

Topologie und Routing in Sensornetzwerken und Auswirkungen auf die Energieeffizienz

Tobias Rossbach

IMMS gGmbH
Ehrenbergstraße 27
D-98693 Ilmenau
<http://www.imms.de>

Tel.: +49 3677-69 5578

Fax.: +49 3677-69 5515

E-Mail: tobias.rossbach@imms.de

Gliederung

1. Anwendungen

2. Topologien

3. MAC

4. Routing

5. Zusammenfassung

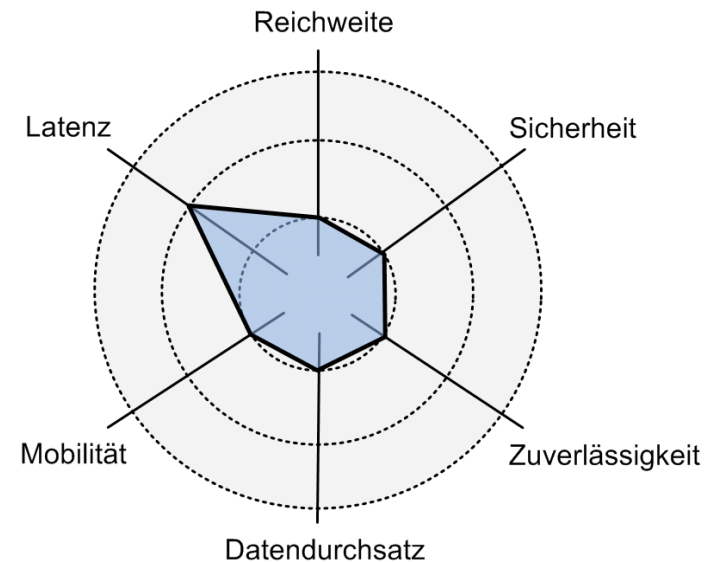
Anforderungen

- Reichweite
 - PA/LNA Leistung und Empfindlichkeit
- Latenz
 - Zugriffsverfahren, Routing, Duty-cycle
- Sicherheit
 - Authentifizierung & Verschlüsselung
- Zuverlässigkeit
 - Acknowledgments, Re-Transmissions
- Datendurchsatz
 - Übertragungsdauer
- Mobilität
 - Topologieaktualisierungen

Typische Anwendungen

Umgebungsmonitoring

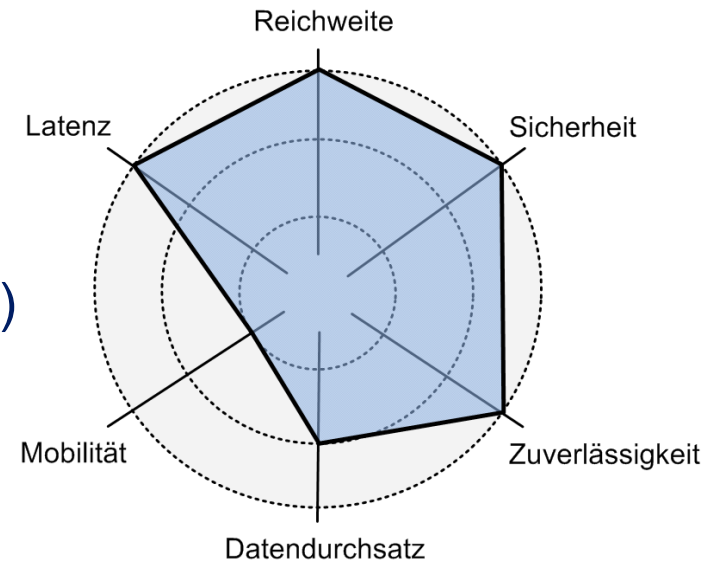
- Monitoring nicht kritischer Daten
- Ändern sich langsam
- Unterschied zwischen aufeinander folgenden Messungen gering
- Geringe Senderate
- Geringer (moderater) Datendurchsatz, Latenz und Zuverlässigkeitsanforderungen
- Geringe bis keine Mobilität der Motes, statisches Netzwerk
- Datenfluss mit meist einer Senke (any-to-one)



Typische Anwendungen

Aktivitätserkennung

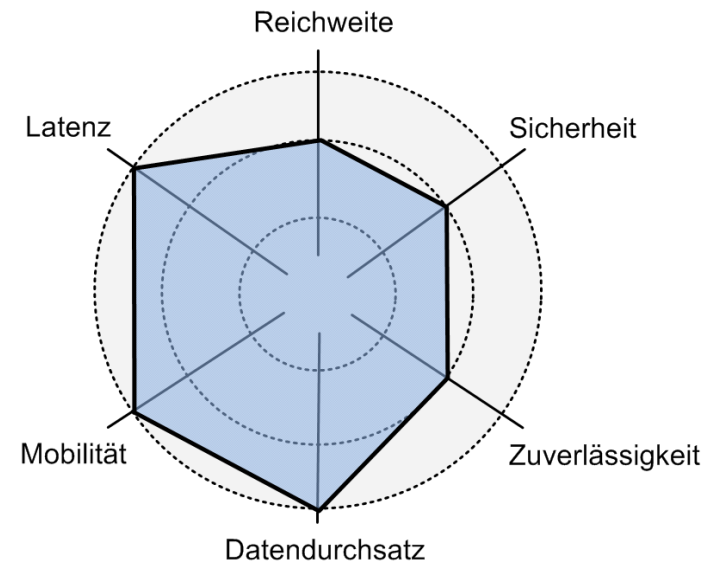
- Geringe Latenz
- Hohe Zuverlässigkeit
- Rückfragen und Kommandos in/an das Netz (any-to-base, base-to-any)
- Große Reichweite auch unter „rauen“ Umgebungsbedingungen
- Pufferung von Bursts



