

Kommunikationsanforderungen in zukünftigen Ad-Hoc-Netzwerken

Dennis Christmann

Reinhard Gotzhein

Fachbereich Informatik, AG Vernetzte Systeme

Technische Universität Kaiserslautern

D-67653 Kaiserslautern, Deutschland

Email: {christma,goetzhe}@cs.uni-kl.de

Durch immer kleinere, günstigere und stromsparendere Hardware erfahren drahtlose Sensornetzwerke in Industrie, medizinischen Einrichtungen und dem häuslichen Umfeld eine zunehmende Beliebtheit. Viele früher betrachtete Anwendungsszenarien, zum Beispiel zur Branderkennung in Gebäuden, gingen von einem stationären Aufbau des Netzwerks aus. Dabei wurden häufig logische Baumstrukturen angenommen, bei welchen Sensorwerte von den Blättern zur Senke zu übertragen sind.

Neuere Anwendungsbeispiele haben allerdings gezeigt, dass sich Sensornetzwerke nicht auf diese einfache Struktur beschränken lassen. Stattdessen bestehen zukünftige Anwendungen aus einer variierenden Anzahl mobiler Knoten, die einem Sensornetzwerk immer häufiger einen Ad-Hoc-Charakter verleihen. Des Weiteren werden auch die Rollen der Netzwerkknoten und die Kommunikation immer vielfältiger. Sensorknoten überwachen nicht mehr nur ihre Umgebung, sondern können diese in Form von Aktuatoren auch beeinflussen.

Durch die Eigenschaften vieler Anwendungstopologien und die beschränkten Hardwareressourcen haben zukünftige Sensornetzwerke zusätzliche Herausforderungen zu meistern. Aufgrund der geringen Sendereichweite der Transceiver bestehen bereits Netzwerke mit geringer räumlicher Ausdehnung aus mehreren Broadcast-Domänen, so dass adäquate MAC- und Routing-Protokolle benötigt werden, bei denen Energieaspekte und die Dynamik des Netzes schon im Design beachtet werden. Aufgrund der Problematik von transienten Links, die durch Mobilität und Knoteneintritte/-austritte verschärft wird, muss auch dem *Hidden-* und *Exposed-Station*-Problem eine hohe Bedeutung gegeben werden.

In dieser Arbeit analysieren wir Anforderungen an zukünftige drahtlose Ad-Hoc-Sensornetzwerke. Im Konkreten diskutieren wir in Abschnitt I folgende Aspekte:

- Dienstgüte
- Energieeffizienz
- Flexibilität
- Skalierbarkeit
- Robustheit
- Zeitsynchronisation

Neben der Erläuterung der einzelnen Anforderungen erörtern

Die Autoren danken der Carl-Zeiss-Stiftung für die finanzielle Unterstützung.

wir die Sonderstellung der Zeitsynchronisation und begründen die Notwendigkeit einer netzweiten Zeitsynchronisation mit deterministischer Genauigkeit und Konvergenzzeit. Des Weiteren werden Lösungsansätze zu den Anforderungen beispielhaft herausgegriffen und einzelne Protokolle betrachtet, in denen die Lösungskonzepte implementiert wurden. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf dem 802.15.4-Standard [1].

I. ANFORDERUNGEN UND LÖSUNGSKONZEPTE

Abbildung 1 gibt einen grafischen Überblick über die Anforderungen und Lösungskonzepte eines Ad-Hoc-Netzes, die im Folgenden näher erläutert werden. Der äußere Ring zeigt die Anforderungen und der innere Ring die jeweiligen Lösungen. Die Zeitsynchronisation ist als zentrale Anforderung im Mittelpunkt der Grafik dargestellt.

