Mario Neugebauer

# Energieeffiziente Anpassung des Arbeitszyklus in drahtlosen Sensornetzen

Beiträge aus der Informationstechnik

**Mario Neugebauer**

# Energieeffiziente Anpassung des Arbeitszyklus in drahtlosen Sensornetzen

VOGT

Dresden 2007

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.ddb.de abrufbar.

Zugl.: Dresden, Techn. Univ., Diss., 2007

Die vorliegende Arbeit stimmt mit dem Original der Dissertation „Energieeffiziente Anpassung des Arbeitszyklus in drahtlosen Sensornetzen“ von Mario Neugebauer überein.

Besuchen Sie uns im Internet:
www.vogtverlag.de

© Jörg Vogt Verlag 2007
Alle Rechte vorbehalten.

Gesetzt vom Autor
Printed in Germany

ISBN 978-3-938860-06-9

Jörg Vogt Verlag
Voglerstr. 20 · 01277 Dresden
Telefon: 0351-31403921
Telefax: 0351-31403918
Email: info@vogtverlag.de

Technische Universität Dresden

# Energieeffiziente Anpassung des Arbeitszyklus in drahtlosen Sensornetzen

**Mario Neugebauer**

von der Fakultät Informatik
der Technischen Universität Dresden
zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktoringenieur**

(Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation


| | |
|---|---|
| Vorsitzender: | Prof. Dr. rer. nat. Oliver Rose |
| Gutachter: | Prof. Dr.-Ing. habil. Klaus Kabitzsch |
| | Prof. Dr.-Ing. habil. Martin Wollschlaeger |
| | Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Beikirch |
| Tag der Einreichung: | 13. September 2006 |
| Tag der Verteidigung: | 29. Januar 2007 |

# Kurzfassung

Drahtlose Sensornetze können Zustände physikalischer Größen messen und an eine Basisstation (Datensenke) melden. Durch die geographische Verteilung der Sensorknoten und die Bedingungen bei der Mehrwegeausbreitung, kann die Situation auftreten, dass nicht alle Sensorknoten direkten Kontakt zur Basisstation aufbauen können. Sie müssen andere Sensorknoten als Vermittlungsstation in Anspruch nehmen, um die Nachrichten an die Basisstation zu befördern.

Um den Energieverbrauch zu verringern werden Nachrichten zum einen ereignisbasiert generiert und zum anderen zeitbasiert vermittelt. Dabei beschreibt der Arbeitszyklus den Anteil der Vermittlungsaktivität am Gesamtzyklus. Derzeit verfügbare Methoden berücksichtigen allerdings nicht die Verknüpfung zwischen dem von der Anwendung generierten Verkehr und der Vermittlungshäufigkeit.

In der vorliegenden Arbeit wird ein Verfahren vorgeschlagen, mit dem der Arbeitszyklus zur Laufzeit automatisch eingestellt werden kann. Dafür wird in der Vermittlungsstation die Verkehrscharakteristik gemessen und für die Einstellung des Arbeitszyklus benutzt. Die Leistungsfähigkeit der Anpassung des Arbeitszyklus wird mit Simulationen untersucht. Sie zeigen, wie sich der Ansatz bei verschiedener Parametrierung in statischen und dynamischen Szenarien verhält. Um dem späteren Anwender der Anpassung eine Abschätzung des Verhaltens zu ermöglichen, werden zusätzlich analytische Modelle für die Analyse des statischen und dynamischen Verhaltens entwickelt. Ferner wird gezeigt, dass der entwickelte Ansatz für etablierte Standardtechniken (z. B. IEEE 802.15.4) eingesetzt werden kann.

# Abstract

Wireless Sensor Networks support flexible measuring of physical values. Due to the geographical distribution and multipath scattering the base station in such a network might not be reached by all sensors. Hence, other sensor nodes have to work as relay stations. At the same time, each sensor node is forced to consume as low energy as possible.

In order to save energy the messages are generated event based in each sensor node and forwarded with a time triggered approach. Thereby, the duty cycle describes the portion of the relay activities in relation to the overall cycle. Currently available approaches do not properly adapt these two paradigms, event and time triggered, to each other.

In this work a method to adapt the duty cycle according to the traffic is proposed. Therefore, the traffic is monitored and evaluated for traffic adaptation. Furthermore, the performance of the duty cycle adaptation is assessed using simulations. They show the behavior of the adaptation algorithm in static and dynamic scenarios with different parametrizations. The supplemental analytical models enable to easily estimate the behavior of the adaptation, in static as well as in dynamic scenarios. Also, it is shown how the duty cycle adaptation can be deployed for standard technologies like IEEE 802.15.4.

# Danksagung

Die der Arbeit zugrunde liegende Idee entstand während meiner Tätigkeit am Institut für Angewandte Informatik. Daher möchte ich in erster Linie Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Klaus Kabitzsch für die zahlreichen Anregungen und Diskussionen danken. Insbesondere durch sein Fachwissen, die Anstöße zum themenübergreifenden Denken und den kritischen Blick auf die Problemstellung konnte der wichtige Bezug zu anderen Fachbereichen hergestellt werden. Mein Dank gilt weiterhin Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Martin Wollschlaeger und Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Beikirch für ihre Bereitschaft, das Koreferat zu übernehmen.

Allen Kollegen am Lehrstuhl Technische Informationssysteme danke ich für das stets angenehme Arbeitsklima. Hervorzuheben ist an dieser Stelle Jörn Plönnigs, der mit seinen Kenntnissen über Ankunftsratenmodellierung und MARKOW-Modelle sowie stetiger Kritik- und Diskussionsbereitschaft erheblich zum Gelingen der Arbeit beigetragen hat. Herrn Dr.-Ing. Heinz-Dieter Ribbecke danke ich für das Hinterfragen und Diskutieren im Bereich der Modellierung und Statistik, wodurch ich wichtige Anregungen für die analytische Analyse erhalten habe. Auch Frau Dr.-Ing. Katja Schwieger danke ich, da sie mit ihrer Arbeit und durch Diskussionen einige Impulse geben konnte.

