



HWI HAMBURG
HOCHSCHULÜBERGREIFENDER STUDIENGANG
WIRTSCHAFTSINGENIEURWESEN HAMBURG

Masterarbeit

Optimization of on-demand line-based bus services

vorglegt von

Alexander Klaus

Matrikelnummer 7169020

Bereich:

- 1. Gutachter: Prof. Dr. Knut Haase
 - 2. Gutachter: Prof. Dr. Malte Fliedner
- vorgelegt am: 27. August 2025

AM LEHRANGEBOT BETEILIGTE HOCHSCHULEN:
Universität Hamburg
Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Helmut Schmidt Universität - Universität der Bundeswehr Hamburg

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	iii
Tabellenverzeichnis	iv
Abkürzungsverzeichnis	v
1 Einleitung	1
1.1 Einordnung drahtloser Sensornetzwerke	1
1.2 Grundbegriffe	2
1.3 Ursprung von drahtlosen Sensornetzwerken	4
1.4 Anwendungsfälle und abgeleitete Eigenschaften	6
1.4.1 Beispielanwendungen	6
1.4.2 Entwurfseigenschaften	6
1.5 Aufgaben	8
Literatur	-9
A Beispielanhang	A-1
B Zweiter Beispielanhang	B-1

Abbildungsverzeichnis

1.1 Grundstruktur eines drahtlosen Sensornetzwerkes.	2
1.2 Multihopp-Prinzip der Reichweitenverlängerung.	3
1.3 Beispiel für die Verwendung unterschiedlicher Kommunikationsprotokolle in einem heterogenen Netzwerk mit drahtlosen Sensorknoten.	4
1.4 ISO-OSI-7-Schichten-Kommunikationsarchitektur.	5
1.5 Ergebnisse des Ultra-Low-Power-Benchmarks von EEBMC, Quelle: http://www.eembc.org/ulpbench/index.php vom 16.10.2017	6

Tabellenverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis

DSN drahtloses Sensornetzwerk

WSN wireless sensor network

IoT internet-of-things

IP internet protocol

CPS cyber-physical system

WAN Wide Area Network

WPAN Wireless Personal Area Network

1 Einleitung

1.1 Einordnung drahtloser Sensornetzwerke

drahtloses Sensornetzwerk (DSN), englisch wireless sensor network (WSN) genannt, entstehen durch den Trend des internet-of-things (IoT), in dem zumindest theoretisch alle Dinge miteinander vernetzt kommunizieren können und somit eine hochdynamisch optimierbare Welt entsteht. Der Ursprung dieser Idee lässt sich bis in die 1990er-Jahre zurück nachvollziehen, in denen Kahn (Kahn, Katz und Pister 1999) von *smart dust* sprach und somit über einen Begriff das Bild unzähliger kleiner, einfacher, billiger Systemelemente prägte. Diese sollen dann über eine einfache, ursprünglich noch internet protocol (IP)-basierte Kommunikation miteinander Daten austauschen und eine vernetzte Welt bilden. Das Gegenstück, das die Rechenleistung der vernetzten Welt bereitstellt, bilden dann die Cloud-Systeme mit prinzipiell unbeschränkter Rechenleistung und Kommunikationskapazität.

Gemeinsam bilden diese beiden Systeme das IoT, das nach International Organization for Standardization (1997) als

Internet of Things (IoT): An infrastructure of interconnected objects, people, systems and information resources together with intelligent services to allow them to process information of the physical and the virtual world and react.

definiert ist. Die DSN bilden darin die Anbindung an die reale Welt, liefern als Sensoren Daten oder als aktivieren als Aktoren andere Systeme. Aus dieser Sichtweise werden sie auch als cyber-physical system (CPS) bezeichnet und nach Lee (Lee 2008) folgendermaßen definiert

Cyberphysical System (CPS): Cyber-Physical Systems (CPS) are integrations of computation with physical processes. Embedded computers and networks monitor and control the physical processes, usually with feedback loops where physical processes affect computations and vice versa.

Dabei ist zu berücksichtigen, dass das Gebiet der DSN alle Facetten von Entwurf und Implementierung des Systems abbildet. Ohne Anspruch auf Vollständigkeit der Aufzählung gehören dazu individuelle Aspekte wie Controller, Sensoren, Baugröße und -form aber auch Systemkomponenten wie Übertragungsprotokolle und Kommunikationstopologien oder theoretische Entwurfsparameter, die durch Sicherheits- und Energiebedarfsbetrachtungen geprägt sind. Letztlich nehmen auch Anwendungsaspekte wie ober- oder unterirdischer Einsatzbereich, Ortungsanwendungen oder auch dauerhafter Stand-alone-Betrieb wesentlichen Einfluss auf die Systemauslegung. Damit erfordert der Entwurf drahtloser Sensornetze ein weites Überblickswissen über große Bereiche der Elektrotechnik und der Technischen Informatik sowie über Grundlagen der Physik, der Technischen Mechanik sowie weiterer Ingenieurwissenschaften.

Im Rahmen dieser Vorlesung wird ein solides Grundwissen in diesen Disziplinen durch eine breite Ingenieurausbildung vorausgesetzt, so dass hier wesentliche Bereiche vertieft werden können. Dabei ist der Begriff *vertieft* auch nur als ein punktuell erweiterter Überblick zu verstehen.

