

Energieverbrauch von Sensorkomponenten - Optimierung der Sensorkommunikation

Johannes Ziegltrum

Betreuer: Christoph Söllner, Corinna Schmitt

Seminar Sensorknoten: Betrieb, Netze und Anwendungen SS2011

Lehrstuhl Netzarchitekturen und Netzdienste, Lehrstuhl Betriebssysteme und Systemarchitektur

Fakultät für Informatik

Technische Universität München

Email: johannes.ziegltrum@gmx.de

Kurzfassung—

Die moderne Forschung verspricht sich großen Nutzen von drahtlosen Sensornetzen. Dabei handelt es sich um ein Rechnernetz, das aus einzelnen Knoten aufgebaut ist, die ihre Umgebung mittels Sensoren erfassen, diese Informationen verarbeiten und per Funk weiterleiten. Diese Technologie gestattet eine großflächige, sehr genaue Beobachtung bzw. Überwachung von Phänomenen der realen Welt. In den meisten Fällen sind Sensorknoten batteriebetrieben. Da es oft nicht möglich ist, diese Batterien auszutauschen bzw. wieder aufzuladen besteht eine zentrale Aufgabe der Forschung darin, den Energieverbrauch der Knoten so gering wie möglich zu halten, um die Lebenszeit von Sensornetzen zu verlängern. Deshalb sollte man sich bereits beim Entwurf und der Entwicklung von Netzwerkprotokollen darüber Gedanken machen, welche Möglichkeiten es gibt, um Energie zu sparen.

Schlüsselworte—

Drahtloses Sensornetz, Sensorknoten, Multihop-Routing, Arbeitszyklus, S-MAC, T-MAC, Datenaggregation, DCE

I. EINLEITUNG

Ein drahtloses Sensornetz ist ein Rechnernetz von Sensorknoten. Dabei handelt es sich um Computer, die per Funk miteinander kommunizieren. Aufgrund der in Zukunft anvisierten Größe werden Sensorknoten oft auch als Smart Dust (engl. für intelligenter Staub) bezeichnet.

Ein typischer drahtloser Sensorknoten beinhaltet in der Regel vier Hauptkomponenten: (1) Ein Abtastungs-System, das mittels Sensoren Daten erfasst, (2) ein Verarbeitungs-System mit einem Prozessor und einem Datenspeicher, (3) ein Funk-System zum Senden der Daten, sowie ein Stromversorgungssystem, das die benötigte Energie bereitstellt (in der Regel über eine Batterie).

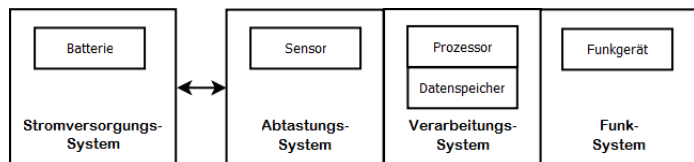
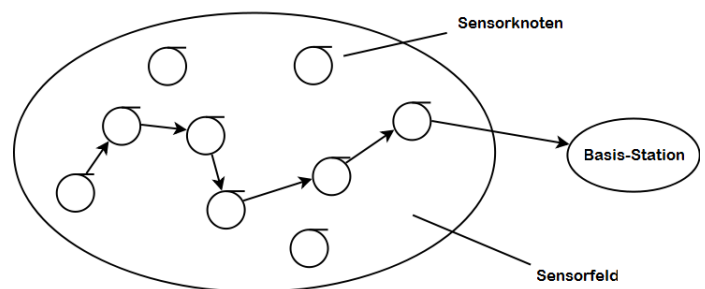


Abbildung 1. Die vier Hauptsysteme eines Sensorknotens [1]

Ein wichtiges Merkmal ist das sogenannte Ad-hoc-Netzwerk, bei dem die einzelnen Sensorknoten in einem

Sensorfeld dazu in der Lage sind, selbständig ihre Nachbarn zu finden. Auf diese Weise bildet sich eine dynamische Netzstruktur, die sich automatisch anpasst, wenn sich Knoten bewegen, hinzukommen oder ausfallen. Dabei werden die Daten oft nicht direkt an die sogenannte Basis-Station (Benutzer-Schnittstelle) gesendet, sondern solange an benachbarte Knoten weitergeleitet, bis das Ziel erreicht wird (Multihop-Routing).



Sonnenenergie in elektr. Energie mittels Solarzellen), zum anderen gibt es aber auch Möglichkeiten, Energie an den Sensorknoten selbst einzusparen. In dieser Arbeit wird im Besonderen darauf eingegangen, in welchen Bereichen Energie verbraucht wird und welche verschiedenen Möglichkeiten es gibt, den Stromverbrauch zu reduzieren.