Große Teile des Manuskripts entstanden während meiner Arbeit bei SAP Research. Daher möchte ich besonders den Kollegen PD Dr. Gregor Hackenbroich und Jürgen Anke danken. Sie haben die erforderlichen Freiräume für das Gelingen der Arbeit geschaffen.

Nicht zuletzt danke ich auch den Kollegen Anja Brauny, Michael Knittel, Jens Naake, Uwe Schumann, Gunnar Stein und allen anderen Mitarbeitern des Lehrstuhls TIS, die nicht nur die gute technische sondern auch soziale Infrastruktur aufrecht erhalten haben.

Herzlich danken möchte ich auch meiner Familie und Freunden, die mich stets unterstützten und durch Interesse am Fortgang der Arbeit anspornten.

Dresden, im September 2006

Mario Neugebauer

# Inhaltsverzeichnis

**Abkürzungen** **v**

**Formelzeichen** **vii**

**Abbildungsverzeichnis** **xi**

**Tabellenverzeichnis** **xiii**

**1 Einleitung** **1**
1.1 Problemstellung . . . . . 2
1.2 Ziel der Arbeit . . . . . 5
1.3 Inhaltsübersicht . . . . . 6

**2 Messwerterfassung und -übertragung als Gesamtsystem** **9**
2.1 Auslösen von Nachrichten . . . . . 10
2.2 Klassifikation der Ankunftsrate . . . . . 13
2.3 Physikalische Größen der Gebäudeautomatisierung . . . . . 14
2.4 Beziehung zwischen Verzögerungszeit und Systemdynamik . . . . . 18
2.5 Zusammenfassende Bewertung . . . . . 21

**3 Energieeffizienz in drahtlosen Netzen** **23**
3.1 Drahtlose Sensornetze . . . . . 24
3.2 Arbeitszyklus in drahtlosen Netzen . . . . . 26
3.2.1 S-MAC . . . . . 28
3.2.2 T-MAC . . . . . 30
3.2.3 TRAMA . . . . . 31
3.2.4 Weitere Verfahren der Arbeitszyklusfestlegung . . . . . 32
3.3 Arbeitszyklus in Abhängigkeit von Sensorparametern . . . . . 33
3.3.1 Modell für Sensorlebensdauer . . . . . 34
3.3.2 Analyse der Abhängigkeiten . . . . . 36
3.4 Mechanismen für Energieeffizienz in Standards . . . . . 38
3.4.1 IEEE 802.15.4 . . . . . 38
3.4.2 IEEE 802.15.1 . . . . . 41
3.5 Weitere Aspekte des energieeffizienten Kommunizierens . . . . . 44

3.6 Zusammenfassende Bewertung . . . . . 45

**4 Verkehrsabhängige Anpassung des Arbeitszyklus 47**
4.1 Szenario . . . . . 47
4.2 Ausgangssituation . . . . . 49
4.3 Anpassung des Arbeitszyklus . . . . . 52
4.3.1 Grundprinzip . . . . . 52
4.3.2 Anwendung auf IEEE 802.15.4 . . . . . 57
4.3.3 Organisation der Zeitplanung . . . . . 59
4.4 Anwendbarkeit auf andere Protokolle . . . . . 62
4.4.1 Anwendbarkeit auf IEEE 802.15.1 . . . . . 62
4.4.2 Anwendbarkeit auf IEEE 802.11 . . . . . 63

**5 Leistungsanalyse der Anpassung 65**
5.1 Vorbetrachtung zur Modellierung . . . . . 66
5.1.1 Generisches zeitliches Modell . . . . . 67
5.1.2 Ansatz zur Arbeitszyklusänderung . . . . . 68
5.1.3 Medienzugriff . . . . . 69
5.1.4 Quellen des Verkehrs . . . . . 71
5.1.5 Hardwaremodell . . . . . 72
5.2 Bewertungsmaße . . . . . 73
5.2.1 Arbeitszyklus . . . . . 73
5.2.2 Verzögerungszeit . . . . . 74
5.2.3 Warteschlangenlänge . . . . . 75
5.3 Bewertung in statischen Szenarien . . . . . 76
5.3.1 Schwellwerte . . . . . 76
5.3.2 Dauer des Beobachtungsintervalls . . . . . 79
5.3.3 Ankunftsrate . . . . . 80
5.3.4 Nachrichtenverlustrate . . . . . 82
5.3.5 Schwankungsverhalten des Arbeitszyklus . . . . . 84
5.4 Bewertung in dynamischen Szenarien . . . . . 85
5.4.1 Beginn der Anpassung . . . . . 86
5.4.2 Sprung . . . . . 90
5.4.3 Burst . . . . . 96
5.5 Vergleich mit T-MAC . . . . . 101
5.5.1 Vergleich in statischem Szenario . . . . . 101
5.5.2 Vergleich in dynamischem Szenario . . . . . 104
5.5.3 Zusammenfassende Bewertung des Vergleichs zu T-MAC . . . . 105

**6 Analytische Analyse 107**
6.1 MARKOW-Modell . . . . . 107
6.1.1 Herleitung des MARKOW-Modells . . . . . 108

6.1.2 Validierung des MARKOW-Modells . . . . . 111
6.2 Differenzengleichungen im dynamischen Fall . . . . . 112
6.2.1 Herleitung der Differenzengleichungen . . . . . 113
6.2.2 Validierung der Differenzengleichungen . . . . . 117
6.3 Anwendung der Analysemodelle für die Einsatzplanung . . . . . 120
6.3.1 Anwendung des MARKOW-Modells . . . . . 122
6.3.2 Anwendung der Differenzengleichungen . . . . . 123

**7 Analyse von IEEE 802.15.4 125**
7.1 Allgemeine Modellanpassungen . . . . . 125
7.2 Anpassung des Markow-Modells . . . . . 126
7.3 Anpassung der Differenzengleichung . . . . . 127
7.4 Grenzen der Wirksamkeit . . . . . 128

