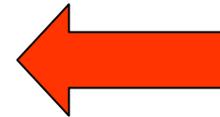


MAC-Layer Protokolle für Sensornetze

**Seminarvortrag von
Thomas Moscibroda**

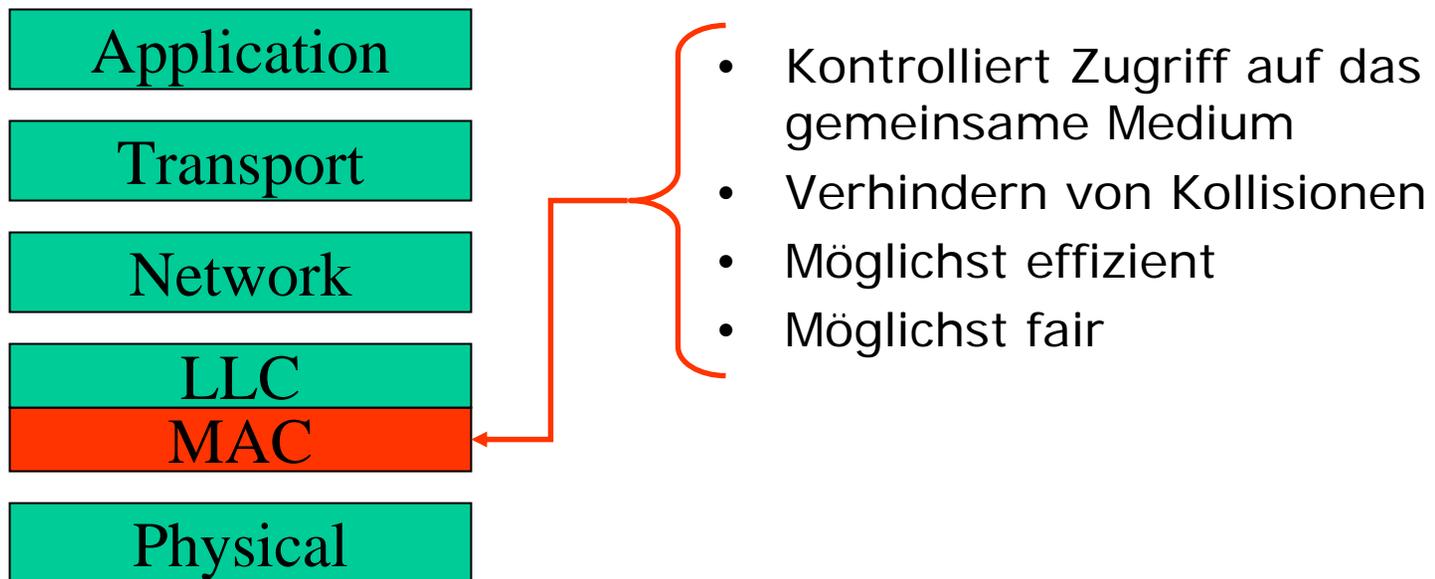
Übersicht

- 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

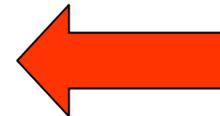
- Traditionelle MAC Protokolle sind optimiert im Bezug auf:
 - Durchsatz
 - Latenz
 - Fairness

→ Frage: Warum nicht ein bestehendes Protokoll verwenden?

→ Antwort: Andere Ziele und Anforderungen!

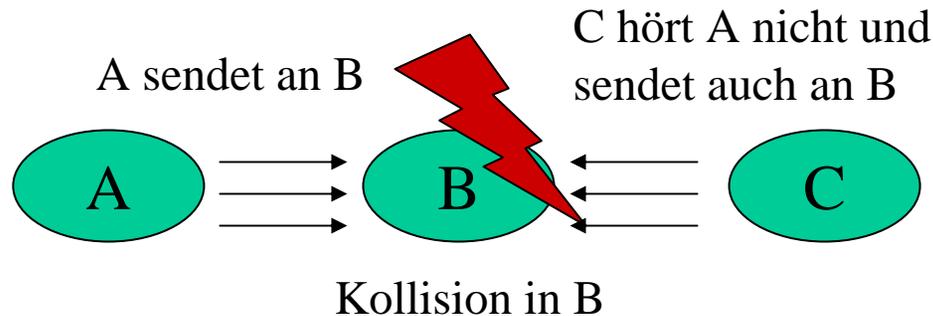
Übersicht

- 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.



