

# MAC-Layer Protokolle für Sensornetze

Seminararbeit im Rahmen des Fachseminars  
Verteilte Systeme im Sommersemester 2003

Thomas Moscibroda

Professor: **Prof. Dr. Friedemann Mattern**  
Betreuer: **Matthias Ringwald**  
Institut: **Institut für Pervasive Computing**  
**Departement Informatik**  
**ETH Zürich**

## 1 Einleitung

Drahtlose Sensornetze sind eine neue, aufstrebende Technologie mit einer grossen Anzahl möglicher Anwendungen. Typischerweise bestehen Sensornetze aus sehr vielen verteilten Knoten, die sich selbst organisieren und gemeinsam ein drahtloses Netzwerk bilden. Diese winzigen Knoten werden durch eine Batterie mit Energie versorgt und sind ausgestattet mit einem oder mehreren Sensoren, einem Mikroprozessor und einem Funkmodul.

*Medium Access Control* (MAC) spielt eine wichtige Rolle in allen Netzwerken mit gemeinsamem Medium. Die grundlegende Aufgabe eines MAC-Layer Protokolls besteht darin, den Zugriff auf das gemeinsame Medium zu regulieren und damit die Kommunikation zwischen den verschiedenen Knoten im Netzwerk zu ermöglichen. Bestehende MAC-Layer Protokolle für Netzwerke wie Ethernet oder Wireless LAN haben sich bewährt und sind gut untersucht, können aber aufgrund der speziellen Eigenschaften von Sensornetzen nicht übernommen werden.

Dieses Dokument stellt im ersten Teil die spezifischen Eigenschaften und Probleme dar, die den Entwurf von MAC-Protokollen für Sensornetze beeinflussen. Das Kapitel 3 beschreibt am Beispiel von Wireless LAN ein etabliertes MAC-Protokoll. Ausgehend davon stellt das Kapitel 4 vier Quellen der Energieineffizienz vor und leitet daraus Forderungen für den Entwurf eines MAC-Protokolls für Sensornetze ab. In den Kapiteln 5 bis 7 werden drei verschiedene Protokolle vorgestellt.

## 2 Eigenschaften von Sensornetzen

Sensornetze weisen gegenüber anderen Netzwerk-Typen eine Reihe spezifischer Eigenschaften auf, die den Entwurf von MAC-Protokollen stark beeinflussen. Wie in allen drahtlosen Ad-Hoc-Netzwerken kann sich die Topologie bei Sensornetzen dynamisch ändern. Es können jederzeit neue Knoten hinzukommen und bestehende Knoten ausfallen. Was Sensornetze hingegen von anderen Ad-Hoc-Netzwerken unterscheidet, ist die Anzahl der eingesetzten Knoten. In vielen Szenarien geht man von bis zu 100'000 oder noch mehr Knoten aus [1].

Die beschränkte Hardware und die stark limitierten Energieressourcen sind weitere wichtige Eigenschaften von Sensornetzen. Da das Ersetzen oder Auffüllen der Batterie eines Sensorknotens in den meisten Szenarien unmöglich ist, ist die Lebensdauer eines Knotens durch die Lebensdauer der Batterie beschränkt. Energieeffizienz ist in Sensornetzen somit ein entscheidender Faktor.

Das typische Verkehrsmuster in Sensornetzen unterscheidet sich von demjenigen in vielen traditionellen drahtlosen Netzen. Der Verkehr in Sensornetzen ist häufig stark korreliert und variabel [2]. Lange Ruhephasen mit nur wenig Verkehr wechseln sich ab mit kurzen, intensiven Phasen mit viel Verkehr. Ein solches Verkehrsmuster tritt beispielsweise in vielen Applikationen zur Überwachung der physischen Umwelt auf, da Ereignisse oft von mehreren Sensoren gleichzeitig detektiert und verarbeitet werden.

