

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 Ankunftsdatenmodellierung 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	Differenzgleichungen im dynamischen Fall	112
6.2.1	Herleitung der Differenzgleichungen	113
6.2.2	Validierung der Differenzgleichungen	117
6.3	Anwendung der Analysemodelle für die Einsatzplanung	120
6.3.1	Anwendung des MARKOW-Modells	122
6.3.2	Anwendung der Differenzgleichungen	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 Differenzgleichung	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
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 (<i>timeout</i> 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
$ x' _{mean,max}$	Betrag des mittleren / maximalen Anstiegs

Δx	Betrag der Änderung eines Signals, die zum Auslösen einer Nachricht führt (Parameter bei sendOnDelta-Prinzip)
\hat{x}	Amplitude eines Signals bzw. einer physikalischen Größe
δ	relative Verzögerungszeit
λ	Ankunftsrate in Nachrichten pro Zeit
$\Delta\lambda$	Änderung der Ankunftsrate
λ_{app}	Häufigkeit des Betriebs der Anwendung
λ_{rxon}	Häufigkeit von empfangenen Nachrichten
λ_{tx}	Häufigkeit, mit welcher Nachrichten tatsächlich übertragen werden
λ_{txon}	Häufigkeit von generierten Nachrichten der Anwendung
π	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 Differenzgleichungen	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 nicht-funktionalen 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.

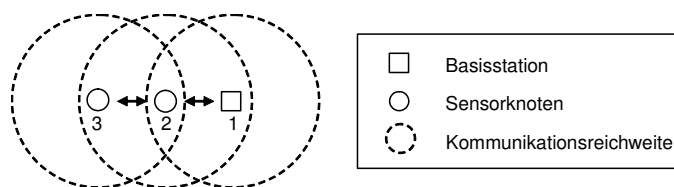


Abbildung 1.1: Von Sensorknoten 3 sollen Nachrichten an die Basisstation 1 gesendet werden. Nur mit Vermittlung durch Sensorknoten 2 gelangen die Nachrichten zum Ziel.

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.

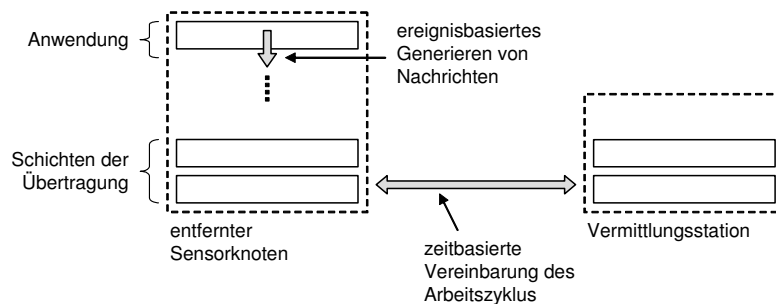


Abbildung 1.2: Beim Beobachten physikalischer Größen der Umgebung konkurriert die ereignisgetriebene Nachrichtenerzeugung mit der zeitbasierten Vermittlungstätigkeit. Beide Strategien sind im jeweiligen Bereich optimal hinsichtlich des Energieverbrauchs, können aber nicht direkt miteinander verknüpft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

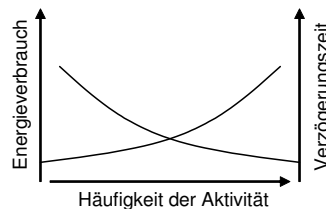


Abbildung 1.3: Wird die Häufigkeit der Aktivität erhöht, steigt auch der Energieverbrauch. Zugleich verringert sich aber die Verzögerungszeit der zu übertragenden Nachrichten. Für die jeweilige Anwendung ist ein geeigneter Kompromiss zu finden.

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 Differenzgleichungen 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.

2 Messwerterfassung und -übertragung als Gesamtsystem

In Automatisierungsumgebungen arbeiten Geräte zusammen, um technische Funktionen automatisiert ablaufen zu lassen. Die dabei eingesetzten Geräte können im Wesentlichen in drei Klassen unterteilt werden: Mess-, Regel- und Stellglieder. Messglieder nehmen mit Sensoren die aktuellen Zustände von physikalischen Größen auf und formen sie in maschinell zu verarbeitende Signale um. Diese Signale werden von dem Regelglied aufgenommen und durch Regelalgorithmen verarbeitet. Das Stellglied wandelt das Ausgangssignal in eine Stellgröße um, die wiederum Einfluss auf die Regelstrecke nimmt [EM85].

Häufig werden Geräte verwendet, die über ein Netz miteinander verbunden sind und digitalisierte Mess- bzw. Stellgrößen austauschen [KDP02] [DLS98]. In Abbildung 2.1 ist das Modell eines Messgliedes im Zusammenhang mit dem Prozess und einem entfernten Beobachter (z. B. ein Regelglied) dargestellt.

Ein Prozess ist durch verschiedene physikalische Größen charakterisiert, die dessen Zustand repräsentieren. Beispielsweise kann durch die Temperatur in einem Raum etwas über seine Behaglichkeit ausgesagt werden. Um Messwerte aufzunehmen, werden Sensoren innerhalb des Prozesses eingebracht, die mit einem Signal Informationen über die physikalischen Größen liefern. Oft befindet sich der Beobachter, den das Signal interessiert, nicht unmittelbar am Ort der Signalquelle. Deshalb muss das Signal anschließend von der Quelle zu dem Beobachter transportiert werden. Damit wird aber innerhalb der Regelstrecke eine Totzeit bei der Nachrichtenübertragung¹ hinzugefügt.

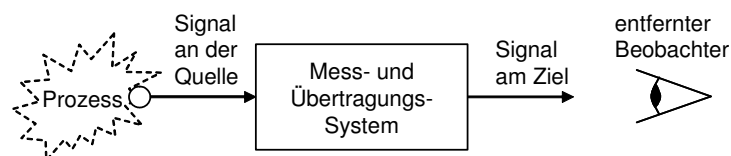


Abbildung 2.1: An einem Prozess wird ein Signal gemessen und über ein Übertragungssystem an einen entfernten Beobachter geliefert.

Eine entscheidende Anforderung an die Nachrichtenübermittlung aus Sicht des Beobachters ist eine möglichst geringe Verfälschung des Messwertes. Die Gesamtverfälschung

¹Der Begriff *Nachricht* wird in dieser Arbeit synonym mit dem Begriff *Paket* verwendet.

eines Messwertes setzt sich dabei aus Verfälschungen bei der Abtastung in der prozessnahen Sensoreinheit und bei der Nachrichtenübertragung zusammen. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Verfälschung durch die Abtastung vernachlässigt. Es wird angenommen, dass ein Messwert aufgenommen und in einer Nachricht verpackt wurde. Mechanismen, mit denen Nachrichten ausgelöst werden können, werden im folgenden Abschnitt 2.1 dargestellt. Kern der Arbeit ist das drahtlose Sensornetz als Übertragungssystem nach dem Abtasten des Signals.

Als Ursache für ausgelöste Nachrichten werden in Abschnitt 2.2 physikalische Größen nach der Wirkung auf die Ankunftsrate klassifiziert. Es wird dargestellt, welche Art von physikalischen Größen bei der Anpassung des Arbeitszyklus in Betracht gezogen werden können. Anschließend wird in Abschnitt 2.3 anhand von Beispielen untersucht, welche allgemeinen Aussagen über die Verkehrscharakteristik abgeleitet werden können.

Die Beobachtung physikalischer Größen wirkt sich im Zusammenhang mit einem Regelkreis auf die Regelbarkeit von Prozessen aus. In Abschnitt 2.4 wird deshalb der Zusammenhang zwischen der netzbedingten Verzögerungszeit und der Systemdynamik angesprochen. Die Darstellung in diesem Abschnitt bezieht sich in vereinfachter Art auf regelungstheoretische Zusammenhänge. Details dazu können der einschlägigen Literatur (z. B. Lunze [Lun04], Bergmann [Ber99] und Samal [SB00]) entnommen werden. Abschließend liefert der Abschnitt 2.5 eine kurze Zusammenfassung.

2.1 Auslösen von Nachrichten

Unter dem Auslösen von Nachrichten soll im Rahmen dieser Arbeit verstanden werden, dass ein bestimmter Anlass zugrunde liegen muss, um Nutzdaten für eine Nachricht zu erhalten und zu verpacken. In diesem Abschnitt werden die möglichen vorliegenden Anlässe erläutert.

Für die folgende Darstellung wird vorausgesetzt, dass ein Sensor den Zustand einer physikalischen Größe umformt und als maschinenlesbares Signal (z. B. Spannung) zur Verfügung stellt. Um aus diesem Signal eine Nachricht mit einem Messwert zu generieren, ist zunächst eine Analog-Digital-Wandlung nach vorherigem Halten und Abtasten notwendig. Dabei muss gesichert sein, dass das Nyquist-Theorem

$$f_s > 2 \cdot f_G \tag{2.1}$$

für die Abtastfrequenz f_s erfüllt ist [Kop97]. Sie muss mehr als doppelt so hoch wie die höchste Signalfrequenz f_G sein. Lunze [Lun04] empfiehlt für die praktische Anwendung in der Regelungstechnik eine deutlich höhere Abtastfrequenz mit

$$6 \cdot f_G \leq f_s \leq 20 \cdot f_G, \tag{2.2}$$

die für die Rekonstruktion des Verlaufes besser geeignet ist. Nach der Analog-Digital-Wandlung liegt eine Zeitreihe der physikalischen Größe vor. In Abbildung 2.2 (a) wird eine abgetastete physikalische Größe beispielhaft dargestellt. Nach der Abtastung und Diskretisierung, wird der Messwert ggf. gespeichert und einer Vorverarbeitung unterzogen.

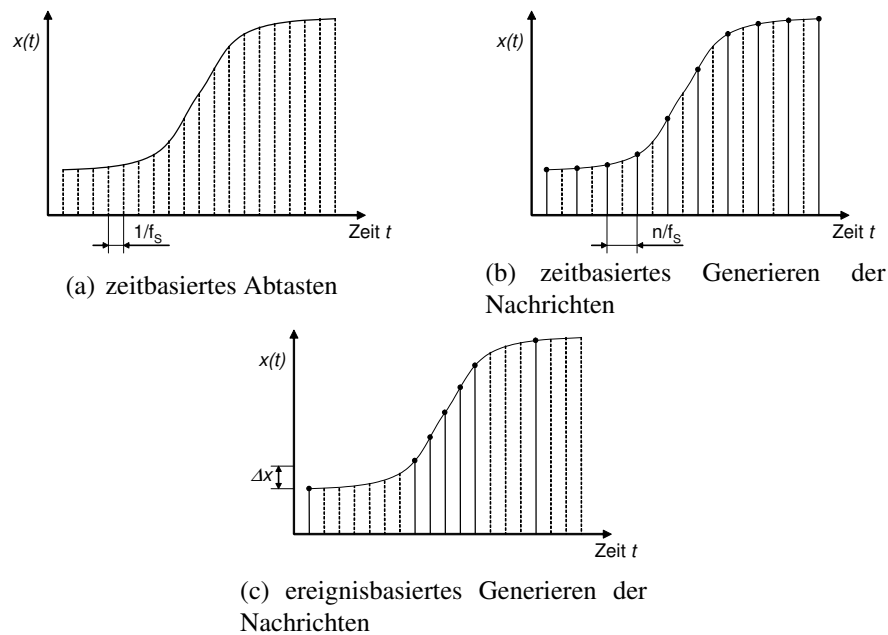


Abbildung 2.2: Das (a) zeitbasierte Abtasten einer physikalischen Größe ist die Grundlage für das (b) zeitbasierte und (c) ereignisbasierte Generieren von Nachrichten.

Aus einem oder mehreren Messwerten werden anschließend Nachrichten generiert und über das Netz an den Empfänger (z. B. Regelglied) gesendet. Wie in Abschnitt 1.1 erwähnt, soll ein Messglied durch ein Sensornetz realisiert werden. An dieser Stelle ist die Anzahl der generierten Nachrichten pro Zeiteinheiten und damit die Strategie zum Auslösen von Nachrichten eine entscheidende Größe. Liegt die Anzahl der Nachrichten pro Zeit über der Kapazität der Übertragungstrecke im Netz, kann es zu Nachrichtenverlusten, z. B. durch Pufferüberläufe, kommen. Die Nachrichtenhäufigkeit wird durch die Ankunftsrate λ beschrieben und in Nachrichten pro Sekunde (1/s) gemessen.

Neben der Last beeinflusst auch die Häufigkeit der Nachrichten den Energieverbrauch. Je mehr Nachrichten übertragen werden, desto häufiger muss die Übertragungseinheit aktiv sein. Dadurch steigt der Energieverbrauch mit der Nachrichtenhäufigkeit. Sie hängt von der zu beobachtenden physikalischen Größe und der Parametrierung ab. Es ist dabei zu unterscheiden, aufgrund welches Anlasses eine Nachricht generiert wird. Ein solcher Anlass kann zeit- oder ereignisbasiert eintreten. Beide Methoden werden im Folgenden näher betrachtet.

Nachrichten zeitbasiert zu generieren bedeutet, den aktuellen Messwert nach Ablauf einer bestimmten Zeit t_{imt} zu senden. Da neue Messwerte nur im Abstand $1/f_S$ verfügbar sind, ist es sinnvoll, die Zeit zwischen zwei Nachrichten als ganzzahliges Vielfaches n durch

$$t_{imt} = \frac{n}{f_S}, \quad (2.3)$$

festzulegen, wobei $n \geq 1$ und $n \in \mathbb{N}$ gilt. Die Zahl der Nachrichten, die in dem Messglied pro Zeiteinheit generiert werden, ergibt sich damit aus

$$\lambda = \frac{1}{t_{imt}} = \frac{f_S}{n}. \quad (2.4)$$

In Abbildung 2.2 (b) ist ein Beispiel für $n = 2$ dargestellt. Die mit dem Punkt gekennzeichneten Abtastwerte fließen jeweils als Nutzdaten in eine Nachricht ein. Treten keine oder geringe Änderungen der physikalischen Größe auf (z. B. erste drei Messwerte in Abbildung 2.2 (b)), werden redundante Messwerte übertragen. Zum einen wird die Last auf dem Übertragungsmedium dadurch erhöht, zum anderen wird zusätzlich Energie verbraucht. Insbesondere in batteriebetriebenen Sensorknoten wird die Lebensdauer dadurch erheblich verringert. Um die Redundanz und den Energieverbrauch zu reduzieren, kann das in der Gebäudeautomatisierung verbreitete `sendOnDelta`-Prinzip [Mot95],[DLS98] eingesetzt werden. Es bedeutet, dass ein Messwert nur dann aufgenommen und in einer Nachricht versendet wird, wenn sich die physikalische Größe $x(t)$ um einen Betrag Δx ändert. Energie zum Versenden von Nachrichten wird nur benötigt, wenn ein bestimmtes Ereignis (Änderung der physikalischen Größe) aufgetreten ist. Das `sendOnDelta`-Prinzip wird in verwandten Arbeiten auch als *level-crossing sampling* [Mis06] oder *deadbands* [OMT02] bezeichnet. In Abbildung 2.2 (c) wird das `sendOnDelta`-Prinzip auf den Verlauf einer beispielhaften physikalischen Größe $x(t)$ angewendet. Im Zeitraum der ersten sieben Abtastwerte würde das Messglied nur eine Nachricht mit dem ersten Abtastwert generieren. Aufgrund des starken Anstieges werden im mittleren Bereich die fünf aufeinander folgenden Abtastwerte in Nachrichten übertragen.

Neben Δx können weitere zwei Parameter für den minimalen ($t_{minSendTime}$) und maximalen ($t_{maxSendTime}$) Abstand zwischen zwei Nachrichten vereinbart werden. Das bedeutet, dass die Ankunftsrate eine obere ($1/t_{minSendTime}$) und untere ($1/t_{maxSendTime}$) Grenze besitzt. Um diese Parameter sinnvoll setzen zu können, sind Wissen über die Signalcharakteristik bzw. Anforderungen an Reaktionszeiten erforderlich. Wenn die Parameter $t_{minSendTime}$ und $t_{maxSendTime}$ hinreichend weit von der mittleren Zwischenankunftszeit entfernt sind, haben sie nur geringen Einfluss auf die Verteilung der Ankunftsrate [PNK04]. Daher werden diese Parameter im Rahmen dieser Arbeit vernachlässigt.

Das `sendOnDelta`-Prinzip bietet bei der Anwendung in drahtlosen Sensornetzen den Vorteil, dass Energie für die Übertragung nur dann eingesetzt wird, wenn ein Ereignis eingetreten ist. Zudem belasten bei geeigneter Parametrierung nur eine geringere Zahl an

Nachrichten das Medium. Wenn zudem mit einem kollisionsbehafteten Mechanismus auf das Medium zugegriffen wird, kann durch reduzierte Last auch die Anzahl der Kollisionen und damit der Energieverbrauch reduziert werden.

2.2 Klassifikation der Ankunftsrate

Wenn Nachrichten mit Messwerten zeitbasiert generiert werden, ist die Ankunftsrate der von einem Messglied zu erwartenden Nachrichten konstant und bekannt. Der Arbeitszyklus (siehe Kapitel 3.2) muss sich in diesem Fall an der Nachrichtenhäufigkeit orientieren. Er kann vor Betriebsbeginn entsprechend eingestellt werden, um die Messwerte mit der erforderlichen Häufigkeit zum Regelglied zu transportieren. Werden die Nachrichten ereignisbasiert generiert, ist der Zusammenhang zwischen dem Größenverlauf und dem Parameter Δx entscheidend für die Ankunftsrate. Bei genauer Kenntnis der Charakteristik der zu beobachtenden physikalischen Größe lässt sich die zu erwartende Ankunftsrate durch vorherige Analyse des Verlaufs abschätzen. Aus Referenzmessungen und dem Parameter Δx können Zwischenankunftszeiten und damit die mittlere Ankunftsrate bestimmt werden. Diese vorherige Analyse ist jedoch nicht immer möglich.

Um Verständnis über den Ankunftsprozess zu erlangen und geeignete Annahmen für die spätere Leistungsbewertung treffen zu können, werden in diesem Abschnitt physikalische Größen mit Bezug auf die Ankunftsrate näher betrachtet. Plönnigs [PNK04], [PBNK06] hat dazu ein Modell vorgestellt, mit dem die Ankunftsrate der Nachrichten für Mess- und Regelglieder klassifiziert und charakterisiert werden kann.

In Abbildung 2.3 ist diese Klassifikation für Quellen der Ankunftsrate dargestellt. Da ein Sensornetz innerhalb der vorliegenden Arbeit nur zur Unterstützung eines Messgliedes eingesetzt werden soll, wird in der Klassifikation nur der Bereich der Quellen von Verkehr betrachtet. Die zweite Ebene in Abbildung 2.3 stellt die Unterscheidung nach der Art wie Nachrichten ausgelöst werden, dar. Wenn ein Sensorknoten Nachrichten zeitbasiert auslöst, wird am Ausgang des Sensors eine konstante Nachrichtenrate zu beobachten sein. Die Einstellung des Arbeitszyklus stellt dann kein Problem dar, weil sie direkt aus der Häufigkeit der Nachrichten abgeleitet werden kann. Die in Abschnitt 1.1 geforderte Zusammenführung zwischen den oberen Anwendungsschichten und den Ebenen der Übertragung würde durch Konfiguration eines festen Arbeitszyklus gelöst. Im Gegensatz dazu wird die Ankunftsrate bei ereignisgetriebenem Auslösen der Nachrichten nicht konstant sein. Wie in Abschnitt 2.3 gezeigt wird, folgen physikalische Größen in der Gebäudeautomatisierung bei der Zwischenankunftszeit einer bestimmten Verteilung. Die dritte Ebene in Abbildung 2.3 stellt diese Eigenschaft heraus. Als unabhängig verteilt können nach Plönnigs [PNK04] z. B. Interaktionen des Menschen mit den Einrichtungen der Gebäudeautomatisierung (Betätigen eines Lichtschalters) verstanden werden. Diese Charakteristik der Ankunftsrate liegt nicht im Fokus dieser Arbeit. In der letzten

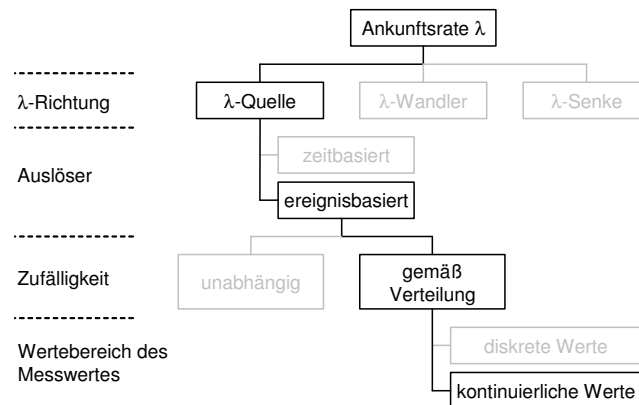


Abbildung 2.3: Bezüglich der Ankunftsrate können die Geräte nach Quelle, Wandler und Senke eingeteilt werden. Die Nachrichten können ereignisbasiert generiert werden und folgen je nach physikalischer Größe in ihrer Häufigkeit einer Verteilung. Quellen, die ereignisbasiert, gemäß einer Verteilung, Nachrichten auslösen, stehen im Blickpunkt dieser Arbeit.

Ebene in Abbildung 2.3 wird charakterisiert, in welchem Wertebereich sich die gemessenen Größen befinden. Physikalische Größen mit kontinuierlichem Wertebereich werden in dieser Arbeit genauer betrachtet. Beispiele dafür werden im nächsten Abschnitt analysiert. Größen mit diskretem Wertebereich (z. B. Frostsensor mit dem Zustand *Frostgefahr* oder *keine Frostgefahr*) werden hier für die Betrachtung der Charakteristik vernachlässigt.

Innerhalb der vorliegenden Arbeit stehen die markierten Bereiche in Abbildung 2.3 im Fokus der Analyse. Im folgenden Abschnitt werden dazu beispielhaft Größen aus der Gebäudeautomatisierung analysiert und mit einer Verteilung näher charakterisiert.

2.3 Physikalische Größen der Gebäudeautomatisierung

Für die Analyse von Verläufen physikalischer Größen wird auf die Ergebnisse des Projektes NetPlan zurückgegriffen. In diesem Projekt wurden verschiedene physikalische Größen im Umfeld der Gebäudeautomatisierung untersucht [PNK04] [KBP] und charakterisiert. Die zugrunde liegenden Datensätze entstammen der Langzeitmessung einer Wetterstation im Gebiet Würzburg [FJ86]. Sie werden in ihrem Jahresverlauf als hinreichend repräsentativ angenommen, da Wettergrößen über einen charakteristischen Jahreszyklus verfügen.

In den Abbildungen 2.4 (a) und (b) sind beispielhaft die Temperatur und die relative Feuchte im Verlauf eines Jahres dargestellt. Der gezeigte Temperaturverlauf spiegelt einen

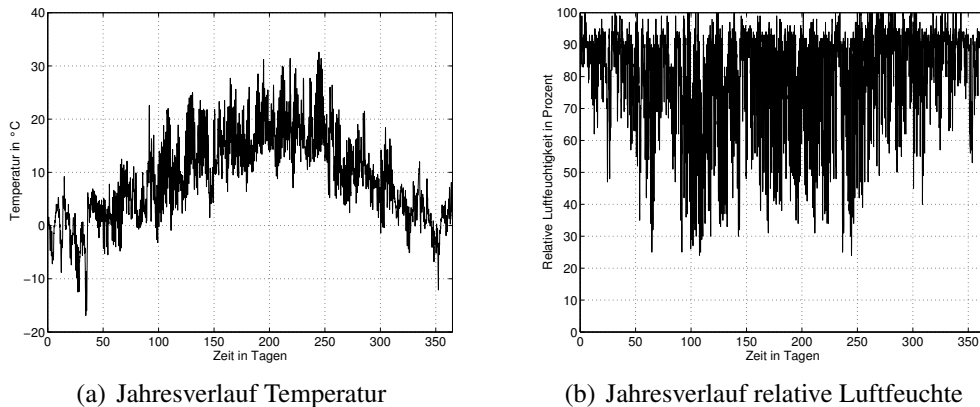


Abbildung 2.4: Reale Jahresverläufe physikalischer Größen werden analysiert, um die Verteilung der mittleren Ankunftsrate zu bestimmen.

für den mitteleuropäischen Raum typischen Verlauf wider. Den generell höheren Temperaturen im Sommer und geringeren Temperaturen im Winter ist die typische Schwankung im Bereich von mehreren Stunden bis Tagen überlagert. Die relative Feuchte ist von der Temperatur und dem Wassergehalt der Luft abhängig. Sie weist im Verlauf eines Jahres starke Schwankungen im Bereich von ca. 30 % bis 100 % auf. Im Bereich des Herbstes (ca. 250ter bis 300ter Tag) ist dabei die für die Jahreszeit typische Häufung von hohen relativen Feuchten zu erkennen.

Diese beiden und acht weitere physikalische Größen (in Tabelle 2.1 erste Spalte) bilden die Grundlage für die weitere Untersuchung. Aus diesen Verläufen werden im ersten Schritt der mittlere Anstieg $|x'(t)|_{mean}$ und der maximale Anstieg $|x'(t)|_{max}$ jeder physikalischen Größe über der Zeit bestimmt. Die Anstiege werden in Einheiten pro Sekunde gemessen. In Tabelle 2.1 ist die Charakteristik der Anstiege der zehn verschiedenen Wettergrößen dargestellt.

Um diese Ergebnisse hinsichtlich der Dynamik einordnen zu können, müssen die Anstiege im Zusammenhang mit dem Wertebereich der jeweiligen physikalischen Größe betrachtet werden. Beispielsweise schwankt die Temperatur innerhalb eines Jahres um ca. 50 °C, wobei der maximale Anstieg ca. vier Zehnerpotenzen kleiner ist. Wenn das entsprechende Messglied so parametrisiert ist, dass bei einer Änderung der Temperatur um $\Delta x = 0,1$ °C eine Nachricht generiert wird, beträgt bei $|x'(t)|_{mean} = 1,85 \cdot 10^{-04}$ der mittlere Abstand zwischen zwei Nachrichten 9 min. Der minimale Abstand zwischen zwei Nachrichten würde bei $|x'(t)|_{max} = 1,17 \cdot 10^{-03}$ ca. 85 s betragen. Ein ähnlicher Zusammenhang ist bei der relativen Luftfeuchte festzustellen, die zwischen 0,25 (25%) und 1 (100%) schwankt, bei einem maximalen Anstieg der ca. fünf Zehnerpotenzen unter der Schwankungsbreite liegt.

Im NetPlan-Projekt wurde zusätzlich zur Analyse der aufgezeichneten Größen ein Modell der Zusammenhänge von verschiedenen physikalischen Größen der

Tabelle 2.1: Die Analyse der Wettergrößen liefert sehr geringe Anstiege. Sie werden in Einheiten pro Sekunde gemessen.

Größe	Einheit	$ x'(t) _{mean}$	$ x'(t) _{max}$
1. Himmelsbedeckung	-	$1,67 \cdot 10^{-05}$	$1,39 \cdot 10^{-04}$
2. Windrichtung	°	$1,73 \cdot 10^{-02}$	$9,72 \cdot 10^{-02}$
3. Windgeschwindigkeit	m/s	$2,90 \cdot 10^{-04}$	$2,69 \cdot 10^{-03}$
4. Niederschlag	mm/h	$1,36 \cdot 10^{-05}$	$1,92 \cdot 10^{-03}$
5. Luftdruck	hpa	$9,00 \cdot 10^{-05}$	$7,50 \cdot 10^{-04}$
6. Lufttemperatur	°C	$1,85 \cdot 10^{-04}$	$1,17 \cdot 10^{-03}$
7. Relative Luftfeuchte	-	$8,45 \cdot 10^{-06}$	$5,83 \cdot 10^{-05}$
8. Direkte Sonnenstrahlung	W/m ²	$9,70 \cdot 10^{-03}$	$1,08 \cdot 10^{+01}$
9. Diffuse Himmelsstrahlung	W/m ²	$5,38 \cdot 10^{-03}$	$2,48 \cdot 10^{+00}$
10. Helligkeit	lx	$1,33 \cdot 10^{+00}$	$1,12 \cdot 10^{+03}$

Gebäudeautomatisierung entwickelt [KBP]. Ein Musterraum, der sich in seiner gerätetechnischen Ausstattung an der heutigen Gebäudeautomatisierung orientiert, dient als Untersuchungsgegenstand. Es liegen für diesen Musterraum zwei verschieden realisierte Modelle vor, in Software als Matlab-Modell und als tatsächlicher Versuchsaufbau. Anhand dieser Modelle können physikalische Größen der Gebäudeautomatisierung im Zusammenhang studiert werden.

Die Untersuchungen an diesem Musterraum führen hinsichtlich der Dynamik physikalischer Größen im Gebäude zu ähnlichen Ergebnisse wie die Einzelmessungen der Wettergrößen, wo der Anstieg um mehrere Zehnerpotenzen kleiner als die Schwankungsbreite ist.

Im zweiten Schritt analysiert Plönnigs [PNK04], welcher Verteilung die Anstiege der Wettergrößen unterworfen sind. Dazu wurde über den Jahresverlauf aller zehn vorliegenden Wettergrößen aus Tabelle 2.1 die Häufigkeit der Anstiege ermittelt. In Abbildung 2.5 sind die Ergebnisse der Analyse dargestellt. Die Bezeichnungen der Datensätze entsprechen der Nummerierung in Tabelle 2.1. Alle Datensätze sind auf den mittleren Anstieg $|x'(t)|_{mean}$ normiert. Zum Vergleich ist zwischen Datensatz 3 und 9 die Exponentialverteilung eingefügt. Die untersuchten Größen weisen in ihrer Verteilung des Anstieges Ähnlichkeit mit der Exponentialverteilung auf.

Aus den Verläufen der Wettergrößen läßt sich mit Kenntniss der Parametrierung der Sensoren (Δx , $t_{minSendTime}$, $t_{maxSendTime}$) die mittlere Ankunftsrate berechnen. Plönnigs [PNK04] beschreibt diesen Zusammenhang zwischen einer beliebigen physikalischen Größe und der Parametrierung im Detail. In der vorangegangenen Arbeit wird gezeigt, dass die mittlere Ankunftsrate durch

$$\lambda \approx \min \left(\frac{1}{t_{minSendTime}}; \max \left(\frac{1}{t_{maxSendTime}}; \frac{|x'|_{mean}}{\Delta x} \right) \right) \quad (2.5)$$

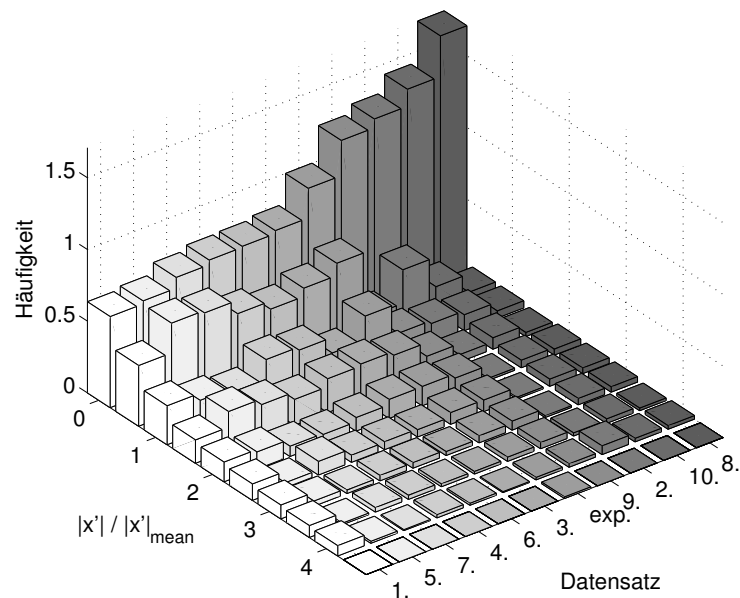


Abbildung 2.5: Die Verteilung des Anstiegs von Wettergrößen kann durch eine Exponentialverteilung angenähert werden.

abgeschätzt werden kann. Die damit verbundenen Analysen haben gezeigt, dass für eine Reihe von Wettergrößen eine zufällig exponentialverteilte Zwischenankunftszeit eine geeignete Näherung darstellt. Die Ankünfte der Nachrichten können daher als POISSON-Prozess angenommen werden.

Für die im nächsten Kapitel zu leistende Anpassung zwischen Anwendungs- und Übertragungsebenen sowie für die spätere Validierung werden aus der Analyse der physikalischen Größe Anleihen für zwei Annahmen genommen:

1. Es gibt eine Reihe von Prozessen (z. B. in der Gebäudeautomatisierung), bei denen sich die physikalischen Größen nur sehr langsam ändern. Werden Nachrichten nach dem sendOnDelta-Prinzip generiert, muss mit einer sehr geringen Ankunftsrate gerechnet werden.
2. Bei der Generierung der Nachrichten können zufällig exponentialverteilte Zwischenankunftszeiten angenommen werden. Daher kann der Ankunftsprozess durch die POISSON-Verteilung modelliert werden.

Bei genauerer Betrachtung des Zusammenhanges zwischen einer physikalischen Größe und den Ankünften stellt sich heraus, dass zeitliche Abhängigkeiten bestehen können. Beispielsweise sind während der Anstiegsphase einer physikalischen Größe die Zeitpunkte der Generierung von Nachrichten nicht voneinander unabhängig. Es kann innerhalb dieser Anstiegsphase eine Häufung von Nachrichten auftreten. Ein POISSON-Prozess

modelliert diese zeitliche Abhängigkeit nicht, da die Unabhängigkeit der Ereignisse vorausgesetzt wird. Aufgrund der Zufälligkeit können dennoch kurzzeitig Häufungen von Nachrichten auftreten.

Im Vergleich zum POISSON-Prozess erscheint es sinnvoll, die Ankünfte zusätzlich mit Bursts zu modellieren. Für den Verlauf physikalischer Größen, wie beispielsweise in der Gebäudeautomatisierung, existieren derzeit allerdings keine entsprechenden Modelle. Im Zusammenhang mit anderen Anwendungen konnten bereits geeignete Modelle aufgestellt werden. Jasperneite [Jas02] untersucht beispielsweise burst-artigen Verkehr im Umfeld der Industrieautomatisierung. Untersuchungen von Mah [Mah97] zeigen Ähnliches für HTTP-Verbindungen im Internet.

Insbesondere bei der Validierung in Kapitel 5 ist es wünschenswert, auch burst-artigen Verkehr bei der Leistungsanalyse zu berücksichtigen. Dort wird deshalb ein vereinfachtes Burst-Modell angenommen, bei dem veränderliche Ankunftsraten λ die zeitweise Änderung des Ankunftsprozesses modellieren. Dadurch können kritische Situationen in der Leistungsbewertung berücksichtigt werden.

2.4 Beziehung zwischen Verzögerungszeit und Systemdynamik

Im regelungstechnischen Sinne erhöht die Übertragung eines Messwertes durch das Sensornetz die Totzeit T_t ². Wenn das Sensornetz kontinuierlich aktiv ist, wirken sich nur die reinen Bitübertragungszeiten zuzüglich der Verarbeitungszeiten in den Sensoren und der Vermittlungsstation auf die Totzeit aus. Die Totzeit führt ähnlich wie die Verzugszeit T_u zum verzögerten Wahrnehmen von Änderungen der Regelstrecke.

Aus energetischen Gesichtspunkten ist kontinuierliche Aktivität allerdings nicht wünschenswert, da sie einen unverhältnismäßig hohen Energieverbrauch nach sich ziehen würde. Daher sind zeitweise passive Phasen³ einzufügen.

Die Häufigkeit, mit der passive Phasen eingefügt werden dürfen, hängt eng mit der Dynamik der zu beobachtenden Strecke zusammen. Bei Strecken mit häufigeren Änderungen sollte das Sensornetz für die Nachrichtenübertragung auch häufiger aktiv sein als bei langsam veränderlichen Strecken. Durch die passiven Phasen wird die Totzeit zusätzlich durch

²Im regelungstechnischen Sprachgebrauch ist der Begriff *Totzeit* üblich. Er entspricht im Zusammenhang der vorliegenden Arbeit der Verzögerungszeit, die in einem Netz bei der Übertragung von Nachrichten entsteht. Die Totzeit wird daher im Rahmen dieser Arbeit synonym mit der Verzögerungszeit der Nachrichten verwendet. Der Begriff *Verzugszeit* stammt auch aus dem Gebiet der Regelungstechnik und kann nicht mit der Verzögerungszeit der Nachrichten gleichgesetzt werden. Vielmehr bezieht er sich auf Eigenschaften der zu regelnden Strecke.

³Das Konzept der passiven und aktiven Phase in drahtlosen Sensornetzen wird in Abschnitt 3.2 dargestellt.

Wartezeiten in den Sensorknoten erhöht. Sie entstehen, wenn Nachrichten innerhalb der passiven Phase generiert werden. Es muss dann bis zur nächsten aktiven Phase des Netzes gewartet werden, um die Nachricht zu übertragen.

Bei unterschiedlicher Systemdynamik können gleiche Tot- und Verzugszeiten die Gesamtsysteme auf verschiedene Weise beeinflussen. Zwei Beispiele für Strecken mit unterschiedlicher Sprungantwort (mit Sprung bei t_0) sind in den Abbildungen 2.6 (a) und (b) dargestellt. In den Beispielen wird die jeweilige Summe der Tot- und Verzugszeiten ($T_t + T_u$) für beide Strecken als gleich angenommen. Dieser Fall kann auftreten, wenn die gleiche Technik für die Übermittlung des Messwertes von der Signalquelle zu dem entfernten Beobachter eingesetzt wird. Die Sprungantworten in den Abbildungen 2.6 (a) und (b) sind vereinfacht dargestellt und können auch Strecken mit mehreren Verzögerungen approximieren [SB00] [Lun04].

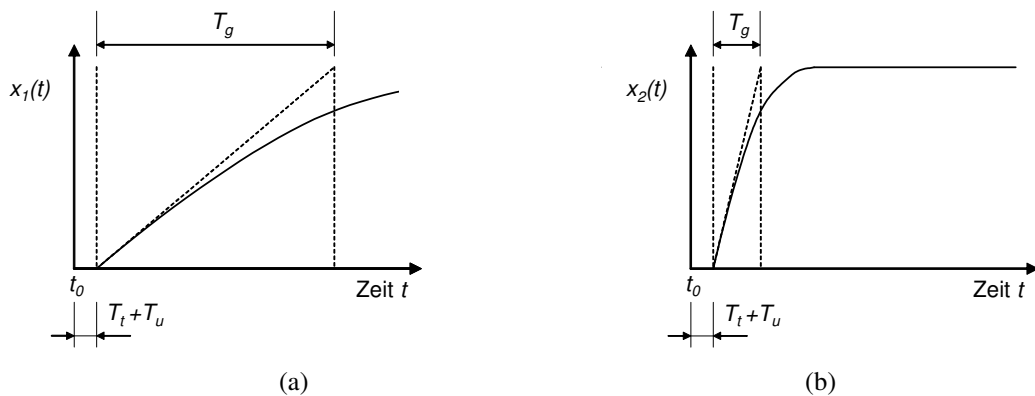


Abbildung 2.6: Durch die Tot- und Verzugszeit kommt das Signal von der Quelle verzögert bei dem entfernten Beobachter an. Die Wirkung der gleichen Tot- und Verzugszeit kann sich unterschiedlich auf die Regelbarkeit von (a) langsamen und (b) schnellen Prozessen auswirken. Das Zeitkonstantenverhältnis $T_g/(T_t + T_u)$ ist bei einem langsamen Prozess größer als bei einem schnellen.

Bei der Bewertung wirkt sich die gleiche Summe aus Tot- und Verzugszeit ($T_t + T_u$) unterschiedlich auf die Regelbarkeit der Strecken in der Praxis aus. Nach Kabitzsch [Kab87], Bergmann [Ber99] und Samal [SB00] werden dafür verschiedene Stufen angewendet. Sie beziehen sich auf das Verhältnis zwischen der Ausgleichzeit T_g und der Summe aus Tot- und Verzugszeit ($T_t + T_u$) einer Strecke:

$$\begin{aligned}
 \frac{T_g}{T_t + T_u} &\leq 3 && \text{schlecht regelbar} \\
 \frac{T_g}{T_t + T_u} &\approx 6 && \text{noch regelbar} \\
 \frac{T_g}{T_t + T_u} &\geq 10 && \text{gut regelbar}
 \end{aligned} \tag{2.6}$$

In den Beispielen der Abbildungen 2.6 (a) und (b) weisen die Strecken unterschiedliche Zeitkonstanten T_g auf. Die erste Strecke mit dem Signal $x_1(t)$ ändert sich wesentlich langsamer als die zweite Strecke mit $x_2(t)$, daher ist $T_{g,x_1} > T_{g,x_2}$. Anhand der Regel in den Gleichungen (2.6) kann das Zeitkonstantenverhältnis für die erste Strecke mit $T_{g,x_1}/(T_t + T_u) \approx 10$ und für die zweite Strecke mit $T_{g,x_2}/(T_t + T_u) \approx 2$ abgeschätzt werden. Die erste Strecke wird daher gut regelbar sein, wobei die zweite als schlecht regelbar eingeordnet wird⁴.

Mit den Regeln in den Gleichungen (2.6) kann die Dimensionierung der Übertragungstrecke innerhalb eines Messgliedes unterstützt werden. Wenn die Zeitkonstante T_g eines zu beobachtenden Prozesses bekannt ist, kann die maximale Dauer von Tot- und Verzugszeit, die durch die Nachrichtenübertragung und Verzögerungsglieder der Strecke zulässig ist, direkt abgeleitet werden. Sie ergibt sich aus

$$(T_t + T_u) \leq \frac{T_g}{10}. \quad (2.7)$$

Die Netze für die Nachrichtenübertragung müssen dann dieser Forderungen nachkommen und entsprechende Totzeiten realisieren können.

Es kann allerdings nicht für jeden zu beobachtenden Prozess vorausgesetzt werden, dass die Sprungantwort der Strecke und damit die Ausgleichszeit T_g vor Betriebsbeginn bekannt ist. Auch Analysen von physikalischen Signalen, wie in Abschnitt 2.3 ausgeführt, sind nicht immer verfügbar. Es könnten also vor dem Betriebsbeginn keine maximalen Verzögerungszeiten der Nachrichtenübertragung gefordert werden.

Wenn die Nachrichten ereignisgetrieben ausgelöst werden (siehe Abschnitt 2.1), lässt sich die Dynamik jedoch indirekt über die Häufigkeit der Nachrichten abschätzen. Grundlage dafür ist der Zusammenhang in Gleichung (2.5) und das Wissen um den Parameter Δx . Je höher die Ankunftsrate λ desto häufiger ändert sich der Zustand der physikalischen Größe und desto größer wird auch der zu erwartende Anstieg sein. Die resultierende Ankunftsrate ist der Ausgangspunkt in der vorliegenden Arbeit. Sie wird im Zusammenspiel mit dem eigentlichen Fokus - den Schichten für die Nachrichtenübertragung - betrachtet. Da sich die Ankunftsrate erst bei der Beobachtung einer Strecke aus der Signalcharakteristik und dem Sensorparameter Δx ergibt, kann sie auch erst während des Betriebs abgeschätzt werden und in die Einstellung der Häufigkeit der passiven Phase einfließen. In Anhang C wird eine weiterführende Idee für die Formulierung des Zusammenhangs zwischen der Systemdynamik und der Verzögerungszeit diskutiert.

⁴Es ist festzuhalten, dass hier ein Maß mit relativem Bezug zur Systemcharakteristik für die Bewertung herangezogen wird. Im späteren Teil der Arbeit (Abschnitt 5.2.2) wird dieser Ansatz des relativen Maßes aufgegriffen und für die Bewertung der Leistungsfähigkeit der zu entwickelnden Arbeitszyklusanpassung herangezogen

2.5 Zusammenfassende Bewertung

In diesem Kapitel wurden Aspekte potenzieller Anwendungen von drahtlosen Sensornetzen untersucht. Ein drahtloses Sensornetz wird dabei im regelungstechnischen Sinn als Messglied verstanden. Für die weitere Arbeit werden aus diesem Kapitel folgende Punkte nochmals herausgestellt:

- Ein **drahtloses Sensornetz** kann als Teil des Messglieds innerhalb einer Regelstrecke aufgefasst werden. Es **fügt** der Verzugszeit einer Strecke eine übertragungsbedingte **Totzeit hinzu**.
- Aus **energetischen** Gesichtspunkten ist es **sinnvoll**, an der Signalquelle die **Nachrichten ereignisorientiert** auszulösen.
- Im Gebiet der Gebäudeautomatisierung existieren verschiedene **physikalische Größen**, die sich nur sehr **langsam ändern**. Sie können als Beispiel für Beobachtungsaufgaben auch außerhalb der Gebäudeautomatisierung aufgefasst werden.
- Die Anstiege der analysierten physikalischen Größen sind exponentialverteilt. Der resultierende **Verkehr** kann als **POISSON-verteilt** angenommen werden.
- Zwischen der übertragungsbedingten Totzeit des Messgliedes und der Dynamik von Strecken besteht ein Zusammenhang, der durch ein **relatives Maß (Zeitkonstantenverhältnis)** ausgedrückt und einer regelungstechnischen Bewertung unterzogen werden kann.

Diese Aspekte werden für die Weiterentwicklung in Kapitel 4 aufgegriffen und zur Bewertung in Kapitel 5 verwendet.

3 Energieeffizienz in drahtlosen Netzen

In drahtlosen Netzen sind Kommunikationsteilnehmer¹ nicht durch Kabel verbunden, sondern tauschen Informationen über eine Funkverbindung aus. Für die Verbindung müssen Teile des OSI-Schichtenmodells an die drahtlose Übertragungstechnik angepasst sein.

Die kommunizierenden Teilnehmer können entweder aus fremden Quellen über Kabel mit Energie versorgt werden oder eine Batterie zur Energieversorgung mit sich führen. Vollständig drahtlos ist ein Kommunikationsteilnehmer erst dann, wenn auch die Energieversorgung keine Kabel zur Anbindung erfordert. Beispiele dafür sind im Mobilfunk zu finden, wo die Endgeräte keine Kabel für die Energieversorgung benötigen. Batterien, die in den Endgeräten integriert sind, bieten sich als eine mögliche Energiequelle an.

Zusätzlich kann mit modernen Techniken der Energieumformung auf kleinstem Raum Energie aus der Umgebung gewonnen und in die Batterien eingespeist werden. Diese Techniken haben derzeit allerdings noch nicht die Reife für breite Anwendung in drahtlosen Netzen erreicht, sondern sind meist nur auf Spezialanwendungen bzw. experimentelle Anwendungen fokussiert ([Sch03], [Per]). Die zu erzielenden Leistungen bewegen sich außerdem in Größenordnungen von einigen μW [Rou03]. Dadurch können nur Verbraucher mit sehr geringem Energiebedarf versorgt werden.

Sowohl in ausschließlich batteriebetriebenen Knoten als auch in Knoten, die durch zusätzlich integrierte Einrichtungen mit Energie versorgt werden, ist die Energie eine knappe Ressource. Sie muss effizient eingesetzt werden, um z. B. Funktionsausfall zu vermeiden. Diese Effizienz beim Einsatz der Energie für die Übertragung von Informationen steht im Blickpunkt dieser Arbeit.

Nach einer Einordnung des Begriffs der drahtlosen Sensornetze in Abschnitt 3.1 werden in den Abschnitten 3.2 und 3.3 verschiedene Ansätze betrachtet, die den Energieverbrauch bei der drahtlosen Nachrichtenübertragung reduzieren helfen. Insbesondere wird dabei

¹Unter Kommunikationsteilnehmer wird im Rahmen dieser Arbeit nicht nur der Mensch als Benutzer einer technischen Einrichtung zum Informationsaustausch verstanden. Auch eine Maschine kann ein Kommunikationsteilnehmer sein. Die Begriffe Kommunikationsteilnehmer, Teilnehmer und Knoten werden im Verlauf dieser Arbeit synonym verwendet.

der Schwerpunkt auf die Anpassung des Arbeitszyklus unter Berücksichtigung der Anwendungsbedürfnisse gelegt. In etablierten Standards sind bereits Verfahren zum Energiesparen festgelegt. Sie werden in Abschnitt 3.4 dargestellt. Abschließend zu diesem Kapitel werden in Abschnitt 3.5 weitere Möglichkeiten zum Energiesparen aus verschiedenen Bereichen des OSI-Schichtenmodells kurz erläutert.

3.1 Drahtlose Sensornetze

Der Bereich der drahtlosen Netze lässt sich nach Sohrabi [SGAP00] in vier Kategorien unterteilen: zelluläre Netze, mobile Ad-hoc Netze, Nahfeld-Kommunikationsnetze und Sensornetze. In Abbildung 3.1 sind Beispiele für die verschiedenen Netztypen dargestellt. Im Folgenden werden die ersten drei Netztypen kurz erklärt, um anschließend den Typ der Sensornetze davon abzugrenzen.

