW/cm <sup>3</sup>

–Zum Vergleich:

- Nominale Sendeleistung eines Klasse-2-Bluetooth-Gerätes:  
**1mW**

# Energiemodelle

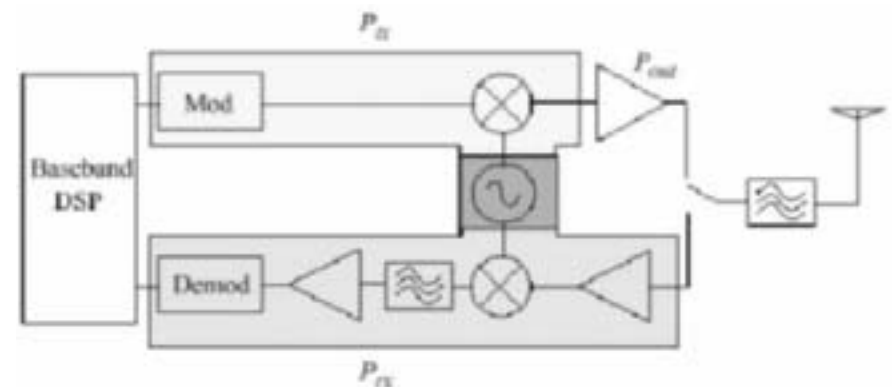


▲ 1. System architecture of a typical wireless sensor node.

*Quelle: Vijay Raghunathan, Curt Schragers,  
Sunf Park and Mani B.Srivastava  
Energy-Aware Wireless Microsensor Networks*

## 3 Energieverbrauchsgebiete

- Sensor (vernachlässigbar)
- Datenverarbeitung
  - Data-Fusion
  - Pre-Processing
- Kommunikation
  - Senden
  - Empfangen



## Energiemodelle -- MCU

$$P_P = CV_{dd}^2 f + V_{dd} I_0 e^{V_{dd} / n' V_T}$$

Leistungsaufnahme  $P_P$  einer Processing-Einheit

$C$  = Schaltkapazität (switching capacitance)

$V_{dd}$  = Spannungshub (voltage swing)

$f$  = Schaltfrequenz (switching frequency)

- Switching-Energy
  - Interne Zustände (*Active, Idle, Sleep*)
- Leakage-Energy

→ Leakage-Energy entscheidende

## Energiemodelle - Kommunikation

$$P_c = N_{Tx} \left[ P_{Tx} (T_{on} + T_{st}) + P_{out} (T_{on}) \right] + N_{Rx} \left[ P_{Rx} (R_{on} + R_{st}) \right]$$

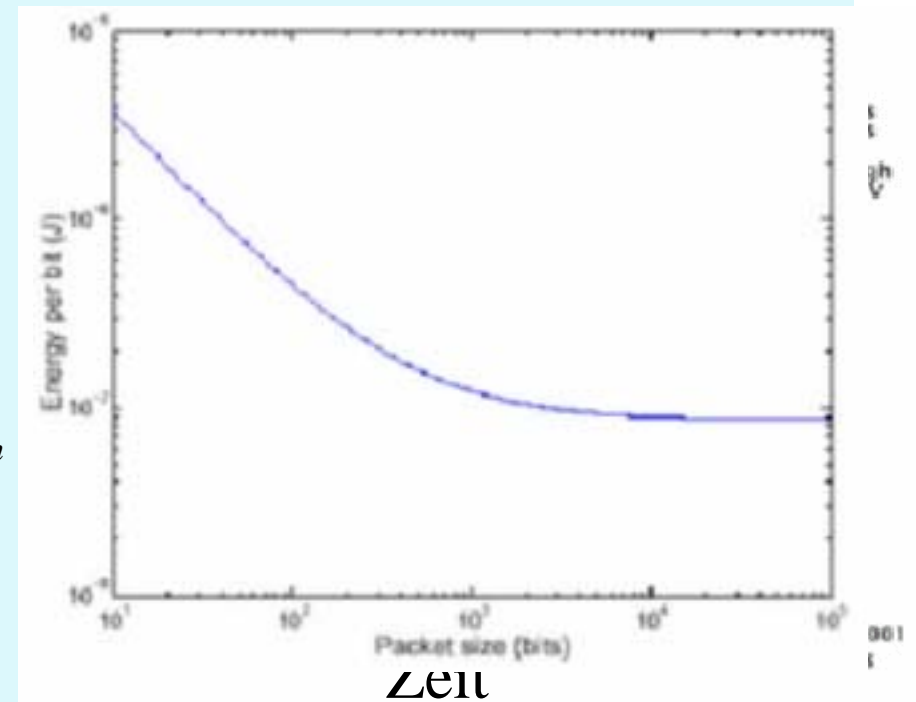
- $E_{Tx} = E_{Rx}$  für kurze Übertragungswege und geringe Sendeleistung ( $\sim 1$  mW)
- Leistung  $P_c$  einer RF-Kommunikationseinrichtung

