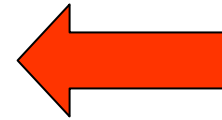


# MAC-Layer Protokolle für Sensornetze

**Seminarvortrag von  
Thomas Moscibroda**

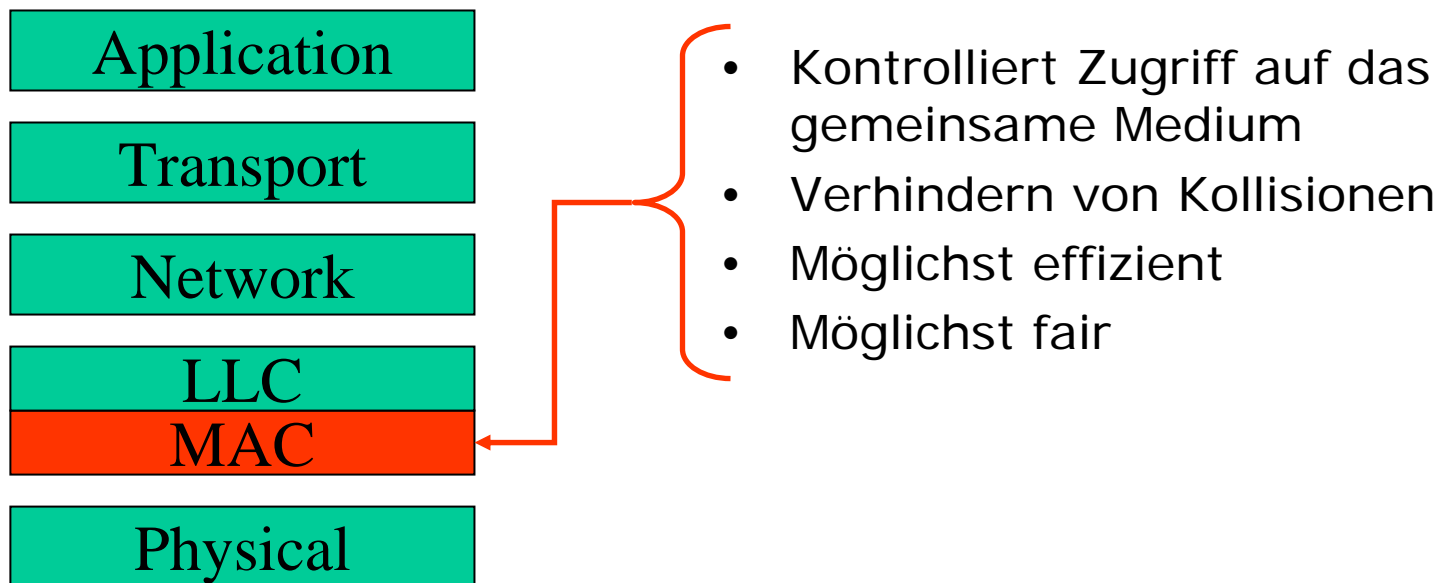
# Übersicht

- Einführung
- Existierende MAC Protokolle
- Designüberlegungen für Sensornetze
- 1. Protokoll: S-MAC
- 2. Protokoll: Berkeley-MAC
- 3. Protokoll: CSMA-PS
- Zusammenfassung und Fazit



# Medium Access Control

Zentrales Element im Protokollstack in allen Netzwerken mit gemeinsamem Medium



# Medium Access Control

- Viele existierende Protokolle
  - Ethernet – CSMA/CD
  - Wireless LAN - CSMA/CA
  - ALOHA, Slotted ALOHA
  - Bluetooth
  - ...

