

ETH
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zürich

inf Informatik
Computer Science

Building a Distributed System with Embedded Devices and Sensors

René Müller muellren@inf.ethz.ch
Prof. Gustavo Alonso alonso@inf.ethz.ch
Institut für Pervasive Computing

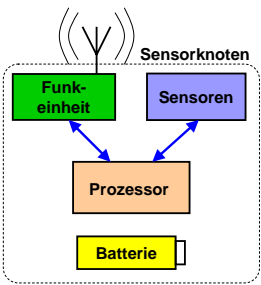


© ETH Zürich | Information and Communication Systems Research Group 8.12.2007

ETH
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zürich

Drahtlose Sensornetze


- Ad-hoc Netzwerk aus Sensorknoten
 - 10/100/1'000/10'000 ???
- Def: Sensor-Knoten = ein Prozessor + eine Funkeinheit + einige Sensoren + eine Batterie
- Sensorknoten sind
 - Klein (wenige cm³)
 - Billig (CHF 150 - ...) ???



8.12.2007 René Müller/mueller@inf.ethz.ch 2

ETH
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zürich

Sensorknoten



<p>BTnode (ETH Zürich)</p> <ul style="list-style-type: none"> CPU: ATmega, 8MHz Flash-Speicher: 128kB RAM: 4kB (intern) + 256kB (extern) Funk: CC1000 (76kbps) + Bluetooth 	<p>tmote sky (Moteiv)</p> <ul style="list-style-type: none"> CPU: MSP430, 1MHz Flash-Speicher: 48kB RAM: 10kB (intern) Funk: CC2420 (250 kbps, IEEE 802.15.4)
---	--

8.12.2007 René Müller/mueller@inf.ethz.ch 3

ETH
 Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
 Swiss Federal Institute of Technology Zürich

Anwendungen

- Überwachen/Messen/Kontrollieren der Umgebung
 - Zivil/Militär
 - Naturwissenschaften (Biologie, Geologie, ...)
 - Bau und Architektur (Intelligente Häuser, Brücken, etc.)

Landwirtschaft



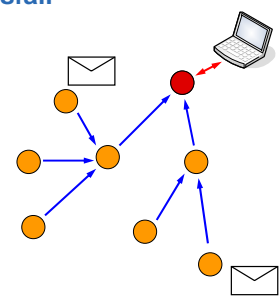
Baustatik Schweinemast Seismik

6.12.2007 René Müller-mueller@inf.ethz.ch 4

ETH
 Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
 Swiss Federal Institute of Technology Zürich

Häufiger Anwendungsfall

- Sensorknoten, die phys. Grösse X messen, werden verteilt
- Gemessene Daten werden auf PC/PDA aufgezeichnet od. weiter verschickt.
- PC/PDA/... via Sensor mit Sensornetz verbinden
- Knoten bauen Ad-hoc Netzwerk auf (z.B., Baum)
- Knoten senden periodisch Messungen an PC/PDA.



6.12.2007 René Müller-mueller@inf.ethz.ch 4

ETH
 Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
 Swiss Federal Institute of Technology Zürich

Inhalt

- Sensornetze
 - Herausforderungen
 - Aspekte aus "Verteilte Systeme"
- Routing-Bäume
- Aggregation von Messwerten im Netzwerk
- SwissQM Demo
 - Virtuelle Maschine für Sensornetze
 - Verarbeitung von kontinuierlichen Queries

6.12.2007 René Müller-mueller@inf.ethz.ch 6

ETH
 Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
 Swiss Federal Institute of Technology Zürich

Herausforderungen

- Ressourcen-Knappheit
 - Energie/Batterie (J)
 - Speicher (kB) / Rechenleistung (MIPS)
 - Kommunikations-Bandbreite (bit/s)
- Fehlertoleranz und Robustheit
 - Ausfall einzelner Knoten
- Skalierbarkeit
 - Netzwerkgrößen: 10, 100, 1'000, ...