A. Dienstgüte

In vielen Szenarien reicht eine *best effort* Dienstgüte (*Quality-of-Service*, QoS) schon lange nicht mehr aus. Stattdessen werden verbindlichere Zusicherungen von Übertragungsraten oder Ende-zu-Ende-Verzögerungen benötigt. Obwohl deterministische Garantien und die Erfüllung harter Echtzeitanforderungen aufgrund der reduzierten Kontrollierbarkeit des Mediums in drahtlosen Sensornetzen kaum vorstellbar sind, gibt es realistische Anwendungsfälle mit *weichen* Echtzeitanforderungen, die die Nicht-Einhaltung von Übertragungsraten oder Fristen bis

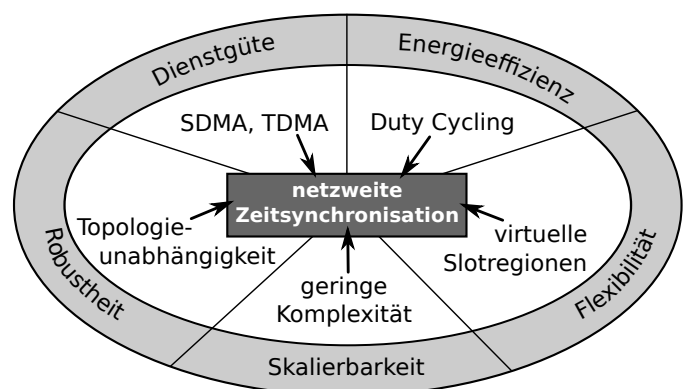


Abbildung 1. Anforderungen und Lösungen eines Ad-Hoc-Netzwerks.

zu einem gewissen Grad tolerieren. Beispiele finden sich in drahtlos vernetzten Multimedia- oder Regelungssystemen.

Der Schlüssel zum Erreichen von Dienstgüte liegt in der Organisation des Zugriffs auf das Medium. Falls eine kollisionsfreie Übertragung von Daten zu gewährleisten ist, scheiden wettbewerbsbasierte Arbitrierungsschemata wie CSMA/CA im Allgemeinen aus. Stattdessen eignen sich Multiplexverfahren wie *Time Division Multiple Access* (TDMA) oder *Frequency Division Multiple Access* (FDMA), wobei die Anwendbarkeit der FDMA-Ansätze aufgrund der höheren Hardwareanforderungen und des Verwaltungsaufwands eingeschränkt ist.

TDMA-Ansätze sind hingegen in nahezu allen QoS-Protokollen zu finden. Diese basieren auf der Einteilung der Zeit in Zeitschlitze, die anschließend exklusiv einem Knoten zum Senden zugewiesen werden. Die Unterteilung in Zeitschlitze wird in der Regel von einem MAC-Protokoll vorgenommen, welches hierfür wiederum eine Synchronisation voraussetzt (siehe Abschnitt I-F). Die Zuweisung der Zeitschlitze an Knoten ist Aufgabe eines Reservierungsprotokolls, welches häufig Teil eines QoS-Routingprotokolls ist [2]. Zur Erhöhung der Effizienz können gleiche Zeitschlitze an Knoten, die außerhalb der Interferenzreichweite voneinander positioniert sind, zugeordnet werden (*Spatial Division Multiple Access* (SDMA)), wobei das Hidden-Station- und das Exposed-Station-Problem zu beachten sind. Zu beachten ist ferner, dass die Interferenzreichweite in der Regel größer ist als die Sendereichweite.

Im Beacon-Modus des IEEE 802.15.4-Standards sind reservierbare Zeitschlitze in Form der *Guaranteed Time Slots* (GTS) zu finden [1].

B. Energieeffizienz

Da Sensorknoten häufig mit Batterien oder Akkus betrieben werden und der Austausch kostspielig ist, ist die Energieeffizienz oft das primäre Optimierungsziel in drahtlosen Sensornetzwerken. In [3] wurden bezogen auf die Kommunikation 4 Quellen von Energieverschwendung identifiziert: *Idle Listening* (Knoten sind empfangsbereit ohne dass empfangen wird), *Overhearing* (es werden Daten empfangen, die für andere Knoten bestimmt sind), *Kollisionen* und *Protokoll overhead*. Eine ideale Energieeffizienz liegt vor, wenn Knoten ausschließlich während Sende-/Empfangsvorgängen im Sende-/Empfangsmodus sind.

