Rechnernetze II

SoSe 2025

Roland Wismüller
Betriebssysteme / verteilte Systeme
roland.wismueller@uni-siegen.de
Tel.: 0271/740-4050, Büro: H-B 8404

Stand: 1. April 2025

Rechnernetze II

SoSe 2025

11 Drahtlose Sensornetze

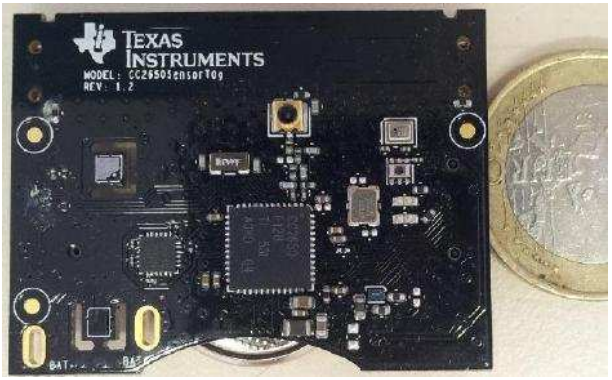
Inhalt

- Einführung
- MAC-Protokolle
- Routing

- Holger Karl, Andreas Willig: *Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks*, Wiley, 2005
- Koen Langendoen: *Medium Access Control in Wireless Sensor Networks*
- Pei Huang *et al*: *The Evolution of MAC Protocols in Wireless Sensor Networks: A Survey*, IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 15, No. 1, 2013, S. 101-120

Drahtlose Sensornetze (WSN)

- Ziel: Überwachung ausgedehnter Gebiete / Strukturen
  - Umweltmonitoring, Landwirtschaft, intelligente Gebäude, Strukturüberwachung von Bauwerken, Patienten-Monitoring, Industrie, Logistik, ...
- Batteriebetriebene Sensorknoten mit Sensorik, CPU, Radio
- Vernetzung ohne Infrastruktur
  - ad-hoc Netzwerk, selbstorganisierend



- Typische Eigenschaften von WSNs:
  - viele Knoten, hohe Knotendichte
  - beschränkte Ressourcen (Energie, CPU-Leistung, Reichweite)
  - Dynamik (Ausfälle, mobile Knoten)

Kommunikation in WSNs

- Eigenschaften der Funkgeräte (Radios)
  - geringe Sendeleistung ⇒ i.A. multi-hop Kommunikation
  - Stromverbrauch für Senden und Empfang etwa gleich
    - zur Energieeinsparung: Radio abschalten
    - Umschalten zwischen den Modi kostet Energie
- Kommunikationsstruktur
  - häufig eine Senke (mit Anbindung an LAN/WAN)
  - Kommunikationsformen: *flooding*, *convergecast*, *local gossip*
    - periodisch oder ereignisgetrieben
    - bei *convergecast*: Datenaggregation ist wichtig
  - Adressierung über Ort / Eigenschaften der Knoten
    - *data centric network* / *data centric routing*

Zielsetzung

- Funkgeräte sollen möglichst oft ausgeschaltet sein
- Gründe für überflüssigen Energieverbrauch:
  - ***Idle listening***: Funkgerät ist eingeschaltet, obwohl niemand eine Nachricht sendet
  - ***Overhearing***: Knoten empfängt eine Nachricht, die er nicht weitergeben / verarbeiten muß
  - ***Kollisionen***: insbes. durch *Hidden Station* Problem
    - RTS/CTS bei kleinen Datenmengen nicht sinnvoll
  - ***Verkehrs-Fluktuationen***: zeitlich und räumlich
    - führt ggf. zu *Overprovisioning*
  - ***Protokoll-Overhead***: MAC-Header, Steuernachrichten
    - daher ausgeklügelte Protokolle oft nicht verwendbar