Typische Anwendungen

Tracking

- Geringe Latenz
- Hohe Zuverlässigkeit
- Alternative Routen
- Hohe Knotendichte
- Ein oder mehrere mobile Teilnehmer



Typische Anwendungen

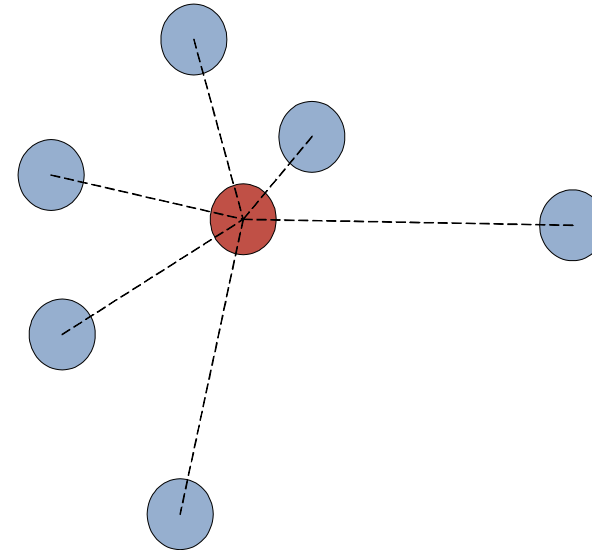
Schlussfolgerungen

- Anforderungen an die Hardware und Software von Anwendung zu Anwendung verschieden
- Wirken sich direkt auf den Energiebedarf eines Moduls aus
- MAC und Routing abhängig von
 - Häufigkeit, Typ und Zieladresse der Nachrichten
 - Zuverlässigkeits- und Latenzanforderungen
 - Geforderte Lebensdauer

Topologien

Stern

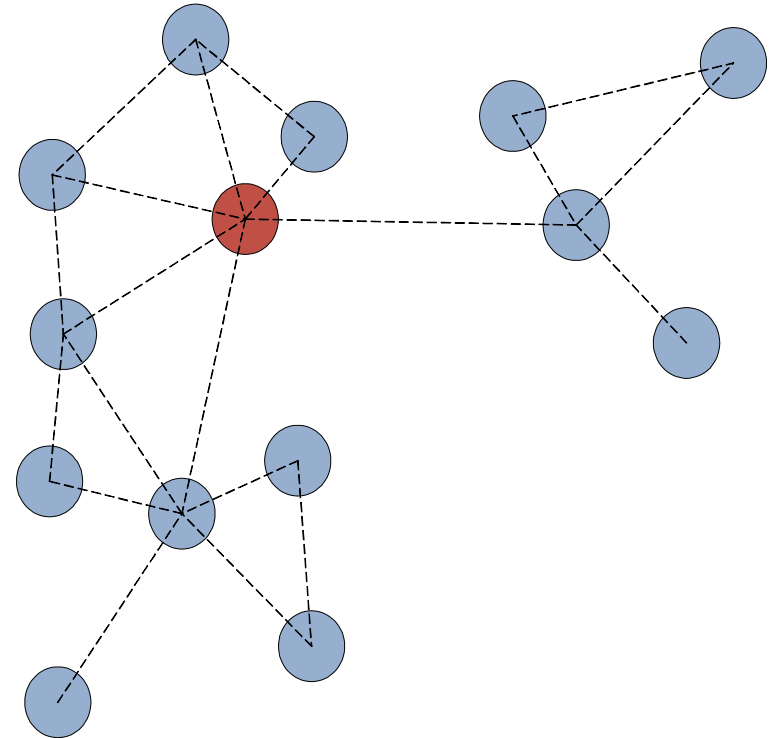
- Module in Reichweite eines Gateways / Basisstation
- Ein Sprung zum Ziel, kein Routing
- Einfachste Form, geringer Implementierungsaufwand