**→ Frage: Warum kein bestehendes Protokoll verwenden?**

# Eigenschaften Sensornetze

- Sensornetze sind drahtlose Ad-Hoc Netze...
  - Position der Knoten kann sich dynamisch ändern
  - Ausfall von Knoten möglich
  - Selbst-Organisation
  - Multi-Hop
- ...mit speziellen Charakteristiken
  - Sehr grosse Anzahl verteilter Knoten
  - Hardware Einschränkungen
  - Limitierte Energieressourcen

# Eigenschaften Sensornetze

- Typische Verkehrsmuster
  - Oft lange Ruhephasen
  - Kurzfristig hohes Verkehrsaufkommen
- **Empfangen** und **Horchen** am Medium brauchen ähnlich viel Energie wie **Senden**
  - Ziel: Funk so oft ausschalten wie möglich
  - Grosse Auswirkung auf MAC Design

# Ziele in Sensornetzen

- Sparsamer Umgang mit Energie
  - Entscheidendes Kriterium
- Skalierbarkeit
  - viele Knoten
- Anpassungsfähigkeit
  - neue Knoten, Ausfall von Knoten
- Weitere Aspekte sind sekundär...
  - Durchsatz
  - Latenz
  - Fairness

# Ziele in traditionellen Netzen

- Traditionelle MAC Protokolle sind optimiert im Bezug auf:
  - Durchsatz
  - Latenz
  - Fairness

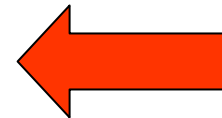
**→ Frage: Warum nicht ein bestehendes Protokoll verwenden?**

**→ Antwort: Andere Ziele und Anforderungen!**



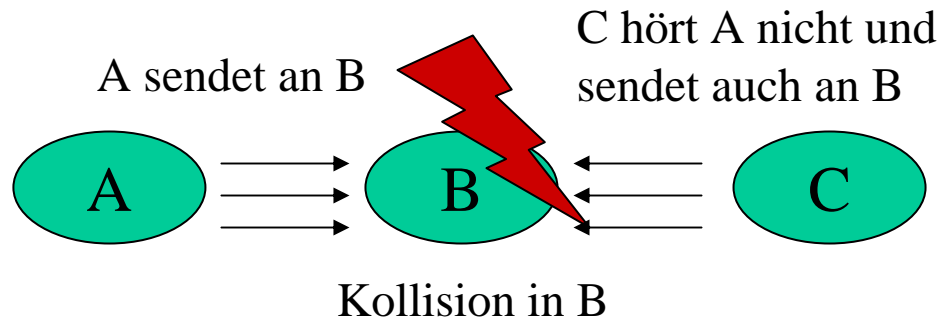
# Übersicht

- Einführung
- **Existierende MAC Protokolle**
- Designüberlegungen für Sensornetze
- 1. Protokoll: S-MAC
- 2. Protokoll: Berkeley-MAC
- 3. Protokoll: CSMA-PS
- Zusammenfassung und Fazit



# Hidden-Node Problem

- MAC Protokolle in drahtlosen Netzen müssen Hidden-Node Problem lösen.



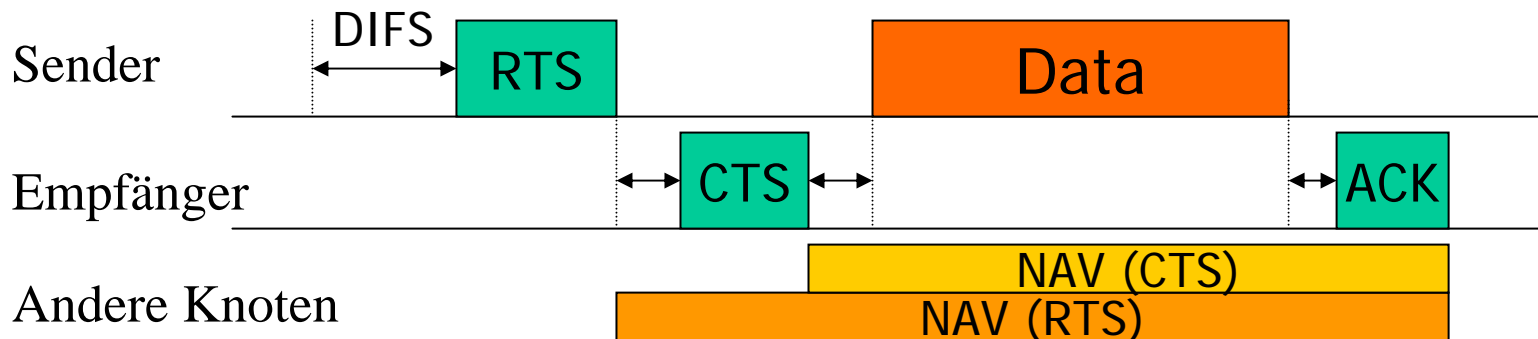
- Sender können Kollision beim Empfänger nicht erkennen.
- Problem tritt in Ethernet (CSMA/CD) nicht auf, weil sich alle Knoten gegenseitig hören

