

Einführung in Sensornetze - Abhängigkeiten zwischen Protokolldesign und verwendeter Hardware

Andreas Heider

Betreuerin: Corinna Schmitt

Seminar Sensorknoten: Betrieb, Netze und Anwendungen SS2011

Lehrstuhl Netzarchitekturen und Netzdienste, Lehrstuhl Betriebssysteme und Systemarchitektur

Fakultät für Informatik, Technische Universität München

Email: heidera@in.tum.de

KURZFASSUNG

Sensorknoten sollen klein, drahtlos und günstig sein und müssen daher mit begrenzten Ressourcen auskommen. Ihre vielfältigen Anwendungen stellen weitere Anforderungen, die nicht nur einzelne Knoten, sondern das gesamte Sensornetz beeinflussen. Im Rahmen dieser Arbeit werden die wichtigsten Zusammenhänge zwischen Hardware, Einsatzszenarien und Netzwerkstrukturen vorgestellt und gezeigt wie diese im Protokolldesign berücksichtigt werden können.

Schlüsselworte

Sensornetzwerke, Protokolldesign, Anwendungen, Hardware, Protokollstack

1. EINLEITUNG

Ein verteiltes Sensornetzwerk besteht aus hunderten bis zu mehreren tausenden über ein Einsatzgebiet verteilten Sensorknoten [11]. Mittels Sensoren überwachen diese ihre Umwelt und stellen die Messergebnisse dem Nutzer zur Verfügung. Dazu kommunizieren sie drahtlos untereinander.

Jeder Knoten kann dabei sowohl an der Kommunikation als auch an der Datensammlung und -verarbeitung beteiligt sein.

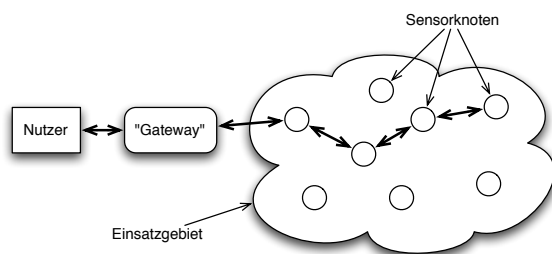


Abbildung 1: Aufbau eines einfachen Sensornetzwerks [6]

In Abbildung 1 ist der typische Aufbau eines einfachen Sensornetzwerks dargestellt. Der Nutzer kann über ein zentrales „Gateway“ auf die Sensorknoten zugreifen.

Von besonderer Bedeutung ist bei Sensornetzen der Energieverbrauch. Da sich die Sensorknoten meist batteriebetrieben sind und sich oft an schwer zugänglichen Orten befinden,

steht ihnen nur eine begrenzte Menge an Energie zur Verfügung. Diese vorhandene Energie muss intelligent genutzt werden, um die Aufgabe des Sensornetzes bestmöglich zu erfüllen. Hierfür ist es nötig, sowohl die Anforderungen eines einzelnen Sensorknotens als auch das Zusammenspiel aller Knoten im Sensornetzwerk zu beachten.

Um diese und weitere Anforderungen zu erfüllen, sind klassische Techniken für den Aufbau und Betrieb von Ad-Hoc-Netzwerken nicht ausreichend. Daher werden spezialisierte Protokolle eingesetzt, die die besonderen Eigenschaften drahtloser Sensornetze beachten.

Ziel dieser Arbeit ist, die Besonderheiten drahtloser Sensornetze darzustellen und die Auswirkungen auf das Protokolldesign zu untersuchen.

Hierfür wird zunächst in Abschnitt 2 ein Überblick über die Hardware eines einzelnen Sensorknotens gegeben. In Abschnitt 3 werden typische Anwendungen für Sensornetze vorgestellt und klassifiziert. Darauf folgend wird in Abschnitt 4 die Netzstruktur eines Sensornetzes anhand der verschiedenen Topologien vorgestellt. In Abschnitt 5.1 werden die bisherigen Erkenntnisse zusammengefasst und konkrete Anforderungen an das Protokolldesign formuliert. Schließlich wird gezeigt wie diese im Protokollstack berücksichtigt werden können.

2. HARDWARE

Als nur ein Teil eines großen Netzwerks zeichnet sich ein einzelner Sensorknoten durch die Beschränkung auf das Nötige aus. Um den Energieverbrauch und die Kosten zu minimieren, sollte ein Sensorknoten nur die nötigen Komponenten beinhalten, um Datensammlung, Kommunikation und anwendungsspezifische Aufgaben auszuführen.

Ein Sensorknoten besteht mindestens aus den in Abbildung 2 dargestellten vier Hauptkomponenten: Den je nach Anwendung sehr verschiedenen Sensoren, der Recheneinheit, die die Steuerung übernimmt, einem Transceiver für die Kommunikation mit anderen Knoten und einer Energiequelle, die das gesamte System mit Strom versorgt.

Je nach Anwendungsfall können zusätzlich weitere Komponenten hinzukommen, die beispielsweise die Lokalisation des Knotens im Einsatzgebiet ermöglichen oder für Mobilität sorgen.