Sehr grosse Auswirkungen auf den Entwurf von MAC-Protokollen für Sensornetze hat vor allem auch die folgende Eigenschaft: In Sensornetzen kostet das Empfangen einer Nachricht und sogar das blosse Horchen am Medium ähnlich viel Energie wie das Senden einer Nachricht. Während die benötigte Sendeleistung ungefähr in der dritten Potenz zur Distanz abnimmt [1], bleibt die benötigte Leistung für den Empfang einer Nachricht im wesentlichen konstant. Da bei Sensornetzen meistens nur über kurze Distanzen im Bereich von wenigen Metern gesendet wird, genügt eine sehr kleine Sendeleistung. Sie ist nicht wesentlich höher als die für den Empfang benötigte Leistung. Dies hat wichtige Konsequenzen: Um ein MAC-Protokoll für Sensornetze energieeffizient zu gestalten, genügt es nicht, möglichst wenig zu senden. Zusätzlich muss auch die Zeit, die ein Knoten horchend am Medium verbringt, minimiert werden.

Alle diese charakteristischen Eigenschaften führen dazu, dass MAC-Protokolle in Sensornetzen hinsichtlich anderer Punkte optimiert werden müssen, als das zum Beispiel im Ethernet oder Wireless LAN der Fall ist. Während in etablierten MAC-Protokollen typischerweise ein möglichst hoher Durchsatz, eine geringe Latenz und eine faire Ausnutzung der zur Verfügung stehenden Bandbreite die wichtigsten Ziele darstellen, stehen in Sensornetzen die Energieeffizienz, die Skalierbarkeit und die Anpassungsfähigkeit an das dynamische Umfeld im Vordergrund. Aufgrund dieser unterschiedlichen Anforderungen und Ziele sind bereits existierende MAC-Protokolle für Sensornetze ungeeignet und können nicht übernommen werden.

### 3 Wireless LAN

In den letzten Jahren wurden verschiedene MAC-Protokolle für Sensornetze vorgeschlagen. Drei davon werden in den Kapiteln 5 bis 7 genauer vorgestellt. Um die Besonderheiten dieser drei speziell für Sensornetze konzipierten Protokolle besser herausarbeiten zu können, sollen in diesem Kapitel vorerst das sogenannte *Hidden-Node Problem* und wichtige existierende Lösungsverfahren in drahtlosen Netzen beschrieben werden. Als Beispiel dient dazu Wireless LAN (WLAN).

Gegenüber Netzwerken mit drahtgebundenem Medium wie dem Ethernet, schafft das drahtlose Medium eine Reihe zusätzlicher Probleme. Abbildung 1 zeigt das wichtigste davon, das *Hidden-Node* (oder auch *Hidden-Terminal*) Problem.

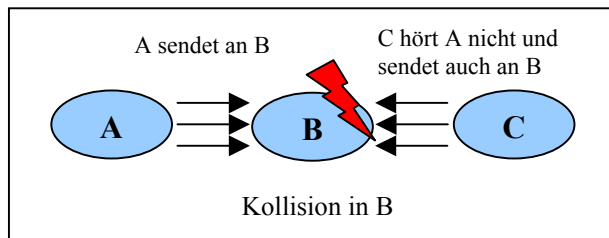


Abbildung 1. Hidden-Node Problem

Bevor ein Knoten sendet, horcht er am Medium (*Carrier Sense*) und überprüft, ob dieses frei ist. Im Beispiel horcht der Knoten A am Medium und stellt fest, dass es frei ist. Somit darf er an B senden. Aufgrund der grösseren Distanz zwischen A und C ist es

möglich, dass der Knoten C das von A ausgesendete Signal nicht hören kann. Auch C stellt also ein freies Medium fest und kann somit an B senden. Dies führt jedoch in B zu einer Kollision. Wichtig ist es zu bemerken, dass keiner der beiden Sender diese Kollision im Knoten B detektieren kann. Im klassischen Ethernet kann diese Situation nicht auftreten, weil stets gewährleistet ist, dass sich alle Stationen gegenseitig hören können. Jedes MAC-Protokoll für drahtlose Netze sollte in irgendeiner Weise das Hidden-Node Problem angehen.

Das MAC-Protokoll in WLAN ist in erster Linie auf einen möglichst hohen Durchsatz und Fairness zwischen den Knoten optimiert.