Zelluläre Netze kommen im Bereich des Mobilfunks zum Einsatz. Sie bestehen aus mobilen Endgeräten und drahtgebundenen Zugangspunkten. Die Zugangspunkte sind innerhalb des Netzes so platziert, dass eine zellförmige Struktur entsteht. Die Kommunikation ist immer sternförmig zwischen dem mobilen Endgerät und dem drahtgebundenen Zugangspunkt organisiert. Bewegt sich ein mobiles Endgerät, kann eine bestehende Verbindung über mehrere Zugangspunkte weitergereicht werden. UMTS, GSM und IEEE 802.11 (im Access Point Modus) sind Standards, mit denen zelluläre Netze realisiert werden können.

Mobile Ad-hoc Netze werden durch Geräte mit mittlerer Leistungsfähigkeit und der Möglichkeit zur drahtlosen Kommunikation gebildet. Beispiele für derartige Geräte sind PDA und Laptop. Sie werden meistens für personengebundene Bürokommunikation eingesetzt. Bei Bedarf kann diesen Geräten Energie zugeführt werden. Die Teilnehmer kommunizieren über eine vermaschte Topologie miteinander. Standards wie z. B. IEEE 802.11 (im Ad-hoc Modus) oder IEEE 802.15.1 unterstützen diesen Netztyp.

Nahfeld-Kommunikation wird für die Verbindung von mobilen Geräten mit Peripheriegeräten oder (drahtgebundenen) Zugangspunkten eingesetzt. Die Kommunikation ist sternförmig organisiert. Beispiele für die Nahfeld-Kommunikation sind der drahtlose Datenaustausch zwischen zwei PDAs oder der Einsatz eines Mobiltelefons als Modem für einen Laptop. Mit dem Standard IEEE 802.15.1 können Nahfeld-Kommunikationsnetze realisiert werden.

Im Gegensatz zu den genannten Netztypen werden drahtlose Sensornetze für die Maschine-Maschine-Kommunikation eingesetzt. Sie bestehen aus mehreren, drahtlos miteinander kommunizierenden Sensorknoten [KW03], [EGPS01]. Ein einzelner Sensorknoten kann Messwerte aus der Umgebung aufnehmen und Daten an andere Sensor-

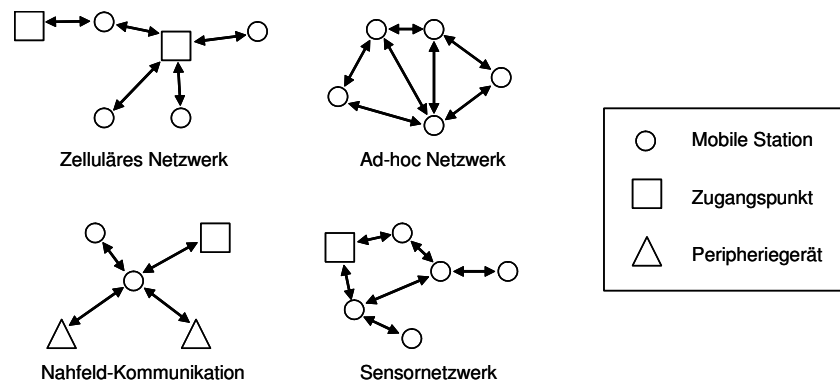


Abbildung 3.1: Zu drahtlosen Netzen gehören Zelluläre Netze, Ad-hoc Netze, Nahfeld-Kommunikationsnetze und Sensornetze.

knoten oder eine Basisstation übertragen. Ein Sensorknoten ist zudem wenige Kubikzentimeter groß. Aufgrund der geringen Größe und der drahtlosen Anbindung verfügt ein Sensorknoten nur über eng begrenzte Ressourcen. Das bedeutet beispielsweise, dass nur geringe Bitraten für die Übertragung verfügbar sind. Zudem muss die vorrätige Energie sparsam verwendet werden, um eine möglichst hohe Lebensdauer des Sensorknotens zu erreichen.

Römer [Röm05] liefert eine über die bisher genannten Eigenschaften hinausgehende Beschreibung von drahtlosen Sensornetzen. Er erläutert außerdem das Konzept des Entwurfsraumes, der mehrere, für den Einsatz von Sensornetzen relevante Dimensionen aufspannt. Zu den Dimensionen gehören beispielsweise Mobilität, Kosten, Größe und Topologie. Anhand dieser Dimensionen kann ein Anwender die bedarfsgerechte Entwicklung von drahtlosen Sensornetzen ausrichten.

In Anwendungsvisionen der Forschung zu drahtlosen Sensornetzen [BCH⁺05] werden oft Netze mit mehreren hundert oder tausend Sensorknoten angenommen, die in einem bestimmten Gebiet ausgebracht werden. Die ausgebrachten Knoten sollen ihre Interaktion autonom organisieren können. Bisher realisierte Anwendungen dienen anderen Forschungsrichtungen zum Beobachten von Umweltphänomenen. Beispielsweise setzt Cerpa [CEE⁺01] mehrere zehn drahtlos vernetzte Sensorknoten für die Beobachtung des Mikroklimas in direkter Umgebung von Mammutbäumen in Kalifornien ein. Allen [WAJR⁺05] beschreibt die Anwendung drahtloser Sensornetze zur Vulkanbeobachtung in Südamerika.

3.2 Arbeitszyklus in drahtlosen Netzen

In drahtgebundenen Netzen spielt der Energieverbrauch eine untergeordnete Rolle. Die Teilnehmer verfügen über einen theoretisch unendlichen Energievorrat und können sich daher ununterbrochen aktiv im Netz beteiligen. Ununterbrochener Betrieb von drahtlosen Sensorknoten bedeutet allerdings, dass der Energievorrat schnell aufgebraucht und die Gesamtbetriebsdauer dadurch nur kurz ist. Daher erscheint es sinnvoll, den Betrieb eines Sensorknotens zeitweise auszusetzen, um die Gesamtbetriebsdauer eines drahtlosen Sensornetzes zu erhöhen.

Zur Vereinfachung werden die Begriffe *aktiv* und *passiv* eingeführt. Im aktiven Zustand wird eine bestimmte Funktion ausgeführt. Im passiven Zustand ruht diese Ausführung. Mit dem Arbeitszyklus wird das Verhältnis zwischen der Dauer der aktiven Phase und der Gesamtdauer von aktiver und passiver Phase bezeichnet. Der Arbeitszyklus ist im Rahmen dieser Arbeit von zentraler Bedeutung. Bei kontinuierlicher Aktivität kann er ein Maximum von 100% erreichen. Synonym soll der Arbeitszyklus als Begriff für die serielle Abfolge einer aktiven und der anschließenden passiven Phase verwendet werden.

Innerhalb eines Sensorknotens arbeiten mehrere Einheiten zusammen. Sie können grob in die Bereiche der Anwendungslogik und der Übertragungsschichten aufgeteilt werden. Dementsprechend können auch die aktive und passive Phase innerhalb dieser Ebenen verstanden werden:

Anwendungsebene: Die Beobachtung von physikalischen Größen und Ereignissen ist die Aufgabe der Logik in der Anwendungsebene. Dazu muss eine Sensoreinheit die physikalische Größe in ein elektrisches Signal umformen und abtasten. Je nach Anforderung wird die Dauer zwischen zwei aufeinander folgenden Abtastungen gesetzt. Bei physikalischen Größen, die sich nur langsam ändern (z. B. Temperatur im Gebäude), können Zeiten im Bereich von mehreren zehn Sekunden bis Minuten sinnvoll sein. Wenn die entsprechende Sensoreinheit keine weiteren Aufgaben zu erfüllen hat, kann sie innerhalb der Zeit zwischen zwei Abtastungen in den Ruhezustand mit wesentlich geringerem Energieverbrauch versetzt werden. Die an die Übertragungsschicht zu übergebenden Nachrichten werden ereignisbasiert (siehe Abschnitt 2.1) generiert.

Übertragungsschichten: Für die Übertragung von Nachrichten sind innerhalb eines Sensornetzes die ersten drei bis vier OSI-Schichten verantwortlich. Wenn Nachrichten zur Übertragung vorliegen bzw. die Möglichkeit zum Empfang von Nachrichten gegeben werden muss, sind die Übertragungsschichten aktiv. In Sensornetzen, die zur Beobachtung von langsam veränderlichen physikalischen Größen eingesetzt werden, unterliegt das Übertragungsmedium nur einer geringen Last. Es werden nur wenige Nachrichten gesendet. Um in solchen Fällen Energie zu sparen, können die beteiligten Kommunikationspartner aktive und passive Zeiten für ihre Übertragungsschichten miteinander vereinbaren.

In dieser Arbeit wird vorausgesetzt, dass die in einem Sensorknoten verwendete Hardware hinsichtlich des Energieverbrauchs die zwei verschiedenen Zustände aktiv und passiv annehmen kann. Die Energieverbräuche in diesen zwei Zuständen unterscheiden sich um mehrere Zehnerpotenzen. Untersuchungen realer Hardware ([Sch06], [NK04a]) bestätigen diese Annahme (siehe auch Abschnitte 5.1.5 und 5.2.1). Sie gilt sowohl für die Aktivität auf der Anwendungsebene als auch für die Übertragungsschichten. Mikrocontroller und Transceiver ermöglichen dementsprechend, die Hardware für eine festgelegte Zeit in einem Modus mit extrem geringem Energieverbrauch (Sleep) zu versetzen.

Der Arbeitszyklus ist neben Parametern auf anderen OSI-Schichten (siehe Abschnitt 3.5) eine wesentliche Einflussgröße für den Energieverbrauch. Je öfter ein Sensorknoten aktiv ist, desto mehr Energie wird verbraucht.

Ein weiterer Aspekt beim Energieverbrauch ist der Medienzugriff. Wenn verschiedene Teilnehmer auf ein Übertragungsmedium zugreifen, kann nicht die gesamte Kapazität direkt für die Übertragung ausgenutzt werden. Beispielsweise treten bei CSMA-basierten Verfahren Ruhezeiten im Medium auf, zu denen keine Übertragung stattfindet [Tan90]. Zusätzlich können durch den Medienzugriff mehrerer Teilnehmer Kollisionen der Nachrichten hervorgerufen werden.

Wenn zwei Kommunikationspartner Nachrichten austauschen und ein dritter aktiv bleibt um ggf. anschließend zu kommunizieren, kommt es dadurch zum sogenannten *overhearing* - der nicht adressierte Teilnehmer ist während der Übertragung aktiv. Ye [YHE02] und van Dam [vDL03] diskutieren die Ursachen für den zusätzlichen Energieverbrauch ausführlich.

Eine weitere Ursache für zusätzlichen Energieverbrauch ist *idle listening*. Es bedeutet, dass ein Teilnehmer auf mögliche Nachrichten wartet. Werden von anderen Teilnehmern nur wenige Nachrichten gesendet, kann *idle listening* einen wesentlichen Beitrag zum Energieverbrauch liefern. Ein Teilnehmer muss empfangsbereit sein, ohne dass tatsächlicher Nachrichtenaustausch stattfindet.

Die Aufgabe besteht darin, die aktiven und passiven Zeiten so zu organisieren, dass die Teilnehmer miteinander kommunizieren, ohne dass unverhältnismäßig hoher Energieverbrauch durch *idle listening* oder *overhearing* auftritt. In vorangegangenen Arbeiten werden verschiedene Lösungsmöglichkeiten vorgeschlagen. Im Folgenden wird der bekannteste Ansatz (S-MAC), mit dem der Arbeitszyklus beeinflusst werden kann, vorgestellt. Weiterhin werden einige Varianten diskutiert, die einen Eindruck über die Vielfalt der Möglichkeiten geben sollen. Dabei wird insbesondere der Aspekt der Arbeitszyklusvereinbarung betrachtet. Die Details zum Medienzugriff werden vernachlässigt, da sie zum Arbeitszyklus nur bedingten Beitrag leisten und den Umfang der vorliegenden Arbeit sprengen würden.

3.2.1 S-MAC

Im Jahr 2002 stellte Ye [YHE02] ein Konzept vor, in dem zum ersten Mal die Aufteilung in aktive und passive Phasen diskutiert wird. Der Ausgangspunkt der Arbeit ist die Annahme, dass wenige Nachrichten auftreten und die verfügbare Übertragungskapazität keine Begrenzung darstellt. Zudem beleuchtete Ye verschiedene Gründe für ineffiziente Energieverwendung bei drahtloser Kommunikation. Eine Schlussfolgerung daraus war, passive Phasen für die Übertragungsschichten zu ermöglichen, in denen wesentlich weniger Energie verbraucht wird. Der von Ye vorgestellte Ansatz wird als S-MAC-Protokoll bezeichnet und ist bisher Grundlage verschiedener Weiterentwicklungen gewesen.

Bei dem S-MAC-Konzept wird die Dauer der aktiven und passiven Phase vor Betriebsbeginn fest eingestellt. Ein Sensorknoten wird dann während des Betriebs periodisch in den Ruhezustand mit geringem Energieverbrauch versetzt. Entsprechend der vorher festgelegten Ruhezeit wird in der internen Uhr ein Zeitpunkt festgeschrieben, zu dem der Knoten wieder in den aktiven Zustand übergehen soll. Die Zeit für die Dauer der passiven Phase muss individuell, ausgerichtet an der jeweiligen Anwendung, festgelegt werden.

In Sensornetzen müssen meist mehrere Teilnehmer untereinander Nachrichten austauschen. Verschiedene Kommunikationspartner sind deshalb gezwungen, ihren jeweiligen Zeitplan für aktive und passive Phasen untereinander abzustimmen. Zugleich ist nicht sicher, dass alle Teilnehmer direkt miteinander kommunizieren können.

Der Ansatz des S-MAC-Protokolls beinhaltet einen Mechanismus, mit dem mehrere Sensorknoten ihre Zeitpläne untereinander abstimmen können. Eine Schwierigkeit dabei besteht zu Betriebsbeginn, wenn noch kein Teilnehmer einen Zeitplan vorgeben kann. Im S-MAC-Protokoll wird festgelegt, dass ein Knoten zu Betriebsbeginn zunächst für eine zufällige Zeitspanne im Empfangsmodus auf mögliche Synchronisationsimpulse von anderen Teilnehmern hört. Kann er keinen solchen Impuls empfangen, weist er sich selbst die Rolle des *Synchronizers* zu und sendet die Information, dass er zu einem bestimmten zukünftigen Zeitpunkt in den Ruhezustand übergeht. Knoten, die den Synchronisationsimpuls empfangen, bringen ihren eigenen Zeitplan in Übereinstimmung mit dem vorgebenen. Wiederum senden diese Knoten den Synchronisationsimpuls weiter. Knoten die den Zeitplan anderer Teilnehmer annehmen, werden *Follower* genannt.

Treffen an einem Knoten mehrere Synchronisationsimpulse von verschiedenen synchronisierten Gruppen aufeinander, müssen sich diese Knoten im Grenzbereich auf beide Zeitpläne einstellen. Dadurch kann es an diesen Knoten zu erhöhtem Energieverbrauch und damit zu einem zeitigeren Ausfall kommen.

In Abbildung 3.2 ist das Ergebnis der Synchronisation zwischen vier verschiedenen Teilnehmern beispielhaft dargestellt. Im linken Bereich wird abgebildet, welche Teilnehmer ihre Zeitpläne über einen Synchronisationsimpuls an andere Teilnehmer propagieren. Für das gesamte Netz wird eine konstante Dauer für die aktive Phase und die Zeit $t_{s,i}$ zwischen

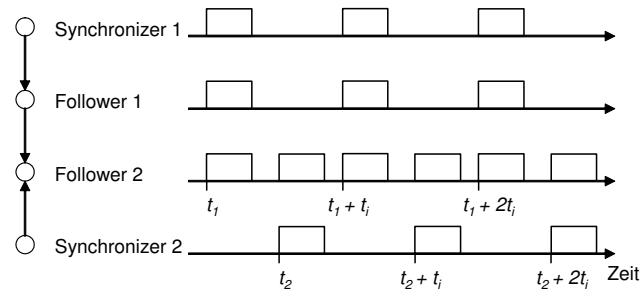


Abbildung 3.2: Mit Synchronisationsimpulsen stimmen sich mehrere Teilnehmer untereinander über den Zeitplan ab. Der Teilnehmer im Randbereich (Follower 2) muss sich an mehrere Zeitpläne anpassen. Die markierten Bereiche kennzeichnen aktive Zeiten.

dem Beginn zweier aktiver Phasen im selben Zeitplan angenommen. In dem Beispiel teilt Synchronizer 1 seinen Zeitplan an Follower 1 mit, der ihn wiederum an Follower 2 weiterleitet. Follower 2 empfängt zusätzlich den Zeitplan von Synchronizer 2. Er muss damit zwei Zeitplänen genügen und häufiger aktiv sein.

Während des Betriebs können Abweichung der internen Uhren auftreten. Um sie zu korrigieren, werden periodisch Synchronisationsnachrichten gesendet. Die empfangenden Knoten können sich anhand dieser Nachrichten zeitlich orientieren und den Zeitplan entsprechend der internen Uhr anpassen.

Um einen Teil der Kollisionen zu vermeiden, kann CSMA eingesetzt werden. Dabei prüft ein Teilnehmer vor einem geplanten Zugriff das Übertragungsmedium auf Belegung. Nur wenn das Medium frei ist, greift der Teilnehmer mit dem Sendewunsch auf das Medium zu. Das Prüfen des Mediums erfordert allerdings zusätzliche Energie. Daher schlägt Ye [YHE02] im Rahmen des S-MAC-Protokolls vor, einen sogenannten Network Allocation Vector (NAV) zu pflegen. Bei Beginn einer Übertragung zwischen zwei Knoten, die nicht an einen dritten Knoten gerichtet ist, kann der unbeteiligte Knoten die verbleibende Dauer ermitteln. In den Zusatzdaten jeder Nachricht ist die entsprechende Information über die Dauer einer Sendung enthalten. Diese Zusatzdaten werden in dem NAV gespeichert. Tritt in dem dritten Knoten ein Sendewunsch auf, wird zuerst der NAV geprüft. Ist dort eine Belegung verzeichnet, wird kein Übertragungsversuch unternommen und dadurch Energie gespart. Zugleich wird mit diesem Ansatz verhindert, dass Knoten Energie für den Empfang von Nachrichten aufbringen, die nicht an sie gerichtet sind. Dieses Verfahren wird als virtuelles Carrier Sense bezeichnet.

Die Ruhezeit zwischen den aktiven Phasen bringt eine Verzögerung für die zu übertragenden Nachrichten mit sich. Ye approximiert diese Verzögerung in Abhängigkeit des Verhältnisses der Ruhezeit zur aktiven Zeit [YHE02]. Je mehr Energie durch erhöhte Ruhezeit gespart wird, desto höhere Verzögerungszeiten der Nachrichten treten auf.

3.2.2 T-MAC

Das T-MAC-Protokoll wurde von van Dam vorgeschlagen [vDL03] und basiert auf dem zuvor dargestellten S-MAC-Verfahren. Dementsprechend verständigen sich die an der Kommunikation beteiligten Knoten über einen Zeitplan der aktiven und passiven Phasen. Innerhalb der aktiven Phasen tauschen die Teilnehmer untereinander Nachrichten aus. Zusätzlich wird die Dauer der aktiven Phase nicht fest vorgegeben, sondern kann variabel vereinbart werden. Die Dauer wird durch einen Parameter für die Zeitüberschreitung flexibel festgelegt. Wenn für eine vorher festgelegte Zeit t_{to} keine Nachrichten empfangen werden, geht der entsprechende Knoten in den Ruhezustand über. Treffen vor der Zeitüberschreitung t_{to} Nachrichten ein, wird die aktive Phase fortgesetzt.

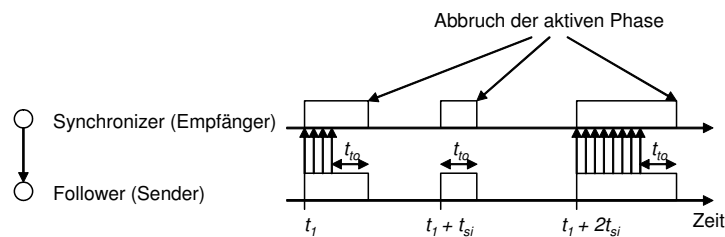


Abbildung 3.3: Die aktive Phase beginnt zu festgelegten Zeitpunkten. Wenn für die Dauer t_{to} kein Verkehr zu verzeichnen ist, gehen die Teilnehmer in den Ruhezustand über.

In Abbildung 3.3 ist ein Beispiel für das T-MAC-Verfahren mit einem Synchronizer und einem Follower dargestellt. Die Zeit zwischen dem Beginn zweier aktiver Phasen ist auf t_{si} festgelegt. Zudem ist der Parameter für die Zeitüberschreitung t_{to} vereinbart. In der ersten dargestellten aktiven Phase werden zunächst vier Nachrichten an den Synchronizer gesendet. Danach besteht kein Bedarf an Nachrichtenaustausch. Nachdem die Zeitüberschreitung t_{to} abgelaufen ist, gehen die Teilnehmer in den Ruhezustand über. Zur festgelegten Zeit $t_1 + t_{si}$ beginnen beide Teilnehmer wieder mit der aktiven Phase. Da keine Nachrichten gesendet werden, deaktivieren sie sich nach Ablauf der Zeitüberschreitung t_{to} . In der dritten aktiven Phase werden mehr Nachrichten gesendet. Die aktive Phase wird dementsprechend verlängert und später nach der Zeitüberschreitung t_{to} beendet.

Knoten können in Sensornetzen in mehreren Ebenen angeordnet sein, bei denen nicht zwangsläufig alle Knoten direkt miteinander verbunden sein müssen. Durch die zusätzliche Konkurrenz um das Übertragungsmedium können Knoten vorzeitig in den Ruhezustand übergehen, obwohl noch Nachrichten für sie vorliegen. Die Darstellung von Dams stellt den Mechanismus in engem Zusammenhang mit CSMA dar. Die Zeitüberschreitung t_{to} und das Problem des vorzeitigen Ruhezustandes orientieren sich an Parametern des für IEEE 802.11 spezifischen Zugriffsmechanismus mit Ready-to-Send und Clear-to-Send Nachrichten (siehe Anhang B).

In der vorliegenden Arbeit wird die Anpassung des Arbeitszyklus von der Übertragungstechnik abstrahiert betrachtet. Zudem soll ein Szenario mit nur einer Vermittlungsstation untersucht werden (siehe Kapitel 1). Daher wird im späteren Teil der Arbeit (Bewertung in Abschnitt 5.5) das wesentliche Prinzip des T-MAC-Protokolls aufgegriffen: wenn keine Nachrichten empfangen werden, geht die Vermittlungsstation nach einer Zeitüberschreitung in den Ruhezustand über. Dieses Prinzip der Zeitüberschreitung (Timeout-Mechanismus) lässt sich auch auf andere Zugriffsmechanismen und Übertragungstechniken anwenden. Es realisiert eine Variante der Anpassung des Arbeitszyklus und wird deshalb in Abschnitt 5.5 für den Vergleich im Rahmen eines generischen zeitlichen Modells verwendet.

Zur Bewertung des T-MAC-Ansatzes hat ihn van Dam mit S-MAC und CSMA innerhalb des Simulationswerkzeuges OMNet verglichen [vDL03]. Die Ergebnisse zeigen, dass der Energieverbrauch durch den Einsatz von T-MAC zum Teil signifikant reduziert werden kann. Der Gewinn ist jedoch von der angenommenen Last und dem Parameter t_{10} für die Zeitüberschreitung abhängig.

3.2.3 TRAMA

Die zuvor beschriebenen Protokolle S-MAC und T-MAC basieren auf dem kollisionsbehafteten RTS/CTS-Mechanismus. Deshalb sind Kollisionen und damit einhergehende Nachrichten- und Energieverluste möglich. Das Ziel des von Rajendran vorgeschlagenen TRAMA-Protokolls [ROGLA03] ist es, kollisionsfreie Kommunikation zu realisieren und die Ressource Zeit nach dem Bedarf der einzelnen Kommunikationsteilnehmer aufzuteilen. Drei Komponenten tragen zum Gesamtkonzept des TRAMA-Protokolls bei: Neighbor Protocol (NP), Schedule Exchange Protocol (SEP) und Adaptive Election Algorithm (AEA).

Zwei zeitlich voneinander getrennte Kanäle werden für die Nachrichtenübertragung verwendet. Ein erster Teil der Signalisierungsinformationen wird über einen Kanal mit zufälligem Zugriff übertragen. Den zweiten Teil der Signalisierungsinformationen und die Nutzdaten übertragen die Teilnehmer über einen Kanal mit zeitgeteiltem Zugriff. In Abbildung 3.4 ist das Prinzip dargestellt.

Informationen zu den benachbarten Knoten werden über das NP innerhalb des kollisionsbehafteten Kanals übertragen. Jeder Knoten teilt dabei allen erreichbaren Knoten seine direkten Nachbarn mit. Dadurch erhalten alle Knoten die Informationen über die Nachbarschaftsknoten in der jeweils zweiten Ebene. Der kollisionsfreie Kanal ist in Zeitschlitze eingeteilt, die den Knoten basierend auf beabsichtigten Sendeaktivitäten für die Übertragung zugeordnet werden. Anhand der Nachrichten, die von höheren Schichten generiert werden, berechnet jeder Knoten seinen Bedarf an Übertragungsrate und drückt ihn durch eine Intervalldauer, die in Zeitschlitzen gemessen wird, aus. Innerhalb dieses

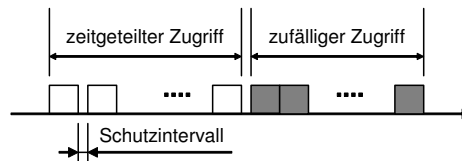


Abbildung 3.4: Kollisionsfreie Übertragung von Nutzdaten wird bei dem TRAMA Protokoll durch zeitlich geteilte Kanäle erreicht. Innerhalb des Schutzintervalls können die Transceiver zwischen Empfang und Senden wechseln. [ROGLA03]

Intervalls wird mit dem AEA eine bestimmte Anzahl an Zeitschlitz berechnet, in denen der Knoten seine Nachrichten übertragen darf. Die Berechnung bezieht die Bedarfe der anderen Knoten ein und führt zu einer eindeutigen Verteilung der verfügbaren Zeitschlitz über alle teilnehmenden Knoten. Im jeweils letzten verfügbaren Zeitschlitz eines Intervalls teilt ein Knoten den Zeitplan für das folgende Intervall mit.

Für neu hinzukommende oder das Netz verlassende Knoten wird der kollisionsbehaftete Kanal mit bestimmter Häufigkeit zur Verfügung gestellt. Dadurch besteht für alle am Netz beteiligten Knoten die Möglichkeit, ihre Nachbarschaftsinformationen aufzufrischen und an Änderungen anzupassen. Die Zuweisungen der Zeitschlitz müssen anschließend neu berechnet werden.

Bei dem TRAMA-Protokoll werden die Zeitschlitz aufgrund von Verkehrsinformationen zugewiesen. Ein Teilnehmer muss dabei selbst ermitteln, mit welcher Rate Nachrichten von höheren Schichten generiert werden und wieviele Zeitschlitz dementsprechend zu reservieren sind. In den Vereinbarungen des TRAMA-Protokolls sind diese verkehrsabhängigen Zuweisungen und der Medienzugriff eng miteinander verknüpft. Das Prinzip lässt sich deswegen nicht auf andere Medienzugriffsmechanismen übertragen.

3.2.4 Weitere Verfahren der Arbeitszyklusfestlegung

Die Verfahren S-MAC, T-MAC und TRAMA sind ein kleiner Ausschnitt aus der Vielfalt der verfügbaren Methoden, die für die Festlegung des Arbeitszyklus bisher entwickelt wurden. Zum einen werden diese Prinzipien in Standards verwendet (siehe Abschnitte 3.4.1 und 3.4.2) und zum anderen sind sie Gegenstand von Weiterentwicklungen und Erweiterungen. Eine Auswahl dieser Weiterentwicklungen wird in diesem Abschnitt angesprochen.

Der Ansatz des Locally Coordinated Scheduling [TG02] Verfahrens (LCS) besteht darin, über die Abstimmung des Arbeitszyklus von zwei benachbarten Kommunikationspartnern zu einem netzwerkweit optimalen Zeitplan zu konvergieren. Die Kapazität eines Netzes stellt dabei eine knappe Ressource dar. Der Arbeitszyklus wird immer zwischen

zwei direkt benachbarten Teilnehmern abgestimmt. Der Ansatz basiert auf dem Standard IEEE 802.15.1, lässt sich aber auch in Teilen auf ähnliche Übertragungstechniken anwenden. Mit DMAC stellt Lu [LKR04a] einen Medienzugriffsalgorithmus vor, der verschiedene Teilprobleme des Medienzugriffs in Sensornetzen adressiert. Ein Bereich ist der verteilten Planung von aktiven und passiven Phasen gewidmet. Mirza [MOS05] stellt sich in seiner Arbeit dem Problem der Synchronisation in einer vermaschten Topologie. Zur Lösung wird ein globales Optimierungsproblem formuliert, mit dem das entsprechende Minimum des Energieverbrauchs berechnet werden kann. In weiteren Arbeiten, z. B. von da Silva [dSLF04] und Jiang [JD04], werden verschiedene Methoden für die lokale Einstellung des Arbeitszyklus vorgeschlagen. Sie beziehen sich auf Parameter, die lokal in einem Sensorknoten gemessen werden können bzw. mit der Aufgabe zur Beobachtung eng zusammenhängen. Außerdem gibt es zahlreiche Arbeiten (z. B. von Anastasi [ACGP03] und Choi [CKK03]), die speziell auf den Standard IEEE 802.11 zugeschnitten sind.

3.3 Arbeitszyklus in Abhängigkeit von Sensorparametern

Im vorangegangenen Abschnitt 3.2 wird der Arbeitszyklus innerhalb eines Netzes mit vermaschter Topologie betrachtet. Ein Hauptproblem besteht dabei immer im Zusammenspiel verschiedener Teilnehmer, die alle beschränkte Ressourcen besitzen. Betrachtungen der höheren Schichten wurden bisher außen vor gelassen, da in dieser Arbeit die Schichten der Übertragungstechnik im Vordergrund stehen. In diesem Abschnitt wird eine Analyse [NK04a] [NK04b] vorgestellt, bei der die Übertragungstechnik vereinfacht wird. Die Grundlage der Untersuchung ist ein Sensornetz in Sterntopologie. Eine Basisstation mit theoretisch unbegrenztem Energievorrat ist von allen Teilnehmern aus erreichbar und steht immer für den Empfang und das Senden von Nachrichten bereit. In vorangegangenen Arbeiten des Lehrstuhls Technische Informationssysteme wurde dafür anhand von Anwendungsanforderungen bereits ein Protokoll entwickelt [SK02] [SK03].

Der Blick auf diese Analyse ist zum einen eine Anwendung der in Kapitel 2 vorgestellten Untersuchungen zum Verkehr in Sensornetzen. Zum anderen wird dargestellt, dass auch die Anwendungsschichten und deren Organisation Einfluss auf den Energieverbrauch ausüben. In diesem Fall rückt die Verantwortlichkeit für den Arbeitszyklus näher an die Anwendungsschicht heran, da der Arbeitszyklus nicht mehr auf zeitlicher Basis zwischen den Kommunikationspartnern vereinbart wird.

Für das Modell der Analyse wird angenommen, dass der Sensorknoten die Nachrichten ereignisgetrieben generiert. Ein physikalisches Signal wird durch die Sensoreinheit zwar zeitgetrieben abgetastet, eine Nachricht wird allerdings nur gesendet, wenn sich die physikalische Größe geändert hat (siehe Abschnitt 2.1).

3.3.1 Modell für Sensorlebensdauer

Grundsätzlich wird bei der Analyse angenommen, dass sich ein Sensorknoten in vier verschiedenen Zuständen befinden kann: Betreiben der Anwendung (*app*), Senden (*txon*), Empfangen (*rxon*), Ruhezustand (*stby*). Der mittlere für den Betrieb notwendige Strom ergibt sich aus

$$I_{avg} = T_{txon}I_{txon} + T_{rxon}I_{rxon} + T_{app}I_{app} + (1 - T_{txon} - T_{rxon} - T_{app})I_{stby}. \quad (3.1)$$

In den Zuständen wird ein bestimmter Stromverbrauch I zu verzeichnen sein, wobei T den jeweiligen Anteil der Verweildauer in einem Zustand beschreibt.

Für das Protokoll wird ein einfaches bestätigtes Übertragen mit einer Bestätigungsnachricht angenommen. Deshalb ist sowohl Senden als auch Empfangen in einem Sensorknoten notwendig. Unter dem Betreiben der Anwendung soll das Abtasten der physikalischen Größe $x(t)$ und das Erstellen einer Nachricht verstanden werden.

Um den mittleren Stromverbrauch I_{avg} zu bestimmen, muss die Häufigkeit des Sendens und Empfangens sowie des Betriebens der Anwendung abgeschätzt werden. Letztere wird durch die Rate λ_{app} ausgedrückt, die in Aktivitäten pro Zeiteinheit gemessen wird. Diese Rate muss vor Betriebsbeginn eingestellt werden und ist an die Charakteristik der zu beobachtenden physikalischen Größe anzupassen. Bei langsam veränderlichen physikalischen Größen (z. B. Temperatur im Gebäude mit Zeitkonstanten im Bereich von Minuten) kann λ_{app} in einer Größenordnung weit unter 1 Hz liegen. In Abschnitt 2.3 wurden dazu Details ausgeführt.

Die Charakteristik der zu beobachtenden physikalischen Größe kann mit dem mittleren $|x'(t)|_{mean}$ und maximalen $|x'(t)|_{max}$ Anstieg, gemessen in Einheiten pro Zeit, beschrieben werden. Die Einheiten beziehen sich dabei auf die beobachtete physikalische Größe. Außerdem muss ein Parameter Δx angegeben werden, der die Größe der Änderung beschreibt, nach der ein Sensorknoten eine Nachricht generiert (siehe Abschnitt 2.1).

Im Mittel tritt eine Änderung, die zu einer Nachricht führen soll mit der Rate $|x'(t)|_{mean}/\Delta x$ auf (vgl. [PNK04]). Ein Sensorknoten kann eine Nachricht allerdings nur dann generieren, wenn die Anwendung gerade aktiv ist und die physikalische Größe abtastet. Die Häufigkeit der Anwendungsaktivität λ_{app} kann daher nur ein n -faches der resultierenden Nachrichtenrate λ_{txon} sein:

$$\lambda_{txon} = \frac{\lambda_{app}}{n}. \quad (3.2)$$

Der Parameter n ist die kleinste ganze Zahl aus dem Quotienten zwischen der Anwendungshäufigkeit und der mittleren Änderungsrate.

$$n = \left\lceil \frac{\lambda_{app}}{|x'(t)|_{mean}/\Delta x} \right\rceil \quad (3.3)$$

Er drückt den Zusammenhang zwischen der Charakteristik der physikalischen Größe und der Häufigkeit der Anwendungsaktivität aus. Zusammen mit Gleichung (3.2) ergibt sich

$$\lambda_{tx} = \frac{\lambda_{app}}{\left\lceil \frac{\Delta x \lambda_{app}}{|x'(t)|_{mean}} \right\rceil} \quad (3.4)$$

als Rate, mit der im Mittel Nachrichten generiert und gesendet werden. Die maximale Ankunftsrate von Nachrichten ist abzuschätzen, indem der mittlere Anstieg $|x'(t)|_{mean}$ mit dem maximalen Anstieg $|x'(t)|_{max}$ ersetzt wird.

Wie zuvor erwähnt, muss die Abtastrate an die zu beobachtende physikalische Größe angepasst werden. Üblicherweise wird bei minimalen Abtastraten von Signalen das Abtasttheorem herangezogen. In den Anwendungen, die innerhalb der vorliegenden Arbeit betrachtet werden, liegt der Fokus allerdings nicht auf der Signalrekonstruktion zur Informationsübertragung. Vielmehr sind physikalische Größen, die nicht als Träger von Information benutzt werden, mit einer hinreichenden Genauigkeit zu erfassen (vgl. Gleichung (2.2)). Übertragen auf die Charakteristik der physikalischen Größe bedeutet das, dass bei maximalem Anstieg $|x'(t)|_{max}$ hinreichend oft abgetastet werden muss, so dass der Sensorknoten die Änderungen der physikalischen Größe erfassen kann. Die Häufigkeit für die Aktivität der Anwendung wird daher mit

$$\lambda_{app} = \frac{|x'(t)|_{max}}{\Delta x} \quad (3.5)$$

bemessen. Durch dieses Verhältnis ist die minimale Abtastrate vorgegeben, die nicht unterschritten werden darf.

Um das Modell zu vereinfachen, wird angenommen, dass bei der eigentlichen Nachrichtenübertragung die gleiche Zeit für Senden und Empfangen benötigt wird ($T_{txon} \approx T_{rxon}$). Dadurch gilt zugleich $\lambda_{txon} \approx \lambda_{rxon}$ für die entsprechenden Sende- und Empfangshäufigkeiten.

Die erarbeiteten Gleichungen (3.2) bis (3.5) können nun in Gleichung (3.1) einfließen. Zusätzlich werden die Zeitanteile $T_{..}$ durch $(\lambda_{..} \cdot t_{..})$ ersetzt.

$$\begin{aligned} I_{avg} &= (I_{rxon} + I_{txon}) \lambda_{txon} t_{txon} + \lambda_{app} t_{app} I_{app} + (1 - 2\lambda_{txon} t_{txon} - \lambda_{app} t_{app}) I_{stby} \\ &= \frac{|x'(t)|_{max} t_{tx} (I_{rx} + I_{tx})}{\left\lceil \frac{|x'(t)|_{max}}{|x'(t)|_{mean}} \right\rceil \Delta x} + \frac{|x'(t)|_{max}}{\Delta x} t_{app} I_{app} \\ &\quad + \left(1 - \frac{2|x'(t)|_{max} t_{tx}}{\left\lceil \frac{|x'(t)|_{max}}{|x'(t)|_{mean}} \right\rceil \Delta x} \right) I_{stby} - \frac{|x'(t)|_{max}}{\Delta x} t_{app} I_{stby} \end{aligned} \quad (3.6)$$

Diese Gleichung hängt lediglich von der Charakteristik der physikalischen Größe ($|x'(t)|_{mean}$ und $|x'(t)|_{max}$), der gewünschten Genauigkeit Δx , hardware-spezifischen Stromverbräuchen und protokoll- bzw. anwendungsspezifischen Zeiten ab.

Mit entsprechenden Annahmen für die Parameter, einer Annahme für die Batteriekapazität C in mAh und dem Zusammenhang von Gutierrez [GNC⁺01]

$$t_{live} = \frac{C}{I_{avg}} \quad (3.7)$$

läßt sich die Lebensdauer t_{live} eines Sensorknotens abschätzen.

3.3.2 Analyse der Abhängigkeiten

In diesem Abschnitt werden Abhängigkeiten innerhalb des Modells aus Abschnitt 3.3.1 anhand von Beispielwerten analysiert. Es soll eine Raumtemperatur innerhalb eines Gebäudes beobachtet werden.

Ein Sensorknoten besteht aus der Kombination eines Transceivers RFB433 [Blu03] ($I_{rx} = 8\text{ mA}$, $I_{tx} = 45\text{ mA}$) mit einem Atmel Mikrocontroller [Atm03] ($I_{app} = 3\text{ mA}$, $I_{stby} = 3\text{ }\mu\text{A}$). Der Stromverbrauch im Ruhezustand I_{stby} ergibt sich aus dem Strom bei Ruhezustand im Transceiver und Mikrocontroller. Die Kapazitäten heutiger Batterien bewegen sich im Bereich von einigen hundert bis tausend mAh. Daher wird $C = 0,4\text{ Ah}$ angenommen. Durch das vorgeschlagene Protokoll [NK04a] ergibt sich mit einer Nachrichtenlänge von 28 Bytes eine Übertragungszeit von $t_{txon} = 28\text{ Byte}/19,2\text{ kBit/s} = 11,7\text{ ms}$. Die Dauer für eine Abtastung und das mögliche Generieren einer Nachricht wird mit $0,25\text{ s}$ abgeschätzt. Diese Zeit beinhaltet das Aktivieren, das Messen und das Deaktivieren des Mikrocontrollers. Während der Beobachtung soll eine Genauigkeit von $\Delta x = 0,5^\circ\text{C}$ erzielt werden. Wenn sich die Temperatur um $0,5^\circ\text{C}$ im Vergleich zum letzten gesendeten Wert geändert hat, meldet eine neue Nachricht den aktuellen Wert. Zur Charakteristik des Temperaturverlaufs werden Anleihen aus Messungen im Bereich der Gebäudeautomatisierung genommen. Die Analysen [PNK04] zeigen, dass mittlere und maximale Anstiege der Temperatur in Größenordnungen deutlich kleiner als eins liegen - $|x'(t)|_{mean} = 0,000185^\circ\text{C/s}$ und $|x'(t)|_{max} = 0,001167^\circ\text{C/s}$.

Mit diesen Annahmen für die Gleichungen (3.6) und (3.7) ergibt sich eine Lebensdauer von 9,2 Jahren. Diese Größenordnung stellt eine brauchbare Lebensdauer für einen Temperatursensor, z. B. in der Gebäudeautomatisierung, dar. Für genauere Berechnung der Lebensdauer sollten verschiedene weitere Effekte, wie z. B. der Energieverbrauch bei Initialisierung, die Selbstentladung von Batterien oder mögliche Fehlerbehandlungen, in Betracht gezogen werden. Auf diese Verfeinerungen des Modells wird in der vorliegenden Arbeit aufgrund des Umfangs verzichtet.

Vielmehr wird im nächsten Schritt der Analyse die Abhängigkeit der Lebensdauer von der Charakteristik der beobachteten physikalischen Größe betrachtet. Der mittlere Anstieg variiert dabei im Bereich von $0,0001^\circ\text{C/s} < |x'(t)|_{mean} < 0,1^\circ\text{C/s}$. Zugleich wird

angenommen, dass das Verhältnis

$$\frac{|x'(t)|_{mean}}{|x'(t)|_{max}} = \frac{0.000185 \text{ } ^\circ\text{C/s}}{0.001167 \text{ } ^\circ\text{C/s}} \quad (3.8)$$

für alle Werte von $|x'(t)|_{mean}$ gleich bleibt. Der Parameter $|x'(t)|_{max}$ muss also an den jeweiligen mittleren Anstieg angepasst werden.

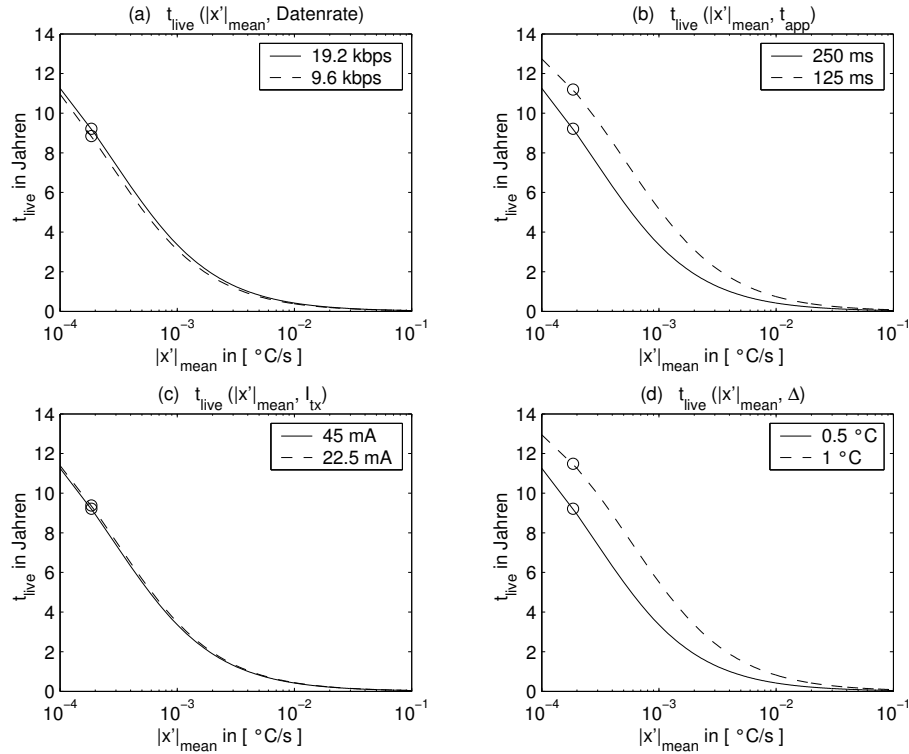


Abbildung 3.5: Die Lebenszeit t_{live} eines Sensors hängt von der Charakteristik $|x'(t)|_{mean}$ der physikalischen Größe und (a) der Datenrate, (b) der Dauer t_{app} eines Anwendungsdurchlaufes, (c) dem Strom I_{txon} während der Übertragung, und (d) der Auflösung Δx für die zu erreichende Genauigkeit ab.

Die Ergebnisse für die Variation der Charakteristik der physikalischen Größe sind in den Abbildungen 3.5 (a) bis (d) dargestellt. Mit wachsendem mittlerem Anstieg $|x'(t)|_{mean}$ verringert sich die Lebensdauer eines Sensorknotens. Der Kreis markiert die erreichbare Lebensdauer, wenn $|x'(t)|_{mean}$ und $|x'(t)|_{max}$ nach den Werten in Gleichung (3.8) eingestellt werden.

Die Abbildungen 3.5 (a) bis (d) zeigen außerdem den unterschiedlichen Einfluss der im Modell beteiligten Größen. Es werden die Datenrate, die Dauer der Anwendung, der Stromverbrauch des Transceivers und die erforderliche Genauigkeit untersucht. Wird die

Datenrate von 19,2 auf 9,6 kBit/s vermindert, beeinflusst das in erster Linie die Dauer des Sendens und Empfangens von Nachrichten. Die zu erwartende Lebensdauer wird dadurch nur minimal beeinflusst (Abbildung 3.5 (a)). Verbleibt der Mikrocontroller für kürzere Zeit in der Anwendung, erhöht sich die Lebensdauer um einige Prozent (Abbildung 3.5 (b)). Der Stromverbrauch des Transceivers hat kaum Einfluss auf die Lebensdauer (Abbildung 3.5 (c)). Durch reduzierte Forderungen der Genauigkeit, indem z. B. nur bei Temperaturänderungen von 1°C statt $0,5^\circ\text{C}$ eine Nachricht gesendet wird, kann die Lebensdauer verlängert werden (Abbildung 3.5 (d)).

Anhand des Modells ist ersichtlich, dass verschiedene Parameter unterschiedlichen Einfluss haben. Nicht nur die Auswahl der Hardwarekomponenten beeinflusst die Lebensdauer eines Sensorknotens. Auch die Parameter, die in der Anwendung für die Datenerfassung gesetzt werden (Auflösung Δx und Dauer t_{app} der Anwendung), wirken sich auf die erreichbare Lebensdauer aus. Werden Anwendungen für drahtlose Sensornetze entwickelt, müssen diese Einflussfaktoren in Betracht gezogen werden. Sie können unter Umständen wesentlich dazu beitragen, einen geeigneten Kompromiss zwischen Leistungsfähigkeit und Lebensdauer einer Anwendung zu finden.

3.4 Mechanismen für Energieeffizienz in Standards

Energieeffizienz bei der Kommunikation in drahtlosen Netzen wird nicht nur innerhalb von Forschungsarbeiten behandelt. Auch Standards greifen das Konzept von aktiven und passiven Phasen auf. In den folgenden zwei Abschnitten werden zwei Standards und deren Energiesparmechanismen dargestellt. Zum einen gibt es innerhalb des Standards IEEE 802.15.4 den Beacon-Enabled-Modus, mit dem innerhalb einer Sterntopologie aktive und passive Phase vereinbart werden können. Zum anderen stellt der Standard IEEE 802.15.1 verschiedene Sondermodi bereit, innerhalb derer die Kommunikationspartner für bestimmte Zeiträume Ruhephasen einlegen können.

Es existieren weitere Standards die mit ähnlichen Mechanismen die Energieeffizienz bei der Nachrichtenübertragung zu steigern versuchen (z. B. IEEE 802.11 mit Power Save Modus). Sie werden hier aufgrund des Umfangs und der Ähnlichkeit nicht dargestellt.

3.4.1 IEEE 802.15.4

Neben den grundlegenden Mechanismen für den Aufbau der Topologie und die Wartung (Aufrechterhalten der Kommunikationsverbindungen) der Netzstruktur gibt es im Standard IEEE 802.15.4 die Möglichkeit, aktive und passive Phasen für die beteiligten Kommunikationspartner zu vereinbaren. Dafür steht der Beacon-Enabled-Modus zur Verfügung. Im Gegensatz dazu ist im Nonbeacon-Enabled-Modus ein kontinuierlich

empfangsbereiter Koordinator erforderlich. In den folgenden Abschnitten werden die Grundzüge beider Modi erläutert.