Allgemeine Ansätze für MAC-Protokolle

- *Random Access* (*Contention based*)
  - Knoten können jederzeit versuchen, das Medium zu nutzen
  - verschiedene Varianten von CSMA
- *Fixed Assignment*
  - den Knoten werden statisch exklusive Ressourcen zugeteilt:
    - Zeitschlitze (*Time Division Multiple Access*, TDMA)
    - Frequenzen (*Frequency Division Multiple Access*, FDMA)
    - Codes (*Code Division Multiple Access*, CDMA)
    - Raumgebiet (*Space Division Multiple Access*, SDMA)
- *Demand Assignment*
  - Zuteilung der Ressourcen (Zeit, Frequenz) erfolgt dynamisch
    - z.B. *Token Ring*

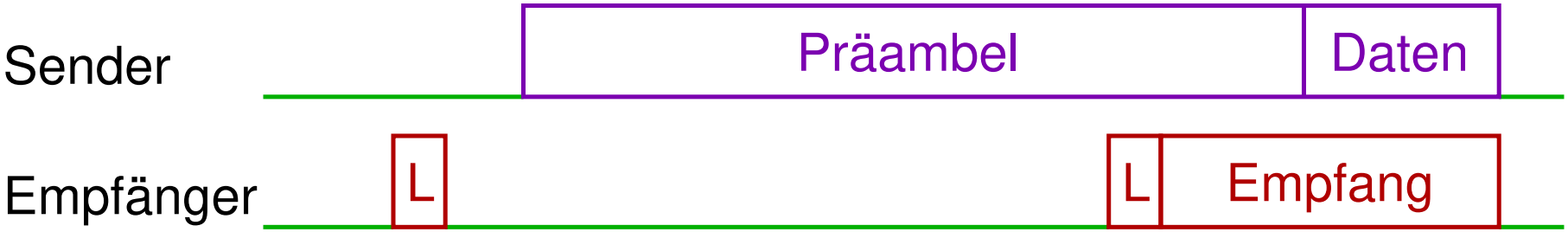
Grundprinzip energiesparender MAC-Protokolle

- Funkgeräte werden periodisch für kurze Zeit eingeschaltet, um nach eintreffenden Nachrichten zu lauschen (*Duty Cycle*)

- Problem: Senden nur möglich, wenn Empfänger aktiv ist
- Lösungsansätze:
  - asynchrone Protokolle: Sender hat kein a-priori Wissen, wann Empfänger aktiv ist
  - synchrone Protokolle: Sender weiß, wann Empfänger aktiv ist
  - Frame-basierte Protokolle: *Listen*-Periode wird zur Kollisionsvermeidung in Zeitschlitze unterteilt

Asynchrone Protokolle: B-MAC

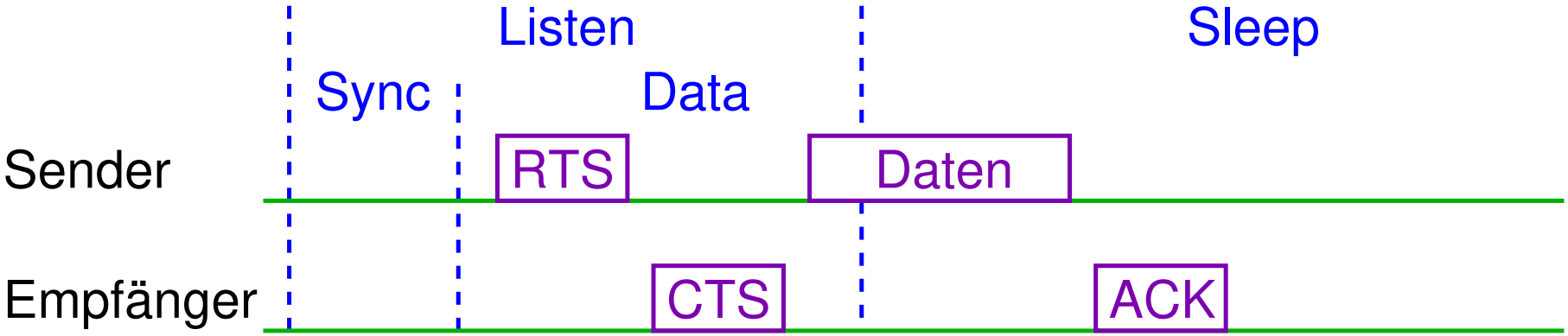
- Idee: Sender sendet vor dem Paket eine lange Präambel
  - wenn Empfänger Präambel hört, bleibt er wach