Tabelle 1: Vergleich häufig verwendeter Mikrocontroller [9]

Name	Bit	Flash	RAM	Energieverbrauch		
				Aktiv	Idle	Sleep
AT90LS8525	8	8KB	512B	6.4 mA	1.9 mA	<1 uA
ATMEGA 103L	8	128KB	4KB	5.5 mA	1.6 mA	<1 uA
MSP430 F149	16	60KB	2B	400 uA	1.3 uA	<0.1 uA

2.1 Sensoreinheit

Die Sensoreinheit stellt die Verbindung zwischen dem Sensorknoten und seiner Umwelt her. Mittels anwendungsspezifischer Sensoren werden verschiedene Parameter gemessen, mit Aktoren kann ein Sensorknoten seine Umgebung auch beeinflussen.

Die benötigten Sensoren werden durch die zu messenden Umwelteigenschaften festgelegt. Sie stellen wiederum Anforderungen an die sonstige verwendete Hardware und den Aufbau des Sensornetzes. Maßgeblich ist dabei vor allem die zu übertragende Datenmenge, die nötige Rechenleistung für den Betrieb des Sensors und der Energieverbrauch.

Je nach Anwendungsfall können sich die verwendeten Sensoren und damit die Anforderungen stark unterscheiden. Für einen konkreten Anwendungsfall gibt es allerdings oft wenig Wahlmöglichkeiten zwischen verschiedenen Sensortechnologien. Daher muss sich meist die übrige Hardware an den anzusteuernenden Sensoren orientieren.

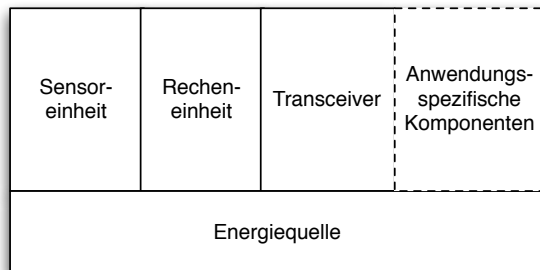


Abbildung 2: Die Hauptkomponenten eines Sensorknotens

2.2 Recheneinheit

Für die Steuerung des Sensorknotens werden meist Mikrocontroller verwendet. Diese vereinen einen Prozessor sowie Speicher auf einem Chip. In Tabelle 1 sind die wichtigsten Daten einiger häufig verwendeter Mikrocontroller dargestellt.

In Hinblick auf das Protokolldesign ist hier vor allem festzustellen: Die Rechenleistung sowie der verfügbare Speicher der Mikrocontroller ist äußerst beschränkt.

Des weiteren ist zu sehen, dass mehrere Energieverbrauchs-werte angegeben werden. Moderne Mikrocontroller bieten verschiedene Betriebsmodi an, die sich stark im Energieverbrauch unterscheiden [3]. Mittels „Dynamic Voltage Scaling“ oder dem Abschalten momentan nicht benötigter Komponenten kann dieser deutlich verringert werden.

2.3 Transceiver

Die Kommunikation zwischen den Knoten eines Sensornetzwerks findet typischerweise drahtlos statt. Hierfür wird ein Transceiver verwendet.

Ähnlich den Betriebsmodi der Recheneinheit kann auch der Transceiver bei Nicht-Gebrauch abgeschaltet werden. Während dem Senden (Tx) von Daten wird sehr viel Energie verbraucht.

Daher ist ein Ziel des Sensornetzwerkdesigns, den Transceiver möglichst selten und kurz zu aktivieren. Die meiste Zeit sollte sich der Transceiver daher entweder im Empfangsmodus (Rx) befinden oder ganz deaktiviert sein.

Essentiell für die Wahl des Transceivers, der Antenne sowie des Netzwerkaufbaus ist dabei die Reichweite der drahtlosen Verbindung. Denn die für eine Übertragung benötigte Energie ist exponentiell von der Distanz d zwischen den Knoten abhängig [3]. Während das theoretische Minimum noch d^2 ist, entspricht der tatsächliche Energieverbrauch in der Praxis oft sogar d^3 bis d^4 . Daher ist es wichtig beim Netzwerkaufbau sowie der Wahl der einzusetzenden Netzwerk-topologie auf eine möglichst geringe Distanz zwischen den miteinander kommunizierenden Knoten zu achten.

Der Energieverbrauch eines Transceivers lässt sich noch weiter untergliedern. Dies wird in [4] am Beispiel des Empfangs einer DVB-T Übertragung dargestellt. Dabei werden folgende Hautverbraucher identifiziert:

Der Analogteil verbraucht etwa 10% der Gesamtenergie und umfasst diverse Filter sowie die Analog-Digital-Umwandlung. Mit 60% entfällt der Hauptteil des Energieverbrauchs auf die digitale Demodulation. Hierbei ist insbesondere die nötige Fouriertransformation (FFT) hervorzuheben, die allein bereits 30% des Energieverbrauchs ausmacht. Die übrige Energie verteilt sich mit 20% auf den „Channel decoder“ sowie mit 10% auf sonstige Verbraucher.