Topologien

Mesh

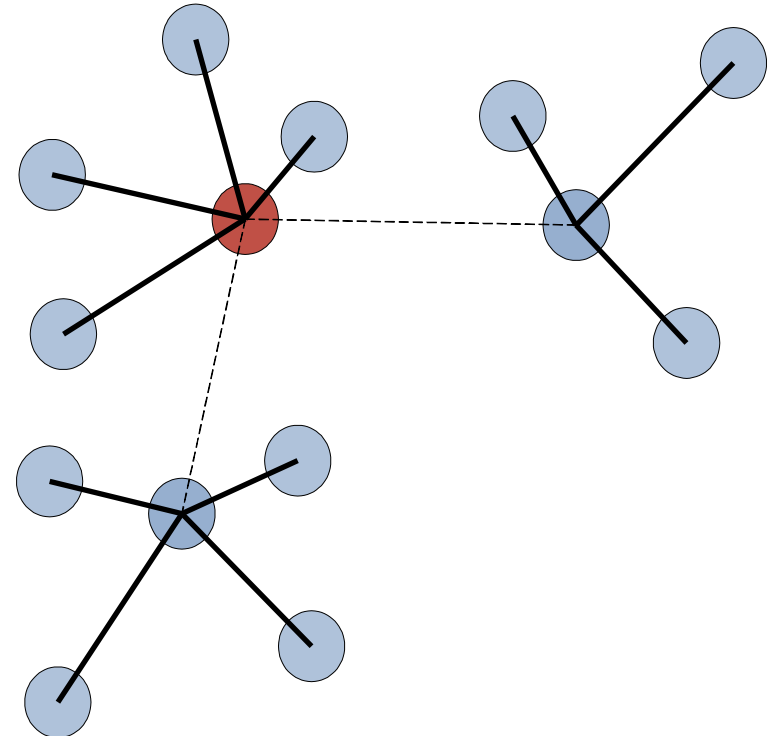
- Jedes Modul kann mit jedem anderen Modul in Reichweite kommunizieren
- Weiterleiten von Nachrichten über mehrere Zwischenstationen möglich
- Routing-Algorithmus zur Wahl einer Route durch das Netz



Topologien

Cluster-Tree

- Unterteilung in Teilnetze mit Clusterhead und Subnodes
- Subnodes kommunizieren mit Clusterhead
- Clusterheads für Inter-Cluster-Kommunikation und Routing zuständig
- Auswahl des Clusterheads:
 - Zufällig
 - Nach Ressourcen (Energie)
 - Nach Funktion

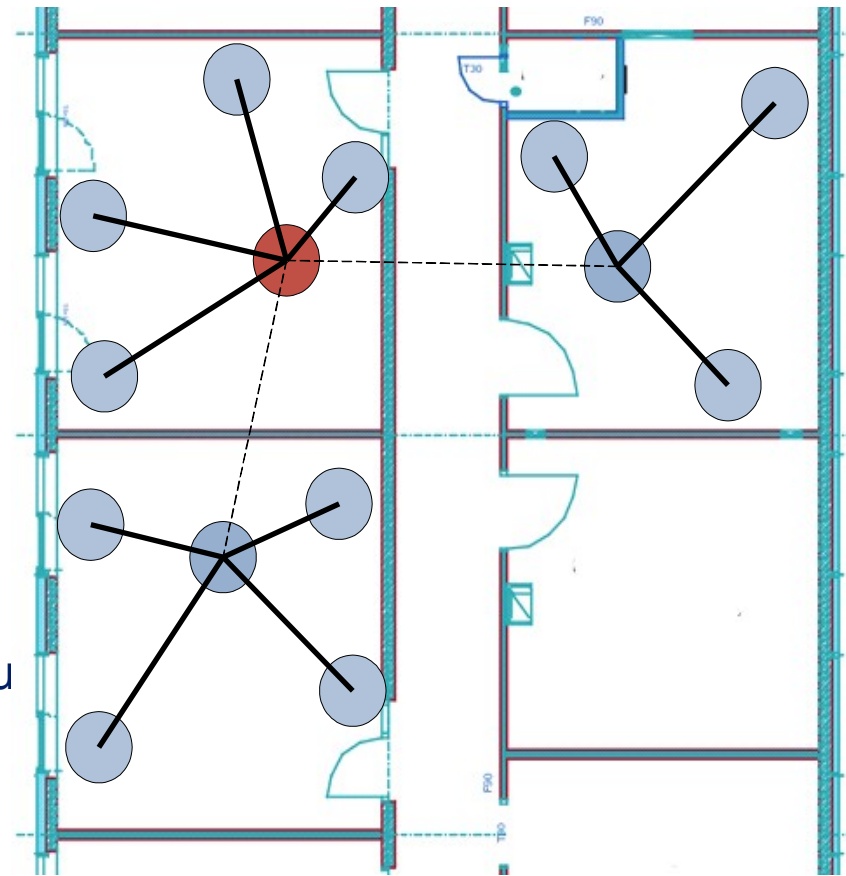


Topologien

Cluster-Tree

- Beispiel: Gebäudeautomation
- Clusterheads sind Knoten mit konstanter Stromversorgung und höherer Rechenleistung
- Clusterheads als Datenaggregatoren
- Energieeffizienz:
 - Um den Faktor 2 bis 3 besser
 - Aber: Datendurchsatz um bis zu 50% geringer

A. Warriar et al. „How much energy saving does topology control offer for wireless sensor networks“ - A practical study



Energieeffizienter MAC

Empfang & Senden:

- Beispiel: Dauerhaftes Verweilen im Empfang
- Kurzer Sendeimpuls
- Empfang benötigt mehr Energie als Senden