# Beispiel: IEEE 802.11

- Wireless LAN
- Single-Hop in einer Zelle
- Ziele
  - Hoher Durchsatz
  - Fairness: Alle Knoten haben ähnlichen Durchsatz
- CSMA/CA Protokoll mit positivem Acknowledgement
- Virtuelles und physisches Carrier Sensing (CS)

# Beispiel: IEEE 802.11

- RTS/CTS enthalten Übertragungsdauer des Pakets
  - Andere Knoten schweigen während dieser Zeit (NAV)
  - Damit wird Hidden-Node Problem abgeschwächt
  - Alle weitere Datenpakete enthalten Übertragungsdauer des jeweils darauffolgenden Pakets → Fairness
- Exponentieller Back-Off wenn Medium belegt



# Beispiel: IEEE 802.11

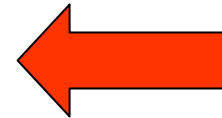
- Knoten müssen Medium ständig überwachen
  - Aber: lange Ruhephasen
  - Und: Horchen am Medium ähnlich teuer wie Senden

→ *Idle Listening*
- Overhead durch Kontrollpakete
  - RTS, CTS, ACK
- *Overhearing*

→ **Bezüglich Energieverbrauch sehr ineffizient**

# Übersicht

- Einführung
- Existierende MAC Protokolle
- Designüberlegungen für Sensornetze
- 1. Protokoll: S-MAC
- 2. Protokoll: Berkeley-MAC
- 3. Protokoll: CSMA-PS
- Zusammenfassung und Fazit



# Wo geht Energie verloren?

*Quelle: Ye, Heidemann, Estrin, "An Energie-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks", 2001*

- Kollisionen
    - Wiederholung korrupter Pakete kostet Energie
  - Overhearing
    - Mithören von Paketen für andere Knoten
  - Overhead durch Kontrollpakete
  - Idle Listening
    - "Unnötiges" Abhören des Mediums
    - Hauptursache für Energieineffizienz
- Schlüssel zum Erfolg: Knoten so oft wie möglich ausschalten !**

# Energieeffizienz im MAC Design

## Contention Protokolle

- Keine explizite Kontrolle
- Knoten "streiten" sich um Medium
- Kollisionen möglich

## TDMA Protokolle

- Zeit in Schlitze eingeteilt
- Knoten reservieren Zeitschlitze zum Senden
- Synchronisation zwischen Knoten notwendig



# Energieeffizienz im MAC Design

## Contention Protokolle

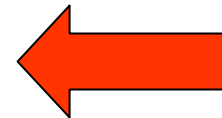
- Weniger Energieeffizient
  - *Idle Listening*
  - Kurzfristig hohes Verkehrsaufkommen
- Gut in dynamischen Netzen
  - Keine Synchronisation notwendig
  - Einbinden neuer Knoten ist kein Problem

## TDMA Protokolle

- Potentiell Energieeffizient
  - Knoten abschalten in inaktiven Zeitschlitz
- Weniger Skalierbar in dynamischen Multi-Hop Netzen
  - Synchronisation zwischen Knoten notwendig
  - Einbinden neuer Knoten ist schwierig