- *Low Power Listening*: Beim Abhören des Mediums (auch für CSMA) wird nur Signalstärke ausgewertet
- Optimierungen:
  - Folge kurzer Präambeln mit Zieladresse: kein *Overhearing*
  - zusätzlich: Zeitdauer bis zur Datenübertragung in Präambel
    - kein *Idle Listening*
- Nachteil: Sender verbraucht viel Energie

Synchrone Protokolle: S-MAC

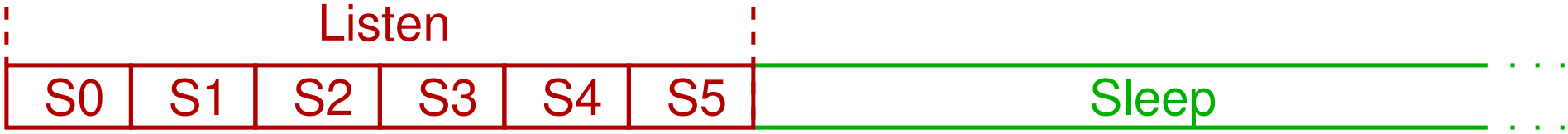
- Idee: Knoten synchronisieren ihre *Listen*- und *Sleep*-Zeiten
  - nicht global, sondern in räumlichen Clustern
  - Knoten kann ggf. in zwei Clustern sein
- Zusätzlich RTS/CTS zur Kollisionsvermeidung



- Variante: T-MAC
  - adaptive *Listen*-Periode, wird bei Aktivität verlängert
- Nachteil: Sychronisationsaufwand, nur wenige Hops pro Periode

Frame-basierte Protokolle: L-MAC

- Idee: Kollisionsvermeidung durch Einführung von Zeitschlitzen



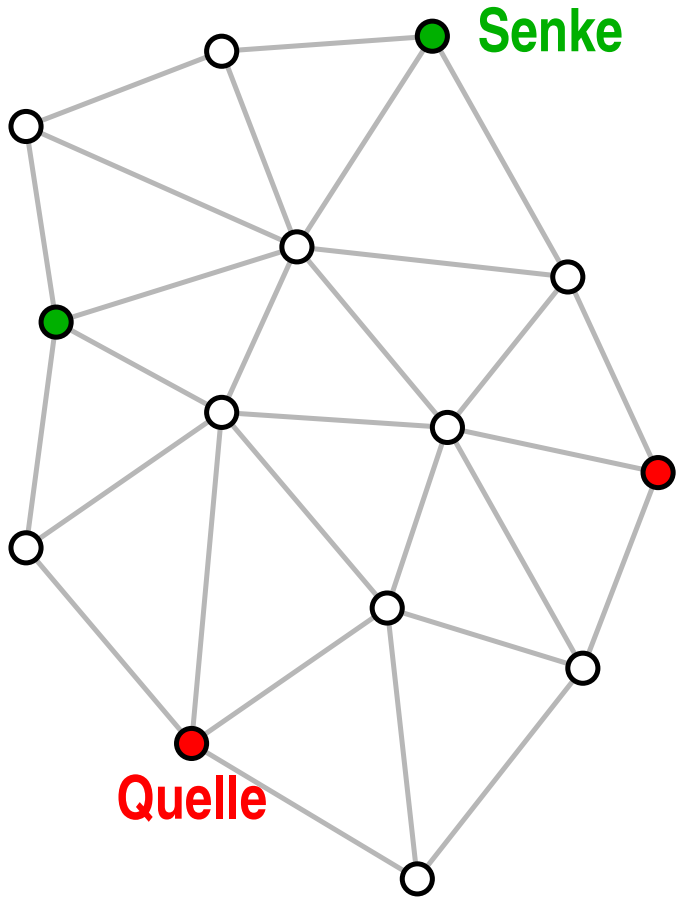
- Knoten senden nur in „ihrem“ Zeitschlitz
  - Header (in jeder Periode, zur Synchronisation)
    - enthält Bitmaske der durch Nachbarn belegten Zeitschlitze
  - ggf. gefolgt von Nutzdaten
- Ermittlung freier Zeitschlitze:
  - Oder-Verknüpfung aller empfangener Bitmasken
  - wähle freien Zeitschlitz zufällig, Wiederholung bei Kollision
- Nachteil: Overhead im Header, begrenzte Zahl an Nachbarn