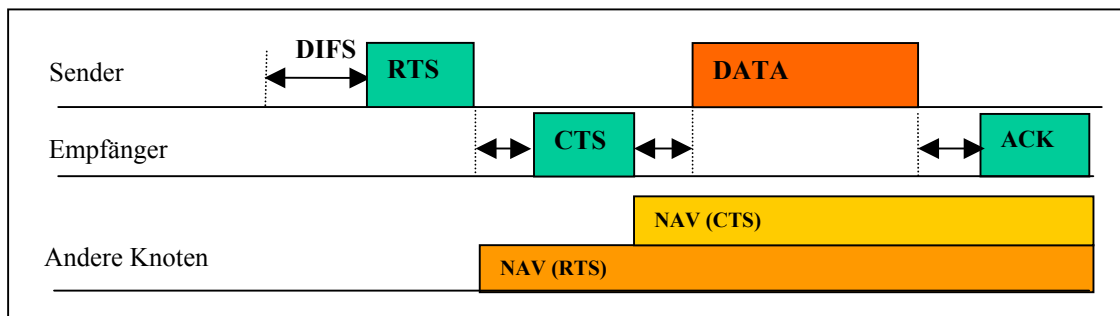


Abbildung 2. Wireless LAN

Das Protokoll von WLAN ist ein CSMA/CA- (*Carrier Sense Medium Access / Collision Avoidance*) Protokoll mit positivem Acknowledgement [3]. Abbildung 2 zeigt den typischen Ablauf einer erfolgreichen Übertragung. Zusätzlich zum physischen Horchen am Medium vor dem Senden, wird ein sogenanntes *Virtual Carrier Sense* eingesetzt. Die *Request-To-Send-* (RTS) und *Clear-To-Send-* (CTS) Kontrollpakete enthalten die Übertragungsdauer des zu übertragenden Pakets und des darauffolgenden Acknowledgements. Alle Stationen in der Umgebung des Senders und Empfängers empfangen entweder das RTS und/oder das CTS und setzen daraufhin ihren *Network Allocation Vector* (NAV) auf diese Übertragungsdauer. Somit wissen die Nachbarknoten, wie lange die Übertragung dauert und schweigen bis zum Ende der Übertragung, um keine Kollision beim Empfänger zu verursachen. Durch diese Kombination von virtuellem und physischem *Carrier Sense* wird die Wahrscheinlichkeit einer Kollision stark reduziert und das *Hidden-Node* Problem somit abgeschwächt.

Wenn das Medium besetzt ist oder das Acknowledgement ausbleibt, wartet der Sender wie beim klassischen Ethernet eine zufällig lange Zeit und versucht danach erneut, das Paket zu senden.

Das hier stark vereinfacht dargestellte WLAN-Protokoll ist im Bezug auf den Energieverbrauch ineffizient, wie das folgende Kapitel zeigen wird.

## 4 Designüberlegungen

Ye, Heidemann und Estrin haben vier Quellen der Energieineffizienz im Design von MAC-Protokollen identifiziert [4]:

- **Kollisionen.** Das Wiederholen von kollidierten Paketen kostet Energie.
- **Overhearing.** Wie in Kapitel 2 gezeigt wurde, kostet auch das Empfangen von Nachrichten in Sensornetzen viel Energie. Knoten in der Nachbarschaft einer Übertragung hören die gesendeten Pakete mit und verbrauchen somit unnötige Energie.
- **Kontrollpakete.** Das Senden und Empfangen von Kontrollpaketen kostet ebenfalls Energie.
- **Idle Listening.** Das Horchen am Medium kostet viel Energie. Es ist somit ineffizient horchend auf eine Nachricht zu warten, wenn keine gesendet wird.

Um den Energieverbrauch eines MAC-Protokolls zu optimieren, muss an diesen vier Punkten angesetzt werden. Dabei führen Optimierungen in einem Punkt oft zu Nachteilen in anderen und es gilt deshalb, die verschiedenen Vor- und Nachteile gegeneinander abzuwägen. Das Idle Listening Problem ist besonders stark ausgeprägt, wenn der Verkehr im Netzwerk geprägt ist durch lange Ruhephasen, wie es in Sensornetzen häufig der Fall ist. Es ist deshalb in vielen Szenarien das dominierende Problem.