Die Vorlesungseinheiten beginnen daher mit exemplarischen Anwendungen und leiten daraus spezifische Komponenten und deren besondere Anforderungen an die Funktionsweise ab. Es ergeben sich so

spezielle Aspekte zu Kommunikationsverfahren, Netzwerktopologien sowie der Sicherheit. Als besonderer Anwendungsfall werden dann noch die Lokalisierung sowie das Tracking thematisiert, bevor die Vorlesung mit einem Überblick über bestehende Standards auf diesem Gebiet abgeschlossen wird.

Zum Ende der Vorlesung sollten die Studierenden in der Lage sein,

- ein drahtloses Sensornetz anforderungsgerecht auszulegen,
- erforderliche Komponenten und Kommunikationsverfahren zu identifizieren und
- sinnvolle Topologien festzulegen,
- die den Sicherheitsanforderung und
- dem Energiebudget entsprechen.

Als spezieller Anwendungsfall sollen Ortungsverfahren konkret angewendet und umgesetzt werden können.

1.2 Grundbegriffe

Drahtlose Sensornetze bestehen in der Regel nicht aus Einzelkomponenten, sondern bilden ein dem Anwendungsfall entsprechend komplexes Netzwerk. Die einzelnen Endgeräte werden dabei *Knoten* (engl.) genannt und bauen eine drahtlose Verbindung zu einer - wie auch immer gearteten - Infrastruktur auf (s. Abb. 1.1).

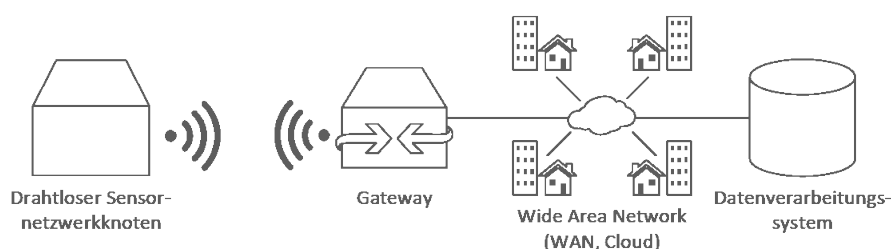


Abbildung 1.1: Grundstruktur eines drahtlosen Sensornetzwerkes.

Aufgrund der üblicherweise stark eingeschränkten Kommunikationsmöglichkeiten eines solchen DSN können diese in der Regel nicht auf ein weitreichendes Übertragungsnetzwerk (Wide Area Network (WAN)) mit hohen Bandbreiten zugreifen, sondern benötigen Gateways, die mehrere Netzwerkprotokolle beherrschen und zwischen ihnen übersetzen können. Als Einsatzgebiet wird grob unterschieden zwischen

Einzelüberwachung , bei der singuläre Eigenschaften eines Systems wie die Temperatur eines Nahrungsmittels oder die mechanische Spannung einer Brücke aufgenommen wird. Hier liegen eher stationäre Werte vor, die an definierten Stellen entnommen werden und untereinander zu keinen wesentlichen Abweichungen führen. Möglicherweise können mit Hilfe von Modellen sogar eine Plausibilitätsüberprüfung oder eine Redundanzkontrolle vorgenommen werden.

Bereichsüberwachung , bei der ein unspezifisches Ereignis bzw. ein definiertes Ereignis an einer beliebigen Stelle in einem größeren Bereich aufgenommen werden soll. Hier besteht die Herausforderung darin, die drahtlosen Sensoren so zu verteilen, dass sie in der Lage sind, das Ereignis zu detektieren. Darüber hinaus ist die Anzahl der erforderlichen Sensoren so gering wie möglich zu

halten. Trotzdem kann das System zunächst als statisch angesehen werden, und eine Verletzung dieses statischen Zustandes entspräche dann dem zu detektierenden Ereignis.

Bereichsüberwachung mit Einzeldetektion, bei der beispielsweise ein Bereich auf das Bewegungsverhalten eines Tieres hin überwacht werden soll. Ein solches System stellt die größten Anforderungen an ein Sensornetzwerk, da es hochdynamisch reagieren muss: Sowohl der Bereich, der Detektionspunkt als auch das Objekt sind zunächst unbekannt und müssen aus der Vielzahl der Möglichkeiten erst identifiziert werden, bevor diese dann klassifiziert und analysiert werden können.

Aus diesen generalisierten Einsatzfällen werden unterschiedliche die besonderen Eigenschaften und Anwendungstypen deutlich: Sensornetze sind nicht nur *vernetzte Sensoren* im wörtlichen Sinne, sondern erfüllen ihren Einsatzzweck sogar nur als Netzwerk. Die Sensoren überwachen ihre Umgebung, gleichen gegebenenfalls Informationen mit benachbarten Sensoren ab und bilden redundante Cluster. Zudem werden benachbarte Sensoren auch zur Reichweitenverlängerung der eigenen Kommunikationsdistanz genutzt, indem diese empfangene Nachrichten wiederholen und somit weiterverbreiten. Eine solche Kommunikation wird auch als *Multihopp* bezeichnet (s. Abb. 1.2).

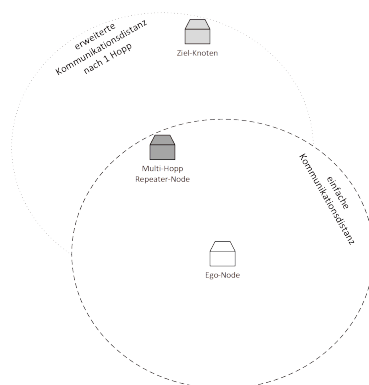


Abbildung 1.2: Multihopp-Prinzip der Reichweitenverlängerung.