Zum Aufbau der Arbeit: In Kapitel II wird zunächst ein kurzer Überblick gegeben bevor in Kapitel III und IV auf konkrete Lösungsvorschläge eingegangen wird. Kapitel III erläutert wesentliche Ursachen für unnötigen Energieverbrauch und präsentiert zwei frühe MAC Protokolle, Sensor Media Access Control (S-MAC) und Timeout Media Access Control (T-MAC). Kapitel IV zeigt, wie das Problem redundanter Daten mittels Datenaggregation gelöst werden kann, bevor in Kapitel V eine kurze Zusammenfassung gegeben wird.

II. ÜBERBLICK

Vergleicht man die drei Systeme Abtastung, Verarbeitung und Funk bezüglich ihres Energiebedarfs, so stellt sich heraus, dass vor allem die Kommunikation, also das Senden, das Empfangen und das Warten auf Daten, die meiste Energie verbraucht. Allerdings sind einzelne Knoten nicht ununterbrochen an einer Kommunikation beteiligt und auch das Nachrichten-aufkommen ist eher gering, da in der Regel nur selten Ereignisse auftreten. Aus diesem Grund konzentriert man sich bei der Reduzierung des Energieverbrauchs in erster Linie auf die Kommunikation der Sensorknoten. Eine Möglichkeit hierfür ist die Einführung von Arbeitszyklen, die einzelnen Knoten regelmäßiges Abschalten in einen 'Schlafmodus' erlaubt. Das Ziel eines MAC Protokolls ist es nun, trotz Schlaf-Phasen ausreichende Kommunikation zu ermöglichen. Zahlreiche Protokolle lösen diese Optimierung auf unterschiedliche Art und Weise [2].

Aufgrund der Tatsache, dass mehrere Knoten oftmals ähnliche Phänomene beobachten, gibt es viel Redundanz in den erfassten Daten benachbarter Knoten. Gibt es keine direkte Verbindung zur Basis-Station, werden die Daten von Knoten zu Knoten transferiert. Dadurch können Knoten ihre eigenen Daten mit denen, die sie von anderen empfangen haben vergleichen und zusammenfassen. Durch diese Vorarbeit kann die zu sendende Datenlast minimiert werden [1].

Im Folgenden werden allgemein also zwei energiesparende Techniken vorgestellt: Arbeitszyklus und Datenaggregation.

III. ARBEITSZYKLUS

Sind Sensorknoten ununterbrochen in Betrieb, führt das dazu, dass der Energievorrat schnell aufgebraucht ist. Um die Lebensdauer eines drahtlosen Sensornetzes zu verlängern, ist es deshalb sinnvoll, bestimmte Komponenten zeitweise abzuschalten. Solange Daten gesendet oder empfangen werden müssen, befinden sich die entsprechenden Sensorknoten im aktiven Zustand. Sind sie untätig, werden sie in einen passiven Zustand gesetzt, in dem sie sehr viel weniger Energie verbrauchen. Je öfter ein Sensorknoten also aktiv ist, desto mehr Energie verbraucht er.



Abbildung 3. Aktiv-Passiv-Zyklus [5]

Folgende Ursachen für unnötigen Energieverbrauch lassen sich identifizieren:

- **Overhearing:** Das Mithören einer Kommunikation, an der ein Knoten nicht beteiligt ist. Ständiges Abhören ist eine einfache Möglichkeit, um herauszufinden, ob ein Medium für den eigenen Datenaustausch zur Verfügung steht. Falls das Medium belegt ist, führt das allerdings oft zu einem unnötigen Zeit- und Energieverlust [5].
- **Idle Listening:** Ein Knoten wartet auf den Empfang von Daten. Findet in einem Netzwerk Kommunikation ohne Vorankündigung statt, so ist Idle Listening die einzige Möglichkeit, Nachrichten zu empfangen. Werden nur wenige Nachrichten gesendet, kann dies zu einem erheblichen Energieverbrauch führen [5].
- **Datenkollision:** Verlust von Daten, weil mehrere Knoten gleichzeitig auf ein gemeinsames Medium zugreifen und somit die Nachrichten auf Empfängerseite nicht mehr zu entziffern sind. Für mögliche Wiederholungen muss dafür zusätzliche Energie aufgebracht werden [5].
- **Kontrollnachrichten:** In vielen Netzwerken entsteht zusätzlicher Mehraufwand durch Kontrollnachrichten, die in der Regel keine für die Anwendung relevanten Informationen beinhalten [5].

Ziel ist es nun, den Sensorknoten passende Arbeitszyklen von aktiven und passiven Zeiten so zuzuordnen, dass sie miteinander kommunizieren können, ohne dass unverhältnismäßig hoher Energieverlust durch Overhearing, Idle Listening, Kollisionen oder Kontrollnachrichten entsteht. Im Folgenden werden nun die gebräuchlichsten Ansätze aufgezeigt, mit denen der Arbeitszyklus organisiert werden kann [6].