Das im vorigen Kapitel dargestellte WLAN-Protokoll hat sowohl das Problem des Overhearing, als auch einen grossen Aufwand für Kontrollpakete. Vor allem aber müssen die Knoten das Medium ständig überwachen. Dies führt zu Idle Listening und kostet Energie. Aus diesen Gründen ist das Protokoll für Sensornetze nicht geeignet.

MAC-Protokolle lassen sich in verschiedene Kategorien einteilen. Diese verschiedenen Typen von MAC-Protokollen besitzen in Sensornetzen unterschiedliche Vor- und Nachteile [4]. Contention-basierte MAC-Protokolle wie das WLAN-Protokoll brauchen keine explizite Kontrolle und sind deshalb gut in der Lage neue Knoten einzubinden und auf Änderungen der Topologie zu reagieren. Dies ist tendenziell ein Problem bei TDMA- (Time Division Multiple Access) basierten Protokollen, bei welchen den Knoten Zeitschlitz zum Senden und Empfangen zugewiesen werden. Diese Protokolle benötigen Organisation und Synchronisation zwischen den Knoten, was sich negativ auf die Anpassungsfähigkeit und Skalierbarkeit auswirkt.

Hingegen können TDMA-Protokolle sparsamer mit der Energie umgehen als contention-basierte Protokolle, weil die Knoten in den inaktiven Zeitschlitz den Empfang ausschalten und somit Idle Listening minimieren können. Diese beiden Protokolltypen weisen also gegensätzliche Charakteristiken auf, die beim Design eines MAC-Protokolls für Sensornetze berücksichtigt werden müssen.

## 5 S-MAC

Das Hauptziel des von Ye, Heidemann und Estrin im Jahre 2001 entwickelten Sensor-MAC- (S-MAC) Protokolls [4] ist es, den Energieverbrauch zu minimieren. Das Protokoll schlägt deshalb Optimierungen vor, die jede einzelne der im Kapitel 4 beschriebenen Quellen der Energieineffizienz betreffen. Dieser umfassende Ansatz von S-MAC ist einer der Gründe, weshalb es eine zentrale Rolle in der aktuellen Forschung einnimmt und oft referenziert wird. S-MAC besteht aus drei Hauptkomponenten: Periodisches Horchen am Medium, Verhinderung von Kollisionen und Overhearing, sowie *Message-Passing*.

### 5.1 *Periodisches Horchen und Schlafen*

S-MAC reduziert das Idle Listening Problem indem die Knoten periodisch in den Schlafmodus versetzt werden. Die Knoten horchen weniger lange am Medium und verbrauchen deshalb weniger Energie. Die Länge des Horch- und Schlafintervalls kann je nach Applikation gewählt werden. Je kürzer das Horchintervall, desto mehr Energie wird eingespart, desto grösser wird jedoch die Latenzzeit. Dieser Trade-Off zwischen Latenz und Energieeffizienz ist grundsätzlicher Natur und findet sich in allen MAC-Protokollen für Sensornetze. S-MAC sieht vor, dass die Perioden benachbarter Knoten übereinstimmen sollten. Mit anderen Worten, benachbarte Knoten horchen und schlafen zur gleichen Zeit. Dies ist jedoch in einem dynamischen Multi-Hop Netzwerk nicht immer möglich. Aus diesem Grund führt jeder Knoten eine Liste mit den Schedules seiner Nachbarn.