Somit verfügt ein drahtloser Sensorknoten über eine vergleichbar große Aufgabenvielfalt im Vergleich zu den geringen Rechenfähigkeiten und dem stark limitierten Energiebudget.

Entsprechend den Anforderungen des Energiebudgets werden auch spezielle Funkprotokolle zur Kommunikation eingesetzt, die in ihren Eigenschaften den Anwendungsanforderungen angepasst sind: Lange Distanzen werden mit geringer Datenrate beispielsweise über LoRa oder Sigfox überbrückt (Linklabs 2016), während komfortable, hochratige Verbindungen eher durch Mesh-Netzwerke (Methley 2009) über sehr kurze Distanzen aufgebaut werden. Industrielle Netzwerke greifen eher auf den IEEE 802.15.4-Standard zurück, während Consumer-Elektronik vorzugsweise Bluetooth verwendet. Wenn wiederum auf den TCP/IP-Protokoll zurückgegriffen werden soll, um eine Internet-Verbindung aufzubauen, kommen in der Regel stationäre Gateways oder Bridges zum Einsatz, die dann über eine umfangreiche Energieversorgung und leistungsfähige Rechner verfügen. Ein Beispiel für ein solches heterogenes Netzwerk ist in Abb. 1.3 dargestellt.

Als Entwurfsbasis für drahtlose Sensornetzwerke sei also festgehalten, dass diese üblicherweise sehr speziell auf ihre technische Aufgabe ausgelegt werden, um

- den Energiebedarf zu minimieren bzw. die Betriebsdauer zu maximieren,
- mechanischen Bauraum zu reduzieren,

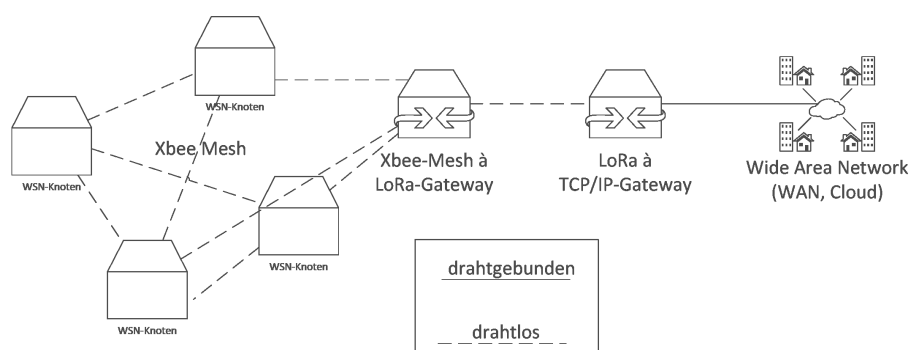


Abbildung 1.3: Beispiel für die Verwendung unterschiedlicher Kommunikationsprotokolle in einem heterogenen Netzwerk mit drahtlosen Sensorknoten.

- Stückkosten zu senken.

In Abhängigkeit vom Einsatzzweck kann es sogar im Vordergrund stehen, Betriebs- und Ausfallsicherheit durch Redundanz im Netzwerk anstelle einer Überdimensionierung von Einzelkomponenten zu erreichen.

1.3 Ursprung von drahtlosen Sensornetzwerken

Ein Großteil der amerikanischen Literatur (Dargie und Poellabauer 2010, S. 8) oder (Obaidat und Misra 2014, S. 2) benennt militärische Applikationen als Ursprung oder Treiber von drahtlosen Sensornetzwerken. Auch wenn dies möglicherweise einen wahren Kern bilden könnte, so wäre die Sicht zu eingeschränkt, da es sich bei drahtlosen Sensornetzwerken um einen Systemverbund von Komponenten handelt, die evolutionär zu einem Sensornetz zusammengewachsen sind.

Es wäre etwas weit zurückgegriffen, wenn der Ursprung von DSN auf die Funkversuche von Nikola Tesla 1893 zurückgeführt würden. Hier wäre fraglich, ob es die Intention von Tesla war, beliebige Knoten oder Systemkomponenten miteinander drahtlos kommunizieren zu lassen. Stattdessen wird in der drahtlosen Kommunikation eher die Entwicklung der internetgebundenen Daten herangezogen. Ursprünglich von der Firma Xerox (1973) mit 2,9 Mbit entwickelt entstanden dann daraus die Standards IEEE 802.3 für die drahtgebundene und IEEE 802.11 für die drahtlose Internetkommunikation sowie IEEE 802.15.1 für Bluetooth sowie IEEE 802.15.4 für das Wireless Personal Area Network (WPAN). Insbesondere das letzte Protokoll ist insbesondere für sehr stabile und energiearme Netze entwickelt worden.

In späteren Kapiteln wird noch intensiver auf die Kommunikation eingegangen. Für das bessere Verständnis ist es aber an dieser Stelle schon sinnvoll kurz das ISO/OSI-7-Schichten Kommunikationsmodell zu erläutern (s. Abb. 1.4): In diesem Modell, das als Referenzmodell für jedes Kommunikationssystem bei ISO oder ITU/T herangezogen wird, sind alle Prozessschritte von der Signalübertragung über ein physikalisches Kommunikationsmedium bis hin zur Datenverwendung in der Nutzeranwendung spezifiziert. Idealweise sollte ein Entwickler beim Senden und Empfangen von Daten nur von einer problemindividuell definierten Schicht in Richtung Applikationsschicht entwickeln müssen. Alle darunterliegenden Schichten sollten idealerweise transparent, also für den Entwickler *unsichtbar* bzw. nicht von Relevanz sein.

