

Sensornetzwerke

Oliver Neukum, Raphael Hahn

Überblick

I. Einführung

II. Anwendungen

- ✱ Militär
- ✱ Medizin
- ✱ Umweltbeobachtungen
- ✱ Soziologie
- ✱ Industrie

III. MAC-Layer

- ✱ Designüberlegungen
- ✱ Sensor-MAC
- ✱ Berkeley-MAC
- ✱ CSMA-PS
- ✱ DE-MAC

IV. Routing

- ✱ Allgemeine Anforderungen
- ✱ Energieverbrauch
- ✱ Flooding
- ✱ Shortest Hop First
- ✱ Hierarchisches Routing

V. Ausblick

Einführung

Sensornetzwerke:

- Drahtlos
- Weit verteilt
- Meist Ad-hoc
- Große Anzahl an Knoten
- Batteriebetriebene Sensoren
- Starke Hardwareeinschränkungen
- Meist Multi-Hop-Verfahren

Ziel: anpassungsfähiges und selbstorganisierendes Netzwerk mit vielen billigen Knoten.

Verschiedene Anwendungen erfordern unterschiedliche und spezifische Technologien.

Anwendungen: Militär

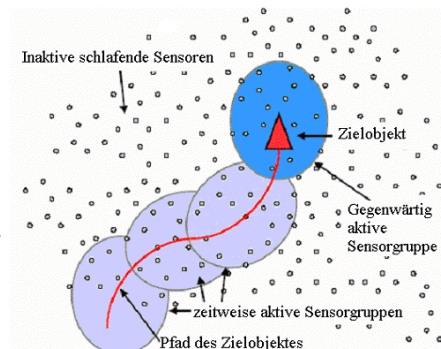
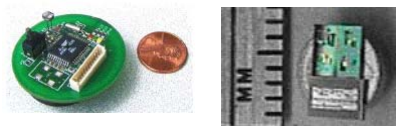
- Am meisten finanziell gefördert
- DARPA: 160 Millionen US-Dollar

Projekt mit der University of California, Berkeley: Abwurf von Sensoren zur Aufzeichnung von Bewegungen von Fahrzeugen

- „Smart Dust“: extrem kleine Sensoren

Frisbee-Modell zur Lokalisierung von Objekten:

Extrem kleine Sensoren:



Anwendungen: Medizin, Umwelt

Medizin:

Prävention von Krankheiten,
Überwachung von Patienten,
Ersetzen von eigenen Sinnen

„Der mobile Patient“:

- mehrschichtiges Netzwerk
- Sensoren zur Messung von Vitalfunktionen
- Überwachender Prozessor am Körper des Patienten
- Root-Rechner im Krankenhaus

Ziel: höhere Mobilität und
bessere Lebensqualität
schwerkranker oder
pflegebedürftiger Patienten

Umweltbeobachtung:

„Great Duck Island“:

- Insel vor Maine, USA
- Beobachtung von Sturmschwalben
- Messung von Temperatur, Helligkeit, Luftdruck, Luftfeuchte, Beschleunigung, Vibration, Gewicht, chemischen Gasen und Gaskonzentrationen, pH-Wert, Lärmpegel, Infrarot
- Basisstation ermöglicht Zugriff und vollständige Kontrolle über das Internet
- www.greatduckisland.net

Anwendungen: Soziologie

Soziologie:

Lernumgebung für Kinder: interaktiv, kontextsensitiv, individualisiert

„Smart Kindergarten“ (ab Frühjahr 2004):

University of California, Los Angeles

Interaktives Klassenzimmer:

- Schüler tragen Mützen mit „IBadges“-Sensoren: Bestimmung von Position und Kopfausrichtung, Stimmaufzeichnung
- Kameras und Mikrofone im Zimmer
- Unterstützt von National Science Foundation mit 1.8 Millionen US-Dollar