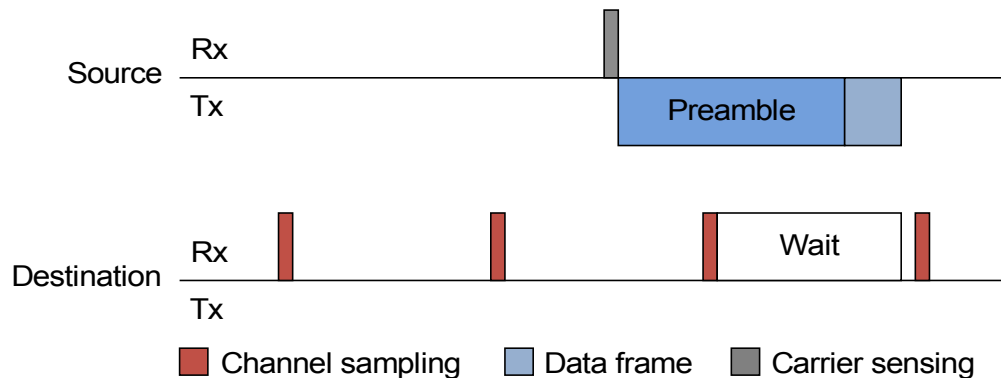
Ziel:

- Transceiver nur dann aktivieren, wenn er auch benötigt wird
- Unnötiges Verweilen in Empfangsmodus reduzieren

Energieeffizienter MAC

Asynchrone Protokolle

- Sampling des Kanals, Carrier Sense
- Zugriff auf den Kanal:
 - Sobald frei (CSMA)
 - Ggf. unter Berücksichtigung eines „Duty-cycle“
- „Low-Power-Listening“



J. Polastre [et al.] „Versatile Low Power Media Access for Wireless Sensor Networks“
M. Kuoriletho [et al.] „Ultra-Low Energy Wireless Sensor Networks in Practice“

Energieeffizienter MAC

B-MAC (Polastre et al. 2004)

- CSMA Protokoll mit „Low-Power-Listening“ Algorithmus
- Channel Sampling einstellbar
- Preamble der Nachricht muss länger als das eingestellte Sampling-Intervall sein

Z-MAC (Rhee et al. 2005)

- Hybrides Protokoll, CSMA und TDMA
- Jedem Teilnehmer wird während Initialisierung ein Zeitschlitz zugewiesen
- Eigentümer hat höchste Priorität, jedoch können auch andere Teilnehmer innerhalb des Zeitschlitzes senden wenn er ungenutzt bleibt
- Basiert auf B-MAC, weniger Kollisionen und größere Fairness

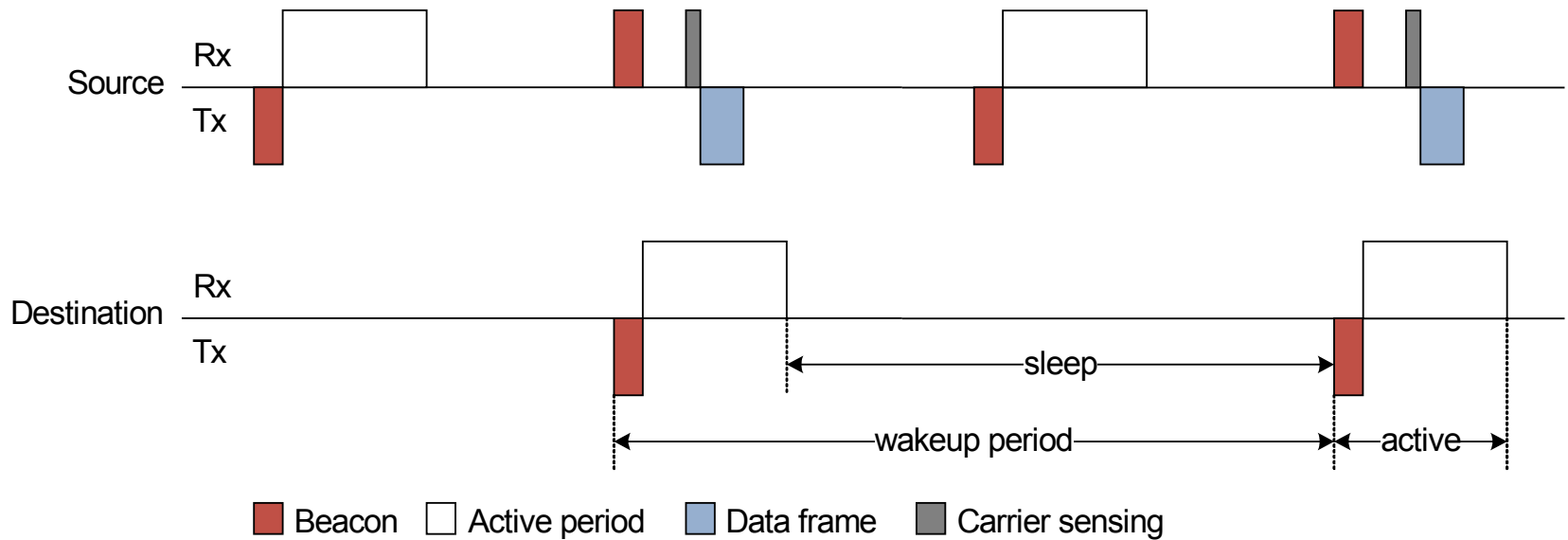
Energieeffizienter MAC

Synchrone Protokolle

- Austausch von Synchronisations-Informationen zwischen den Modulen
- Periodisches Aufwachen
- Synchronisation der nächsten Nachbarn
- Synchronisation über das gesamte Netzwerk unpraktikabel
- Ermittlung der Nachbarn innerhalb einer Initialisierungsphase