**8 Zusammenfassung und Ausblick 131**
8.1 Zusammenfassung . . . . . 131
8.2 Ausblick . . . . . 133

**A Standard IEEE 802.15.4 135**
A.1 Bitübertragungsschicht . . . . . 135
A.2 Beacon-Enabled-Modus . . . . . 135

**B RTS/CTS Mechanismus 139**
B.1 Versteckter Teilnehmer . . . . . 139
B.2 Ablauf der Reservierung bei RTS/CTS . . . . . 140

**C Einfluss der relativen Verzögerungszeit auf die Regelbarkeit 141**

**D Weitere Ergebnisse 143**

**Literatur- und Quellenverzeichnis 147**

# Abkürzungen

| | |
|---|---|
| AEA | Adaptive Election Algorithm |
| AODV | Ad-hoc On-Demand Distance Vector Routing |
| APP | Application Layer |
| BO | Beacon Order |
| BSS | Basic Service Set |
| CAP | Contention Access Period |
| CDMA | Code Division Multiple Access |
| CFP | Contention Free Period |
| CSMA | Carrier Sense Multiple Access |
| CSMA/CA | Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance |
| CTS | Clear To Send |
| D-MAC | Data-Gathering Medium Access Control |
| FAP | Frequency Assignment Problem |
| FDMA | Frequency Division Multiple Access |
| FFD | Full Function Device |
| FHSS | Frequency Hopping Spread Spectrum |
| FIFO | First In First Out |
| GSM | Global System for Mobile Communications |
| GTS | Guaranteed Time Slots |
| IBSS | Independent Basic Service Set |
| IEEE | Institute of Electrical and Electronics Engineers |
| LAN | Local Area Network |
| LCS | Locally Coordinated Scheduling |
| LLC | Logical Link Control |
| MAC | Medium Access Control |
| MCPS | Medium Access Control Common Part Sublayer |
| MIPS | Million Instructions Per Second |
| MLME | Medium Access Control Sublayer Management Entity |
| NAV | Network Allocation Vector |
| NP | Neighbor Protocol |
| OSI | Open Systems Interconnection |
| PAN | Personal Area Network |
| PDA | Personal Digital Assistant |
| PHY | Physical Layer |

| | |
|---|---|
| PIB | Personal Area Network Information Base |
| PSM | Power Save Mode |
| RFD | Reduced Function Device |
| RTS | Ready To Send |
| S-MAC | Sensor Medium Access Control |
| SAP | Service Access Point |
| SEP | Schedule Exchange Protocol |
| SDMA | Space Division Multiple Access |
| SIG | Special Interest Group |
| SO | Superframe Order |
| T-MAC | Timeout Medium Access Control |
| TDD | Time Division Duplex |
| TDMA | Time Division Multiple Access |
| TRAMA | Traffic-Adaptive Medium Access Protocol |
| UMTS | Universal Mobile Telecommunications System |
| WLAN | Wireless Local Area Network |
| WPAN | Wireless Personal Area Network |

# Formelzeichen

| | |
|---|---|
| $\mathbf{c}$ | Vektor mit $n_{uK}$ Elementen als Zähler für die eintreffenden Nachrichten |
| $C$ | Batteriekapazität in mAh |
| $c(k)$ | Anzahl der im aktuellen Beobachtungsintervall eingetroffenen Nachrichten |
| $d$ | Arbeitszyklus |
| $D_{access}$ | Verzögerung, nach welcher die Zeitfenster im Park-Modus beginnen |
| $d_P$ | Durchsatz in Nachrichten pro Zeiteinheit |
| $f(\cdot)$ | parameterabhängige Arbeitszyklusänderung |
| $f_G$ | höchste Signalfrequenz |
| $f_S$ | Abtastrate |
| $f_{sec}$ | Sicherheitsfaktor für die Berechnung der maximal relevanten Zustände im MARKOW-Modell |
| $h_l$ | unterer Schwellwert |
| $h_u$ | oberer Schwellwert |
| $i(k)$ | Anzahl der beobachteten aktiven Phasen im aktuellen Beobachtungsintervall |
| $I_{app}$ | Strom während des Betriebs der Anwendung |
| $I_{avg}$ | mittlerer Strom während des Betriebs |
| $I_{rxon}$ | Strom während des Empfangsbetriebs |
| $I_{stby}$ | Strom im Ruhezustand |
| $I_{txon}$ | Strom während des Sendebetriebs |
| $M_{access}$ | Anzahl der Wiederholungen für ein Zeitfenster im Park-Modus |
| $n_c(k)$ | Anzahl der in der $k$-ten aktiven Phase eingetroffenen Nachrichten, wenn sich die Ankunftsrate geändert hat |
| $n_m$ | Anzahl der aktiven Phasen innerhalb eines Monitoring-Intervalls |
| $n_{Nachrichten}$ | Anzahl der während der passiven Phase eintreffenden Nachrichten |
| $n_r(k)$ | Anzahl der in der $k$-ten aktiven Phase eingetroffenen Nachrichten |
| $N_{SniffAttempts}$ | Anzahl der Zeitschlitze, die ein Teilnehmer im Sniff-Modus noch aktiv bleiben muss |
| $N_{SniffTimeout}$ | Anzahl der Zeitschlitze, die ein Teilnehmer im Sniff-Modus nach dem Empfang von Nachrichten noch aktiv bleiben muss |
| $n_{uK}$ | Anzahl der untergeordneten Knoten |
| $p_{dec}(s_i)$ | Wahrscheinlichkeit, den Zustand $s_i$ hin zum Zustand $s_{i-1}$ zu verlassen (Arbeitszyklus erhöhen) |