Lu [LKR04b] untersucht diese beiden Modi hinsichtlich des effizienten Einsatzes der Energie. Vergleiche beim Betrieb im Beacon-Enabled- und Nonbeacon-Enabled-Modus zeigen, wie sich die einzelnen Parameter auf den Energieverbrauch auswirken. Die Ergebnisse können als Grundlage für die Bemessung der Parameter von IEEE 802.15.4 basierten Geräten herangezogen werden.

Kommunikation mit Beacon-Enabled-Modus

Grundlage des Beacon-Enabled-Modus ist die Synchronisation der Arbeitszyklen zwischen dem Koordinator und den untergeordneten Knoten. Mit einer speziellen Nachricht (Beacon-Nachricht) bestimmt der Koordinator den Zeitplan für aktive und passive Phasen. Die untergeordneten Knoten müssen sich nach dem vorgegebenen Zeitplan richten.

Ein Beispiel für einen Zeitplan ist in Abbildung 3.6 dargestellt. Die markierten Bereiche stehen für die aktiven Phasen, wobei zu Beginn jeder aktiven Phase eine Beacon-Nachricht gesendet wird. Anschließend dürfen untergeordnete Knoten für eine festgelegte Zeit Nachrichten übertragen. Die aktive Phase tritt in einem festgelegten Intervall auf.

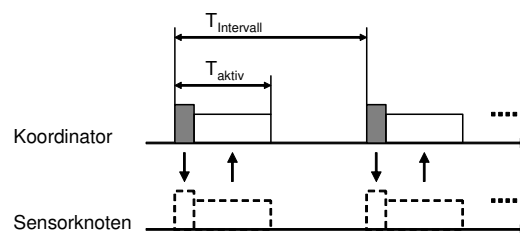


Abbildung 3.6: Im Beacon-Enabled-Modus (vereinfachte Darstellung) dürfen die beteiligten Knoten innerhalb bestimmter Zeiten aktiv sein. Mit einer Beacon-Nachricht wird der Beginn einer aktiven Phase, ausgehend vom Koordinator, markiert.

Für den Betrieb im Beacon-Enabled-Modus wird eine korrekt aufgebaute Topologie vorausgesetzt. Es gibt dabei einen Koordinator, der die Kommunikation innerhalb von sternförmig angeordneten Knoten organisiert. Die übrigen Knoten innerhalb der Sterntopologie müssen sich den Vorgaben des Koordinators unterordnen. Die Nachrichten dürfen in diesem Modus nur zwischen einem untergeordneten Knoten und dem Koordinator ausgetauscht werden. Direkte Kommunikation zwischen zwei untergeordneten Knoten ist im Beacon-Enabled-Modus nicht vorgesehen.

Durch die spezielle Beacon-Nachricht (grau markiert in Abbildung 3.6) synchronisiert sich der Koordinator mit den untergeordneten Knoten. Zum einen markiert sie den Beginn jedes Arbeitszyklus. Zum anderen sind in der Beacon-Nachricht zwei mal vier Bit

für die Beacon Order (BO) und die Superframe Order (SO) reserviert. Jeder untergeordnete Knoten, der die Beacon-Nachricht empfängt, nutzt die Superframe Order, um die Dauer der aktiven Phase T_{aktiv} zu bestimmen. Die Beacon Order bestimmt die Zeit $T_{Intervall}$ zwischen dem Beginn zweier aufeinander folgender aktiver Phasen.

Nach dem Empfang der Beacon-Nachricht dürfen die untergeordneten Knoten innerhalb der aktiven Phase Nachrichten an den Koordinator senden bzw. von ihm empfangen. Mit den Zeiten T_{aktiv} und $T_{Intervall}$ kann der Energieverbrauch wesentlich beeinflusst werden. Die Vorschriften zur Berechnung dieser Zeiten werden im Anhang A detailliert dargestellt.

Wird die Zeit $T_{Intervall}$ zwischen zwei Beacon-Nachrichten bei gleichbleibender Zeit T_{aktiv} erhöht, sinkt der Energieverbrauch für die Kommunikation, da Aktivität seltener stattfindet. Ebenso sinkt der Energieverbrauch, wenn die Dauer der aktiven Phase T_{aktiv} bei gleichbleibender Zeit $T_{Intervall}$ verringert wird. Im Anhang A ist dargestellt wie sich die Beacon Order und die Superframe Order auf den Arbeitszyklus auswirken.

Prinzipiell steht mit dem Beacon-Enabled-Modus ein standardbasierter Mechanismus zur Verfügung, um den im S-MAC Protokoll vorgeschlagenen Ansatz mit aktiven und passiven Phasen zu realisieren. In dem Standard wird keine Festlegung getroffen, um verschiedene Ebenen von Sensorknoten bezüglich ihrer Zeitpläne zu koordinieren.

Kommunikation mit Nonbeacon-Enabled-Modus

Im Nonbeacon-Enabled-Modus ist der Nachrichtentransport in der erwähnten sternförmigen Topologie und in Peer-to-Peer Topologie möglich. Letztere Variante wird im Standard vorgeschlagen, erfordert allerdings weitere Vereinbarungen um die speziellen Eigenschaften von Peer-to-Peer Topologien zu berücksichtigen. Im Folgenden wird daher nur auf die sternförmig organisierte Topologie Bezug genommen.

Bei dem Nonbeacon-Enabled Modus gibt der Koordinator keine zeitliche Struktur vor. Er muss kontinuierlich empfangsbereit sein, damit ihn Nachrichten von untergeordneten Knoten erreichen können. Bei sternförmiger Organisation dürfen die untergeordneten Teilnehmer nicht untereinander kommunizieren. Die Nachrichten müssen immer über den zentralen Koordinator ausgetauscht werden, wobei sowohl von dem Koordinator zu einem untergeordneten Knoten als auch in umgekehrter Richtung Nachrichten übertragen werden können. Im ersten Fall muss der untergeordnete Knoten eine Anfrage an den Koordinator senden. Wenn Daten für den anfragenden Knoten vorliegen, werden sie mit einer Antwortnachricht ausgeliefert. Daten von dem untergeordneten Knoten an den Koordinator können direkt, ohne vorherige Verständigung gesendet werden.

Der Nonbeacon-Enabled-Modus ist in sternförmig organisierten Netzen geeignet. Um ein Peer-to-Peer Netz mit dem Nonbeacon-Enabled-Modus zu betreiben, müssen weitere

Festlegungen, über die bereits definierten Schichten zur Bitübertragung und Sicherung hinaus, getroffen werden. Mechanismen zur Vermittlung und zum Transport von Nachrichten werden im Standard IEEE 802.15.4 nicht beschrieben. Etablierte Vermittlungsprotokolle für drahtlose Netze, wie z. B. Ad-hoc On-Demand Distance Vector Routing (AODV) [PR99], bieten sich dafür als Erweiterung an.

3.4.2 IEEE 802.15.1

Der Standard IEEE 802.15.1 hat sich aus der Bluetooth Special Interest Group (SIG) heraus entwickelt. Das Ziel der Bluetooth SIG war es, industrieweite Vereinbarungen für drahtlose Nahfeld-Kommunikation im Anwendungsbereich Wireless Personal Area Networks (WPAN) zu treffen. Die Entwicklungen wurden zunächst im Rahmen eines Industriekonsortiums betrieben. Wesentliche Teile der dort erarbeiteten Verfahren wurden später innerhalb eines Normungsgremiums zum Standard IEEE 802.15.1 erhoben. In diesem Abschnitt werden die Verfahren vorgestellt, die mit dem Standard IEEE 802.15.1 (synonym mit Bluetooth) für energieeffizientes Kommunizieren zur Verfügung stehen.

Ähnlich wie bei IEEE 802.15.4 ist auch bei Bluetooth die Verständigung der Teilnehmer bei Betriebsbeginn erforderlich. Die an einem Netz beteiligten Knoten müssen einander erkennen und Beziehungen für darauf folgende Kommunikation herstellen. Dazu gehört unter anderem, dass sie sich über einen gemeinsamen Takt verständigen. Die Verfahren zum Initiieren der Kommunikation werden in der Standardspezifikation [Ins02] ausführlich dargestellt.

Der Bluetooth Standard spezifiziert die Kommunikationsverfahren innerhalb einer Stern-topologie (in Bluetooth als Pico-Netz bezeichnet). Ein Master kann dabei die Nachrichtenübertragung mit bis zu sieben aktiven Slaves koordinieren. Zugleich können dem Master weitere Slaves zugeordnet sein, die sich aufgrund der Begrenzung des Adressraumes allerdings im Park-Modus befinden müssen.

Der Zugriff wird über zeitgeteilte, numerierte Kanäle in sogenannten Zeitschlitzten realisiert. In den geradzahligen Zeitschlitzten darf der Master senden. Im darauf folgenden ungeraden Zeitschlitz darf ein Slave auf den Kanal zugreifen. Dieses Verfahren wird auch als Time Division Duplex (TDD) bezeichnet.

Im Normalbetrieb kommunizieren Master und Slave durch synchronen oder asynchronen Nachrichtenaustausch miteinander. Im synchronen Betrieb weist der Master der Verbindung zu einem bestimmten Slave Zeitschlitz mit einem bestimmten Takt zu. Dadurch wird der Verbindung eine feste Übertragungsrate zugeordnet. Wenn ein Master einem Slave nur den nächsten Zeitschlitz zuweisen kann, wird die Verbindung asynchron genannt. Der Master adressiert den Slave in einem geraden Zeitschlitz, der wiederum den darauf folgenden Zeitschlitz für eine Antwort nutzen darf. Im asynchronen Modus bestimmt allein der Master die Häufigkeit des Datenaustauschs. Während der synchronen

und asynchronen Kommunikation müssen alle aktiven Slaves empfangsbereit sein, da der Master jederzeit Vorgaben für die Übertragung machen darf. Auch wenn keine Kommunikation zwischen Master und Slave stattfindet, ist Energie erforderlich.

Zusätzlich stehen drei verschiedene Verfahren für die energieeffiziente Kommunikation zur Verfügung: Sniff-, Hold- und Park-Modus. Voraussetzung für die Anwendung dieser Modi ist eine existierende Verbindung zwischen dem Master und einem Slave. Ausgehend davon können Master oder Slave den Übergang zu Sniff-, Hold- oder Park-Modus anfordern und bei Einverständnis realisieren.

In den Abbildungen 3.7 (a) bis (c) sind die drei verschiedenen Modi dargestellt. In allen Modi kann die Zeit zwischen zwei aktiven Phasen individuell vereinbart werden. Dadurch können passive Phasen und somit Energieeinsparung realisiert werden. Die folgenden drei Abschnitte bieten einen Überblick über den Sniff-, Hold- und Park-Modus ([Ins02], Seite 94 ff).

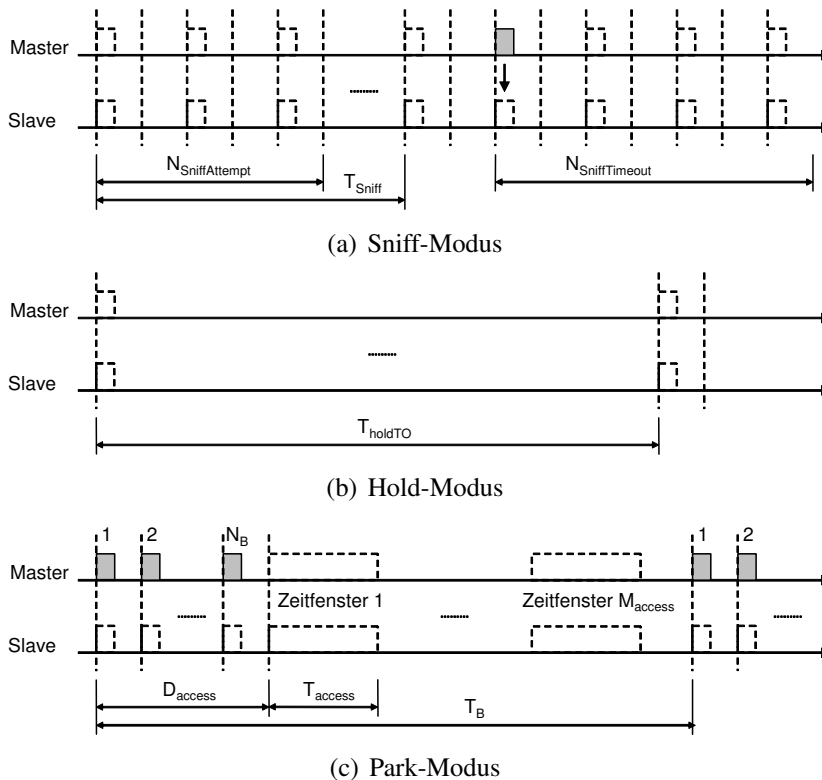


Abbildung 3.7: Mit den drei verschiedenen Modi (a) Sniff, (b) Hold und (c) Park können die Teilnehmer zeitweise in einen Ruhezustand versetzt werden.

Sniff-Modus

Der Sniff-Modus kann entweder vom Master oder vom Slave angefordert werden und ist nur aus dem asynchronen Modus heraus zu aktivieren. Wenn der jeweils andere Teilnehmer dem Übergang in den Sniff-Modus zustimmt, verständigen sich beide Teilnehmer über die Parameter $N_{SniffAttempts}$, $N_{SniffTimeout}$ und T_{Sniff} .

Der Ablauf der Kommunikation im Sniff-Modus ist in Abbildung 3.7 (a) beispielhaft dargestellt. Durch den Parameter T_{Sniff} wird die Zeit zwischen zwei aufeinander folgenden aktiven Sniff-Phasen festgelegt. Ab Beginn dieser Phase muss der Slave für mindestens $N_{SniffAttempts}$ Zeitschlitzpaare empfangsbereit sein. Wird innerhalb dieser Dauer vom Master keine Nachricht an den Slave gesendet, beginnt die passive Phase und der Nachrichtenaustausch ist erst ab dem Beginn der nächsten aktiven Phase möglich.

Treffen vom Master Nachrichten ein, muss der Slave nach dem Empfang für weitere $N_{SniffTimeout}$ Zeitschlitze empfangsbereit bleiben. Tritt innerhalb dieser Zeitspanne kein Verkehr auf, beginnt wiederum die passive Phase. Wenn der Master innerhalb dieser Zeit Nachrichten sendet, beginnt die Zeitspanne mit $N_{SniffTimeout}$ empfangsbereiten Zeitschlitzen erneut.

Begeben sich Teilnehmer in den Sniff-Modus, können einerseits parallele Verbindungen zu anderen Teilnehmern aufgebaut bzw. unterhalten werden, andererseits können die Teilnehmer in einem Ruhezustand energiesparend betrieben werden. Aus der Sicht des Masters werden Slaves im Sniff-Modus noch als aktive Teilnehmer verstanden. Ihnen bleibt noch eine der sieben möglichen Adressen innerhalb einer Sterntopologie zugewiesen.

Hold-Modus

Wie der Sniff-Modus kann auch der Hold-Modus von Master oder Slave angefordert werden, wenn die Teilnehmer asynchron kommunizieren. Bei Initiieren des Hold-Modus wird zwischen den Kommunikationspartnern der Wert des Parameters T_{holdTO} abgestimmt. Er legt fest, für welche Dauer der Empfang von Nachrichten ausgesetzt wird. Ist diese Zeit abgelaufen, beginnt die aktive Phase mit der asynchronen Verbindung erneut (siehe Abbildung 3.7 (b)). Weitere Ruhephasen müssen die Teilnehmer neu vereinbaren.

Die Festlegungen des Standards erlauben im Hold-Modus eine passive Phase von bis zu zwölf Stunden. In der Praxis kann eine Ruhephase in dieser Größenordnung allerdings zu Synchronisationsproblemen führen, da selbst kleine lokale Uhrenfehler den korrekten Beginn der aktiven Phase verhindern würden.

Ähnlich wie beim Sniff-Modus können mit dem Hold-Modus Energie gespart und andere Verbindungen unterhalten werden. Ein Master betrachtet einen Slave im Hold-Modus noch als aktiv und verzeichnet ihn mit einer der sieben möglichen Adressen in dem Pico-Netz.

Park-Modus

Der Park-Modus ist die dritte Möglichkeit, um für eine Verbindung zeitweise passive Phasen zu vereinbaren. Er kann von einem Master für einen bestimmten Slave festgelegt werden. In diesem Modus ist die Kommunikation nur mit verringerter Übertragungskapazität möglich, wobei gleichzeitig die Synchronisation erhalten bleibt. Das Schema für die Kommunikation im Park-Modus ist in Abbildung 3.7 (c) dargestellt.

Für die Kommunikation vom Master zu dem im Park-Modus befindlichen Slave wird ein separater Beacon-Kanal verwendet. In diesem Beacon-Kanal werden im Intervall T_B jeweils N_B Beacon-Zeitschlitze reserviert. Innerhalb dieser Zeitschlitze sendet der Master Beacon-Nachrichten, um die Synchronisation zwischen Master und Slave aufrecht zu erhalten. Zusätzlich sind Zeitfenster (T_{access}) für den Kanalzugriff verfügbar. Sie beginnen mit einer Verzögerung von D_{access} nach dem ersten Beacon-Paket. Die Zeitfenster können M_{access} mal wiederholt werden. Innerhalb der Zeitfenster können Informationen zwischen Master und Slave (z. B. Anfragen des Slaves an den Master) ausgetauscht werden. Anschließend geht der Slave wieder in den passiven Modus über.

Mit dem Park-Modus können bis zu 255 Knoten an einem Pico-Netz beteiligt bleiben. Die im Park-Modus befindlichen Slaves ordnet der Master in einen separaten Adressbereich ein, in dem er mehr als sieben Slaves verwalten kann.

3.5 Weitere Aspekte des energieeffizienten Kommunizierens

Bei den zuvor dargestellten Verfahren steht der Arbeitszyklus im Sinne von abwechselnden aktiven und passiven Phasen im Vordergrund. Für das in Abschnitt 1.1 dargestellte Problem der Verknüpfung der Anpassung zwischen Anwendungs- und Übertragungsebene stellt der Arbeitszyklus den Schlüssel dar.

Im Bereich der drahtlosen Netze existieren zahlreiche weitere Teilgebiete, die mit dem Problem des energieeffizienten Betriebs in Berührung kommen. In diesem Abschnitt werden einige Problembereiche herausgegriffen und kurz angesprochen. Damit soll ein Eindruck über die Vielfalt der Energieproblematik im Bereich der drahtlosen Netze vermittelt werden.

Karl und Willig [Kar03] geben in einem Projektbericht einen Überblick über die einzelnen Schichten und die jeweiligen Möglichkeiten dort Energie zu sparen. Im Allgemeinen wirken sich die folgenden Aspekte auf den Energieverbrauch aus:

Hardware: Untersuchungen von Schwieger [Sch06] zeigen, dass verfügbare Hardwaremodule bei gleicher Sendeleistung unterschiedliche Stromverbräuche aufwei-

sen. Sie hängen nicht vom Übertragungsverfahren wie z. B. Modulation, Bitrate oder Frequenzbereiche ab. Vielmehr ist naheliegend, dass die Unterschiede durch die Hardwarearchitektur begründet sind. Je nachdem welche Datenmengen übertragen werden und welche Bitraten zur Verfügung stehen, sind unterschiedliche Übertragungszeiten erforderlich. Zusätzlich spielt die periphere Beschaltung eine entscheidende Rolle.

Medienzugriff: In etablierten Standards werden unterschiedliche Verfahren für den Zugriff auf das Medium bei mehreren Teilnehmern festgeschrieben. Beispielsweise wird im Standard IEEE 802.11 das RTS/CTS Verfahren angewendet. Damit kann dem Problem des versteckten Teilnehmers (siehe Anhang B) wirksam begegnet werden. Das Verfahren birgt allerdings den Nachteil, dass innerhalb der Phase, in der die Teilnehmer um das Medium konkurrieren, zusätzliche Nachrichten ausgetauscht werden, die keine Nutzdaten transportieren. Im Vergleich dazu sind beim zeitgeteilten Zugriffsmodus im Standard IEEE 802.15.4 keine RTS/CTS Nachrichten erforderlich. Die bereitgestellten Zeitschlitze müssen nur durch den Koordinator vergeben werden.

Nachrichtenvermittlung: Für die Wegewahl von Nachrichten existieren verschiedene Verfahren, die die vorrätige Energie berücksichtigen. Sie beeinflussen den Weg, der für die Nachrichten gewählt wird. Voigt [VRS03] stellt beispielsweise einen Algorithmus zur Wegewahl vor, der die Energiequelle der Vermittlungsstationen in Betracht zieht. In dem Beitrag von Jain [JMA03] ist ein Algorithmus zu finden, der die Vermittlungsaktivitäten gleichmäßig über alle Knoten verteilt. Mit beiden Ansätzen soll die Lebensdauer des gesamten Netzes erhöht werden.

Batterie: Das Verbrauchsprofil beim Einsatz von Batterien kann einen entscheidenden Einfluss auf die Leistungsfähigkeit der Batterie haben. Sarkar [SA03] stellt einen Ansatz vor, bei dem für den Betrieb eines Sensorknotens diejenige Zelle ausgewählt wird, die sich am meisten erholt hat. Damit soll eine optimale Nutzung aller Zellen mit dem Ziel der maximalen Lebenszeit eines Sensorknotens realisiert werden.

Neben den dargestellten Forschungsbereichen sind noch zahlreiche andere Arbeiten zu nennen, die sich z. B. mit dem Topologiemanagement [CJBM02] [MLN03] [ZGE02] [MLN03], Parameter- und Zeitplanfestlegung [NBD05] [NKSK02] [GKSG03] [HDB04] oder Sicherheitsaspekten [HLV04] beschäftigen.

3.6 Zusammenfassende Bewertung

Der Überblick über das Themengebiet der Energieeffizienz in drahtlosen Sensornetzen hat gezeigt, dass verschiedene Methoden existieren, um Energie sparsam einzusetzen. Die Grundlage aller Ansätze ist die Erkenntnis, dass Aktivität in jeder Form Energie kostet

und deshalb selten auftreten sollte. Für das folgende Kapitel werden hier die wichtigen Punkte nochmals herausgestellt:

- In verwandten Arbeiten wird das Problem des energieeffizienten Medienzugriffs adressiert. Mit den existierenden Protokollen kann **vor Betriebsbeginn** der **Zeitplan** für aktive und passive Phasen **festgelegt** werden.
- Der festgelegte **Zeitplan** kann **in vermaschten Topologien** eingesetzt werden.
- Der T-MAC-Ansatz beinhaltet ein Verfahren, bei dem der **Arbeitszyklus** anhand **kurzfristiger** Verkehrsbeobachtung innerhalb bestimmter Grenzen **verändert** werden kann.
- Bestimmte **Anwendungsparameter** (Auflösung und Anwendungsdauer) **beeinflussen** den **Energieverbrauch** eines Sensorknotens in Abhängigkeit des zu beobachtenden Prozesses.
- In **Standards**, die den Medienzugriff beschreiben (z. B. IEEE 802.15.1 und IEEE 802.15.4), werden **Methoden** zum **energiesparenden Kommunizieren** vorgeschlagen.

Die Untersuchungen dieses Kapitels zeigen, dass bisher keine Verfahren existieren, die den von Sensorknoten ausgehenden Verkehr explizit für die Einstellung des Arbeitszyklus berücksichtigen. Dementsprechend sind auch keine Bewertungen oder Methoden zur Abschätzung des Zusammenhangs zwischen der Ankunftsrate und dem Energieverbrauch verfügbar. Diese Defizite der bisherigen Arbeiten sind die Grundlage für die folgenden Kapitel.

4 Verkehrsabhängige Anpassung des Arbeitszyklus

Die Betrachtungen vorangegangener Arbeiten (insbesondere in Abschnitt 3.2) haben gezeigt, dass Anwendungsaspekte und Verkehr bei der Wahl geeigneter Arbeitszykluseinstellungen fast vollständig unberücksichtigt bleiben. Entweder sind die Ansätze speziell auf Anwendungen und Übertragungstechnik zugeschnitten oder sie erfordern zusätzliches Anwendungswissen, um eine geeignete Parameterwahl zu treffen. Im Hinblick auf den Zusammenhang zwischen Verkehr und Medienzugriff fordert Ali [ASD⁺06] daher, dass Mechanismen für die Anpassung an den Verkehr zu entwickeln sind. Diese Anpassung zu realisieren, wird im Kern der vorliegenden Arbeit adressiert. Dazu wird in diesem Kapitel ein Ansatz vorgestellt, mit dem der Arbeitszyklus an die Bedürfnisse der Anwendung angepasst werden kann. Zum einen ist dabei die Unabhängigkeit von der Übertragungstechnik und der Anwendung zu bewahren, zum anderen soll Wissen über die Verkehrscharakteristik vor Betriebsbeginn nicht erforderlich sein.

In Abschnitt 4.1 wird zunächst das Szenario vorgestellt, das die Basis für die Erläuterung der Arbeitszyklusanpassung ist. Die Ausgangssituation für die Anpassung wird in Abschnitt 4.2 erläutert. Der eigentliche Kern des Ansatzes für die Anpassung des Arbeitszyklus wird in Abschnitt 4.3 dargestellt und in Beziehung zu dem Standard IEEE 802.15.4 gesetzt. Abschließend bietet der Abschnitt 4.4 einen Einblick in die Anwendbarkeit auf weitere Standardprotokolle.

4.1 Szenario

Die in Abschnitt 4.3 vorgestellte verkehrsabhängige Anpassung des Arbeitszyklus wird anhand eines einfachen Beispiels diskutiert. Das Szenario ist in Abbildung 4.1 dargestellt. Es besteht aus einer Basisstation, einer Vermittlungsstation und mehreren, entfernten Sensorknoten.

Die Basisstation wird drahtgebunden mit Energie versorgt. Wie der Zugangspunkt in Abbildung 3.1 dient sie der kommunikationstechnischen Verbindung von verschiedenen Netzen. Außerdem verfügt sie über eine Möglichkeit zur Kommunikation mit drahtlosen Sensorknoten. Die Vermittlungsstation und der entfernte Sensorknoten sind batteriebetrieben

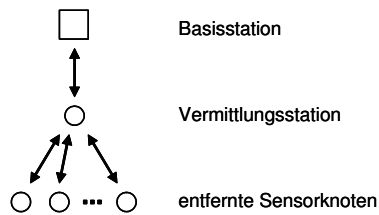


Abbildung 4.1: Für die Anpassung des Arbeitszyklus wird ein Szenario mit mehreren entfernten Sensorknoten, die ihre generierten Datenpakete mit Hilfe der Vermittlungsstation zur Basisstation übertragen, angenommen.

und können drahtlos mit anderen Sensorknoten bzw. mit der Basisstation kommunizieren. Außerdem besitzen sie Sensorfunktionen, um beispielsweise Umgebungsdaten zu erfassen. Die entfernten Sensorknoten zeichnen sich dadurch aus, dass sie aufgrund von physikalischen Beschränkungen (geringe Stärke des elektromagnetischen Feldes) nicht direkt mit der Basisstation in Verbindung treten können. Die Vermittlungsstation muss daher die Datenpakete der entfernten Sensorknoten entgegennehmen und an die Basisstation weiterleiten. Insgesamt entspricht diese Anordnung einem ungerichteten Baum, der hinsichtlich der Übertragung der Datenpakete allerdings einem In-Tree¹ mit der Basisstation als Wurzel entspricht.

Sensorische Funktionalität wird in den entfernten Sensorknoten und in der Vermittlungsstation angenommen. Die Idee dabei ist es, dass keine speziellen Knoten als Vermittlungsstation erforderlich sein sollen. Ist ein Knoten entsprechend konfiguriert, kann er sowohl als untergeordneter Knoten als auch als Vermittlungsstation für andere Knoten arbeiten. Etablierte Standards (z. B. IEEE 802.15.1 und IEEE 802.15.4) bieten Verfahren, um Netze entsprechend der verfügbaren Signalstärken aufzubauen.

Für die Verkehrscharakteristik werden im Wesentlichen zwei vereinfachende Annahmen getroffen. Erstens werden nur kleine Datenpakete (wenige Byte Nutzdaten) generiert und zweitens wird POISSON-Verkehr mit einer Ankunftsrate λ angenommen. Diese Annahmen sind beispielsweise für Anwendungen beim Monitoring von Umgebungsdaten (siehe Kapitel 2) angemessen. Die Datenpakete können sowohl im entfernten Sensorknoten als auch in der Vermittlungsstation generiert werden.

In dem Szenario wird weiterhin angenommen, dass alle durch die Sensorknoten generierten Datenpakete zur Basisstation weitergeleitet werden. Mögliche Regler oder Aktoren befinden sich innerhalb des Beispielszenarios nicht im drahtlosen Sensornetz und werden in dieser Arbeit nicht betrachtet.

Mobilität, beispielsweise nach Modellen von Camp [CBD02], wird in dieser Arbeit vernachlässigt. In dem zu betrachtenden Szenario werden nur geographisch stationäre Sen-

¹Als In-Tree wird ein gerichteter Graph verstanden, der einen bestimmten Knoten als Wurzel besitzt. Die Wurzel muss von jedem Knoten aus durch genau einen gerichteten Pfad erreichbar sein.

sorknoten betrachtet. Für einen ersten Ansatz zur Anpassung werden dadurch die Randbedingungen vereinfacht.

Die Voraussetzung für den Vorschlag einer Arbeitszyklusanpassung ist eine vorhandene Synchronisation zwischen den am drahtlosen Sensornetz beteiligten Knoten. Für das Anwendungsszenario bedeutet es, dass den Knoten (Basisstation, Vermittlungsstation und entfernter Sensorknoten) die Existenz der jeweiligen Kommunikationspartner bekannt sein muss. Des Weiteren müssen die Knoten über die jeweiligen Arbeitszyklen informiert sein. In Anlehnung an existierende Standards (z. B. IEEE 802.15.1 oder IEEE 802.15.4) sollten dazu hierarchische Beziehungen zwischen einer Vermittlungsstation (Kordinator) und einem untergeordneten Knoten bestehen. Im Szenario bedeutet es, dass die Basisstation der Koordinator bezüglich der Vermittlungsstation ist. Letztere wiederum ist Koordinator hinsichtlich der entfernten Sensorknoten.

4.2 Ausgangssituation

Durch das geschilderte Szenario ergeben sich verschiedene hard- und softwareseitige Einschränkungen für den Einsatz des zu entwickelnden Ansatzes zur Anpassung des Arbeitszyklus. Im Folgenden werden diese Einschränkungen diskutiert und als Ausgangssituation formuliert.

- Die Arbeitsweise der Anwendung unterscheidet sich prinzipiell von den Ansätzen, wie Arbeitszyklen vereinbart werden können. Von der Anwendung wird eine Nachricht generiert, wenn ein Ereignis aufgetreten ist. Dem entgegen stehen die zeitbasierten Verfahren, einen Arbeitszyklus zu vereinbaren. Die Problematik ist in Abbildung 1.2 dargestellt. Mit dem zu erarbeitenden Ansatz soll das **ereignisbasierte** Generieren der Nachrichten mit dem **zeitbasierten** Vereinbaren des Arbeitszyklus **zusammengeführt** werden. Diese Zusammenführung stellt die Hauptaufgabe des zu entwickelnden Ansatzes dar.
- Auf den Knoten in drahtlosen Sensornetzen kommen aus energetischen Gründen Mikrocontroller mit nur **geringen Rechen- und Speicherkapazitäten** zum Einsatz (z. B. ATMEL AT90 [Atm03]). Verarbeitungsgeschwindigkeiten von wenigen 10 MIPS und Speichergrößen von wenigen kByte sind damit möglich. Dadurch ist es zum einen notwendig, den einzusetzenden Algorithmus mit möglichst wenigen Rechenschritten zu gestalten und speicherintensive Analysen (z. B. umfangreiche Verkehrshistorien) zu vermeiden.
- Kommunikation zwischen den Knoten in drahtlosen Sensornetzen ist wegen geringer Ressourcen teuer. Für die Anpassung des Arbeitszyklus sind möglichst wenige Datenpakete auszutauschen. Deswegen sollte der zu entwickelnde Algorithmus

dezentral in Vermittlungsstationen **einsetzbar** sein. Das bedeutet, dass nur aufgrund von lokal in Vermittlungsstationen verfügbaren Informationen die Festlegung für Arbeitszyklen getroffen werden müssen. Zudem ist der zusätzlich notwendige Kommunikationsaufwand (z. B. für das Festlegen veränderter Arbeitszyklen) so gering wie möglich zu halten.

- Verschiedene Standardtechniken sind verfügbar, um Daten innerhalb eines drahtlosen Sensornetzes auszutauschen (siehe dazu Abschnitt 3.4). Wird der zu entwickelnde Algorithmus für die Anpassung des Arbeitszyklus auf einen Standard zugeschnitten, können zwar die Vorteile einer speziellen Technik genutzt werden, aber für die Übertragung auf andere Techniken sind größere Anpassungen notwendig. Deswegen ist der Algorithmus möglichst **standardunabhängig** zu gestalten. Zusätzliche standardspezifische Verfeinerungen sind dennoch möglich und können zu Verbesserungen im Einzelfall führen. In diesem Zusammenhang muss auf die Betrachtung spezieller Medienzugriffsverfahren verzichtet werden (siehe auch Abschnitt 5.1.3).
- Für die Anwendung des Algorithmus kann **kein Vorwissen**, beispielsweise **über** die zu erwartende **Verkehrscharakteristik**, vorausgesetzt werden. Der Ansatz soll sich dem Anwender transparent darstellen. Daher ist es notwendig, dass in dem Knoten, der die Anpassung des Arbeitszyklus festlegt, eigenständig die Verkehrscharakteristik, mit geringer Komplexität, bestimmt wird.
- In der Realität können zu bestimmten Zeitpunkten **Änderungen in der Verkehrscharakteristik** auftreten (siehe Kapitel 2). Bei Anwendung der Arbeitszyklusanpassung soll es möglich sein, auf derartige Veränderungen zu reagieren. Deshalb muss die Verkehrscharakteristik kontinuierlich beobachtet werden, um bei auftretenden Änderungen den Arbeitszyklus erneut anzupassen.
- Der Energieverbrauch der drahtlosen Sensorknoten ist abhängig von dem Modus, in dem sie betrieben werden. In vorangegangenen Arbeiten (z. B. Bhardwaj [CBG01]) werden genaue Angaben über die Verbräuche gemacht. In dieser Arbeit soll im Wesentlichen zwischen zwei Zuständen in Bezug auf die **Energieverbräuche** unterschieden werden: **aktiv** (wenige zehn Milliwatt) und **passiv** (wenige Mikrowatt, im Folgenden auch als Ruhezustand bezeichnet). Im aktiven Zustand ist der Sensorknoten voll funktionsfähig für Senden, Empfangen und Verarbeiten der Nachrichten. Da in dieser Arbeit nur die Anpassung des Arbeitszyklus für die Datenübertragung, nicht aber für die sensorischen Aktivitäten untersucht wird, werden Zustände, die beispielsweise das Erfassen von Umgebungsdaten betreffen, vernachlässigt.
- Innerhalb einer aktiven Phase kommunizieren die Knoten stets innerhalb einer Sterntopologie. Ein Knoten arbeitet als **Koordinator** für die Organisation **des Arbeitszyklus** aller anderen untergeordneten Knoten. Damit besteht nur in der Ver-

mittlungsstation die Möglichkeit, Einfluss auf die Einstellung des Arbeitszyklus zu nehmen.

- Es werden nur **Nachrichtenflüsse von Sensorknoten hin zur Basisstation** angenommen. Diese Richtung entspricht dem Normalbetrieb, in dem das Sensornetz Änderungen der Umgebung an die Basisstation melden soll. Nachrichten, die z. B. für die Wartung der Sensorknoten notwendig sind, werden im Rahmen dieser Arbeit vernachlässigt. Ebenso werden Signalisierungsnachrichten, z. B. Bestätigung des Empfangs, vernachlässigt, da die entsprechenden Dienste abstrakt betrachtet werden.
- Ein Knoten besitzt nur einen Transceiver. Damit können **Datenpakete nur gesendet oder empfangen** werden. Es ist für den Knoten nicht möglich, gleichzeitig zu senden und zu empfangen oder auf unterschiedlichen verfügbaren Frequenzen an Kommunikationsverbindungen teilzuhaben. Die Aktivitäten müssen entsprechend zeitlich aufgeteilt werden.

Eine Schwierigkeit für die Anpassung des Arbeitszyklus stellt die Wahl eines geeigneten Kompromisses zwischen Energieverbrauch und Transaktionszeit dar (vgl. Abschnitt 3.2). Ohne spezielles Wissen über die Anwendung (z. B. Anforderungen hinsichtlich der Reaktionszeiten) lassen sich keine sinnvollen Parameter bestimmen. Das widerspricht eigentlich der Bedingung, dass kein Vorwissen über die Verkehrscharakteristik notwendig sein sollte. Dieser Aspekt wird im späteren Teil der Arbeit (siehe Abschnitt 5.2.2) genauer diskutiert. Es wird dort die relative Verzögerungszeit als eine Abstraktion von speziellen Verkehrscharakteristika eingeführt.

Da die von den untergeordneten Knoten an die Vermittlungsstation übertragenen Nachrichten an die Basisstation weitergeleitet werden müssen, besteht in der Vermittlungsstation die Möglichkeit, Nutzdaten zusammenzufassen und damit Signalisierungsinformation einzusparen. Vorangegangene Arbeiten beschäftigen sich mit der Problematik der Aggregation (z. B. [HMR⁺04]). Sie wird in dieser Arbeit vernachlässigt, um nur die Anpassung des Arbeitszyklus isoliert zu betrachten.

Ein untergeordneter Knoten kann nur einer Vermittlungsstation zugeordnet werden. In realen drahtlosen Sensornetzen sind auch Topologien, die nicht einem Baum entsprechen, möglich. Der untergeordnete Knoten müsste sich dann mit zwei verschiedenen Vermittlungsstationen über die Organisation der aktiven Phasen und die damit zusammenhängende Topologie abstimmen. Ansätze für die Lösung dieses organisatorischen Problems werden in Abschnitt 4.3.3 diskutiert.

Durch physikalische Gegebenheiten [Pro95] ist der Kanal für die drahtlose Übertragung Schwankungen unterworfen. Dadurch kann es zu unterschiedlichen Bitfehlerraten bis hin zu Informationsverlusten kommen. In dieser Arbeit werden die physikalischen Bedingungen vereinfacht betrachtet (siehe Abschnitt 5.3.4).

4.3 Anpassung des Arbeitszyklus

Die Herausforderung besteht darin, den Arbeitszyklus in der Vermittlungsstation und den entfernten Sensorknoten einzustellen, so dass ein geeigneter Kompromiss zwischen Energieverbrauch und Transaktionszeit gefunden wird (siehe Abbildung 1.3).

Zunächst wird der Kern des Anpassungskonzeptes diskutiert. Er stellt den generischen Teil der Arbeit dar, der auf verschiedene Übertragungstechniken angewendet werden kann. Anschließend wird am konkreten Beispiel erläutert, wie der Ansatz zur Anpassung des Arbeitszyklus auf den Standard IEEE 802.15.4 angewendet werden kann. Die Darstellung des Konzeptes wird durch eine Diskussion zur Übertragbarkeit auf weitere Standardtechniken abgeschlossen.

4.3.1 Grundprinzip

In diesem Abschnitt wird ein Verfahren für die verkehrsabhängige Anpassung des Arbeitszyklus eingeführt. In Abbildung 4.2 ist die dafür notwendige Komponente innerhalb der Sicherungsschicht des OSI-Modells zwischen den Teilschichten für Medienzugriff (MAC) und Datensicherung (LLC) eingeordnet. Die Anpassung des Arbeitszyklus bezieht sich unmittelbar nur auf die Vermittlungsstation. Daher wird in den folgenden Erläuterungen zu den Details die Vermittlungsstation als Koordinator für die entfernten Sensorknoten, die als untergeordnete Knoten arbeiten, verstanden. Da aufgrund der Annahmen in Abschnitt 4.1 Energie in der Basisstation keine knappe Ressource ist, wird die Anpassung nicht in der Basisstation eingesetzt. Sie ist damit für die Vermittlungsstation kontinuierlich verfügbar. Dadurch ist kein zusätzlicher Aufwand für die Koordination des Arbeitszyklus zwischen Basisstation und Vermittlungsstation erforderlich.

Alle Dienstaufrufe in beiden Richtungen zwischen MAC und LLC werden zunächst durch die Anpassungskomponente bearbeitet, die die relevanten Informationen extrahiert. Werden Sensorknoten nur als untergeordnete Knoten betrieben (entfernte Sensorknoten in Abbildung 4.2), wird der Arbeitszyklus dort nicht aktiv angepasst, da er immer vom übergeordneten Knoten bestimmt wird. Entfernte Sensorknoten haben nicht die Möglichkeit, gegenüber anderen Sensorknoten die Funktion als Vermittlungsstation auszuüben.

Die Anpassungskomponente stellt im Wesentlichen einen Regler dar, der Verkehrsbeobachtungen als Rückführungsgröße aufnimmt und Parameter für den Arbeitszyklus als Stellgröße ausgibt. Dabei besteht das Grundprinzip der Anpassung des Arbeitszyklus aus drei Teilen [NPK05b], [NPK05a]:

1. Beobachtung des in der Vermittlungsstation eintreffenden Verkehrs
2. Ableiten des Änderungsbedarfs bezüglich des Arbeitszyklus

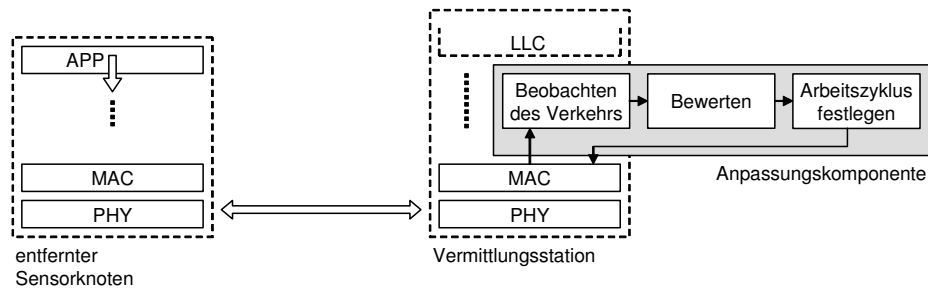


Abbildung 4.2: Der Algorithmus zur Anpassung des Arbeitszyklus wird im OSI-Schichtenmodell oberhalb der Medienzugriffsschicht platziert. Die darüber liegenden Schichten werden durch die Anpassungskomponente nicht beeinflusst.

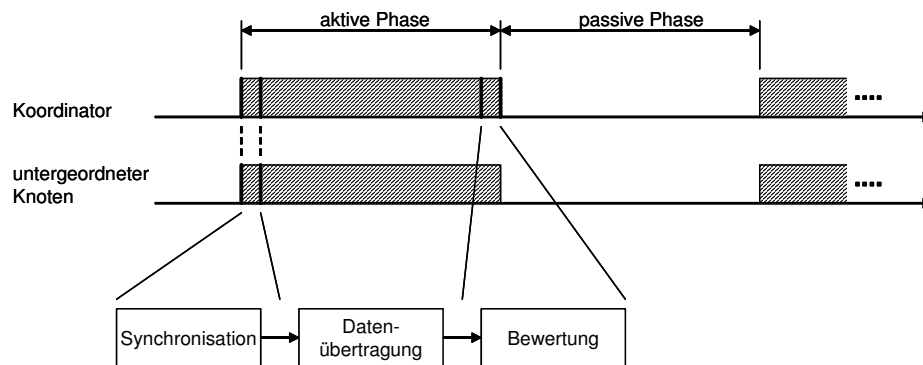


Abbildung 4.3: Für die Anpassung des Arbeitszyklus muss die Synchronisation sichergestellt sein, der Verkehr beobachtet und bewertet werden.

3. Mitteilen der Änderung an die untergeordneten Knoten

Solange eine Anpassung des Arbeitszyklus erwünscht ist, werden diese drei Schritte wiederholt ausgeführt. Abbildung 4.3 zeigt die zeitliche Abfolge der aktiven und passiven Phasen, in die die drei Schritte eingeordnet werden können. Während der Datenübertragung vom untergeordneten Knoten zur Vermittlungsstation wird durch letztere der erste Schritt, die Beobachtung des eintreffenden Verkehrs, ausgeführt. Anschließend bewertet die Vermittlungsstation den Verkehr und leitet mögliche Änderungen des Arbeitszyklus ab. Die Einfachheit des im Folgenden genauer dargestellten Algorithmus erlaubt die Annahme, dass die Bewertung wesentlich geringere Zeit als die aktive bzw. passive Phase in Anspruch nimmt. Der letzte Schritt kann auch zu Beginn der nächsten aktiven Phase ausgeführt werden. Mit der Synchronisation werden mögliche neue Einstellungen des Arbeitszyklus an den untergeordneten Knoten mitgeteilt.

Der Algorithmus 1 stellt den detaillierten Ablaufplan für die Anpassung des Arbeitszyklus dar. Die folgenden Erläuterungen beziehen sich auf diesen Algorithmus. Im Kern sind die

Algorithmus 1 Anpassung des Arbeitszyklus

```

1:  $i \leftarrow 1$ 
2: while Anpassung erwünscht do
3:   Synchronisation zu Beginn der aktiven Phase und Mitteilen möglicher vorangegan-
     gener Änderungen des Arbeitszyklus
4:   Empfangen aller Datenpakete von den untergeordneten Knoten 1 bis  $n_{uK}$ 
5:   for  $j = 1$  to  $n_{uK}$  do
6:     if Datenpaket von untergeordnetem Knoten  $j$  empfangen then
7:        $c_j ++$ 
8:     end if
9:   end for
10:  if  $\text{sum}(\mathbf{c}) \geq h_u$  then
11:    Arbeitszyklus erhöhen
12:     $\mathbf{c} = \mathbf{0}$  /* Zähler initialisieren */
13:     $i \leftarrow 1$ 
14:  else
15:    if  $i = n_m$  then
16:      if  $\text{sum}(\mathbf{c}) \leq h_l$  then
17:        Arbeitszyklus verringern
18:      end if
19:       $\mathbf{c} = \mathbf{0}$  /* Zähler initialisieren */
20:       $i \leftarrow 1$ 
21:    else
22:       $i \leftarrow i + 1$ 
23:    end if
24:  end if
25:  Weiterverarbeitung der Datenpakete bei Bedarf
26:  Timer für Umschalten von Ruhezustand in aktiven Zustand setzen
27:  Ruhezustand bis zum Beginn der nächsten aktiven Phase
28: end while

```

folgenden Parameter bedeutsam:

- n_{uK} - Eine Vermittlungsstation kann einen oder mehrere untergeordnete Knoten besitzen. Der Parameter n_{uK} gibt die Anzahl dieser Knoten an. Sie wird durch die Anzahl der maximal möglichen Adressen bzw. der maximal gleichzeitig handhabbaren untergeordneten Knoten (z. B. nur 7 aktive Slaves bei Bluetooth/IEEE 802.15.1) innerhalb eines Sensornetzes bestimmt. In der folgenden Beschreibung wird in Abbildung 4.1 $n_{uK} = 1$ angenommen.
- n_m - Die an der Vermittlungsstation eintreffenden Datenpakete werden über eine festgesetzte Zeit beobachtet. Anschließend bewertet die Vermittlungsstation diesen Verkehr und teilt mögliche Änderungen mit. Der Parameter n_m legt fest, über wieviele aktive Phasen der Verkehr vor der Bewertung aufgezeichnet werden soll. In der Variable i werden die aktuell beobachteten passiven Phasen gezählt.
- h_l, h_u - Für die Bewertung ist entscheidend, ob eine minimale Anzahl von Paketen unterschritten oder ein Maximum überschritten wurde. Die Parameter h_l und h_u halten diese Grenzen als untere bzw. obere Schwelle.
- \mathbf{c} - Für jeden untergeordneten Knoten j wird die Anzahl der eintreffenden Nachrichten in einer separaten Zählervariable c_j erfasst. Der Vektor \mathbf{c} hält insgesamt n_{uK} solcher Zähler ($\mathbf{c} = (c_1, \dots, c_{n_{uK}})$).