6.12.2007 René Müller-mueller@inf.ethz.ch 7

ETH
 Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
 Swiss Federal Institute of Technology Zürich

Problem #1: Energie

- Sensorknoten sind batteriebetrieben
- Austausch der Batterien ist meist nicht praktikabel.
- Energie für Sensorknoten: aus 2x AA Alkali-Batterien
E ≈ 17 kJ (= 4 kcal)

[Duracell PLUS, 250 mA Entladestrom bis 0.9 V Klemmspannung]

Vergleich
 Energieinhalt eines Hamburgers



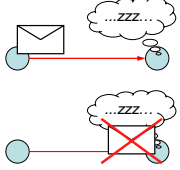
© McDonalds
E ≈ 3556 kJ (= 850 kcal)
 [Quelle: BigMac, McDonalds]

6.12.2007 René Müller-mueller@inf.ethz.ch 4

ETH
 Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
 Swiss Federal Institute of Technology Zürich

Energie Management

- Verbraucher (Bsp. tmote sky):
 - Prozessor (≈0.8-3 mA)
 - Sensoren (≈1 mA)
 - Funkeinheit (Senden oder Empfänger an ≈ 20mA)
- **Energiesparen:** zur Zeit nicht benötigte Verbraucher ausschalten
- **Tastgrad** (duty cycle) = Dauer "An"-Phase / Gesamtdauer
 - 100% immer "An"
- Grösster Verbraucher ist Funkempfänger! ← optimieren
- An/Aus-Phasen der Empfänger müssen synchronisiert sein
 - Logische Zeit (Lamport) alleine reicht hier nicht!
 - Synchronisation der Uhren nicht der Zeitstempel von Nachrichten



6.12.2007 René Müller-mueller@inf.ethz.ch 9

ETH
 Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
 Swiss Federal Institute of Technology Zürich

Synchronisation der Knoten

- Auch An/Aus-Phasen innerhalb des Netzwerk-Stacks muss koordiniert sein.
 - Applikation sendet periodisch Messungen
 - Routing Layer sendet Routing Tabelle an Nachbarn (periodisch oder auf Anfrage)
 - MAC Layer: Collision Avoidance, Random Back-off, etc.
- Wann die Funkeinheit ein/ausschalten? Wer darf das? → Cross-Layer Optimierungen

8.12.2007 René Mülle/mueller@inf.ethz.ch 10

ETH
 Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
 Swiss Federal Institute of Technology Zürich

Uhren-Synchronisation

"Beacon" Knoten

Paarweise Synchronisation

- Periodisches Beacon ohne Zeitangabe dient zur Synchronisation.
- Nach Empfang des Beacons sendet jeder seine lokale Zeit.
- Knoten passen Schedule an, d.h. wann Nachbar "wach" ist eine Meldung empfangen kann.

- A sendet Nachricht $m_1 = (ta_1)$ mit Zeitstempel ta_1 .
- B empfängt m_1 zu Zeit tb_1 .
- B sendet $m_2 = (ta_1, tb_1, tb_2)$.
- A empfängt m_2 zu ta_2 .
- A berechnet relativen Drift Δ und mittlere Laufzeit d

$$\Delta = \frac{(tb_1 - ta_1) - (ta_2 - tb_2)}{2}, d = \frac{(tb_1 - ta_1) + (ta_2 - tb_2)}{2}$$

8.12.2007 René Mülle/mueller@inf.ethz.ch 11

ETH
 Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
 Swiss Federal Institute of Technology Zürich

Uhren-Synchronisation (Forts.)

Hierarchisch

GPS

- Kindknoten synchronisieren mit Elternknoten (paarweise).
- $O(n)$ Meldungen für Synchronisation
 - $O(n^2)$ wenn paarweise jeder mit jedem
- Hierarchie Konzept ähnlich zu Strata (NTP Protokoll aus dem Internet)
- Sensorknoten haben GPS Empfänger.
- Zeitinformation aus GPS Signal
- GPS Empfänger immer noch gross und teuer
- Mischformen GPS + hierarchische Synchronisation (wie NTP)

8.12.2007 René Mülle/mueller@inf.ethz.ch 12

ETH
 Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
 Swiss Federal Institute of Technology Zürich

Problem #2: Speicher

- Speicher für Programm und Daten ist stark begrenzt.
- Beispiel Tmote Sky Node**
 - 10 kB RAM für Programdaten (Stack, Heap)
 - 48 kB Flash-Speicher für Programmcode
 - 1 MBit serieller Flash-Speicher (z.B. für Messungen, nicht als Programmspeicher verwendbar)
- Nicht alles aus dem Desktop/Serverbereich ist auf Sensornetze übertragbar
- Beispiel**
 - TCP/IP → nanoIP/nanoTCP (nanoIP+nanoTCP: 300B RAM, 1kB Flash)
 - Multithreading nur eingeschränkt möglich (Speicher für Thread-Context)