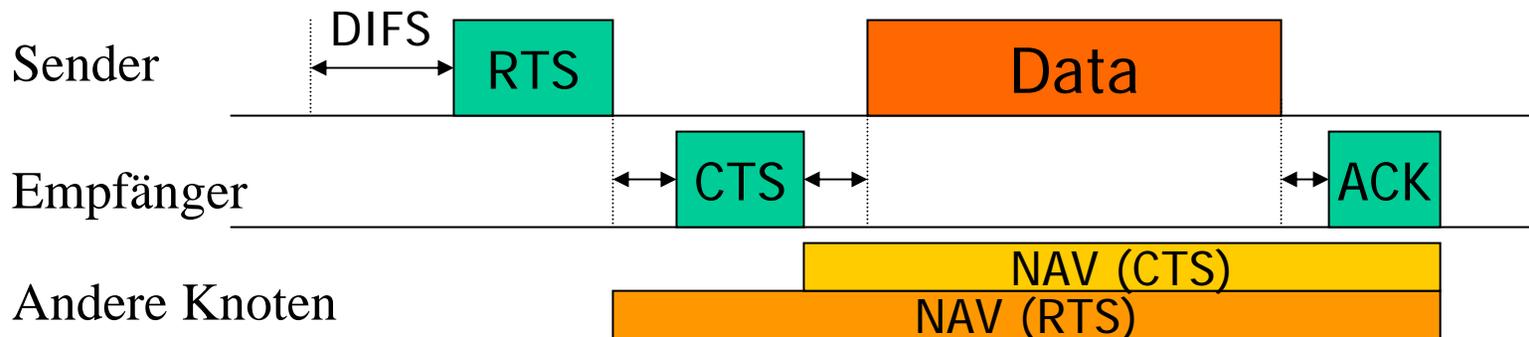
- Sender können Kollision beim Empfänger nicht erkennen.
- Problem tritt in Ethernet (CSMA/CD) nicht auf, weil sich alle Knoten gegenseitig hören

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

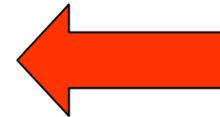
- Knoten müssen Medium ständig überwachen
 - Aber: lange Ruhephasen
 - Und: Horchen am Medium ähnlich teuer wie Senden

→ *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

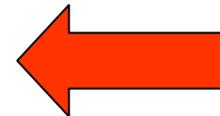
- Weniger Energieeffizient
 - *Idle Listening*
 - Kurzfristig hohes Verkehrsaufkommen
- Gut in dynamischen Netzen
 - Keine Synchronisation notwendig
 - Einbinden neuer Knoten ist kein Problem

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

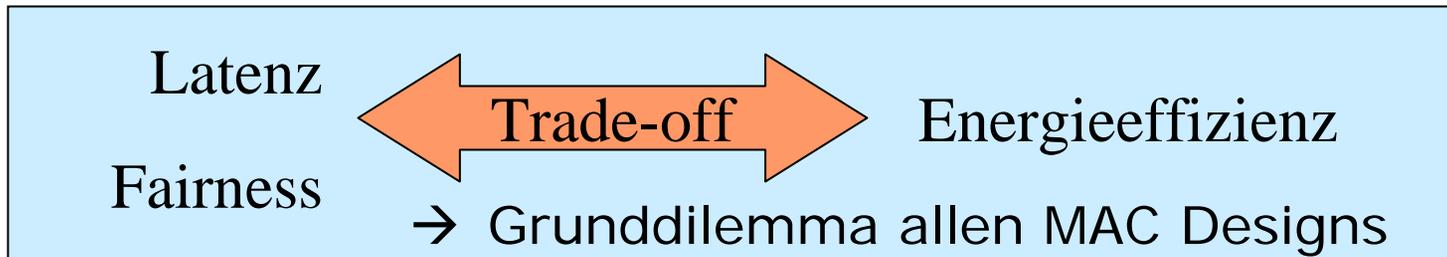
Übersicht

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



S-MAC

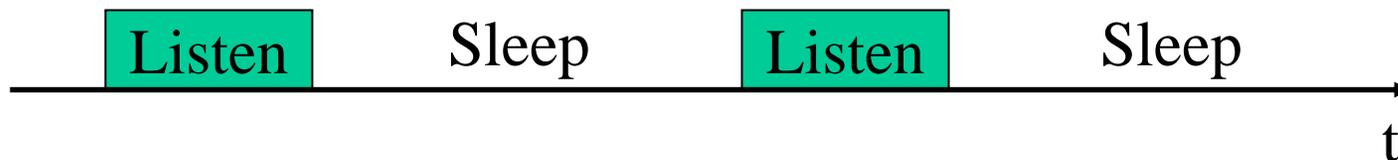
- Ye, Heidemann, Estrin - UCLA - 2001
 - Ye, Heidemann, Estrin, "An Energie-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks", USC/ISI Technical Report ISI-TR-543, 2001