Als Voraussetzung für die korrekte Funktion der Anpassung wird zunächst die Synchronisation der Arbeitszyklen der Vermittlungsstation und der untergeordneten Sensorknoten sichergestellt. Zugleich werden Änderungen des Arbeitszyklus, die sich möglicherweise aus vorangegangenen Bewertungen ergeben haben, an die untergeordneten Knoten mitgeteilt (Zeile 3). Abhängig von der Übertragungstechnik werden dafür verschiedene Mechanismen angewendet. Damit soll erreicht werden, dass Beginn und Ende einer aktiven Phase in der Vermittlungsstation und den untergeordneten Knoten gleich sind und keine Verschiebungen auftreten können. Anschließend übertragen die untergeordneten Knoten ihre Datenpakete (Zeile 4). Die empfangenen Pakete werden für jeden untergeordneten Sensorknoten j separat im Zähler c_j innerhalb von \mathbf{c} gezählt (Zeilen 5-9).

Am Ende der aktiven Phase bewertet die Vermittlungsstation die Häufigkeiten der Nachrichten. Dabei stellt sie im ersten Schritt fest, ob die obere Grenze h_u überschritten ist, das heißt ob sie von den untergeordneten Knoten mehr als h_u Nachrichten empfangen hat (Zeile 10). Ist das nicht der Fall, so bedeutet es zunächst, dass kein Handlungsbedarf hinsichtlich der Erhöhung des Arbeitszyklus besteht. Ansonsten erhöht die Vermittlungsstation den Arbeitszyklus und gibt den untergeordneten Knoten damit häufiger die Möglichkeit für die Übertragung von Nachrichten. Der Arbeitszyklus kann erhöht werden, indem bei gleichbleibender Dauer der aktiven Phase die passive Phase verkürzt wird. Anschließend setzt die Vermittlungsstation die Zähler \mathbf{c} und i zurück (Zeilen 11-13).

Im zweiten Schritt prüft die Vermittlungsstation, ob sie bereits eine Anzahl von n_m aktiven Phasen beobachtet hat (Zeile 15). Ist das gegeben, so prüft sie weiterhin, ob eine minima-

le Anzahl h_l Nachrichten von den untergeordneten Knoten eingetroffen sind (Zeile 16). Konnte die Grenze h_l nicht überschritten werden, bedeutet es, dass der Arbeitszyklus zu hoch ist, und dass somit die Vermittlungsstation den untergeordneten Knoten zu häufig die Möglichkeit zur Datenübertragung einräumt. Der Arbeitszyklus kann also verringert werden (Zeile 17), indem die passive Phase bei gleichbleibender aktiver Phase verkürzt wird. Damit ist die Bewertung des Verkehrs abgeschlossen und die Zähler können zurückgesetzt werden (Zeilen 19-20). Wurde die obere Grenze h_u nicht überschritten bzw. die maximale Anzahl aktiver Phasen n_m noch nicht beobachtet, inkrementiert die Vermittlungsstation nur den Zähler i .

Der Arbeitszyklus kann nicht nur durch die Veränderung der Dauer der passiven Phase beeinflusst werden, auch über die Dauer der aktiven Phase lässt sich der Arbeitszyklus verändern. Durch die Erhöhung der Dauer der aktiven Phase wird allerdings nicht die Anzahl der eintreffenden Nachrichten erhöht, da die Zeit, innerhalb welcher die Sensor-knoten Nachrichten generieren, gleich bleibt. Die Dauer der aktiven Phase kann aber im Fall von Überlastungen für den Abbau angestauter Nachrichten erhöht werden. Diese Variante wird in der vorliegenden Arbeit nicht betrachtet, kann aber als Ansatz für weitere Arbeiten verwendet werden.

Nach der Bewertung der Häufigkeiten der Nachrichten steht der Arbeitszyklus für die folgenden aktiven Phasen fest. Abhängig von der Übertragungstechnik wird dann der Arbeitszyklus entweder unmittelbar, noch am Ende der aktiven Phase, oder erst in der nächsten aktiven Phase den untergeordneten Knoten mitgeteilt.

Innerhalb der passiven Phase können die Knoten autonom entscheiden, ob sie noch andere Aufgaben erfüllen sollen oder ob sie bis zum Beginn der nächsten aktiven Phase in einen Ruhezustand zu versetzen sind (Zeile 25). Müssen beispielsweise die empfangenen Datenpakete mit der gleichen Übertragungstechnik an übergeordnete Vermittlungsstationen (z. B. an Basisstation) weitergeleitet werden, dann übernimmt die Vermittlungsstation die Rolle eines untergeordneten Knotens gegenüber der Basisstation, die dann als Vermittlungsstation arbeitet um die weiterzuleitenden Pakete zu empfangen.

Den Zeitpunkt für den Beginn der nächsten aktiven Phase berechnen die Teilnehmer aus den Einstellungen der Parameter für den Arbeitszyklus. Damit können sie einen Timer setzen, der sie rechtzeitig vor Beginn der nächsten aktiven Phase vom passiven in den aktiven Zustand schalten soll (Zeile 26). Die Vermittlungsstation kann dann in den energiesparenden passiven Zustand übergehen (Zeile 27).

Im nächsten Arbeitszyklus wird erneut mit der Synchronisation der Arbeitszyklen begonnen. Solange die Anpassung erwünscht ist, führt die Vermittlungsstation die dargestellten Schritte für die Anpassung des Arbeitszyklus aus (Zeile 2). Es ist möglich, die Anpassung des Arbeitszyklus abzuschalten, allerdings sollte das von der Anwendung bestimmt werden.

Befinden sich innerhalb eines Netzes mehrere Ebenen mit drahtlosen Knoten, ist es erfor-

derlich, die Arbeitszyklen untereinander zu koordinieren. In Abschnitt 4.3.3 wird diese Problematik im Detail dargestellt werden.

4.3.2 Anwendung auf IEEE 802.15.4

Bisher wurde der Ansatz zur Anpassung des Arbeitszyklus abstrakt und ohne konkreten Bezug auf verfügbare Übertragungstechniken dargestellt. In diesem Abschnitt wird nun der spezielle Bezug zum Standard IEEE 802.15.4 herausgearbeitet. Insbesondere der Beacon-Enabled-Modus (siehe Abschnitt 3.4.1) wird als Grundlage für die Anpassung des Arbeitszyklus vorausgesetzt. Innerhalb des Standards IEEE 802.15.4 wird eine Vermittlungsstation (Koordinator) auch als Full Function Device (FFD) und ein untergeordneter Knoten als Reduced Function Device (FFD) bezeichnet. Ein FFD ist in der Lage sowohl als Koordinator als auch als untergeordneter Knoten zu arbeiten.

Der Algorithmus zur Anpassung des Arbeitszyklus wird oberhalb der Medienzugriffsschicht angeordnet. Für den Zugriff auf diese Schicht stehen im Standard zwei verschiedene Dienzzugriffspunkte (Service Access Point - SAP) zur Verfügung: MAC Common Part Sublayer (MCPS) und MAC Sublayer Management Entity (MLME). Durch den MCPS-SAP werden Datendienste angeboten, der MLME-SAP bietet Funktionen für organisatorische Aufgaben (z. B. Parameterverwaltung) innerhalb der Medienzugriffsschicht an. In der PAN Information Base (PIB), die sich innerhalb des MLME befindet, werden die für das PAN wichtigen Parameter (z. B. aktuelle Beacon Order) gespeichert. Die für den Ansatz zur Arbeitszyklusanpassung wichtigsten Parameter sind *macBeaconOrder*, *macSuperframeOrder* und *aBaseSuperframeDuration*. Mit diesen Parametern können unter anderem die Dauer der aktiven Phase und die Zeit zwischen zwei aufeinander folgenden Beacon-Nachrichten bestimmt werden.

Unterhalb der Medienzugriffsschicht befindet sich die physikalische Schicht, deren Dienste nicht für die Realisierung der Arbeitszyklusanpassung herangezogen werden.

Der erste Teil der Arbeitszyklusanpassung, die Synchronisation der aktiven Phasen, wird im Standard IEEE 802.15.4 mit Beacon-Enabled-Modus durch eine spezielle Beacon-Nachricht gesichert. Sie enthält Beacon Order und Superframe Order, womit die untergeordneten Knoten den Ablauf des Arbeitszyklus berechnen können. Der Koordinator generiert die Beacon-Nachricht zu Beginn einer aktiven Phase innerhalb der Medienzugriffsschicht und sendet sie an alle untergeordneten Knoten. Innerhalb der untergeordneten Knoten wird bei Ankunft einer Nachricht die Funktion MCPS-DATA.indication aufgerufen. Anhand der übergebenen Parameter erkennt ein untergeordneter Knoten den Empfang einer Beacon-Nachricht und schließt auf die folgende aktive Phase. Die in der Beacon-Nachricht enthaltenen Parameter für die Beacon Order und die Superframe Order erlauben einem untergeordneten Knoten außerdem, die Dauer der aktiven Phase und die Zeit bis zur nächsten Beacon-Nachricht zu berechnen (siehe Anhang A).

Untergeordneten Knoten können innerhalb der aktiven Phase durch Aufruf der Funktion `MCPS-DATA.request` Datenpakete an den Koordinator senden. Dabei ist ihnen für den Netzbetrieb zunächst freigestellt, ob sie konkurrierend (CAP) oder konkurrenzfrei (CFP) auf das Medium zugreifen. Der Erfolg oder mögliche Fehler beim Medienzugriff wird über die Funktion `MCPS-DATA.confirm` zurückgemeldet.

Erreicht ein Datenpaket eines untergeordneten Knotens die Medienzugriffsschicht des Koordinators, wird ausgehend von der Medienzugriffsschicht die Funktion `MCPS-DATA.indication` in der nächsthöheren Schicht aufgerufen. In dieser Funktion ist der Sender j der Nachricht vermerkt, so dass der Koordinator den entsprechenden Zähler c_j in \mathbf{c} erhöhen kann. Nachrichten, die vor dem korrekten Empfang kollidieren oder durch physikalische Gegebenheiten zerstört werden, erreichen die Medienzugriffsschicht nicht. Dadurch kann sie der Koordinator nicht erkennen. Um Verluste zu vermeiden, kann ein bestätigter Dienst verwendet werden.

Am Ende der aktiven Phase muss der Koordinator die Häufigkeiten der eingetroffenen Nachrichten bewerten (Zeilen 10 bis 24 in Algorithmus 1). Übertragen auf den Standard IEEE 802.15.4 bedeutet die Erhöhung oder Verringerung des Arbeitszyklus (Zeile 11 bzw. 17 in Algorithmus 1) ein Dekrementieren bzw. Inkrementieren der Beacon Order. Das Dekrementieren der Beacon Order führt zu einer kürzeren passiven Phase, das Inkrementieren entsprechend zu einer längeren passiven Phase. Ist die Superframe Order trotz der Beschränkung in Gleichung (A.1) noch anpassbar, kann sie auch inkrementiert bzw. dekrementiert werden, um den Arbeitszyklus zu erhöhen oder zu verringern. Wenn das Medium nicht überlastet ist, wird sich dadurch allerdings die Anzahl der Nachrichten nicht verändern. Es wirkt sich also nicht auf den Algorithmus aus.

Beacon Order und Superframe Order werden mit den Parametern `macBeaconOrder` und `macSuperframeOrder` in der PIB gespeichert. Durch die Funktion `MLME-GET.request` können die aktuellen Parameterwerte abgefragt werden. Die Funktion `MLME-GET.confirm` liefert das Ergebnis zurück. Neue Parameterwerte können mit `MLME-SET.request` gesetzt werden. Die Bestätigung über Erfolg oder Fehler liefert die Funktion `MLME-SET.confirm`. Diese Funktionen ermöglichen einem Koordinator, den Arbeitszyklus zu erhöhen oder zu verringern. Werden die Parameter `macBeaconOrder` und `macSuperframeOrder` in der Anpassungskomponente nicht persistent, parallel zur PIB gehalten, müssen die aktuellen Werte zunächst abgefragt werden. Die Parameter können dann inkrementiert bzw. dekrementiert und in die PIB geschrieben werden. Damit ist die Veränderung des Arbeitszyklus realisiert und die neuen Werte für `macBeaconOrder` bzw. `macSuperframeOrder` werden automatisch mit der nächsten Beacon-Nachricht an die untergeordneten Knoten übertragen.

Die für den Anpassungsalgorithmus wichtigsten Dienstprimitive sind in Abbildung 4.4 in einem Message-Sequence-Chart zusammengefasst. Details zu den genannten Funktionen sind in der Standardspezifikation ([Ins03], Kapitel 7) zu finden. Dort sind auch alle anderen Dienstprimitive zu finden, z. B. für Assoziation/Dissoziation zu einem Koor-

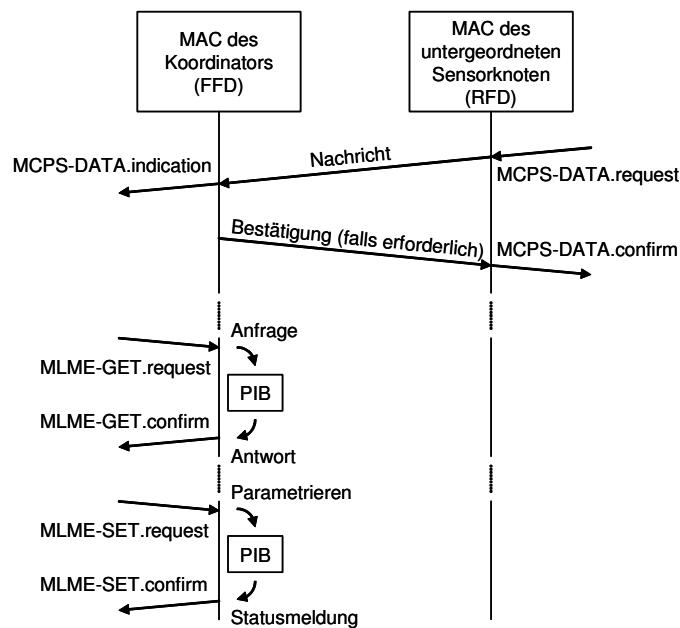


Abbildung 4.4: Message-Sequence-Chart mit den wichtigsten Dienstprimitiven des IEEE 802.15.4 Standards

inator, die innerhalb des Standards definiert, aber für die Anpassung des Arbeitszyklus unbedeutend sind.

Neben dem Beacon-Enabled-Modus ist im Standard auch ein Non-Beacon-Enabled-Modus vorgesehen. Diese Betriebsart wird in der vorliegenden Arbeit nicht in Betracht gezogen, da die für die Anpassung notwendige Synchronisation der Arbeitszyklen zwischen Koordinator und untergeordneten Knoten fehlt.

4.3.3 Organisation der Zeitplanung

Für die Erläuterung des Grundprinzips zur Anpassung des Arbeitszyklus in drahtlosen Sensornetzen wurde bisher ein Szenario herangezogen (Abbildung 4.1), in dem die Organisation der einzelnen aktiven und passiven Phasen kein Problem darstellt. Nur die Vermittlungsstation modifiziert den Arbeitszyklus, der auch direkt für den untergeordneten Knoten gilt. Da die Basisstation keinen Beschränkungen hinsichtlich der Energie unterworfen ist, kann sie kontinuierlich für Pakete der Vermittlungsstation empfangsbereit sein. Es kann dadurch nicht zu Überlappungen der aktiven Phasen kommen und die Vermittlungsstation kann den Arbeitszyklus autark bestimmen. Er wirkt sich nur auf die Kommunikationsbeziehung zwischen Vermittlungsstation und den entfernten Sensorknoten aus.

Wenn allerdings mehr als die in Abbildung 4.1 dargestellten Knoten ein Netz bilden, können Probleme bei der Einstellung des Arbeitszyklus auftreten. In Abbildung 4.5 (a) ist ein Teilbaum, innerhalb dessen eine Konfliktsituation entstehen kann, dargestellt. Der Wurzelknoten 1 dieses Teilbaumes hat auf einer ersten untergeordneten Ebene zwei Knoten 2 und 3, die wiederum jeweils einen Knoten (4 bzw. 5) als untergeordnete Knoten haben. Auch diese Knoten besitzen eine weitere untergeordnete Ebene mit jeweils einem Knoten.

Zu Problemen hinsichtlich der Organisation der Zeitplanung können beispielsweise die folgenden Abläufe führen:

- Der Wurzelknoten 1 besitzt mehrere untergeordnete Knoten 2 und 3, die wiederum auch untergeordnete Knoten 4 bzw. 5 besitzen. Ohne zusätzliches Wissen über die Topologie ist zunächst unklar, ob die untergeordneten Knoten 2 und 3 auf gleicher Ebene miteinander kommunizieren können. Befänden sich die Knoten außerhalb der Kommunikationsreichweite des jeweils anderen Knoten, würden sie sich nicht gegenseitig stören. Es müssten keine zusätzlichen Maßnahmen für die Koordination der Arbeitszyklen ergriffen werden. Befinden sich allerdings die Knoten 2 und 3 innerhalb der jeweils anderen Kommunikationsreichweite und werden gleichzeitig als Vermittlungsstation aktiv, stören sie gegenseitig ihre Übertragung aufgrund der geographischen Nähe. Dieser Konfliktfall entsteht zwischen Knoten innerhalb einer Ebene (horizontal) und ist in Abbildung 4.5 (b) dargestellt. Er erzwingt eine Aufteilung der Ressourcen für die Datenübertragung.
- Des Weiteren können sich Aktivitäten überlagern, wenn Knoten verschiedener Ebenen gleichzeitig aktiv werden. In Abbildung 4.5 (c) ist eine solche Situation dargestellt. Dabei ist der Wurzelknoten 1 des Teilbaumes zugleich mit den Knoten 4 und 5 als Vermittlungsstation aktiv. Senden nun die untergeordneten Knoten 2 und 3 bzw. 6 und 7 an ihre jeweiligen Vermittlungsstationen 1 bzw. 4 und 5, kommt es aufgrund der geographischen Nähe zur Überlagerungen der Datenübertragung in den Knoten 4 und 5. Der Konfliktfall entsteht innerhalb verschiedener Ebenen (vertikal) und wird auch als Problem des versteckten Teilnehmers bezeichnet (siehe Anhang B.1). Es kann nur durch die Aufteilung der Ressourcen gelöst werden.

Grundsätzlich stehen in drahtlosen Übertragungssystemen vier verschiedene Ressourcen zur Verfügung: Raum, Zeit, Frequenz und Code [Pro95]. Entsprechend wird in der Nachrichtentechnik zwischen Raum-, Zeit-, Frequenz- und Code-geteilten Mehrfachzugriffsverfahren (SDMA, TDMA, FDMA, CDMA) unterschieden. Aufgrund der geographischen Anordnung der Sensorknoten und der Ausbreitungseigenschaften elektromagnetischer Wellen ist die Ressource Raum unveränderlich entsprechend der Topologie des Netzes vergeben, die Teilnehmer sind räumlich voneinander getrennt. Die Ressource Raum ist damit bereits aufgeteilt. Durch die erhöhte Sender- und Empfängerkomplexität bei Code-geteilten Mehrfachzugriffsverfahren hat sich diese Technik im Bereich der drahtlosen Sensornetze noch nicht durchgesetzt. Um Frequenz-geteilt mehrfach auf das Medium

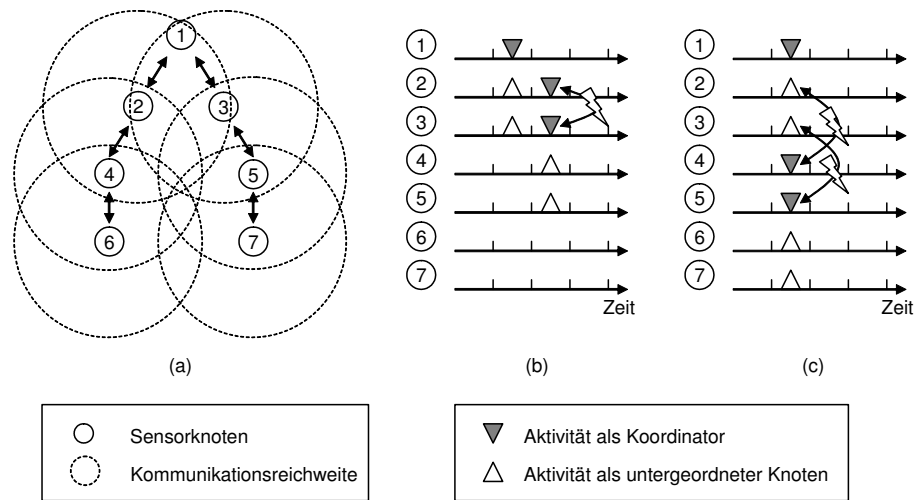


Abbildung 4.5: (a) Teilbaum, in dem es aufgrund der Topologie zu Konflikten bei der Datenübertragung kommen kann. (b) Konflikt zwischen zwei Knoten innerhalb der gleichen Ebene. (c) Konflikt zwischen Knoten innerhalb unterschiedlicher Ebenen.

zuzugreifen stehen im Standard IEEE 802.15.4 im 2,4 GHz Frequenzbereich 16 verschiedene Kanäle zur Verfügung. Nutzen verschiedene Gruppen von Kommunikationsteilnehmern unterschiedliche Kanäle, stören sie sich nicht untereinander. Die Zeit unterliegt als Ressource zunächst keinen Beschränkungen in Bezug auf den Medienzugriff, über sie kann frei verfügt werden.

Die Herausforderung besteht darin, die verfügbaren Ressourcen Frequenz und Zeit den einzelnen Teilnehmern geeignet zuzuweisen, so dass keine Konflikte bei der Datenübertragung auftreten können.

Die einfachste Lösung wäre, jedem Knoten einen separaten Zeitschlitz oder eine eigene Frequenz für die Aktivität als Vermittlungsstation zuzuordnen. Damit würde die Anzahl der notwendigen Zeitschlitze, respektive Frequenzen, innerhalb eines Zyklus der Anzahl der als Vermittlungsstation arbeitenden Knoten entsprechen. Als Folge würde mit dieser Strategie allerdings Kapazität verschwendet, da hinreichend weit voneinander entfernte Knoten durch die Ressource Raum bereits voneinander getrennt wären. Eine zusätzliche Zeit- bzw. Frequenzteilung wäre für entfernte Knoten nicht erforderlich.

Eine konkrete Lösung zum Problem der Aufteilung der Ressourcen zu finden, soll nicht Ziel dieser Arbeit sein. Vielmehr wird an dieser Stelle auf verwandte Arbeiten verwiesen, die bereits im Bereich der Funknetzplanung ähnliche Probleme gelöst haben.

In diesem benachbarten Fachgebiet besteht die Aufgabe, die verfügbaren Frequenzen den einzelnen Basistationen so zuzuweisen, dass möglichst wenig Interferenz zwischen

benachbarten Zellen auftreten kann. Lösungsmöglichkeiten für dieses sogenannte Frequency Assignment Problem (FAP) werden von Eisenblätter [EGK02] diskutiert und von Aardal [AvHK⁺01] ausführlich dargestellt. Im Kern handelt es sich dabei um Graphfärbungsprobleme (Ressource Frequenz als Farbe) unter Beachtung bestimmter maximal zulässiger Interferenzen.

Diesbezüglich kann die hier notwendige Aufteilung der Ressourcen Zeit und Frequenz als eine Erweiterung des FAP verstanden werden. Um die vorgeschlagenen Lösungen auf das Problem der Zeitplanung zu übertragen, müssen für die Problematik hier allerdings noch weitere Parameter in die Zielfunktion des Optimierungsproblems einfließen - beispielsweise die Zeit als Ressource und die zulässige Verzögerungszeit für Datenübertragungen als zusätzliche Bedingung.

Auf die Lösung des Verteilungsproblems wird innerhalb dieser Arbeit aufgrund des Problemumfangs verzichtet. Der Fokus der Darstellung liegt nur auf dem in Abbildung 4.1 dargestellten Szenario.

4.4 Anwendbarkeit auf andere Protokolle

In Abschnitt 4.3.2 wurde am Beispiel von IEEE 802.15.4 gezeigt, dass sich das Grundprinzip der verkehrsabhängigen Anpassung des Arbeitszyklus auch auf Standardtechnik anwenden lässt. Neben dem dort betrachteten Standard IEEE 802.15.4 lässt sich der entwickelte Ansatz auch auf andere Übertragungstechniken anpassen. Beispielhaft werden im Folgenden die Standards IEEE 802.15.1 (Bluetooth) und IEEE 802.11 (WLAN) in Bezug auf die Anwendbarkeit untersucht.

4.4.1 Anwendbarkeit auf IEEE 802.15.1

Der Standard IEEE 802.15.1 verfügt über synchronisierte Kommunikation, wobei über eine Kombination aus TDMA und FDMA der getrennte Zugriff auf das Übertragungsmedium für mehrere Teilnehmer ermöglicht wird. Dem zeitgeteilten Mehrfachzugriffsverfahren TDMA ist das Time Division Duplex (TDD) überlagert, so dass innerhalb von zwei Zeitschlitzten die Datenübertragung von Master zu Slave sowie in umgekehrter Richtung von Slave zu Master bewältigt werden kann. Um schmalbandige Störungen des Übertragungsmediums zu vermeiden, wird zusätzlich Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS) eingesetzt. Die entsprechenden Sequenzen für das Wechseln der Frequenzen werden von den Kommunikationspartner automatisch generiert, und verhalten sich daher transparent gegenüber der Datenübertragung.

Die im Standard vorgesehenen, zusätzlichen Modi Sniff, Hold und Park ermöglichen Ruhephasen, in denen die Geräte energiesparend betrieben werden können (siehe Abbildung

gen 3.7 (a) bis (c) in Abschnitt 3.4.2). Mit diesen Möglichkeiten ist die Voraussetzung für die Anpassung des Arbeitszyklus vorhanden. Für die folgende Darstellung der Anwendbarkeit der Arbeitszyklusanpassung wird der Hold-Modus herausgegriffen.

Im Hold-Modus betrieben, kann der Master dem Slave vorgeben, wie lange ein Datenaustausch pausieren soll. Master und Slave können damit getrennt oder gemeinsam für einen definierten Zeitraum in den Ruhezustand übergehen. Um darauf aufbauend die Anpassung des Arbeitszyklus für den Standard IEEE 802.15.1 realisieren zu können, müssen Master und Slave keine zusätzlichen Vereinbarungen treffen. Bereits durch eine zusätzlich eingebrachte Anpassungskomponente im Master kann der Arbeitszyklus je nach beobachtetem Verkehr verändert werden.

Innerhalb einer aktiven Phase beobachtet der Master (Koordinator) den Verkehr der untergeordneten Knoten. Die Dauer einer solchen aktiven Phase ist abhängig von der Anzahl der aktiven Slaves und dem Kommunikationsbedarf, der möglicherweise, ausgehend von höheren Schichten angemeldet wurde. Nach der aktiven Phase bewertet der Master die Aktivität der Knoten. Mit dem in Abschnitt 4.3.1 vorgestellten Algorithmus wird die Entscheidung für Erhöhen, Vermindern oder Beibehalten des Arbeitszyklus herbeigeführt. Da im Standard IEEE 802.15.1 keine Vorgaben für Arbeitszykluszeiten gemacht werden, sind diese Zeiten im Rahmen der Implementierung der Anpassungskomponente festzulegen. Sie sind in eine Anzahl von Zeitschlitzen umzurechnen, um sie direkt auf Zeitraster des TDMA-Verfahrens zu beziehen. Anschließend propagiert der Master an alle untergeordneten Slaves die standardmäßig vorgegebene Zeit (t_{holdTO}) in der keine Aktivität stattfinden darf. Jeder Slave setzt einen entsprechenden Timer, der für rechtzeitiges Aktivieren der Kommunikation nach Ablauf der passiven (Hold-) Phase sorgt. Bei Beginn der nächsten aktiven Phase synchronisieren sich die untergeordneten Slaves erneut mit dem Master und senden gegebenenfalls aufgelaufene Datenpakete.

Der in Abbildung 4.3 dargestellte Ablauf kann damit auch für die Anwendung auf den Standard IEEE 802.15.1 übernommen werden. Innerhalb der aktiven Phase müssen sich Master und Slave zunächst synchronisieren und tauschen anschließend Datenpakete aus. Der Master bewertet die Häufigkeit der Kommunikation und muss den untergeordneten Knoten die Dauer der passiven Phase mitteilen.

Kommt die Anpassung innerhalb eines Piconetzes zum Einsatz, muss zusätzlich die Zeitplanung organisiert werden. Details dazu wurden in Abschnitt 4.3.3 besprochen und sind auch auf den Standard IEEE 802.15.4 übertragbar.

4.4.2 Anwendbarkeit auf IEEE 802.11

Generell wird im Standard IEEE 802.11 mit dem CSMA-Verfahren auf das Übertragungsmedium zugegriffen. Der Power Save Mode (PSM), eine Betriebsart für

energiesparende Organisation des Medienzugriffs, ermöglicht eine zusätzliche Synchronisierung durch eine Beacon-Nachricht. Dieser Modus ist bei Betrieb mit und ohne Infrastruktur wählbar. Im Wesentlichen schließen sich dabei mehrere Knoten zu einem Basic Service Set (BSS) zusammen und werden durch einen Knoten bezüglich der Kommunikation koordiniert. Es wird dabei angenommen, dass der als Koordinator arbeitende Knoten Verbindungen zu anderen Netzen (drahtlos oder drahtgebunden) herstellen kann. Bei Betrieb im infrastrukturlosen Betrieb wird die Gruppe von Knoten als Independent Basic Service Set (IBSS) bezeichnet. Es steht dabei dem Koordinator keine Verbindungsmöglichkeit zu externen Netzen zur Verfügung. Mit diesen Vorgaben können Baumstrukturen ähnlich der Abbildung 4.1 aufgebaut werden.

Wird der PSM eingesetzt, dann initiiert innerhalb eines BSS oder IBSS ein Knoten als Koordinator den Aufbau des Netzes und sendet eine Beacon-Nachricht an die umgebenden Knoten. Die in Reichweite befindlichen Knoten können sich an diesem Koordinator als untergeordnete Knoten anmelden.

Im Gegensatz zum Standard IEEE 802.15.4 ist es den Knoten, die den Koordinator umgeben, gestattet, jederzeit Nachrichten zu senden. Dem Koordinator wird daher kontinuierliche Empfangsbereitschaft vorgeschrieben und Arbeitszyklusänderungen wirken sich nicht auf ihn aus. Allerdings können die Arbeitszyklen der untergeordneten Knoten beeinflusst werden.

Dafür kann das Beacon-Intervall verändert werden. Wiederum kann der in Abbildung 4.3 dargestellte Ablauf unter Berücksichtigung der Gegebenheiten auf IEEE 802.11 übertragen werden. Das bedeutet, dass der Koordinator den Verkehr innerhalb einer festgesetzten Zeit beobachten und anschließend bewerten muss. Es ist dann im Koordinator zu entscheiden, ob das Beacon-Intervall verringert, beibehalten oder erhöht werden muss. Diese Variante der Arbeitszyklusanpassung erfordert keine Modifikation des Standards, da vom Koordinator lediglich andere Parameter für das Beacon-Intervall an die umgebenden Knoten mitgeteilt werden müssen. Wird zusätzlich vereinbart, dass nach einer Beacon-Nachricht nur für eine bestimmte Zeit Datenpakete an den Koordinator übertragen werden dürfen, kann darüber hinaus Energie eingespart werden. Allerdings erfordert es zusätzliche Protokollvereinbarungen die aufbauend auf dem Standard festgelegt werden müssen.

5 Leistungsanalyse der Anpassung

Wie in Abschnitt 4.3.1 vorgestellt, besitzt der Algorithmus zur Anpassung im Wesentlichen drei verschiedene Parameter: die Schwellwerte h_l und h_u sowie die Dauer des Beobachtungsintervalls n_m . Es wird vermutet, dass diese Parameter das Verhalten der Anpassung entscheidend beeinflussen. Daneben existieren Bedingungen, die nicht durch den Anwender verändert werden können. Sie werden vielmehr durch die Umgebung und die Umstände des Einsatzes des betreffenden drahtlosen Sensornetzes vorgegeben. Diese Bedingungen hängen von der Anwendung und den technischen Eigenschaften ab. In diesem Kapitel sollen die Auswirkungen dieser Einflussgrößen auf die Leistungsfähigkeit der Arbeitszyklusanpassung bestimmt werden.

Zu den anwendungsabhängigen Einflussgrößen werden die Ankunftsrate λ und die Anzahl n_{uK} der untergeordneten Knoten gezählt. Da das Ziel des Anpassungsalgorithmus die Angleichung des Energieverbrauchs an die Verkehrscharakteristik ist, sollte je nach Ankunftsrate der Nachrichten in der Vermittlungsstation ein bestimmter Arbeitszyklus erreicht werden. Kommen mehrere n_{uK} untergeordnete Knoten zum Einsatz, liegt an der Übertragungsstrecke zwischen den untergeordneten Knoten und der Vermittlungsstation ein Nachrichtenstrom an, der einer Überlagerung aus mehreren POISSON-Verteilungen (vgl. Annahmen zur Verkehrscharakteristik in Kapitel 2) folgt. Der resultierende Nachrichtenstrom folgt wiederum einer POISSON-Verteilung mit dem Parameter $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_{n_{uK}}$ [Ros75] [Ros97]. Auf eine detaillierte Untersuchung der Abhängigkeit von n_{uK} wird in dieser Arbeit verzichtet, da sie direkt durch die Abhängigkeit von der Ankunftsrate λ zu ersetzen ist.

Außer den anwendungsabhängigen Bedingungen wirken sich auch die Übertragungseigenschaften und die Fähigkeiten der Hardware aus. Stellvertretend wird in dieser Arbeit die für drahtlose Sensornetze wichtige Größe der Nachrichtenverlustrate p_{loss} untersucht. Dadurch werden raue Übertragungseigenschaften modelliert und allgemeine Unzulänglichkeiten der Hardware nachgebildet.

Trotz der geringen Anzahl der Einflussgrößen sind vielfältige Wirkungen auf die Leistungsfähigkeit des Algorithmus durch die Kombination der unterschiedlichen Größen zu erwarten. Die Simulationen werden daher nur innerhalb einer begrenzten Menge von Konfigurationen für die Bewertung genutzt. Mit dem in Kapitel 6 vorgestellten Formelwerk kann die Leistungsfähigkeit darüber hinaus individuell abgeschätzt werden. Prinzipiell wird die Menge von Konfigurationen in zwei Bereiche unterteilt: statische und

dynamische Konfigurationen. Diese Einteilung bezieht sich auf die Veränderlichkeit der Ankunftsrate. Bei statischen Szenarien bleibt die Ankunftsrate konstant, wohingegen sie sich in dynamischen Szenarien zeitlich ändert.

Die zentralen Bewertungsmaßstäbe für die Leistungsfähigkeit der Arbeitszyklusanpassung sind der Energieverbrauch und die damit eng zusammenhängende Verzögerungszeit. Außerdem gibt die Warteschlangenlänge in den entfernten Sensorknoten implizit Auskunft über die Paketverluste aufgrund fehlender Warteschlangenkapazität.

Häufig werden für Leistungsanalysen von technischen Systemen Simulationen eingesetzt ([TUKY01], [SD97], [Ste97], [FDF⁺99], [HHS01]). Auch für Sensornetze sind komplexe Simulationssysteme verfügbar (z. B. [PSS00]). Meist handelt es sich dabei um spezielle Werkzeuge, die Szenarien für einen eng begrenzten Bereich, z. B. bestimmte Standards, zulassen. Die in dieser Arbeit verwendeten Simulationen wurden in Java implementiert. Darin werden die wesentlichen Bestandteile des im Folgenden vorgestellten generischen Modells nachgebildet. Es können damit allgemeine, standardunabhängige Aussagen über die Leistungsfähigkeit der Arbeitszyklusanpassung gewonnen werden.

Die folgenden Abschnitte sind wie folgt gegliedert. Zunächst werden in Abschnitt 5.1 Vorbetrachtungen zur Modellierung der simulativen Bewertung behandelt. Sie beinhalten sowohl die konkreten Bedingungen des Systemmodells, einschließlich dem angenommenen Medienzugriff, als auch die betrachteten Verkehrscharakteristika. Anschließend werden die anzusetzenden Bewertungsmaße erläutert. Mit ihnen kann zum einen das grundsätzliche Verhalten quantifiziert und zum anderen ein Vergleich zu bestehenden Techniken gezogen werden. In den Abschnitten 5.3 und 5.4 werden konkrete statische und dynamische Szenarien hinsichtlich der zuvor eingeführten Bewertungsmaße untersucht. Um die Leistungsfähigkeit des vorgeschlagenen Algorithmus zur Anpassung bezüglich existierender Verfahren einzuordnen, wird in Abschnitt 5.5 die Idee von T-MAC [vDL03] auf das allgemeine zeitliche Modell angepasst und zum Vergleich herangezogen.

5.1 Vorbetrachtung zur Modellierung

Die simulative Bewertung erfordert ein Modell, das hinreichende Genauigkeit für die zu untersuchenden Leistungseigenschaften aufweisen muss. Zugleich sind Vereinfachungen sinnvoll, mit denen der Einfluss der Anpassung studiert werden kann. Der Untersuchungsgegenstand wird nicht vollständig modelliert, um die Simulationszeiten handhabbar zu halten.

Das verwendete Modell enthält fünf Bestandteile. Dazu zählen ein verallgemeinertes zeitliches Verständnis, ein konkretes Vorgehen der zuvor allgemein genannten Arbeitszyklusänderung, ein Modell für den Medienzugriff, Überlegungen zu den möglichen Quel-

len des Verkehrs und vereinfachte Annahmen zur Hardware. Diese Teilbereiche des Gesamtmodells werden in den folgenden Abschnitten genauer diskutiert.

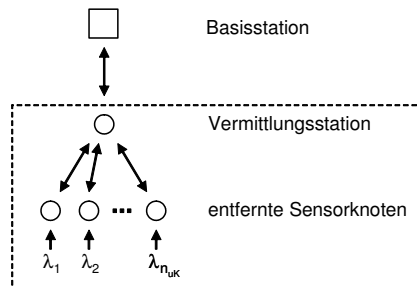


Abbildung 5.1: Für die Bewertung der Leistungsfähigkeit wird der gekennzeichnete Bereich herausgegriffen. Nur die Arbeitszyklusanpassung in der Vermittlungsstation wird berücksichtigt. Die entfernten Sensorknoten sind daher die einzigen angenommenen Quellen für den Datenverkehr.

Als Beispielszenario wird die Topologie entsprechend der Abbildung 5.1 angenommen. In Abbildung 5.1 ist die Topologie des Beispielszenarios dargestellt. In der Vermittlungsstation wird der Verkehr beobachtet und der Arbeitszyklus entsprechend angepasst. Die gesamte Analyse bezieht sich nur auf den Arbeitszyklus, der durch den Algorithmus innerhalb der Vermittlungsstation eingestellt wird. Die in der Vermittlungsstation generierten Nachrichten haben keinen Einfluss auf die Anpassung, da sie direkt an die Basisstation gesendet werden können. Sie sind nicht auf die Vorgaben bezüglich der aktiven Phasen innerhalb der Vermittlungsstation angewiesen.

5.1.1 Generisches zeitliches Modell

Für den anzuwendenden Zeitbezug bei der simulativen Bewertung von Systemen sind unterschiedliche Skalierungen denkbar. Je nach verwendeter Übertragungstechnik kann die minimale Dauer einer aktiven Phase beispielsweise bei 15,36 ms (IEEE 802.15.4 im 2,4 GHz Bereich) oder 625 μ s (IEEE 802.15.1) liegen.

Das Ziel der Untersuchungen besteht darin, von der Übertragungstechnik unabhängige Zusammenhänge aufzudecken. Daher beziehen sich die Analysen in diesem Kapitel auf eine generische Zeitbasis. Das bedeutet, dass die Dauer eines generischen Zeitabschnitts einer Zeiteinheit entspricht. Für das allgemeine Modell wird keine physikalische Einheit für die Zeiteinheit festgelegt. Das ermöglicht, das Modell später einfach auf eine spezielle Übertragungstechnik anzuwenden. Für das Beispiel des Standards IEEE 802.15.4 im 2,4 GHz Bereich würde folglich gelten:

$$1 \text{ Zeiteinheit} = 15,36 \text{ ms.} \quad (5.1)$$

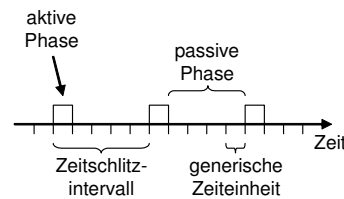


Abbildung 5.2: Für die simulative Bewertung wird ein allgemeines zeitliches Modell vorausgesetzt.

In Abbildung 5.2 sind die relevanten Begriffe für die Organisation der aktiven und passiven Phase dargestellt. Ein Zeitschlitzintervall besteht dabei aus n generischen Zeitabschnitten, wobei der erste Zeitschlitz zur aktiven Phase und die folgenden $n - 1$ Zeitschlitze zur passiven Phase gehören. Die aktive Zeit wird mit t_{act} und die passive Zeit mit t_{pass} bezeichnet. Dieses Modell führt zu unterschiedlichen Granularitäten bei der Änderung des Arbeitszyklus. Im oberen Bereich des Arbeitszyklus sind die Werte $d = \{1; 0,5; 0,33; 0,25; 0,2; \dots\}$ möglich. Im Bereich geringerer Arbeitszykluswerte sind geringere Stufen möglich ($d = \{\dots; 0,1; 0,0909; 0,0833; 0,0769; \dots\}$).

5.1.2 Ansatz zur Arbeitszyklusänderung

In den Zeilen 11 und 17 des Algorithmus 1 (Seite 54) wurde dargestellt, dass der Arbeitszyklus zu erhöhen oder zu vermindern ist, wenn die obere bzw. untere Schwelle über- bzw. unterschritten wird. Das konkrete Verfahren zum Erhöhen und Verringern des Arbeitszyklus wurde allerdings noch nicht näher spezifiziert. In existierenden Standards werden unterschiedliche Arten der Abstufung angegeben. So gibt es beispielsweise im Standard IEEE 802.15.4 zwei Möglichkeiten, um den Arbeitszyklus zu erhöhen. Erstens kann bei gleichbleibender aktiver Phase die Dauer zwischen dem Beginn zweier aufeinander folgender, aktiver Phasen halbiert werden. Zweitens besteht die Möglichkeit, die Dauer der aktiven Phase zu verdoppeln, wobei die Zeit zwischen dem Beginn aufeinander folgender, aktiver Phasen gleich bleibt (Details siehe Anhang A). Die Anzahl der Nachrichten wird durch letztere Möglichkeit allerdings nur dann erhöht, wenn das Medium überlastet ist und damit mehr Nachrichten erzeugt werden als in der aktiven Phase zu transportieren sind.

In den folgenden Abschnitten zur Bewertung des Modells wird eine vereinfachte Möglichkeit zur Arbeitszyklusänderung gewählt. Die aktive Phase erstreckt sich stets über genau einen Zeitschlitz. Lediglich die Dauer der passiven Phase ist variabel. Ein vollständiger Arbeitszyklus besteht aus einer aktiven Phase und der darauf folgenden passiven Phase. Der Arbeitszyklus kann dann verringert werden, indem die passive Phase um einen Zeitschlitz ausgedehnt wird. Entsprechend kann der Arbeitszyklus durch Verkürzen

der passiven Phase um einen Zeitschlitz erhöht werden. Beispiele für die Erhöhung bzw. Verminderung des Arbeitszyklus sind in Abbildung 5.3 dargestellt.

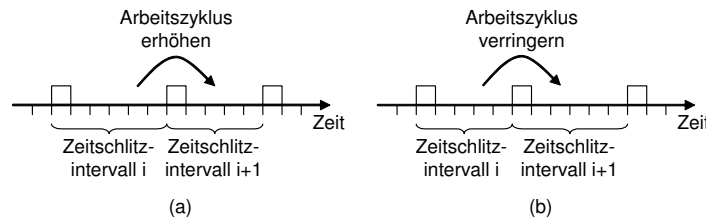


Abbildung 5.3: Beispiele für das (a) Erhöhen von $1/6$ auf $1/5$ bzw. für das (b) Verringern von $1/5$ auf $1/6$ des Arbeitszyklus

Da nicht voraus gesetzt werden kann, dass eine Vermittlungsstation über mehrere Kommunikationseinheiten für den parallelen Betrieb (gleichzeitige Kommunikation zu entfernten Sensorknoten und zur Basisstation) verfügt, wird im Modell der folgenden Untersuchungen für den Arbeitszyklus ein Maximum von 50% angenommen. Dahinter verbirgt sich die Annahme, dass für die Vermittlungsstation noch die Möglichkeit zur Übertragung der empfangenen Nachrichten an die Basisstation bestehen muss. Im minimalen Fall verbleibt dafür ein Zeitschlitz. Für die Bilanz des Arbeitszyklus in Bezug auf die Anpassung leistet diese Zeit keinen entscheidenden Beitrag. Deshalb wird sie in der späteren Analyse vernachlässigt. Nur die aktive Phase während der Kommunikation mit den entfernten Sensorknoten wird berücksichtigt.

Der vorgeschlagene Ansatz zur Arbeitszykluserhöhung und -verminderung ist nur eine Möglichkeit aus verschiedenen denkbaren Varianten. So ließe sich beispielsweise eine Verbesserung hinsichtlich der Anpassungsgeschwindigkeit einbringen. Die Intensität der Änderung des Arbeitszyklus könnte sich zusätzlich an der Anzahl der eingetroffenen Nachrichten orientieren. Modifikationen dieser Art werden in Kapitel 8.2 diskutiert. Für die weitere Bewertung der Leistungsfähigkeit der Anpassung des Arbeitszyklus wird nur eine inkrementelle Veränderung um einen Zeitschlitz in Betracht gezogen.

5.1.3 Medienzugriff

Bei verschiedenen Übertragungstechniken werden unterschiedliche Möglichkeiten für den Medienzugriff angeboten. So ist es beispielsweise bei IEEE 802.15.4 möglich, CSMA/CA oder TDMA Verfahren für die Aufteilung des Übertragungsmediums auf verschiedene Teilnehmer zu verwenden. Hingegen bietet der Standard IEEE 802.15.1 nur TDMA in Kombination mit FHSS an. In drahtlosen LANs (IEEE 802.11a/b) kann nur mit dem CSMA/CA Verfahren auf das Medium zugegriffen werden. Für diese Zugriffsmechanismen sind in der Literatur zahlreiche Bewertungen zu finden. Lu [LKR04b] hat

sich beispielsweise mit der konkreten simulativen Bewertungen des Medienzugriffs für den Standard IEEE 802.15.4 beschäftigt. Buchholz [BP04] zeigt eine analytische Analyse eines CSMA-basierten Medienzugriffs.

In der vorliegenden Arbeit muss aufgrund der Vielfalt der in der Praxis eingesetzten Verfahren auf einen konkreten Zugriffsmechanismus verzichtet werden. Dennoch sollte der Aspekt eines begrenzten Durchsatzes im Modell Berücksichtigung finden. Beispiele für prinzipielle Verläufe in der Praxis sind in Abbildung 5.4 (a) aufgeführt. Kommt ein kollisionsbehaftetes Übertragungsverfahren (z. B. CSMA) zum Einsatz, können bei verschiedener Teilnehmerzahl die dargestellten Verläufe von angebotener Last zu Durchsatz beobachtet werden (Vergleiche z. B. [LKR04b], [Tan90], [BP04]). Zu Beginn steigt der Durchsatz monoton, bis eine Sättigung erreicht wird. Das Verhalten bei Eintreten in den Bereich der Sättigung weist je nach Übertragungsverfahren und Teilnehmerzahl unterschiedliche Verläufe auf.

Für die vorliegende Arbeit wird eine vereinfachte Beziehung von angebotener Last zu Durchsatz angenommen. Sie ist in Abbildung 5.4 (b) dargestellt. Bei zeitgeteilten Mehrfachzugriffsverfahren (ohne Kollisionen) ist diese Annahme korrekt (z. B. IEEE 802.15.4 mit GTS). Für kollisionsbehaftete Verfahren müssen Abweichungen in Kauf genommen werden. Dazu sind allerdings das spezielle Protokoll und die entsprechenden Gegebenheiten separat zu bewerten. Prinzipiell wird durch die Annahme in Abbildung 5.4 (b) ausgedrückt, dass der Durchsatz von der angebotenen Last abhängt und in die Sättigung eintreten kann.

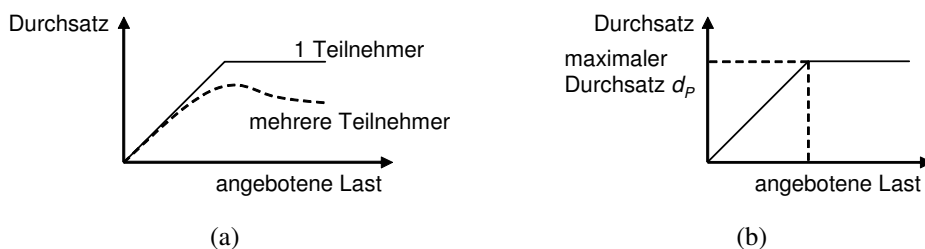


Abbildung 5.4: (a) Angebotene Last und Durchsatz stehen je nach Übertragungsverfahren in einem bestimmten Verhältnis zueinander. Bei kollisionsbehafteten Verfahren kann der maximale Durchsatz bei mehreren Teilnehmern nicht erreicht werden. (b) Für die Bewertung wird ein vereinfachtes Verhältnis von angebotener Last zu Durchsatz angenommen. Die dargestellten Größen angebotene Last und Durchsatz werden in der Einheit *Nachrichten pro Zeiteinheit* gemessen.