2.4 Energiequelle

Da Sensorknoten oft schwer zugänglich und über ein großes Gebiet verteilt sind, ist es meist nicht möglich diese kabelgebunden mit Strom zu versorgen. Daher ist ein essentieller Bestandteil jedes Sensorknotens seine jeweilige Energieversorgung. Die Zeit, die ein Sensorknoten arbeiten kann, ist abhängig von der vorhandenen Energie sowie dem Energieverbrauch. Die Kapazität der Energiequelle beeinflusst also die Lebenszeit des Sensorknotens entscheidend.

Die einfachste und am häufigsten verwendete Energiequelle ist die Batterie. Mit einer Ladung können Sensorknoten teilweise mehrere Jahre arbeiten bis sie erneuert werden muss. Allerdings besitzt eine Batterie nur eine feste Kapazität.

Tabelle 2: Betriebsmodi eines Sensorknotens [3]

Modus	Recheneinheit	Sensorik	Transceiver
s_0	Aktiv	Aktiv	Tx, Rx
s_1	Idle	Aktiv	Rx
s_2	Sleep	Aktiv	Rx
s_3	Sleep	Aktiv	Inaktiv
s_4	Sleep	Inaktiv	Inaktiv

Um eine längere Laufzeit zu erreichen kann mittels „Energy Harvesting“ Energie aus der Umgebung des Sensorknotens genutzt werden. Ein Sensorknoten kann beispielsweise mit einer Solarzelle ausgestattet werden und so tagsüber einen Akkumulator laden. Wichtig ist hierbei die Verfügbarkeit der Energiequelle, die nötige Größe um genug Strom zu erzeugen sowie die Kosten für den Einsatz.

Idealerweise wird durch „Energy Harvesting“ mehr Energie erzeugt, als der Sensorknoten für den Betrieb benötigt.

Da die Effektivität einiger Energiegewinnungsverfahren von der Tages- sowie der Jahreszeit abhängt, müssen diese Eigenschaften ebenfalls in den verwendeten Protokollen beachtet werden. So ist es denkbar, solarbetriebene Sensorknoten bevorzugt tagsüber bei hoher Sonneneinstrahlung zu aktivieren.

2.5 Betriebsmodi

Da die Stromsparfunktionen der Komponenten voneinander abhängig sind, ergeben sich für einen vollständigen Sensorknoten beispielsweise die in Tabelle 2 aufgelisteten Betriebsmodi. Da nicht alle Kombinationen der Energiesparmodi der einzelnen Komponenten sinnvoll sind, werden hierfür oft nur wenige Kombinationen ausgewählt.

Im Allgemeinen ist es Aufgabe des Betriebssystems, je nach Bedarf zwischen den Betriebsmodi zu wechseln.

Allerdings bringt ein Übergang in einen sparsameren Betriebsmodus auch Kosten mit sich: Jeder Moduswechsel benötigt eine gewisse Zeit um durchgeführt zu werden und verbraucht damit selbst Energie. Daher muss das Betriebssystem möglichst viele Informationen zur Verfügung haben, um gut entscheiden zu können, wann in einen sparsameren Modus gewechselt werden sollte.

Insbesondere für die Kommunikation spielt auch das verwendete Netzwerkprotokoll eine wichtige Rolle. Um den Stromverbrauch zu minimieren, sollte der Transceiver oft ganz ausschaltet sein. Dazu muss sichergestellt werden, dass der Knoten eine gewisse Zeit keine Pakete empfangen muss. Um solche Optimierungen implementieren zu können ist es notwendig, alle Aspekte eines Sensornetzwerks zu beachten.

3. ANWENDUNGEN

Der klassische Anwendungsfall für ein Sensornetzwerk ist das Überwachen von physikalischen Messwerten. Diese werden an ein zentrales „Gateway“ gesendet, über das der Nutzer auf die Messungen zugreifen kann. Dies entspricht dem in Abbildung 1 dargestellten Fall.

3.1 Klassifikation

Es gibt allerdings noch andere Einsatzfälle für drahtlose Sensornetze. In [8] wird ein Klassifikationsschema für Anwendungen von Sensornetzwerken vorgestellt, das diese nach diversen Gesichtspunkten gruppiert.

3.1.1 Ziel

Ein Kriterium ist dabei das Ziel des Sensornetzes. Hier wird unterschieden zwischen Anwendungen in denen die Sensorknoten nur Messaufgaben übernehmen und solchen, in denen sie mittels Aktoren ihre Umwelt auch beeinflussen.

Ein Beispiel für ein solches drahtloses Sensor- und Aktor-Netzwerk ist die automatische Temperaturregulation durch zusätzliche Aktorknoten. Anstatt die Klimatisierung des Einsatzgebiets nur zu überwachen, könnte ein solches Netz auch aktiv eingreifen und die Belüftung steuern. Weitere Informationen zu diesem Typ von Sensornetzen sind in [5] zu finden.

Soll das Sensornetzwerk auch reagieren können ergeben sich völlig neue Anforderungen für den Netzaufbau und die verwendeten Protokolle. Es müssen nun einige Knoten die Aufgabe übernehmen, Entscheidungen über das auszuführende Verhalten zu fällen. Um diese Steuerentscheidungen zu den ausführenden Knoten zu übermitteln muss ein Rückkanal vorhanden sein.