A. S-MAC

Das S-MAC-Protokoll (Sensor Media Access Control) beruht auf der Rendezvous-Technik. Will ein Sensorknoten Daten senden, so muss er zunächst eine Sende-anfrage (RTS, request to send) an den betreffenden Empfänger schicken. Antwortet dieser mit einer Sende-bestätigung (CTS, clear to send), so weiß der Sender, dass er seine Daten nun übermitteln kann. Nach dem Erhalt der Daten antwortet der Empfänger wiederum mit einer Empfangsbestätigung (ACK, acknowledgement). Damit bei einem Übermittlungsfehler nicht die gesamten Daten erneut versendet werden müssen, verfolgt S-MAC den Ansatz, große Dateneinheiten in kleinere Pakete aufzuteilen [Abb.4].

Beim S-MAC-Konzept wird den Sensorknoten vor Betriebsbeginn ein Aktiv-Passiv-Zyklus vorgegeben, der ihren 'Tagesablauf' bestimmt. Dabei werden die Knoten immer wieder in einen Ruhezustand mit geringem Energieverbrauch versetzt. In diesem Zustand bleibt lediglich eine interne Uhr in Betrieb, die vorgibt, zu welchem Zeitpunkt der Knoten wieder in den

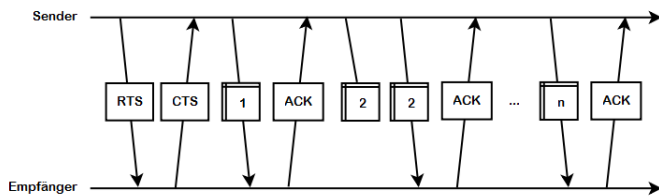


Abbildung 4. Datenübermittlung bei S-MAC [7]

aktiven Zustand übergehen soll. Dabei sollten möglichst viele Knoten dem gleichen Tagesablauf folgen, damit sie in ihrer gemeinsamen Aktiv-Phase miteinander kommunizieren können. Um dies sicherzustellen, gibt S-MAC einen Mechanismus vor, mit dem mehrere Sensorknoten ihre Zeitpläne aufeinander abstimmen können.

Zu Betriebsbeginn wartet jeder Sensorknoten eine gewisse Zeit auf den Empfang eines Synchronisationsimpulses (SYNC). Bleibt dieser aus, weist sich ein Knoten nach einer zufälligen Zeitspanne selbst die Rolle des Synchronizers zu, indem er die Information aussendet, zu welchem Zeitpunkt und für wie lange er in den Ruhezustand übergeht. Wer einen Synchronisationsimpuls empfängt, nimmt die Rolle eines Followers ein und passt seinen eigenen Zeitplan dem im SYNC enthaltenen Tagesablauf an.

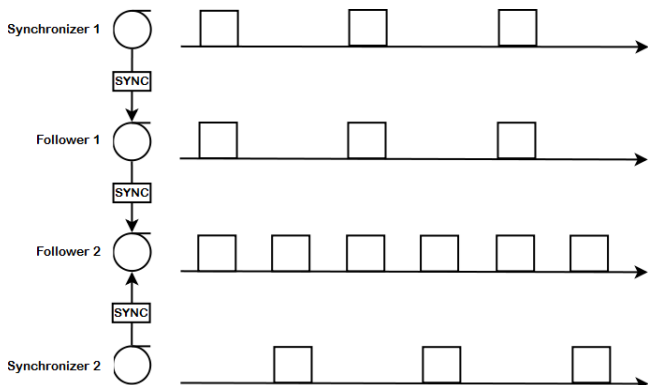


Abbildung 5. Synchronisation der Zeitpläne von Sensorknoten [6]

Allerdings garantiert dieses Verfahren keine netzwerkweite Synchronisation. Werden Synchronisationsimpulse gleichzeitig an verschiedenen Stellen des Netzes gestartet, so können sich Cluster bilden, die jeweils nur in sich synchronisiert sind. Eine Kommunikation zwischen diesen Clustern ist dennoch möglich, indem Knoten im Grenzbereich als Brückenknoten agieren und sich dem Tagesablauf aller benachbarten Cluster anpassen. Dies führt dazu, dass diese Grenzknoten schneller ausfallen, da sie öfter aktiv sind und somit mehr Energie verbrauchen [Abb.6].

Da Uhren niemals völlig gleich gehen, kann es während des Betriebs zu zeitlichen Abweichungen der internen Uhren kommen. Um diese zu korrigieren, teilt S-MAC die Aktiv-Phasen in zwei Unterphasen auf. In der ersten, kürzeren Phase werden Synchronisationsnachrichten gesendet, die zweite, längere Phase ist dann für den eigentlichen Datenaustausch gedacht.