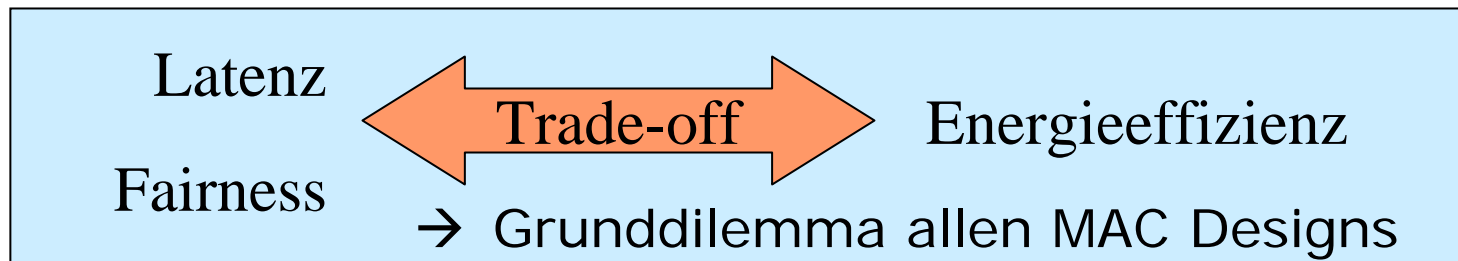
# Übersicht

- Einführung
- Existierende MAC Protokolle
- Designüberlegungen für Sensornetze
- **1. Protokoll: S-MAC**
- 2. Protokoll: Berkeley-MAC
- 3. Protokoll: CSMA-PS
- Zusammenfassung und Fazit



# S-MAC

- Ye, Heidemann, Estrin - UCLA - 2001
  - Ye, Heidemann, Estrin, "An Energie-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks", USC/ISI Technical Report ISI-TR-543, 2001



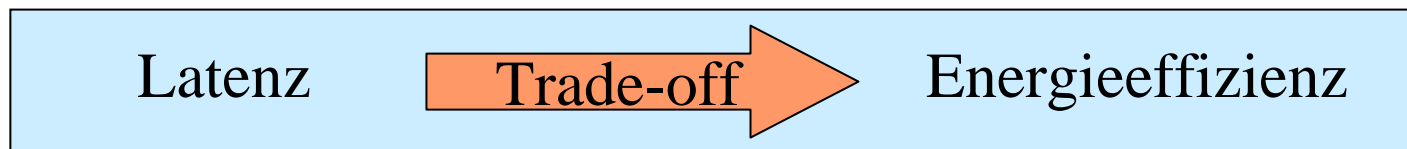
- Hauptbestandteile:
  - Periodisches Abwechseln von *Listen* und *Sleep*
  - Vermeidung von Kollisionen
  - Vermeidung von *Overhearing*
  - *Message Passing*

# 1. Periodisches *Listen* und *Sleep*

- Problem: *Idle Listening* verbraucht viel Energie
- Lösung: Periodisches *Listen* und *Sleep*

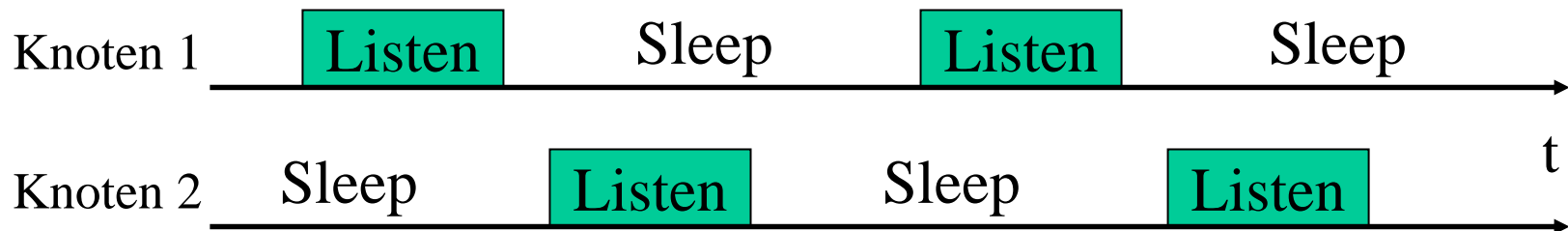


- Empfang abschalten im Schlafmodus
- *Listen* kürzer als *Sleep* (applikationsabhängig)