Die Wahl des Schedules geschieht in S-MAC wie folgt: Jeder Knoten sendet regelmässig seinen Schedule in Form eines SYNC-Pakets. Ein neuer Knoten horcht zuerst während einer gewissen Zeit am Medium. Falls er in dieser Zeit ein SYNC-Paket erhält, übernimmt er dessen Schedule und ist somit mit dem benachbarten Knoten synchronisiert. Falls der neue Knoten kein SYNC-Paket empfängt, wählt er sich einen Schedule und sendet diesen periodisch. Er wird somit quasi zum Taktgeber für andere Knoten. Ein neuer Knoten versucht also immer, einen bereits bestehenden Schedule zu übernehmen. Nur wenn es in der Nachbarschaft keinen Knoten mit einem Schedule gibt, schafft er einen neuen. In gewissen Szenarien kann es vorkommen, dass ein Knoten mehrere Schedules übernehmen muss. Abbildung 3 zeigt ein solches Szenario. Die Knoten A1, A2, A3, sowie die Knoten C1, C2, C3 sind untereinander synchronisiert. Wird nun zwischen diesen beiden Teilnetzen ein neuer Knoten B eingefügt, empfängt B die Schedules sowohl vom Teilnetz A, wie auch vom Teilnetz C. Der Grenzknoten B übernimmt beide Schedules und ist somit sowohl mit den Knoten in A, wie auch mit denjenigen in C synchronisiert. Dies hat zur Folge, dass der Grenzknoten B weniger schlafen kann und somit mehr Energie verbraucht als andere Knoten.

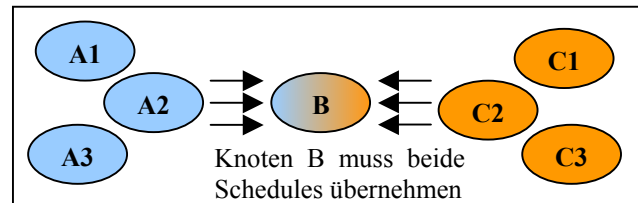


Abbildung 3. Bestimmung des Schedules in S-MAC

## 5.2 Verhinderung von Kollisionen und Overhearing

Wenn mehrere Stationen gleichzeitig senden wollen, müssen sie sich um das Medium bewerben. S-MAC benützt dazu die gleiche Technik wie das Protokoll von WLAN, inklusive RTS/CTS/ACK, Back-Off und virtuellem und physikalischem *Carrier Sense*. S-MAC versucht das Problem des Overhearing einzudämmen, indem unbeteiligte Knoten während einer Übertragung in den Schlafmodus versetzt werden. Alle Knoten in der Nachbarschaft des Senders und Empfängers hören entweder das RTS- oder das CTS-Paket mit. Diese Pakete enthalten die Dauer der Übertragung, was den unbeteiligten Knoten die Möglichkeit gibt, ihre NAV Werte entsprechend dieser Dauer anzupassen. Während der Übertragung schalten die benachbarten Knoten in den Schlafmodus und sparen somit Energie. Die ursprüngliche Idee für dieses Vorgehen stammt von einem Protokoll namens PAMAS [5] und wurde in S-MAC adaptiert.

## 5.3 Message-Passing

Die letzte Komponente von S-MAC beantwortet die Frage, wie längere, aus mehreren Paketen bestehende Nachrichten übertragen werden. Im WLAN-Protokoll enthält jedes Paket die Übertragungsdauer des jeweils folgenden Pakets, nicht der ganzen Nachricht. Das erhöht die Fairness zwischen den Knoten, weil sich andere Knoten zwischen den Paketen wieder um das Medium streiten können. S-MAC verfolgt eine andere Idee: Lange Nachrichten werden zwar in kleine Pakete aufgeteilt, diese werden aber alle gemeinsam gesendet. Die RTS- und CTS-Pakete reservieren das Medium nicht nur für

das folgende Paket, sondern für die gesamte Übertragung. Dies hat zur Konsequenz, dass die anderen Knoten während der Übertragung aller Pakete schlafen und sich somit nicht um das Medium bewerben können. Dies gilt insbesondere auch dann, wenn ein Übertragungsfehler stattgefunden hat oder ein Acknowledgement ausbleibt und der Sender somit gar nicht weitersenden kann. Für die dadurch eingebüßte Fairness erhält man bessere Energieeffizienz, da die Knoten länger schlafen können und sich weniger um das Medium streiten.