Die oben erwähnten Funkstandards bedienen üblicherweise nur die Schichten 1 bis 2 oder 3, in denen Signale physikalisch generiert, Bits und Bytes zusammengesetzt, ggf. noch ver- oder entschlüsselt oder

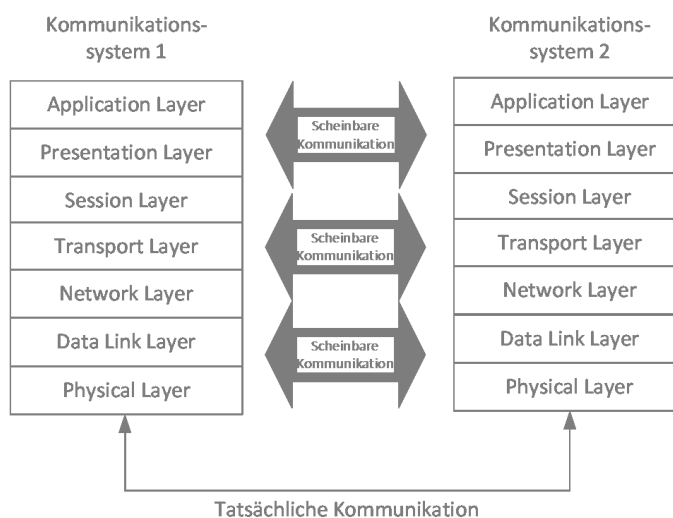


Abbildung 1.4: ISO-OSI-7-Schichten-Kommunikationsarchitektur.

mit anderen Sicherungsmaßnahmen versehen werden. Hier wird auch von *unteren Protokollschichten* gesprochen.

In den *mittleren Schichten*, also den Schichten 3 bis 5 hingegen werden die Daten zu sinnvollen Worten und Datenpaketen zusammengesetzt, um sie dann anwendungsspezifisch z. B. als Internetseite oder als Email aufbereiten zu können.

Die *oberen Schichten* hingegen dienen der anwendungsspezifischen Aufbereitung der Daten.

Ein solches Protokoll in den unteren Schichten für drahtlose Computerkommunikation wurde 1970 von der Universität Hawaii als Aloha-Protokoll veröffentlicht (Norman Abramson 1970; Schwartz und N. Abramson 2009). Es handelt sich dabei im Wesentlichen um ein Verfahren zur Kollisionserkennung und Vermeidung bei gleichzeitig sendenden Knoten.

Somit wird die Geburtszeit der drahtlosen Netzwerke auf Anfang der 1970er Jahre datiert. Bevor daraus Sensornetzwerke wurden, waren noch weitere Entwicklungen in der Kommunikationstechnologie sowie in der Größe, der Leistungsfähigkeit und dem Energiebedarf der Controllersysteme erforderlich. Anfang der 2000er-Jahre war eine erste Hype-Phase der Forschung an drahtlosen Sensornetzwerken, in der sich berühmte Forschungsinstitutionen wie die University of California an den Standorten Berkeley und Los Angeles oder das MIT, die sich mit der Entwicklung von der Hardware drahtloser Sensornetze beschäftigt haben. Stichworte über Forschungsergebnisse sind hier *Wireless Integrated Network Sensors (WINS)*, einem ersten sogenannten *CPS*, also einer Einheit, die Daten aufnehmen, verarbeiten und weitergeben kann. Alle diese Einheiten wurden in dem WINS-Projekt auf einem einzigen Chip zusammengefasst.

In Berkeley hingegen wurde das Konzept der Hochintegration auf Komponentenbasis verfolgt. Hier wurde beispielsweise der Begriff *smart dust* (Kahn, Katz und Pister 1999) als Vorläufer des Internet-of-Things geprägt. Die sehr kleinen Sensoren wurden auch *motest*¹ genannt.

Moderne Knoten drahtloser Sensornetzwerke sind hochintegrierte Rechen- und Kommunikationssysteme auf einem einzelnen Chip. Bei einem Spannungspegel herunter von bis zu 1,8 V einen Energiebedarf von $50 \mu\text{W MHz}^{-1}$ aufweisen bzw. mit 1 mW kommunizieren.

¹<https://computer.howstuffworks.com/mote4.htm>

Das Industriekonsortium EEMBC führt unterschiedlichste Benchmarks durch. Einer dieser Benchmarks ist ein Ultra-Low-Power-Benchmark², siehe Abbildung 1.5. Der pp-Benchmark stellt dabei ein Maß für den Kehrwert die Durchschnittsleistung dar.

Genauer: $\frac{1000}{\text{Median der mittleren Sekundenleistung über 10 Benchmarkzyklen}}$. In dem abgebildeten Benchmark führen die energieeffizientesten Controller die Benchmarkaufgaben folglich bei ca. 10...20 μW durch.

Hier ist anzumerken, dass dieser Benchmark nicht unumstritten ist, da alle Hersteller gemeinschaftlich festlegen, welche Rechenaufgaben zur Ermittlung des Benchmarkwertes durchgeführt werden. Folglich ist es fraglich, ob dieser Benchmark sehr repräsentativ für einen echten Betrieb ist.