$P_{Tx/Rx}$	=	Leistungsaufnahme des Transmitter/Receiver
$P_{out}$	=	Sendeleistung des Transmitter
$T/R_{on}$	=	Transmitter/Receiver Betriebszeit
$T/R_{st}$	=	Transmitter/Receiver Startzeit
$N_{Tx/Rx}$	=	Anzahl der Einschaltvorgänge je Zeiteinheit

## Energiemodelle – Kommunikation (fort.)

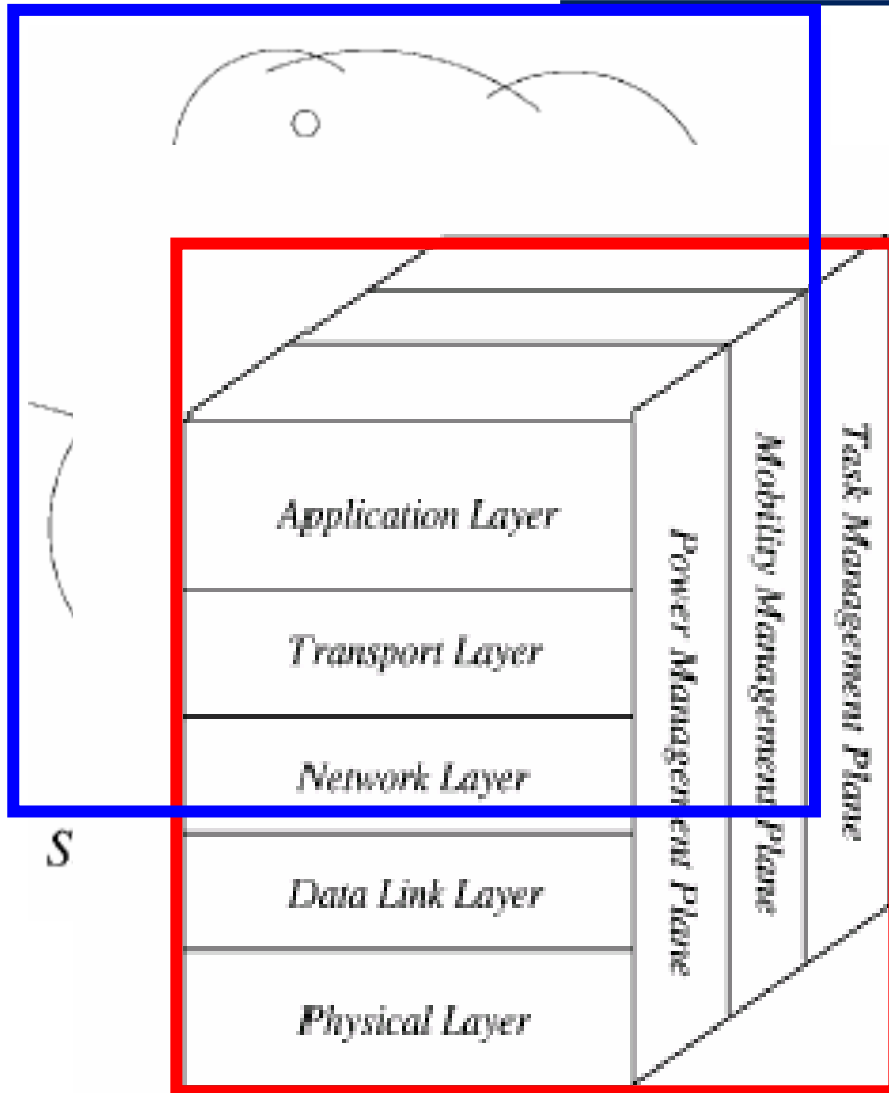
$$P_c = N_{Tx} [P_{Tx} (T_{on} + T_{st}) + P_{out} (T_{on})] + N_{Rx} [P_{Rx} (R_{on} + R_{st})]$$

- Interne Zustände:
  - *Transmit*
  - *Receive*
  - *Idle*
  - *Sleep*
- $T/R_{st}$  (nicht) vernachlässigbar gegen  $T/R_{on}$