## 5.4 Resultate

S-MAC versucht, alle Quellen der Energieineffizienz anzupacken. Kollisionen werden durch die Verwendung von RTS- und CTS-Paketen vermieden. Das Overhearing Problem wird behoben, indem unbeteiligte Knoten während einer Übertragung in den Schlafmodus versetzt werden. Der Overhead durch Kontrollpakete wird durch das Message-Passing System verkleinert, wenngleich natürlich die SYNC-Pakete einen zusätzlichen Energieaufwand darstellen. Das Idle Listening Problem wird reduziert, indem die Knoten periodisch schlafen und dabei den Empfang ausschalten.

S-MAC wurde auf den Motes von UC Berkeley implementiert und getestet. Es weist in den gängigen Szenarien gegenüber dem WLAN-Protokoll eine Energieeinsparung von über 50% auf. Diese Messresultate stammen jedoch von kleinen Versuchsanordnungen mit nur wenigen Knoten. Wie sich S-MAC in grossen Umgebungen verhält ist noch offen. Eine weitere Kritik an S-MAC ist die, dass Grenzknoten im Zwischenbereich zweier nicht synchronisierter Teilnetze weniger lang schlafen können und somit mehr Energie verbrauchen.

## 6 Berkeley-MAC

Berkeley-MAC wurde von Woo und Culler im Rahmen einer umfassenden, auch andere Aspekte enthaltenden Arbeit zu Sensornetzen vorgeschlagen [2]. Der Namen "Berkeley-MAC" stammt daher, dass die beiden Autoren an der Universität von Berkeley tätig sind. Dieser Namen ist in der Literatur nicht ganz eindeutig.

Das Protokoll geht von der Annahme aus, dass es im Sensornetz eine eindeutige Basisstation gibt. Alle Daten werden von den Knoten zu dieser Basisstation gesendet. Dies geschieht auf einem Spannbaum, der von einer übergeordneten Schicht erstellt wird. Berkeley-MAC geht davon aus, dass jeder Knoten im Sensornetz seinen Vaterknoten im Spannbaum kennt und somit weiss, wohin er seine Daten senden muss.

Das Hauptziel dieses Protokolls ist die Energieeffizienz. Ausserdem soll die zur Verfügung stehende Bandbreite von den Knoten zur Basisstation fair aufgeteilt werden. Berkeley-MAC will insbesondere vermeiden, dass Knoten in der Nähe der Basisstation mehr Daten senden können als weit entfernte Knoten. Das Protokoll schlägt deshalb einen *Adaptive Rate Control* Mechanismus vor, der diese Fairness sicherstellt. Dieser Mechanismus geht aber über den Problembereich des *Medium Access Control* hinaus und ist deshalb nicht Thema dieses Dokuments.

Berkeley-MAC basiert auf einem einfachen CSMA Prinzip. Energieeinsparungen werden erreicht, indem vor das Horchen am Medium eine zufällig lange Wartezeit im Schlafmodus eingefügt wird. Häufig tritt in Sensornetzen kurzfristig viel Verkehr auf, da mehrere Knoten gleichzeitig ein bestimmtes Ereignis detektieren. Die Warte-Phase dient dazu, diese Synchronisation zu brechen und damit die Wahrscheinlichkeit von Kollisionen zu vermindern und Energie einzusparen. Weitere Einsparungen werden erzielt, indem überhaupt keine Kontrollpakete verwendet werden. Dies wird durch die Technik des *Parenting* erreicht.

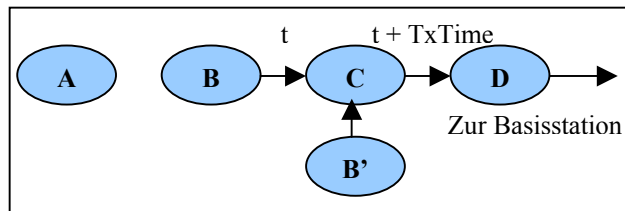


Abbildung 4. *Parenting* in Berkeley-MAC

Das *Parenting* nützt den zugrundeliegenden Spannbaum aus. In dem in Abbildung 4 dargestellten Szenario können Kollisionen zwischen den Knoten A und C durch den folgenden Trick vermieden werden: Wenn A hört, dass B