| | |
|---|---|
| $p_{hold}(s_i)$ | Wahrscheinlichkeit, im Zustand $s_i$ zu bleiben |
| $p_{inc}(s_i)$ | Wahrscheinlichkeit, den Zustand $s_i$ hin zum Zustand $s_{i+1}$ zu verlassen (Arbeitszyklus vermindern) |
| $p_{loss}$ | Nachrichtenverlustwahrscheinlichkeit |
| $\mathbf{P}$ | Matrix der Wahrscheinlichkeiten für Zustandsübergänge |
| $r_{max}$ | maximaler Anstieg einer physikalischen Größe |
| $r_{mean}$ | mittlerer Anstieg einer physikalischen Größe |
| $S$ | Menge der Zustände in einer MARKOW-Kette |
| $s_i$ | Zustand innerhalb einer MARKOW-Kette |
| $t$ | Zeit |
| $T_{access}$ | Dauer eines zusätzlichen Zeitfensters im Park-Modus |
| $t_{act}$ | Dauer der aktiven Phase |
| $T_{aktiv}$ | Dauer der aktiven Phase bei IEEE 802.15.4 |
| $T_{app}$ | Zeitanteil im Anwendungsbetrieb |
| $t_b$ | Dauer eines Bursts |
| $t_c$ | Zeitpunkt einer Ankunftsratenänderung |
| $t_e$ | Zeitpunkt, zu dem die Rampenfunktion den Endwert erreicht hat |
| $T_g$ | Ausgleichszeit einer Regelstrecke |
| $T_{holdTO}$ | Dauer, für welche der Empfang im Hold-Modus ausgesetzt wird |
| $t_{imt}$ | Zeit zwischen zwei generierten Nachrichten |
| $T_{Intervall}$ | Zeit zwischen dem Beginn zweier aktiver Phasen bei IEEE 802.15.4 |
| $t_{live}$ | Lebensdauer eines Knotens |
| $t_{minSendTime}$ | minimale Zeit, die zwischen zwei gesendeten Nachrichten mit Messwerten verstreichen muss |
| $t_{maxSendTime}$ | maximale Zeit, die zwischen zwei gesendeten Nachrichten mit Messwerten verstreichen darf |
| $t_{mon}$ | Dauer des Beobachtungsintervalls |
| $T_{PackDelay}$ | mittlere absolute Verzögerungszeit |
| $t_{pass}$ | Dauer der passiven Phase |
| $T_{rxon}$ | Zeitanteil im Empfangsbetrieb |
| $t_{si}$ | Dauer zwischen zwei aktiven Phasen |
| $T_{Sniff}$ | Zeit zwischen zwei aufeinander folgenden aktiven Phasen im Sniff-Modus |
| $T_t$ | Totzeit in einem Regelkreis |
| $t_{to}$ | Parameter für die Zeitüberschreitung (*timeout* bei T-MAC) |
| $T_{txon}$ | Zeitanteil im Sendebetrieb |
| $T_u$ | Verzugszeit in einer Regelstrecke |
| $\Delta t(k)$ | Zeitschlitzintervalldauer in Abhängigkeit von Index $k$ |
| $x$ | Signal bzw. physikalische Größe im Zeitbereich |
| $x'$ | Anstieg ($dx/dt$) eines Signals bzw. einer physikalischen Größe |
| $\lvert x' \rvert_{mean,max}$ | Betrag des mittleren / maximalen Anstiegs |

| | |
|---|---|
| $\Delta x$ | Betrag der Änderung eines Signals, die zum Auslösen einer Nachricht führt (Parameter bei sendOnDelta-Prinzip) |
| $\hat{x}$ | Amplitude eines Signals bzw. einer physikalischen Größe |
| | |
| $\delta$ | relative Verzögerungszeit |
| $\lambda$ | Ankunftsrate in Nachrichten pro Zeit |
| $\Delta\lambda$ | Änderung der Ankunftsrate |
| $\lambda_{app}$ | Häufigkeit des Betriebs der Anwendung |
| $\lambda_{rxon}$ | Häufigkeit von empfangenen Nachrichten |
| $\lambda_{tx}$ | Häufigkeit, mit welcher Nachrichten tatsächlich übertragen werden |
| $\lambda_{txon}$ | Häufigkeit von generierten Nachrichten der Anwendung |
| $\pi$ | Vektor für stationäre Zustandswahrscheinlichkeiten |

# Abbildungsverzeichnis


1.1 Entfernter Sensorknoten nutzt Vermittlungsstation . . . . . 3
1.2 Ereignisgetriebene Nachrichtengenerierung vs. zeitbasierte Vermittlung . 4
1.3 Kompromiss zwischen Aktivität und Verzögerungszeit . . . . . 5

2.1 Messwertübertragung von Prozess zu Beobachter . . . . . 9
2.2 Abtasten und Auslösen von Nachrichten . . . . . 11
2.3 Klassifikation der Geräte nach Ankunftsrate . . . . . 14
2.4 Jahresverläufe von Temperatur und relativer Feuchte . . . . . 15
2.5 Verteilung des Anstiegs von Wettergrößen . . . . . 17
2.6 Tot- und Verzugszeit wirken sich auf Regelbarkeit aus . . . . . 19

3.1 Verschiedene Typen drahtloser Netze . . . . . 25
3.2 Abstimmung der Zeitpläne bei S-MAC . . . . . 29
3.3 Variable aktive Phase bei T-MAC . . . . . 30
3.4 Zeitgeteilte Übertragung bei TRAMA . . . . . 32
3.5 Abhängigkeit der Lebenszeit eines Sensors . . . . . 37
3.6 Beacon-Enabled-Modus bei IEEE 802.15.4 . . . . . 39
3.7 Energiesparmodi bei IEEE 802.15.1 . . . . . 42

4.1 Szenario für die Anpassung des Arbeitszyklus . . . . . 48
4.2 Platzierung des Algorithmus im OSI-Schichtenmodell . . . . . 53
4.3 Ablauf der Anpassung des Arbeitszyklus . . . . . 53
4.4 Message-Sequence-Chart für Anpassung bei IEEE 802.15.4 . . . . . 59
4.5 Konflikt verschiedener Zeitpläne . . . . . 61

5.1 Szenario für Leistungsbewertung . . . . . 67
5.2 Allgemeines zeitlicher Modell für Leistungsbewertung . . . . . 68
5.3 Beispiele für Ändern des Arbeitszyklus . . . . . 69
5.4 Modell des Medienzugriffs für Leistungsbewertung . . . . . 70
5.5 Modell der Sensorhardware für Leistungsbewertung . . . . . 72
5.6 Arbeitszyklus und Verzögerung abhängig von Parametrierung . . . . . 77
5.7 Hohe Schwellwerte führen zu hoher Verzögerung . . . . . 78
5.8 Hohe Schwellwerte führen zu hoher Warteschlangenlänge . . . . . 79
5.9 Arbeitszyklus und Verzögerung abhängig von $n_m$ . . . . . 80
5.10 Arbeitszyklus und Verzögerung abhängig von Verkehr . . . . . 81