Um sich diesem Ideal anzunähern, entstanden 2 Ansätze: *Preamble Sampling* und *Duty Cycling*. *Preamble Sampling* ist ein asynchrones Verfahren, bei dem der Sender vor der Übertragung der Daten ein Wecksignal auf das Medium legt. Empfänger, die ihren Transceiver regelmäßig in den Empfangsmodus schalten, verbleiben bei Erkennung eines Wecksignals im Empfangsmodus bis die Übertragung der Nutzdaten abgeschlossen ist. Ein Beispiel eines Preamble Sampling-Protokolls ist WiseMAC [4].

Bei *Duty Cycling* wird die Zeit in periodische Aktiv- und Schlafphasen unterteilt: In Aktivphasen finden Übertragungen statt, in den Schlafphasen wird der Transceiver der Knoten in einen stromsparenden *idle*-Modus versetzt. Um Aktiv-/

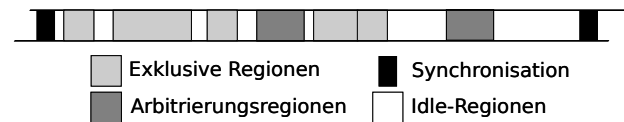


Abbildung 2. Virtuelle Slotregionen [7].

Schlafphasen aufeinander abzustimmen, ist eine Zeitsynchronisation unerlässlich (siehe Abschnitt I-F). Eines der ersten *Duty Cycling*-Protokolle für drahtlose Sensornetzwerke ist S-MAC [3]. *Duty Cycling* in Verbindung mit effizienten Multi-Hop-Übertragungen wurde in RMAC thematisiert [5]. Der IEEE 802.15.4-Standard realisiert *Duty Cycling* ebenfalls durch eine Unterteilung des sogenannten *Superframes* in Aktiv-/Inaktiv-Phasen [1].

C. Flexibilität

Aus Gründen des Entwicklungsaufwands und der Kosten sollten Protokolle für Sensornetzwerke nicht auf ein bestimmtes Szenario zugeschnitten sein. Stattdessen sollten sie generischer Natur sein und flexibel per Konfiguration an unterschiedliche Anwendungen und dynamisch zur Laufzeit angepasst werden können. Im Konkreten sollten beliebige Verkehrsmuster (periodische sowie sporadische) unterstützt und optimiert werden und Kommunikation zwischen allen Knotenpaaren möglich sein. Letzteres wird beispielsweise von vielen Protokollen nicht erfüllt, die auf logischen Baumstrukturen beruhen, in der Daten ausschließlich zur Datensenke fließen [6].

Möglichkeiten zur Erhöhung der Flexibilität bieten virtuelle Slotregionen [7]. Virtuelle Slotregionen sind ebenfalls eine Lösung, die wiederum eine Synchronisation voraussetzt (siehe Abschnitt I-F). Abbildung 2 zeigt hierzu ein Beispiel. Zwischen 2 Synchronisationsphasen können 3 Arten von Regionen beliebig platziert werden: *Exklusive Regionen*, die für reservierungsbasierte Übertragungen bestimmt sind (siehe auch Abschnitt I-A), *Arbitrierungsregionen* für wettbewerbsbasierten Zugriff auf das Medium (bspw. für Übertragungen ohne verbindliche Dienstgüteanforderung) und *Idle-Regionen* zum Sparen von Energie (siehe auch Abschnitt I-B).

Der IEEE 802.15.4-Standard unterstützt virtuelle Slotregionen nur stark eingeschränkt und bietet daher eine geringe Flexibilität [1]. Ein *Superframe* folgt immer dem gleichen Aufbau: Beacon-Übertragung, Aktiv-Phase (bestehend aus Wettbewerbsphase und maximal 7 GTS) und Inaktiv-Phase. Die Länge der einzelnen Phasen ist zwar konfigurierbar, die Anzahl und Position der Phasen lässt sich aber nicht ändern. Des Weiteren kann ein Knoten während eines GTS ausschließlich mit dem PAN-Koordinator kommunizieren, so dass keine beliebigen Kommunikationspartner unterstützt werden.