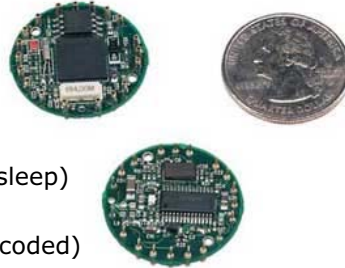
Anwendungen: Industrie

Industrie:

- Dust-Inc: komplette Anwendungen: industrielles Monitoring, Tracking von Objekten, Sicherheitsaspekte
- Crossbow, MicroStrain: unterschiedlichste Hardware, je nach Anwendung extrem klein

Beispiel: MPR500CA

- Program Flash Memory: 128 KB
- Measurement (Serial) Flash: 512 KB
- Current Draw: 8 mA (active), <math><15 \mu\text{A}</math> (sleep)
- Center Frequency: 868/916 MHz
- Data Rate: 38.4 Kbaud (manchester encoded)
- Outdoor Range: 500 ft
- User Interface: 1 LED
- Weight: 3 g
- Size: 25 x 6 mm



MAC-Layer: Designüberlegungen

Besondere Anforderungen an den MAC-Layer:

Limitierte Energieressourcen

- Beschränkte Hardwaremöglichkeiten
- kurze Übertragungsdistanz → Energieverbrauch für Empfangen ähnlich hoch wie für Senden

Faktoren für den Energieverbrauch:

- Kollisionen: erneutes Senden notwendig
- Overhearing: Mithören von fremden Nachrichten
- Kontrollpakete: Senden kostet Energie
- Idle listening: Horchen am Medium

MAC-Layer: Designüberlegungen

Skalierbarkeit und Anpassungsfähigkeit

- Hohe Selbstorganisation
- Positionswechsel der Sensoren → Dynamik
- Große Anzahl an Knoten

Verkehrscharakteristik

- Datenaustausch stark korreliert und variabel
- Lange Ruhephasen
- Kurze intensive Phasen

MAC-Layer: Designüberlegungen

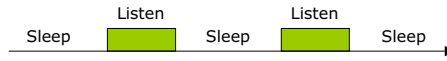
Vergleich mit existierenden Protokollen

- Alle Knoten eines Sensornetzes dienen derselben Anwendung
- Aspekte wie Fairness, Durchsatz und Latenz sekundär
- 802.11 (CSMA-CA): Knoten ständig im Idle mode
- PAMAS: keine Verringerung des Idle listening, zwei Funk-Kanäle benötigt
- TDMA-Ansätze: schlechte Skalierbarkeit, Clusterbildung

MAC-Layer: S-MAC (Sensor-MAC)

Eigenschaften:

- ad-hoc-Netzwerk ohne Basisstation
- Periodische Schlaf- und Wachintervalle
→ virtuelle Clusterbildung
- Multi-Hop-Übertragung mit Message Passing:
Fragmentierung langer Nachrichten und Versenden in einem Burst



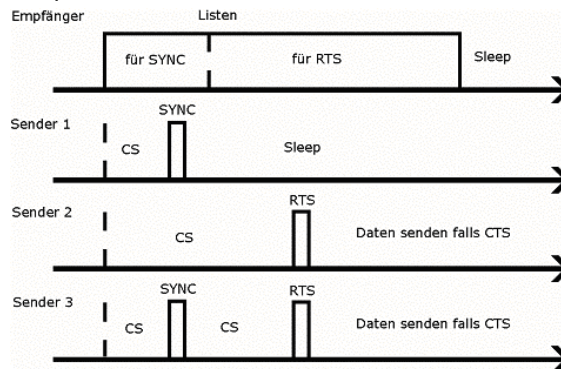
Auswählen der Zeitpläne:

- Knoten verwalten Tabellen mit Zeitplänen der Nachbarn
- Jeder Knoten broadcastet periodisch den eigenen Zeitplan (SYNC)
- Neuer Knoten horcht, ob er einen Zeitplan empfängt, ansonsten wählt er einen eigenen Rhythmus aus
- Knoten können zwei Zeitpläne übernehmen

MAC-Layer: S-MAC

Synchronisation der Zeitpläne:

- Horch-Zeiten stets länger als typische Zeitabweichungen
→ nur lockere Zeitsynchronisation nötig (Intervall > 10 s)
- SYNC-Paket: enthält Adresse des Absenders und Zeitdauer bis zur nächsten Schlafphase
- Wachphase unterteilt in SYNC und RTS



MAC-Layer: S-MAC

Vermeidung von Kollisionen und Overhearing:

- Carrier Sense
- RTS/CTS (außer bei Broadcast)
- Jedes Paket enthält die Länge der verbleibenden Übertragung
- Unbeteiligte Knoten werden in Schlafzustand versetzt

Message Passing:

- Problem: Versenden von großen Nachrichten:
 - am Stück: aufwändige Wiederholung der Übertragung
 - fragmentiert: Aufwand für Kontrollpakete, RTS/CTS
- S-MAC: Fragmentieren und Versenden in einem Burst
- Schlafzustand so lange wie möglich
- nur ein RTS/CTS: Reservierung für gesamte Dauer der Übertragung

MAC-Layer: S-MAC

Message Passing (Forts.):

- Nach jedem Paket erfolgt ACK
- ACK enthält auch Restdauer der Übertragung → wirkt zugleich Hidden-Terminal-Problem entgegen

Vorteile:

- 2-6-fach geringerer Energieverbrauch als 802.11
- Gute Skalierbarkeit
- Kollisionsvermeidung

Nachteile:

- Multi-Hop-Latenz
- Höherer Energieverbrauch der Grenzknoten eines Clusters

MAC-Layer: Berkeley-MAC

Eigenschaften:

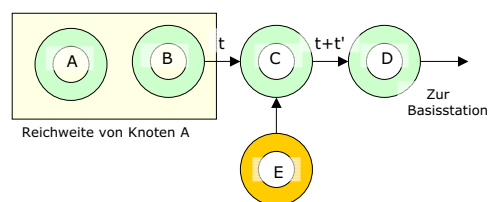
- Auf Basis von CSMA
- Eindeutige Basisstation
- Alle Daten werden zu Basis gesendet mit Hilfe eines Spannbaumes
- Jeder Knoten kennt seinen Vaterknoten
- Adaptive Rate Control Mechanismus zur Optimierung der Bandbreite
- Carrier Sense: zusätzlich vorgeschaltete zufällig lange Wartezeiten zur Verhinderung von Kollisionen

Parenting:

- Gänzlicher Verzicht auf Kontrollpakete
- Nutzt Spannbaum aus

MAC-Layer: Berkeley-MAC

Parenting (Forts.):



B sendet zum Zeitpunkt t an Knoten C. Knoten A hört diese Übertragung. Er weiß, dass C das Paket innerhalb der Zeit $(t - t')$ an D weitersenden wird, und wartet genau diese Zeit ab, um eine Kollision in B zu verhindern.

Problem: Nicht alle Kollisionen werden vermieden: Knoten E, außerhalb der Reichweite von A, kann an C senden, ohne dass A davon erfährt. Dies verursacht eine Kollision in B.

MAC-Layer: Berkeley-MAC

Vorteile:

- Geringer Energieverbrauch
- Keine Kontrollpakete

Nachteile:

- Idle listening: ständige Überwachung des Mediums

Folge:

- Berkeley-MAC eignet sich vor allem für Netzwerke mit hohem Verkehrsaufkommen, bei dem das Idle listening weniger zum Tragen kommt.