3.1.2 Interaktionsmuster

Diese Anforderung führt direkt zu dem zweiten Unterscheidungsfaktor, dem Interaktionsmuster zwischen den Knoten. Der klassische Fall eines Sensornetzwerks mit zentralem „Gateway“ entspricht dabei „many-to-one“: Viele verteilte Sensorknoten schicken Daten an ein „Gateway“.

Kann statt nur über ein zentrales „Gateway“ über viele Knoten auf das Netzwerk zugegriffen werden oder müssen Steuerknoten mit anderen Sensorknoten kommunizieren handelt es sich um ein „many-to-many“-Szenario. Hierbei kann jeder Knoten mit jedem anderen kommunizieren. In seltenen Fällen sind auch „one-to-many“-Sensornetze zu finden, also Netzwerke in denen nur ein Knoten Nachrichten an viele andere schickt.

3.1.3 Mobilität

Wie bereits in Abschnitt 2 angemerkt wurde können Sensorknoten auch beweglich sein. Dies wird im Klassifikationsschema als Mobilität berücksichtigt. Im Gegensatz zu statischen können mobile Sensorknoten ihre Position während der Laufzeit ändern.

Dabei kann zusätzlich zwischen Quellen-mobilen und Senken-mobilen Anwendungen unterschieden werden. In Quellen-mobilen Sensornetzen sind die datensammelnden Sensorknoten beweglich. Für diese Einsatzzwecke ist insbesondere die Verfolgung und Lokalisation der Sensorknoten in dem Einsatzgebiet sowie ein regelmäßiges Aktualisieren der Routingtabellen nötig. Senken-mobile Anwendungen zeichnet dagegen aus, dass die Senke (das „Gateway“) nicht statisch ist und beispielsweise durch einen Roboter, der regelmäßig seine Position ändert realisiert sein kann. In diesem Fall werden besonders hohe Anforderungen an die verwendeten Aggregationsalgorithmen gestellt.

Tabelle 3: Beispiele verschiedener Anwendungen und ihre Klassifizierung [8]

Anwendung	Ziel	Interaktion	Mobilität	Lokalität	Zeit
Gletscherüberwachung	„sense only“	„many-to-one“	statisch	global	periodisch
Verkehrssteuerung	„sense and react“	„many-to-many“	statisch	regional	periodisch
Waldbrandfrühwarnsystem	„sense only“	„many-to-one“	statisch	global	eventbasiert
Tierüberwachung	„sense only“	„many-to-one“	mobile Quellen	global	periodisch

3.1.4 Lokalität

Des weiteren kann die Lokalität der verarbeiteten Daten betrachtet werden: Während in globalen Sensornetzwerken ein Zugriff auf alle Knoten gleichzeitig erforderlich ist, ist es in regionalen Netzwerken ausreichend auf die Daten einiger Sensorknoten in einer bestimmten Umgebung Zugang zu haben.

3.1.5 Zeit

Schließlich kann bei der Datenakquisition noch zwischen periodischer Aufzeichnung, bei der Messungen in einem Intervall durchgeführt werden, und eventbasierten Sensornetzwerken, die auf Ereignisse warten und reagieren, unterschieden werden.

Einige Beispiele für die Einordnung verschiedener Anwendungsszenarien in dieses Klassifikationsschema sind in Tabelle 3 zu finden. Weitere Einordnungen sowie ausführlichere Informationen zu diesem Thema sind in [8] beschrieben.

3.2 Lebenszeit

Aufgrund der begrenzten zur Verfügung stehenden Energiemenge kann ein Sensorknoten meist nur eine bestimmte Zeit ohne Wartung arbeiten. In [10] werden Anwendungen anhand der benötigten Lebenszeit des Sensornetzwerks klassifiziert.

Die typischerweise benötigte Lebenszeit bis zum Batterieaustausch für einige Anwendungen ist in Tabelle 4 dargestellt. Diese kann sich in einem großen Bereich bewegen: Während es in klinischen Anwendungen unproblematisch ist, die Batterie täglich durch Pflegepersonal zu wechseln, sollten die oft an weit abgelegenen Orten verteilten Sensorknoten eines Erdbebenfrüherkennungssystems lange ohne teure Eingriffe zuverlässig arbeiten.

Des weiteren wird die Frequenz der periodisch zu messenden Ereignisse betrachtet. Soll beispielsweise ein Sensorknoten nur Luftdruck und Temperatur messen ist es ausreichend dies stündlich oder noch seltener durchzuführen. Für solch eine Anwendung ist entsprechend ein kleiner und sparsamer Sensorknoten ausreichend. Um Vibrationen in einer Halbleiterfabrik oder Geräusche zu überwachen ist dagegen eine hohe Messfrequenz von über 1 kHz notwendig.

3.2.1 Definition Lebenszeit

Wenn Anwendungen nach der Lebenszeit gegliedert werden sollen, stellt sich die Frage was diese genau aussagt. Denn während die Lebenszeit eines einzelnen Sensorknotens direkt als die Zeit definiert werden kann, in der der Knoten seine Aufgabe im Netzwerk erfüllen kann, ist dies für ein ganzes Sensornetzwerk schwieriger. Denn der Ausfall eines Knotens bedeutet meist noch nicht den Ausfall des gesamten Netzes.