zum Zeitpunkt  $t$  an C sendet, dann weiss A, dass C das Paket daraufhin an D weitersenden wird. Dies geschieht innerhalb der Zeit  $t + TxTime$ . Würde nun A während dieser Zeit an B senden, käme es in B zur Kollision, weil B ja die Übertragung von C nach D ebenfalls mithört. Deshalb wartet A bis zum Zeitpunkt  $t + TxTime$  und verhindert somit eine Kollision in B. Mit dieser einfachen Technik können jedoch nicht alle Kollisionen vermieden werden. Sendet beispielsweise der Knoten B', der nicht in der Nachbarschaft von A liegt, an C, dann hört A diese Übertragung nicht und es kann daraufhin zur Kollision in B kommen. Mit *Parenting* kann also nur ein Teil der Kollisionen vermieden werden.

Ebenso können auch die ACK-Pakete eingespart werden. Wenn A eine Nachricht an B sendet, dann weiss er, dass B diese Nachricht an C weitersenden wird. A kann dieses Weitersenden mithören. Deshalb wirkt die Übertragung der Nachricht von B nach C für A wie ein implizites Acknowledgement.

Die Idee des *Parenting* basiert darauf, dass die Knoten ständig das Medium überwachen und somit Energie für Idle Listening verloren geht. Dies ist der Hauptkritikpunkt an diesem Protokoll. *Parenting* setzt ausserdem voraus, dass die Kanäle zwischen den Knoten vollständig symmetrisch sind.

Berkeley-MAC wurde ebenfalls auf den Motes implementiert und getestet. Gegenüber dem WLAN-Protokoll zeigt es ebenfalls eine Energieeinsparung. Die grösste Kritik an Berkeley-MAC ist sicherlich, dass das Idle Listening Problem nicht gelöst wird. Für die Messungen wurden vor allem Fälle mit relativ starkem Verkehrsaufkommen verwendet, in denen das Idle Listening Problem weniger akut zu tragen kommt.



## 7 CSMA-PS

Das *Carrier Sense Medium Access Preamble Sampling* (CSMA-PS) Protokoll wurde im Jahre 2002 von El-Hoiydi entwickelt und analysiert [6, 7]. Es geht von einer einfachen Grundüberlegung aus: In Sensornetzen ist der Verkehr auf dem Medium häufig gering. Wenn man erreichen will, dass ein Sensor mit einer einzigen Batterie eine Lebenszeit von mehreren Jahren erreicht, muss sein Empfang ohnehin fast immer ausgeschaltet sein. Mit anderen Worten, das Verhindern von Idle Listening ist das entscheidende Kriterium und dominiert die anderen drei Quellen des Energieverlustes. El-Hoiydi's Idee besteht darin, das klassische CSMA mit Präamble Sampling zu kombinieren.

