

---

# Einleitung

Die Nachfrage nach immer leistungsfähigeren Telekommunikationsnetzen erfährt in letzter Zeit eine starke Dämpfung. Während das GSM<sup>1</sup>-Mobilfunknetz ein großer kommerzieller Erfolg ist, verläuft die Markteinführung des UMTS<sup>2</sup>-Netzes der dritten Generation zögerlich. Das klassische Bestreben der Ingenieurwissenschaften nach **höherer** Datenrate, **schnellerer** Bewegung des Nutzers und **weiterer** Entfernung zur nächsten Basisstation erfährt eine Sättigung.

Im Gegensatz hierzu zeichnen sich Sensor- und Datenfunknetze, die im Folgenden vereinfachend Sensorfunknetze genannt werden, durch einfache Einzelkomponenten mit begrenzten Möglichkeiten aus. Sensorfunknetze bestehen aus einer großen Menge identischer Knoten, die in der Anschaffung günstig und in ihrer Größe stark begrenzt sind. Dadurch sind Ausfälle einzelner Knoten wirtschaftlich undramatisch und werden durch benachbarte Knoten ausgeglichen. So entsteht der Nutzen des Netzwerks nicht durch die Messung eines einzelnen Knotens, sondern mit der Fusion vieler Messungen innerhalb eines gesamten Netzwerks.

Sensorfunknetze werden zur verteilten Überwachung von physikalischen Messwerten und in der Automation eingesetzt. Bei diesen Anwendungen stehen Robustheit, Langlebigkeit und Wartungsarmut im Vordergrund. Auf höchste Datenraten und geringste Latenzen wird zu Gunsten eines effizienten Haushaltens mit Energie verzichtet.

Jeder Knoten innerhalb eines Sensorfunknetzwerks verfügt mindestens über die folgenden fünf Komponenten:

- einen oder mehrere *Sensoren* zum Sammeln von physikalischen Messwerten aus der lokalen Umgebung,
- eine *Funkschnittstelle* mit deren Hilfe die gesammelten Daten kommuniziert werden können,

---

<sup>1</sup>Global System for Mobile Communications

<sup>2</sup>Universal Mobile Telecommunications System

- einen *Mikroprozessor* zur Steuerung von Sensoren und Funkschnittstelle,
- eine *Energiequelle* zur autarken Versorgung des Knotens über einen langen Zeitraum sowie
- eine *Steuersoftware*, die den Zugriff auf Sensoren und Mobilfunkkanal ressourcenschonend organisiert.

Diese fünf Komponenten sind dabei auf einander abgestimmt: Ein Temperatursensor, der jede Minute einen Wert misst, benötigt beispielsweise nur eine Funkschnittstelle geringer Datenrate, einen einfachsten Mikroprozessor und sehr wenig Energie. Andererseits benötigt ein akustischer Sensor, der einen kontinuierlichen Audiostrom liefert, insbesondere in einem Mehrnutzerszenario eine leistungsfähige Funkschnittstelle und hat einen erhöhten Energiebedarf. Werden dann noch Sicherheitsaspekte zum Schutz der gesammelten Informationen notwendig, steigt auch der Anspruch an die Leistungsfähigkeit des Prozessors, der die Daten ver- und entschlüsseln muss. Dementsprechend variieren die Parameter von Sensorfunknetzen sehr stark [RM04].

Anwendungen für Sensorfunknetze sind so vielseitig wie die Menge unterschiedlicher Sensoren. Sie erfüllen Überwachungsaufgaben von Industrieprozessen [TBL07], Umgebungs- und Verkehrszuständen [Ann99, Ebn05, Wis07] bis hin zu Tiermigrationen [J<sup>+</sup>02]. Sie suchen Schadstoffe oder Waldbrände [YZY06]. Sie bieten telemedizinische Anwendungen [D<sup>+</sup>06] oder automatisieren Wohnhäuser [K<sup>+</sup>08]. Es existieren Sensorfunknetze mit mehr als 1000 Knoten [A<sup>+</sup>05]. In einigen Fällen kann auf eine fest installierte Infrastruktur zurückgegriffen werden, in vielen Fällen muss der Betrieb des Netzes jedoch durch die Knoten selbst organisiert werden.

In den meisten dieser Anwendungen ist Energie eine limitierte Ressource, die oft nicht regeneriert werden kann. Daher ist die Lebenszeit eines Sensorfunknetzes von der mittleren Leistungsaufnahme beziehungsweise dem mittleren Stromverbrauch abhängig. Dessen Minimierung stellt das dringlichste Ziel beim Entwurf und der Realisierung von Sensorfunknetzen dar.