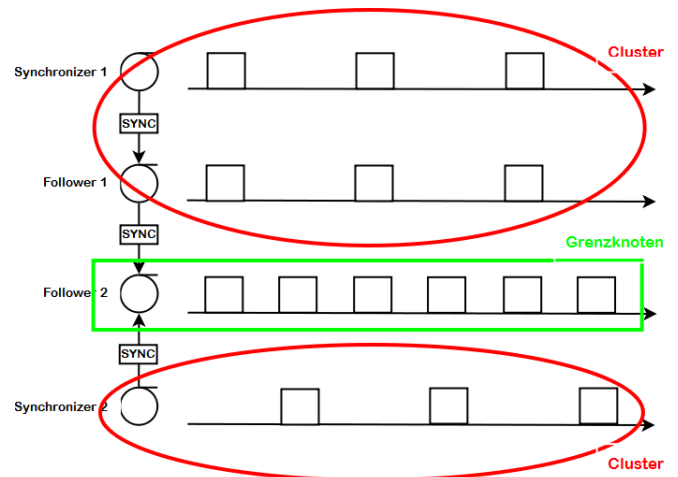


Abbildung 6. Bildung eines Grenzknotens zwischen benachbarten Clustern [6]

Auf diese Weise ist es auch möglich, bei fortlaufendem Betrieb neue Knoten in das bestehende Netz mit aufzunehmen. Nach dem Erhalt einer Synchronisationsnachricht können sie sich zeitlich orientieren und passen sich dem Tagesablauf an. Zur Reduzierung von Kollisionen wird CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance) eingesetzt. Dabei handelt es sich um ein Verfahren, mit dem ein Übertragungsmedium vor einem geplanten Zugriff auf Belegung geprüft werden kann (Trägerprüfung). Um gleichzeitig Overhearing zu vermeiden, enthält jede Sendeanfrage die entsprechende Information über die Dauer einer Sendung. Diese Zusatzdaten werden im NAV (Network Allocation Vector) gespeichert. Mithörende Knoten können anhand dieses Netzbelegungsvektors die Länge einer Kommunikation bestimmen und sich für diese Zeit wieder schlafen legen. Ein Zeitgeber zählt den Wert des Vektors nach und nach herunter. Wird der Wert Null erreicht, so wissen andere Knoten, dass das Medium wieder frei ist [5]–[7].

Um die Verzögerung bei Multihop-Übertragungen zu reduzieren, wurde S-MAC um Adaptive Listening erweitert. Mit dieser Optimierung kann im Idealfall pro Aktiv-Passiv-Zyklus ein zusätzlicher Hop überwunden werden, indem die entsprechenden Knoten nach ihrer eigentlichen Aktiv-Phase erneut für eine bestimmte Zeit aufwachen [8].

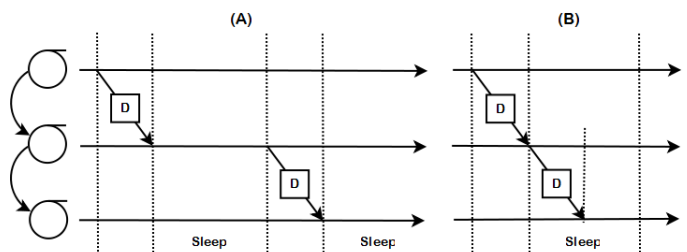


Abbildung 7. Multihop-Routing ohne (A) und mit (B) Adaptive Listening

Ein ungelöstes Problem beim S-MAC stellt das Early-

Sleeping-Problem dar. Oft kommt es zu der Situation, dass Knoten in den Schlafmodus wechseln, obwohl einem Nachbarknoten Daten zur Übertragung vorliegen. Dieser kann seine Sendeabfrage aber nicht abschicken, da er gerade in eine andere Kommunikation verwickelt ist. Um dieses Problem zu lösen und weitere Effizienzsteigerungen zu erreichen, wurde der Nachfolger T-MAC entwickelt.

B. T-MAC

Das T-MAC-Protokoll (Timeout Media Access Control) basiert auf dem eben dargestellten S-MAC-Verfahren und setzt wie sein Vorgänger auf einen regelmäßig vereinbarten Aktiv-Passiv-Zyklus. Dementsprechend synchronisieren Sensorknoten ihre Tagesabläufe, um möglichst große Gruppen zu bilden, die gemeinsam aktiv werden und somit miteinander kommunizieren können. Anders als beim S-MAC wird die Dauer der aktiven Phase aber nicht fest vorgegeben, sondern kann von Knoten zu Knoten immer wieder variieren. Werden für eine festgelegte Zeitspanne TA keine Nachrichten empfangen, gehen die entsprechenden Knoten für eine bestimmte Zeit in den Ruhezustand über. Dieser Timeout war namensgebend für das Protokoll. Knoten, die vor der Zeitüberschreitung Nachrichten empfangen, setzen ihre aktive Phase fort. Beim T-MAC wachen also alle Knoten eines Clusters gleichzeitig auf, können sich aber innerhalb ihrer aktiven Phase zu unterschiedlichen Zeitpunkten wieder schlafen legen, falls sie an keiner Kommunikation teilnehmen. Somit verkürzen sich die aktiven Zeiten im Vergleich zum S-MAC noch einmal.