Clear	Device	CP (3.0v)	CP (x.yv)	PP (3.0v)	PP (x.yv)
<input type="checkbox"/>	Amiq Micro APOLLO512-KBR Rev.A3	✓	377.50		
<input type="checkbox"/>	Amiq Micro APOLLO512-KBR Rev.A4		353.00	490.00 (2.20v)	29.40
<input type="checkbox"/>	Amiq Micro APOLLO512-KBR Rev.A4 + 32KB SRAM retention		302.00	384.00 (2.20v)	28.20
<input type="checkbox"/>	STMicroelectronics STM32L433RC-P		264.00	298.00 (2.20v)	107.00
<input type="checkbox"/>	Amiq Micro APOLLO512-KBR Rev.A4 + 64KB SRAM retention		261.00	349.00 (2.20v)	27.90
<input type="checkbox"/>	STMicroelectronics STM32L452RE-P		256.00	298.00 (2.20v)	98.00
<input type="checkbox"/>	STMicroelectronics STM32L433	✓	253.20		
<input type="checkbox"/>	Analog Devices ADuCM302x Rev1.0		246.00	274.00 (1.80v)	
<input type="checkbox"/>	Analog Devices ADuCM302x Rev1.0	✓	245.50		
<input type="checkbox"/>	STMicroelectronics STM32L452	✓	245.10		
<input type="checkbox"/>	STMicroelectronics STM32L476ZG-P		227.00	257.00 (2.20v)	81.10
<input type="checkbox"/>	STMicroelectronics STM32L496 Rev.2	✓	216.90		
<input type="checkbox"/>	STMicroelectronics STM32L433 Rev.1		204.90		
<input type="checkbox"/>	Analog Devices, Inc. ADuCM4050 Rev.0.0	✓	203.00		
<input type="checkbox"/>	Texas Instruments MSP432P401R Rev. C	✓	192.30		
<input type="checkbox"/>	STMicroelectronics STM32L476RG		187.70		
<input type="checkbox"/>	Microchip SAML21J18A-UES Rev.A-DC1506	✓	185.80		
<input type="checkbox"/>	Texas Instruments MSP432P401R Rev. C		180.00	232.00 (1.90v)	
<input type="checkbox"/>	STMicroelectronics STM32L433 Rev.1	✓	176.70		
<input type="checkbox"/>	STMicroelectronics STM32L452		176.00	335.00 (1.80v)	64.60
					113.00 (1.80v)

Abbildung 1.5: Ergebnisse des Ultra-Low-Power-Benchmarks von EEMBC, Quelle: <http://www.eembc.org/ulpbench/index.php> vom 16.10.2017

1.4 Anwendungsfälle und abgeleitete Eigenschaften

1.4.1 Beispielanwendungen

Die Anwendungsfälle von drahtlosen Sensornetzwerken sind zahllos und lassen sich kaum klassifizieren. Daher werden im folgenden eher große Anwendungsbereiche mit spezifischen Besonderheiten exemplarisch genannt, um daran später Anforderungsbereiche für Sensornetze festzumachen.

1.4.2 Entwurfseigenschaften

Aus den Anwendungsfällen oben wird ersichtlich, dass ein Sensorknoten üblicherweise lassen sich folgende Entwurfseigenschaften ableiten:

Aufgabenbezogenheit Ein Sensornetz üblicherweise minimalistisch ausgelegt, orientiert sich daher hinsichtlich Prozessorleistung, Speicherkapazität, Batteriekapazität, Nachladeverfahren (= energy harvesting) eng an den Anforderungen. Beispielsweise benötigt ein FRAM zur dauerhaften Speicherung von Daten mehr Energie als ein konventioneller RAM-Baustein. Dies kann allerdings ein lohnenswerter Energieeinsatz sein, wenn der Sensorknoten über lange Pausenzeiten verfügt oder die Versorgungsenergie spontan ausfallen könnte. Der Energiebedarf kann unter anderem durch folgende Maßnahmen gesenkt werden:

²<http://www.eembc.org/ulpbench/index.php>

- intelligenter Wechsel aus Schlaf- und Arbeitsphasen der einzelnen Netzknoten (engl. duty cycle),
- kurze Übertragungszeiten und -strecken. Während die Übertragungszeit nur linear in den Energiebedarf eingeht, muss die Übertragungsdistanz quadratisch berücksichtigt werden. Dies ist darin begründet, dass sich die Funkwelle bei einem ungerichteten Strahler in rotatorischer Form ausbreitet - z. B. einer Kugel -, deren Oberfläche quadratisch mit dem Radius zunimmt.
- effiziente, optimierte Netzwerkprotokolle mit geringem Datenoverhead, Vermeidung von Kommunikationskollisionen und optimalen Übertragungswegen und
- effiziente Programmierverfahren, kleine Betriebssysteme, geringe Prozessorgeschwindigkeit.

Netzwerkorientierung Das Sensornetz erfüllt seine Aufgabe im Netzwerk und nutzt daher aktiv die Netzwerkeigenschaften. Hierzu gehören neben der Möglichkeit einer vermaschten Kommunikation (mesh-network) auch Ortung und Tracking durch Netzwerkeigenschaften, spezialisierte Aufgaben einzelner Netzknoten, extensive Schlafintervalle einzelner Teilnehmer bei voller Funktion des gesamten Netzwerkes durch Redundanz. Daher ist die Netzwerktopologie ein Kernentwurfskriterium.

konstruktive Anforderungen der Einsatzumgebung Sensornetze erfordern aufgrund ihrer Entwurfsminimalität ein Zusammenspiel aller Komponenten aus Software, Hardware und Konstruktion (engl.: *mechanical design*). So könnte beispielsweise ein Sensor zur Messung eines Flüssigkeitsfüllstandes davon technisch profitieren, dass die Flüssigkeit erst durch einen Trichter in einen kleinen Vorratsbehälter läuft und somit Schwingungen und Vibrationen kompensiert werden. Dies erspart dann Soft- und Hardwareverfahren zur Filterung der Messwerte.