Tabelle 4: Anwendungsgebiete nach Lebenszeit [10]

Anwendung	Lebenszeit	Messfrequenz
Wetterüberwachung	Jahre	Sehr niedrig
Erdbebendetektion	Jahrzehnte	Niedrig-Mittel
Herzratenüberwachung	Tage	Mittel
Warenüberwachung	Monate	Niedrig
Vibrationsüberwachung	Monate	Hoch

Hierfür werden in [7] verschiedene Aspekte der Lebenszeit eines Sensornetzwerks identifiziert:

Üblicherweise wird die Lebenszeit ausgehend von der Anzahl noch aktiver Sensorknoten angegeben. Ein Sensornetzwerk ist dann funktionsfähig, wenn mehr als n Knoten lauffähig sind. Diese einfache Metrik ignoriert allerdings einige funktionale Aspekte.

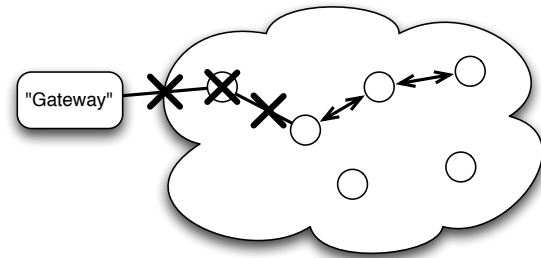


Abbildung 3: Ausfall eines zentralen Knotens

Alternativ kann die Lebenszeit auch über die Abdeckung des Einsatzgebiets oder die Erreichbarkeit des „Gateways“ durch die verbleibenden Sensorknoten angegeben werden. Bei diesen Definitionen wird bereits die Funktionalität des Sensornetzwerks mit einbezogen.

Insbesondere wird nicht jeder Ausfall gleich gewichtet: Fällt ein Knoten aus, der zuvor zentrale Routingaufgaben übernommen hatte, ist dies schwerwiegender als der Ausfall eines Randknotens. Abbildung 3 zeigt solch einen möglichen Extremfall. Da das gesamte Sensornetz nur über einen Knoten mit dem „Gateway“ kommunizieren konnte, führt der Ausfall dieses einen Knotens bereits dazu, dass das Sensornetz seine Aufgabe nicht mehr erfüllen kann.

Als gute Metrik wird schließlich die Angabe der Lebenszeit basierend auf den „Quality-of-Service“-Anforderungen genannt: Die Lebenszeit eines Netzwerks ist die Zeit, in der das Netzwerk durchgehend die Anforderungen der Anwendung erfüllt.

4. TOPOLOGIEN

Die Netzwerktopologie eines Sensornetzwerks gibt an, wie die Knoten untereinander kommunizieren.

4.1 Stern

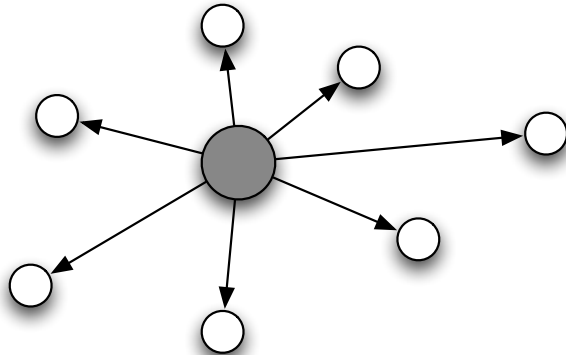


Abbildung 4: Sterntopologie

Die einfachste Topologie ist der Stern. Dabei läuft sämtliche Kommunikation über eine einzige Basisstation [2]. Nur diese kann mit den anderen Knoten kommunizieren, direkte Kommunikation zwischen anderen Knoten ist in einem sternförmigen Netzwerk nicht zulässig.

Durch diesen Aufbau ist die Kommunikation sehr einfach, da jeder Knoten von jedem Knoten mit maximal 2 Hops erreicht werden kann. Bei größeren Netzwerken ergeben sich allerdings einige Probleme. Insbesondere die Reichweite der Drahtloskommunikation limitiert die Einsatzmöglichkeiten. Dabei ist insbesondere der bereits in Abschnitt 2.3 angesprochene exponentielle Zusammenhang zwischen Sendedistanz und Energieverbrauch zu beachten.

Die Beschränkung auf eine einzige Basisstation stellt auch in Bezug auf die Zuverlässigkeit des Netzwerks eine Schwachstelle dar. Fällt diese aus ist im gesamten Netzwerk keine Kommunikation mehr möglich.

4.2 Baum

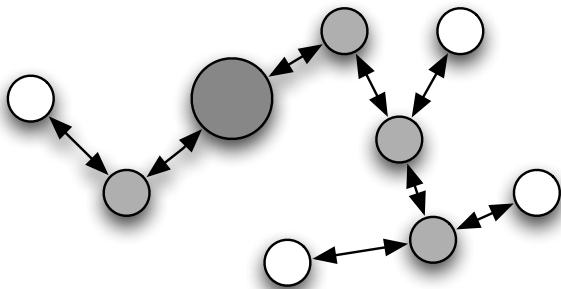


Abbildung 5: Baumtopologie

Eine Erweiterung der Sterntopologie ist die Baumstruktur. Durch zusätzliche Basisstationen kann ein solches Netz auch bei größerer räumlicher Ausdehnung arbeiten.