Für die Simulationen wird angenommen, dass ein Durchsatz von maximal d_p Nachrichten pro Zeiteinheit erreicht werden kann. Da ein konkreter Medienzugriffsmechanismus vernachlässigt wird, müssen Kollisionen als eine Ursache für Paketverluste unberücksichtigt bleiben. In Folgenden wird generell $d_p = 10$ Nachrichten pro Zeiteinheit gesetzt.

Allerdings kann es bei drahtloser Datenübertragung durch die physikalischen Bedingungen zu Bit- und damit auch Paketfehlern kommen. Nachrichten würden auf dem Weg zwischen entferntem Sensorknoten und Vermittlungsstation verloren gehen. Diese Fehlerquelle wird mit einer vereinfachten Paketfehlerrate p_{loss} modelliert. Konkrete Untersuchungsergebnisse zu Paketfehlerraten liefern z. B. Khalili [KS04] und Schwieger [Sch06]. Schwieger hat aufgrund geringer verfügbarer Übertragungsenergie speziell für Sensornetze eine Paketfehlerrate von $p_{loss} \geq 10^{-2}$ bestimmt. In Abschnitt 5.3.4 werden höhere, pessimistische Annahmen für diese Paketfehlerraten getroffen, um die Auswirkung auf den Arbeitszyklus im kritischen Fall zu bestimmen. Für die einzelnen Nachrichten wird bestätigte Übertragung angenommen. Das heißt, dass nicht korrekt empfangene Nachrichten erneut in die Warteschlange des sendenden Knotens eingefügt werden.

Ein entfernter Sensorknoten überträgt die eintreffenden Nachrichten in der Reihenfolge ihrer Ankünfte (FIFO) an die Vermittlungsstation. Die Möglichkeit zur Übertragung ist auf die Dauer der aktiven Phase beschränkt. Innerhalb der passiven Phase übertragen die Teilnehmer keine Nachrichten.

Für die Simulationen wird angenommen, dass die Länge aller Pakete gleich ist. Beim Einsatz von Sensornetzen als Messglied ist diese Annahme geeignet, da ein Messwert in seiner Länge nicht variiert. Wenn veränderliche Paketlängen berücksichtigt werden sollen, müssen Lastmodelle, ähnlich den Untersuchungen von Lu [LKR04b], in die Bewertung einbezogen werden.

5.1.4 Quellen des Verkehrs

Das vorgestellte Konzept erlaubt es, dass auch in der Vermittlungsstation Sensorfunktionalität verfügbar ist. Nachrichten können auch dort generiert werden. Die Vermittlungsstation überträgt sie sofort, ohne dass der festgelegte Arbeitszyklus beachtet werden muss. Außerdem fließen diese Nachrichten nicht in die Bewertung des Verkehrs von den entfernten Sensorknoten ein. Deshalb werden in dem verwendeten Modell nur Nachrichten, die in den entfernten Sensorknoten generiert werden, betrachtet. Von der Vermittlungsstation generierte Nachrichten werden vernachlässigt.

In Abbildung 5.1 wird diese Annahme verdeutlicht. Nur die entfernten Sensorknoten speisen Nachrichtenströme ein und sind für das Verhalten der Anpassung relevant. Für diese Nachrichtenströme werden die Ankunftsraten $(\lambda_1, \dots, \lambda_{n_{uk}})$ angenommen. Wie in Kapitel 2 gezeigt, gibt es Gruppen von Anwendungen, bei denen die Nachrichten in einem Strom mit exponentialverteilten Zwischenankunftszeiten generiert werden. Daher werden die Nachrichtenströme in den Simulationen als POISSON-Ankunftsprozesse angenommen.

5.1.5 Hardwaremodell

Ein vereinfachtes Blockschaltbild der Hardwarearchitektur eines Sensorknotens ist in Abbildung 5.5 dargestellt. Standardbauelemente sind für den Aufbau kommerziell verfügbar. Die eingebettete Anwendung läuft auf einem Mikrocontroller (z. B. Atmel AT90S [Atm03], Texas Instruments MSP430F149 [Ins01]) ab. Ein Transceiver (z. B. Chipcon CC2420 [Chi06], BlueChip RFB433 [Blu03]) überträgt die generierten Nachrichten. Der Mikrocontroller enthält neben der Prozessoreinheit auch Programm- und Datenspeicher. Der Mikrocontroller enthält neben der Prozessoreinheit auch Programm- und Datenspeicher.

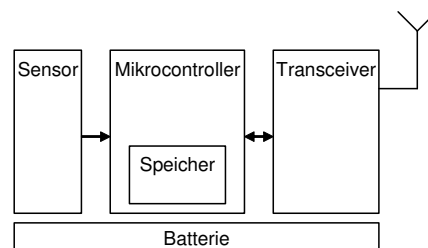


Abbildung 5.5: Die Sensorknotenhardware setzt sich aus standardmäßig verfügbaren Elektronikkomponenten zusammen. Der Mikrocontroller nimmt einen gemessenen Sensorwert auf und sendet ihn über den Transceiver zum Empfänger. Umgekehrt können Nachrichten über den Transceiver auch empfangen werden. Durch die Batterie wird der Sensorknoten mit Energie versorgt (Vergleiche auch [Sch06]).

Der Sensor erfasst Messwerte der Umgebung und übergibt sie an den Mikrocontroller. Der wiederum ergänzt die erforderlichen Protokollinformationen und führt die resultierende Nachricht dem Transceiver zu. Eintreffende Nachrichten empfängt der Transceiver und gibt sie gegebenenfalls an den Mikrocontroller weiter. Innerhalb der Vermittlungsstation ist dies für die Weiterleitung der Nachrichten erforderlich. Der Speicher innerhalb des Mikrocontrollers enthält unter anderem die Warteschlange für weiterzuleitende oder generierte Nachrichten. Je nach Bedarf der Anwendung kann dieser Speicher bei Entwicklung des Sensorknotens dimensioniert werden.

Der Sensorknoten wird durch eine Batterie mit Energie versorgt. Untersuchungen von Sarkar [SA03] haben gezeigt, dass die Lebensdauer der Batterie auch vom jeweiligen Nutzungsmuster abhängt. Nutzungspausen führen beispielsweise zu Erholungseffekten. Zusammenhänge dieser Art werden in dieser Arbeit nicht berücksichtigt.

Moderne Transceiverbausteine decken Funktionalitäten bis zur Medienzugriffsschicht ab (z. B. Chipcon CC2420 [Chi06]). Daher wird für das Modell davon ausgegangen, dass der Algorithmus zur Anpassung des Arbeitszyklus im Mikrocontroller implementiert ist. Er greift dabei vollständig auf die darunter liegenden Schichten des jeweiligen Standards im Transceiver zu.

5.2 Bewertungsmaße

Für die späteren Simulationen sind Maße zur Bewertung der Leistungsfähigkeit erforderlich. Oft wird die Lebenszeit eines drahtlosen Sensornetzes (Zeit bis zum Ausfall des ersten Sensorknotens aufgrund des erschöpften Energievorrates) als Maßstab für die Leistungsfähigkeit von drahtlosen Sensornetzen herangezogen (Vergleiche z. B. [BC02], [ALG⁺04],[NK04c]). Diese Größe ist direkt von der verfügbaren Energie (unterschiedliche Batteriekapazität) und dem Energieverbrauch (verschiedene Energieverbräuche je nach eingesetzter Hardware) abhängig. In anderen Arbeiten, z. B. von Haapola [HSPRM05] und Heinzelmann [HCB00], wird die Energie pro Bit als Maßzahl verwendet. Sie wird häufig für die Bewertung von Routingalgorithmen herangezogen und repräsentiert den Energieverbrauch aus der Sichtweise einer zu übermittelnden Nachricht. Da in der vorliegenden Arbeit eine statische Topologie vorausgesetzt wird und der Energieverbrauch innerhalb der Vermittlungsstation zu betrachten ist, erscheint die Energie pro Bit ungeeignet.

Als entscheidendes Maß für den Energieverbrauch wird hier der Arbeitszyklus verwendet, da das Ziel des in Kapitel 4 eingeführten Algorithmus auch die Anpassung des Arbeitszyklus ist. Mit speziellen Hardwareeigenschaften und Batteriekapazitäten kann daraus die Lebensdauer berechnet werden. Die Änderung des Arbeitszyklus hat direkten Einfluss auf die Leistungsfähigkeit des Netzes. Deshalb wird zusätzlich als mittelbare Wirkung der Arbeitszyklusanpassung die Verzögerungszeit der Nachrichten und die Warteschlangenlänge in den Sensorknoten gemessen.

5.2.1 Arbeitszyklus

Der Energieverbrauch der Vermittlungsstation hängt direkt mit der Häufigkeit der Aktivität zusammen. Hier wird für die Häufigkeit der Aktivität nur die Kommunikationseinheit betrachtet. Die Organisation der Anwendung (z. B. Vorverarbeitung von Sensordaten) und die damit zusammenhängende Interaktion mit der Umgebung (z. B. Abtastfrequenz) wird aufgrund der speziellen Abhängigkeit vom Einsatzgebiet hier nicht betrachtet. Die im Folgenden getroffenen Aussagen über den Arbeitszyklus beziehen sich daher nur auf das Übertragungsverhalten. Wie in Kapitel 2 dargestellt, werden POISSON-Ankünfte angenommen.

In 5.1.2 wurde bereits angedeutet, dass dem Arbeitszyklus ein numerischer Wert zugeordnet werden kann. Er wird hier mit d bezeichnet und aus dem Verhältnis zwischen Dauer der aktiven Phase und Dauer des Zeitschlitzintervalls berechnet. Damit kann er nur Werte im Bereich von $100\% \geq d > 0\%$ annehmen.

Analysen realer Hardware [Sch06] zeigen, dass generell ein signifikanter Unterschied zwischen dem Ruhe- und dem Aktivmodus besteht. So beläuft sich beispielsweise der bei

einem Atmel-Mikrocontroller im Ruhemodus fließende Strom auf wenige μA . Im aktiven Modus (Empfang, Senden, sonstige Aktivität) hingegen liegen Ströme im Bereich von wenigen mA an (Vergleiche hierzu auch [BC02] und [ALG⁺04]).

Zusätzliche Energieverluste sind durch Kollisionen, Protokollinformationen und Overhearing zu verzeichnen. Jedoch beziffert van Dam [vDL03] diese Energieverluste als nicht wesentlich gegenüber dem Idle Listening. Zudem sind diese Verluste stark von der verwendeten Übertragungstechnik abhängig.

Daher erscheint für prinzipielle Aussagen zum Energieverbrauch nur ein allgemeines Verhältnis zwischen den Zeiten des Aktivmodus und des Ruhemodus ausschlaggebend. Verfeinerte Analysen können die Genauigkeit verbessern, leisten allerdings keinen Beitrag zu den grundsätzlichen Aussagen über die Zusammenhänge. Insbesondere der Arbeitszyklus in der Vermittlungsstation soll in dieser Arbeit angepasst werden. Daher beziehen sich alle Messungen des Arbeitszyklus auf die Vermittlungsstation.

5.2.2 Verzögerungszeit

Wenn die Vermittlungsstation den Arbeitszyklus verringert, dann haben entfernte Sensorknoten seltener die Möglichkeit zur Übertragung ihrer Nachrichten. Dadurch müssen die entfernten Sensorknoten bei Übertragungswünschen im Mittel länger bis zur nächstmöglichen aktiven Phase warten. Der entfernte Sensorknoten puffert die zur Übertragung anstehenden Nachrichten in einer dafür eingerichteten Warteschlange. Für die Anwendung ist nun entscheidend, wie lange ein Datum nach der Messung im Kommunikationssystem verbleibt, um zum Empfänger zu gelangen. Diese Verzögerungszeit wird im Folgenden mit $t_{PackDelay}$ bezeichnet. Sie hängt eng mit dem Arbeitszyklus zusammen. Häufigere Aktivität bedeutet häufigere Möglichkeit zur Nachrichtenübertragung und damit kürzere Verzögerungszeiten. Die Verzögerungszeit wird in Zeiteinheiten gemessen, die zwischen Generieren der Nachricht im entfernten Sensorknoten und der Ankunft in der Basisstation vergehen.

Relative Verzögerungszeit

Wenn in einem Einsatzszenario die Charakteristik der physikalischen Größe bekannt ist, kann auch die Ankunftsrate der Nachrichten abgeschätzt werden. Anschließend kann die Anforderung an die Verzögerungszeit formuliert und ein geeigneter Arbeitszyklus bestimmt werden. Er wird vor Betriebsbeginn (vgl. Kapitel 3) in den Sensorknoten fest implementiert.

Die Herausforderung im zugrunde liegenden Anwendungsfall ist allerdings, dass die Charakteristik des zu beobachtenden physikalischen Prozesses nicht als bekannt vorausgesetzt werden kann. Dadurch ist die absolute Verzögerungszeit nur dort aussagekräftig,

wo Bezug auf feste Zeiträume und bekannte Ankunftsraten genommen werden kann. Sind nur grobe Anforderungen der Art „die Verzögerungszeit sollte nicht 10% der Zwischenankunftszeit überschreiten“ verfügbar, helfen bei der Bewertung keine absoluten Verzögerungszeiten.

Als Alternative zur absoluten Verzögerungszeit wird eine relative Bezugsgröße vorgeschlagen: die relative Verzögerungszeit [NPK05a]. Sie wird in den folgenden Experimenten durch den Quotienten der mittleren absoluten Verzögerungszeit $t_{PackDelay}$ und der mittleren Zwischenankunftszeit λ^{-1} berechnet. Im Folgenden wird die relative Verzögerungszeit mit δ bezeichnet und durch

$$\delta = \frac{t_{PackDelay}}{\lambda^{-1}} = t_{PackDelay} \cdot \lambda \quad (5.2)$$

berechnet.

Mit Wissen über die Parametrierung Δx des Messgliedes und die Amplitude \hat{x} kann durch die relative Verzögerungszeit der Bezug zum realen Prozess hergestellt werden. Die Ausführungen in Anhang C deuten an, wie dieser Zusammenhang formuliert werden kann. Sie stellen eine erste Idee dar und sollten in weiteren Arbeiten detailliert untersucht werden.

Ali [ASD⁺06] fordert, dass für die Bewertung der Leistungsfähigkeit in Sensornetzen neue Möglichkeiten für die Bemessung geschaffen werden. Mit der relativen Verzögerungszeit steht ein solches Maß zur Verfügung. In den folgenden Abschnitten zur Bewertung der Leistungsfähigkeit wird zudem gezeigt, dass ein allgemeiner Zusammenhang zwischen der relativen Verzögerungszeit δ und der Ankunftsrate λ besteht.

5.2.3 Warteschlangenlänge

Generiert ein Sensorknoten eine Nachricht, ohne sie sofort an die Vermittlungsstation zu senden, muss sie in einer Warteschlange aufbewahrt werden, bis die nächste Möglichkeit zur Übertragung besteht. Da der Durchsatz begrenzt ist, können auch nach dem Ende einer aktiven Phase noch Nachrichten in der Warteschlange verbleiben. Der entsprechende Sensorknoten muss dann innerhalb der nächsten aktiven Phase versuchen, die wartenden Nachrichten zu übertragen. Je nach Charakteristik des Verkehrs kann dadurch eine mehr oder weniger lange Warteschlange innerhalb eines Sensorknotens zustande kommen. Die Population (Anzahl der Nachrichten in der Warteschlange) kann sich je nach Ankunftsrate und Verlauf des Arbeitszyklus ändern.

In der Praxis sind unendlich lange Warteschlangen nicht realisierbar. Zudem stellt der Speicher in einem Sensorknoten eine knappe Ressource dar und lässt damit nur eine geringe Warteschlangenlänge zu. Bei einer kurzzeitig hohen Ankunftsrate λ und geringem

Arbeitszyklus d können innerhalb kurzer Zeit viele Nachrichten in einem Sensorknoten auflaufen. Aufgrund der begrenzten Speicherfähigkeit in einem Sensorknoten kann es damit zu Nachrichtenverlusten kommen. Die Warteschlangenlänge ist deshalb ein Bewertungsmaß bei der Analyse der Leistungsfähigkeit des Anpassungsalgorithmus. Liegen zusätzlich konkrete Angaben über die verfügbaren Warteplätze in einem Sensorknoten vor, lässt sich damit die Größenordnung der Nachrichtenverluste grob abschätzen.

In den folgenden Untersuchungen wird vereinfacht eine unendliche Warteschlangenlänge angenommen. Zur realistischen Leistungsbewertung wäre hier eine begrenzte Warteschlangenlänge notwendig. Damit ließe sich direkt die Kenngröße der Nachrichtenverluste messen. In dieser Arbeit wird darauf verzichtet, die Warteschlangenlänge zusätzlich zu parametrieren, um den Umfang der Ergebnisse zu reduzieren. Dennoch lässt sich die Größenordnung der Nachrichtenverluste mit der Entwicklung der Warteschlangenlänge und einer angenommenen Begrenzung bereits grob abschätzen. In den folgenden Simulationen wird die Warteschlangenlänge nach jeder aktiven Phase gemessen.

5.3 Bewertung in statischen Szenarien

Für die Leistungsfähigkeit der Anpassung sind zwei Gruppen von Einflüssen ausschlaggebend: Parameter des Anpassungsalgorithmus und Abhängigkeiten von äußeren Einflussfaktoren. In den folgenden Abschnitten zur Bewertung werden zunächst die Parameter des Algorithmus variiert: Schwellwerte h_l und h_u sowie die Dauer des Beobachtungsintervalls n_m . Innerhalb einer Anwendung können sie direkt gesetzt werden. Es ist zu untersuchen, inwieweit diese Parameter die Maße für die Leistungsfähigkeit beeinflussen.

Anschließend wird die Auswirkung von veränderlichen äußeren Einflussfaktoren untersucht. Hier wird die Ankunftsrate λ und die Paketverlustrate p_{loss} betrachtet. Abschließend wird in Abschnitt 5.3.5 untersucht, in welcher Weise der mittlere erreichte Arbeitszyklus schwankt.

5.3.1 Schwellwerte

Es ist zu erwarten, dass Änderungen der Schwellwerte h_l und h_u den Arbeitszyklus und damit die Verzögerungszeit beeinflussen. Falls die obere Schwelle h_u bei gleichbleibender unterer Schwelle h_l erhöht wird, müssen innerhalb des Beobachtungsintervalls mehr Nachrichten in der Vermittlungsstation empfangen werden, um den Arbeitszyklus zu erhöhen. Es kann also erwartet werden, dass der Arbeitszyklus geringer ausfällt. Ähnlich sollte sich bei einer höheren unteren Schwelle h_l und gleichbleibendem h_u ein geringerer

Arbeitszyklus einstellen, da tendenziell mehr Pakete für das Beibehalten des Arbeitszyklus benötigt werden.

Während des Betriebs und der laufenden Anpassung wirken beide Schwellwerte zur gleichen Zeit. Daher ist für die Beurteilung der Leistungsfähigkeit interessant, welche Auswirkung das Zusammenspiel der Parameter auf das generelle Verhalten der Leistungsfähigkeit hat. Die Dauer des Beobachtungsintervalls wird in den folgenden Szenarien bei $n_m = 10$ festgelegt. Die Abhängigkeiten von n_m werden in Abschnitt 5.3.2 untersucht.

In den Simulationen sollen verschiedene Konfigurationen der unteren und oberen Schwellwerte untersucht werden, wobei $1 < h_l < h_u$ gelten soll. Zunächst müssen maximale Werte für die Schwellwerte in den Simulationsszenarien festgelegt werden. Innerhalb des Beobachtungsintervalls $n_m \cdot (t_{act} + t_{pass})$ können maximal $n_m \cdot d_p = 100$ Nachrichten an der Vermittlungsstation eintreffen. Während jeder der n_m aktiven Phasen können jeweils maximal d_p Nachrichten übertragen und damit auch an der Vermittlungsstation beobachtet werden. Daher wird der Wertebereich für die Schwellwerte h_l und h_u auf $1 \leq h_l < h_u \leq 100$ festgelegt. Da innerhalb des Beobachtungsintervalls nicht mehr als $n_m \cdot d_p$ Nachrichten an der Vermittlungsstation eintreffen können, ergibt sich für Schwellwertkonfigurationen mit $(n_m \cdot d_p) < h_l < h_u$ keine Veränderung. Die Schwellwerte h_l und h_u befänden sich damit im Bereich der Überlast.

Die Ankunftsrate wird in den Szenarien dieses Abschnitts auf $\lambda = 0,1$ Nachrichten pro Zeiteinheit festgelegt. Die Abhängigkeit des Verhaltens von der Ankunftsrate wird in Abschnitt 5.3.3 untersucht. In den Simulationen wird nur ein untergeordneter Knoten ($n_{uK} = 1$) angenommen.

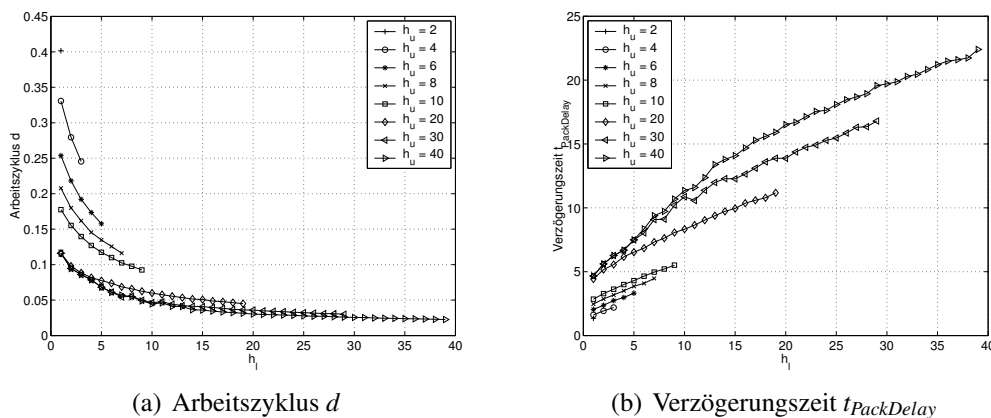


Abbildung 5.6: Arbeitszyklus und Verzögerungszeit entwickeln sich bei steigenden Schwellwerten im Bereich von $2 \leq h_u \leq 40$ annähernd umgekehrt proportional. Es wurden eine Ankunftsrate von $\lambda = 0,1$ Nachrichten pro Zeiteinheit, eine Beobachtungsdauer $n_m = 10$ und ein untergeordneter Knoten angenommen.

In den Abbildungen 5.6 (a) und (b) werden der mittlere erreichte Arbeitszyklus d innerhalb der Vermittlungsstation und die mittlere Verzögerungszeit $t_{PackDelay}$ dargestellt. Auf der Abszisse ist jeweils der untere Schwellwert h_l abgebildet. Der Arbeitszyklus (Abbildung 5.6 (a)) und die mittlere Verzögerungszeit (Abbildung 5.6 (b)) sind auf der Ordinate dargestellt. Zunächst wird nur der Wertebereich $2 \leq h_l < h_u \leq 40$ betrachtet. Die unterschiedlichen Linien in den Abbildungen stellen Verläufe bei ausgewählten oberen Schranken h_u dar. Anhand der ausgewählten Verläufe werden die Erwartungen zur Abhängigkeit zwischen den Schwellwerten und dem Arbeitszyklus bestätigt: höhere Schwellwerte h_l bzw. h_u führen zu einem geringeren Arbeitszyklus. Bei Verminderung des Arbeitszyklus in der Vermittlungsstation haben entfernte Sensorknoten seltener die Möglichkeit zur Übertragung der Nachrichten. Das führt zu einer erhöhten Verzögerungszeit (Abbildung 5.6 (b)).

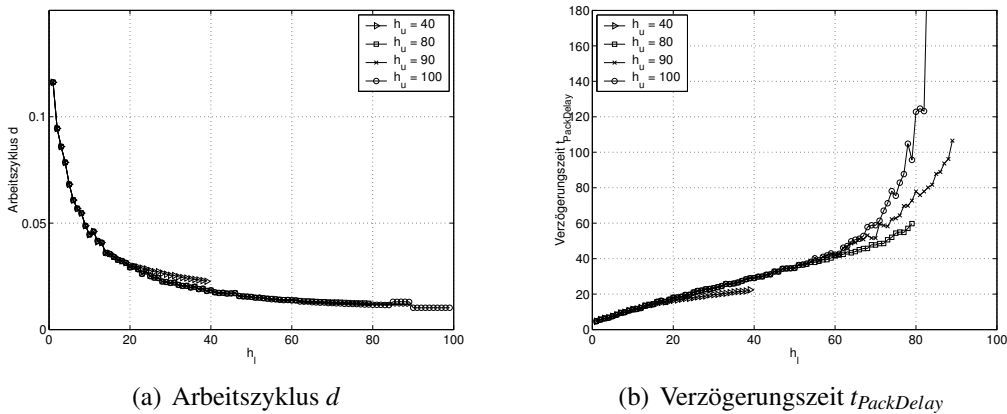


Abbildung 5.7: Arbeitszyklus und Verzögerungszeit weisen bei steigendem h_u im Bereich von $60 \leq h_u \leq 100$ Instabilität auf.

Die Entwicklung des Arbeitszyklus im Wertebereich $40 \leq h_l < h_u \leq 100$ ist in den Abbildungen 5.7 (a) und (b) dargestellt. Wie zuvor wird der Arbeitszyklus bei ansteigenden Schwellwerten vermindert. Die Verzögerungszeit weicht im Bereich von ca. $60 \leq h_l < h_u$ jedoch deutlich vom vorherigen Verhalten ab. Bei der oberen Schranke $h_u = 100$ stellt sich im Bereich von ca. $h_l > 80$ eine Instabilität ein. Die aktiven Phasen reichen nicht aus, um die generierten Nachrichten von den entfernten Sensorknoten abzutransportieren. Die Verläufe der maximalen bzw. mittleren Warteschlangenlänge in den Abbildungen 5.8 (a) und (b) bestätigen diese Instabilität. Im Bereich von ca. $60 \leq h_l < h_u$ zeichnet sich eine deutliche Erhöhung der Warteschlangenlänge ab. Darüber wächst die Warteschlangenlänge im Bereich von $h_l > 80$ deutlich überproportional. Im Bereich geringerer Schwellwerte befinden sich nur maximal 10 Nachrichten in der Warteschlange des entfernten Sensorknotens.

Diese Entwicklung zeigt, dass die Arbeitszyklusanpassung bei höheren Schwellwerten zu Instabilitäten führen kann. Vor Einsatz des Anpassungsalgorithmus in einem rea-

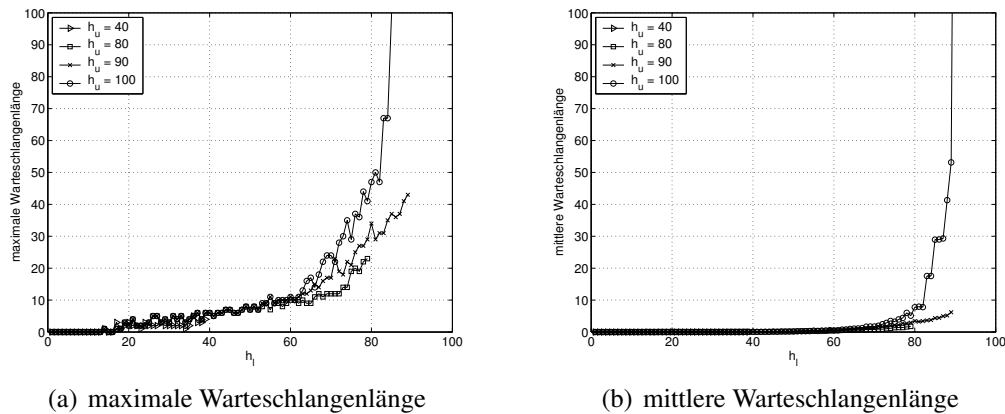


Abbildung 5.8: Die (a) maximale und (b) mittlere Warteschlangenlänge weisen bei steigendem h_l im Bereich von $60 \leq h_u \leq 100$ überproportionale Steigerungen und Instabilität auf.

len Szenario sollte deswegen die mögliche Parametrierung genau untersucht werden. Nähern sich die Schwellwerte h_l und h_u der maximal möglichen Anzahl an übertragbaren Nachrichten innerhalb des Beobachtungsintervalls ($n_m \cdot dp$), muss mit Instabilität bei der Verzögerungszeit gerechnet werden. Aufgrund der überdurchschnittlich hohen Warteschlangenlänge kann es außerdem zu Nachrichtenverlusten kommen.

Die Entwicklung im Bereich höherer Schwellwerte ähnelt dem Verhalten überlasteter Übertragungsmedien mit CSMA-Zugriff. In den Simulationen wird allerdings ein an TDMA angelegter Zugriff verwendet. Die überdurchschnittliche Erhöhung der Verzögerungszeiten wird durch die Zufälligkeit der Ankunftsrate hervorgerufen. Zeitweise mehr Nachrichten führen dann zu kurzzeitigen Staus und erhöhten Verzögerungszeiten.

5.3.2 Dauer des Beobachtungsintervalls

Die Dauer des Beobachtungsintervalls ($n_m \cdot (t_{act} + t_{pass})$) ist ein weiterer Parameter, der die Leistungsfähigkeit der Anpassung beeinflussen kann. Sie ergibt sich aus der Anzahl zu beobachtender Zeitschlitzintervalle n_m und der innerhalb dieser Intervalle aktuellen Dauer der aktiven t_{act} und passiven t_{pass} Phase. Wie zuvor wird für die Simulationen eine konstante mittlere Ankunftsrate $\lambda = 0,1$ Nachrichten pro Zeiteinheit mit POISSON-Ankünften angenommen.

Wird die Dauer des Beobachtungsintervalls n_m bei gleichbleibenden Schwellwerten erhöht, muss sich der Arbeitszyklus so einstellen, dass die Anzahl der Nachrichten innerhalb des Beobachtungsintervalls annähernd gleich bleibt. Das bedeutet, dass sich die

Dauer ($t_{act} + t_{pass}$) verringern muss. Als Folge kann ein erhöhter Arbeitszyklus d erwartet werden.

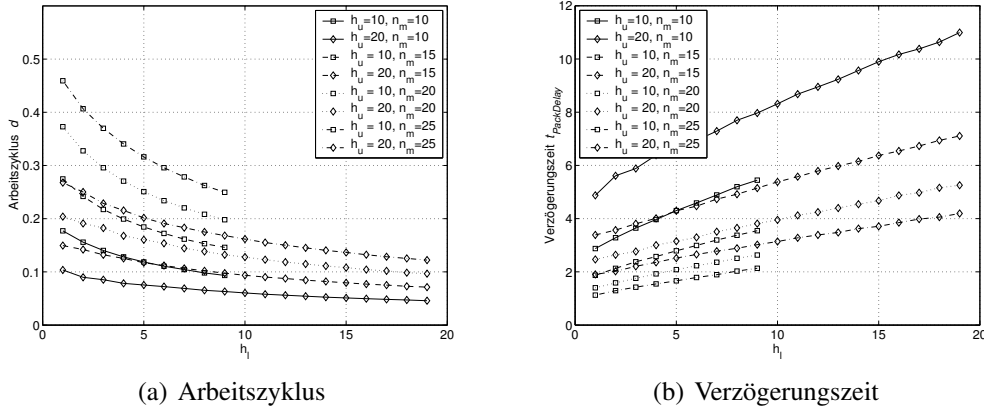


Abbildung 5.9: (a) Der Arbeitszyklus steigt mit zunehmender Anzahl n_m der beobachteten Zeitschlitzintervalle. (b) Parallel dazu sinkt die Verzögerungszeit.

In den Szenarien der Simulationen werden zwei verschiedene obere Schwellwerte $h_u = \{10, 20\}$ untersucht. Der untere Schwellwert variiert entsprechend im Bereich $2 \leq h_l < h_u$. Für die Anzahl n_m der zu beobachtenden Intervalle werden vier verschiedene Größen festgelegt: $n_m = \{10, 15, 20, 25\}$. Die Abbildungen 5.9 (a) und (b) zeigen den Arbeitszyklus und die Verzögerungszeit bei veränderlicher Dauer des Beobachtungsintervalls n_m . Die Verläufe des Arbeitszyklus bestätigen die getroffenen Annahmen. Werden mehr Zeitschlitzintervalle für die Bewertung des Beobachtungsintervalls herangezogen, erhöht sich auch der Arbeitszyklus. Analog dazu verringert sich die Verzögerungszeit. Da die Schwellwerte h_l und h_u in einem Verhältnis zur Auslastung innerhalb des Beobachtungsintervalls stehen, kommen verschiedene Arbeitszyklen bei unterschiedlichem n_m zu Stande.

5.3.3 Ankunftsrate

Die mittlere Ankunftsrate λ ist ein Parameter, den der Anwender nur bedingt beeinflussen kann. Die Anzahl der pro Zeiteinheit eintreffenden Nachrichten hängt vom jeweiligen Einsatzgebiet, den zu beobachtenden Größen und Anwendungsparametern (z. B. zu beobachtende Genauigkeit) ab. Den Untersuchungen in diesem Abschnitt liegt das in Kapitel 2 vorgestellte Lastmodell mit POISSON-Ankünften zugrunde. Die Anzahl der Zeitschlitzintervalle im Beobachtungsintervall beträgt $n_m = 10$. Der obere und untere Schwellwert wird im Bereich von $2 \leq h_l < h_u \leq 40$ variiert. Der Bereich mit $h_u > 40$ wird aufgrund der in Abbildung 5.8 gezeigten Instabilität für die Betrachtung in diesem Abschnitt außer Acht gelassen.

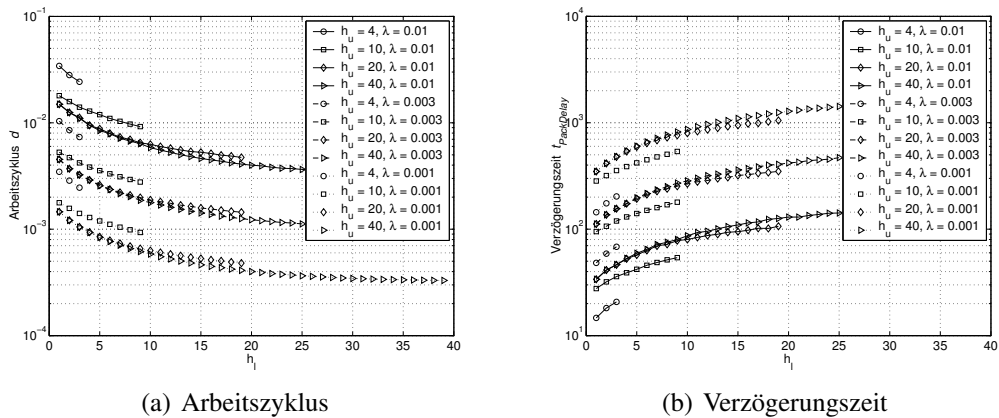


Abbildung 5.10: (a) Der Arbeitszyklus d verringert sich bei sinkender Ankunftsrate λ . (b) Gleichermäßen erhöht sich die Verzögerungszeit $t_{PackDelay}$ bei steigender Ankunftsrate λ .

In den Abbildungen 5.10 (a) und (b) ist das Verhalten des Arbeitszyklus und der Verzögerungszeit bei drei verschiedenen Ankunftsrate $\lambda = \{0,01; 0,003; 0,001\}$ dargestellt. Anhand der verschiedenen Kurvenscharen in Abbildung 5.10 (a) ist zu erkennen, dass sich der Arbeitszyklus bei geringerer Ankunftsrate λ vermindert. Da das eine größere Dauer zwischen zwei aktiven Phasen nach sich zieht, steigt die Verzögerungszeit $t_{PackDelay}$ in gleicher Weise an (Abbildung 5.10 (b)).

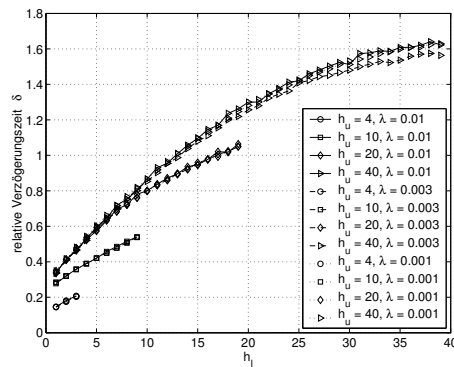


Abbildung 5.11: Die relative Verzögerungszeit δ bleibt für unterschiedliche Ankunftsrate λ gleich.

Als erweitertes Maß wurde in Abschnitt 5.2.2 die relative Verzögerungszeit δ vorgeschlagen. In Abbildung 5.11 ist dieses relative Maß in Abhängigkeit von der Ankunftsrate λ und den Schwellenwerten dargestellt. Der prinzipielle Verlauf der relativen Verzögerungszeit ähnelt dem der absoluten Verzögerungszeit in Abbildung 5.10(b). Außerdem ist festzustellen, dass die relative Verzögerungszeit bei unterschiedlicher An-

kunftsrate gleich bleibt. Bei den untersuchten Konfigurationen liegt sie einheitlich im Bereich von $0, 1 < \delta < 1,65$.

Das Wissen um dieses Verhalten kann der Anwender der Arbeitszyklusanpassung ausnutzen. Mit der relativen Verzögerungszeit wird ihm ein Maß zur Verfügung gestellt, das die Wirkung der Arbeitszyklusanpassung unter dem Einfluss der Ankunftsrate charakterisiert. Es ist kein Wissen über die Charakteristik der zu beobachtenden physikalischen Größe erforderlich. Ausgehend vom Bereich, in dem die relative Verzögerungszeit variiert, entscheidet sich der Anwender für eine Konfiguration der Schwellwerte h_l und h_u . Die Anforderung an die Verzögerungszeit muss lediglich in Bezug auf die Ankunftsrate in Form der relativen Verzögerungszeit formuliert werden. Im Abschnitt 2.4 und im Anhang C wird dargestellt, wie der Zusammenhang mit der Regelbarkeit einer Strecke formuliert werden kann.

5.3.4 Nachrichtenverlustrate

Eine weitere, vom Anwender nicht zu beeinflussende Größe ist die Nachrichtenverlustrate p_{loss} bei der Übertragung zwischen entferntem Sensorknoten und Vermittlungsstation. Untersuchungen von Khalili [KS04] und Schwieger [Sch06] haben gezeigt, dass sie sich im Bereich bis zu einigen zehn Prozent bewegen können. Dabei wurde die Kodierung für Fehlerkorrektur und -schutz bereits berücksichtigt. Verlusten kann durch Bestätigungsmechanismen entgegen gewirkt werden. Die Annahme in den Simulationen ist, dass ein Paketverlust zu einer wiederholten Übertragung führt. Ein verlorenes Paket nimmt bei der erfolglosen Übertragung Kapazität in Anspruch und reduziert damit die Anzahl der Nachrichten, die ein Sensorknoten innerhalb der aktiven Phase übertragen kann.

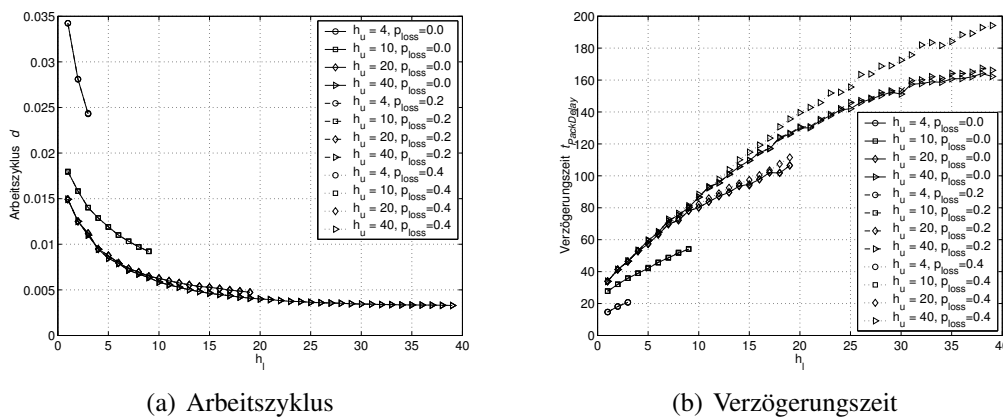
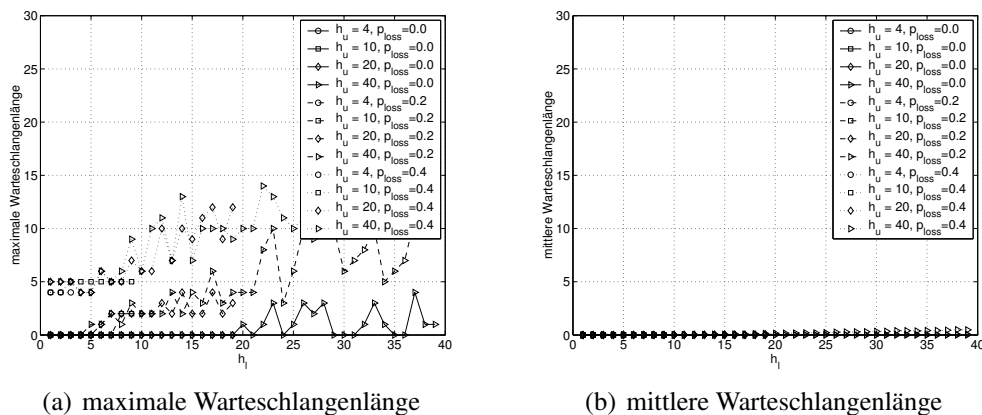


Abbildung 5.12: (a) Der Arbeitszyklus erfährt durch Nachrichtenverluste keine Veränderung. (b) Die Nachrichtenverlustrate p_{loss} erhöht die Verzögerungszeiten bei höheren Schwellwerten leicht.



(a) maximale Warteschlangenlänge

(b) mittlere Warteschlangenlänge

Abbildung 5.13: (a) Eine höhere Nachrichtenverlustrate führt zu einer höheren maximalen Warteschlangenlänge. (b) Die mittlere Warteschlangenlänge bleibt bei veränderlicher Paketverlustrate $p_{loss} = \{0, 0.2, 0.4\}$ nahezu gleich.

In dieser Arbeit werden für die Untersuchung der Leistungsfähigkeit zwei unterschiedliche Nachrichtenverlustraten angenommen: $p_{loss} = \{0, 0.2, 0.4\}$. Die Abbildungen 5.12 (a) und (b) zeigen die Abhängigkeiten des Arbeitszyklus und der Verzögerungszeit von der Nachrichtenverlustrate. Zum Vergleich ist das Verhalten ohne Nachrichtenverluste mit durchgezogener Linie abgebildet. Die Ergebnisse zeigen, dass der Arbeitszyklus von der Nachrichtenverlustrate unabhängig ist. Innerhalb des Beobachtungsintervalls kommt trotz der Verluste im Mittel die gleiche Anzahl Nachrichten an. Daher wirken sich die Verluste nicht auf den Arbeitszyklus aus. Im Gegensatz dazu erhöhen die Verluste die Verzögerungszeit geringfügig (siehe Abbildung 5.12(b)). Durch die Verluste muss die Übertragung mancher Nachrichten auf die nächste aktive Phase verschoben werden. Diese Verschiebung erhöht die Verzögerungszeit.

Die Verschiebung mancher Nachrichten auf die nächste aktive Phase erhöht die Warteschlangenlänge im entfernten Sensorknoten. Dieser Zusammenhang ist in den Abbildungen 5.13 (a) und (b) dargestellt. Je größer die Nachrichtenverlustrate ist, desto größer ist auch die maximale Warteschlangenlänge. Auf die mittlere Warteschlangenlänge hat p_{loss} kaum Einfluss.

Je nach Anzahl der Warteplätze im entfernten Sensorknoten müssen während des Betriebs Nachrichten verworfen werden. Aus den Abbildungen 5.13 (a) und (b) lässt sich näherungsweise ableiten, dass diese Verluste von geringer Größenordnung sein werden, da die Warteschlangenlänge selbst bei hoher Verlustrate im Bereich unter 15 bleibt.

5.3.5 Schwankungsverhalten des Arbeitszyklus

Die Ankünfte der Nachrichten sind zufällig verteilt. Daher können zeitweise mehr Nachrichten eintreffen, die dann zu einer Veränderung des Arbeitszyklus führen. Er ändert sich je nach der Parametrierung der Schwellwerte in verschiedener Weise. In den Abbildungen 5.14 (a) und (b) ist das Verhalten des Arbeitszyklus über der Zeit bei gleichbleibender Ankunftsrate von $\lambda = 0,01$ Nachrichten pro Zeiteinheit dargestellt. Der Verlauf wurde in einem eingeschwungenen Zustand (mittlerer Arbeitszyklus wurde erreicht) aufgenommen.

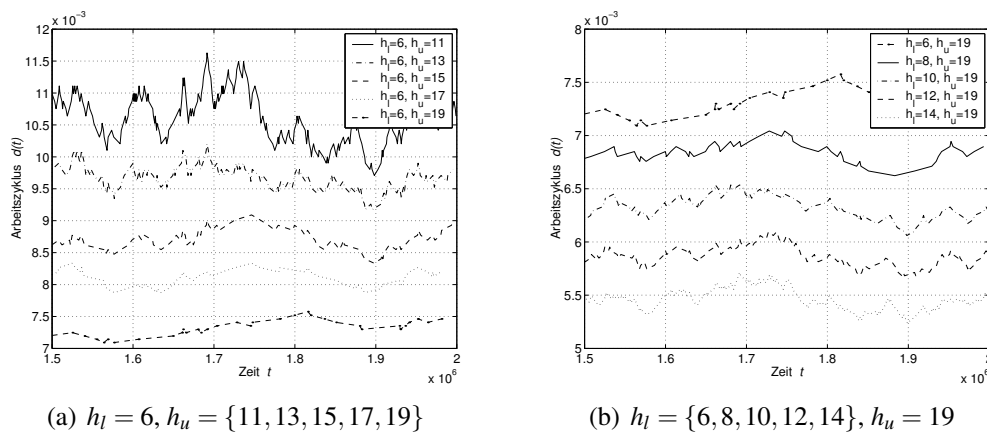


Abbildung 5.14: Bei verschiedenen Parametrierungen der Schwellwerte können unterschiedliche Schwankungsbreiten des Arbeitszyklus beobachtet werden. Je weiter die Schwellwerte auseinander liegen, desto geringer ist die Intensität mit welcher der Arbeitszyklus bei gleichbleibender mittlerer Ankunftsrate $\lambda = 0,01$ schwankt. Außerdem wird die Abhängigkeit des Arbeitszyklus von dem Schwellwert bestätigt.

In der Abbildung 5.14 (a) wird der untere Schwellwert $h_l = 6$ konstant gehalten und der obere Schwellwert h_u variiert. Im Gegensatz dazu wird in Abbildung 5.14 (b) der obere Schwellwert $h_u = 19$ konstant gehalten und der untere Schwellwert variiert. Die Abbildung zeigt zum einen, dass sich bei steigenden Schwellwerten der Arbeitszyklus verringert. Das bestätigt den in Abschnitt 5.3.1 festgestellten Zusammenhang. Zum anderen lassen sich anhand der Abbildungen Rückschlüsse auf das Schwankungsverhalten des Arbeitszyklus ziehen. Wenn die Schwellwerte nah beieinander liegen (z. B. $h_l = 6, h_u = 11$ in Abbildung 5.14 (a)) schwankt der Arbeitszyklus stärker als bei größerer Differenz (z. B. $h_l = 6, h_u = 19$ in Abbildung 5.14 (a)). Stärkere Schwankungen können dabei sowohl größere Schwankungsbreiten als auch größere Anstiege des Arbeitszyklus bedeuten. In Abbildung 5.14 (b) ist für die Anstiege ein ähnliches Verhalten zu beobachten, wobei die Schwankungsbreite annähernd gleich bleibt.

Bei der Dimensionierung des Anpassungsalgorithmus für die jeweilige Anwen-

dung ist das Schwankungsverhalten zu berücksichtigen. Wenn das Sensornetz als Übertragungseinheit träger auf kurzzeitige Häufungen der Nachrichten reagieren soll, sind die Schwellwerte mit größerem Abstand untereinander zu wählen. Ansonsten können die Schwellwerte auch nahe beieinander liegen.