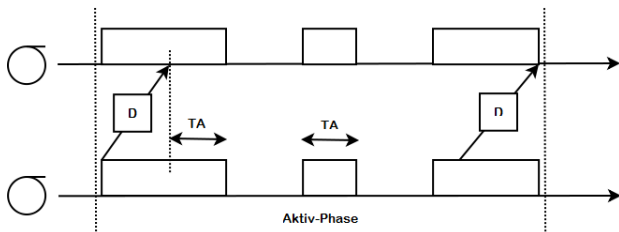


Abbildung 8. Findet für die Zeitspanne TA keine Kommunikation statt, legen sich die Knoten für eine gewisse Zeit schlafen [6]

T-MAC folgt bei der Datenübertragung wie S-MAC dem Rendezvous-Schema mit RTS, CTS und ACK. Allerdings wird dieses Schema bei T-MAC um eine zukünftige Sendeabfrage (FRTS, future request to send) erweitert, um das Early-Sleeping-Problem zu lösen.

In Abb. 9 wird dies an einem Beispiel verdeutlicht. Knoten A sendet Daten an B. Knoten C wiederum würde gerne Daten an D senden. Da C aber die Antwortpakete von B hören kann und die Kommunikation nicht stören will, muss er mit seiner Sendeabfrage an D warten, bis A und B ihre Kommunikation beendet haben und geht für diese Zeit schlafen. Knoten D bekommt von alledem nichts mit und geht ebenfalls nach einer gewissen Zeit schlafen, da er an keiner Datenübertragung beteiligt ist. Nachdem Knoten C wieder aufgewacht ist, versucht er vergebens D zu erreichen und muss schließlich aufgeben und in der nächsten Periode um das Medium kämpfen.

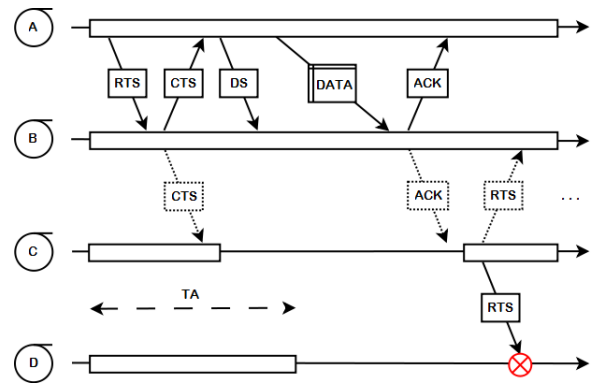


Abbildung 9. Early-Sleeping-Problem [9]

Dieses Problem soll nun gelöst werden, indem man Knoten erlaubt, zukünftige Sendeabfragen zu äußern.

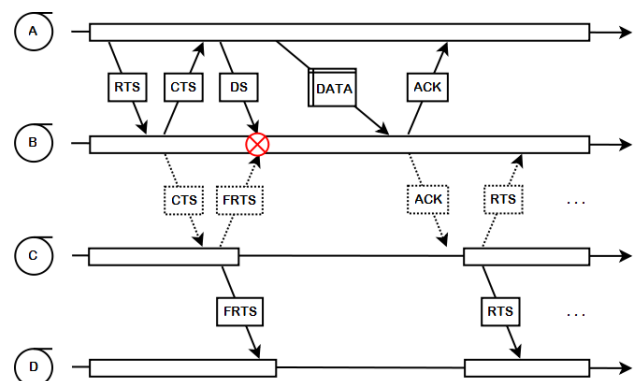


Abbildung 10. FRTS um das Early-Sleeping-Problem zu lösen [10]

Knoten C hört das CTS von B und hat unmittelbar danach die Möglichkeit, eine spätere Sendeabfrage (FRTS) an Knoten D zu äußern. Dadurch weiß Knoten D zum einen von der Sendeabsicht C's, zum anderen können beide nun eine genau bemessene Schlafphase einlegen, da über das FRTS auch die Dauer der Kommunikation zwischen Knoten A und B mitgeteilt wurde. Damit das FRTS-Paket mit keinen Nutzdaten von Knoten A kollidiert, verzögert A die Datensendung, indem es nach dem CTS von B zunächst ein Datensignal (DS, data signal) schickt. Dieses DS-Paket hat dieselbe Größe wie ein FRTS, wodurch es zur Kollision dieser beiden Pakete kommt. Dies ist aber nicht weiter problematisch, da das DS einerseits keine Nutzdaten enthält, sondern dem Empfänger lediglich ankündigt, dass danach die eigentlich Datensendung beginnt und andererseits dafür gedacht ist, das Medium für diesen Zeitraum zu belegen, um die Übernahme anderer Nachbarknoten von A zu verhindern. Die Knoten C und D wachen zum vereinbarten Zeitpunkt auf und können nun ihrerseits Daten austauschen [Abb.10].