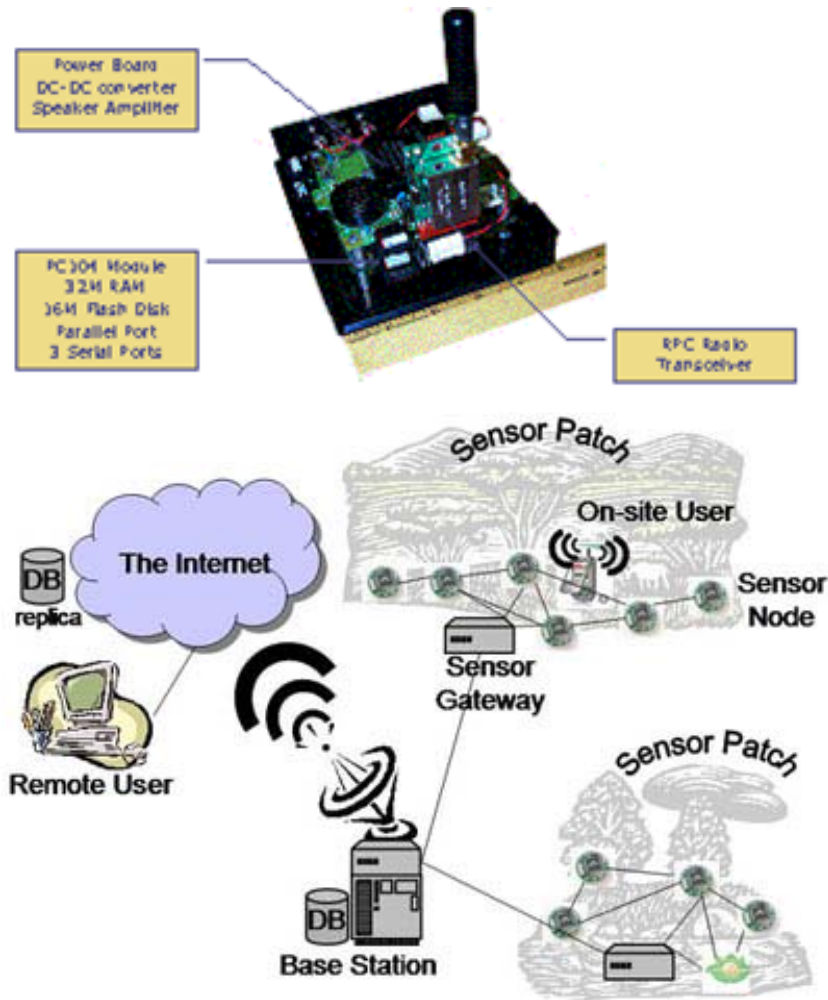




## Protokollstack und Entwurfskriterien



- 2 Kategorien
- Knotenebene (Node-level)
  - *Radiotechnologie*
  - *Prozessor*
  - *Optimierungsalgorithmus*
- Netzwerkebene (Network-level)
  - *Routingalgorithmus*
  - *Berechnungsalgorithmus*



- Motivation
- Energiemodell
- **Node-level Energieoptimierung**
  - Radiotechnologie
  - MCU
  - Optimierungsalgorithmus
- Netzwerk-level Energieoptimierung
  - Netzwerktopologie
  - Routingalgorithmus
- Frage

## Physikalische Schicht

### Aufgaben:

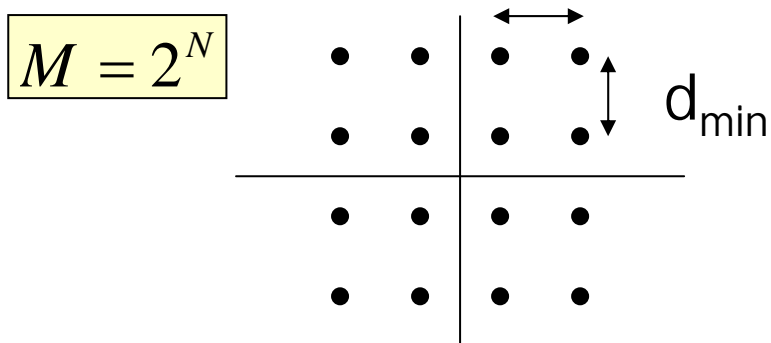
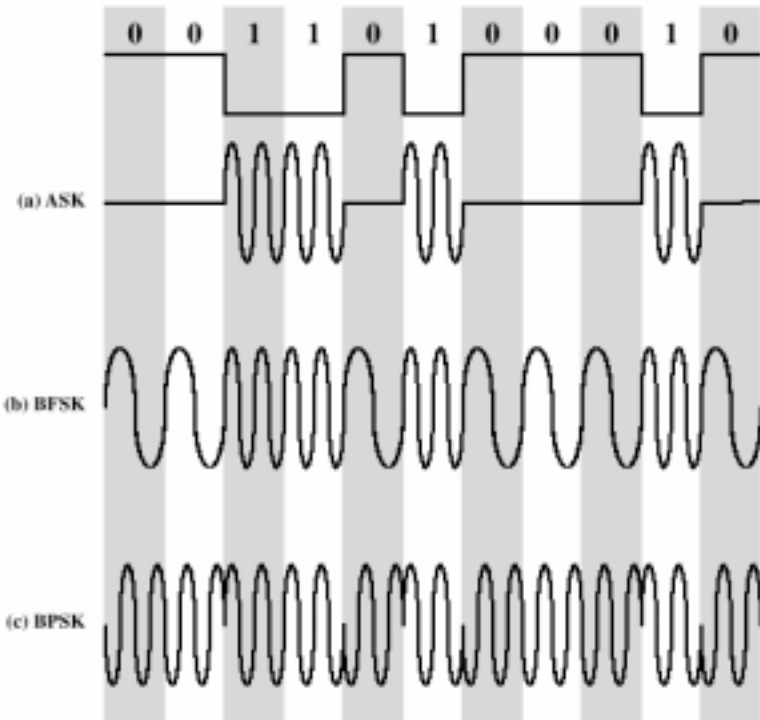
- Auswahl des Kommunikationsmittels
  - aktive Funkwellen
  - aktive/passive optische Kommunikation
- Erzeugung der Trägerfrequenz
- Signalerkennung
- Modulation
- Verschlüsselung