5.4 Bewertung in dynamischen Szenarien

In der Praxis sind nicht nur Anwendungen mit fester mittlerer Ankunftsrate vorzufinden. Auch Szenarien in denen sich die Charakteristik des Verkehrs zeitabhängig ändert, müssen in Betracht gezogen werden. Als Beispiel lässt sich ein Außenlichtsensor in der Gebäudeautomatisierung anführen. Nachts generiert ein solcher Sensor nur wenige Nachrichten. Tagsüber kann es hingegen zu häufigen Änderungen der Lichtverhältnisse und damit zu mehr Nachrichten kommen, wenn Wolken die Sonneneinstrahlung beeinflussen. Um das Verhalten des vorgeschlagenen Anpassungsalgorithmus auch für den Einsatz in derartigen Szenarien abzuschätzen, wird in den folgenden Abschnitten im Verkehrsmodell die Anzahl der Nachrichten pro Zeiteinheit variiert. Dynamik innerhalb des Szenarios wird also im Sinne von zeitlich veränderlichen Ankunftsrate verstanden.

Die vorangegangene statische Analyse hat gezeigt, dass eine große Anzahl von Parametern und deren Kombination das Verhalten der Anpassung beeinflussen können. Zudem sind durch den praktisch kontinuierlichen Wertebereich der Ankunftsrate unendlich viele Möglichkeiten für den Übergang zwischen verschiedenen Ankunftsrate möglich. Daher können Simulationen nicht für alle möglichen Konfigurationen, sondern nur für eine sehr begrenzte Auswahl untersucht werden. Für spezielle Abschätzung in einem bestimmten Anwendungsfall wird auf Abschnitt 6.2 verwiesen. Dort wird ein Verfahren zur Abschätzung des Verhaltens vorgestellt, das ohne aufwändige Simulationen auskommt.

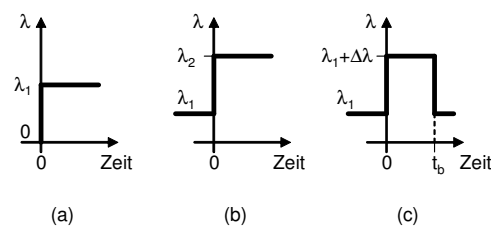


Abbildung 5.15: In den dynamischen Szenarien werden drei verschiedene Verläufe der Ankunftsrate untersucht: die Entwicklung der Leistungsfähigkeit (a) zu Beginn, (b) bei sprunghafter Änderung der Ankunftsrate, (c) bei burst-artiger Änderung der Ankunftsrate

Die Ergebnisse der folgenden Abschnitte unterstützen das Verständnis des allgemeinen Verhaltens und helfen beim Identifizieren kritischer Situationen in der Anwendung. Des-

halb werden die drei verschiedenen, in den Abbildungen 5.15 (a) bis (c) dargestellten Szenarien betrachtet:

- **Beginn der Anpassung:** Zur Zeit $t = 0$ wird mit einem Arbeitszyklus $d = 50\%$ gestartet und eine Ankunftsrate λ_1 für die Nachrichten angenommen. In diesem Szenario ist das Verhalten der Anpassung bezüglich des Arbeitszyklus und der Verzögerungszeiten zu untersuchen.
- **Sprung der Ankunftsrate:** Hinsichtlich der Leistungsfähigkeit kann der Wechsel von einer niedrigen Ankunftsrate λ_1 auf eine hohe Ankunftsrate λ_2 kritisch sein. Innerhalb dieses Szenarios wird die Entwicklung des Arbeitszyklus und der Verzögerungszeit betrachtet. Außerdem ist die Warteschlangenlänge interessant, da sich kurzzeitig Nachrichten stauen können, die ein Knoten nicht hinreichend schnell übertragen kann.
- **Burst-artiger Verkehr:** Ein Burst ist durch eine kurzzeitige Änderung der Ankunftsrate gekennzeichnet. In diesem Szenario wird die Auswirkung eines Bursts auf den Arbeitszyklus, die Verzögerungszeit und die Warteschlangenlänge untersucht.

In den Simulationen kommen nur ausgewählte Konfigurationen der Parameter zum Einsatz. Sie werden in den betreffenden Abschnitten vorgestellt.

5.4.1 Beginn der Anpassung

Im ersten Szenario wird das Verhalten zu Beginn der Anpassung untersucht. Der Betrieb beginnt mit einem Arbeitszyklus $d = 50\%$. Die Ankunftsrate setzt bei $t = 0$ mit $\lambda_1 = 0,1$ bzw. $\lambda_2 = 0,01$ Nachrichten pro Zeiteinheit ein. Die Konfiguration der Schwellwerte h_l , h_u und die Anzahl n_m der Beobachtungsintervalle ist innerhalb eines Szenarios für die gesamte Dauer der Anpassung konstant.

Zu Beginn der Anpassung beeinflussen im Wesentlichen nur der untere Schwellwert h_l und die Anzahl der Beobachtungsintervalle n_m den Verlauf der Arbeitszyklusanpassung. Der obere Schwellwert h_u wird in den Untersuchungen nicht betrachtet, da er zu Beginn keine wesentlichen Auswirkungen auf die Entwicklung des Arbeitszyklus hat. Bei höherer Auslastung des Mediums wirkt sich h_u auf den Arbeitszyklus aus, weil die Dauer der passiven Phase dann verringert wird. In den vorgestellten Szenarien zu Beginn der Anpassung liegt anfangs allerdings nur eine sehr geringe Auslastung vor, wodurch sich h_u nicht auf den Verlauf auswirkt. In den Szenarien werden der Arbeitszyklus und die Verzögerungszeit gemessen. Zu Beginn der Anpassung ist der Arbeitszyklus bezüglich der Ankunftsrate überdimensioniert, das heißt dass entfernten Sensorknoten wesentlich häufiger die Möglichkeit zur Übertragung gegeben wird, als tatsächlich Bedarf besteht. Es kann anfangs nicht zur Überlastung des Kanals kommen. Daher ist die Entwicklung von einem hohen hin zu einem geringen Arbeitszyklus hinsichtlich der Nachrichten in der Warteschlange nicht kritisch. Die Warteschlangenlänge wird daher nicht dargestellt.

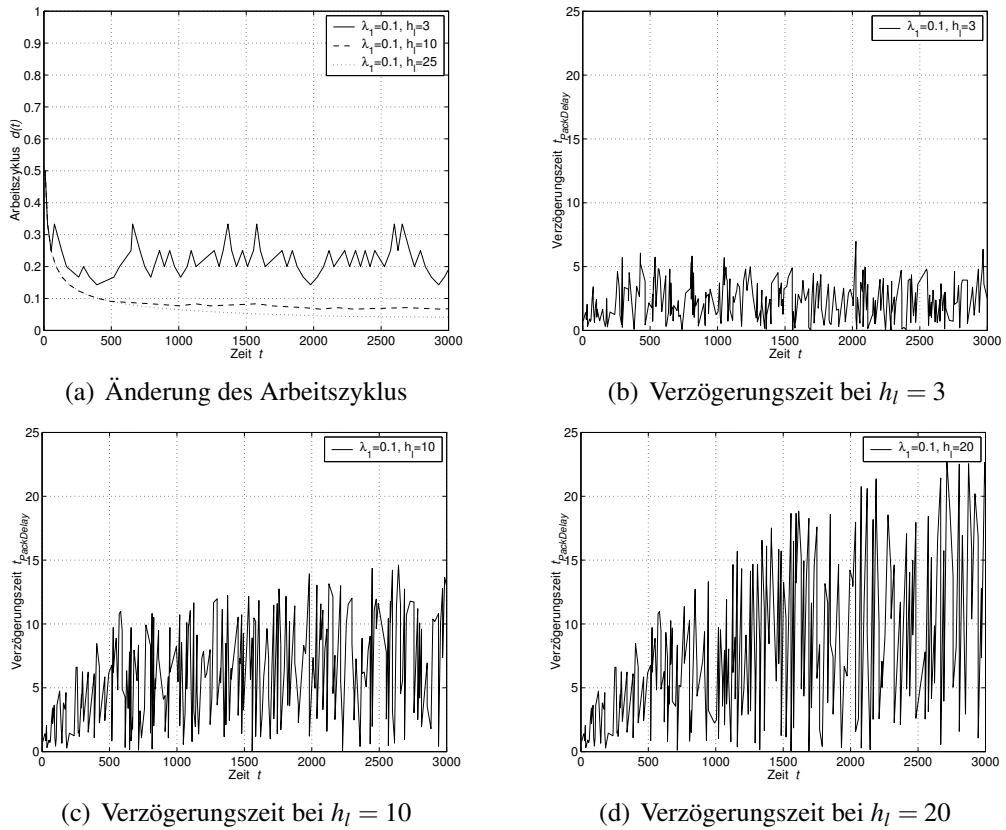
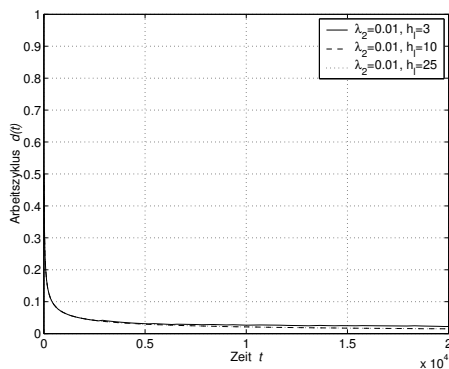
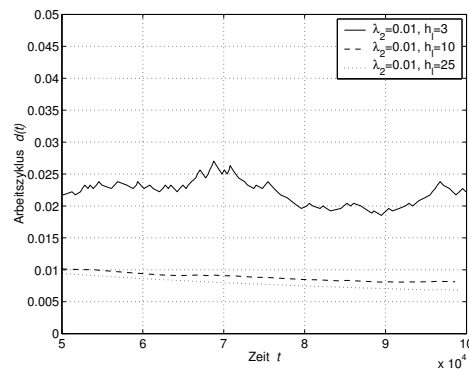


Abbildung 5.16: (a) Der Arbeitszyklus entwickelt sich bei verschiedenen Konfigurationen des unteren Schwellwertes und $\lambda = 0,1$ innerhalb von wenigen tausend Zeiteinheiten zum mittleren Arbeitszyklus. Die Verzögerungszeiten ((b) bis (d)) erhöhen sich entsprechend des Arbeitszyklus.

In den Abbildungen 5.16 (a) bis (d) sind die Verläufe von Arbeitszyklus und Verzögerungszeit mit Start bei $d = 50\%$ und $\lambda_1 = 0,1$ Nachrichten pro Zeiteinheit dargestellt. Die Ergebnisse wurden mit drei verschiedenen Konfigurationen der Schwellwerte $\{h_l, h_u\} = \{\{3, 5\}, \{10, 15\}, \{20, 25\}\}$ erzielt. Prinzipiell passen sich die Arbeitszyklen in negativ-exponentieller Weise an die in Abbildung 5.6 (a) ermittelten mittleren Arbeitszyklen an. Die Entwicklung hin zu einem geringeren Arbeitszyklus bei höheren Schwellwerten (gepunktete und gestrichelte Linie) dauert deutlich länger als bei geringerem Schwellwert (durchgezogene Linie). Durch die Zufälligkeit der Nachrichtenankünfte können kurzzeitig mehr Nachrichten eintreffen. Daher wird der Arbeitszyklus erhöht und nach dem Abbau des Staus wieder verringert. Das führt zu den in Abbildung 5.16 (a) dargestellten Schwankungen des Arbeitszyklus. Sie sind von der Parametrierung der Schwellwerte abhängig, gehören aber nicht mehr zum Beginn der Anpassung. Die relativ starken Schwankungen des Arbeitszyklus entstehen aufgrund der geringen Granularität im Bereich höherer Arbeitszykluswerte (vgl. Modellannahmen in Abschnitt 5.1.1 und Untersuchungen zum Schwankungsverhalten in Abschnitt 5.3.5). Dem Arbeitszyklus entsprechend entwickeln sich auch die Verzögerungszeiten (Abbildung 5.16 (b) bis (d)). Bei geringerem unterem Schwellwert h_l werden die Nachrichten weniger verzögert als bei einem höheren unteren Schwellwert.



(a) Änderung des Arbeitszyklus



(b) Änderung des Arbeitszyklus (vergrößert)

Abbildung 5.17: Bei geringerer Ankunftsrate $\lambda = 0,01$ dauert die Anpassung des Arbeitszyklus länger als bei höherer Ankunftsrate.

Der Verlauf des Arbeitszyklus bei Beginn mit einer 10 mal geringeren Ankunftsrate $\lambda_2 = 0,01$ ist in Abbildung 5.17 (a) dargestellt. Die Abbildung 5.17 (b) zeigt eine Vergrößerung im Bereich von 50.000 bis 100.000 Zeiteinheiten. Wiederum passt sich der Arbeitszyklus in negativ-exponentieller Weise an, jedoch hin zu einem geringeren Arbeitszyklus als bei der Ankunftsrate λ_1 . Die Vergrößerung zeigt, dass nach ca. 100.000 Zeiteinheiten die Anpassung bei höheren unteren Schwellwerten noch nicht abgeschlossen ist. Der absolute Unterschied zwischen den Arbeitszykluswerten ist in diesem Bereich jedoch sehr gering.

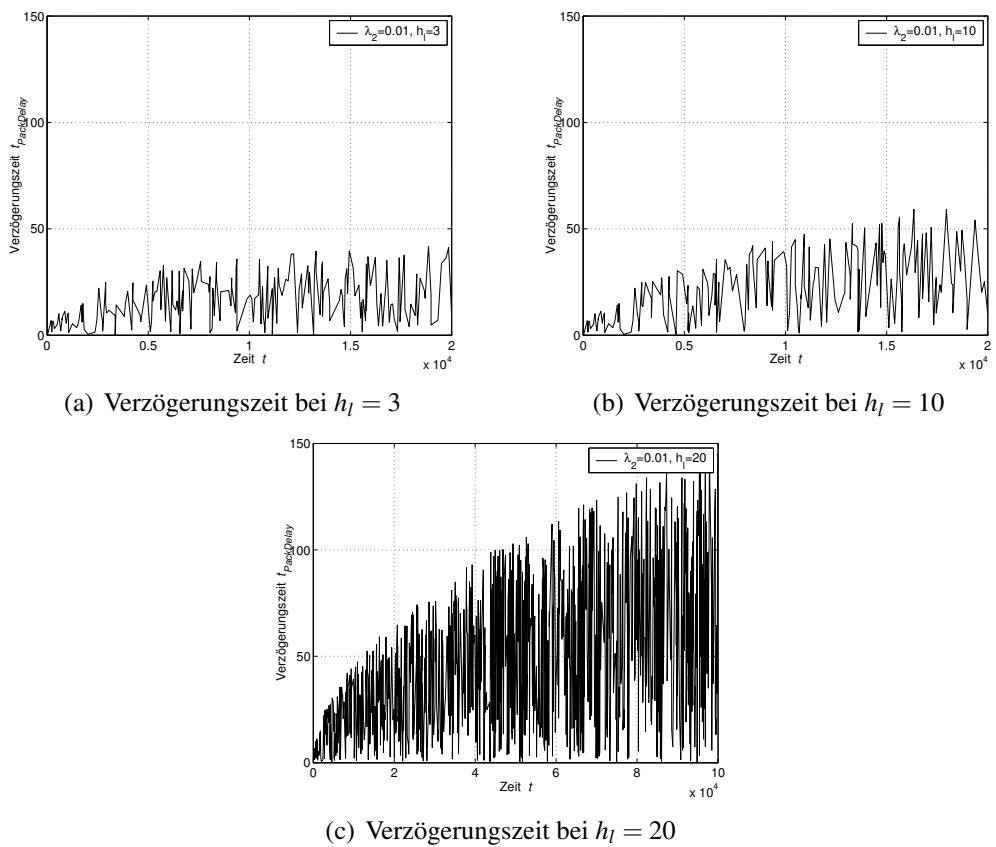


Abbildung 5.18: Die Verzögerungszeit entwickelt sich bei verschiedenen Konfigurationen und $\lambda = 0,01$ entsprechend dem Arbeitszyklus.

In den Abbildungen 5.18 (a) bis (c) sind die zur Abbildung 5.17 (a) gehörigen Verläufe der Verzögerungszeit bei einer Ankunftsrate von $\lambda = 0,01$ Nachrichten pro Zeiteinheit dargestellt. Entsprechend dem sinkenden Arbeitszyklus steigt auch die Verzögerungszeit, solange der Endwert des Arbeitszyklus noch nicht erreicht ist.

Neben den Schwellwerten h_l und h_u beeinflusst die Anzahl n_m der Beobachtungsintervalle die Entwicklung des Arbeitszyklus während des Beginns der Anpassung. Je höher n_m gewählt wird, desto mehr Zeit verstreicht zwischen zwei Bewertungen der Verkehrsverhältnisse. Bei einer Anpassung von einem hohen (zu Beginn) hin zu einem geringen Arbeitszyklus würde damit nicht nur ein höherer mittlerer Arbeitszyklus erreicht werden (vgl. Abbildung 5.9 (a)). Auch ein geringerer Anstieg der Arbeitszyklusänderung wäre zu verzeichnen. Die Abbildung 5.19 bestätigt diese Erwartung durch den Verlauf des Arbeitszyklus mit $n_m = 10$ und $n_m = 20$. Da die Schwellwerte h_l und h_u konstant bleiben, ändert sich auch die Auslastung innerhalb des Beobachtungsintervalls. Deshalb kommen verschiedene Arbeitszyklen zu Stande.

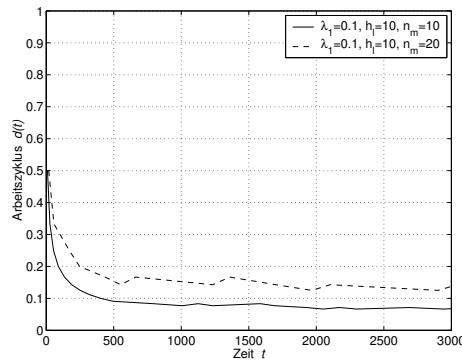


Abbildung 5.19: Unterschiedliche Anzahlen n_m der Beobachtungsintervalle führen zu verschiedenen Verläufen des Arbeitszyklus.

Bei der Dimensionierung der Parameter sollte dieses Verhalten berücksichtigt werden. Wenn beispielsweise bei Verminderung der Ankunftsrate der Arbeitszyklus träger verringert werden sollte, ist der Parameter n_m höher zu wählen. Für die Parametrierung ist zusätzlich der Zusammenhang zu den Schwellwerten zu beachten. Wird n_m erhöht, ohne auch h_l zu erhöhen, dann vermindert sich der Arbeitszyklus erst bei geringeren Lasten. Wenn die Schwellwerte in dem gleichen Verhältnis wie der Arbeitszyklus geändert werden, bleiben die erreichten mittleren Arbeitszyklen gleich. Lediglich die Reaktionszeiten bei Veränderungen der Ankunftsrate würden sich ändern.

5.4.2 Sprung

Signifikante Änderungen der Ankunftsrate können kritisch sein, da innerhalb von kurzer Zeit viele Nachrichten eintreffen. Sie können den Kanal zwischen entferntem Sensor-

knoten und Vermittlungsstation kurzzeitig überlasten. Mit dem vorgeschlagenen Algorithmus zur Anpassung kann der Arbeitszyklus aber nur schrittweise geändert werden. Für die Verwendung der Anpassung in realen Szenarien ist das prinzipielle Verhalten bei Ankunftsrateänderungen interessant. Deshalb werden in diesem Abschnitt Sprünge der Ankunftsrate um verschiedene Größenordnungen untersucht: Änderung um eine bzw. zwei Größenordnungen der Ankunftsrate. Der erste Fall wird durch eine Änderung der Ankunftsrate von $\lambda_1 = 0,001$ Nachrichten pro Zeiteinheit auf $\lambda_2 = 0,01$ Nachrichten pro Zeiteinheit angenommen. Der Beginn bei $\lambda_1 = 0,001$ Nachrichten pro Zeiteinheit und ein Sprung auf $\lambda_2 = 0,1$ Nachrichten pro Zeiteinheit steht für die Änderung um zwei Größenordnungen. Diese Ankunftsrateänderungen sind nur in der Übergangsphase kritisch, da maximal 10 Nachrichten pro Zeiteinheit übertragen werden können (vgl. Modellannahmen in Abschnitt 5.1.3).

Die veränderte Ankunftsrate λ_2 wird bei $t = 0$ in den Simulationen gesetzt, wobei ein eingeschwungener Zustand bezüglich der Anpassung bei $t < 0$ vorausgesetzt wird. Für diese Untersuchungen werden die Parameter $h_l = 3$, $h_u = 5$ und $n_m = 10$ angenommen. Außerdem werden Nachrichtenverluste ausgeschlossen.

In den Abbildungen 5.20 (a) bis (c) sind die Verläufe von Arbeitszyklus und Verzögerungszeit nach einer Änderung der Ankunftsrate um eine Größenordnung ($\lambda_1 : \lambda_2 = 0,001 : 0,01$) dargestellt. Nach dem Zeitpunkt $t = 0$ passt sich der Arbeitszyklus an die Ankunftsrate $\lambda_2 = 0,01$ Nachrichten pro Zeiteinheit an. Die Warteschlange bleibt während der gesamten Anpassung leer. Der Sprung der Ankunftsrate über eine Größenordnung von $\lambda_1 = 0,001$ auf $\lambda_2 = 0,01$ kann damit als unkritisch bewertet werden.

Deutlich anderes Verhalten lässt sich bei einer Änderung der Ankunftsrate um zwei Größenordnungen, von $\lambda_1 = 0,001$ auf $\lambda_2 = 0,1$ beobachten. Die Abbildungen 5.21 (a) bis (d) zeigen, dass die Verzögerungszeit unverhältnismäßig hoch ansteigt. Ebenso unverhältnismäßig hoch entwickelt sich die Warteschlangenlänge. Die ab $t = 0$ eintreffenden Nachrichten überlasten zunächst den Kanal zur Vermittlungsstation. Der entfernte Sensorknoten speichert die Nachrichten in der Warteschlange. Die Anpassung des Arbeitszyklus kommt erst nach ca. 10.000 Zeiteinheiten in einen Bereich, bei dem die Übertragungskapazität in der Größenordnung der Ankunftsrate liegt. Daher baut der Sensorknoten die bis dahin angestauten Nachrichten erst ab $t \approx 10.000$ Zeiteinheiten ab. Erst nach dem Abbau aller in der Warteschlange befindlichen Nachrichten reduziert sich die Verzögerungszeit.

In Anhang D sind zusätzliche Ergebnisse von Untersuchungen mit schrittweise erhöhter Ankunftsrate λ_1 dargestellt. Sie zeigen, dass ein Sprung von $\lambda_1 = 0,003$ auf $\lambda_2 = 0,1$ Nachrichten pro Zeiteinheit noch eine kritische Situation darstellt. Jedoch zeigt sich bei einer Änderung der Ankunftsrate von $\lambda_1 = 0,004$ auf $\lambda_2 = 0,1$ Nachrichten pro Zeiteinheit eine maximale Warteschlangenlänge von ca. 14 Nachrichten. Diese Ankunftsrateänderung führt bei der gegebenen Parametrierung also nicht zwangsläufig zu einer

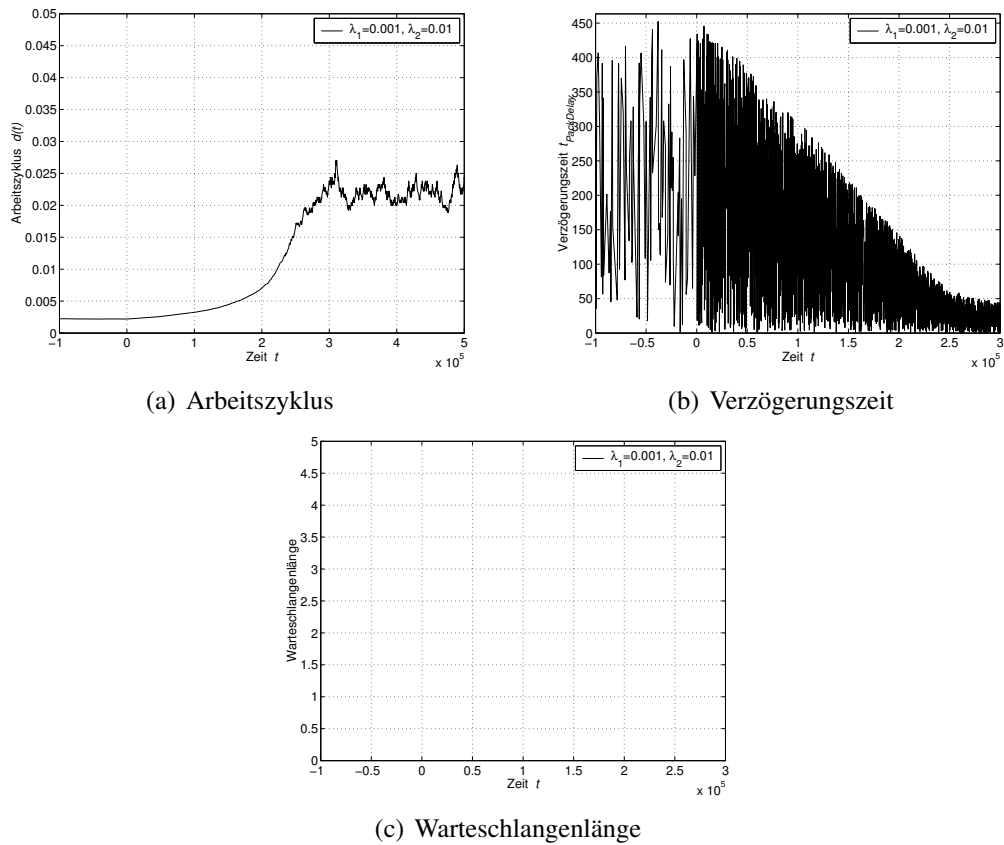
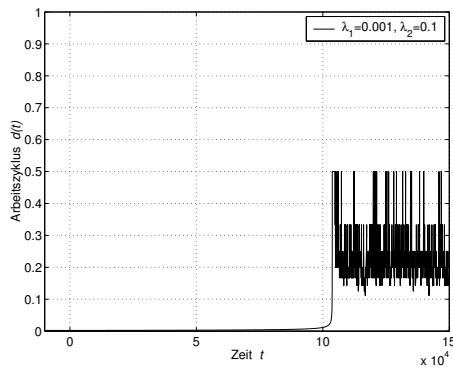
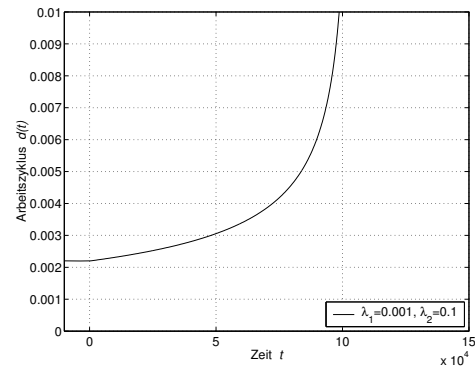


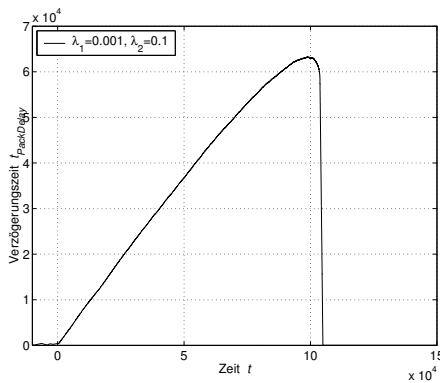
Abbildung 5.20: Bei einer sprungartigen Änderung der Ankunftsrate um eine Größenordnung passt sich (a) der Arbeitszyklus an die neue Situation an. (b) Die Verzögerungszeit entwickelt sich entsprechend dem Arbeitszyklus. (c) Die Warteschlange enthält über die gesamte Dauer der Anpassung keine Nachrichten.



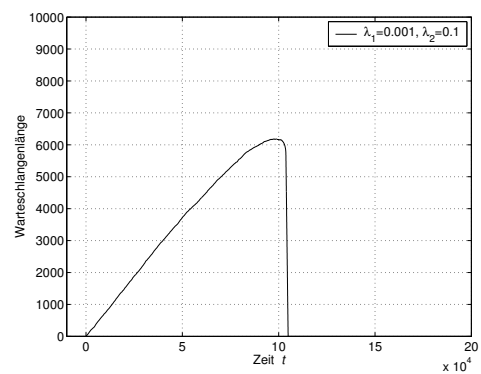
(a) Arbeitszyklus



(b) Arbeitszyklus (vergrößert)



(c) Verzögerungszeit



(d) Warteschlangenlänge

Abbildung 5.21: (a) Bei einer sprunghaften Änderung der Ankunftsrate um zwei Größenordnungen passt sich der Arbeitszyklus an die neue Ankunftsrate an. (b) Die vergrößerte Darstellung zeigt den exponentiellen Anstieg bereits zu Beginn der Änderung. (c) Die Verzögerungszeit und die (d) Warteschlangenlänge steigen unverhältnismäßig (im Vergleich zu Abbildung 5.20 (b) und (c)) stark an.

Überlastung des Kanals.

Die Größenordnung der für die Anpassung benötigten Zeit ist sowohl beim Sprung um eine als auch um zwei Größenordnungen vergleichbar. Grund dafür ist der anfangs hohe Arbeitszyklus, bei dem wegen des großen zeitlichen Abstands zwischen zwei aktiven Phasen nur selten die Möglichkeit zur Arbeitszyklusänderung besteht.

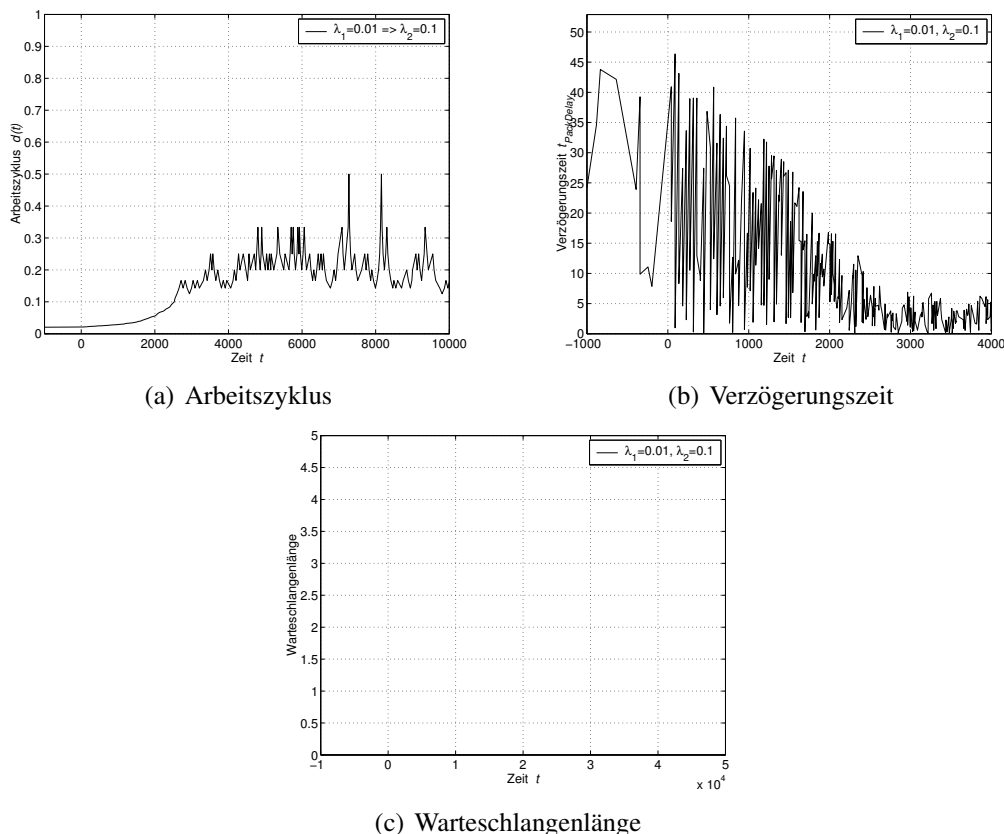


Abbildung 5.22: Im höheren Bereich der Ankunftsrate ändert sich der Arbeitszyklus bei einem Sprung um eine Größenordnung wesentlich schneller (vgl. Abbildungen 5.20 (a) bis (c)).

Zum Vergleich der Änderungszeit ist in den Abbildungen 5.22 (a) bis (c) der Verlauf des Arbeitszyklus bei einem Sprung von $\lambda_1 = 0,01$ auf $\lambda_2 = 0,1$ Nachrichten pro Zeiteinheit dargestellt. Wiederum führt dieser Sprung nicht zu einer kritischen Situation z. B. durch überlaufende Warteschlange. Lediglich der Arbeitszyklus und die Verzögerungszeit passen sich über eine bestimmte Dauer an. Kurzzeitig ist daher mit größeren relativen Verzögerungszeiten zu rechnen.

Aus den Abbildungen 5.20 (a) bis (c) und 5.22 (a) bis (c) ist erkennbar, dass die Dauer der Anpassung bei Sprüngen gleicher Größenordnung in verschiedenen Bereichen der

Ankunftsrate unterschiedlich ausfällt. Beim Sprung von $\lambda = 0,01$ auf $\lambda = 0,1$ (Abbildungen 5.22 (a) bis (c)) dauert die Anpassung ca. 3000 Zeiteinheiten. Hingegen verstreichen ca. 250.000 Zeiteinheiten bis zur Anpassung, wenn sich die Ankunftsrate von $\lambda = 0,001$ auf $\lambda = 0,01$ (vgl. Abbildungen 5.20 (a) bis (c)) ändert. Die Unterschiede werden durch verschiedene Arbeitszyklen bei Beginn der Änderung hervorgerufen. Im ersten Fall setzt die Anpassung bei einem Arbeitszyklus von ca. $d \approx 0,025$ ein, wobei im zweiten Fall von einem Arbeitszyklus bei $d \approx 0,0004$ ausgegangen wird. Diese Unterschiede im Arbeitszyklus bei $t = 0$ führen zu unterschiedlichen Zeiten zwischen aktiven Phasen und damit zu unterschiedlichen Geschwindigkeiten der Anpassung.

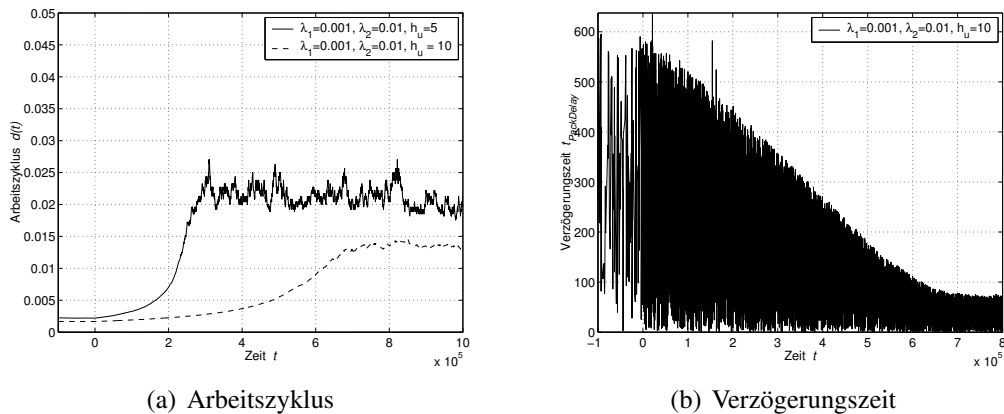


Abbildung 5.23: Der obere Schwellwert h_u beeinflusst (a) die Geschwindigkeit der Anpassung des Arbeitszyklus und damit auch (b) die Verzögerungszeit während der Anpassung.

Ein letzter zu untersuchender Parameter ist der obere Schwellwert h_u , der die Wahrscheinlichkeit der Erhöhung des Arbeitszyklus verändert. Im Folgenden werden daher verschiedene Werte für h_u untersucht. Die Verläufe des Arbeitszyklus bei unterschiedlichen oberen Schwellwerten sind in der Abbildung 5.23 (a) dargestellt. Neben dem unterschiedlich erreichten Arbeitszyklus nach der Anpassung wird auch die unterschiedliche Geschwindigkeit der Anpassung deutlich. Bei erhöhtem Schwellwert $h_u = 10$ erreicht die Anpassung erst nach ca. doppelter Zeit den endgültigen Wert. Der Unterschied tritt auf, weil sich nach Algorithmus 1 (Seite 54) der Arbeitszyklus bereits ändert, wenn der obere Schwellwert h_u überschritten ist, ohne dass die Anzahl der Beobachtungsintervalle n_m erreicht sein muss. Bei einem höheren Schwellwert $h_u = 10$ wirkt sich die Änderung daher später aus und verzögert die Anpassung. Die Verzögerungszeit (Abbildung 5.23 (b) im Vergleich zu Abbildung 5.20 (b)) entwickelt sich entsprechend langsamer.

Abschließend kann festgestellt werden, dass bei der verwendeten Konfiguration der Schwellwerte keine Probleme auftreten, wenn die Ankunftsrate um den Faktor 10 erhöht wird. Allerdings können Änderungen der Ankunftsrate um zwei Größenordnungen (Faktor 100) zu Problemen führen, weil der Kanal zur Übertragung der Nachrichten zwischen dem entfernten Sensorknoten und der Vermittlungsstation überlastet wird. Mit dem in Ab-

schnitt 6.2 entwickelten Modell lässt sich das Verhalten auch für andere Konfigurationen der Schwellwerte abschätzen.

5.4.3 Burst

Als dritte Art der Änderung der Ankunftsrate wird der Burst betrachtet. Ein Burst im Bereich der Nachrichtenübertragung ist dadurch gekennzeichnet, dass kurzzeitig ein Bündel von Nachrichten auftritt, bei dem die Zwischenankunftszeit deutlich kleiner ist als im übrigen zeitlichen Mittel. Burst-artiger Verkehr kann beispielsweise in der Automatisierungstechnik auftreten. Jaspermeite [Jas02] konnte burst-artigen Verkehr durch Ergebnisse detaillierter Untersuchungen innerhalb einer Automatisierungsumgebung genauer beschreiben.

Bei burst-artiger Belastung ist zu erwarten, dass sich der Arbeitszyklus, ähnlich wie bei sprunghafter Erhöhung der Ankunftsrate (siehe Abschnitt 5.4.2), hin zu einem höheren Arbeitszyklus entwickelt. Während der Anpassung des Arbeitszyklus besteht für kurze Zeit die Möglichkeit, dass ein Sensorknoten die generierten Nachrichten nicht hinreichend schnell zur Vermittlungsstation übertragen kann, da der Kanal überlastet ist. Dadurch wären wesentlich höhere Warteschlangenlängen und damit einhergehende Verzögerungszeiten zu beobachten. Mit den Simulationen in diesem Abschnitt soll die Frage nach dem Verhalten bei Nachrichtenbursts beantwortet werden. Insbesondere interessiert, welche Art von Bursts kurzzeitig zu bewältigen sind und wo die Grenzen bei burst-artigem Verkehr liegen.

In dieser Arbeit wird ein Burst mit einer kurzzeitig höheren Ankunftsrate modelliert. In Abbildung 5.15 (c) ist das generische Modell für die in dieser Arbeit anzunehmenden Bursts dargestellt. Ein Burst beginnt, nachdem der Arbeitszyklus an die Ankunftsrate λ_1 angepasst ist (eingeschwungener Zustand). Die Ankunftsrate springt zu Beginn des Bursts auf die Ankunftsrate $\lambda_1 + \Delta\lambda$. Nach der Burst-Dauer t_b sinkt die Ankunftsrate wieder auf λ_1 .

Alle Burst-Szenarien starten aus dem eingeschwungenen Zustand bei $\lambda_1 = 0,01$ Nachrichten pro Zeiteinheit. Ein Burst beginnt beim Zeitpunkt $t = 0$ Zeiteinheiten, indem Änderungen um eine ($\Delta\lambda_1 = 0,09$, Faktor 10), zwei ($\Delta\lambda_2 = 0,99$, Faktor 100) und drei Größenordnungen ($\Delta\lambda_3 = 9,99$, Faktor 1000) in die Simulationen eingespeist werden. Als maximale kurzzeitige Belastung wird demnach $\lambda_1 + \Delta\lambda_3 = 10$ Nachrichten pro Zeiteinheit betrachtet. Da laut Modell (siehe Abschnitt 5.1.3) maximal 10 Nachrichten pro Zeiteinheit übertragen werden können und der Arbeitszyklus $d \leq 50\%$ sein muss, wird die Verbindung zwischen entferntem Sensorknoten und Vermittlungsstation kurzzeitig überlastet. Dieses Szenario soll zum Abschätzen der Grenzen für die Anwendbarkeit der Anpassung dienen. Die Dauer t_b der eingespeisten Bursts beträgt in den Szenarien 10, 50, 100 und 500 Zeiteinheiten. Während der Simulationen werden die Schwellwerte auf $h_l = 3$ und $h_u = 5$ und die Anzahl der beobachteten Zeitschlitzintervalle auf $n_m = 10$ gesetzt.

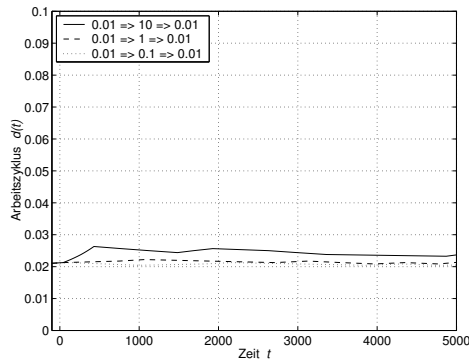
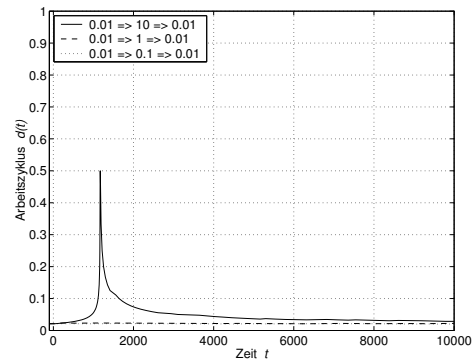
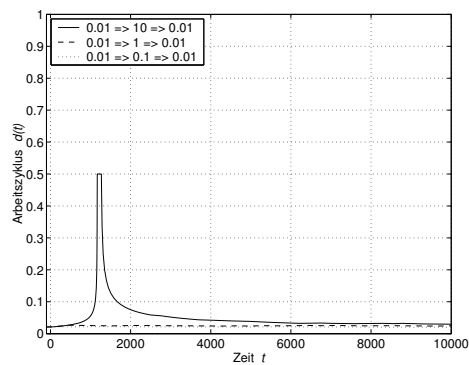
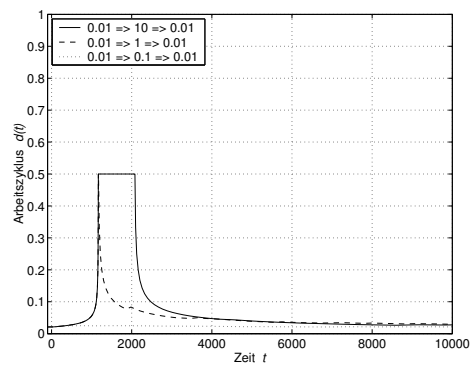
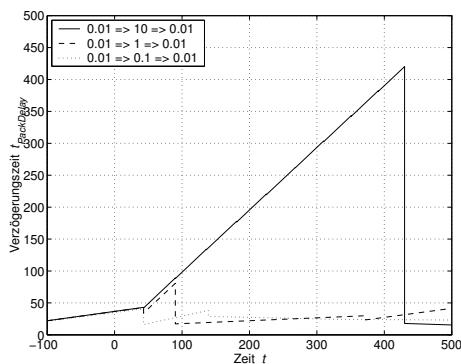
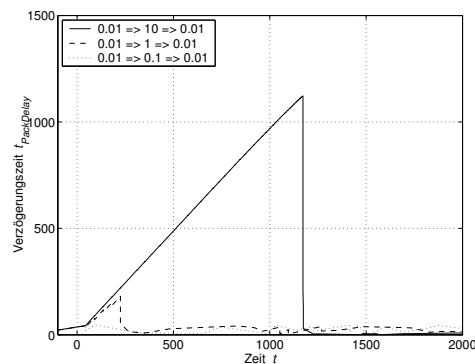
(a) Arbeitszyklus bei $t_b = 10$ Zeiteinheiten(b) Arbeitszyklus bei $t_b = 50$ Zeiteinheiten(c) Arbeitszyklus bei $t_b = 100$ Zeiteinheiten(d) Arbeitszyklus bei $t_b = 500$ Zeiteinheiten

Abbildung 5.24: Verschiedene Burst-Intensitäten und -dauern rufen verschiedenartige Änderungen des Arbeitszyklus hervor. Die in der Legende angegebenen Zahlenwerte für die Burst-Eigenschaften entsprechen den Ankunftsraten in der Form $\lambda_1 \Rightarrow (\lambda_1 + \Delta\lambda) \Rightarrow \lambda_1$.

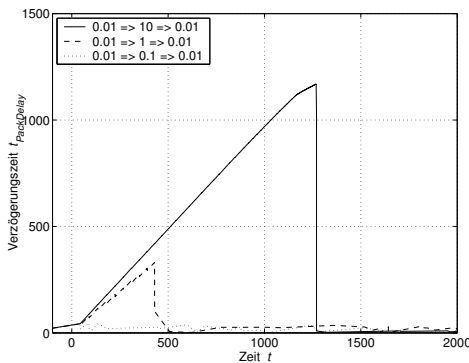
Die Verläufe des Arbeitszyklus bei den genannten Burst-Dauern t_b und Änderungen $\Delta\lambda$ der Ankunftsrate sind in den Abbildungen 5.24 (a) bis (d) dargestellt. Generell ist zu beobachten, dass bei einem Burst mit einer zehnfach über λ_1 liegenden Ankunftsrate (punktierter Linie) unabhängig von der Dauer t_b des Bursts, der Arbeitszyklus annähernd unverändert bleibt. Bei einer kurzzeitigen Änderung $\Delta\lambda_2$ um eine Größenordnung (gestrichelte Linie) ist erst ab einer Burst-Dauer $t_b = 500$ Zeiteinheiten eine deutliche Änderung des Arbeitszyklus zu beobachten. Ändert sich die Ankunftsrate während t_b um drei Größenordnungen (durchgezogenen Linie), sind ab einer Burst-Dauer von $t_b = 50$ Zeiteinheiten deutliche Änderungen des Arbeitszyklus festzustellen. Liegt die Burst-Dauer bei 10 Zeiteinheiten, ändert sich der Arbeitszyklus nur unmerklich.



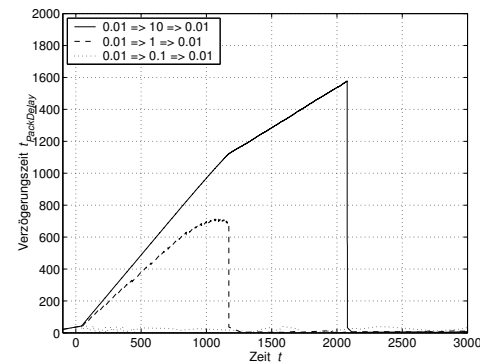
(a) Verzögerungszeit bei $t_b = 10$ Zeiteinheiten



(b) Verzögerungszeit bei $t_b = 50$ Zeiteinheiten



(c) Verzögerungszeit bei $t_b = 100$ Zeiteinheiten

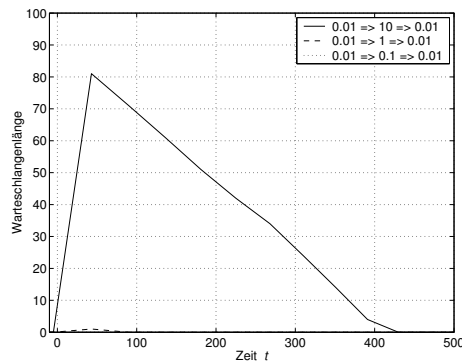


(d) Verzögerungszeit bei $t_b = 500$ Zeiteinheiten

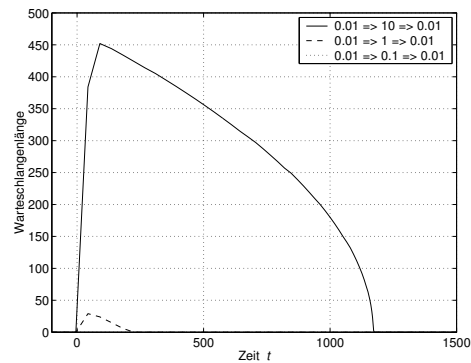
Abbildung 5.25: Durch burst-artigen Verkehr können unverhältnismäßig hohe Verzögerungszeiten zustande kommen. Die in der Legende angegebenen Zahlenwerte für die Burst-Eigenschaften entsprechen den Ankunftsraten in der Form $\lambda_1 \Rightarrow (\lambda_1 + \Delta\lambda) \Rightarrow \lambda_1$.