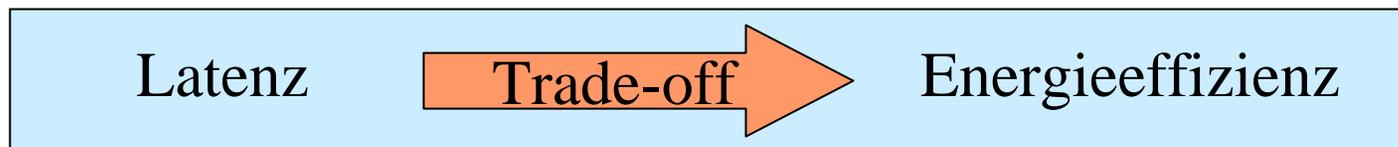
- Hauptbestandteile:
 - Periodisches Abwechseln von *Listen* und *Sleep*
 - Vermeidung von Kollisionen
 - Vermeidung von *Overhearing*
 - *Message Passing*

1. Periodisches *Listen* und *Sleep*

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

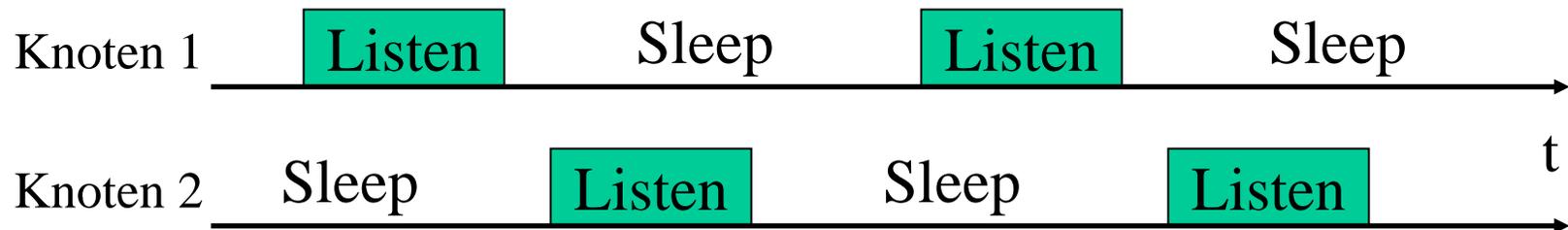


- Empfang abschalten im Schlafmodus
- *Listen* kürzer als *Sleep* (applikationsabhängig)



1. Periodisches *Listen* und *Sleep*

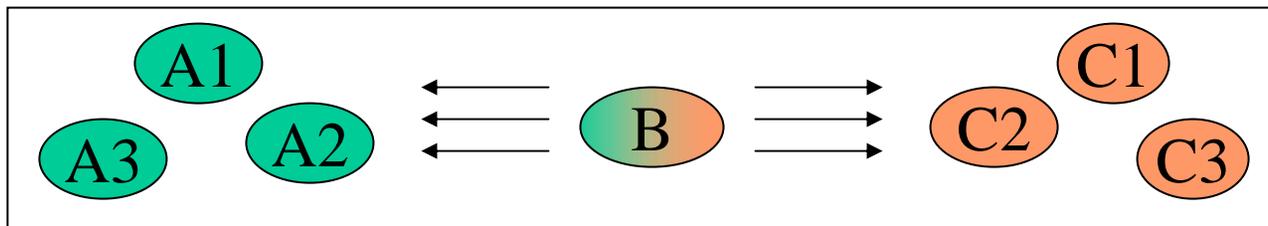
- Perioden können verschieden sein



- 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

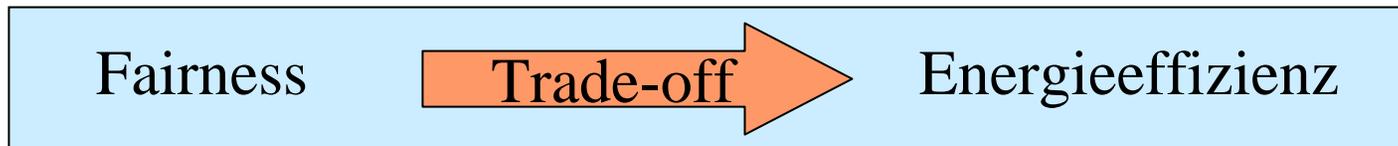
- Problem: Mehrere Sender wollen übertragen
- Lösung: Ähnlich wie in IEEE 802.11
 - RTS/CTS gegen Hidden-Node Problem
 - Physikalisches und virtuelles Carrier Sense
 - Random Back-Off

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

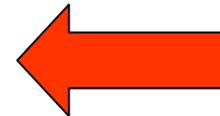
- Kollisionen
 - Lösung: Verwende RTS/CTS wie bei IEEE 802.11
- Overhearing
 - Energieeinsparung: Unbeteiligte Knoten schalten während der Transaktion den Empfang aus
- Overhead durch Kontrollpakete
 - Verbesserung durch *Message-Passing*
- Idle Listening
 - Energieeinsparung durch periodisches Umschalten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