$$E_{bit} * L = E_{tx} \sim d^n$$

	PicoRadio	Bluetooth	WLAN
Carrier Frequency (GHz)	1.9	2.4	2.4
Reichweite (m)	<10	1-100	30-300
Datenrate(kbit/s)	1	732,2	2000
Stromverbrauch	<100 $\mu$ W	50 mA	< 1A

- $E_{bit}$
- Distanz  $d$ 
  - $n$  = Path Loss Exponent (Dämpfung)
  - $n = 2 \rightarrow$  theoretischer Wert für Freiraum
  - Real:  $n > 3$  (etwa  $n=4$  nahe am Boden)
- Frequenzauswahl
  - ISM (Industrial, Scientific, Medical)
  - High vs. Low carrier frequency
    - Bandbreite
    - Reichweite
- Modulationsschema
  - Binary
  - M-ary

# Binary vs. M-ary Modulation



4-QAM 2-dimensional signal space

- Modulation: Digital  $\rightarrow$  Analog
- Binary Modulation
  - ASK (Amplitude Shift Keying)
  - BFSK (Frequency Shift Keying)
  - BPSK (Phase Shift Keying)
- M-ary Modulation
  - QAM (Quadrature Amplitude Modulation)
    - 2D signal space
    - Sendeleistung, De-Modulation, Fehlererkennung
  - MFSK
  - MMPSK

- Energy-Aware MAC Protokolle
  - Overhearing
  - **PAMAS** [S.Singh,2000]
    - Separate Signaling-Kanal
    - Transceiver abschalten wenn nicht gebraucht
  - Signal vs. Packetgrösse
- Fehlerkontrolle
  - Fehlererkennung vs. Fehlerkorrektur
  - **FEC (Forward Error Correction)**
    - bevorzugt im Sensornetze
    - Hamming Code

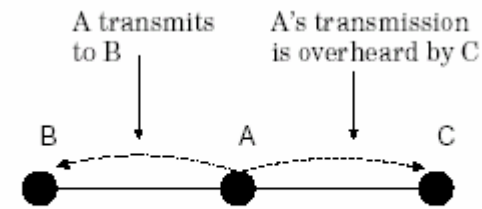


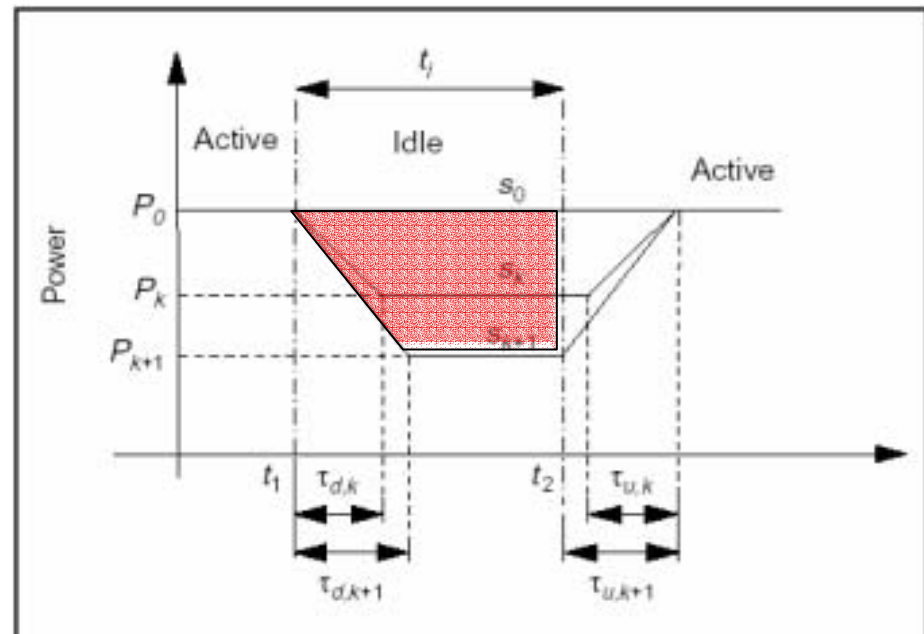
Figure 1: Unnecessary power consumption.