# 1. Periodisches *Listen* und *Sleep*

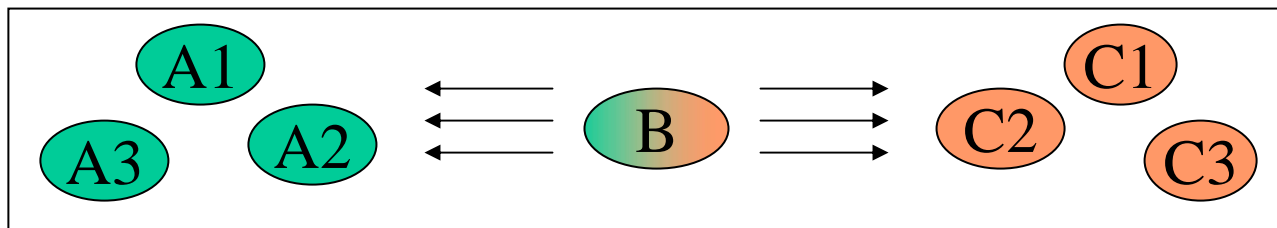
- Perioden können verschieden sein



- Alle Nachbarknoten sollten möglichst die gleichen Schedules haben  
→ Ist aber nicht immer möglich!
- Knoten führen Liste mit den Schedules aller Nachbarn

# 1. Periodisches *Listen* und *Sleep*

- Bestimmung des ersten Schedules
  - Neuer Knoten horcht während eines SYNC-Intervalls
  - Wenn er eine SYNC-Nachricht erhält
    - *Knoten übernimmt Schedule*
  - Wenn er keine SYNC-Nachricht erhält
    - *Knoten wählt neuen Schedule und sendet ihn periodisch*
  - Ein Knoten muss eventuell zwei Schedules annehmen!



# 1. Periodisches *Listen* und *Sleep*

- Aufrechterhaltung der Synchronisation
  - Problem: Clock Drift → Synchronisation geht verloren
  - Taktgeber sendet periodisch ein SYNC-Paket
  - Andere Knoten passen ihren Timerstand an
- Damit SYNC und Daten nicht kollidieren
  - Aufteilung der Listen-Phase in zwei Teile



## 2. Vermeidung von Kollisionen

- Problem: Mehrere Sender wollen übertragen
- Lösung: Ähnlich wie in IEEE 802.11
  - RTS/CTS gegen Hidden-Node Problem
  - Physikalisches und virtuelles Carrier Sense
  - Random Back-Off

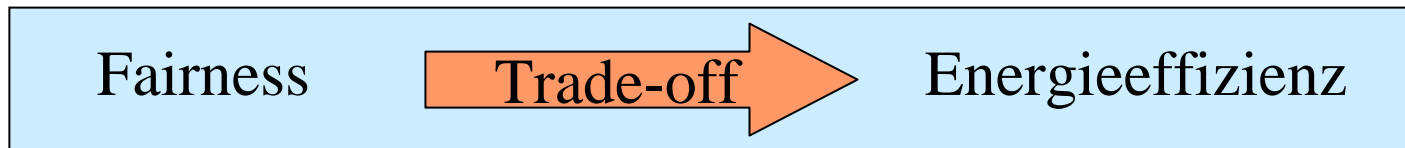


# 3. Vermeidung von Overhearing

- Problem: Unnötiges Mithören von Paketen
- Lösung: Schläfe während Nachbarn übertragen
  - Grundidee von PAMAS (Singh, Raghavendra 1998)
- Welche Knoten sollen schlafen?
  - Alle direkten Nachbarn vom Sender und Empfänger
- Wie lange sollen sie schlafen?
  - Pakete (inkl. RTS/CTS) enthalten Übertragungsdauer

# 4. Message Passing

- Problem: Wie werden Nachrichten übertragen?
- Lösung: Teile Nachricht in kleine Pakete auf und sende alle gemeinsam
  - Nur ein RTS/CTS für alle Pakete
  - RTS/CTS reservieren Medium für alle Pakete
- Andere Knoten schlafen während ganzer Nachricht



# Zusammenfassung S-MAC

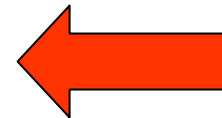
- Kollisionen
  - Lösung: Verwende RTS/CTS wie bei IEEE 802.11
- Overhearing
  - Energieeinsparung: Unbeteiligte Knoten schalten während der Transaktion den Empfang aus
- Overhead durch Kontrollpakete
  - Verbesserung durch *Message-Passing*
- Idle Listening
  - Energieeinsparung durch periodisches Umschalten zwischen *Sleep* und *Listen*