6.12.2007 René Müller-mueller@inf.ethz.ch 13

ETH
 Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
 Swiss Federal Institute of Technology Zürich

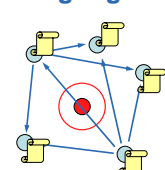
Problem #3: Drahtlose Übertragung

- Kommunikation**
 - Drahtlos
 - (Energie-)sparsam
 - Billige Komponenten
- Technologien**
 - WLAN (802.11): meist zu teuer (Kosten/Energie)
 - Bluetooth (802.15.1): möglich, Protokoll komplex
 - „ZigBee“ (802.15.4): einfaches Protokoll, geringe Datenraten (theoretisch bis 250 kbps)
 - Proprietäre Lösungen
- Drahtlos**
 - Interferenz unter den Knoten
 - Störemissionen von aussen
 - Gleiches 2.4-GHz-Band für WLAN, Bluetooth, ZigBee, Garagentoröffner und Mikrowellengeräte(!)
 - Fehlerrate bei Funkübertragung ist um ein Vielfaches grösser als z.B. bei Ethernet.
 - Carrier Sense (CA): möglich und sinnvoll
 - Collision Detection (CD): gleichzeitiges Senden und Empfangen schwierig

6.12.2007 René Müller-mueller@inf.ethz.ch 14

ETH
 Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
 Swiss Federal Institute of Technology Zürich

Übertragungs-Charakteristik (Experiment)



Setup

- 33 Knoten Testbed in CAB F31
- 1 Beacon-Knoten
- Gegenseitiges Senden von „Ping“ Nachrichten
- Pro Runde werden $32 \times 31 = 992$ Nachrichten versendet

Beacon-Knoten:

- Zu Beginn jeder Runde, Broadcast des Beacons mit max. Leistung an alle.

Nach Empfang des Beacons:

- Stellen Runden-Uhr
- Erzeugen Zufallspermutation der Liste aller (32-1) Knoten.
- Senden „Ping“-Nachricht sequentiell an alle Knoten in der Liste.

Knoten j empfängt Ping von i

- Notieren sich Sender i in Sender-Vektor s_j ($s_{jj} = 1$)

Nach Ablauf der Runden-Uhr

- Loggen Sender-Vektor

6.12.2007 René Müller-mueller@inf.ethz.ch 15

ETH
 Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
 Swiss Federal Institute of Technology Zürich

Adjazenz-Matrix

Graphische Darstellung von $M^{(t)}$

- Sender-Vektoren s_i bilden Adjazenz-Matrix $M = (s_1, \dots, s_{32})$
- $M_{ij} = s_{ij}$
- $M_{ij}^{(t)} = \begin{cases} 1 & \text{erfolgreiche Nachricht } i \rightarrow j \text{ in Runde } t \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$
- Darstellung des Verbindungsgraphen: Kante von $i \rightarrow j$ wenn $M_{ij} = 1$.
- Diagonale jeweils 0 \rightarrow Knoten senden keine Nachricht an sich selbst.

0: schwarz, 1: weiss

6.12.2007 René Müllemann@inf.ethz.ch 16

ETH
 Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
 Swiss Federal Institute of Technology Zürich

Adjazenz-Matrix (Forts.)

Arithmetisches Mittel

- Aus 170 Runden
- Empfangene Nachrichten (Mittel): 197.6/Runde
- Versendet: $32 \times 31 = 992$ /Runde
- Mittlere Übertragungs-Wsk: ≈ 0.2
- Matrix ist nicht symmetrisch!
 $\|M\|_2 \approx 6, \|M - M^T\|_2 \approx 2$
 $i \rightarrow j \not\Rightarrow j \rightarrow i$

Beachte

- Unrealistisches Kommunikations-Szenario: $O(n^2)$ Nachrichten
- Kein Scheduling der Nachrichten, nur Zufallspermutation
- Soll Problematik illustrieren

0: schwarz, 1: weiss

6.12.2007 René Müllemann@inf.ethz.ch 17

ETH
 Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
 Swiss Federal Institute of Technology Zürich