- MCU Auswahl
  - Atmel AVR, XScale, ARM Thumb, Strong ARM
  - Performance vs. Energieverbrauch
    - 2.1nJ/Instruction for ARM Thumb@40 MHz
    - 1.1nJ/Instruction for Xscale@400 MHz

Table 1. Power Analysis of Rockwell's Wins Nodes.

MCU Mode	Sensor Mode	Radio Mode	Power (mW)
Active	On	Tx (Power: 36.3 mW)	1080.5
		Tx (Power: 19.1 mW)	986.0
		Tx (Power: 13.8 mW)	942.6
		Tx (Power: 3.47 mW)	815.5
		Tx (Power: 2.51 mW)	807.5
		Tx (Power: 0.96 mW)	787.5
		Tx (Power: 0.30 mW)	773.9
		Tx (Power: 0.12 mW)	771.1
Active	On	Rx	751.6
Active	On	Idle	727.5
Active	On	Sleep	416.3
Active	On	Removed	383.3
Sleep	On	Removed	64.0
Active	Removed	Removed	360.0

- Dynamic Power Management
  - Node-level Zustände
  - Ca. 1/6 Energie verbräuche im Sleep Mode





$$E \approx C \cdot W \cdot V^2$$

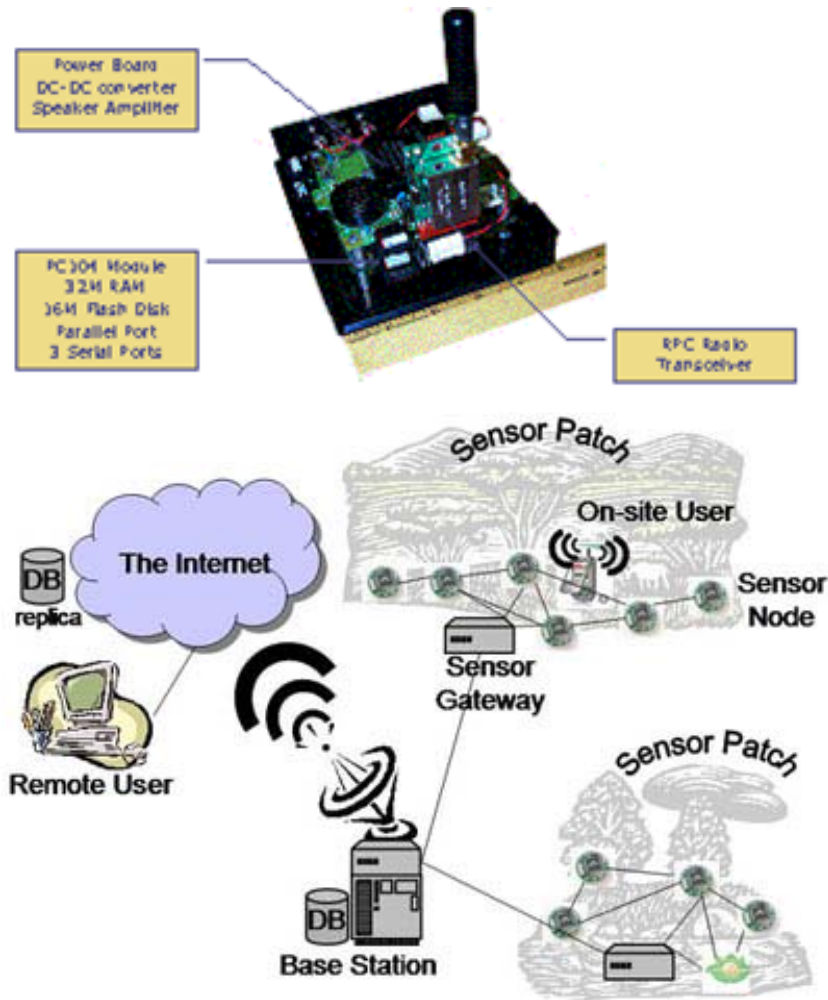
E = Energy Consumption of a program

C = effective Switching Capacity

W = number of execution cycles (Anzahl Instruktionen)