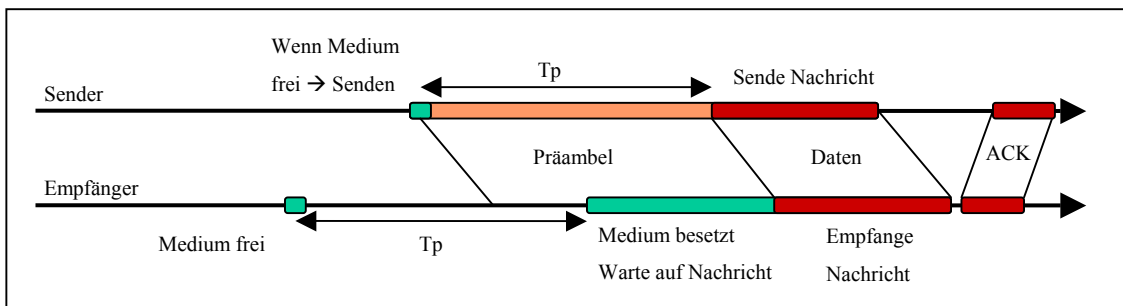


Abbildung 5. *Parenting* in Berkeley-MAC

Abbildung 5 zeigt den Ablauf einer Übertragung mit CSMA-PS. Alle Knoten schlafen und wachen periodisch in einem gewissen Intervall auf. Die Länge dieses Intervalls ist in der Abbildung als  $T_p$  bezeichnet. Will nun ein Knoten senden, horcht er zuerst am Medium (CSMA). Falls es frei ist, sendet er zuerst eine Präambel der Länge  $T_p$ , die den Empfänger identifiziert, und erst dann die eigentlichen Daten. Durch die gewählte Länge der Präambel ist gewährleistet, dass der Empfänger genau einmal aufwacht während die Präambel gesendet wird. Wacht nun ein Knoten auf, horcht er kurz am Medium und prüft, ob es besetzt ist. Falls das Medium frei ist, kann er sofort wieder weiterschlafen. Erkennt er jedoch eine Präambel, dann horcht er weiter, bis er die eigentlichen Daten empfängt. Eine erfolgreiche Übertragung wird durch ein ACK bestätigt. Es gilt zu bemerken, dass die Knoten im CSMA-PS-Protokoll nicht synchronisiert sein müssen, was gegenüber S-MAC sicherlich einen Vorteil darstellt.

Die lange Präambel von CSMA-PS hat nicht nur zur Folge, dass das Senden viel Energie kostet, sondern erhöht auch die Kollisionswahrscheinlichkeit. Beide Probleme versucht El-Hoiydi mit einer verbesserten Version des Protokolls namens Synchronized-CSMA-PS zu beheben. In dieser Variante merken sich die Knoten die Schedules, also die Aufwachzeitpunkte der Nachbarn, und senden genau dann eine Präambel, wenn der Empfänger aufwacht. Dadurch kann die Länge der Präambel stark verkürzt werden. Allerdings ist es in dieser Variante des Protokolls schwieriger, dynamisch neue Knoten in das Netzwerk einzubinden.

El-Hoiydi hat berechnet, dass bei einer Intervalllänge von 10 Sekunden dank der verbesserten Version von CSMA-PS mit einer einzigen Batterie eine Lebenszeit von Jahren erreicht werden kann.

## 8 Fazit

Das Design von MAC-Protokollen für Sensornetze ist eine vielseitige und interessante Aufgabe. Alle drei in diesem Dokument vorgestellten Protokolle weisen interessante Eigenschaften und charakteristische Vor- und Nachteile auf. Bis jetzt hat sich kein eigentlicher Standard herauskristallisiert und es ist unklar, welches Protokoll sich dereinst durchzusetzen vermag. Insbesondere gibt es bis jetzt auch keine vergleichenden Messungen zwischen den drei in diesem Dokument vorgestellten Protokollen. Im Gebiet der MAC-Protokolle für Sensornetze gibt es also weiterhin viel zu erforschen und zu entdecken.

## Quellenverzeichnis

- [1] I.Akyildiz, W.Su, Y.Sankarasubramaniam, E.Cayirci, "A Survey on Sensor Networks", IEEE Communications Magazine, Vol.40, No.8, 2002
- [2] A.Woo and D.Culler, "A transmission control scheme for media access in sensor networks", in *Proceedings of the ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking*, Rome, 2001
- [3] LAN MAN Standards Committee of the IEEE Computer Society, "Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specification", IEEE, New York, IEEE Std 802.11-1997 edition, 1997
- [4] W.Ye, J.Heidemann, D.Estrin, "An Energy-Efficient MAC protocol for Wireless Sensor Networks", *USC/ISI Technical Report ISI-TR-543*, 2001
- [5] S.Singh and C.Raghavendra, "Pamas – power aware multi-access protocol with signalling for ad hoc networks", in *ACM Computer Communication Review*, 1998
- [6] A.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
- [7] A.El-Hoiydi, "Spatial TDMA and CSMA with Preamble Sampling Aloha with Preamble for Low Power Ad Hoc Wireless Sensor Networks", in *Proc. IEEE International Conference on Computers and Communications (ISCC 2002)*, Italy, 2002