In den Abbildungen 5.25 (a) bis (d) sind die zugehörigen Verläufe der Verzögerungszeit dargestellt. Wiederum lässt sich bei einem Burst mit einer Ankunftsratenänderung $\Delta\lambda_1$ um eine Größenordnung (gepunktete Linie), unabhängig von der Burst-Dauer kaum eine

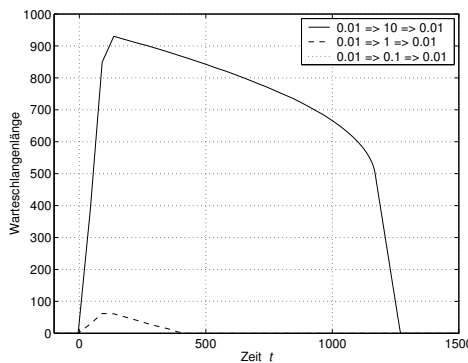
Änderung der Verzögerungszeit feststellen. Deutliche Änderungen der Verzögerungszeit sind hingegen bei einem Burst mit Änderungen um zwei (gestrichelte Linie) bzw. drei Größenordnungen (durchgezogene Linie) zu erkennen. Diese signifikanten Erhöhungen der Verzögerungszeiten machen die Grenzen der Arbeitszyklusanpassung deutlich. Bursts, bei denen die Ankunftsrate kurzzeitig um mehr als das zehnfache steigt, führen kurzzeitig zu sehr hohen Warteschlangenlängen. Aufgrund der hohen Warteschlangenlängen ist in realen Szenarien mit deutlichen Verlusten von Nachrichten zu rechnen.



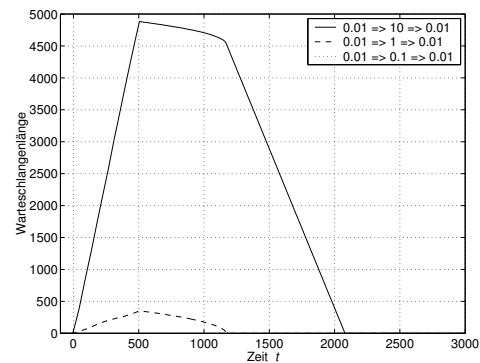
(a) Warteschlangenlänge $t_b = 10$ Zeiteinheiten



(b) Warteschlangenlänge $t_b = 50$ Zeiteinheiten



(c) Warteschlangenlänge $t_b = 100$ Zeiteinheiten



(d) Warteschlangenlänge $t_b = 500$ Zeiteinheiten

Abbildung 5.26: Die Warteschlangen im entfernten Sensorknoten entwickeln im Verlauf des Bursts, abhängig von der Burst-Intensität und -dauer, unterschiedliche Längen. Bei hoher Burst-Intensität kommen unverhältnismäßig hohe Warteschlangenlängen zustande. Die in der Legende angegebenen Zahlenwerte für die Burst-Eigenschaften entsprechen den Ankunftsraten in der Form $\lambda_1 \Rightarrow (\lambda_1 + \Delta\lambda) \Rightarrow \lambda_1$.

Der zugehörige Verlauf der Warteschlangenlänge im entfernten Sensorknoten wird in den Abbildungen 5.26 (a) bis (d) dargestellt. Den Verläufen bei einem Sprung über drei Größenordnungen ist gemeinsam, dass die Warteschlangenlänge während des Bursts mo-

noton steigt. Nach Ende des Bursts werden die aufgelaufenen Nachrichten in der Warteschlange des entfernten Sensorknotens abgebaut. Gleichzeitig erhöht sich der Arbeitszyklus (Abbildung 5.24 (a) bis (d)) weiterhin (bis zu $t \approx 1100$ Zeiteinheiten), wodurch die Warteschlangenlänge in unterschiedlicher Weise abgebaut wird. Die Warteschlangenlänge bei einem Burst mit hundertfacher Erhöhung $\Delta\lambda_2$ der Ankunftsrate (gestrichelte Linie) verläuft prinzipiell ähnlich. Lediglich die Größenordnung der maximalen Warteschlangenlänge fällt deutlich geringer aus. Bei einem Burst mit einer Erhöhung der Ankunftsrate $\Delta\lambda_1$ auf das Zehnfache (gepunktete Linie) werden keine Nachrichten in der Warteschlange gespeichert.

Am Beispiel des Bursts mit einer Ankunftsratenänderung über drei Größenordnungen und einer Dauer von $t_b = 500$ Zeiteinheiten wird der Zusammenhang zwischen Arbeitszyklus (Abbildung 5.24 (d)), Verzögerungszeit (Abbildung 5.25 (d)) und Warteschlangenlänge (Abbildung 5.26 (d)) erläutert. Ein solcher Burst stellt eine Besonderheit hinsichtlich der Intensität der Ankunftsratenänderung und der Dauer des Bursts dar, da er zur Überlastung des Kanals zwischen entferntem Sensorknoten und Vermittlungsstation führt. Zu Beginn des Bursts steigen Arbeitszyklus, Verzögerungszeit und Warteschlangenlänge monoton. Bei $t = 500$ Zeiteinheiten (Ende des Bursts) fällt die Warteschlangenlänge mit geringem negativen Anstieg, da der mögliche maximale Durchsatz größer als die angebotene Last λ_1 ist. Ab dem Zeitpunkt $t \approx 1100$ Zeiteinheiten hat der Arbeitszyklus das Maximum von $d = 50\%$ erreicht und die Warteschlangenlänge sinkt mit deutlich negativem Anstieg. Die aufgezeichnete Verzögerungszeit steigt weiterhin an, da die in der Warteschlange des entfernten Sensorknotens aufgestauten Nachrichten noch abgebaut werden müssen. Zum Zeitpunkt $t \approx 2100$ Zeiteinheiten sind alle in der Warteschlange aufgestauten Nachrichten abgebaut. Die Verzögerungszeit bewegt sich ab diesem Zeitpunkt wieder im vorherigen Bereich. In der Folge wird der Arbeitszyklus durch die Anpassung wieder auf einen für die Ankunftsrate λ_1 angemessenen Wert reduziert.

Anhand des dargestellten Beispiels wird deutlich, dass Bursts mit großer Intensität und Dauer die Grenzen der in Abschnitt 4.3 eingeführten Anpassung darstellen. Diese Feststellung ist ein allgemeiner Hinweis, für den praktischen Einsatz aber noch nicht hilfreich, da die Aussagen nur für das generische Modell getroffen werden können. Außerdem sind die gezeigten Ergebnisse nur für die Konfiguration $h_l = 3$, $h_u = 5$ und $n_m = 10$ gültig. In Kapitel 6 wird der Verlauf der Anpassung analytisch formuliert, so dass die Untersuchungen einfach auf spezielle Übertragungstechniken angepasst werden können. Damit lassen sich spezielle Untersuchungen für die jeweilige Übertragungstechnik und das Einsatzszenario durchführen.

5.5 Vergleich mit T-MAC

In den bisherigen Abschnitten der Leistungsanalyse wurde gezeigt, welche Auswirkungen verschiedene Parametrierungen der Anpassung auf das Verhalten der wesentlichen Größen haben. Verwandte Arbeiten schlagen Ansätze vor, die in ähnlicher Weise den ereignisbasierten Verkehr höherer Schichten für die zeitbasierte Einstellung des Arbeitszyklus in Betracht ziehen. Wie in Kapitel 3 dargestellt, weist der von van Dam [vDL03] vorgeschlagene T-MAC-Ansatz die meisten Ähnlichkeiten mit dem in dieser Arbeit vorgeschlagenen Verfahren zur Arbeitszyklusanpassung auf. Das Grundprinzip bei T-MAC beruht darauf, dass ein Koordinatorknoten den Empfang abbricht, wenn er für eine festgelegte Zeit keine Nachrichten empfangen hat. Dadurch kann der Arbeitszyklus innerhalb bestimmter Grenzen an den Kommunikationsbedarf höherer Schichten angepasst werden. Der Vorschlag des T-MAC Protokolls beinhaltet weitere konzeptionelle Ideen. Sie haben für das Prinzip der Arbeitszyklusanpassung allerdings keine Bedeutung und werden daher vernachlässigt.

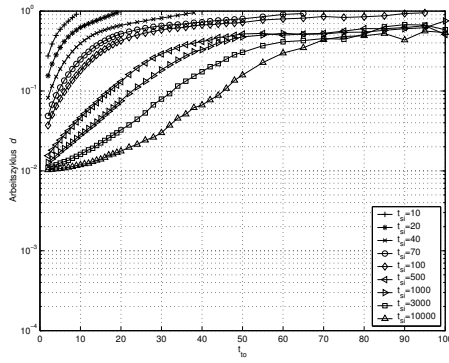
Die Leistungsfähigkeit des T-MAC Konzeptes kann durch zwei Parameter beeinflusst werden. Erstens muss eine feste Zykluszeit t_{si} eingestellt werden. Sie bestimmt den Abstand zwischen dem Beginn zweier aufeinander folgender aktiver Phasen. Zweitens gibt der Parameter t_{to} die Zeit vor, nach welcher der Empfang eingestellt wird, falls keine Nachrichten eintreffen (Timeout). Beide Parameter werden in Zeiteinheiten angegeben. Sie müssen vor Betriebsbeginn in der Vermittlungsstation fest eingestellt werden.

Angelehnt an die Untersuchungen in den vorangegangenen Abschnitten wird die Leistungsfähigkeit in Bezug auf statische und dynamische Szenarien diskutiert. Im Vergleich zur Anpassung des Arbeitszyklus sollen die Unterschiede dargestellt werden. Außerdem ist zu bestimmen, ob ähnliche allgemeine Zusammenhänge zwischen Ankunftsrate und relativer Verzögerungszeit bestehen.

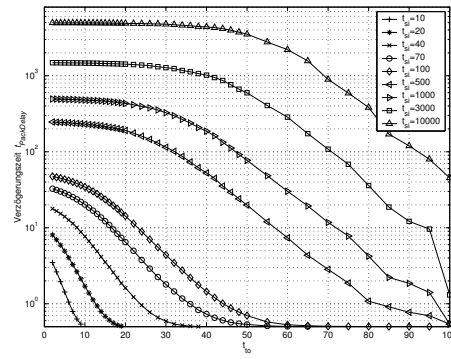
5.5.1 Vergleich in statischem Szenario

Bei der statischen Bewertung werden drei verschiedene Ankunftsraten angenommen: $\lambda_1 = 0,1$, $\lambda_2 = 0,01$ und $\lambda_3 = 0,001$ Nachrichten pro Zeiteinheit. Die Analyse der Anpassung des Arbeitszyklus hat gezeigt, dass bei einer Ankunftsrate von $\lambda = 0,001$ Nachrichten pro Zeiteinheit der Arbeitszyklus minimal auf $d \approx 3 \cdot 10^{-4}$ sinkt (vgl. Abbildung 5.10 (a)). Um einen fairen Vergleich mit dem T-MAC-Ansatz zu gewährleisten, muss ein Arbeitszyklus von $d \approx 10^{-4}$ ermöglicht werden. Deshalb wird die maximale Zykluszeit $t_{si} = 10.000$ Zeiteinheiten gesetzt. Der Parameter t_{to} für die Zeitüberschreitung wird jeweils im Bereich von $2 \leq t_{to} \leq t_{si}$ variiert.

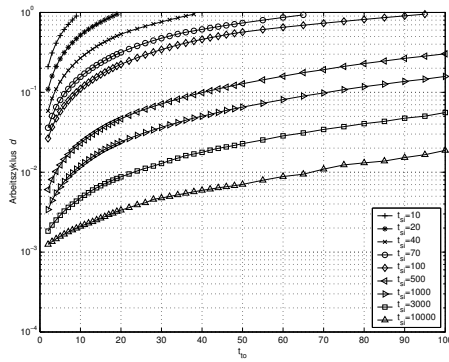
In den Abbildungen 5.27 (a) bis (f) sind Arbeitszyklus und Verzögerungszeit für verschiedene Konfigurationen von t_{si} und t_{to} dargestellt. Unterschiedliche Linien stehen für



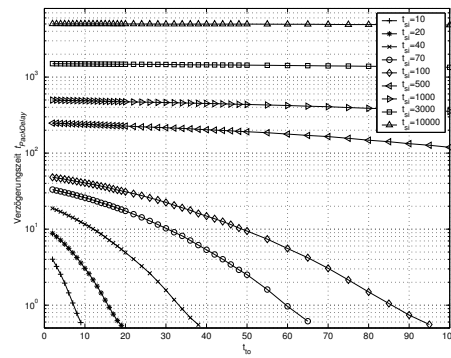
(a) Arbeitszyklus bei λ_1



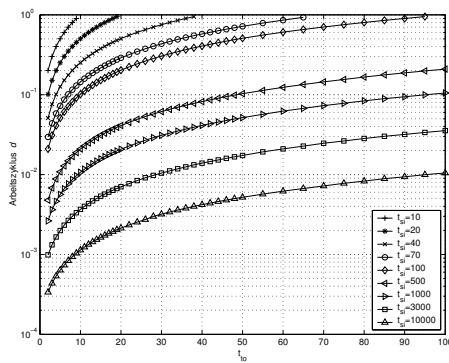
(b) Verzögerungszeit bei λ_1



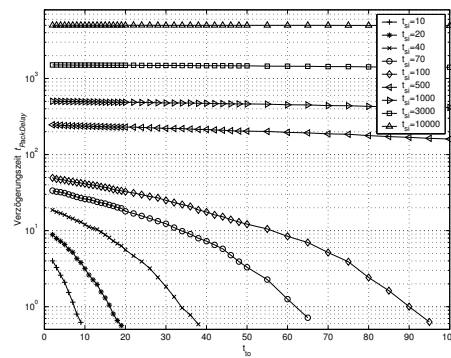
(c) Arbeitszyklus bei λ_2



(d) Verzögerungszeit bei λ_2



(e) Arbeitszyklus bei λ_3



(f) Verzögerungszeit bei λ_3

Abbildung 5.27: Arbeitszyklus und Verzögerungszeit ändern sich bei verschiedenen Anknunftsraten λ_1 , λ_2 und λ_3 .

verschiedene Werte der Zykluszeit t_{si} . Auf der Abszisse ist der Parameter t_{t0} für die Zeitüberschreitung dargestellt. Je höher die Zykluszeit t_{si} ist, desto seltener muss ein Koordinator aktiv sein, um untergeordneten Knoten die Möglichkeit zur Übertragung zu geben. Die Folge ist ein geringerer Arbeitszyklus. Mit steigender Dauer t_{t0} muss hingegen ein höherer Arbeitszyklus erreicht werden. Da das Verhalten des Arbeitszyklus umgekehrt proportional zur Verzögerungszeit ist, verringert sich die Verzögerungszeit mit steigendem Arbeitszyklus (vgl. Abbildungen 5.27 (b), (d), (f)). Außerdem beeinflusst die Ankunftsrate λ den Arbeitszyklus und die Verzögerungszeit. Mit der Ankunftsrate erhöht sich auch der Arbeitszyklus. Durch die häufiger auftretenden Nachrichten sinkt die Wahrscheinlichkeit, dass für die Dauer t_{t0} keine Nachrichten in der Vermittlungsstation eintreffen. Dadurch wird die Dauer der aktiven Phase und damit der Arbeitszyklus erhöht.

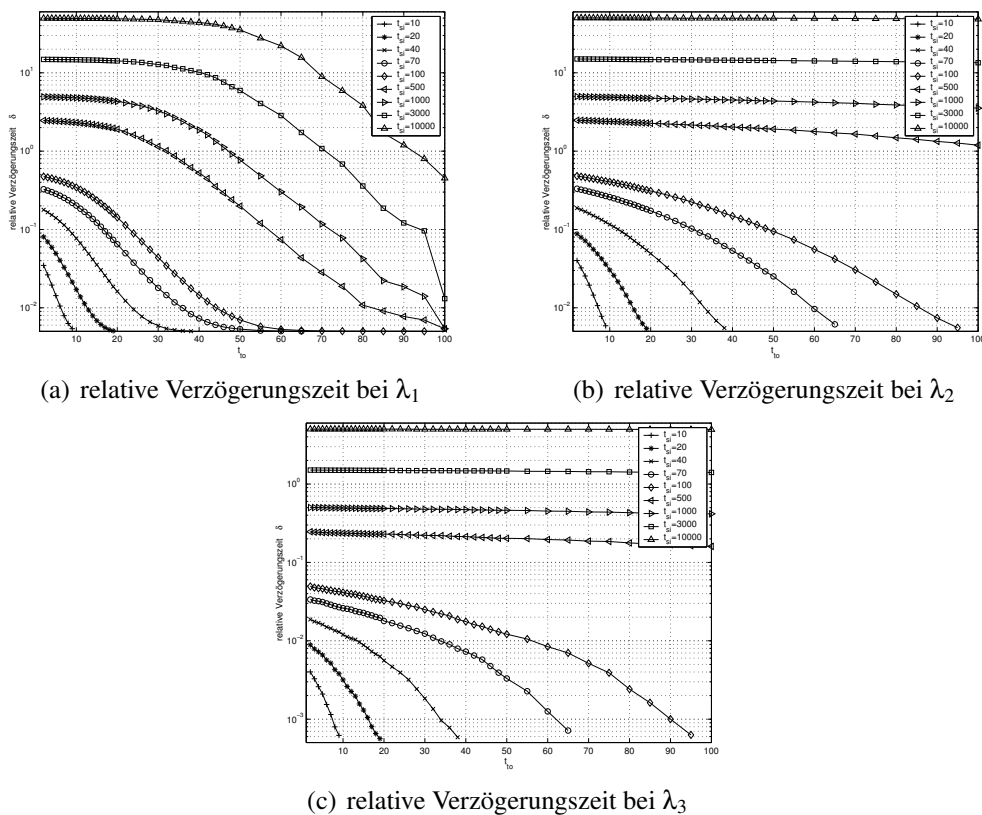


Abbildung 5.28: Im Gegensatz zu dem vorgeschlagenen Ansatz zur Arbeitszyklusanpassung ändert sich bei T-MAC die relative Verzögerungszeit bei verschiedenen Ankunftsraten λ_1 , λ_2 und λ_3 .

In den Abbildungen 5.28 (a) bis (c) sind ergänzend die relativen Verzögerungszeiten dargestellt. Sie entwickeln sich bei unterschiedlichen Ankunftsraten in verschiedener Weise. Bei geringen Ankunftsraten λ_2 und λ_3 unterscheiden sich die relativen Verzögerungszeiten um eine Größenordnung. Das Maß der relativen Verzögerungszeit

sagt damit nichts Allgemeines über das Verhalten des T-MAC-Ansatzes in Abhängigkeit von der Konfiguration aus.

5.5.2 Vergleich in dynamischem Szenario

Neben den simulativen Bewertungen zum statischen Vergleich wird in diesem Abschnitt der T-MAC-Ansatz auch in dynamischen Szenarien diskutiert. Die Ergebnisse des vorangegangenen Abschnittes legen nahe, dass die Parametrierung von T-MAC eng am Anwendungsfall ausgerichtet werden muss. Die relative Verzögerungszeit kann nicht als Hilfe zum Einstellen genutzt werden.

Gegenüber dem in Abschnitt 4.3 vorgestellten Ansatz zur Arbeitszyklusanpassung existieren bei T-MAC keine inneren Zustände, wie der Arbeitszyklus, die an die Verkehrscharakteristik anpassbar sind. Vielmehr entscheidet die Vermittlungsstation nach kurzfristiger Beobachtung des Verkehrs, ob sie die aktive Phase abbricht. Daher ist bei der dynamischen Analyse interessant, welche Zeit vergeht, bis der Arbeitszyklus bei gleichbleibender Parametrierung t_{si} und t_{to} einen veränderten mittleren Wert erreicht hat.

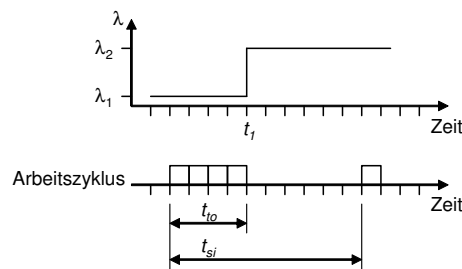


Abbildung 5.29: Ungünstigster Fall bei T-MAC

Der ungünstigste Fall tritt auf, wenn sich die Ankunftsrate kurz nach Eintreten in die passive Phase ändert. Ein Beispiel für diese Situation ist in Abbildung 5.29 dargestellt. Während der aktiven Phase ist für die Dauer t_{to} keine Nachricht zu beobachten. Daher bricht die Vermittlungsstation die aktive Phase ab. Der ungünstigste Fall tritt auf, wenn der Zeitpunkt zum Eintritt in die passive Phase mit dem Auftreten einer signifikant höheren Ankunftsrate zur Zeit t_1 zusammenfällt. Dann laufen ab dem Zeitpunkt t_1 mehr Nachrichten auf, die ein entfernter Sensorknoten in der Warteschlange speichern muss. Die Dauer, innerhalb der die Nachrichten mit der geänderten Ankunftsrate λ_2 gespeichert werden müssen, beträgt dann

$$t_{pass,max} = t_{si} - t_{to}. \quad (5.3)$$

Vorausgesetzt wird dabei, dass während der gesamten letzten aktiven Phase (Dauer t_{to}) keine Nachrichten an der Vermittlungsstation eintreffen. Innerhalb der passiven Phase

speichert der entfernte Sensorknoten dann

$$n_{\text{Nachrichten}} = t_{\text{pass,max}} \cdot \lambda_2 \quad (5.4)$$

Nachrichten in der Warteschlange. Diese Nachrichten kann der entfernte Sensorknoten erst ab dem Beginn der nächsten aktiven Phase an die Vermittlungsstation übertragen. Ab diesem Zeitpunkt wirkt auch der neue Arbeitszyklus. Die Vermittlungsstation tritt erst dann in die passive Phase ein, wenn für die Dauer von t_{t0} Zeiteinheiten keine Nachrichten eingetroffen sind. Dafür müssen zunächst alle Nachrichten aus der Warteschlange abgebaut sein.

Ein höheres Intervall t_{si} bedeutet, dass sich eine mögliche Arbeitszyklusänderung verzögert. Analog führt die Erhöhung des Parameters t_{t0} für die Zeitüberschreitung, zu einer verringerten maximalen passiven Phase (vgl. Gleichung (5.3)). In gleicher Weise wirken sich die Parameter t_{si} und t_{t0} auch auf die Anzahl der angesammelten Nachrichten in der Warteschlange aus (siehe Gleichung (5.4)).

5.5.3 Zusammenfassende Bewertung des Vergleichs zu T-MAC

Zum Vergleich mit dem in dieser Arbeit entwickelten Ansatz zur Arbeitszyklusanpassung wird auf die Abbildungen 5.10 und 5.11 (Seite 81) verwiesen. Die in diesen statischen Szenarien erreichten Arbeitszyklen bewegen sich in ähnlichen Bereichen wie bei dem vorliegenden T-MAC-Ansatz. Es existiert jedoch eine klare Abhängigkeit zwischen der Ankunftsrate, der Parametrierung und dem Arbeitszyklus bzw. der Verzögerungszeit. Diese Abhängigkeit kann durch das Maß der relativen Verzögerungszeit auf die Ankunftsrate normiert werden. Im Gegensatz dazu besteht bei dem T-MAC-Ansatz zwischen den Größen keine allgemeine Abhängigkeit. Für die Konfiguration des T-MAC-Ansatzes ist Wissen über die Verkehrscharakteristik erforderlich. Nur wenn der Bereich der Ankunftsrate abgeschätzt wird, können die Parameter t_{si} und t_{t0} entsprechend gesetzt werden. Der T-MAC-Ansatz realisiert also auch eine Anpassung des Arbeitszyklus, allerdings nicht proportional zur Ankunftsrate. Die Parametrierung beeinflusst das Verhalten wesentlich.

Im Vergleich zum Ansatz der schrittweisen Anpassung wird bei T-MAC der veränderte Arbeitszyklus mit der maximalen Verzögerung $t_{\text{pass,max}}$ unmittelbar nach der letzten passiven Phase vor Eintritt der Ankunftsratenänderung wirksam. Generell ist diese Geschwindigkeit der Anpassung, ähnlich wie bei der Anpassung des Arbeitszyklus, von der Parametrierung abhängig.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass sowohl mit der vorgestellten Anpassung als auch mit dem T-MAC-Ansatz der Arbeitszyklus an die Verkehrscharakteristik angepasst werden kann. Bei dem T-MAC-Ansatz ist allerdings keine proportionale

Abhängigkeit der relativen Verzögerungszeit von der Ankunftsrate festzustellen. Daher muss die Wirksamkeit für jedes Ankunftsratenszenario separat untersucht werden. Bei dem vorgestellten Ansatz zur Arbeitszyklusanpassung ist eine allgemeine Abhängigkeit der relativen Verzögerungszeit zu verzeichnen. Die relative Wirkung der Anpassung ist unabhängig von der Ankunftsrate.

6 Analytische Analyse

Im vorangegangenen Kapitel wurde der grundsätzliche Zusammenhang zwischen Arbeitszyklus, Verzögerungszeit und Warteschlangenlänge als die zentralen Kenngrößen der Leistungsfähigkeit diskutiert. Für die Bewertung wurden verschiedene Modelle aufgebaut und in Simulationen untersucht.

Wenn die Arbeitszyklusanpassung in der Praxis eingesetzt werden soll, müssen die Wirkungen der Anpassung bekannt sein. Da der mögliche Parameterraum im Rahmen dieser Arbeit nicht vollständig mit Simulationen abgedeckt werden kann, müsste ein Anwender erneut Modelle für die simulative Analyse aufbauen und mit Simulationen bewerten. Der Aufwand für die Planung erhöht sich damit. Daher sind einfacher zu handhabende Werkzeuge für die Abschätzung des späteren Verhaltens wünschenswert. In diesem Kapitel werden die Zusammenhänge zwischen der Arbeitszyklusanpassung und dem Übertragungssystem analytisch formuliert, um das Verhalten grob abzuschätzen. Der zu entwickelnde Ansatz soll den Anwender beim Einsatz der Arbeitszyklusanpassung unterstützen, um die spätere Wirkung im Zusammenspiel mit realen Ankunftsdaten zu bewerten.

Angelehnt an die Leistungsanalyse in Kapitel 5 wird das Verhalten hinsichtlich statischer und dynamischer mittlerer Ankunftsdaten analysiert. In Abschnitt 6.1 wird ein MARKOW-Modell benutzt, um das statische Verhalten zu analysieren. Die Ergebnisse werden mit Resultaten aus Simulationen verglichen. Anschließend wird in Abschnitt 6.2 das dynamische Verhalten mit Differenzgleichungen modelliert und wiederum mit den Ergebnissen der Simulationen verglichen [NPK06].

6.1 MARKOW-Modell

Das Ziel des MARKOW-Modells ist es, basierend auf Wahrscheinlichkeiten das stationäre Verhalten zu analysieren. Dafür wird im analytischen Modell eine vereinfachende Annahme getroffen: der Arbeitszyklus kann nur dann verändert werden, wenn die empfangenen Nachrichten über die vollständige Anzahl Beobachtungsintervalle n_m aufgezeichnet wurden. Im Gegensatz dazu kann der Arbeitszyklus im vorgeschlagenen Ansatz (Algorithmus 1, Seite 54) unmittelbar nachdem der obere Schwellwert h_u überschritten wurde,

geändert werden. Für die Analyse des stationären Verhaltens bei gleichbleibender mittlerer Ankunftsrate wird diese Eigenschaft vernachlässigt. Bei der Analyse des dynamischen Verhaltens in den Differenzgleichungen (Abschnitt 6.2) wird sie berücksichtigt.

6.1.1 Herleitung des MARKOW-Modells

Zunächst ist der eigentlichen Modellierung voranzustellen, dass jedem Modell ein Satz von Szenarien zugeordnet wird. Ein Szenario wird dabei durch eine Menge von Parametern bestimmt. In der vorliegenden statischen Analyse sind das die mittlere Ankunftsrate λ sowie die dem Algorithmus zur Anpassung inhärenten Parameter h_l , h_u und n_m . Diese Parameter bleiben innerhalb eines Szenarios konstant. Um analog zur Darstellung in den Abschnitten 5.3 und 5.4 verschiedene Szenarien zu berechnen, werden dann unterschiedliche Parametersätze zur Analyse herangezogen.

Das Ziel der Analyse des statischen Falls besteht darin, ein Wahrscheinlichkeitsmodell abzuleiten und daraus die stationäre Verteilung zu bestimmen. Dieses Wahrscheinlichkeitsmodell wird im Folgenden mit einer MARKOW-Kette (siehe z. B. Buchholz [BDMC⁺94]), insbesondere einer zeitdiskreten MARKOW-Kette, modelliert. Eine zeitdiskrete MARKOW-Kette wird durch eine Menge von Zuständen $S = \{s_1, s_2, \dots\}$ und Wahrscheinlichkeiten für die Übergänge p_{ij} von einem Zustand s_i zu einem Zustand s_j zu diskreten Zeitpunkten bestimmt. In Abbildung 6.1 ist die entsprechende MARKOW-Kette dargestellt. Mit dem Modell kann das Verhalten des Algorithmus in der Vermittlungsstation basierend auf Mittelwerten analysiert werden.

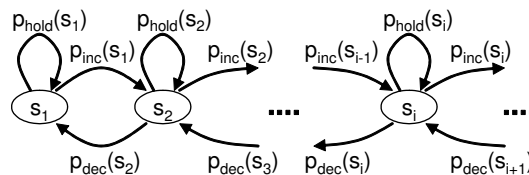


Abbildung 6.1: Das Modell für die statische Analyse wird mit einer MARKOW-Kette aufgebaut.

Im dargestellten Modell steht jeder Zustand s_i für die Länge eines Zeitschlitzintervalls der Länge i (vgl. generisches zeitliches Modell in Abbildung 5.2). Innerhalb des Zeitschlitzintervalls wird der erste Zeitschlitz für die aktive Phase reserviert. In dem verwendeten Modell sind nur Zustände mit $i \geq 1$ zulässig, da das minimale Zeitschlitzintervall 1 beträgt. Der einem Zustand s_i entsprechende Arbeitszyklus wird mit $d = 1/i$ berechnet. Dadurch ergibt sich bei $i \geq 1$ ein Arbeitszyklus von $d \leq 100\%$. Wird beispielsweise der Zustand mit $i = 5$ analysiert, lässt sich der entsprechende Arbeitszyklus mit $d = 1/5 = 20\%$ berechnen.

Um die vollständige MARKOW-Kette abzuleiten, müssen die Wahrscheinlichkeiten, dass ein Zustand in Richtung s_{i+1} bzw. s_{i-1} verlassen wird, bestimmt werden. Im vorliegen-

den Modell bezeichnet $p_{inc}(s_i)$ die Wahrscheinlichkeit für das Verlassen eines Zustandes s_i hin zu einem Zustand s_{i+1} mit einem größeren Zeitschlitzintervall. Die Wahrscheinlichkeit $p_{inc}(s_i)$ entspricht dabei der Wahrscheinlichkeit, dass innerhalb der letzten n_m aktiven Phasen (Beobachtungsintervalls t_{mon}) weniger als h_l Nachrichten an der Vermittlungsstation eintrafen. Entsprechend bezieht sich die Wahrscheinlichkeit $p_{dec}(s_i)$ darauf, dass die Vermittlungsstation innerhalb von t_{mon} mehr als h_u Nachrichten empfangen hat. Mit $p_{hold}(s_i)$ wird die Wahrscheinlichkeit für das Verbleiben im Zustand s_i bezeichnet.

Die Dauer des Beobachtungsintervalls $t_{mon}(s_i)$ ist für beliebige i unterschiedlich, da sie direkt von der Dauer des Zeitschlitzintervalls abhängt. Damit müssen die Wahrscheinlichkeiten $p_{inc}(s_i)$, $p_{dec}(s_i)$ und $p_{hold}(s_i)$ in Abhängigkeit vom jeweiligen Zustand s_i formuliert werden. Die zustandsabhängige Beobachtungsdauer ergibt sich aus

$$t_{mon}(s_i) = n_m \cdot i, \quad (6.1)$$

wobei vorausgesetzt wird, dass der Zustand s_i innerhalb von t_{mon} konstant bleibt. Wird beispielsweise eine Ankunftsrate von $\lambda = 0,1$ Nachrichten pro Zeiteinheit angenommen, kommt im Mittel innerhalb von 10 Zeiteinheiten eine Nachricht an, wenn die Nachrichtankünfte einer POISSON-Verteilung folgen. Unter der Annahme einer konstanten mittleren Ankunftsrate kommen damit innerhalb des Beobachtungsintervalls $t_{mon}(s_i) = n_m \cdot i$ weniger Nachrichten als innerhalb von $t_{mon}(s_{i+1}) = n_m \cdot (i+1)$ an, da $t_{mon}(s_i) < t_{mon}(s_{i+1})$ gilt.

Um die Wahrscheinlichkeiten $p_{inc}(s_i)$, $p_{dec}(s_i)$ und $p_{hold}(s_i)$ für alle i zu bestimmen, muss die Vermittlungsstation die mittlere Anzahl der empfangenen Nachrichten innerhalb der Dauer der Beobachtung des Verkehrs ($t_{mon}(s_i)$) ermitteln. Die Wahrscheinlichkeit $p_{inc}(s_i)$ ist von der Ankunftsrate λ , der Dauer des Beobachtungsintervalls $t_{mon}(s_i)$ und der unteren Schranke h_l abhängig. Da die Ankünfte der POISSON-Verteilung folgen, können die genannten Parameter in die Verteilungsfunktion eingesetzt werden.

$$p_{inc}(\lambda, t_{mon}(s_i), h_l) = e^{-\lambda t_{mon}(s_i)} \sum_{n=0}^{h_l} \frac{(\lambda t_{mon}(s_i))^n}{n!} \quad (6.2)$$

Mit Gleichung (6.2) kann die Wahrscheinlichkeit berechnet werden, mit der innerhalb des zustandsabhängigen Beobachtungsintervalls $t_{mon}(s_i)$ die Anzahl der Nachrichten kleiner oder gleich h_l ist, wobei die Nachrichten mit der mittleren Ankunftsrate λ eintreffen.

Analog dazu ergibt sich die Wahrscheinlichkeit $p_{hold}(s_i)$, dass keine Zustandsänderung eintritt, durch:

$$p_{hold}(\lambda, t_{mon}(s_i), h_l, h_u) = e^{-\lambda t_{mon}(s_i)} \sum_{n=h_l+1}^{h_u-1} \frac{(\lambda t_{mon}(s_i))^n}{n!} \quad (6.3)$$

Wiederum beruht Gleichung (6.3) auf der POISSON-Verteilung. Sie beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass innerhalb des Beobachtungsintervalls $t_{mon}(s_i)$ mindestens $h_l + 1$ und maximal $h_u - 1$ Nachrichten an der Vermittlungsstation eintreffen.

Es verbleibt noch die Wahrscheinlichkeit $p_{dec}(s_i)$, dass der Arbeitszyklus erhöht werden muss. Sie wird mit

$$p_{dec}(s_i) = 1 - p_{inc}(s_i) - p_{hold}(s_i) \quad (6.4)$$

berechnet. Da s_1 in diesem Modell der geringste mögliche Zustand ist, existiert keine Wahrscheinlichkeit $p_{dec}(s_1)$ für die Erhöhung des Arbeitszyklus aus s_1 heraus. Für diesen Fall wird nur $p_{inc}(s_1)$ berechnet und anschließend für die Berechnung von $p_{hold}(1) = 1 - p_{inc}(1)$ verwendet.

Mit den genannten Wahrscheinlichkeiten kann die quadratische Matrix \mathbf{P} für die Wahrscheinlichkeiten der Zustandsübergänge der zeitdiskreten MARKOW-Kette aus Abbildung 6.1 wie folgt gebildet werden:

$$\mathbf{P} = \left\{ \begin{array}{cccc} p_{hold}(s_1) & p_{inc}(s_1) & 0 & \cdots \\ p_{dec}(s_2) & p_{hold}(s_2) & p_{inc}(s_2) & \\ 0 & p_{dec}(s_3) & p_{hold}(s_3) & \\ \vdots & & \ddots & \ddots \end{array} \right\}. \quad (6.5)$$

Durch die allgemeine Modellierung ist zunächst ein unendlich großer Zustandsraum vorhanden, es gibt kein Maximum für die Anzahl der Zustände S . Damit besitzt auch die Matrix \mathbf{P} unendlich viele Zeilen und Spalten. Für die konkrete Berechnung des stationären Zustandes wird hier zuerst der maximal relevante Zustand $s_{i,max}$ bestimmt. Er hängt eng mit der maximal möglichen Beobachtungsdauer $t_{mon}(s_{i,max})$ zusammen, innerhalb der die maximal relevante Anzahl von Nachrichten eintrifft. Die maximal mögliche Beobachtungsdauer wird in dieser Arbeit mit der folgenden Gleichung abgeschätzt:

$$t_{mon}(s_{i,max}) = \frac{h_{l,max}}{\lambda n_m} \cdot f_{sec}. \quad (6.6)$$

Die Variable f_{sec} drückt dabei einen Sicherheitsfaktor aus und wird auf $f_{sec} = 2$ gesetzt. Unter der Annahme von $h_{l,max} \approx 40$ für die untere Schranke, $\lambda \approx 0,01$ und $n_m \approx 10$ ergibt sich $t_{mon}(s_{i,max}) \approx 800$. Das entspricht einem Arbeitszyklus von $d_{min} \approx 0,125\%$ als eine untere anzunehmende Schranke und einem maximalen relevanten Zustand $s_{i,max} = 80$. Vergleiche mit Abbildung 5.10 (a) zeigen, dass die geschätzte untere Schranke d_{min} eine angemessene Annahme darstellt. Der Arbeitszyklus für $\lambda = 0,01$ (obere Kurvenschar in Abbildung 5.10 (a)) bleibt mit $d > 0,003$ deutlich über der abgeschätzten Schranke d_{min} .

Anschließend wird der Vektor π für die stationären Zustandswahrscheinlichkeiten

$$\pi = (\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{i,max})^T \quad (6.7)$$

berechnet. Ein Vektor von Zustandswahrscheinlichkeiten kann als stationär bezeichnet werden, wenn

$$\pi^T \mathbf{P} = \pi^T \quad (6.8)$$

für das entsprechende MARKOW-Modell gilt. Bei gegebener Matrix \mathbf{P} der Übergangswahrscheinlichkeiten ergibt sich π als ein linker Eigenwert von \mathbf{P} (siehe Langrock [LJ79]). Da die Summe aller Wahrscheinlichkeiten in π der Bedingung

$$\sum_{j=1}^{i_{max}} \pi_j = 1 \quad (6.9)$$

genügen muss, ist der Vektor noch entsprechend zu normieren [LJ79]. Abschließend kann der im Mittel erreichte Zustand mit

$$\pi_{mean} = \sum_{j=1}^{i_{max}} j \pi_j \quad (6.10)$$

bestimmt werden. Dieser Wert sagt für eine bestimmte Konfiguration (h_l, h_u, n_m) und ein Szenario für die Ankunftsrate aus, welcher mittlere Zustand s_j bei der Anpassung der Ankunftsrate erreicht wird.

Die maximale Verzögerungszeit ist eng mit dem Arbeitszyklus verknüpft und kann daher aus der vorangegangenen Analyse abgeleitet werden. Sie ergibt sich aus der Dauer der passiven Phase, der Zeit innerhalb der keine Nachrichten übertragen werden können. Da der Arbeitszyklus durch

$$d = \frac{t_{act}}{t_{act} + t_{pass}} \quad (6.11)$$

berechnet wird, ergibt sich die Dauer der passiven Phase aus

$$t_{pass} = \frac{t_{act}(1-d)}{d}. \quad (6.12)$$

In den simulativen Analysen hat sich gezeigt, dass die Warteschlange innerhalb eines Sensor-knotens im Bereich geringerer Schwellwerte nur eine geringe Anzahl Nachrichten speichert (Abbildungen 5.8 (a) und (b)). Der Kanal wird nur wenig ausgelastet. Daher kann die maximale Verzögerungszeit mit der Dauer der passiven Phase angenähert werden.

In Abschnitt 6.3.1 wird dargestellt, in welcher Weise ein Anwender die analytische Analyse für die Abschätzung verwenden kann. Ausgehend von den allgemeinen Anforderungen kann er damit die Leistungsfähigkeit der Anpassung bewerten, ohne aufwändige Simulationsmodelle aufbauen zu müssen.

6.1.2 Validierung des MARKOW-Modells

Aus Abschnitt 5.3 liegen bereits Ergebnisse zum stationären Verhalten der Anpassung des Arbeitszyklus vor. Hier werden sie benutzt, um in Vergleichen mit Ergebnissen

der analytischen Analyse die Eignung des Modells zu prüfen. Zum Vergleich werden die Verläufe des Arbeitszyklus bei verschiedenen Konfigurationen der Schwellwerte ($1 \leq h_l < h_u \leq 20$) herangezogen. Die Anzahl der Beobachtungsintervalle wird einheitlich auf $n_m = 10$ gesetzt. Für den Vergleich werden Szenarien mit zwei verschiedenen Ankunftsraten ($\lambda = \{0,1; 0,01\}$) angenommen.

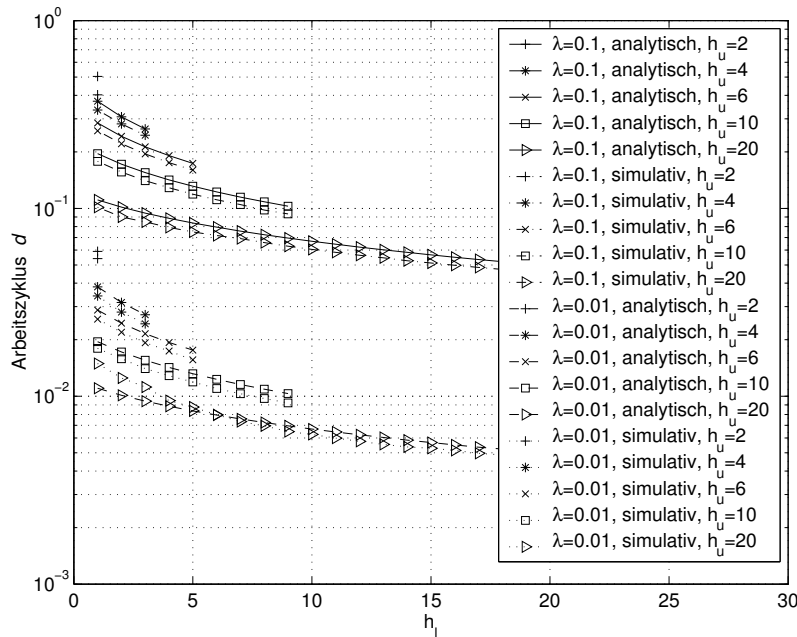


Abbildung 6.2: Mit den Ergebnissen der Analyse des MARKOW-Modells lassen sich die mittleren Arbeitszyklen bei verschiedenen Ankunftsraten und Konfigurationen abschätzen.

In Abbildung 6.2 sind die Verläufe der analytischen und simulativen Analyse dargestellt. Die obere bzw. untere Kurvenschar zeigt die Ergebnisse für $\lambda = 0,1$ bzw. $\lambda = 0,01$ Nachrichten pro Zeiteinheit. Die analytische Analyse liefert annähernd die gleichen Verläufe wie die Simulation. Die Ergebnisse weisen nur geringe Abweichungen auf. Die wesentlichen Aussagen werden dadurch nicht beeinflusst.

6.2 Differenzgleichungen im dynamischen Fall

Das dynamische Verhalten wird mit Differenzgleichungen modelliert. Durch sie kann eine Folge rekursiv definiert werden. Ein einzelnes Folgeglied ergibt sich dabei aus einer funktionalen Abhängigkeit zu den vorangegangenen Folgegliedern [Unb90].

$$x_n = f(x_{n-1}, x_{n-2}, \dots, x_1, x_0) \quad (6.13)$$

Gleichung (6.13) gibt den allgemeinen Zusammenhang dieser rekursiven Abhängigkeit wieder. In dem vorliegenden Teil der Arbeit wird das Konzept der Differenzengleichung auf die Arbeitszyklusanpassung übertragen.

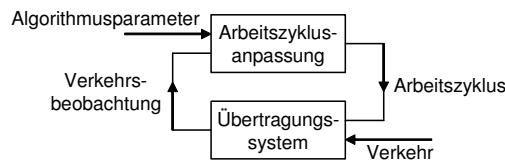


Abbildung 6.3: Die Arbeitszyklusanpassung und das Übertragungssystem sind durch die Arbeitszykluseinstellung und die Verkehrsbeobachtung miteinander gekoppelt. Zusätzlich wird ihr Verhalten durch die Parametrierung und den eintreffenden Verkehr beeinflusst.

In Abbildung 6.3 wird der allgemeine Zusammenhang zwischen der Arbeitszyklusanpassung und dem Übertragungssystem wiedergegeben. Je nach der Parametrierung des Algorithmus und dem beobachteten Verkehr wird der Arbeitszyklus eingestellt. Dieser Arbeitszyklus wirkt gemeinsam mit dem eintreffenden Verkehr auf das Übertragungssystem. Dadurch ist ein bestimmter Verkehr zu beobachten. Dieses Modell dient als Grundlage für die Analyse des Zusammenhangs in dynamischen Szenarien.

Im folgenden Abschnitt werden die Differenzengleichungen für die dynamische Analyse erarbeitet. Anschließend wird in Abschnitt 6.2.2 anhand von Vergleichen mit Simulationen gezeigt, dass das Modell für die dynamische Analyse geeignet ist.

6.2.1 Herleitung der Differenzengleichungen

Die abzuleitenden Differenzengleichungen werden in dieser Arbeit als eine Rechenvorschrift genutzt, um den Verlauf der relevanten Größen (Ausgangsgrößen) bei bestimmten Gegebenheiten der Umgebung (Eingangsgrößen) nachzubilden. Als Ausgangsgrößen wird hier der Arbeitszyklus in Abhängigkeit von der Zeit $d(t)$ verstanden. Eingangsgröße ist die mittlere, zeitlich veränderliche Ankunftsrate $\lambda(t)$. Wie bei der Analyse im statischen Szenario (zeitlich konstante Ankunftsrate $\lambda(t)$) beeinflusst die Konfiguration des Anpassungsalgorithmus das Verhalten des Systems. Daher werden h_l , h_u und n_m ebenfalls berücksichtigt.

Im ersten Schritt der Modellierung muss eine Sequenz gefunden werden, die mit Hilfe von Differenzengleichungen zu formulieren ist. In Abbildung 6.4(a) ist ein Beispiel für den Verlauf des Arbeitszyklus in Abhängigkeit von der Zeit $d(t)$ dargestellt. Die Zeit Δt zwischen dem k -ten und dem $(k+1)$ -ten aufgezeichneten Arbeitszykluswert hängt direkt vom k -ten Wert ab, da die Zeit zwischen zwei aktiven Phasen umgekehrt proportional zum Arbeitszyklus ist. Wird beispielsweise im k -ten Arbeitszyklus $d = 20\%$ berechnet,

verstreichen vier Zeitschlitze nach Ende der aktiven Phase, bis die nächste aktive Phase beginnt. Das Zeitschlitzintervall beträgt in diesem Fall 5 Zeitschlitze.

Für die Analyse der über den Arbeitszyklus vorliegenden Zeitreihe (Abbildung 6.4(a)) wird sie in zwei voneinander abhängige Zeitreihen aufgeteilt. Die erste Zeitreihe beschreibt den Verlauf des Arbeitszyklus über dem Index k und ist in Abbildung 6.4(b) dargestellt. Sie ist mit der zweiten, in Abbildung 6.4(c) dargestellten Zeitreihe für die Zeitschlitzintervalldauer verknüpft. Jedem Arbeitszykluswert wird über den Index k genau eine Zeitschlitzintervalldauer zugeordnet.

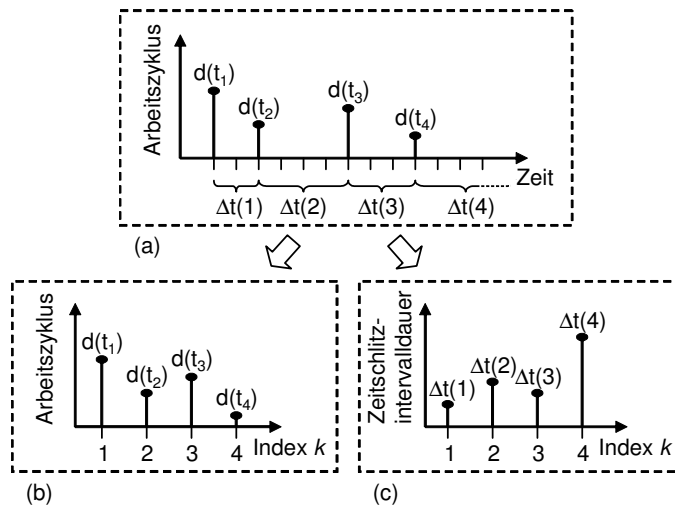


Abbildung 6.4: Die ursprüngliche Reihe des zeitabhängigen Arbeitszyklus $d(t)$ wird in zwei voneinander abhängige Zeitreihen $d(k)$ und $\Delta t(k)$, die vom Index k abhängen, überführt.