(Vor-)Verarbeitungsanforderungen Jegliche Verarbeitungsverfahren der Daten sollten sich auf ein Minimum reduzieren, da jeder Rechengang Energie benötigt. Zudem ist auch zu bedenken, dass Niedrigenergiecontroller nur über minimale Prozessorhardware beispielsweise sogar ohne Fließkommaeinheit verfügt.

operative Autarkie Sensoren in einem drahtlosen Sensornetz müssen nicht nur energetisch, sondern auch operativ autark agieren. Dies bedeutet, dass wesentliche Systemfunktionen unabhängig von der exakten räumlichen Anordnung zueinander bzw. unabhängig von einer möglichen Mobilität der Sensoren eingerichtet und ausgeführt werden können müssen. Hierzu zählen beispielsweise der Aufbau und der Betrieb des Netzwerkes selbst, (Netzwerk-) Routingverfahren unter Einbeziehung der Sensornachbarschaft, Anpassung der Betriebsparameter an die Umgebung ohne manuelle Interaktion.

Zugriffs- und Betriebssicherheit Die Begriffe werden im Englischen besser durch *security* als Zugriffssicherheit und *safety* als Betriebssicherheit unterschieden. Beide Eigenschaften sind wichtig, um eine zuverlässige Datenübertragung sicherzustellen. Allerdings bedürfen sie ob algorithmischer, verschlüsselnder oder kryptographischer Verfahren, die die Rechenbelastung und somit den Energiebedarf des Sensorknotens stark erhöhen. Daher sind die drahtlosene Sensorknoten oft deutlich weniger leistungsfähig und weitaus anfälliger gegenüber Sicherheitsangriffen.

Über die übliche Grobklassifikation von Sensornetzwerken in der Literatur nach Netzwerkorganisation und Knotenstruktur hinaus lassen sich zahlreiche detailliertere Parameter zur Unterscheidung und Bewertung von Sensornetzen definieren:

- räumliche Auflösung (spatial resolution),

- Übertragungsverzögerung von Nachrichten, auch *Latenzzeit* genannt,
- räumliche Abdeckung (coverage) C als Verhältnis der Gesamtüberwachungsfläche A_{ges} und der durch Sensoren sensierten Fläche A_{sens} mit

$$C = \frac{A_{sens}}{A_{ges}}, \quad (1.1)$$

- Art der Systemsteuerung (control) wie zentral, verteilt oder chaotisch,
- zeitliche Auflösung,
- Betriebsdauern - im englischen besser differenziert als *lifetime*, also die absolute gesamte Lebensdauer, und *operating time*, also die Betriebsdauer,
- erforderliche Bandbreite zur Datenübertragung beispielsweise in bit s^{-1} oder Mbit s^{-1} .

1.5 Aufgaben

1. Informieren Sie sich über das Aloha-Protokoll und studieren Sie Varianten davon, z. B. *unsynchronisiertes* (= *pure*) Aloha und *synchronisiertes* (= *slotted*) Aloha. (Roberts 1975)
2. Charakterisieren Sie für drahtlose Sensorknoten die technischen Entwurfsmerkmale Skalierbarkeit, Energiebedarf, Verteilung/Topologie/Abdeckung, Kommunikation und Sicherheit kurz jeweils in ein bis zwei Sätzen.
3. Überlegen Sie sich eine Messaufgabe, bei der Sie drahtlose Sensornetzwerke einsetzen würden. Versuchen Sie insbesondere, eine Anwendung zu finden, bei der gerade der Charakter des "verteilten Netzwerkes", also der kleinteiligen, redundanten Messung genutzt wird.
4. Wie unterscheiden sich Xbee, Zigbee und das IEEE 802.15.4-Protokoll?
5. Wofür wird der IEEE 1451-Standard eingesetzt?
6. Stellen Sie von den Firmen Texas Instruments und ST Microelectronics die Prozessoren der Serien MSP 432 (TI) und STM32 L und F gegenüber tabellarisch hinsichtlich ihrer On-Chip-Hardware und ihrer Energiebedarfe gegenüber.
7. Welche Methoden kennen Sie, um den Energiebedarf von drahtlosen Sensorknoten zu reduzieren?
8. Beschreiben Sie Unterschiede in Single-Hopp- und Multi-Hopp-Kommunikationsverfahren hinsichtlich Energiebedarf, Datendurchsatz, Zuverlässigkeit, Sicherheit und Kommunikationsverzögerungen.