D. Skalierbarkeit

Durch immer günstigere Hardware und kleinere Bauformen ist in vielen Szenarien eine hohe Knotendichte und eine komplexe Topologie zu erwarten. Protokolle sollten daher eine hohe Skalierbarkeit aufweisen, d.h. sie sollten eine große

Knotenanzahl und eine stark ausgeprägte topologische Dynamik bewältigen können. Dabei ist auch die Verwaltung von Multi-Hop-Topologien und die Eingliederung neuer Knoten zur Laufzeit in das Netzwerk zu unterstützen.

Um dieses Ziel zu erreichen, müssen die Protokolle eine geringe Zeit- und Nachrichtenkomplexität hinsichtlich des Verwaltungsoverheads aufweisen. Verwaltungsoverhead entsteht zum Beispiel bei der Koordination von Reservierungen siehe auch (Abschnitt I-A) oder bei der Durchführung der Synchronisation (siehe auch Abschnitt I-F). Für all diese Verwaltungsaktionen gilt, dass der Overhead maximal linear von der Knotenanzahl abhängen sollte, d.h. bei n Knoten sollte die Komplexität $O(n)$ nicht überschreiten.

Des Weiteren besteht eine große Abhängigkeit zwischen Skalierbarkeit und Flexibilität. Steigt beispielsweise die Anzahl der Knoten, dann ist zu erwarten, dass auch der Bedarf an reservierbaren Zeitslots wächst. Solange das Medium noch Kapazitäten aufweist, sollte dieser Bedarf durch Hinzunahme neuer Reservierungsslots gedeckt werden können.

Eine hohe Skalierbarkeit setzt außerdem voraus, dass die Effizienz eines Protokolls nicht übermäßig von der Knotenanzahl abhängen darf. Beispielsweise erfüllen viele Duty Cycling-Protokolle, unter Anderem auch S-MAC [3], dieses Kriterium nicht, da sie unter einer starken Sensitivität von der Knotenanzahl leiden. Bei ihnen steigt der Energieverbrauch einzelner Knoten mit einer wachsenden Anzahl von Nachbarknoten stark an, unabhängig davon, ob die Knoten selbst neue Kommunikationspartner erhalten.

Auch der IEEE 802.15.4-Standard erlaubt Skalierbarkeit nur eingeschränkt [1]. Die Gründe hierfür liegen unter Anderem in der beschränkten Anzahl an GTS, die maximal 7 wettbewerbsfreie Übertragungsslots pro PAN-Koordinator erlaubt, und in der komplexen Verwaltung von Multi-Hop-Netzwerken. Im Allgemeinen lässt sich festhalten, dass Multi-Hop-Netzwerke nur unzureichend von dem 802.15.4-Standard unterstützt werden.

E. Robustheit

Aufgrund der Beschaffenheit von Sensorknoten sind Knotenausfälle und transiente Links in einem drahtlosen Sensornetzwerk häufiger zu erwarten als in herkömmlichen drahtgebundenen Vernetzungen. Protokolle für drahtlose Sensornetze müssen daher robust gegen eine daraus entstehende topologische Dynamik sein und Knotenausfälle bis zu einem gewissen Ausmaß verkraften können.

Um dieses Ziel zu erreichen, dürfen die Netzwerke keine stark ausgeprägte Abhängigkeit von der Topologie besitzen. Insbesondere darf kein Single-Point-of-Failure existieren, dessen Wegfall zu einem Ausfall des kompletten Systems führt. Es werden demnach dezentrale Protokolle und dezentral organisierte Netzwerkstrukturen benötigt, die effektiv und schnell auf einen Knotenausfall reagieren.