# Resultate S-MAC

- Positives:
  - Implementiert und getestet auf Motes (UC Berkeley)
  - S-MAC: >50% Energieeinsparung gegenüber 802.11
- Kritik:
  - Bis jetzt nur in kleinen Umgebungen getestet
  - Eventuell Probleme in grossen Umgebungen
  - Multi-Hop Latenz eventuell sehr gross
  - “Grenzknoten“ verbrauchen mehr Energie

# Übersicht

- Einführung
- Existierende MAC Protokolle
- Designüberlegungen für Sensornetze
- 1. Protokoll: S-MAC
- **2. Protokoll: Berkeley-MAC**
- 3. Protokoll: CSMA-PS
- Zusammenfassung und Fazit



# Berkeley-MAC

- Woo, Culler - Berkeley - 2001
  - *Woo, Culler, "A Transmission Control Scheme for Media Access in Sensor Networks", Proc. ACM MobiCom '01, Rom, July 2001*
- Hauptziel:
  - Energieeffizienz
- Annahmen:
  - Kurzfristig hohes Verkehrsaufkommen
  - Kurze Pakete (~30 Bytes)

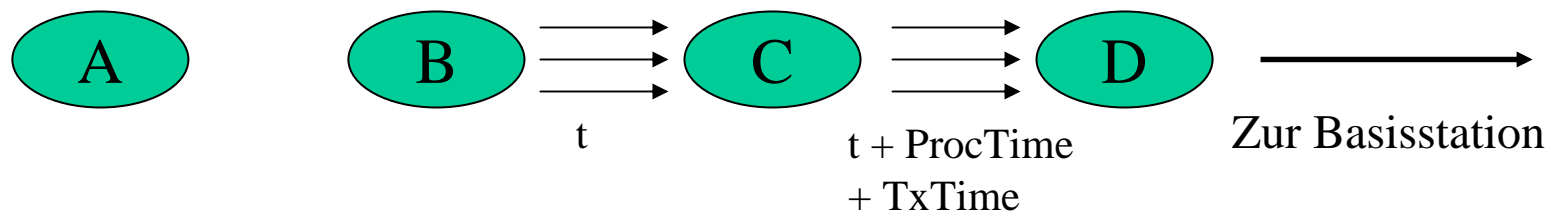
# Berkeley-MAC

- Basiert auf CSMA
- Energieeinsparungen durch
  - Brechen der Synchronisation  
Einfügen eines zufällig langen Delays vor dem CS
  - Weniger Overhearing  
Schlafmodus während des Back-Off
  - Kein Overhead durch Kontrollpakete
  - **Aber: Idle Listening ?**



# Keine Kontrollpakete

- Idee: "Parenting"
  - Annahme: Alle Daten gehen zur Basisstation



- Vermeide Kollision zwischen Knoten A und C
  - A hört: B sendet zum Zeitpunkt  $t$
  - A schläft bis zum Zeitpunkt  $t + \text{ProcTime} + \text{TxTime}$
- Acknowledgement ist implizit durch Overhearing
  - Aber: Funktioniert nur bei Symmetrie

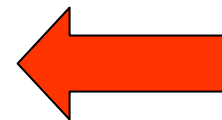


# Resultate Berkeley-MAC

- Positives:
  - Implementiert und getestet auf Motes (UC Berkeley)
  - Energiegewinn gegenüber 802.11
- Kritik:
  - Idle Listening Problem ungelöst
  - Basiert auf Symmetrie der Kanäle
  - Annahme: Keine Inter-Sensor Kommunikation