Sensorknoten sammeln ihre zu sendenden Daten in einem Nachrichtenausgang. Bekommt ein Knoten selten die Möglichkeit seine Nachrichten abzuschicken, kann es passieren, dass sein Datenpuffer irgendwann voll ist. Um dies zu verhindern,

schlägt T-MAC eine weitere Neuerung vor. Falls sich bei einem Knoten Daten anhäufen, will dieser bevorzugt Nachrichten versenden und bekommt daher die Möglichkeit, seinen Sendewünschen eine höhere Priorität einzuräumen.

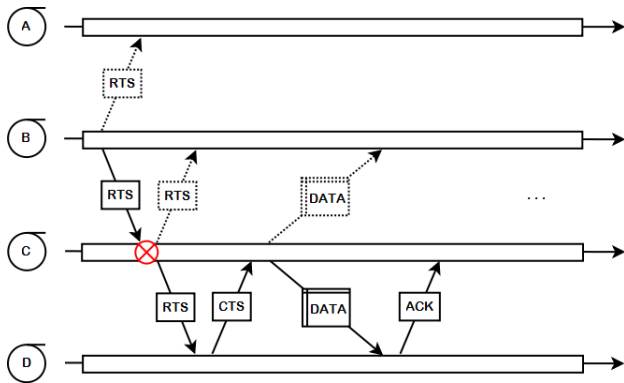


Abbildung 11. Priorisierung durch Sendeabfrage-Ablehnung [9]

Knoten B will Daten an C senden und schickt deshalb ein RTS an C. Da dessen Datenpuffer aber fast voll ist, ignoriert er die Sendeabfrage von B und schickt seinerseits ein RTS an D. Knoten B nimmt das wahr und verzichtet daraufhin auf seine Datenübertragung. Es kommt zur Kommunikation zwischen C und D.

Allerdings ist hierbei Vorsicht geboten. In der Folge kam es oft dazu, dass sich mehrere Nachrichtenausgänge anfüllten und somit viele Knoten Anfragen ablehnten, was den Datendurchsatz stark senkte. Damit bei hohem Datenaufkommen nicht das ganze Netz zum Erliegen kommt, wendet ein Knoten mit fast vollem Puffer diese Technik erst nach zwei fehlgeschlagenen Sendeabfragen an [5], [6], [10].

C. Weitere MAC-Protokolle

Die Verfahren S-MAC und T-MAC sind nur zwei von vielen weiteren Methoden, um die Arbeitszyklen von Sensorknoten festzulegen. Da die ausführliche Erklärung aller Verfahren den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde, wird im Folgenden in ein bis zwei Sätzen erklärt, welche grundsätzlichen Strategien andere Protokolle verfolgen:

- **TRAMA:** Um kollisionsfreie Kommunikation zu realisieren, werden bei TRAMA zwei zeitlich voneinander getrennte Kanäle für die Nachrichtenübertragung verwendet. Über einen Kanal mit zufälligem Zugriff erhalten die Knoten Informationen über benachbarte Knoten. Über den zweiten, kollisionsfreien Kanal werden die Nutzdaten gesendet, indem jedem Knoten basierend auf beabsichtigten Sendeaktivitäten feste Zeitschlitze für die Übertragung zugeordnet werden [6].
- **B-MAC:** Ziel des B-MAC-Protokolls ist es, Funktionen wie Netzinitialisierung und -synchronisation in höher-schichtige Module auszugliedern. Aus diesem Grund beschränkt sich B-MAC einzig auf die Mediengriffskontrolle und verwendet ein Rauschunterdrückungsverfahren, um Signalempfang und Trägerprüfung zuverlässiger zu machen [11].

- **D-MAC:** D-MAC wurde für effizienteres Multihop-Routing entwickelt. Da Multihop-Übertragungen jeweils durch Schlafzyklen unterbrochen werden, nutzt D-MAC Topologieinformationen, um die Aktiv-Phasen benachbarter Knoten so anzuordnen, dass sie sich überlappen. Beim Senden von Daten entsteht so eine Kettenreaktion, die die Verzögerung von Blattknoten zur Basis-Station minimiert [5].