Energieeffizienter MAC

Synchrone Protokolle



Mauri Kuoriletho [et al.] „Ultra-Low Energy Wireless Sensor Networks in Practice“

Energieeffizienter MAC

S-MAC (Ye et al. 2002, 2004)

- Feste, 115ms lange Aktivzeit
- Anpassbare, mehrere hundert Millisekunden lange, Wakeup-Periode
- Höherer Duty-Cycle -> höhere Latenz und reduzierter effektiver Datendurchsatz
- Synchronisation der Nachbarn, Ausbildung virtueller Cluster
- Aktiv-Phase (CSMA-CA):
 - 1. SynC: Synchronisations-Informationen
 - 2. RTS: Nachbarn Senden Anforderung
 - 3. CTS: Ziel erteilt Freigabe
- **Nachteil:** Hohe Latenz durch Sleep-Phase

Energieeffizienter MAC

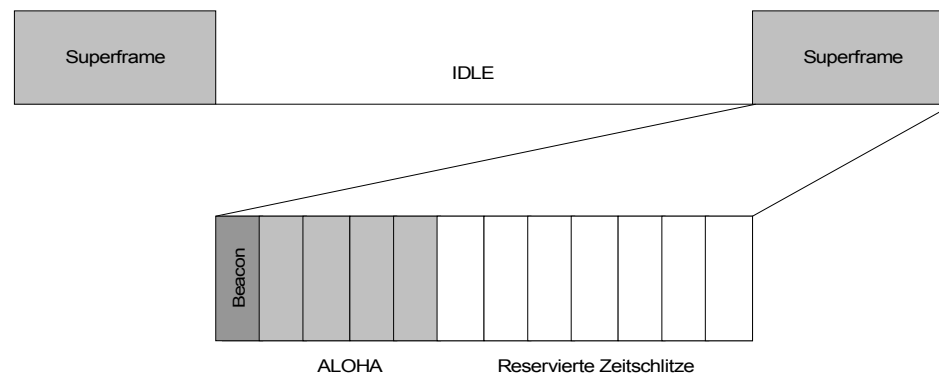
LEACH (Heinzemann et al. 2002)

- Cluster Topologie, Headnode und Subnode Zuweisung selbstorganisierend
- Clusterheads benötigen mehr Energie als Subnodes
- Ziel: Rotation der Clusterheads, Gleichmäßige Verteilung des Verbrauchs
- Jedes Modul entscheidet selbständig anhand der gewünschten Anzahl der Cluster, ob es ein Clusterhead wird
- Clusterheads kommunizieren mit erhöhter Sendeleistung mit einer Basistation (Stern)
- **Nachteil:** Jeder muss mit jedem kommunizieren können (unter Einsatz maximaler Sendeleistung)

Energieeffizienter MAC

TUTWSN MAC (M. Kuorilehto et al., 2007)

- Cluster-Topologie
- Zuweisung einer eigenen Frequenz je Cluster
- Senden und Empfangen eines Clusters findet innerhalb eines „Superframes“ statt
- Clusterhead sendet Synchronisation (Beacon)
- Aufteilung in freie und fest zugewiesene Subnode-Zeitschlitz



Energieeffizienter MAC

IEEE 802.15.4 (2003)

■ PHY:

- Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)
- 868/915 MHz mit 20 und 40 kbps
- 2.4 Ghz mit 250kbps

■ MAC:

- Unterteilung in 3 Geräteklassen:
 - PAN (network) coordinator (Gateway bzw. Basisstation)
 - Coordinator (Router)
 - Devices
- Beacon Enabled (superframes, timeslots) und Non-Beacon Mode (CSMA)
- Full function (FFD) und reduced function (RFD) devices

Routing

„Routing ist der Prozess der Wahl der richtigen Schnittstelle und des nächsten Sprunges (Hop) der Pakete, die weitergeleitet werden sollen.“ RFC 1983

Routing: node-centric

Distance-Vector

- Router kennen ihre unmittelbare Nachbarschaft
- Routing-Tabelle mit Daten der Nachbarn
- Routen werden festgelegt:
 - A priori
 - Auf Anfrage (Rreq, Rrep)
- Vorteil: geringer Kontroll-Overhead
- Nachteil: Route-Discovery Delay