Literatur

- Abramson, Norman (1970). „THE ALOHA SYSTEM - another alternative for computer communications“. In: *Proceedings of the November 17-19, 1970, fall joint computer conference*. ACM, S. 281–285. URL: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1478502> (besucht am 16.10.2017).
- Dargie, Waltenegus und Christian Poellabauer (2010). *Fundamentals of Wireless Sensor Networks: Theory and Practice*. Wiley series on wireless communications and mobile computing. Chichester, West Sussex, U.K. ; Hoboken, NJ: Wiley. 311 S.
- International Organization for Standardization (1997). *Information Technology - Internet of Things - Definition and Vocabulary*. ISO/IEC WD 20924. Genf/CH: The Organization.
- Kahn, Joseph M., Randy H. Katz und Kristofer SJ Pister (1999). „Next Century Challenges: Mobile Networking for Smart Dust“. In: *Proceedings of the 5th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking*. ACM, S. 271–278. URL: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=313558> (besucht am 22.05.2016).
- Lee, Edward A. (2008). „Cyber Physical Systems: Design Challenges“. In: *Object Oriented Real-Time Distributed Computing (Isorc), 2008 11th Ieee International Symposium On*. IEEE, S. 363–369. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4519604/> (besucht am 10.10.2017).
- Linklabs (1. Aug. 2016). *A COMPREHENSIVE LOOK AT Low Power, Wide Area Networks*.
- Methley, Steve (2009). *Essentials of Wireless Mesh Networking*. Cambridge: Cambridge University Press. URL: <http://ebooks.cambridge.org/ref/id/CB09780511581021> (besucht am 18.09.2016).
- Obaidat, Mohammad S. und Sudip Misra (2014). *Principles of Wireless Sensor Networks*. Cambridge, United Kingdom ; New York: Cambridge University Press. 415 S.
- Roberts, Lawrence G. (1975). „ALOHA Packet System with and without Slots and Capture“. In: *ACM SIGCOMM Computer Communication Review* 5.2, S. 28–42.
- Schwartz, M. und N. Abramson (2009). „The Alohanet-Surfing for Wireless Data [History of Communications]“. In: *IEEE Communications Magazine* 47.12.

A Beispielanhang

Dies hier ist ein Blindtext zum Testen von Textausgaben. Wer diesen Text liest, ist selbst schuld. Der Text gibt lediglich den Grauwert der Schrift an. Ist das wirklich so? Ist es gleichgültig, ob ich schreibe: „Dies ist ein Blindtext“ oder „Huardest gefburn“? Kjift – mitnichten! Ein Blindtext bietet mir wichtige Informationen. An ihm messe ich die Lesbarkeit einer Schrift, ihre Anmutung, wie harmonisch die Figuren zueinander stehen und prüfe, wie breit oder schmal sie läuft. Ein Blindtext sollte möglichst viele verschiedene Buchstaben enthalten und in der Originalsprache gesetzt sein. Er muss keinen Sinn ergeben, sollte aber lesbar sein. Fremdsprachige Texte wie „Lorem ipsum“ dienen nicht dem eigentlichen Zweck, da sie eine falsche Anmutung vermitteln.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} x_i = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$$

Dies hier ist ein Blindtext zum Testen von Textausgaben. Wer diesen Text liest, ist selbst schuld. Der Text gibt lediglich den Grauwert der Schrift an. Ist das wirklich so? Ist es gleichgültig, ob ich schreibe: „Dies ist ein Blindtext“ oder „Huardest gefburn“? Kjift – mitnichten! Ein Blindtext bietet mir wichtige Informationen. An ihm messe ich die Lesbarkeit einer Schrift, ihre Anmutung, wie harmonisch die Figuren zueinander stehen und prüfe, wie breit oder schmal sie läuft. Ein Blindtext sollte möglichst viele verschiedene Buchstaben enthalten und in der Originalsprache gesetzt sein. Er muss keinen Sinn ergeben, sollte aber lesbar sein. Fremdsprachige Texte wie „Lorem ipsum“ dienen nicht dem eigentlichen Zweck, da sie eine falsche Anmutung vermitteln.

$$\int_0^\infty e^{-\alpha x^2} dx = \frac{1}{2} \sqrt{\int_{-\infty}^\infty e^{-\alpha x^2} dx \int_{-\infty}^\infty e^{-\alpha y^2} dy} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{\alpha}}$$

Dies hier ist ein Blindtext zum Testen von Textausgaben. Wer diesen Text liest, ist selbst schuld. Der Text gibt lediglich den Grauwert der Schrift an. Ist das wirklich so? Ist es gleichgültig, ob ich schreibe: „Dies ist ein Blindtext“ oder „Huardest gefburn“? Kjift – mitnichten! Ein Blindtext bietet mir wichtige Informationen. An ihm messe ich die Lesbarkeit einer Schrift, ihre Anmutung, wie harmonisch die Figuren zueinander stehen und prüfe, wie breit oder schmal sie läuft. Ein Blindtext sollte möglichst viele verschiedene Buchstaben enthalten und in der Originalsprache gesetzt sein. Er muss keinen Sinn ergeben, sollte aber lesbar sein. Fremdsprachige Texte wie „Lorem ipsum“ dienen nicht dem eigentlichen Zweck, da sie eine falsche Anmutung vermitteln.

$$\sum_{k=0}^{\infty} a_0 q^k = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^n a_0 q^k = \lim_{n \rightarrow \infty} a_0 \frac{1 - q^{n+1}}{1 - q} = \frac{a_0}{1 - q}$$

Dies hier ist ein Blindtext zum Testen von Textausgaben. Wer diesen Text liest, ist selbst schuld. Der Text gibt lediglich den Grauwert der Schrift an. Ist das wirklich so? Ist es gleichgültig, ob ich schreibe: „Dies ist ein Blindtext“ oder „Huardest gefburn“? Kjift – mitnichten! Ein Blindtext bietet mir wichtige Informationen. An ihm messe ich die Lesbarkeit einer Schrift, ihre Anmutung, wie harmonisch die Figuren zueinander stehen und prüfe, wie breit oder schmal sie läuft. Ein Blindtext sollte möglichst viele verschiedene Buchstaben enthalten und in der Originalsprache gesetzt sein. Er muss keinen Sinn

ergeben, sollte aber lesbar sein. Fremdsprachige Texte wie „Lorem ipsum“ dienen nicht dem eigentlichen Zweck, da sie eine falsche Anmutung vermitteln.