#4 Robustheit

- Sensor-Knoten sind unzuverlässig
 - Restkapazität der Batterien zu gering \rightarrow **Fail-Stop**
 - Nachricht „verloren“ \rightarrow **Omission**
 - Hardwaredefekt (Wassereinschluss, Feuchtigkeit, Vögel) \rightarrow **Fail-Stop/Crash/byzantinische Fehler**

Beispiel

- Statischer (fest-codierter) Baum.
- 3 Quellen-Knoten erzeugen Datenstrom
- Knoten nahe der Senke stärker belastet als Knoten nahe einer Quelle \rightarrow Brauchen grössere Batterie oder fallen schneller aus
- Statisch \rightarrow kein Recovery \rightarrow Fail-Stop
- Besser keine stat. Strukturen (ad-hoc)

6.12.2007 René Müllemann@inf.ethz.ch 18

ETH
 Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
 Swiss Federal Institute of Technology Zürich

Routing-Topologien in Sensornetzen

- Art der Kommunikation
 - Basisstation → Knoten
 - Knoten → Basisstation**
 - Knoten → Knoten
- Ziel i.d.R. nicht direkt erreichbar
 - Zu weit entfernt/Sendeleistung zu gering
 - Direkter Link → zu grosse Interferenz
- Weiterleiten von Meldungen (**Multihop Routing**)

Netzwerk-Struktur

- Flach**
- Hierarchisch**
- Geo-Routing**

Jeder Knoten kennt seine x/y Position. Nachricht an bestimmte Position leiten.

6.12.2007 René Müllemlieben@inf.ethz.ch 19

ETH
 Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
 Swiss Federal Institute of Technology Zürich

Collection Tree Routing

- „Einsammeln“ von Daten an einer bestimmten Stelle.
- Sensor-Daten werden entlang eines **Spannbaums** zur Basisstation geschickt.
- Spannbaum:
 - Wurzel:** Basisstation
 - Blätter:** Datenquellen
 - Innere Knoten:** Datenquellen und leiten Nachrichten weiter
- „Abfangen“ von Nachrichten auf dem Pfad zur Wurzel → Bündelung von Datenwerten, **Aggregation (data fusion)**

Woher kommen die Pfeile?

- Keine eigentlichen Kanten
- Kantenreduzierter Verbindungsgraph? Realität?

Dezentraler Algorithmus

- Was sind die Inputs?
- Stabiler Baum trotz Funk
- Dynamisch (ad-hoc), Baum muss Störungen (Knoten, Interferenz) angepasst werden.

6.12.2007 René Müllemlieben@inf.ethz.ch 20

ETH
 Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
 Swiss Federal Institute of Technology Zürich

Verteilter Algorithmus für Spannbaum

Kurzfassung

- Komponenten**
 - Messung der Link-Qualität zu „Nachbarknoten“
 - Austausch und Management der Nachbar-Tabelle
 - Weiterleiten von Nachrichten
- Routing-Metrik (Gradient)**
 - Entfernung zum Wurzelknoten (Anzahl Hops)
 - Oder: **Erwartete #Übertragungen (ETX)** bis zur Wurzel
 - Berücksichtigt Retransmissions infolge schlechter Links
- Messung Links-Qualität**
 - Bidirektionale ETX-Werte
 - ETX ~ #erwartete / #empfangene Nachrichten
- Nachbar-Tabelle** (NachbarID, Nachbars ETX zur Wurzel)
 - Periodischer Austausch der Tabelle
 - Bei Empfang lokale Einträge entsprechend anpassen → Ziel: min ETX
- Weiterleiten von Nachrichten**
 - Senden an Nachbarn mit kleinstem ETX zur Wurzel

6.12.2007 René Müllemlieben@inf.ethz.ch 21

ETH
 Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
 Swiss Federal Institute of Technology Zürich

Daten-Aggregation

Was ist die *mittlere Temperatur* im Sensornetz?

Aggregation in Basisstation

Mittelwert in Basisstation berechnet
Total # 8 Nachrichten

Aggregation im Netzwerk

Mittelwert berechnet aus $231/5 = 46.2$
Total # 5 Nachrichten

8.12.2007 René Müllemlieben@inf.ethz.ch 22

ETH
 Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
 Swiss Federal Institute of Technology Zürich

Aggregations-Bäume

Kettengraph

$O(n)$

Knoten: n
 Kanten: n-1

Nachr. ohne Aggregation: $\frac{n}{2}(n-1)$
 # Nachr. mit Aggregation: n-1

-n/2 mehr Nachrichten!