Zuvorderst muss die Funkschnittstelle auf eine effiziente Nutzung der vorhandenen Energie ausgelegt werden. Die Energiemenge, die notwendig ist, um eine Informationseinheit zu übertragen, muss minimiert werden. Weiterhin zeichnen sich Sensorfunknetze im Allgemeinen durch geringe Aktivitätsraten aus. In der meisten Zeit werden alle Komponenten eines Knotens abgeschaltet – der Knoten ist inaktiv.

Die Zeitplanung, wann Knoten aktiv oder inaktiv sind, hängt zum einen vom Anwendungsfall ab. Zum anderen gehören zu einer Funkkommunikation immer ein Sender und ein Empfänger, die daher dergestalt aufeinander synchronisiert werden müssen, dass sich deren Aktivitätsphasen decken, um Wartezeiten zu vermeiden. Diese Aufgabe ist vom Medienzugriffsprotokoll zu regeln [Ras01], indem es Zeitpunkte für das Senden von Sensordaten festlegt und Zeitspannen zum Abhören des Mobilfunkkanals minimiert.

Viele Sensorfunknetze verwenden einfache Übertragungsverfahren begrenzter Datenrate nach dem WPAN<sup>3</sup>-Standard [IEE06]. Diese zeichnen sich aber durch einen niedrigen Stromverbrauch aus, sodass Knoten mit Akkumulatoren geringer Kapazität betrieben werden können, wie es beispielsweise in den Sensorknoten von Crossbow der Fall ist [Cro07]. Andere Netze verwenden breitbandige WLAN<sup>4</sup>-basierte Funkssysteme [IEE99]. Diese vereinen allerdings die Medienzugriffssteuerung und das Übertragungssystem in einer integrierten Schaltung, sodass sie nur sehr begrenzt auf die Bedürfnisse von Sensorfunknetzen angepasst werden können.

Diese Arbeit diskutiert die beiden genannten Übertragungstechniken und zeigt auf, dass auch Sensorfunknetze mit höherem Bandbreitebedarf energieeffizient gestaltet werden können. Zu diesem Zweck ist ein Demonstrationssystem für breitbandige Übertragungstechniken entstanden, dessen Leistungsaufnahme sowohl in Bezug auf die digitale Signalverarbeitung als auch auf die analogen Komponenten diskutiert wird.

Weiterhin wird ein Medienzugriffsverfahren für Sensorfunknetze entwickelt und quantitativ bewertet. Das Verfahren nutzt regelmäßig wiederkehrende Zeitpunkte für den Versand von Sensordaten, um für empfangende Knoten eine Vorhersagbarkeit zu ermöglichen. Es organisiert den Medienzugriff selbst und ist nicht auf eine zentrale Steuerung angewiesen. So wird die geforderte Synchronisierung von Aktivitätsphasen erreicht.

Diese Arbeit gliedert sich wie folgt:

- In Kapitel 2 werden der Mobilfunkkanal und die Übertragungstechniken eingeführt und die Energieeffizienz breitbandiger Systeme wird diskutiert.

---

<sup>3</sup>Wireless Personal Area Network

<sup>4</sup>Wireless Local Area Network

- In Kapitel 3 werden die Übertragungstechniken ausführlich modelliert, um als Grundlage für den Vergleich verschiedener Medienzugriffsprotokolle zu dienen. Diese Protokolle werden dann anhand ihres Stromverbrauchs verglichen. Dabei kommen drei typische Szenarien für Sensorfunknetze zur Anwendung.
- In Kapitel 4 wird das Hardware Demonstrationssystem beschrieben, um Implementierungsaspekte für die energieeffiziente Realisierung einer breitbandigen Übertragungstechnik aufzuzeigen. Weiterhin wird ein System on Chip entworfen, um das Übertragungssystem mit einem Mikroprozessor für die Medienzugriffssteuerung in einen programmierbaren Logikbaustein zu integrieren.

Diese Arbeit liegt in deutscher Sprache vor. Nichts desto trotz ist die Wissenschaftswelt von der englischen Sprache dominiert. Daher wird häufig auf englischsprachige Literatur verwiesen. Weiterhin sind viele Fachbegriffe fast nur noch in ihrer englischen Version geläufig. Deshalb werden im Folgenden alle Fachbegriffe durch Fußnoten auch mit dem englischen Pendant gekennzeichnet.