# Übersicht

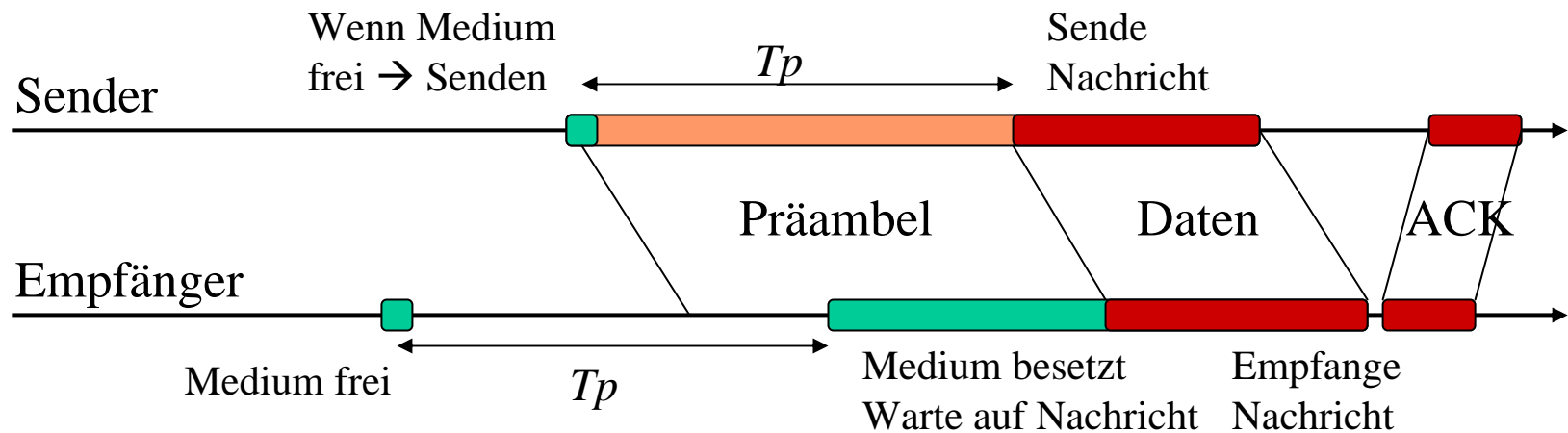
- Einführung
- Existierende MAC Protokolle
- Designüberlegungen für Sensornetze
- 1. Protokoll: S-MAC
- 2. Protokoll: Berkeley-MAC
- **3. Protokoll: CSMA-PS**
- Zusammenfassung und Fazit



# CSMA-PS

- El-Hoiydi – 2002
  - *El-Hoiydi, "Aloha with Preamble Sampling for Sporadic Traffic in Ad Hoc Wireless Sensor Networks", in Proc. IEEE International Conference on Communications (ICC 2002), New York, 2002*
- Carrier Sense Medium Access Preamble Sampling
- Hauptidee
  - Bei wenig Verkehr → Vermeidung von Idle Listening entscheidendes Kriterium
  - Kombiniere Präambel Sampling mit CSMA

# CSMA-PS



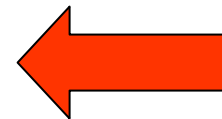
- Sender sendet Präambel der Länge  $T_p$  vor jeder Nachricht
- Sensoren wachen alle  $T_p$  auf und prüfen ob Medium besetzt
  - Falls Präambel erkannt → Empfänger wartet und empfängt Nachricht
- ACK wenn Übertragung erfolgreich

# Resultate CSMA-PS

- Problem von CSMA-PS
  - Hoher Energieverbrauch durch lange Präambel
  - Hohe Kollisionswahrscheinlichkeit
- Verbesserung: Synchronized-CSMA-PS
  - Idee: Merken der Schedules aller Nachbarn
  - Sende Präambel genau dann, wenn Empfänger aufwacht
  - Mehrere Jahre Lebenszeit (bei  $T_p = 10s$ )

# Übersicht

- Einführung
- Existierende MAC Protokolle
- Designüberlegungen für Sensornetze
- 1. Protokoll: S-MAC
- 2. Protokoll: Berkeley-MAC
- 3. Protokoll: CSMA-PS
- **Zusammenfassung und Fazit**



# Zusammenfassung

- Aufgaben und Ziele von MAC-Protokollen
- Für Sensornetze sind neue MAC-Protokolle notwendig
- Energieverlust hat verschiedene Quellen
  - Idle Listening ist entscheidend!
- S-MAC
- Berkeley-MAC
- CSMA-PS

# Fazit

- Sehr interessantes Gebiet
- Noch kein Standard-Protokoll
  - Es gibt kaum vergleichende Messungen
- Viel Raum für Verbesserungen
  - Verhinderung von Idle Listening
  - Vermeidung von Kollisionen, Overhearing
- Neue Ideen?

**→ Es gibt noch viel zu Erforschen!**