IV. DATENAGGREGATION

In drahtlosen Sensornetzen werden Informationen oft von Sensorknoten zu einer Basis-Station geleitet. Bei dieser Kommunikationsform haben Knoten einen ungleichmäßig verteilten Energieverbrauch, da sie unter dem sogenannten 'Trichtereffekt' leiden. Je näher sich die Knoten an der Basis-Station befinden, desto häufiger werden Informationen per Multihop-Routing über sie weitergeleitet und desto höher ist dann auch die Wahrscheinlichkeit, dass sie früher ausfallen.

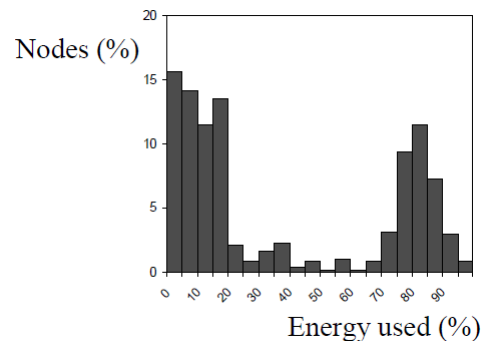


Abbildung 12. Unerwünschtes Energie-Histogramm: Viele Knoten haben noch fast vollen Energievorrat, während einige Knoten beinahe leer sind. [12]

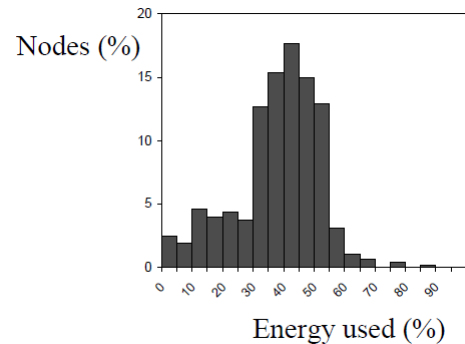


Abbildung 13. Erwünschtes Energie-Histogramm: Die meisten Knoten besitzen noch ähnlich große Energiereserven. [12]

Es hat sich gezeigt, dass der Einsatz von Datenaggregation die negativen Auswirkungen dieses Effekts reduzieren kann. In den erfassten Daten benachbarter Knoten gibt es viel Redundanz, da es oft vorkommt, dass mehrere Knoten dasselbe Phänomen beobachten (z.B. Temperaturmessungen in einem Raum). Um die Lebensdauer eines Sensornetzes zu verlängern, können diese redundanten Daten auf dem Weg von der Quelle

zur Basis-Station zusammengefasst oder komprimiert werden [1].

A. Data Combining Entity

Die Energiekosten für die Übertragung von Daten sind wesentlich höher als die Kosten für die Verarbeitung dieser Daten. Erfassen die Sensoren verschiedener Knoten dasselbe Ereignis, bietet es sich also an, diese Daten zuerst in einem Knoten zusammenzufassen, bevor sie weitergeschickt werden. Bei diesen Knoten handelt es sich also um Einheiten, die verschiedene Daten kombinieren (DCE, data combining entity). Durch die Komprimierung redundanter Daten zu einer einzigen Datei können erhebliche Übertragungskosten eingespart werden. Welche Knoten zu solchen Kombinationseinheiten werden, kann explizit oder dynamisch festgelegt werden. Allerdings ist die explizite Festlegung vor allem bei sehr großen Sensornetzen oft zu aufwändig. Eine mögliche Vorgehensweise ist eine dynamische Wahl zur Laufzeit, bei der jeder Knoten je nach Bedarf zu einer DCE wird. Erfassen verschiedene Knoten zur gleichen Zeit Daten, handelt es sich dabei meist um Knoten, die sehr nahe beieinander stehen und dasselbe Ereignis beobachtet haben. Durch ihre räumliche Nähe zueinander fließen die gesendeten Daten irgendwann auf gleichen Pfaden zur nächsten Basis-Station. Knoten, bei denen mehrere Datenströme zusammenfließen, werden zu DCEs. Diese befinden sich meist in der Nähe des Ereignis-Radius [12].

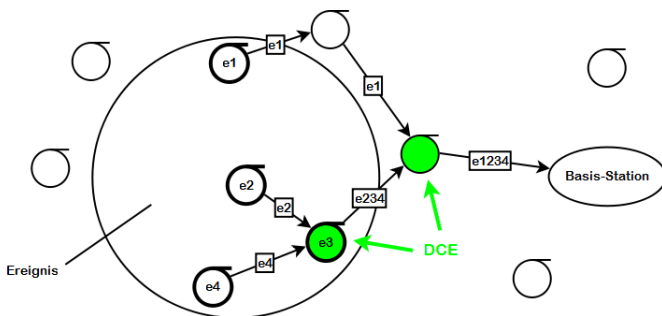


Abbildung 14. Dynamische Bildung von Data Combining Entities [13]

In einem bestimmten Gebiet wird ein Ereignis ausgelöst. Die Knoten, die sich innerhalb des Ereignis-Radius befinden, versuchen ihre erfassten Daten (e1, e2, e3, e4) per Multihop-Routing an die Basis-Station zu senden. Treffen auf dem Weg in einem Knoten Daten vom gleichen Ereignis aufeinander, so werden diese zunächst zusammengefasst (e234, e1234) bevor sie weitergeleitet werden. Die entsprechenden Knoten werden automatisch zu DCEs [13].

V. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Wie wir in dieser Arbeit sehen konnten, gibt es verschiedene Möglichkeiten, um energieeffiziente Kommunikation in drahtlosen Sensornetzen zu realisieren. Allerdings haben all diese Techniken Vor- und Nachteile, die man je nach Gegebenheit abwägen muss.

S-MAC versucht in erster Linie die knappen Ressourcen von Sensorknoten zu schonen und gilt als Vorläufer der

spezialisierten Sensornetzprotokolle. Heute ist es aber lediglich noch von rein akademischem Interesse und wird gerne zum Vergleich zahlreicher nachfolgender Netzwerkprotokolle herangezogen. Später entwickelte MAC-Protokolle gingen gezielt auf die Schwächen von S-MAC ein und waren erwartungsgemäß effizienter. Bereits der direkte Nachfolger T-MAC konnte den Energieverbrauch durch geringfügige Modifikationen erheblich reduzieren. Die Entwickler von B-MAC wiederum kritisierten, dass S-MAC zu weit gehe, indem es sich um die Netzorganisation, Netzsynchronisation und Datenfragmentierung kümmere. Sie lagerten diese Aufgaben in eigene konfigurierbare Module aus.

Eine weitere Möglichkeit, die wir kennengelernt haben, um die Kommunikation in Sensornetzen zu verbessern, ist die Datenaggregation, die redundante Informationen mittels DCEs zusammenfasst. Mit zunehmender Anzahl an DCEs sinkt die zu sendende Datenmenge und damit der Energieverbrauch. Gleichzeitig steigt aber auch die Verzögerung im Netz, da Knoten mehr Zeit für die Kombination der Daten benötigen. Grundsätzlich kann man sagen, dass es nicht eine 'beste' Strategie gibt oder geben wird. Man muss immer einen Kompromiss zwischen Energieeinsparung und Dienstgüte finden. Für spezifische Szenarien müssen spezielle, auf das jeweilige Problem zugeschnittene Lösungen gefunden werden. Und durch den technischen Fortschritt wird man auch in Zukunft immer neue Wege finden, um den Energieverbrauch weiter zu reduzieren.

LITERATUR

- [1] S. Haidan, "Datenzentrisches routing und directed diffusion in drahtlosen sensornetzen," pp. 1–5, 2004.
- [2] G. Anastasi, M. Conti, M. Di Francesco, and A. Passarella, "Energy conservation in wireless sensor networks: A survey," *Ad Hoc Networks*, vol. 7, no. 3, pp. 537–568, 2009.
- [3] S. Mark, "Energiesparende system- und schaltungskonzepte für drahtlose sensornetzwerke," Ph.D. dissertation, Universitätsbibliothek, 2008.
- [4] "Sensornetz." [Online]. Available: <http://de.wikipedia.org/wiki/Sensornetz>
- [5] D. Christmann, "Duty cycling in drahtlosen multi-hop-netzwerken," Technical Report 372/09, TU Kaiserslautern, Tech. Rep., 2009.
- [6] M. Neugebauer, *Energieeffiziente Anpassung des Arbeitszyklus in drahtlosen Sensornetzen*. J. örg Vogt Verlag, 2007.
- [7] "S-mac." [Online]. Available: <http://de.wikipedia.org/wiki/S-MAC>
- [8] "Adaptive listening." [Online]. Available: <http://www.scribd.com/doc/53349143/14/Adaptive-listening>
- [9] T. Van Dam and K. Langendoen, "An adaptive energy-efficient mac protocol for wireless sensor networks," in *Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems*. ACM, 2003, pp. 171–180.
- [10] "T-mac." [Online]. Available: <http://de.wikipedia.org/wiki/T-MAC>
- [11] "Berkeley_media_access_control." [Online]. Available: http://de.wikipedia.org/wiki/Berkeley_Media_Access_Control
- [12] C. Schurgers and M. Srivastava, "Energy efficient routing in wireless sensor networks," in *Military Communications Conference, 2001. MILCOM 2001. Communications for Network-Centric Operations: Creating the Information Force*. IEEE, 2001, pp. 357–361.
- [13] S. Shumilov, "Seminar verteilte informationssysteme," pp. 15–17, 2006.