MAC-Layer: CSMA-PS

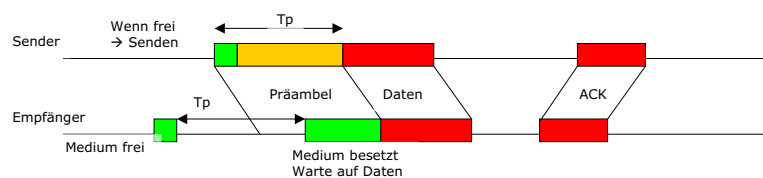
Carrier Sense Medium Access Preamble Sampling

Annahme: meist geringer Nachrichtenverkehr bei Sensornetzwerken

Ziel: Vor allem Verminderung von Idle listening

Eigenschaften:

- Periodischer Wach- / Schlafzyklus (Intervalllänge: T_p)
- Reihenfolge beim Senden:
Carrier Sense, Präambel (Länge: T_p), Daten



MAC-Layer: CSMA-PS

Vorteile:

- Intervalllänge > 10 s
- keine Synchronisation nötig

Nachteile:

- Hoher Energieverbrauch beim Senden durch lange Präambel
- Kollisionen durch lange Präambel

Verbesserte Version:

Synchronized CSMA-PS:

- Knoten merken sich Zeitpläne
- Präambel wird genau dann gesendet, wenn Empfänger aufwacht
→ Verkürzung der Präambel möglich
- Nachteil: dynamische Einbindung neuer Knoten schwierig

MAC-Layer: DE-MAC

Distributed Energy-Aware MAC-Protocol

Eigenschaften:

- TDMA-Prinzip → Vermeidung von Kollisionen und Overhead an Kontrollpaketen
- Schlafzyklen beschränkt auf die eigenen Zeitschlitz

Lokale Auswahlprozedur:

- Schwachen Knoten werden zur Energieeinsparung Vorrechte zugeteilt → Energieeinsparungen
- In TDMA-Zeitschlitzvergabe integriert → keine zusätzliche Bandbreite nötig
- Zuordnung mehrerer Zeitschlitz zu kritischen Knoten → längere Schlafzeiten möglich

MAC-Layer: DE-MAC

Vorteile:

- ✿ Energieersparnis gegenüber herkömmlichem TDMA
- ✿ Kollisionsvermeidung durch TDMA
- ✿ Kein Carrier Sense
- ✿ Minimierung der Kontrollpakete

Nachteile:

- ✿ Hoher Aufwand für Idle listening
- ✿ Synchronisation nötig
- ✿ Schlechte Skalierbarkeit

Routing: Allgemeine Anforderungen

Selbstorganisation

Alle Knoten sind gleich und müssen sich ohne äußere Hilfe organisieren.

Robustheit

Sensornetzwerke sind in der Regel auf Verlust gebaut. Der Ausfall einzelner Knoten muss leicht kompensiert werden können.

Energieeffizienz

Ein gegenüber drahtgebundenen Netzwerken vollkommen neuer Aspekt, dem größte Aufmerksamkeit gewidmet wird.

Routing: Energieverbrauch

$$E_{\text{Knoten}} = E_{\text{Betrieb}} + E_{\text{Sendung}} = P_{\text{Sender}} \times l + P_{\text{Sendung}} \times l \times d^a$$

| | |
|---|-------------------------|
| P | elektrische Leistung |
| l | Länge der Nachricht |
| d | Entfernung |
| a | Ausbreitungskoeffizient |

$$E_{\text{Netzwerk}} = \sum_{\text{Nachrichten}} \sum_{\text{Knoten}} E_{\text{Knoten}}$$

Entfernung ist nicht das einzige Kriterium. Die Anzahl der Zwischenstationen muss auch bedacht werden.

Routing: Flooding

- Alle Knoten wiederholen empfangene Nachrichten
- Man kann Flooding einer Anfrage oder einer Antwort unterscheiden
- Ein sehr einfaches Verfahren ohne Kontrolldatenverkehr
- Viel unnötiger Datenverkehr mit einem Hang zu Kollisionen