$$x_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} = \frac{-p \pm \sqrt{p^2 - 4q}}{2}$$

Dies hier ist ein Blindtext zum Testen von Textausgaben. Wer diesen Text liest, ist selbst schuld. Der Text gibt lediglich den Grauwert der Schrift an. Ist das wirklich so? Ist es gleichgültig, ob ich schreibe: „Dies ist ein Blindtext“ oder „Huardest gefburn“? Kjift – mitnichten! Ein Blindtext bietet mir wichtige Informationen. An ihm messe ich die Lesbarkeit einer Schrift, ihre Anmutung, wie harmonisch die Figuren zueinander stehen und prüfe, wie breit oder schmal sie läuft. Ein Blindtext sollte möglichst viele verschiedene Buchstaben enthalten und in der Originalsprache gesetzt sein. Er muss keinen Sinn ergeben, sollte aber lesbar sein. Fremdsprachige Texte wie „Lorem ipsum“ dienen nicht dem eigentlichen Zweck, da sie eine falsche Anmutung vermitteln.

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2}$$

Dies hier ist ein Blindtext zum Testen von Textausgaben. Wer diesen Text liest, ist selbst schuld. Der Text gibt lediglich den Grauwert der Schrift an. Ist das wirklich so? Ist es gleichgültig, ob ich schreibe: „Dies ist ein Blindtext“ oder „Huardest gefburn“? Kjift – mitnichten! Ein Blindtext bietet mir wichtige Informationen. An ihm messe ich die Lesbarkeit einer Schrift, ihre Anmutung, wie harmonisch die Figuren zueinander stehen und prüfe, wie breit oder schmal sie läuft. Ein Blindtext sollte möglichst viele verschiedene Buchstaben enthalten und in der Originalsprache gesetzt sein. Er muss keinen Sinn ergeben, sollte aber lesbar sein. Fremdsprachige Texte wie „Lorem ipsum“ dienen nicht dem eigentlichen Zweck, da sie eine falsche Anmutung vermitteln.

B Zweiter Beispielanhang

Dies hier ist ein Blindtext zum Testen von Textausgaben. Wer diesen Text liest, ist selbst schuld. Der Text gibt lediglich den Grauwert der Schrift an. Ist das wirklich so? Ist es gleichgültig, ob ich schreibe: „Dies ist ein Blindtext“ oder „Huardest gefburn“? Kjift – mitnichten! Ein Blindtext bietet mir wichtige Informationen. An ihm messe ich die Lesbarkeit einer Schrift, ihre Anmutung, wie harmonisch die Figuren zueinander stehen und prüfe, wie breit oder schmal sie läuft. Ein Blindtext sollte möglichst viele verschiedene Buchstaben enthalten und in der Originalsprache gesetzt sein. Er muss keinen Sinn ergeben, sollte aber lesbar sein. Fremdsprachige Texte wie „Lorem ipsum“ dienen nicht dem eigentlichen Zweck, da sie eine falsche Anmutung vermitteln.

Das hier ist der zweite Absatz. Dies hier ist ein Blindtext zum Testen von Textausgaben. Wer diesen Text liest, ist selbst schuld. Der Text gibt lediglich den Grauwert der Schrift an. Ist das wirklich so? Ist es gleichgültig, ob ich schreibe: „Dies ist ein Blindtext“ oder „Huardest gefburn“? Kjift – mitnichten! Ein Blindtext bietet mir wichtige Informationen. An ihm messe ich die Lesbarkeit einer Schrift, ihre Anmutung, wie harmonisch die Figuren zueinander stehen und prüfe, wie breit oder schmal sie läuft. Ein Blindtext sollte möglichst viele verschiedene Buchstaben enthalten und in der Originalsprache gesetzt sein. Er muss keinen Sinn ergeben, sollte aber lesbar sein. Fremdsprachige Texte wie „Lorem ipsum“ dienen nicht dem eigentlichen Zweck, da sie eine falsche Anmutung vermitteln.

Und nun folgt – ob man es glaubt oder nicht – der dritte Absatz. Dies hier ist ein Blindtext zum Testen von Textausgaben. Wer diesen Text liest, ist selbst schuld. Der Text gibt lediglich den Grauwert der Schrift an. Ist das wirklich so? Ist es gleichgültig, ob ich schreibe: „Dies ist ein Blindtext“ oder „Huardest gefburn“? Kjift – mitnichten! Ein Blindtext bietet mir wichtige Informationen. An ihm messe ich die Lesbarkeit einer Schrift, ihre Anmutung, wie harmonisch die Figuren zueinander stehen und prüfe, wie breit oder schmal sie läuft. Ein Blindtext sollte möglichst viele verschiedene Buchstaben enthalten und in der Originalsprache gesetzt sein. Er muss keinen Sinn ergeben, sollte aber lesbar sein. Fremdsprachige Texte wie „Lorem ipsum“ dienen nicht dem eigentlichen Zweck, da sie eine falsche Anmutung vermitteln.

Versicherung über die Selbstständigkeit

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Masterarbeit ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst habe. Ich habe keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel – insbesondere keine im Quellverzeichnis nicht benannten Internet-Quellen – benutzt. Ich habe die Arbeit vorher nicht in einem anderen Prüfungsverfahren eingereicht. Die schriftliche Fassung entspricht der auf dem elektronischen Speichermedium.

Hamburg, den 15. März 2025

Ort, Datum

Unterschrift