Der IEEE 802.15.4-Standard erfüllt diese Ansprüche im Beacon-Modus nicht, da PAN-Koordinatoren die Achillesferse eines Netzwerks sind [1]. Der Non-Beacon-Modus ist

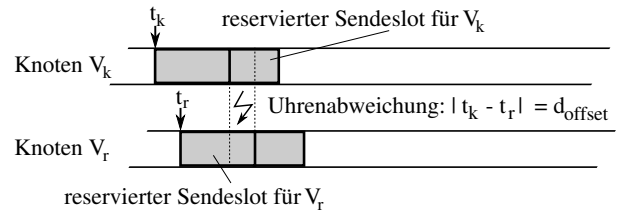


Abbildung 3. Auswirkungen von Synchronisationsungenauigkeiten.

hingegen robuster gegen Knotenausfälle, wird aber den anderen oben genannten Anforderungen nicht gerecht. Auch viele Protokolle, die auf drahtlosen oder drahtgebundenen virtuellen Backbones basieren, sind wenig robust gegen Knotenausfälle. [8] stellt diesbezüglich Maßnahmen vor, um Knotenausfälle vorherzusehen und daraus entstehende Probleme proaktiv zu verhindern. Bei unerwarteten Knotenausfällen versagen aber auch solche Ansätze.

Protokolle, in denen kein Knoten eine Sonderrolle einnimmt, sind in der Regel robuster gegen Knotenausfälle. Beispiele sind MacZ [7] und RMAC [5]. Allerdings ist zu beachten, dass manche dieser Protokolle für sich betrachtet zwar dezentral und dadurch robust sind, aber auf weniger robusten Diensten aufsetzen. Beispielsweise wird in RMAC zur Synchronisation auf TPSN verwiesen [9], welches ausgewählte Referenzknoten zur Synchronisation verwendet, deren Ausfall eine Neuwahl der Referenzknoten zur Folge hat. Demnach ist die Zeitsynchronisation auch hier ein ausschlaggebender Faktor zum Erreichen einer hohen Robustheit (siehe auch Abschnitt I-F).

F. Netzweite Zeitsynchronisation

Netzweite Zeitsynchronisation ist aus Kommunikationssicht Voraussetzung für TDMA-Ansätze zum Mediumzugriff, Duty Cycling und die Bildung virtueller Slotregionen (siehe Abschnitte I-A, I-B, I-C). Damit besitzt die netzweite Zeitsynchronisation in Ad-Hoc-Netzen eine Sonderstellung (siehe Abbildung 1). Aus einer Reihe von Gründen ist eine perfekte Zeitsynchronisation nicht möglich, so dass zwischen den lokalen Uhren immer eine Restabweichung, genannt *Clock Offset*, besteht, die möglichst klein zu halten ist. Abbildung 3 zeigt ein TDMA-Szenario, in dem dieser Clock Offset zu einer Kollision von Nachrichten der Knoten V_k und V_r führt, obwohl beide Knoten in benachbarten reservierten Slots senden. Solche Kollisionen lassen sich nur dann zuverlässig vermeiden, wenn die Zeitsynchronisation einen netzweiten maximalen Clock Offset unter Einhaltung einer geringen und beschränkten Konvergenzzeit – die Dauer bis zum (Wieder-)Erreichen des maximalen Clock Offsets – garantieren kann. Die Verwendung des mittleren Clock Offsets genügt also nicht; vielmehr sind deterministische Verfahren zur netzweiten Zeitsynchronisation erforderlich.

Der IEEE 802.15.4-Standard sieht im Beacon-Modus zwar eine Zeitsynchronisation vor, allerdings beschränkt auf die Single-Hop-Bereiche der PAN-Koordinatoren [1]. Häufig zitierte Verfahren zur netzweiten Zeitsynchronisation wie RBS

[10] oder TPSN [9] arbeiten mit statistischen Ansätzen zur Ermittlung des Clock Offsets und haben außerdem eine Konvergenzzeit ohne obere Schranke. Lösungen auf der Basis von GPS haben Nachteile hinsichtlich Hardwarekosten und Energieverbrauch. Sie eignen sich außerdem nicht für den Einsatz in Gebäuden. Ein Verfahren, das die erforderlichen Eigenschaften aufweist, ist BBS [11].

II. ZUSAMMENFASSUNG

Die zunehmenden Möglichkeiten von Sensornetzwerken zeigen, dass *Ambient Intelligence* und *Pervasive Computing* schon lange keine reine Fiktion mehr sind. Mit der Anzahl der Anwendungsfälle steigt aber auch die Anzahl der Anforderungen an ein drahtloses Sensornetz, welches heute in vielen Fällen Ähnlichkeiten mit Ad-Hoc-Netzwerken aufweist.