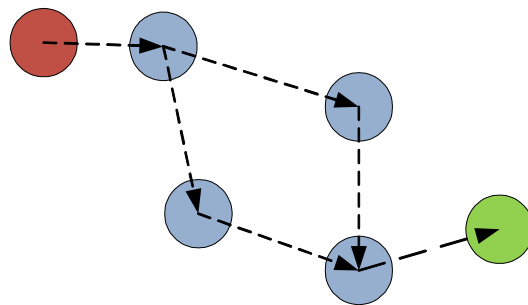
Link-State

- Router kennt den Zustand des gesamten Netzwerkes, aller Links
- Routen werden anhand eines Algorithmus (shortest-path) berechnet
- Vorteil: schnelle Routenfindung
- Nachteil: große Tabellen, Protokoll-Overhead

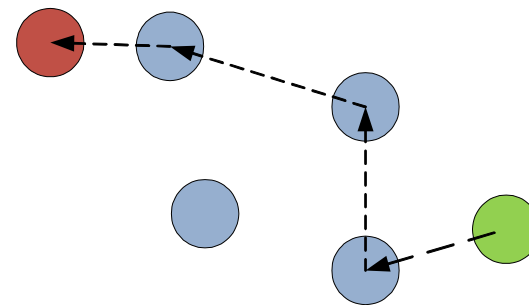
Routing: node-centric

DSR – Dynamic Source Routing (Maltz et al. 1999)

- Reaktives Routing-Protokoll
- Broadcast des Route-Discovery in das Netzwerk
- Jede Station fügt eigene Adresse hinzu
- Empfänger sendet Antwort mit Pfad als Payload
- Nachteil: Paketgröße
- Alternativen: AODV, DYMO

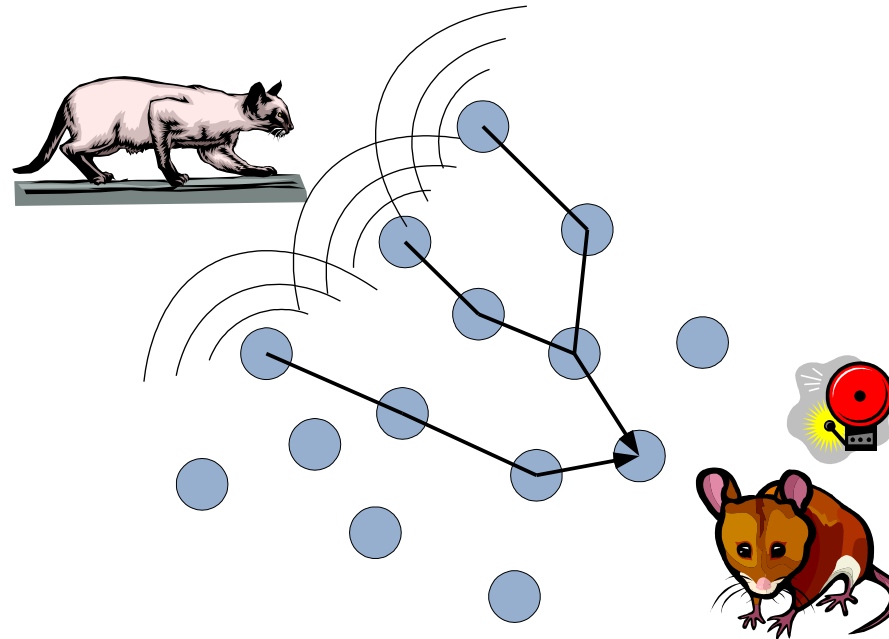


Route-Request



Route-Reply

Routing: data-centric



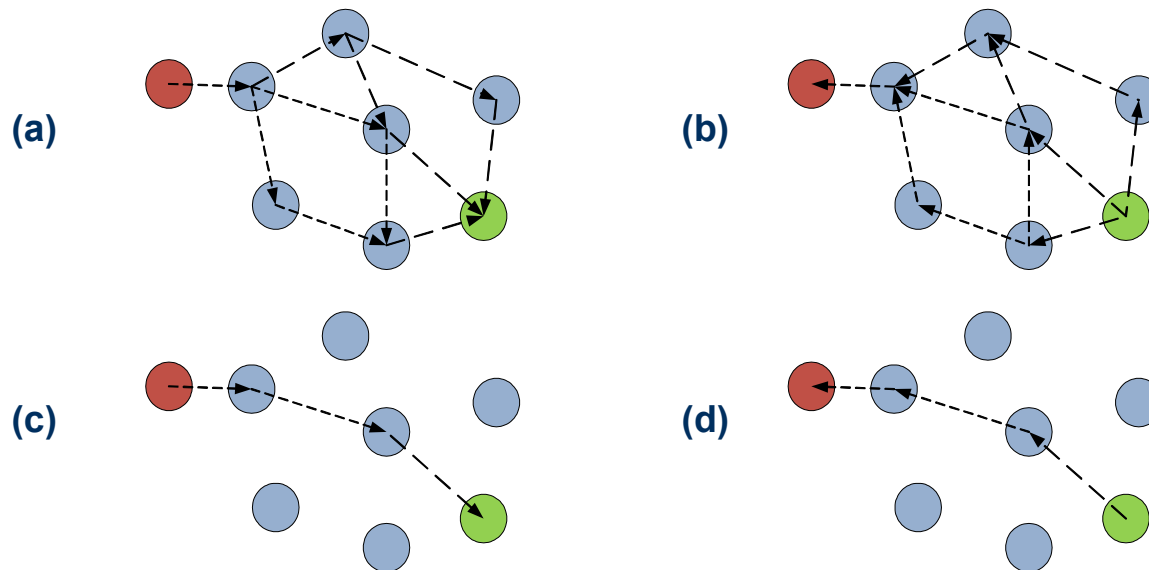
- Häufig ist die Art und der Zeitpunkt eines Ereignisses wichtiger als die Adresse des messenden Moduls
- Ein Ereignis kann von mehreren Teilnehmern gleichzeitig gemessen werden
- *Data-centric addressing / Data-centric aggregation*