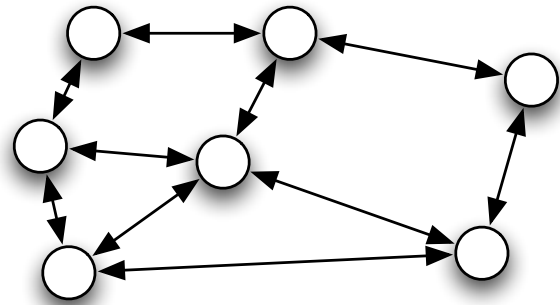


Abbildung 6: Meshtopologie

4.3 Mesh

Das Gegenteil zum zentralen Aufbau eines sternförmigen Netzwerks ist ein Mesh-Netzwerk. Innerhalb eines Meshes können Knoten mit allen anderen in Reichweite liegenden Knoten kommunizieren. Dazu nehmen alle Knoten auch eine Rolle als Router ein und leiten Nachrichten weiter. Durch diesen Aufbau sind Meshnetzwerke sehr störungsresistent. Falls ein Knoten ausfällt, können die Daten über einen anderen Pfad gesendet werden.

Durch die vielfältigen Routingmöglichkeiten wird die Kommunikation allerdings komplexer, was in höherer Latenz und vergrößertem Rechenaufwand resultiert.

4.4 Baum/Mesh-Hybride

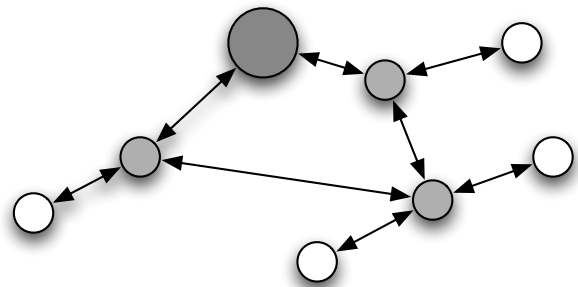


Abbildung 7: Hybride Topologie

Um die Vorteile der einzelnen Topologien zu kombinieren werden in der Praxis meist Hybridsysteme eingesetzt. Ein Beispiel hierfür ist in Abbildung 7 zu sehen. Durch die Kombination einer Baumtopologie mit Meshelementen können so insgesamt bessere Netzwerkeigenschaften erreicht werden.

4.5 Einfluss auf den Energieverbrauch

Je nach Topologie existieren in einem Sensornetzwerk verschiedene Knotentypen. Diese unterscheiden sich vor allem in ihren Kommunikationsaufgaben.

So gibt es in den Baum- und Sterntopologien Endknoten, die nur Daten aufzeichnen. Zentraler gelegene Sensorknoten dagegen übernehmen auch Routingfunktionen. Sie müssen also nicht nur ihre eigenen Messungen übermitteln, sondern auch die anderer Knoten empfangen und weiterleiten.

Daher kann sich der Energieverbrauch der Sensorknoten je nach Lage im Netzwerk unterscheiden. Dies ist ein wichtiger Punkt für das Protokolldesign.

So wäre es möglich, für mehr Redundanz bei diesen viel beanspruchten Knoten zu sorgen, so dass falls ein Routingknoten ausfällt Ersatz bereitsteht. Um dies umsetzen zu können muss aber die entsprechende Unterstützung z.B. für die Aktualisierung der Routinginformationen im Protokollstack vorhanden sein.

5. PROTOKOLLDISEIGN

5.1 Anforderungen

Aus der Betrachtung der verwendeten Hardware sowie den Anwendungsfällen ergeben sich einige konkrete Anforderungen an das Protokolldesign. In [12] werden diese sowie weitere Ziele und Herausforderungen vorgestellt. Die Wichtigsten sollen an dieser Stelle kurz zusammengefasst werden.

5.1.1 Hardware

Sensorknoten sollen möglichst billig sein und müssen mit einer begrenzten Energiemenge auskommen. Daher steht nur wenig Rechenleistung und Speicher zur Verfügung.

5.1.2 Transceiver

Sensornetze kommunizieren meist drahtlos. Beim Protokolldesign müssen daher die höheren Bitfehlerraten, Latenzzeiten und die schwankende Bandbreite berücksichtigt werden. Ebenso muss robust auf ganz ausgefallene Knoten reagiert werden können. Um den Energieverbrauch gering zu halten, sollten die Abstände zwischen direkt miteinander kommunizierenden Knoten minimiert werden.

5.1.3 Anwendungen

Die vielfältigen Anwendungen für Sensornetze stellen ebenso vielfältige Anforderungen an die verwendeten Protokolle. Diese Anforderungen an die Netzwerkqualität werden in den „Quality of Service“-Anforderungen der Anwendung festgehalten und müssen von dem Protokollstack eingehalten werden.

Über das „Gateway“ soll das Sensornetz mit anderen Netzwerken wie dem Internet integrierbar sein.

5.1.4 Netzwerkaufbau

Sensornetze bestehen aus einer großen Anzahl an Knoten, die mobil sein können und einfach austauschbar sein müssen. Dazu sollte sich das Netzwerk selbst organisieren können und sehr flexibel sein.