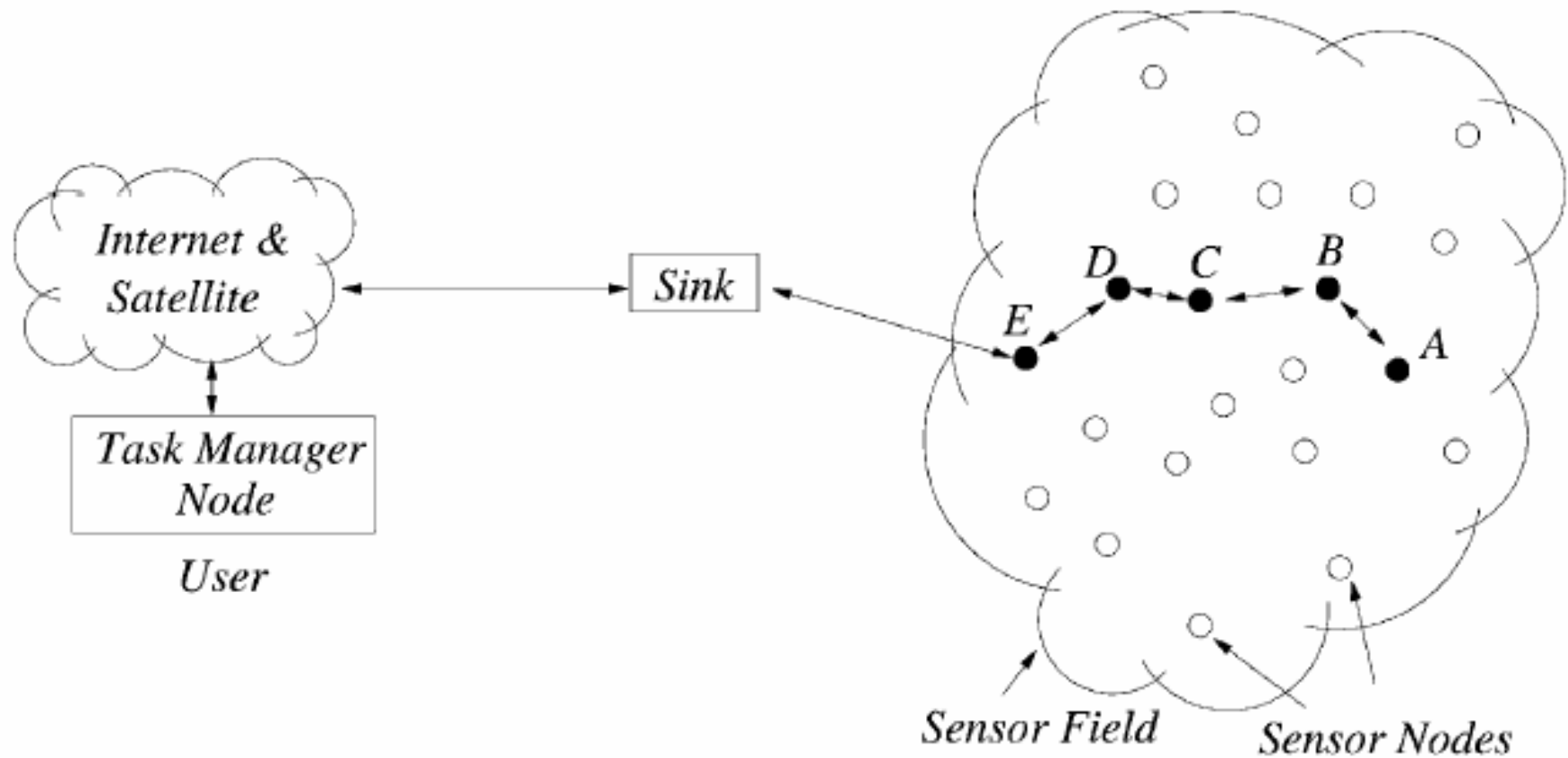
V = supplied Voltage

- Dynamic Voltage Scaling
  - Spannung dynamisch reduzieren je nach Workload
  - Quadratische Verringerung der Energie
- Code Optimierung