5.11 Relative Verzögerung bei unterschiedlichem Verkehr gleich . . . . . 81
5.12 Arbeitszyklus und Verzögerung abhängig von Verlustrate . . . . . 82
5.13 Warteschlangenlänge abhängig von Verlustrate . . . . . 83
5.14 Schwankungsverhalten des Arbeitszyklus . . . . . 84
5.15 Verläufe der Ankunftsrate in dynamischen Szenarien . . . . . 85
5.16 Arbeitszyklus und Verzögerung zu Beginn bei $\lambda = 0,1$ . . . . . 87
5.17 Arbeitszyklus zu Beginn bei $\lambda = 0,01$ . . . . . 88
5.18 Verzögerung zu Beginn bei $\lambda = 0,01$ . . . . . 89
5.19 Arbeitszyklus zu Beginn abhängig von $n_m$ . . . . . 90
5.20 Arbeitszyklus, Verzögerung und Warteschlange bei Sprung auf $10 \cdot \lambda$ . . . 92
5.21 Arbeitszyklus, Verzögerung und Warteschlange bei Sprung auf $100 \cdot \lambda$ . . 93
5.22 Arbeitszyklus, Verzögerung und Warteschlange bei Sprung auf $10 \cdot \lambda$ . . . 94
5.23 Arbeitszyklus und Verzögerung bei Sprung abhängig von $h_u$ . . . . . 95
5.24 Arbeitszyklus bei verschiedenen Burst-Intensitäten . . . . . 97
5.25 Verzögerung bei verschiedenen Burst-Intensitäten . . . . . 98
5.26 Warteschlangenlänge bei verschiedenen Burst-Intensitäten . . . . . 99
5.27 Arbeitszyklus und Verzögerung bei T-MAC . . . . . 102
5.28 Relative Verzögerungszeit bei T-MAC . . . . . 103
5.29 Ungünstigster Fall bei T-MAC . . . . . 104

6.1 MARKOW-Modell für statische Analyse . . . . . 108
6.2 Statisches Szenario bei Simulation und analytischer Analyse . . . . . 112
6.3 Zusammenhang zwischen Arbeitszykluseinstellung und Verkehr . . . . . 113
6.4 Zeitreihen im Modell der Differenzengleichungen . . . . . 114
6.5 Änderung des Verkehrs innerhalb eines Zeitschlitzintervalls . . . . . 116
6.6 Szenarien für Validierung des dynamischen Modells . . . . . 118
6.7 Beginn der Anpassung in Simulation und analytischer Analyse . . . . . 118
6.8 Sprung der Ankunftsrate in Simulation und analytischer Analyse . . . . . 119
6.9 Warteschlangenlänge in Simulation und analytischer Analyse . . . . . 120
6.10 Rampenartige Änderung in Simulation und analytischer Analyse . . . . . 121

7.1 Wirksamkeit der Anpassung bei IEEE 802.15.4 . . . . . 129

A.1 Beacon Order und Superframe Order beeinflussen den Arbeitszyklus. . . 136

B.1 Problem des versteckten Teilnehmers in drahtlosen Netzen . . . . . 139

D.1 Arbeitszyklus bei unterschiedlichen Sprüngen der Ankunftsrate . . . . . 144
D.2 Verzögerung bei unterschiedlichen Sprüngen der Ankunftsrate . . . . . 145
D.3 Warteschlangenlänge bei unterschiedlichen Sprüngen der Ankunftsrate . . 146

# Tabellenverzeichnis

2.1 Charakteristik von Wettergrößen . . . . . 16

# 1 Einleitung

Die Möglichkeiten zur drahtlosen Mensch-Mensch-Kommunikation sind heutzutage durch die Mobilfunktechnik allgegenwärtig. Neben der drahtlosen Kommunikation zwischen Menschen gelangen zunehmend auch Szenarien der drahtlosen Kommunikation zwischen Mensch und Maschine sowie von Maschinen untereinander in den Fokus der Forschung. Ein Beispiel dafür sind die Entwicklungen auf dem Gebiet der drahtlosen Sensornetze. Kleinste Sensoren, Mikroprozessoren, Kommunikationsmodule und Batterien werden zu sogenannten Sensorknoten von nur wenigen Kubikzentimetern Volumen verknüpft. Diese Sensorknoten können in der Umgebung ausgebracht werden, sich selbständig zu Netzen formieren, Zustände von physikalischen Größen aufnehmen und an übergeordnete Systeme melden.

Drahtgebundene Sensornetze sind in der modernen Gebäudeautomatisierung bereits seit mehr als zehn Jahren Stand der Technik. Zahlreiche Feldbussysteme stehen zur Auswahl um Automatisierungsnetze mit bis zu 20.000 Knoten aufzubauen. Die Nutzung drahtloser Übertragungstechnologien steht in der Automatisierung jedoch erst am Anfang.

Generell bringen drahtlose Übertragungstechniken den Vorteil mit sich, dass keine aufwändige Verkabelung für den Aufbau von Netzen erforderlich ist. Allerdings müssen die drahtlosen Sensoren über ausreichend Energie für den Betrieb verfügen. Neben drahtgebundener Energieversorgung bieten sich Batterien als eine mögliche Energiequelle an. Unter bestimmten Bedingungen können diese Energiequellen auch aufgeladen werden, indem aus der Umgebung gewonnene Energie umgeformt und eingespeist wird. Insbesondere wenn die Batterie nur eine begrenzte Menge Energie zur Verfügung stellt bzw. aus der Umgebung nur wenig Energie gewonnen werden kann, ist die Energie eine knappe Ressource. Sie muss demnach sparsam verwendet werden.

In Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf dem Gebiet der drahtlosen Sensornetze wird gezeigt, dass der verfügbare Energievorrat den Betrieb in verschiedenen Bereichen des OSI-Schichtenmodells beeinflusst. Typische Forschungsfragen, die in verwandten Arbeiten im Hinblick auf geringen Energieverbrauch verfolgt werden, sind z. B.:

- Welche Übertragungsverfahren der physikalischen Schicht sind für den Betrieb geeignet?
- Wie muss der Medienzugriff bei Konkurrenz um das Übertragungsmedium gestaltet sein?

- Welche Strategie ist beim Aufbau der Topologie günstig?
- Wie muss die Hardware beschaffen sein?
- Bringt die Aggregation von Nachrichten innerhalb des Netzes Vorteile?
- Wie können Nachrichtenvermittlungsaufgaben unter den Kommunikationspartnern aufteilt werden?

Diese Fragestellungen beschäftigen sich in erster Linie mit nichtfunktionalen Eigenschaften, die für die Aufgabe eines Sensornetzes als Messglied von untergeordneter Bedeutung sind. Vielmehr tragen die Untersuchungen zum Aufbau und der Organisation aus der technischen Sicht des Sensornetzes bei.

Anwendungsübergreifende Empfehlungen im Hinblick auf funktionale Eigenschaften beim Einsatz von Sensornetzen können bisher nur selten gegeben werden. Beispielsweise blieb bisher unbeantwortet, wie sich der Mehrfachzugriff auf das Medium im Hinblick auf die Regelbarkeit einer Strecke auswirkt. Vielmehr wirft die Vielfalt der angebotenen Lösungen konkrete Fragen zur Beschaffenheit der tatsächlichen Anwendung auf. Erst mit den daraus abgeleiteten funktionalen Anforderungen kann eine Lösung auf die Anwendung zugeschnitten werden. Dementsprechend würden sich dann die untersuchten nichtfunktionalen Eigenschaften ergeben.

## 1.1 Problemstellung

Ausgangspunkt dieser Arbeit sind Anwendungen, die sich auf die Maschine-Maschine Kommunikation beziehen. Beispiele dafür sind in der Gebäudeautomatisierung zu finden. Netze die aus bis zu 20.000 Knoten (Sensoren, Regler, Aktoren) bestehen, sind in der Gebäudeautomatisierung Stand der Technik. Drahtlose Sensornetze können dort künftig drahtgebundene Messglieder ersetzen. Die Eigenschaften drahtloser Netze beeinflussen das Messgliedverhalten allerdings anders als die Eigenschaften der drahtgebundenen Netze. Grund dafür ist die Ressourcenknappheit eines drahtlosen Sensornetzes, beispielsweise ein geringer Energievorrat, mit dem das Netz längere Zeit betrieben werden muss. Deshalb sollte die Energie sparsam eingesetzt werden, indem ein Sensorknoten nur dann aktiv ist, wenn es erforderlich wird. Diese Forderung wird bei der Nachrichtenübertragung und auf Anwendungsebene auf unterschiedliche Weise erfüllt. Dabei steht die ereignisgetriebene Nachrichtenerzeugung der zeitbasierten Vermittlungstätigkeit gegenüber.

### Ereignisgetriebene Nachrichtenerzeugung

Die Sensoreinheit ist der Anwendungsbereich eines Sensorknotens, in dem das Abtasten eines Signals zum Auslösen von Nachrichten führt. Um energieeffizient zu arbeiten, sollte

diese Einheit nur bei Bedarf aktiv werden. Das bedeutet, dass eine Nachricht nur generiert wird, wenn eine Änderung in der Umgebung aufgetreten ist. Dieses Verfahren orientiert sich an den Ereignissen in der Umgebung und wird deshalb als ereignisgetriebene Methode zum Erzeugen von Nachrichten bezeichnet. Redundante Nachrichten und zusätzlicher Energieverbrauch werden dadurch vermieden (siehe Kapitel 2).

Die erzeugte Nachricht wird anschließend an die darunter liegende Übertragungsschicht übergeben. Sie sendet die Nachricht an den entsprechenden Empfänger, wenn eine Verbindung besteht. Ist das Verhalten der Umgebung und der darin beobachteten physikalischen Größen nicht bekannt, können keine Annahmen über die Häufigkeit der Ereignisse und der damit verbundenen Nachrichten getroffen werden.

Diese Arbeitsweise eines Sensornetzes wirkt sich auf die Eigenschaften der Regelstrecke aus, für die ein Zeitkonstantenverhältnis als relatives Maß verwendet wird. Zwischen den Eigenschaften der Regelstrecke, der Häufigkeit der Nachrichten und der Verzögerungszeit besteht eine Beziehung, die die Regelbarkeit der Strecke beeinflusst (siehe Abschnitt 2.4 und Anhang C).

### Zeitbasierte Vermittlungstätigkeit

Bei der Nachrichtenübertragung in Sensornetzen kann die Situation auftreten, dass innerhalb des Netzes ein weiterer Sensorknoten (Vermittlungsstation) vermitteln muss (Abbildung 1.1). Dieser Fall tritt auf, wenn aufgrund der physikalischen Gegebenheiten für die Ausbreitung der elektromagnetischen Wellen ein entfernter Sensorknoten (Knoten 3 in Abbildung 1.1) nicht direkt mit der Basisstation kommunizieren kann.

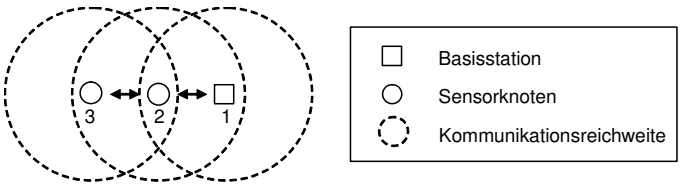


***Abbildung 1.1:*** Von Sensorknoten 3 sollen Nachrichten an die Basisstation 1 gesendet werden. Nur mit Vermittlung durch Sensorknoten 2 gelangen die Nachrichten zum Ziel.