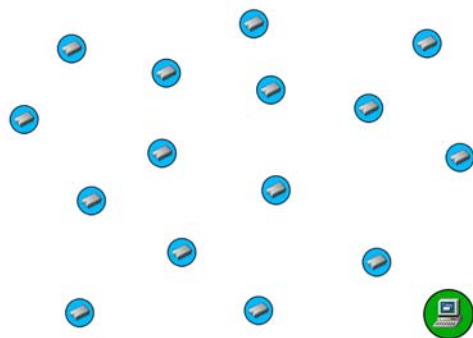
Routing: Shortest Hop First

Der nächste zielnähere Knoten wird ausgewählt

```
FÜR alle Knoten
  WENN Knoten.distanz(ziel) < selbst.distanz(Ziel)
    DANN Kandidaten.aufnehmen(Knoten)
entfernung = unendlich
zwischenziel = NULL
FÜR alle Kandidaten
  WENN entfernung > Kandidat.distanz(ziel)
    DANN
      entfernung = Kandidat.distanz(ziel)
      zwischenziel = Kandidat
```

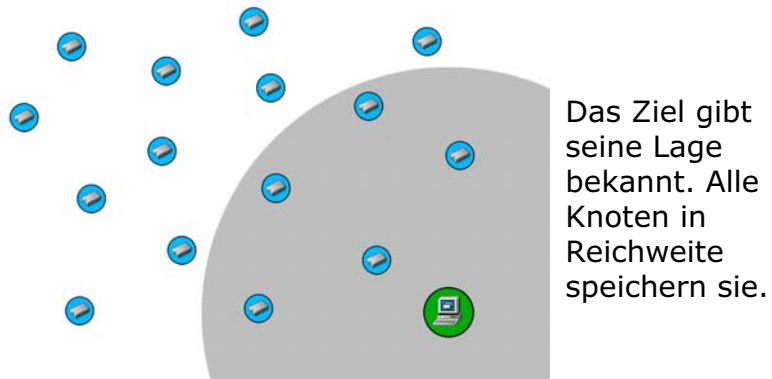
Der Vorteil liegt in der Einfachheit der Implementierung

Aufbau eines Routingbaumes

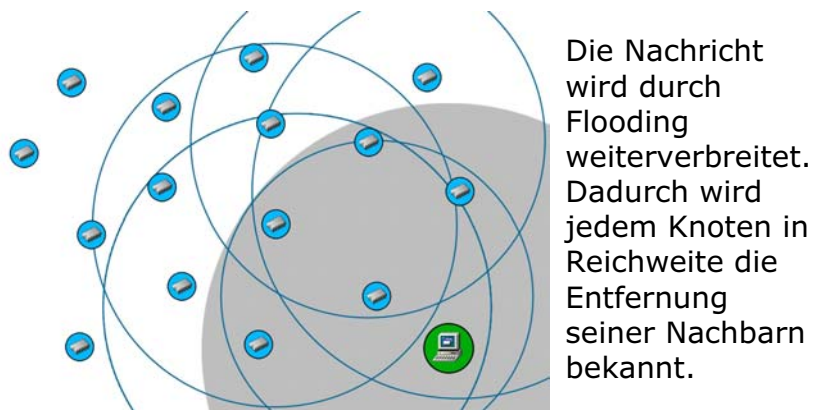


Gehen wir am Anfang von einem Ziel und zufällig verteilten Knoten aus.

Aufbau eines Routingbaumes



Aufbau eines Routingbaumes

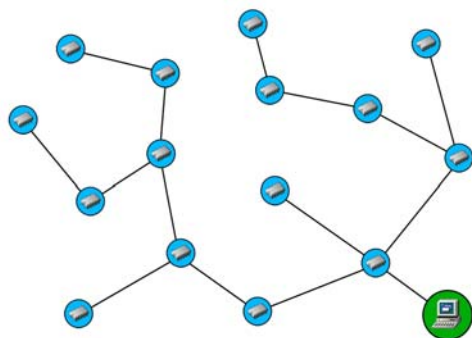


Aufbau eines Routingbaumes



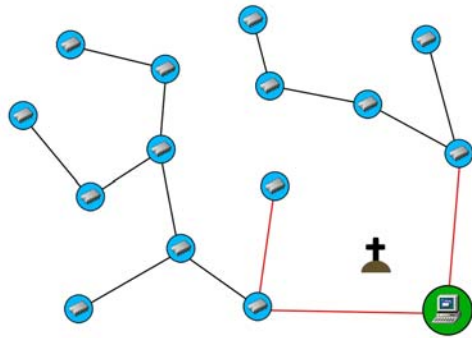
Durch Vergleich der Nachrichten werden Routen errechnet.