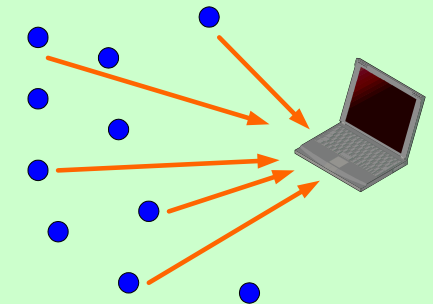
- Motivation
- Energiemodell
- Node-level Energieoptimierung
  - Radiotechnologie
  - MCU
  - Optimierungsalgorithmus
- **Netzwerk-level Energieoptimierung**
  - **Netzwerktopologie**
  - **Routingalgorithmus**
- Frage

# Network-level Energieoptimierung



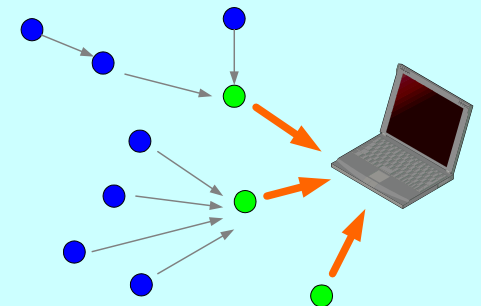
- Direkte Übertragung (Sternförmig)

$$E_{dt} = \sum_{i=1}^N E_{elec_i} k_i + \varepsilon_{amp_i} k_i d_i^\lambda$$



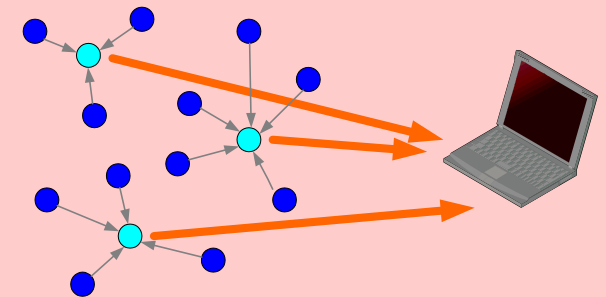
- Multihop (Baumförmig)