Einige Aspekte

- Kommunikationsform / Routing-Schema:
  - *unicast*: Punkt-zu-Punkt
  - *broadcast* / *convergecast*: Baumstruktur
  - *geocast*: geographisches Routing
    - Adressierung über den Ort, Ortsinformation zum Routing
- Energieeffizienz
  - Minimierung der Energie pro Paket (bzw. Bit)
  - Maximierung der Lebensdauer des Netzes
  - Verbleibende Restenergie in den Batterien
  - Abwägung zu andern Metriken (Verzögerung, Zuverlässigkeit)
- *Multipath* Routing: Erhöhung der Zuverlässigkeit
- Mobile Knoten

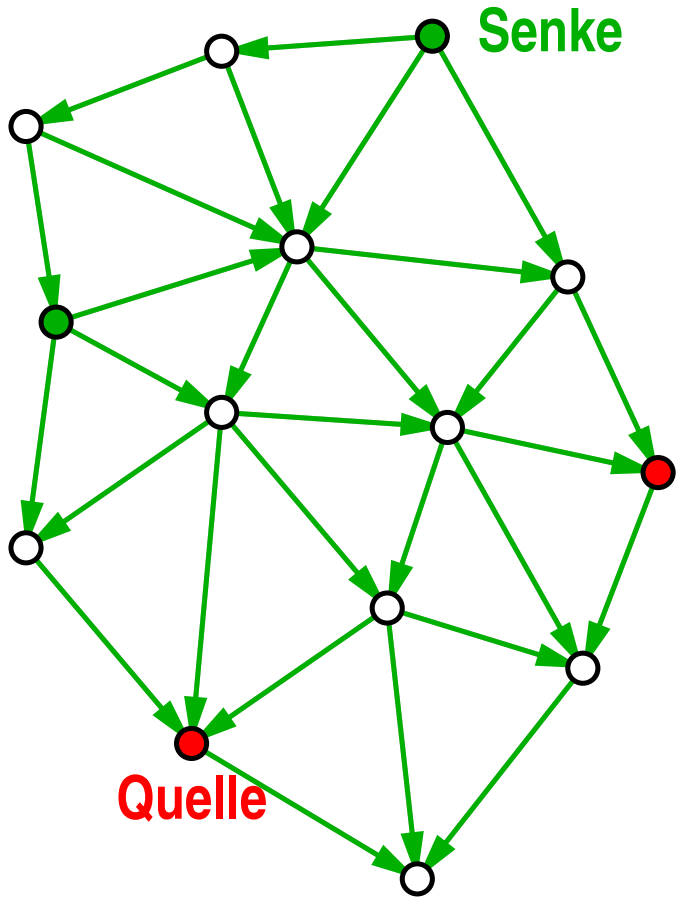
Beispiel: Datenzentrisches Routing mit *Directed Diffusion*

- Senken fordern periodische Informationen von Quellen an
- Vier Schritte:



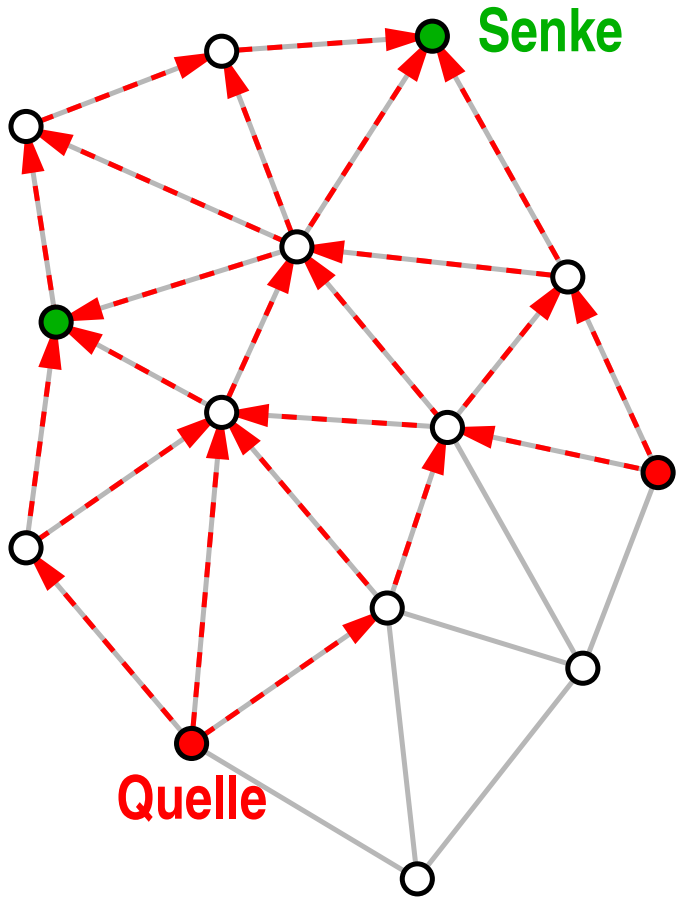
Beispiel: Datenzentrisches Routing mit *Directed Diffusion*

- Senken fordern periodische Informationen von Quellen an
- Vier Schritte:
  - *Interest propagation*
    - Anforderung an alle Knoten verteilen (z.B Flooding)



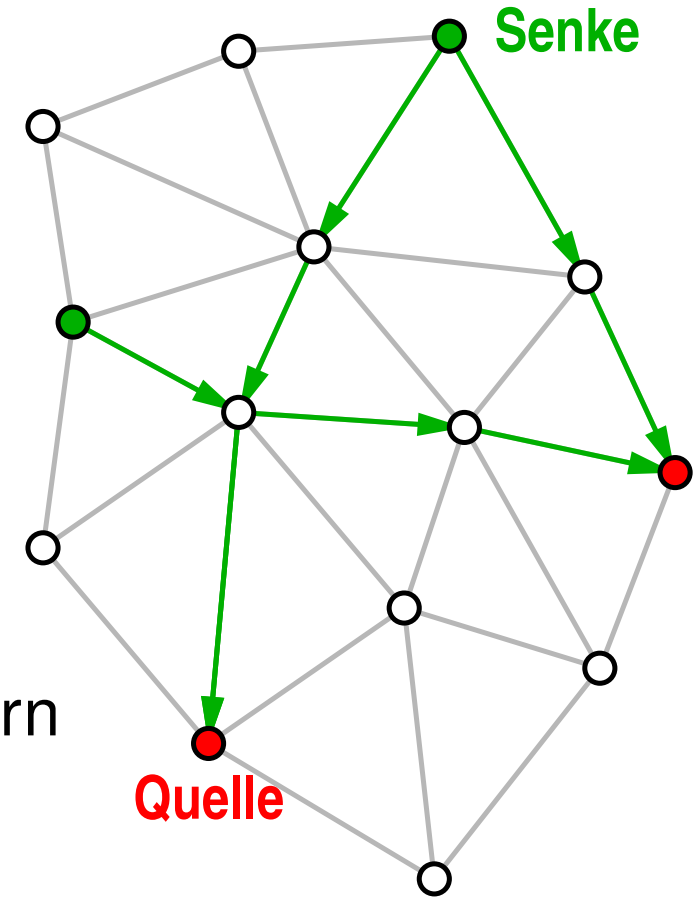
Beispiel: Datenzentrisches Routing mit *Directed Diffusion*