Routing: data-centric

Directed Diffusion (Intanagonwiwat et al. 2003)

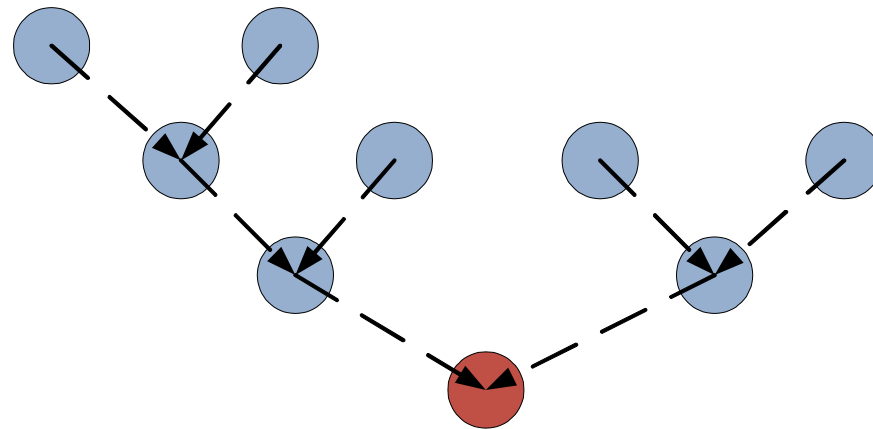
■ Gruppierung in Attribut-Daten Paare

- (a) Interessent stellt Anfrage nach einem Attribut
- (b) Erhält Antwort von einem oder mehreren Quellen
- (c) Verstärkung (Reinforcement) eines oder mehrerer Pfade
- (d) Daten über einen Pfad



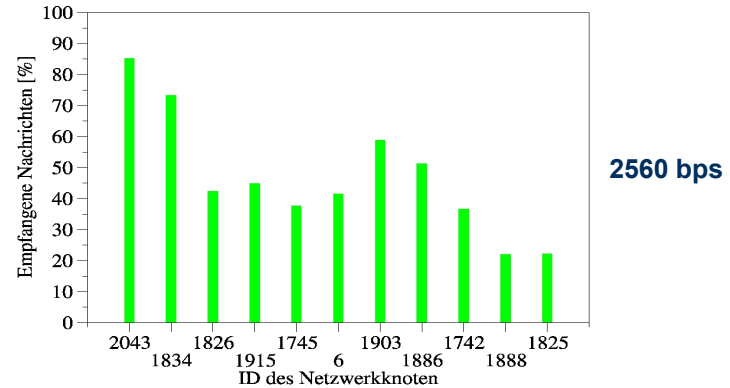
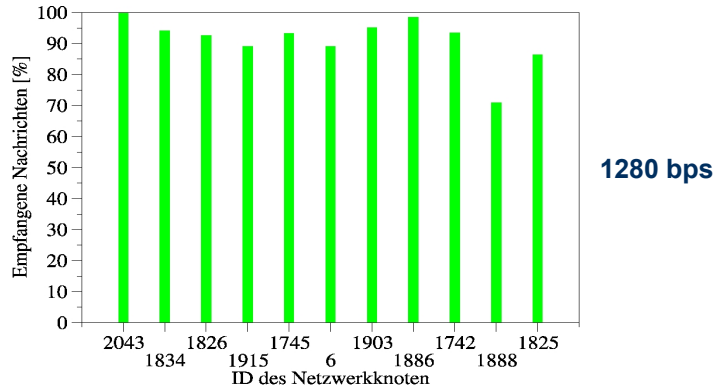
Routing in Sensornetzwerken

- Einfachste Form: MultiHop mit einer oder mehreren Senken als Ziel: Any-To-One
- Aufbau einer Baumstruktur
- Wahl des Elternknotens basiert auf der akkumulierten Verbindungsqualität (z.B. LQI, RSSI oder Paketverluste) zur Wurzel -> **cost-field based**