In dieser Arbeit haben wir 6 Anforderungen an zukünftige Sensornetzwerke analysiert. Dabei wurde gezeigt, dass zwar zahlreiche Lösungsansätze für die einzelnen Anforderungen existieren, aber kein existierendes Protokoll alle Anforderungen in Einklang bringt. Insbesondere der IEEE 802.15.4-Standard offenbart bei näherer Betrachtung einige Schwächen; vor Allem fehlende Flexibilität und geringe Robustheit.

Des Weiteren wurde gezeigt, dass die Zeitsynchronisation eine Sonderrolle unter allen Anforderungen einnimmt, da sie häufig nicht nur durch die Anwendungen selbst benötigt wird, sondern auch einen Basisdienst zur Erfüllung anderer Anforderungen bereitstellt. Es wurde verdeutlicht, dass ein Bedarf an skalierenden Multi-Hop-Synchronisationsprotokollen mit deterministisch beschränkter Genauigkeit und Konvergenzzeit besteht, um netzweites Mediumslotting als Grundlage für Reservierungen und Dienstgüte zu ermöglichen.

LITERATUR

- [1] IEEE, *Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)*. New York, NY, USA: IEEE Computer Society, Oct. 2003. [Online]. Available: <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.15.4-2006.pdf>
- [2] W.-H. Liao, Y.-C. Tseng, and K.-P. Shih, "A TDMA-based Bandwidth Reservation Protocol for QoS Routing in a Wireless Mobile Ad Hoc Network," in *Proceedings of IEEE ICC*, April–May 2002.
- [3] W. Ye, J. S. Heidemann, and D. Estrin, "An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks," in *INFOCOM*, June 2002.
- [4] A. El-Hoiydi and J.-D. Decotignie, "WiseMAC: an ultra low power MAC protocol for the downlink of infrastructure wireless sensor networks," in *ISCC*. IEEE Computer Society, 2004, pp. 244–251.
- [5] S. Du, A. K. Saha, and D. B. Johnson, "RMAC: A routing-enhanced duty-cycle MAC protocol for wireless sensor networks," in *INFOCOM*, 2007, pp. 1478–1486.
- [6] G. Lu, B. Krishnamachari, and C. S. Raghavendra, "An adaptive energy-efficient and low-latency MAC for data gathering in wireless sensor networks," *Parallel and Distributed Processing Symposium, International*, vol. 13, p. 224a, 2004.
- [7] P. Becker, R. Gotzhein, and T. Kuhn, "MacZ – A Quality-of-Service MAC Layer for Ad-hoc Networks," in *HIS '07: Proceedings of the 7th International Conference on Hybrid Intelligent Systems*. IEEE Computer Society, Sept. 2007, pp. 277–282.
- [8] M. Ayyash, K. Alzoubi, and Y. Alsbou, "Preemptive Quality of Service Infrastructure for Wireless Mobile Ad Hoc Networks," in *Proceedings of the 2006 international conference on Wireless communications and mobile computing*, ser. IWCMC '06. New York, NY, USA: ACM, 2006, pp. 707–712. [Online]. Available: <http://doi.acm.org/10.1145/1143549.1143690>
- [9] S. Ganeriwal, R. Kumar, and M. B. Srivastava, "Timing-sync protocol for sensor networks," in *SenSys*, I. F. Akyildiz, D. Estrin, D. E. Culler, and M. B. Srivastava, Eds. ACM, 2003, pp. 138–149.
- [10] J. Elson, L. Girod, and D. Estrin, "Fine-grained network time synchronization using reference broadcasts," in *OSDI*. Proceedings of the Fifth Symposium on Operating Systems Design and Implementation (OSDI 2002), Boston, MA, USA, 2002.
- [11] R. Gotzhein and T. Kuhn, "Decentralized Tick Synchronization for Multi-Hop Medium Slotting in Wireless Ad Hoc Networks Using Black Bursts," in *5th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks. SECON'08, San Francisco*. IEEE, June 2008, pp. 422–431.