Routing: Shortest Hop First - Nachteile



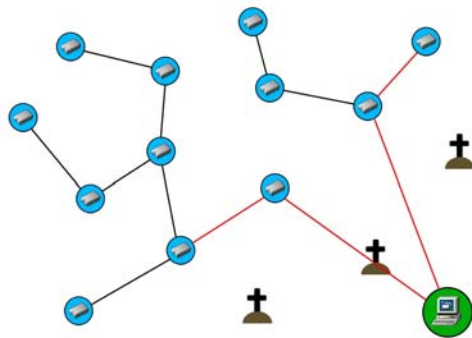
Der Aufbau des Routingbaumes führt dazu, dass einige Knoten überdurchschnittlich viel Verkehr haben.

Routing: Shortest Hop First - Nachteile



Die am meisten beanspruchten Knoten fallen zuerst aus. Die dann gebildeten Routen sind ungünstiger.

Routing: Shortest Hop First - Nachteile

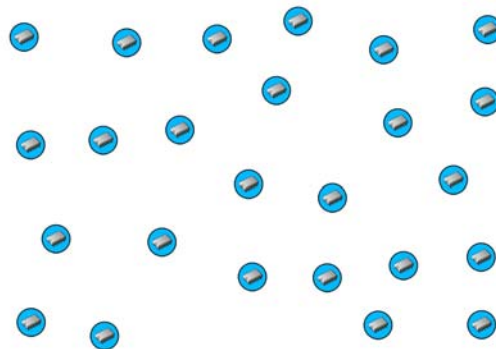


Der Vorgang setzt sich mit sich ständig erhöhender Geschwindigkeit fort.

Routing: Hierarchisches Routen

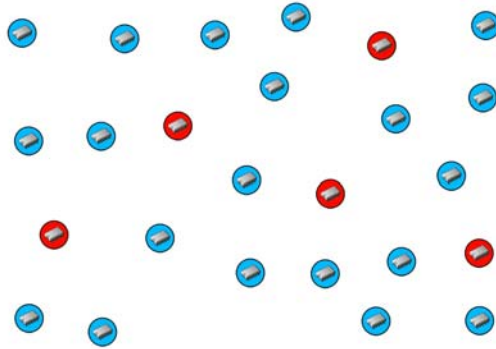
- Knoten organisieren sich zu einer Hierarchie
- Unterknoten schließen sich einem Gruppenführer an
- Reguläre Kommunikation folgt strikt den Rangstufen
- Gruppenführer werden regelmäßig ersetzt

Hierarchisches Routen - Organisation



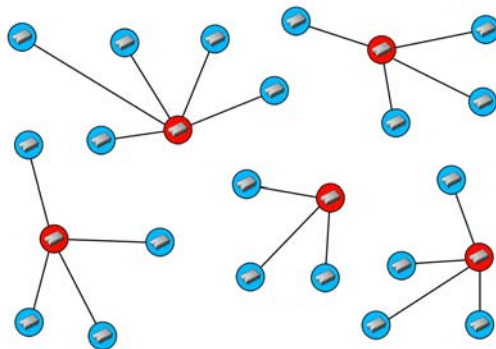
Am Anfang sind alle Knoten zufällig verteilt und haben die gleichen Energievorräte

Hierarchisches Routen - Organisation



Gruppenführer ernennen sich nach dem Zufallsprinzip selbst

Hierarchisches Routen - Organisation



Unterknoten schließen sich dem nächsten Gruppenführer an und kommunizieren bis zur Neuorganisation nur mit diesem.