$$E_{mt} = \sum_{i=2}^{H-1} (E_{Rx_g} + E_{Tx_g}) + E_{Tx_1} + E_{Tx\_toBS}$$

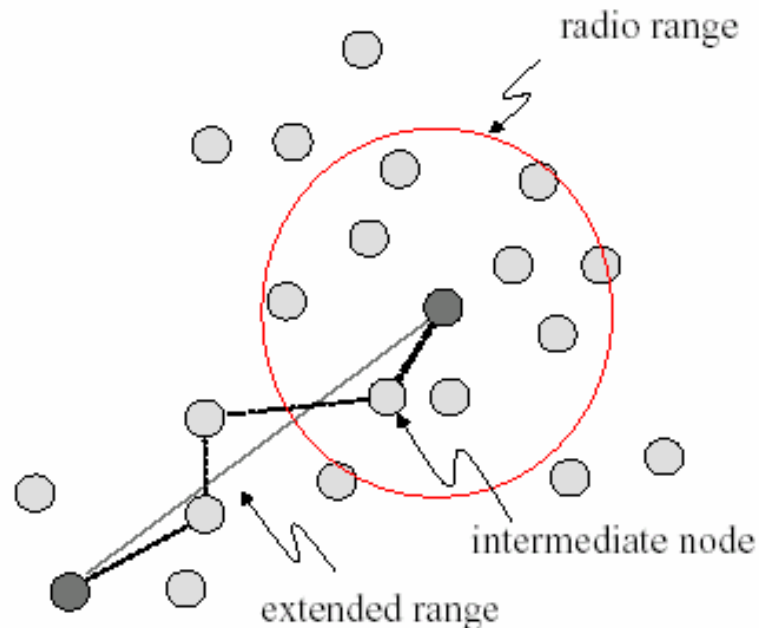


- Clustering

$$E_{ct} = l E_{cluster} = l \left( E_{CH} + \frac{N}{l} E_{non-CH} \right)$$



## Energieeffizienz: Stern vs. Baum

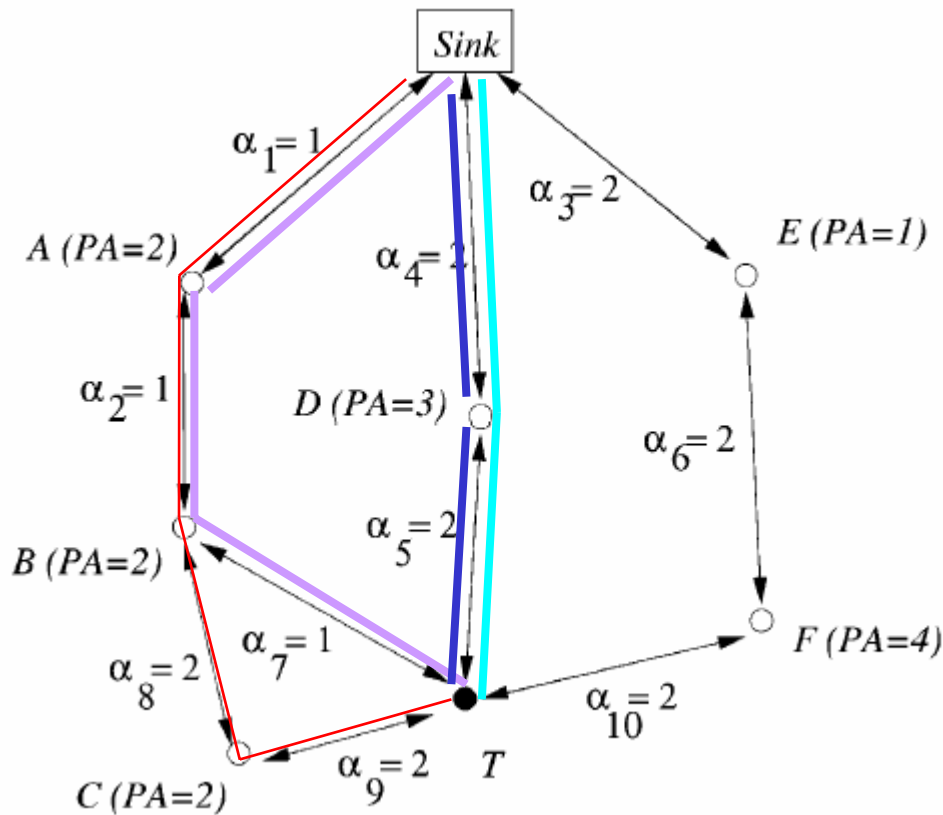


Bsp:

- 1 hop über 50 m: 1.25 nJ/bit
- 5 hops je 10 m:  
 $5 * 2 \text{ pJ/bit} = 10 \text{ pJ/bit}$
- Multi-hop reduziert  
Energieverbrauch um 125%!  
Achtung! Empfangsenergie nicht berücksichtigt

Baumförmig Netzwerktopologie energieeffizienter

# Multihop-Multipath-Routing



T = Datenquelle

PA= verfügbare  
Energie im  
Knoten

$\alpha$ = benötigte  
Übertragungs-  
energie

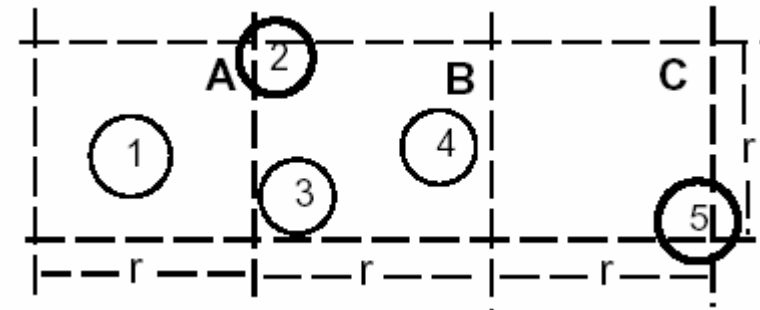
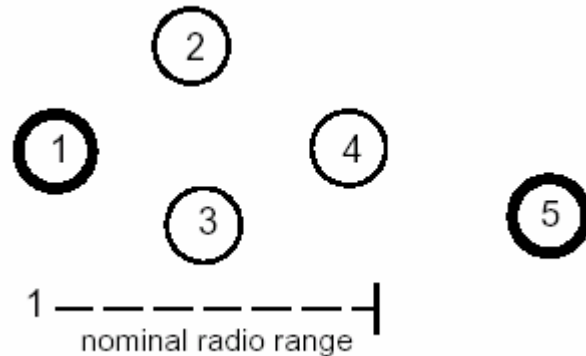
## Strategien:

Maximum Available Power

Minimum Energy

Minimum Hop

Maximum Minimum PA



- Problem bei bestehende Protokolle
  - Trotz Idle-Zustand viele Energie verbraucht
  - Überlappung der Sensor-Area
- GAF (Geographical Adaptive Fidelity)
  - Virtual Grids
  - Ausschalten unbenutzte Radioanteil
- Node self-scheduling algorithm
  - Ausschalten überlappende Sensoren

## Zusammenfassung

- Energieeffiziente Protokolle gefordert in Sensornetze
- Entwurfskriterien:
  - MCU
  - Kommunikationstechnologie:
    - Frequenzwahl, Modulationsschema, MAC-Protokoll, Fehlerkorrektur
    - Schalten zwischen internen Zuständen (DPM)
    - Routing-Algorithmus nach Netzwerktopologie