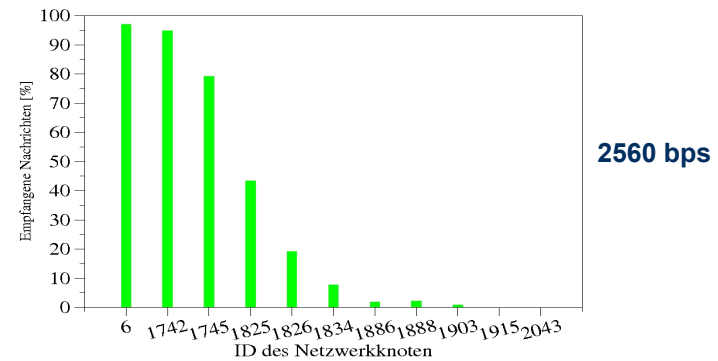
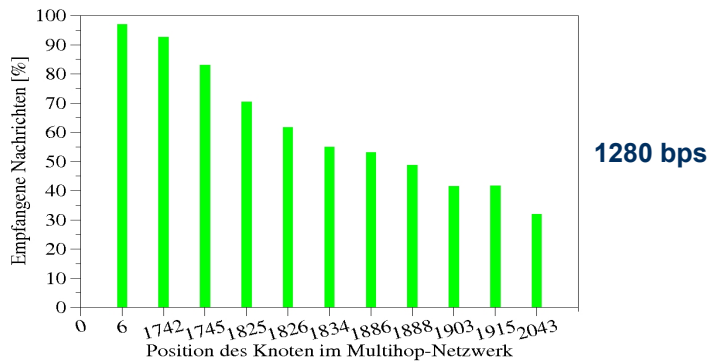


Routing in Sensornetzwerken

■ Mesh-Topologie - 868,9 MHz, 76100 bps



■ Linien-Topologie (steigende Sprungananzahl)



Energieeffizientes Routing

- Durch Wahl eines schlechten Links mehr Paketfehler
- Re-Transmissions sind notwendig, Energie wird „verschwendet“
- Auswahl der Pfade nicht nur anhand der Signalstärke sondern auch:
 - Durchsatz
 - Sprunganzahl
 - Paketfehler
 - Zur Verfügung stehenden Energie

Metrik 

Energieeffizientes Routing

■ Klassifikation:

1. Maximale Zuverlässigkeit
2. Minimaler Energieverbrauch
3. Hohe Bandbreite
4. Minimale Verzögerung

$$C_{ij} = C_j + \alpha(e_{ij}) + \beta(r_{ij}) + \gamma(a_{ij})$$

1. Nächster Sprung

C_{ij}	: <i>Kosten des Sprungs</i>
C_j	: <i>Kosten des Vorgängers</i>
e_{ij}	: <i>TxPower</i>
r_{ij}	: <i>Paketfehlerrate</i>
a_{ij}	: <i>Verzögerung</i>
α, β, γ	: <i>Skalierungsfunktionen</i>

Suhonen et al., *Cost-aware dynamic routing protocol for wireless sensor networks - design and prototype experiments, 2006*

Energieeffizientes Routing

2. Eigene Kosten:

$$C_i = C_{ij} + \delta(L_i) + \epsilon(E_i)$$

Skalierungsfunktionen:

$\alpha, \beta, \gamma, \delta$:

$$f(x) = a * x$$

ϵ :

$$f(x) = \begin{cases} a * (x - b)^c & : x > b \\ 0 & : x \leq b \end{cases}$$

a : *Gewicht*

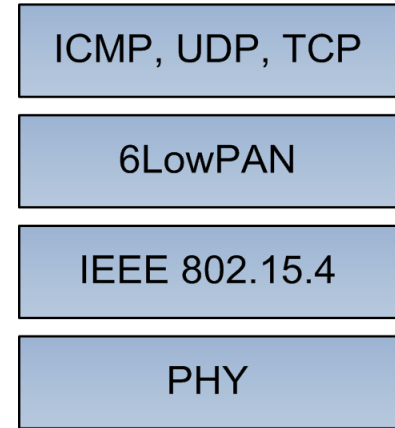
b : *Schwellwert*

c : *Steilheit*

Suhonen et al., *Cost-aware dynamic routing protocol for wireless sensor networks - design and prototype experiments, 2006*

6LowPAN

- IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks
- Setzt auf IEEE 802.15.4 auf (RFC 4944)
- Durch Kompression um bis zu 80% kleinere Header
- ICMP, UDP
- Autokonfiguration
- Fragmentierung
 - 1260 Byte IPv6 Frames -> 127 Byte IEEE 802.15.4 Frames
- Unterstützung von Routing-Protokollen auf Link-Ebene (Quell- und Zieladresse, Sprunganzahl)
- Unterstützung von 64 Bit und 16 Bit IEEE 802.15.4 Adressen
- Multi-/Broadcast



6LowPAN - Routing

- ROLL - Routing over Low Power and Lossy Networks
- IETF Arbeitsgruppe mit dem Ziel der Standardisierung von Routing-Protokollen
- Anwendungsspezifische Anforderungen für
 - Gebäudeautomation
 - Industrielle Steuerungen
 - Umweltmonitoring
- Analyse existierender Protokolle
- In der Spezifikationsphase (Ziel: Ende 2008)

Zusammenfassung

- Applikationsspezifische Auswahl und Konfiguration des MAC- und Routing-Protokolls notwendig
- Synchrone MAC-Protokolle für statische Netzwerke mit hohen Anforderungen an die Skalierbarkeit und eine lange Lebensdauer geeignet
- Berechnung einer Routing-Metrik mit Hilfe unterschiedlicher, die Verbindungsqualität und den Energiehaushalt betreffender, Parameter
- Anbindung an ein „Future-Internet“ über IPv6