Routing: Nachrichtenverkehr

Zeitmultiplex

Gruppenführer teilen Unterknoten Kommunikationszeit zu

Zentralisation

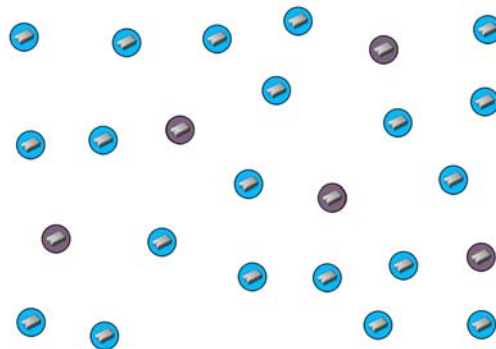
Gruppenführer bündeln Nachrichten vor der Weitergabe

Zusammenfassung

Gruppenführer fassen mehrere Nachrichten zusammen

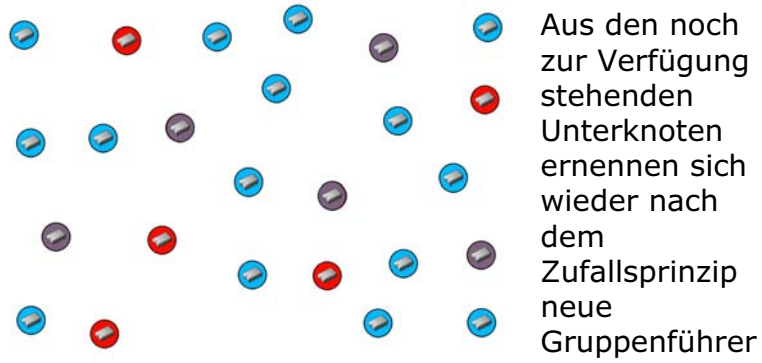
Kommunikation mit langer Reichweite betreiben nur die Gruppenführer. Das Verfahren begrenzt die Anzahl der Zwischenstopps einer Nachricht.

Routing: Neuorganisation

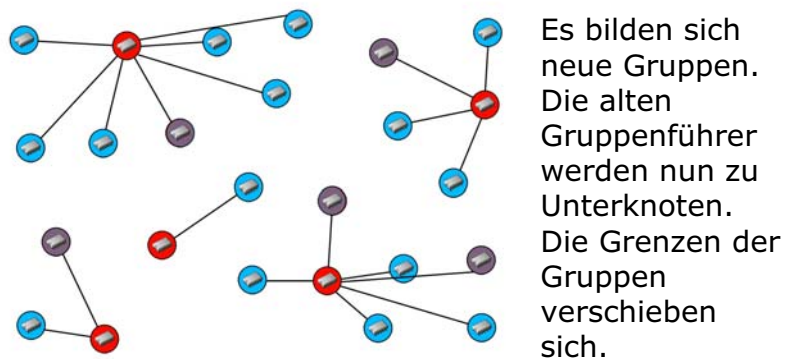


Zum Zeitpunkt der Neuorganisation stehen die alten Gruppenführer nicht mehr für diese Funktion zur Verfügung.

Routing: Neuorganisation



Routing: Neuorganisation



Routing: Gründe für Neuorganisation

Energieverbrauch

Gruppenführer erschöpfen sich schneller. Ungleiche Lasten werden durch genügend häufige Wechsel verteilt.

Betriebszeit als Kriterium

Alle Gruppen müssen sich gleichzeitig reorganisieren. Deswegen kann der tatsächliche Energieverbrauch eines Gruppenführers nicht zur Wahl des Zeitpunktes einer Neuorganisation genutzt werden.

Energievorräte

Der verbleibende Energievorrat beeinflusst die Wahrscheinlichkeit eines Unterknotens, sich zum Gruppenführer zu ernennen.

Zusammenfassung und Ausblick

Sensornetzwerke:

- Applikationen
- MAC-Layer: Designüberlegungen und MAC-Protokolle
- Routing: verschiedene Verfahren

Ausblick:

- Großes Forschungsgebiet
- Verschiedene Anwendungen erfordern unterschiedliche Technologien
- Neue Möglichkeiten durch Nutzung alternativer Energiequellen wie Temperaturschwankungen oder kinetischer Energie