Aufgrund des knappen Energievorrats muss zugleich die oben genannte Forderung der bedarfsorientierten Aktivität erfüllt werden. Für die Vermittlungsstation und den entfernten Sensorknoten gibt es damit nur die Möglichkeit, die aktiven Phasen durch einen Zeitplan festzulegen (siehe Kapitel 3). Dieser Plan schreibt Zeiträume vor, in denen der entfernte Sensorknoten seine Nachrichten an die Vermittlungsstation zum Weiterleiten an die Basisstation senden kann.

Der festgelegte Zeitplan ist nur auf die Bedürfnisse der Sensorknoten aus der technischen Sicht des Netzes und der Energie zugeschnitten. Aspekte der Anwendung, wie beispielsweise die Regelbarkeit von Strecken, werden in diesen Zeitplänen nicht berücksichtigt. Auch die Ankunftsrate, eine von der Regelstrecke abstrahierte Eigenschaft, fließt bei der Festlegung der Zeitpläne nicht ein.

### Lücke zwischen Nachrichtenerzeugung und Vermittlungstätigkeit

Innerhalb des dargestellten Problemkreises kristallisieren sich zwei konkurrierende Strategien zur Nachrichtenbehandlung heraus. Einerseits werden Nachrichten ereignisorientiert im Anwendungsbereich des Sensorknotens generiert, andererseits müssen Übertragungsmöglichkeiten zwischen Sensorknoten und Vermittlungsstation zeitbasiert vereinbart werden. Die knappe Energie sollte effektiv eingesetzt werden.

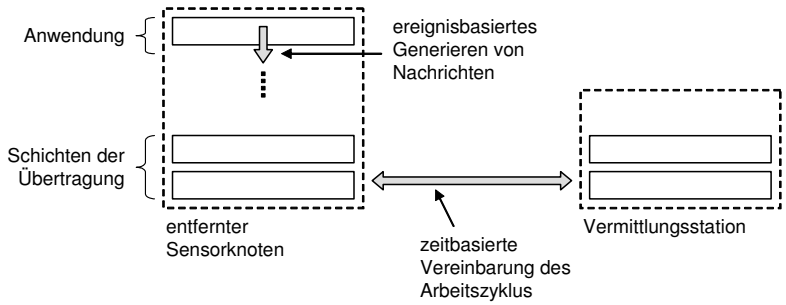


***Abbildung 1.2:*** Beim Beobachten physikalischer Größen der Umgebung konkurriert die ereignisgetriebene Nachrichtenerzeugung mit der zeitbasierten Vermittlungstätigkeit. Beide Strategien sind im jeweiligen Bereich optimal hinsichtlich des Energieverbrauchs, können aber nicht direkt miteinander verknüpft werden.

Daraus ergibt sich die in Abbildung 1.2 dargestellte Situation, wobei beide Strategien nicht direkt miteinander verknüpft werden können. Zudem spielen die Anforderungen der Anwendung eine entscheidende Rolle für den Einsatz des Sensornetzes. Das wirft die folgenden Probleme auf:

1. Für den Empfang und die Weiterleitung der Nachrichten muss in der Vermittlungsstation Energie aufgewendet werden. Da auch in der Vermittlungsstation die Energie eine knappe Ressource ist, muss dieser Energieverbrauch so gering wie möglich sein.

2. Das Paradigma der ereignisorientierten Nachrichtengenerierung lässt sich ohne Wissen über die Nachrichtenhäufigkeit nicht mit der zeitbasierten Übertragung zusammenführen. Das bedeutet, dass kein Zeitplan für die aktiven Phasen zwischen Vermittlungsstation und entferntem Sensorknoten festgelegt werden kann, wenn nicht bekannt ist, wie oft Nachrichten von der Anwendung generiert werden.

3. Wenn dem entfernten Sensorknoten zu selten die Möglichkeit zur Nachrichtenübertragung gegeben wird, kann das zu hohen Verzögerungszeiten, Überlasten auf dem Übertragungsmedium bis hin zu Nachrichtenverlusten führen. Daher muss dem entfernten Sensorknoten hinreichend oft die Möglichkeit zur Nachrichtenübertragung gegeben werden.
4. Das Verhalten des Sensornetzes als Übertragungseinheit innerhalb des Messgliedes beeinflusst die Regelbarkeit einer Strecke. Die Regelbarkeit fließt nicht in die Dimensionierung des Zeitplans für die Übertragung ein.

Ist die Vermittlungsstation häufiger aktiv, steigt auch der Energieverbrauch. Zugleich verringert sich dadurch die Verzögerungszeit der Nachrichten, da der entfernte Sensorknoten häufiger übertragen kann. Die Regelbarkeit der entsprechenden Strecke verbessert sich.

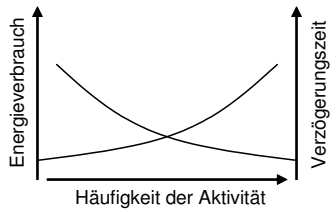


***Abbildung 1.3:*** Wird die Häufigkeit der Aktivität erhöht, steigt auch der Energieverbrauch. Zugleich verringert sich aber die Verzögerungszeit der zu übertragenden Nachrichten. Für die jeweilige Anwendung ist ein geeigneter Kompromiss zu finden.

In Abbildung 1.3 ist der Kompromiss zwischen Energieverbrauch und Verzögerungszeit in Abhängigkeit von der Häufigkeit der Aktivität dargestellt. Je geringer die Verzögerungszeit ist, desto besser wird auch die Regelbarkeit der Strecke sein.

## 1.2 Ziel der Arbeit

Durch das dargestellte Problem ergibt sich die in der vorliegenden Arbeit zu adressierende Forschungsfrage:

> Wie kann die zeitbasierte Vermittlungstätigkeit an das Paradigma der ereignisorientierten Nachrichtengenerierung während des Betriebs energieeffizient angepasst werden?