Das Netzwerk muss robust gegenüber Störungen sein. Dies beinhaltet Fehlertoleranz sowie Sicherheit gegenüber Angriffen. Da die drahtlose Kommunikation leicht mitschneidbar ist sollten wichtige Informationen verschlüsselt übertragen werden.

Des weiteren ist das richtige Timing für viele Sensorfunktionen kritisch. Daher sollte das Netzwerk einen Zeitsynchronisierungsmechanismus anbieten. Dieser wird beispielsweise für einige Sicherheitsmechanismen sowie zur exakten Zeitmessung von Ereignissen benötigt.

5.1.5 Unterschiede zu klassischen Ad-Hoc-Netzen

Einige dieser Anforderungen werden bereits von allgemeinen Protokollen für drahtlose Ad-Hoc-Netzwerke erfüllt. Es bestehen aber einige gravierende Unterschiede zwischen drahtlosen Sensornetzwerken und Ad-Hoc-Netzwerken [6].

Durch die geringeren Kosten können und werden in Sensornetzwerken deutlich mehr Knoten eingesetzt als in traditionellen Ad-Hoc-Netzwerken. Daher müssen die eingesetzten Techniken gut skalieren. Aus den Energieversorgungsproblemen ergibt sich, dass der Ausfall eines Sensorknotens keine Ausnahme ist und das Netzwerk entsprechend robust darauf reagieren muss. Nicht nur aufgrund von Ausfällen sondern auch durch Knotenmobilität oder manuelle Eingriffe kann sich auch die Topologie des Sensornetzwerks häufig ändern.

Letztendlich ist noch die Interaktionsweise zu beachten. Wie bereits in Abschnitt 3 vorgestellt ist die am häufigsten verwendete Kommunikationsform der Broadcast von Messdaten an das „Gateway“. Dies steht im Gegensatz zu der in traditionellen Rechnernetzwerken meist genutzten Punkt-zu-Punkt-Kommunikation.

5.2 Protokollstack

Um die besonderen Anforderungen drahtloser Sensornetze erfüllen zu können, wird der klassische am ISO/OSI Schichtenmodell orientierte Protokollstack in [6] erweitert. Wie in Abbildung 8 zu sehen sind für Sensornetze zusätzliche Ebenen relevant.

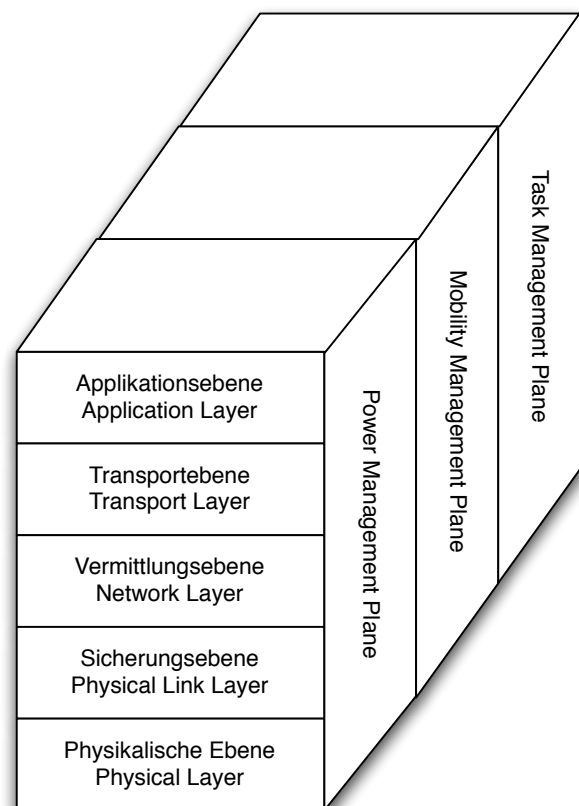


Abbildung 8: Protokollstack für Sensornetze [6]

Um die Energieknappheit zu berücksichtigen wird die „Power Management Plane“ eingeführt. Sie regelt den Energieverbrauch der Sensorknoten und hat zum Ziel, die Lebenszeit des Sensornetzes zu erhöhen. Dies kann beispielsweise geschehen indem Knoten mit wenig verbleibender Laufzeit ihre Routingfunktionalität einschränken und die restliche Energie nur noch für Messungen verwenden.

Die „Mobility Management Plane“ verfolgt die Bewegungen der Knoten und kann dadurch Energieverbrauch und Aufgabenverteilung besser steuern.

Die Verteilung von Aufgaben auf verfügbare Sensorknoten wird durch die „Task Management Plane“ geregelt. In Abbildung 9 ist ein Anwendungsfall hierfür dargestellt. In jedem der vier Sektoren des Einsatzgebiets soll eine Messung durchgeführt werden, es sind allerdings teilweise deutlich mehr als dafür nötige Sensorknoten verfügbar. Daher muss nun die Aufgabe auf die Sensorknoten aufgeteilt werden. Indem nicht benötigte Knoten temporär deaktiviert werden kann Energie gespart und so die Lebenszeit des Gesamtsystems erhöht werden.

Eine mögliche Aufteilung ist mit ausgefüllten Knoten für aktive und leeren Knoten für deaktivierte Knoten in Abbildung 9 zu sehen.