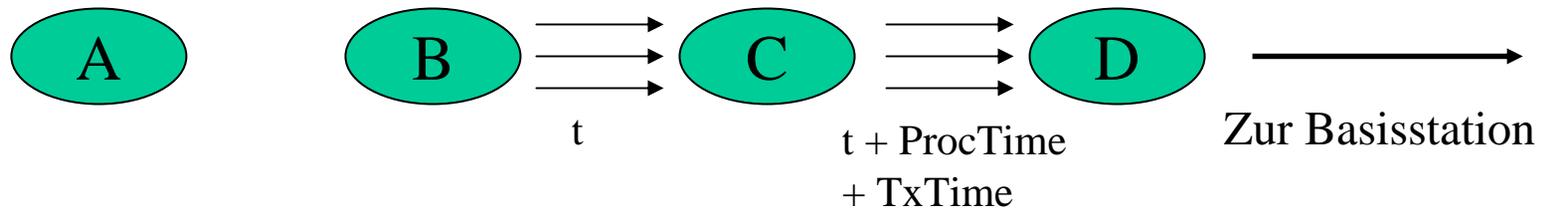
Berkeley-MAC

- 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



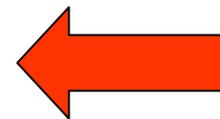
- Vermeide Kollision zwischen Knoten A und C
 - A hört: B sendet zum Zeitpunkt t
 - A schläft bis zum Zeitpunkt $t + \text{ProcTime} + \text{TxTime}$
- Acknowledgement ist implizit durch Overhearing
 - Aber: Funktioniert nur bei Symmetrie

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

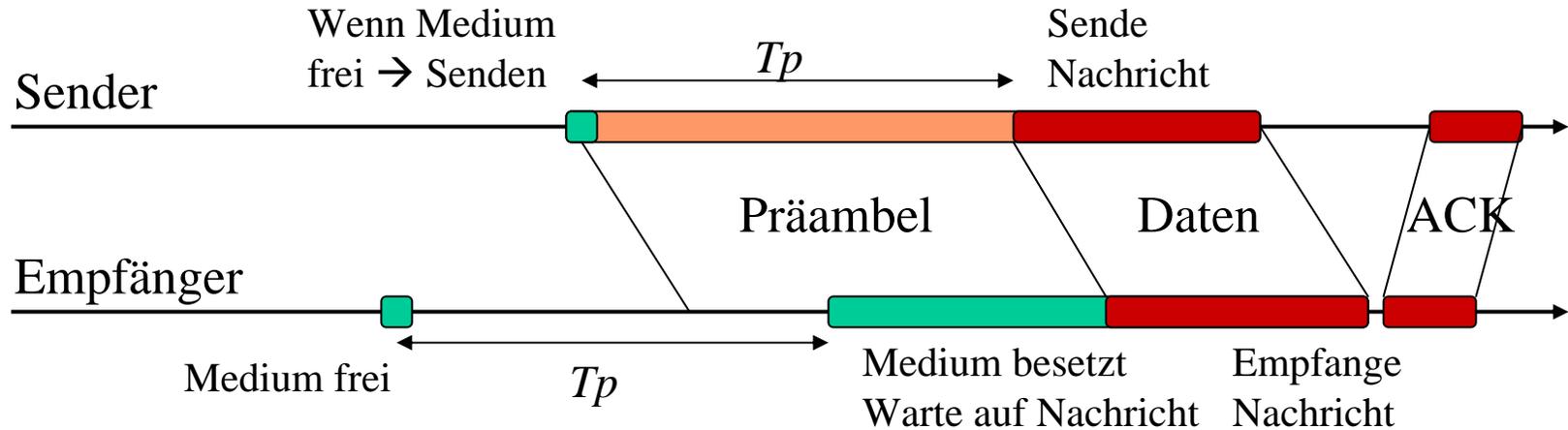
- Einführung
- Existierende MAC Protokolle
- Designüberlegungen für Sensornetze
- 1. Protokoll: S-MAC
- 2. Protokoll: Berkeley-MAC
- **3. Protokoll: CSMA-PS**
- Zusammenfassung und Fazit



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



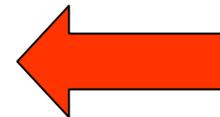
- Sender sendet Präambel der Länge T_p vor jeder Nachricht
- Sensoren wachen alle T_p auf und prüfen ob Medium besetzt
 - Falls Präambel erkannt \rightarrow Empfänger wartet und empfängt Nachricht
- ACK wenn Übertragung erfolgreich

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!