Binärer Graph

In-Netzwerk Aggregation **und** Topologie haben Einfluss auf Nachrichtenkomplexität.

Knoten: n
 Kanten: n-1

Nachr. ohne Aggregation: $O(n \log n)$
 $(n+1)\log_2(n+1) - 2n$

Nachr. mit Aggregation: n-1

Sterngraph

Knoten: n
 Kanten: n-1

Nachr. ohne Aggregation: $O(n)$

Nachr. mit Aggregation: n-1

kein Unterschied

8.12.2007 René Müllemlieben@inf.ethz.ch 23

ETH
 Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
 Swiss Federal Institute of Technology Zürich

In-Netzwerk Aggregation

- Aggregation von räumlich verteilten, gleichzeitigen Messungen → **räumliche Aggregation (data fusion)**
- Mögliche räuml. Aggregate
 - Minimum (MIN)
 - Maximum (MAX)
 - Summe (SUM)
 - Mittelwert (AVG)
 - Varianz (VARIANCE)
 - Anzahl (COUNT)
 - Median
 - Histogramm

konst. Grösse
- In-Netzwerk Aggregation:
 - Idealerweise nur eine Nachricht/Kante

Aggregationszustand (AZ)

- Beinhaltet „Zusammenfassung“ der Werte für das Aggregat.
- Bsp: <Summe, Anzahl> für avg
- Knoten senden Aggregationszustand in Richtung Wurzel
 - Vollständiger AZ: in Wurzel
 - Partieller AZ: Unterhalb Wurzel

Klassifikation

- Exemplarische Werte (MAX, MIN)
- Algebraisch (SUM, AVG, VARIANCE)
- Holistisch: Grösse ~ # Werte (Median, Histogramm)

8.12.2007 René Müllemlieben@inf.ethz.ch 24

ETH
 Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
 Swiss Federal Institute of Technology Zürich

In-Netzwerk Aggregation mit SwissQM

```

  graph TD
    start(( )) -- Programm laden --> init((init))
    init --> bereit((bereit))
    reception((reception)) -- Nachricht von Kind --> bereit
    bereit -- Timer --> delivery((delivery))
    bereit -- stoppen --> gestoppt((gestoppt))
  
```

- Datenstrom aus aggregierten Messungen
 - Code muss periodisch ausgeführt werden → Timer
- QM Programme bestehen aus 3 Code Abschnitten
 - Programm wird geladen (**init**)
 - Ein neues Tuple soll versendet werden (**delivery**)
 - Eine Nachricht wird von einem Kind empfangen/abgefangen (**reception**)

6.12.2007 René Müllermueller@inf.ethz.ch 28

ETH
 Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
 Swiss Federal Institute of Technology Zürich

Vertiefende Vorlesungen und weitere Informationen

- 251-0380-00: Drahtlose Sensornetze, Kay Römer (FS08)
- 227-0557-00: Ad-hoc and Sensor Networks, Roger Wattenhofer (HS07)
- SwissQM Projekt
<http://swissqm.inf.ethz.ch>

6.12.2007 René Müllermueller@inf.ethz.ch 29

ETH
 Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
 Swiss Federal Institute of Technology Zürich

Werbung in eigener Sache... **SwissQM**

- Wir suchen immer motivierte Studenten für Projekte rund um SwissQM:
 - Bachelor-Arbeiten
 - Semesterarbeiten
 - Labor "Verteilte Systeme"
 - Master-Arbeiten
 - Hilfsassistenten
- **Kontakt**
 - René Müller, muellren@inf.ethz.ch
- **Projekt-Ideen**
 - **Multi-Tier Datenverarbeitung im heterogenes Netzwerk**
 - tmote sky + Linux Knoten
 - **Power Management Issues im Linux Kernel**
 - Duty Cycling und Arbitrierung der Hardware Komponenten (Design)
 - **Diskrete Eventverarbeitung**
 - Programmieren von virtuellen Maschinen
 - Verteilte endl. Automaten
 - Events innerhalb und zwischen den Knoten
 - Actions/Event-Bedingungen in Bytecode

6.12.2007 René Müllermueller@inf.ethz.ch 30