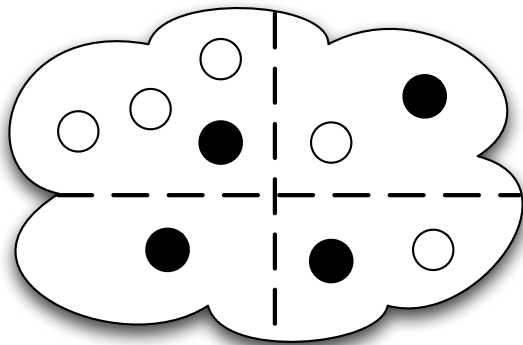


Abbildung 9: Energiesparen durch Abschalten von Knoten

Je nach dem Verhältnis von aktiven zu abgeschalteten Knoten ergeben sich daraus unterschiedliche Lebenszeiten für das Gesamtsystem. Es ist sogar denkbar, das Verhältnis dynamisch nach Bedarf anzupassen. Damit könnten dann genauere Messdaten zur Verfügung stehen wenn sie benötigt werden und in der übrigen Zeit Energie gespart werden.

Bereits an diesem einfachen Beispiel wird klar, dass ein gutes Protokoll viele Eigenschaften eines Sensornetzes beachten muss, um effizient zu arbeiten.

5.3 „Cross-Layer Design“

In Architekturen wie dem ISO/OSI Schichtenmodell wird das Netzwerkdesign in hierarchische Schichten aufgeteilt, die bestimmte Dienste anbieten. Direkte Kommunikation zwischen nicht direkt aneinanderliegenden Schichten ist nicht erlaubt [1].

In Bezug auf Sensornetze bezeichnet „Cross-Layer Design“ hauptsächlich das Aufweichen dieser strikten Schichtentrennung. Dazu werden Mechanismen eingeführt um über mehrere Schichten hinweg Informationen auszutauschen. Insbesondere bei drahtloser Kommunikation können so die vorhandenen Ressourcen besser genutzt werden.

Dies ist besonders für schichtübergreifende Optimierungen hilfreich, wie der in Abschnitt 2.5 vorgestellten.

6. ZUSAMMENFASSUNG

Abschließend lässt sich feststellen, dass eine Vielzahl von Abhängigkeiten zwischen der Anwendung, der verwendeten Hardware und dem Protokolldesign existiert. Zentral für die Planung des Sensornetzes ist dabei die Anwendung. Von dieser ausgehen kann erst die Hardware sowie die verwendeten Protokolle festgelegt werden.

Die Anwendung gibt auch vor, welche dieser Abhängigkeiten für einen konkreten Einsatz tatsächlich relevant sind. Je nach Einsatzzweck kann der Schwerpunkt auf verschiedenen Aspekten liegen.

In jedem Fall ist es essentiell, bei der Planung des Sensornetzwerk in seiner Gesamtheit zu betrachten. Nur so kann ein effizientes Protokoll und damit ein gut funktionierendes Sensornetzwerk entwickelt werden.

7. LITERATUR

- [1] V. Srivastava, M. Motani. Cross-layer design: a survey and the road ahead. *IEEE Communications Magazine*, 43(12):112 – 119, 2005.
- [2] Chris Townsend, Steven Arms. *Wireless Sensor Networks: Principles and Applications*, 2004.
- [3] Hao Zhou. Energieeffiziente, drahtlose Sensornetze - Auswirkung der Hardware auf das Protokolldesign, 2003.
- [4] Heinrich Meyr. *Minimizing the total energy consumption in wireless sensor networks*, 2011.
- [5] Ian Akyildiz Ismail, Ian F. Akyildiz, Ismail H. Kasimoglu. *Wireless Sensor and Actor Networks: Research Challenges*, 2004.
- [6] I.F. Akyildiz, Weilian Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci. A survey on sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, 40(8):102 – 114, 2002.
- [7] Isabel Dietrich, Falko Dressler. On the lifetime of wireless sensor networks. *ACM Trans. Sen. Netw.*, 5:5:1–5:39, 2009.
- [8] Luca Mottola, Gian Pietro Picco. Programming wireless sensor networks: Fundamental concepts and state of the art. *ACM Comput. Surv.*, 43:19:1–19:51, 2011.
- [9] M.A.M. Vieira, C.N. Coelho Jr., D.C. da Silva Jr., J.M. da Mata. Survey on wireless sensor network devices. In *Emerging Technologies and Factory Automation, 2003. Proceedings. ETFA '03. IEEE Conference*, pages 537 – 544 vol.1, 2003.
- [10] Mark Hempstead, Michael J. Lyons, David Brooks, Gu-Yeon Wei. Survey of Hardware Systems for Wireless Sensor Networks. *J. Low Power Electronics*, 4(1):11–20, 2008.
- [11] Sanjay Shakkottai, Peter C. Karlsson. Cross-Layer

Design for Wireless Networks. *IEEE Communications Magazine*, 41:74–80, 2003.

- [12] V. C. Gungor, G. P. Hancke. Industrial Wireless Sensor Networks: Challenges, Design Principles, and Technical Approaches. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56(10):4258–4265, 2009.