- Senken fordern periodische Informationen von Quellen an
- Vier Schritte:
  - *Interest propagation*
    - Anforderung an alle Knoten verteilen (z.B Flooding)
  - *Gradient setup / Exploratory data*
    - Daten mit geringer Rate entlang aller Pfade



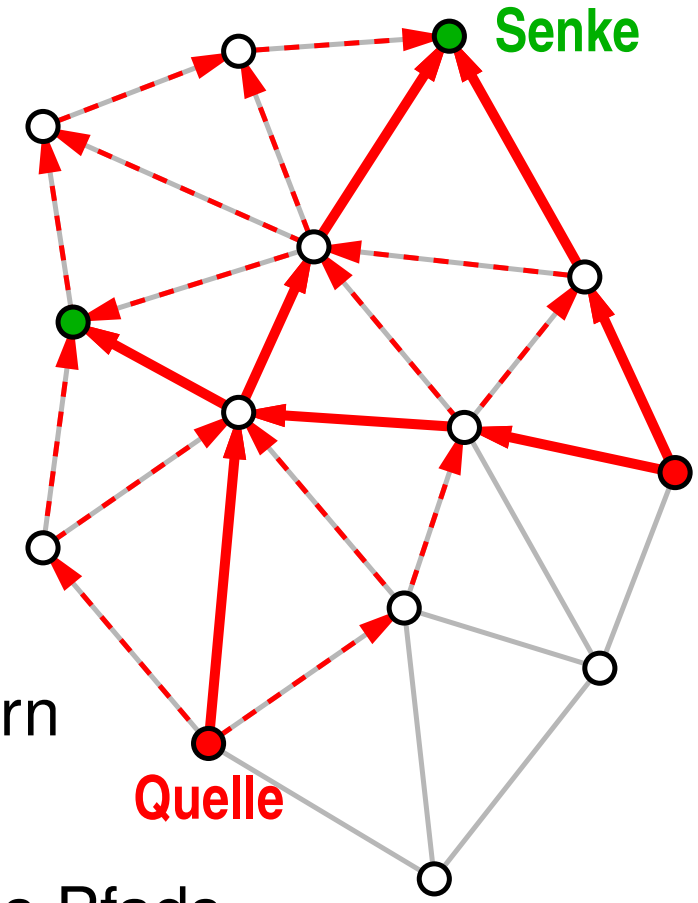
Beispiel: Datenzentrisches Routing mit *Directed Diffusion*

- Senken fordern periodische Informationen von Quellen an
- Vier Schritte:
  - *Interest propagation*
    - Anforderung an alle Knoten verteilen (z.B Flooding)
  - *Gradient setup / Exploratory data*
    - Daten mit geringer Rate entlang aller Pfade
  - *Reinforcement*
    - Empfänger wählt beste(n) Nachbarn



Beispiel: Datenzentrisches Routing mit *Directed Diffusion*

- Senken fordern periodische Informationen von Quellen an
- Vier Schritte:
  - *Interest propagation*
    - Anforderung an alle Knoten verteilen (z.B Flooding)
  - *Gradient setup / Exploratory data*
    - Daten mit geringer Rate entlang aller Pfade
  - *Reinforcement*
    - Empfänger wählt beste(n) Nachbarn
  - *Data delivery*
    - Daten mit hoher Rate entlang eines Pfads



11.4 Zusammenfassung

- Sensorknoten mit beschränkter Energie und Rechenleistung
- Selbstorganisierende Vernetzung
- Typisch: Kommunikation in Baumstruktur
- Adressierung über Ort bzw. Eigenschaften der Knoten
- Energiesparende MAC-Protokolle
  - Vermeidung von *Idle listening*, *Overhearing* und Kollisionen
  - Randbedingungen: Verkehrs-Fluktuationen, Protokoll-Overhead
  - Grundidee: *Low Duty Cycle*
- Routing
  - Berücksichtigung der Energie bei der Routenauswahl
  - *Data centric routing*