In verwandten Arbeiten und etablierten Standards sind bereits Vorschläge zu finden, die auf sparsamen Einsatz der Energie ausgerichtet sind. Es ist die Frage zu klären, inwieweit diese Arbeiten die energieeffiziente Anpassung an den Verkehr bereits ermöglichen und

welche Defizite diesbezüglich bestehen. Falls keine adäquaten Methoden für das Anpassungsproblem existieren, soll zur Beantwortung der Frage ein neuer Ansatz entwickelt werden. Er soll ermöglichen, den Arbeitszyklus innerhalb der Vermittlungsstation und während des laufenden Betriebs ohne Eingriff des Anwenders einzustellen. Der Anwender eines drahtlosen Sensornetzes wird damit von der Abschätzung des Kommunikationsbedarfes der entfernten Sensorknoten entbunden. Aufgrund der existierenden Vielfalt, sowohl standardisierter als auch proprietärer Übertragungsverfahren, besteht außerdem die Forderung, das Verfahren möglichst standardunabhängig zu gestalten. In der Arbeit soll daher gezeigt werden, dass die zu entwickelnde Lösung auf verschiedene Standards anwendbar ist.

Gelingt es, ein Verfahren für die Anpassung zu entwickeln, dann ist dessen Leistungsfähigkeit zu zeigen. Zur Bewertung der Leistungsfähigkeit müssen Auswirkungen der wesentlichen Einflussfaktoren untersucht werden. Falls bereits Verfahren existieren, die die Häufigkeiten der Nachrichten für die Anpassung des Arbeitszyklus in Betracht ziehen, müssen sie für die Bewertung der Leistungsfähigkeit herangezogen werden. Somit soll das zu erarbeitende Verfahren zur Arbeitszyklusanpassung in Bezug zu existierenden Techniken gesetzt werden. Wünschenswert sind außerdem Methoden, mit denen der Anwender des Verfahrens das Verhalten einfach abschätzen kann.

Wie im vorangegangenen Abschnitt dargestellt, besteht die Schwierigkeit, einen geeigneten Kompromiss zwischen dem Energieverbrauch und der Verzögerungszeit zu finden. Nur mit genauer Kenntnis der Anforderungen in einer Anwendung, kann dieser Kompromiss auf ein einheitliches Maß abgebildet werden. Es ist nicht Ziel dieser Arbeit, ein geeignetes Maß für die Bewertung zu finden. Dennoch sollte die Regelbarkeit von Strecken berücksichtigt werden. Deshalb ist zusätzlich die Frage zu klären, welcher Zusammenhang zwischen dem Verkehr und der Regelbarkeit besteht. Dieser Aspekt erweitert die auf die Übertragungseigenschaften konzentrierte Betrachtung dieser Arbeit und liefert Ansatzpunkte für weitere Arbeiten. Eine detaillierte Betrachtung des Zusammenhangs kann in dieser Arbeit jedoch nicht geleistet werden.

## 1.3 Inhaltsübersicht

In Kapitel 2 wird mit der Betrachtung von Anwendungen die Grundlage für die Verkehrscharakteristik geschaffen. Über die Art des Auslösens von Nachrichten wird der Zusammenhang mit physikalischen Größen am Beispiel der Gebäudeautomatisierung dargestellt. Insbesondere wird in Abschnitt 2.4 die Beziehung zu der Regelbarkeit von Strecken angedeutet. Das Ergebnis dieses Kapitels ist ein Modell für den Ankunftsprozess der Nachrichten. Es wird zum einen als Ausgangspunkt für die Anpassung des Arbeitszyklus und zum anderen als Modell für die Validierung des Ansatzes in Kapitel 5 verwendet.

Darauf folgend werden in Kapitel 3 verwandte Arbeiten untersucht, wobei das Augenmerk auf die Anpassung des Arbeitszyklus gelegt wird. Es wird gezeigt, dass in den existierenden Ansätzen Mechanismen im Bereich des Medienzugriffs vorhanden sind, mit denen Energie eingespart werden kann. Außerdem wird dargestellt, wie Parameter, die sich an der Anwendung orientieren, den Energieverbrauch beeinflussen. Die allgemeinen Ansätze zum Energiesparen in drahtlosen Netzen werden auch in Standards aufgegriffen. An den Beispielen von IEEE 802.15.4 und IEEE 802.15.1 wird dargestellt, welche Methoden bereits im Rahmen von Standards verfügbar sind. Schließlich wird am Ende des Kapitels 3 herausgearbeitet, durch welche wesentlichen Eigenschaften die existierenden Ansätze gekennzeichnet sind und welche Lücken bestehen.

Anschließend wird in Kapitel 4 ein Verfahren zur Anpassung des Arbeitszyklus vorgeschlagen. Es beruht auf der Beobachtung des Verkehrs und der dementsprechenden Einstellung des Arbeitszyklus. Im Verlauf dieses Kapitels wird gezeigt, dass der Ansatz auf bestehende Standards ohne Veränderung der darunter liegenden Schichten aufgesetzt werden kann. Dieser Ansatz zur Anpassung des Arbeitszyklus wird im Kapitel 5 einer Leistungsanalyse unterzogen. Dafür wird ein allgemeines Modell vorgestellt, das von den speziellen Eigenschaften einer Standardtechnik abstrahiert, aber bei Bedarf darauf zu übertragen ist. Innerhalb des allgemeinen Modells werden statische und dynamische Szenarien nachgebildet und in einer Simulationsumgebung studiert. Zum Vergleich wird das Prinzip des in Abschnitt 3.2.2 vorgestellten T-MAC-Ansatzes herangezogen. Es weist die meisten Ähnlichkeiten mit dem in dieser Arbeit vorgestellten Konzept zur Arbeitszyklusanpassung auf.

Das Erstellen von Simulationsmodellen ist in der Praxis oft aufwändig. Deshalb werden in Kapitel 6 zwei analytische Modelle vorgestellt, die der Analyse von statischen und dynamischen Szenarien dienen. Als analytische Werkzeuge werden MARKOW-Ketten und Differenzengleichungen benutzt. Wie in Kapitel 7 gezeigt wird, können diese Modelle auch auf Standardtechniken abgebildet werden. Am Beispiel von IEEE 802.15.4 wird gezeigt, wie die Anpassung des Arbeitszyklus das Verhalten des Standards beeinflussen kann.