Diese beiden Zeitreihen dienen als Basis, um den Arbeitszyklus d und die Zeitschlitzintervalldauer Δt in Abhängigkeit vom Index k zu formulieren. Analog zu Gleichung (6.13) kann allgemein festgestellt werden, dass der $(k+1)$ -te Wert für die Zeitschlitzintervalldauer von den vorangegangenen Werten abhängt.

$$\Delta t(k+1) = g(\Delta t(k), \Delta t(k-1), \Delta t(k-2), \dots) \quad (6.14)$$

Vereinfacht formuliert, kann diese Beziehung durch eine Menge von inneren Zuständen und den vorangegangenen Wert Δt für die Zeitschlitzintervallgröße dargestellt werden. Diese Überlegung führt zu drei Basisgleichungen, die der Ausgangspunkt für die weitere Entwicklung der Differenzgleichungen sind:

$$\Delta t(k+1) = \Delta t(k) + f(c(k), n_r(k+1), i(k)) \quad (6.15)$$

$$t(k+1) = t(k) + \Delta t(k) \quad (6.16)$$

$$d(k+1) = \frac{1}{\Delta t(k+1)} \quad (6.17)$$

Die Zeitschlitzintervalldauer $\Delta t(k+1)$ (Gleichung (6.15)) ist vom vorangegangenen Wert $\Delta t(k)$ und von der Arbeitszyklusänderung $f(c(k), n_r(k+1), i(k))$ abhängig. Letztere hängt von drei inneren Zuständen ab: erstens von der Anzahl der Nachrichten $c(k)$, die seit der letzten Entscheidung über den Arbeitszyklus eingetroffen sind, zweitens von der Anzahl der Nachrichten $n_r(k+1)$, die in der aktuellen aktiven Phase eintrafen und drittens von der Anzahl $i(k)$ der bis zur vorangegangenen aktiven Phase beobachteten Zeitschlitzintervalle. Diese drei Zustände werden im Folgenden beschrieben. In Gleichung (6.16) wird die absolute Zeit bei Index $k+1$ aus der vorangegangenen Zeit und der letzten Zeitschlitzintervalldauer berechnet. Schließlich wird mit Gleichung (6.17) der resultierende aktuelle Arbeitszyklus aus der neu berechneten Zeitschlitzintervalldauer bestimmt.

Die Änderung der Zeitschlitzintervalldauer $f(\cdot)$ kann berechnet werden, indem die Entscheidung zur Arbeitszyklusänderung (siehe Zeilen 10-24 in Algorithmus 1, Seite 54) in Form von Differenzgleichungen formuliert wird. Gleichung (6.18) bildet diesen Zusammenhang durch eine Fallunterscheidung ab.

$$f(c(k), n_r(k+1), i(k)) = \begin{cases} -1 & \text{falls } c(k) + n_r(k+1) \geq h_u \\ 1 & \text{falls } (i(k) + 1 = n_m) \\ & \wedge (c(k) + n_r(k+1) \leq h_l) \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (6.18)$$

Der erste Fall der rechten Seite beschreibt die Situation, dass das Zeitschlitzintervall um einen Zeitschlitz vermindert ($f(\cdot) = -1$) und damit der Arbeitszyklus erhöht wird. Er tritt ein, wenn die Summe der Nachrichten seit der letzten Entscheidung über den Arbeitszyklus $c(k)$ und die Nachrichten aus der aktuellen aktiven Phase $n_r(k+1)$ größer oder gleich der oberen Schwelle h_u ist. Wenn diese Summe ($c(k) + n_r(k+1)$) kleiner als die untere Schwelle h_l und gleichzeitig das festgelegte Beobachtungsintervall erreicht ist ($i(k) + 1 = n_m$), dann wird der Arbeitszyklus vermindert, indem die Zeitschlitzintervalldauer erhöht wird ($f(\cdot) = 1$). Tritt keiner der beiden genannten Fälle ein, bleibt der Arbeitszyklus unverändert ($f(\cdot) = 0$).

Die Anzahl der aktuellen, seit der letzten Arbeitszyklusänderung eingetroffenen Nachrichten $c(k+1)$ wird auf 0 zurückgesetzt (vgl. Zeile 12 und 19 in Algorithmus 1, Seite 54), wenn der Arbeitszyklus in der aktuellen aktiven Phase geändert werden soll (erster Fall in Gleichung (6.19)). Ansonsten wird die Anzahl der bisherigen und der in der aktuellen aktiven Phase eingetroffenen Nachrichten summiert.

$$c(k+1) = \begin{cases} 0 & \text{falls } (c(k) + n_r(k+1) \geq h_u) \\ & \vee (i(k+1) = n_m) \\ c(k) + n_r(k+1) & \text{sonst} \end{cases} \quad (6.19)$$

Die Bedingung des ersten Falles in Gleichung (6.19) ist erfüllt, wenn die Nachrichtenzahl die obere Schwelle überschreitet ($c(k) + n_r(k+1) \geq h_u$) oder das Beobachtungsintervall abgelaufen ist ($i(k+1) = n_m$). Andernfalls wird die Anzahl der aktuell empfangenen Nachrichten addiert ($c(k) + n_r(k+1)$).

Wenn innerhalb des letzten Zeitschlitzintervalls keine Änderung der Ankunftsrate aufgetreten ist (erster Fall in Gleichung (6.20)), wird die Anzahl der neu eingetroffenen Nachrichten $n_r(k+1)$ aus dem Produkt der derzeitigen mittleren Ankunftsrate $\lambda(t(k+1))$ und der letzten Zeitschlitzintervalldauer $\Delta t(k)$ berechnet.

$$n_r(k+1) = \begin{cases} \Delta t(k) \cdot \lambda(t(k+1)) & \text{falls } \lambda(t(k)) = \lambda(t(k+1)) \\ n_c(k+1) & \text{falls } \lambda(t(k)) \neq \lambda(t(k+1)) \end{cases} \quad (6.20)$$

Ändert sich während des letzten Zeitschlitzintervalls $\Delta t(k)$ die Ankunftsrate λ , müssen diese Änderungen bei der Berechnung von $n_r(k+1)$ berücksichtigt werden. Dieser Fall wird durch die zweite Bedingung in Gleichung (6.20) ausgedrückt.

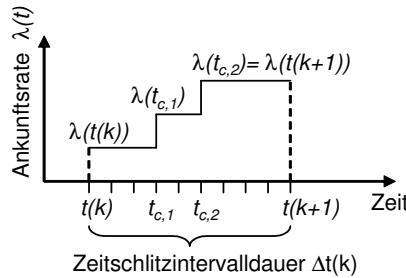


Abbildung 6.5: Während eines Zeitschlitzintervalls können Änderungen der Ankunftsrate auftreten und müssen bei der Berechnung von $n_c(k+1)$ berücksichtigt werden. Die Anzahl $n_c(k+1)$ entspricht dem Integral unter der Kurve $\lambda(t)$.

Ein Beispiel dafür ist in Abbildung 6.5 dargestellt. Dort wird nur der Zeitraum $\Delta t(k)$ betrachtet. Die Anzahl $n_c(k+1)$ muss durch das Integral unter der Kurve $\lambda(t)$ für den Zeitraum zwischen $t(k)$ und $t(k+1)$ mit

$$n_c(k+1) = (t_{c,1} - t(k))\lambda(t(k)) + \sum_{l=2}^j (t_{c,l} - t_{c,l-1})\lambda_{l-1} + (t(k+1) - t_{c,j})\lambda(t(k+1)) \quad (6.21)$$

berechnet werden. Dabei wird angenommen, dass innerhalb von $\Delta t(k)$ die Ankunftsrate j mal geändert wird. Abschnittsweise wird dann das Integral berechnet und in $n_c(k+1)$ akkumuliert.

Schließlich muss für die vollständige Berechnung der Gleichung (6.18) noch die Differenzgleichung für die Anzahl der beobachteten Zeitschlitzintervalle $i(k)$ formuliert werden. Ebenso wie in Gleichung (6.19) sind zwei Fälle zu unterscheiden.

$$i(k+1) = \begin{cases} 0 & \text{falls } (c(k) + n_r(k+1)) \geq h_u \\ & \vee (i(k+1) = n_m) \\ i(k) + 1 & \text{sonst} \end{cases} \quad (6.22)$$

Wurde die obere Schwelle h_u überschritten oder ist die Beobachtungsdauer abgelaufen (erster Fall), dann wird der Zähler $i(k+1)$ zurückgesetzt. Ansonsten wird der Zähler $i(k)$ um eins inkrementiert (zweiter Fall).

Die abgeleiteten Differenzgleichungen (6.18) bis (6.22) sind in die Gleichung (6.15) einzusetzen. Damit steht ein analytisches Werkzeug zur Verfügung, um bei gegebener Konfiguration des Anpassungsalgorithmus (h_l , h_u und n_m) das zeitliche Verhalten des Arbeitszyklus bei einem bestimmten Verlauf der Ankunftsrate $\lambda(t)$ zu bestimmen. Für die grobe Leistungsbewertung des Anpassungsalgorithmus sind keine Simulationen mehr erforderlich.

Der Abschnitt 6.3.2 stellt eine Handlungsanweisung vor, in der beschrieben wird, wie das vorgestellte analytische Modell für die Leistungsanalyse eingesetzt werden kann. Der Anwender wird damit von dem Aufbau aufwändiger Simulationsmodelle entbunden und kann die Leistungsfähigkeit der Arbeitszyklusanpassung schneller abschätzen.

6.2.2 Validierung der Differenzgleichungen

Analog der Validierung in Abschnitt 6.1.2 wird auch das dynamische Modell mit Ergebnissen der simulativen Analyse verglichen. Mit den Gleichungen (6.15), (6.16) und (6.17) wird deshalb der Verlauf des Arbeitszyklus berechnet und in den folgenden drei Szenarien den Simulationen gegenübergestellt:

- Entwicklung des Arbeitszyklus beginnend bei $d = 50\%$ und einer konstanten Ankunftsrate $\lambda_1 = 0,1$ bzw. $\lambda_2 = 0,01$ Nachrichten pro Zeiteinheit (Abbildung 6.6(a));
- Entwicklung des Arbeitszyklus, ausgehend von einem eingeschwungenen Zustand bei $\lambda_1 = 0,01$ für $t < 0$ nach einem Sprung der Ankunftsrate auf $\lambda_2 = 0,1$ bzw. $\lambda_3 = 1$ bei $t = 0$ (Abbildung 6.6(b)); und
- Entwicklung des Arbeitszyklus, ausgehend von einem eingeschwungenen Zustand bei $\lambda = 0,01$ für $t < 0$ nach einer Änderung auf $\lambda = 0,1$ in Form einer integrierten Rechteckfunktion (Rampenfunktion), beginnend bei $t = 0$ bis t_e (Abbildung 6.6(c)).

Im Abschnitt 5.4 wurde zusätzlich das Verhalten bei burst-artiger Änderung der Ankunftsrate untersucht. Da ein Burst eine Zusammensetzung aus dem ersten und dem zweiten zu untersuchenden Fall (Abbildungen 6.6 (a) und (b)) ist, wird burst-artiger Verkehr für den Vergleich der analytischen mit der simulativen Analyse nicht herangezogen.

In den Szenarien werden wie in Abschnitt 5.4.1 unterschiedliche Konfigurationen der Parameter untersucht. Wiederum kann nur eine ausgewählte Anzahl an Konfigurationen in Betracht gezogen werden. Die Konfigurationen $h_l = 3$ und $h_u = 5$ sowie $h_l = 10$ und $h_u = 15$ werden dafür eingesetzt. Die Anzahl der beobachteten Intervalle ist konstant bei $n_m = 10$. Nachrichtenverluste treten innerhalb der Szenarien nicht auf.

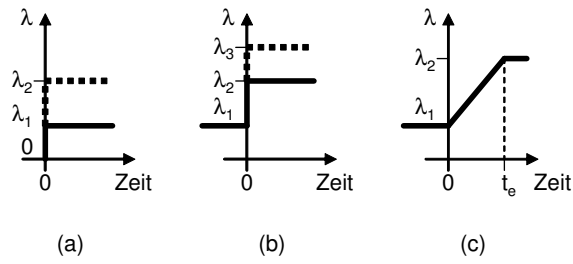
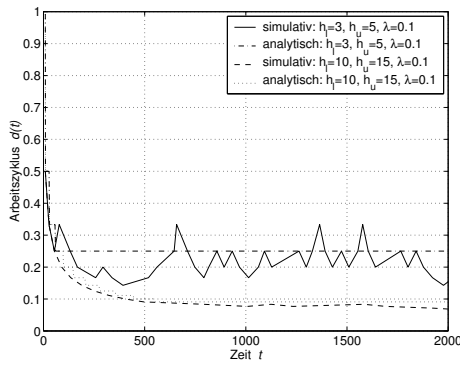
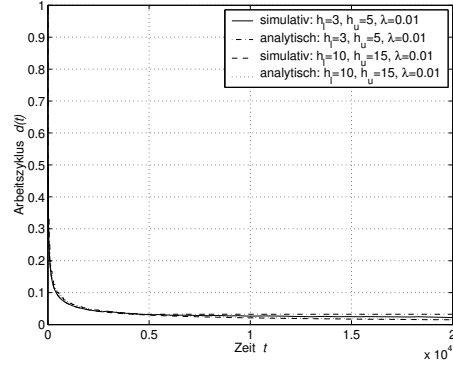


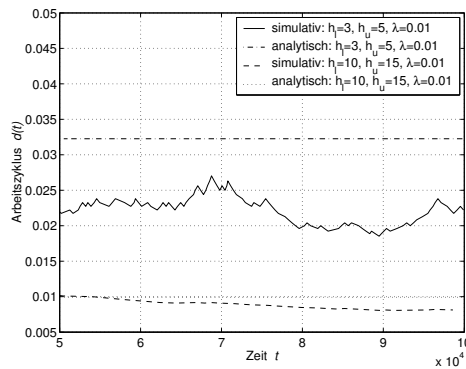
Abbildung 6.6: Drei verschiedene Szenarien werden für die Validierung im dynamischen Fall angenommen: (a) Beginn der Anpassung, (b) Sprung der Ankunftsrate von einer geringen auf eine hohe Ankunftsrate, (c) Änderung der Ankunftsrate in Form einer Rampenfunktion.



(a) Arbeitszyklus bei Beginn mit λ_1



(b) Arbeitszyklus bei Beginn mit λ_2



(c) Arbeitszyklus bei Beginn mit λ_2 (vergrößert)

Abbildung 6.7: Durch die Ergebnisse der analytischen Analyse bei Beginn der Arbeitszyklusanpassung mit verschiedenen Ankunftsraten und Konfigurationen können die Simulationsergebnisse abgeschätzt werden.

Zunächst wird das Verhalten bei Beginn der Anpassung und verschiedenen Ankunftsraten, $\lambda_1 = 0,1$ und $\lambda_2 = 0,01$ Nachrichten pro Zeiteinheit, untersucht. Das Verhalten des Arbeitszyklus bei Beginn mit der Ankunftsrate $\lambda_2 = 0,1$ Nachrichten pro Zeiteinheit ist in Abbildung 6.7 (a) dargestellt. Die simulativen Ergebnisse (durchgezogene bzw. gestrichelte Linie) wurden aus den Untersuchungen im Abschnitt 5.4.1 übernommen. Die Größenordnungen bei den analytischen Verläufen des Arbeitszyklus stimmen mit den simulativen Ergebnissen bei beiden Konfigurationen überein.

Ähnlich wie bei der Anpassung auf die Ankunftsrate λ_2 verhalten sich die Ergebnisse im Fall der Anpassung bezüglich der Ankunftsrate $\lambda_1 = 0,01$ Nachrichten pro Zeiteinheit. Die Ergebnisse für die ersten 20.000 Zeiteinheiten sind in Abbildung 6.7 (b) dargestellt. Analog zur Abbildung 5.18 (b) wird in Abbildung 6.7 (c) der Zeitraum von 50.000 bis 100.000 Zeiteinheiten vergrößert dargestellt. Die strichpunktierte Linie bei $d \approx 0,032$ bzw. punktierte Linie bei $d \approx 0,01$ stellen die Ergebnisse der analytischen Analyse für die erste und zweite Konfiguration dar. Bei der ersten Konfiguration weichen die Ergebnisse um ca. 20% ab, die Größenordnung des erreichten Arbeitszyklus stimmt überein.

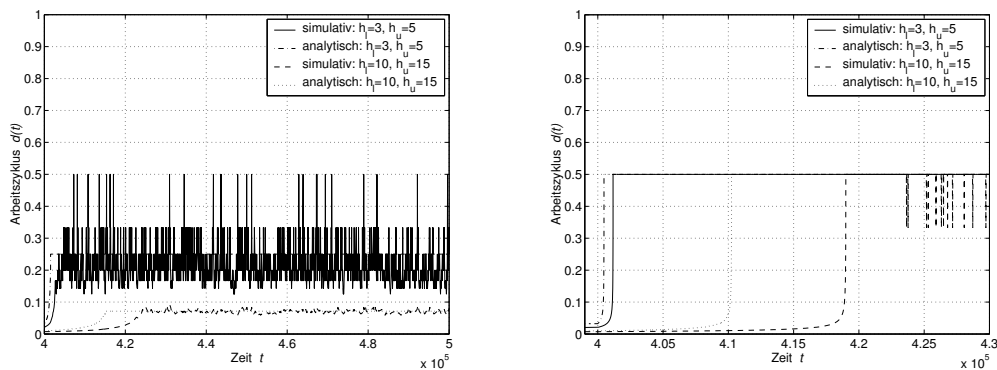
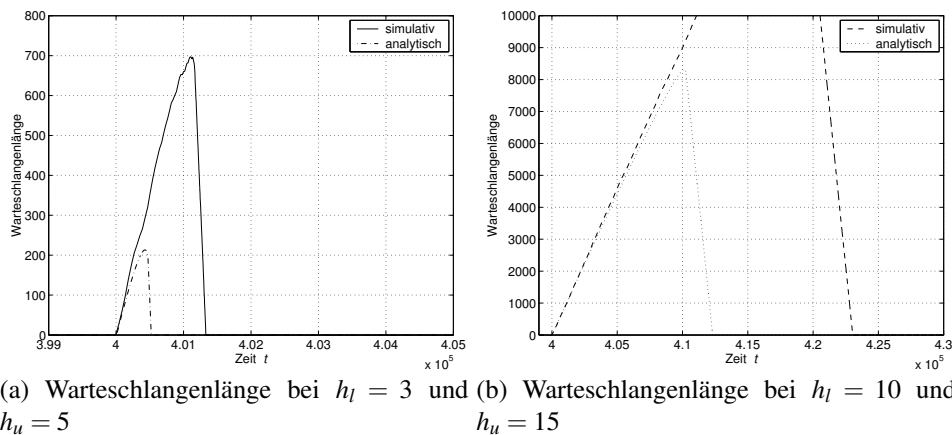
(a) Arbeitszyklus bei Sprung von λ_1 auf λ_2 (b) Arbeitszyklus bei Sprung von λ_1 auf λ_3

Abbildung 6.8: Abhängig von der Intensität des Sprungs der Ankunftsrate kann mit der analytischen Analyse der simulative Verlauf des Arbeitszyklus mit Abweichungen nachgebildet werden.

Im zweiten Szenario wurden die Konfigurationen bei unterschiedlichen Sprüngen der Ankunftsrate verglichen. Die Abbildung 6.8 (a) zeigt die Ergebnisse der analytischen und simulativen Analyse bei der ersten und zweiten Konfiguration im Vergleich. Sowohl bei der ersten als auch bei der zweiten Konfiguration stellen die erreichten Mittelwerte der analytischen Analyse eine angemessene Approximation dar. Hinsichtlich der Dynamik der Änderungen führt die analytische Analyse zu optimistischen Ergebnissen. Bei beiden Konfigurationen erreichen die Verläufe der analytischen Analyse den Mittelwert schneller. Die Größenordnungen der Dauer der Anpassung sind annähernd gleich. Bei der ersten Konfiguration ($h_l = 3, h_u = 5$) liegt sie im Bereich von wenigen tausend Zeiteinheiten, bei der zweiten Konfiguration dauert die Anpassung ca. 20.000 Zeiteinheiten.



(a) Warteschlangenlänge bei $h_l = 3$ und $h_u = 5$ (b) Warteschlangenlänge bei $h_l = 10$ und $h_u = 15$

Abbildung 6.9: In kritischen Szenarien (Sprung der Ankunftsrate von λ_1 auf λ_3) kann die Warteschlangenlänge durch die Differenzgleichung nur mit größerer Abweichung abgeschätzt werden.

Die Untersuchungen in Abschnitt 5.4.2 haben ergeben, dass ein Sprung der Ankunftsrate über zwei Größenordnungen (Faktor 100) zu einer kritischen Situation hinsichtlich der Nachrichten in der Warteschlange führt. Um festzustellen, ob die Formeln der analytischen Analyse für die Abschätzung auch in kritischen Situationen geeignet sind, werden die simulativen Ergebnisse mit denen der analytischen Analyse in einem kritischen Szenario verglichen. In Abbildung 6.8 (b) ist der Verlauf der Arbeitszyklen bei einem Sprung von λ_1 auf λ_3 dargestellt. Die erreichten Endwerte des Arbeitszyklus sind gleich. Bei der Dauer der Anpassung sind jedoch deutliche Unterschiede zu verzeichnen. Ergänzend dazu sind in den Abbildungen 6.9 (a) und (b) die entsprechenden Warteschlangenlängen über der Zeit dargestellt. Ebenso wie die simulativen geben auch die analytischen Ergebnisse einen Hinweis auf unverhältnismäßig viele Nachrichten in der Warteschlange. Die Größenordnungen unterscheiden sich jedoch deutlich.

Abschließend sind die Verläufe des Arbeitszyklus bei Änderung der Ankunftsrate in Form einer Rampenfunktion in Abbildung 6.10 dargestellt. Die simulativen Ergebnisse weisen nur geringe Abweichungen zu den Ergebnissen der analytischen Analyse auf.

6.3 Anwendung der Analysemodelle für die Einsatzplanung

Mit dem vorgestellten Ansatz zur analytischen Analyse kann sowohl das statische als auch das dynamische Verhalten der Arbeitszyklusanpassung vor dem Einsatz in realer Hardware abgeschätzt werden. In diesem Abschnitt wird zusammenfassend dargestellt,

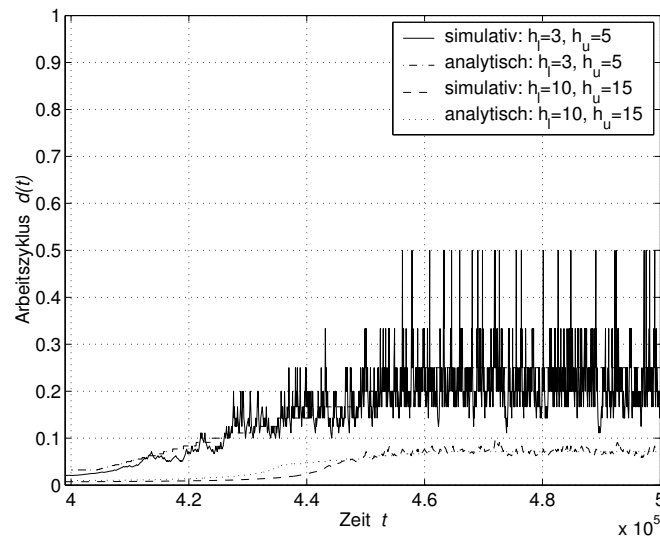


Abbildung 6.10: Ändert sich die Ankunftsrate in Form einer Rampenfunktion von λ_1 auf λ_2 innerhalb von 60.000 Zeiteinheiten, kann der Verlauf durch die Differenzgleichung abgeschätzt werden.

wie ein Anwender der Arbeitszyklusanpassung die in den vorangegangenen Abschnitten vorgestellten analytischen Modelle für eine Einsatzplanung benutzen kann.

Dabei müssen bestimmte Annahmen über das zu erwartende Einsatzszenario getroffen werden. Sie beziehen sich auf die Ankunftsrate, die beim Betrieb der Arbeitszyklusanpassung zu erwarten ist. Da in Abschnitt 4.1 für die Arbeitszyklusanpassung explizit kein Wissen über die Verkehrscharakteristik vorausgesetzt wird, kann es sich nur um mögliche Bereiche handeln, in denen sich die Ankunftsrate bewegt. Gemeinsam mit der Parametrierung werden sie in das Modell eingespeist und zur Berechnung der Eigenschaften verwendet.

Zudem hat ein Anwender bestimmte Anforderungen, z. B. Verzögerungszeit der Nachrichten (siehe auch Abschnitt 2.4), die aus den Eigenschaften der Anwendung resultieren. Im Anhang C wird angedeutet, wie der Zusammenhang zwischen der Ankunftsrate, der Systemdynamik und der relativen Verzögerungszeit abgeschätzt werden kann. Dieser Zusammenhang muss in weiteren Arbeiten detaillierter untersucht werden. Wenn die Anforderungen befriedigt werden und der erreichte Arbeitszyklus in der Anwendung sinnvoll ist, kann die verwendete Parametrierung für den Betrieb benutzt werden. Ansonsten muss mit veränderter Parametrierung erneut berechnet werden, um gegebenenfalls eine bessere Konfiguration zu finden.

In den folgenden Abschnitten wird dargestellt, wie die Analysemodelle konkret für statische (Abschnitt 6.3.1) und dynamische (Abschnitt 6.3.2) Szenarien eingesetzt werden können. In Kapitel 7 wird weiterführend diskutiert, wie die Analysemodelle auf den Standard IEEE 802.15.4 zugeschnitten werden können. Mit dem resultierenden angepassten

Modell kann der Zusammenhang, wie in diesem Kapitel dargestellt, speziell für den Standard IEEE 802.15.4 berechnet werden.

6.3.1 Anwendung des MARKOW-Modells

Für die Anwendung des MARKOW-Modells zur Einsatzplanung in statischen Szenarien müssen die folgenden Schritte durchlaufen werden:

1. Der zu untersuchende Ankunftsratenbereich muss festgelegt werden. Aus diesem Bereich sind einzelne Ankunftsraten auszuwählen, die innerhalb von MARKOW-Modellen untersucht werden sollen.
2. Der Parametrierungsbereich der Schwellwerte h_l und h_u sowie die Anzahl n_m der Beobachtungsintervalle sollte im Zusammenhang mit der Zugriffstechnik festgelegt werden. Der maximale Wert des Parameters h_u muss dabei unter der maximal möglichen Anzahl von Nachrichten innerhalb der Dauer von n_m Beobachtungsintervallen liegen.
3. Die Parameter $h_{l,max}$, λ (eine der in Schritt 1 ausgewählten Ankunftsraten) und n_m werden in Gleichung (6.6) eingesetzt. Ebenso wird der Sicherheitsfaktor f_{sec} festgelegt (Empfehlung $f_{sec} \geq 2$) und in Gleichung (6.6) eingesetzt. Die maximale Beobachtungsdauer $t_{mon}(s_{i,max})$ kann berechnet werden.
4. Mit Gleichung (6.1) wird die maximale Anzahl $s_{i,max}$ der relevanten Zustände bestimmt. Dadurch wird die Zeilen- und Spaltenanzahl der Matrix \mathbf{P} festgelegt.
5. Für jedes s_i aus $S = \{s_1, s_2, \dots, s_{i,max}\}$ müssen mit den Gleichungen (6.2) bis (6.4) die Zustandsübergangswahrscheinlichkeiten p_{inc} , p_{hold} und p_{dec} berechnet werden. Alle Werte werden mit einer festen Konfiguration für h_l , h_u und n_m berechnet.
6. Die Zustandsübergangswahrscheinlichkeiten sind in die Matrix \mathbf{P} einzusetzen.
7. Von der Matrix \mathbf{P} ist π (Gleichung (6.7)) als der linke Eigenwert zu berechnen und mit Gleichung (6.9) zu normieren.
8. Der im Mittel erreichte Zustand $s_i = \pi_{mean}$ kann abschließend mit Gleichung (6.10) berechnet werden. Das Ergebnis ist für die in Schritt 5 festgelegte Konfiguration von h_l , h_u und n_m gültig.
9. Um eine Darstellung in der Art der Abbildung 6.2 zu erhalten, müssen die Schritte 5 bis 8 wiederholt werden, bis alle Ergebnisse für die gewünschten Konfigurationen von h_l und h_u vorliegen. Bei Bedarf ist der Parameter n_m ebenfalls zu variieren. Die relative Verzögerungszeit kann berechnet werden. Sollen verschiedene konkrete Ankunftsraten (wie in Schritt 1 festgelegt) betrachtet werden, sind zusätzlich die Schritte 3 und 4 wiederholt auszuführen.

10. Mit den Ergebnissen in verschiedenen Ankunftsratenszenarien kann über die Gleichungen (6.12) und (5.2) der Zusammenhang zwischen der Parametrierung und der relativen Verzögerungszeit, ähnlich der Abbildung 5.11, dargestellt werden.

Der Zusammenhang zwischen der Parametrierung, der Ankunftsrate, der relativen Verzögerungszeit und dem Arbeitszyklus ist das Ergebnis der Analyse. Der Anwender kann damit erkennen, welchen Arbeitszyklus die gewünschte relative Verzögerungszeit im späteren Betrieb nach sich ziehen wird. Wenn die Ergebnisse nicht den Anforderungen in dem Anwendungsszenario entsprechen, kann mit Δx zusätzlicher Einfluss genommen werden. Der entsprechende Zusammenhang zu den Signalverläufen ist in Anhang C skizziert.

6.3.2 Anwendung der Differenzgleichungen

Wenn bei der Anwendung der Arbeitszyklusanpassung auch das Verhalten der Größen bei zeitlich veränderlicher Ankunftsrate interessant ist, können die Differenzgleichungen eingesetzt werden. Im Gegensatz zu der statischen Analyse muss allerdings mehr Wissen über die zu erwartende Ankunftsrate in das Modell eingespeist werden. Es ist ein konkreter zu untersuchender Verlauf der Ankunftsrate vorzugeben. Das bedeutet zum einen, die Ankunftsrate zu quantifizieren und zum anderen auch mögliche kritische Bereiche (z. B. Burst-Dauer und -intensität) zu benennen. Gegebenenfalls müssen diese Analysen mit verschiedenen Konfigurationen mehrfach durchlaufen werden.

Für die Analyse des Verhaltens der Ankunftsratenanpassung in einem dynamischen Szenario müssen die folgenden Schritte ausgeführt werden:

1. Der Verlauf der Ankunftsrate $\lambda(t)$, unter welchem die Anpassung untersucht werden soll, muss festgelegt werden. Neben den zur Validierung verwendeten Verläufen (siehe Abbildung 6.6) können beliebige andere Verläufe, die für das Anwendungsszenario interessant sind, eingesetzt werden.
2. Die Parametrierung von h_l , h_u und n_m , bei welcher der Verlauf untersucht werden soll, ist festzulegen.
3. Der Verlauf von $\Delta t(k)$, $t(k)$ und $d(k)$ in den Gleichung (6.15), (6.16) und (6.17) ist iterativ zu berechnen. Die jeweils für k fehlenden Größen sind mit den Gleichungen (6.18) bis (6.22) zu bestimmen.
4. Die Auswirkungen der Veränderung der Ankunftsrate auf den Arbeitszyklus d und die Warteschlangenlänge c können aus der Entwicklung der Größen $d(k)$ und $c(k)$ abgelesen werden.
5. Zu der Abschätzung der Verzögerungszeit kann auch im dynamischen Szenario die jeweils $d(k)$ entsprechende Verzögerungszeit mit der Gleichung (6.12) angenähert werden.

Aus den Ergebnissen der dynamischen Analyse ist abzulesen, in welcher Weise sich der Arbeitszyklus, die Verzögerungszeit und die Warteschlangenlänge in Abhängigkeit von der Ankunftsrate ändern. Anhand der Resultate kann der Anwender entscheiden, ob die Parametrierung für den jeweiligen Einsatzfall geeignet ist.

Wenn mit den Ergebnissen der Analyse die Anforderungen nicht erfüllt werden können, muss die Konfiguration verändert und erneut für die Berechnung benutzt werden. Der Zusammenhang mit dem Signalverlauf wird in Anhang C angedeutet und sollte in weiterführenden Arbeiten genauer betrachtet werden.

7 Analyse von IEEE 802.15.4

In Abschnitt 4.3.2 wurde vorgestellt, wie der Ansatz zur Arbeitszyklusanpassung auf den Standard IEEE 802.15.4 übertragen werden kann. Die bisherigen simulativen und analytischen Analysen bezogen sich allerdings nur auf das allgemeine zeitliche Modell (siehe Abschnitt 5.1.1). Konkrete Skalierungen, die Rückschlüsse beispielsweise auf bestimmte Standards zulassen, wurden nicht diskutiert.

In diesem Abschnitt wird eine Erweiterung der analytischen Analyse vorgestellt. Damit können die vorhandenen Modellgleichungen für die statische und dynamische Analyse hinsichtlich des zeitlichen Modells angepasst werden. In den Abschnitten 7.2 und 7.3 wird das Vorgehen der Anpassung beim statischen bzw. dynamischen Modell beispielhaft für den Standard IEEE 802.15.4 dargestellt.

Bei Betrieb mit dem Standard IEEE 802.15.4 kann festgelegt werden, dass der Arbeitszyklus im Beacon-Enabled-Modus durch die Beacon Order BO und die Superframe Order SO eingestellt wird. Auf diese Weise kann er im Bereich von $1/16.384 \leq d \leq 1$ variiert werden (vgl. Anhang A). Im Gegensatz zu dem in Abschnitt 4.3.1 vorgestellten allgemeinen Ansatz für die Einstellung des Arbeitszyklus ergeben sich damit Grenzen für die Wirksamkeit. Sie werden in Abschnitt 7.4 analysiert. Die Ergebnisse zeigen die Grenzen des Verfahrens bei der Arbeitszyklusanpassung basierend auf dem Standard IEEE 802.15.4 auf.

7.1 Allgemeine Modellanpassungen

Unabhängig von der Charakteristik der Ankunftsrate sind allgemeine Anpassungen bezüglich des zeitlichen Modells, der Art der Arbeitszyklusänderung und des Medienzugriffs notwendig. Im realen zeitlichen Verlauf werden je nach Frequenzbereich verschiedene Symbol- und Bitraten verwendet. Die Dauer einer aktiven Phase ist im Standard direkt an die Dauer eines Symbols gekoppelt (siehe Anhang A). Im Frequenzbereich 2,4 GHz ergibt sich eine minimale Dauer von $t_{act} = \text{aBaseSuperframeDuration} = 15,36 \text{ ms}$ bei $SO = 0$.

In dem bisherigen allgemeinen Modell wurde der Arbeitszyklus durch Erhöhen oder Verringern der Anzahl der Zeitschlitze zwischen zwei aktiven Phasen verändert (Abschnitt

5.1.2). Beim Standard IEEE 802.15.4 kann für die Änderung des Arbeitszyklus nur der Exponent in Gleichung (A.4) bzw. (A.3) beeinflusst werden. Dadurch wird die Zeit zwischen zwei aufeinander folgenden Beacon-Nachrichten bzw. die Dauer der aktiven Phase verändert. Diese Organisation des Arbeitszyklus und die dadurch mögliche Art der Änderung muss sowohl im MARKOW-Modell als auch in den Differenzgleichungen berücksichtigt werden. Hier wird vereinfachend angenommen, dass der Arbeitszyklus nur über die Beacon Order BO und nicht durch die Superframe Order SO beeinflusst wird. Die Superframe Order wird bei $SO = 0$ konstant gehalten.

In Abschnitt 5.1.3 wird ein Medienzugriff ohne kollidierende Nachrichten angenommen. Der Standard IEEE 802.15.4 erlaubt jedoch zwei Möglichkeiten für den Medienzugriff innerhalb der aktiven Phase: CSMA/CA innerhalb der CAP und TDMA innerhalb der GTS. Wird CSMA/CA verwendet, muss das Modell für die Nachrichtenübertragung innerhalb der aktiven Phase angepasst werden. Der kollisionsbehaftete Zugriffsmechanismus ist zunächst ähnlich zu dem Ansatz von Buchholz [BP04] zu analysieren. Da keine detaillierten analytischen Modelle für den Durchsatz in Abhängigkeit von der angebotenen Last für das CSMA/CA Verfahren bei IEEE 802.15.4 verfügbar sind, wird hier von der Annahme aus Abschnitt 5.1.3 ausgegangen. Innerhalb einer aktiven Phase können zehn Nachrichten übertragen werden. Diese Größenordnung entspricht annähernd den beim Standard erreichbaren Werten.

Schließlich muss der allgemeine Bezug der Ankunftsrate λ von einer generischen Zeiteinheit auf eine physikalische Zeiteinheit übertragen werden. Daher werden die Ankünfte in Nachrichten pro Sekunde (1/s) gemessen.

7.2 Anpassung des Markow-Modells

Die Zustände $S = \{s_1, s_2, \dots\}$ der MARKOW-Kette in Abbildung 6.1 entsprechen für den Standard IEEE 802.15.4 der Beacon Order BO . Der Zustand s_1 entspricht $BO = 0$, s_2 entspricht $BO = 1$ und so fort. Zudem ist die Anzahl der Zustände durch den vorgegebenen Wertebereich mit $BO \leq 14$ begrenzt. Deshalb besteht die auf den Standard übertragene MARKOW-Kette aus 15 Zuständen. Dadurch ergibt sich $s_{i,max} = 15$. Die quadratische Matrix \mathbf{P} mit den Wahrscheinlichkeiten für die Zustandsübergänge hat demnach 15 Zeilen und Spalten.

Unter der Bedingung $SO = 0$ wird der einer Beacon Order entsprechende Arbeitszyklus mit

$$d = \frac{\text{aBaseSuperframeDuration} \cdot 2^{SO}}{\text{aBaseSuperframeDuration} \cdot 2^{BO}} = \frac{1}{2^{BO}} \quad (7.1)$$

berechnet. Durch das veränderte zeitliche Modell müssen zudem die Parameter des

MARKOW-Modells angepasst werden. Das betrifft die Beobachtungsdauer, die durch

$$t_{mon} = n_m \cdot \text{aBaseSuperframeDuration} \cdot 2^{BO} \quad (7.2)$$

zu berechnen ist. Sie fließt direkt in die Gleichungen (6.2), (6.3) und (6.4) zur Berechnung der Wahrscheinlichkeiten für die Zustandsübergänge p_{inc} , p_{hold} und p_{dec} ein. Die Matrix \mathbf{P} kann unverändert aufgebaut und für die Berechnung der stationären Zustandswahrscheinlichkeiten π (Gleichungen (6.8) bis (6.10)) eingesetzt werden.

Mit diesen Modifikationen lässt sich die Leistungsfähigkeit der Anpassung des Arbeitszyklus bei Verwendung des Standards IEEE 802.15.4 in statischen Szenarien analytisch abschätzen. Somit können Erkenntnisse über die bei dem Standard speziell vorliegenden Zusammenhänge, ähnlich denen in Abschnitt 5.3, gewonnen werden. Diese Analyse soll hier allerdings nicht wiederholt werden. Vielmehr wird als Ergänzung zu den bisherigen Ergebnissen das angepasste MARKOW-Modell in Abschnitt 7.4 für die Abschätzung der Grenzen der Wirksamkeit verwendet.

7.3 Anpassung der Differenzgleichung

Analog zu den Modifikationen des allgemeinen MARKOW-Modells müssen die Differenzgleichungen an den Standard IEEE 802.15.4 angepasst werden. Der prinzipielle Zusammenhang, wie in Abbildung 6.3 dargestellt, ist weiterhin gültig.

Im Unterschied zu dem allgemeinen zeitlichen Modell und der Formulierung in Abschnitt 6.2.1 muss hier die Beacon Order BO als Parameter berücksichtigt werden. Sie hat direkten Einfluss auf $d(k)$ und $\Delta t(k)$. Daher muss in der Gleichung (6.15) für Δt der Parameter BO verwendet werden. In den Gleichungen (7.3) und (7.4) wird dieser neue Zusammenhang ausgedrückt.

$$BO(k+1) = BO(k) + f_{BO}(c(k), n_r(k+1), i(k)) \quad (7.3)$$

$$\Delta t(k+1) = \text{aBaseSuperframeDuration} \cdot 2^{BO(k+1)} \quad (7.4)$$

Die Abhängigkeit der Beacon Order BO vom vorangegangenen Wert wird in Gleichung (7.3) formuliert und für die Berechnung der Zeit bis zur nächsten aktiven Phase in Gleichung (7.4) eingesetzt. Der zweite Term mit $f_{BO}(\cdot)$ in Gleichung (7.3) bezieht sich hier auf die Änderung von BO statt auf die Änderung der Anzahl passiver Zeitschlitze (vgl. Gleichung (6.15)).

Die Arbeitszyklusänderung $f_{BO}(\cdot)$ kann unverändert formuliert werden, da sie nur von Zählervariablen abhängt. Lediglich bei der Berechnung von $n_r(k+1)$ müssen das

veränderte Beacon-Intervall $\Delta t(k)$ aus Gleichung (7.4) und die einheitenbehaftete Ankunftsrate λ eingesetzt werden. Zusätzlich ist die Berechnung des aktuellen Arbeitszyklus anzupassen:

$$d(k+1) = 1/2^{BO(k+1)} \quad (7.5)$$

Mit dem resultierenden Satz von Differenzgleichungen kann die Entwicklung des Arbeitszyklus und die damit verbundene Verzögerungszeit abgeschätzt werden. Die Ergebnisse sind somit auf die Charakteristik des Standards IEEE 802.15.4 zugeschnitten.

7.4 Grenzen der Wirksamkeit

Im allgemeinen zeitlichen Modell ist der Arbeitszyklus nur durch das Maximum $d = 100\%$ begrenzt. Die Anzahl der Zeitschlitze zwischen zwei aktiven Phasen unterliegt keiner oberen Grenze. Insofern kann für den Arbeitszyklus im allgemeinen zeitlichen Modell kein Minimum angegeben werden.

Beim Standard IEEE 802.15.4 gilt, wie im allgemeinen zeitlichen Modell, die obere Beschränkung für den Arbeitszyklus $d_{max} = 100\%$ bei $SO = BO = 0$. Zusätzlich kann ein minimal möglicher Arbeitszyklus bestimmt werden. Er ergibt sich aus dem Quotienten der minimalen Dauer der aktiven Phase (bei $SO_{min} = 0$) und der maximalen Zeit zwischen zwei aufeinander folgenden aktiven Phasen (bei $BO_{max} = 14$):

$$\begin{aligned} d_{min} &= \frac{\text{aBaseSuperframeDuration} \cdot 2^{SO_{min}}}{\text{aBaseSuperframeDuration} \cdot 2^{BO_{max}}} \\ &= \frac{1}{2^{BO_{max}}} \\ &\approx 0,000061 = 0,0061\% \end{aligned} \quad (7.6)$$

Wird die Arbeitszyklusanpassung im Zusammenhang mit dem Standard IEEE 802.15.4 eingesetzt, wäre die Anpassung nur bis zu diesem minimalen Arbeitszyklus d_{min} wirksam.

Um den Verlauf der Wirksamkeit auszuloten, werden statische Szenarien mit unterschiedlicher Ankunftsrate untersucht. Während der Untersuchung eines Bereiches der Ankunftsrate bleibt die Konfiguration der Parameter der Anpassung (h_l , h_u und n_m) gleich, wobei die Auswirkung auf vier unterschiedliche Konfigurationen untersucht wird. Im Standard IEEE 802.15.4 kann der Arbeitszyklus sowohl durch die Superframe Order SO als auch durch die Beacon Order BO beeinflusst werden. Wie zuvor wird vereinfachend angenommen, dass die Dauer der aktiven Phase konstant bei $SO_{min} = 0$ bleibt. Der Arbeitszyklus wird nur durch die Beacon Order verändert. Mit dem vorgestellten übertragenen

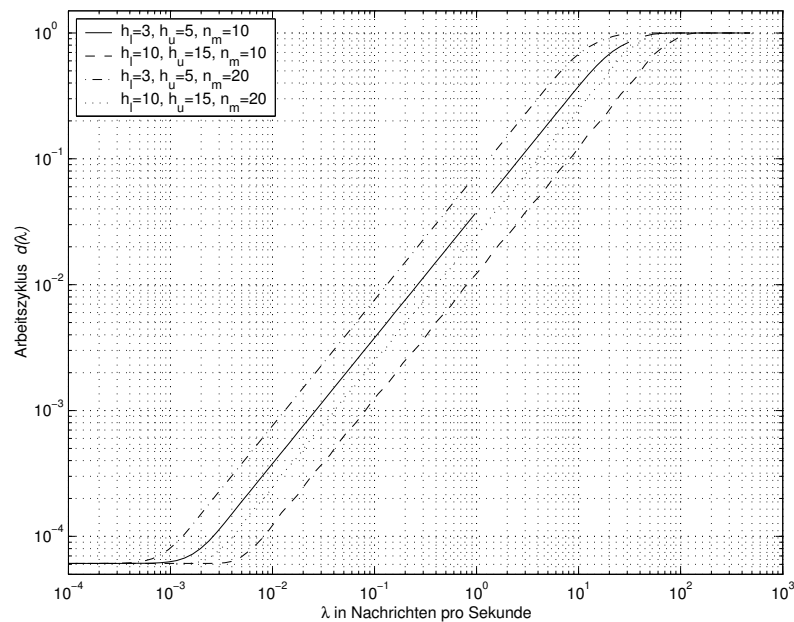


Abbildung 7.1: Die Anpassung des Arbeitszyklus ist nur innerhalb bestimmter Grenzen wirksam. Ankunftsrate unter $\lambda \approx 10^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ führen nur zum minimal möglichen Arbeitszyklus. Bei mehr als $\lambda \approx 50 \cdot \text{s}^{-1}$ wird der Arbeitszyklus auf $d = 100\%$ gesetzt.

MARKOW-Modell aus Abschnitt 7.2 werden die mittleren Arbeitszyklen bei den jeweiligen Konfigurationen und Ankunftsrate berechnet.

In Abbildung 7.1 sind die Ergebnisse der Untersuchungen dargestellt. Die Ankunftsrate wurde im Bereich von $10^{-4} \cdot \text{s}^{-1} \leq \lambda \leq 10^3 \cdot \text{s}^{-1}$ variiert. Es ist zu beobachten, dass oberhalb von $\lambda \approx 50 \cdot \text{s}^{-1}$ der maximale Arbeitszyklus $d = 100\%$ erreicht wird. Unterhalb von $\lambda \approx 10^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ erreicht die Anpassung den minimalen Arbeitszyklus (vgl. Gleichung (7.6)).

Wie bereits in Abschnitt 5.8 gezeigt, ist der mittlere stationäre Arbeitszyklus abhängig von der Konfiguration der Schwellwerte. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 7.1 wiederzufinden. Bei verschiedenen Konfigurationen der Parameter h_l , h_u und n_m werden unterschiedliche Arbeitszyklen erreicht.

Die Ergebnisse zeigen, dass der Einsatz der Arbeitszyklusanpassung für den Standard IEEE 802.15.4 in einem Bereich, der ca. fünf Größenordnungen überstreicht, wirken kann. Außerhalb dieses Bereiches wird der maximale bzw. minimale Arbeitszyklus (vgl. Gleichung (7.6)) erreicht.

8 Zusammenfassung und Ausblick

8.1 Zusammenfassung

Drahtlose Sensornetze ist ein in den letzten Jahren bereits intensiv bearbeitetes Forschungsgebiet. Ein Sensornetz kann als Messglied an einer Regelstrecke aufgefasst werden. Es beeinflusst dadurch das Zusammenwirken mit der Anwendung. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dem Arbeitszyklus der Übertragungseinheit in drahtlosen Sensorknoten. Der Fokus liegt dabei auf der Einstellung des Arbeitszyklus in einer Vermittlungsstation, die Nachrichten eines entfernten Sensorknotens an eine Basisstation weiterleitet. Dabei tritt das Problem auf, dass die Nachrichten der Anwendungsschicht in dem Sensorknoten ereignisorientiert generiert werden und der Arbeitszyklus zwischen der Vermittlungsstation und dem entfernten Sensorknoten nur zeitgetrieben vereinbart werden kann. Das Ziel bestand darin, diese beide Paradigmen, ereignisorientiertes Erzeugen der Nachrichten und zeitgetriebenes Vereinbaren des Arbeitszyklus, miteinander zu verknüpfen.

Zunächst wurde untersucht, wie Nachrichten in einem Sensornetz erzeugt werden können. Das sendOnDelta-Prinzip ermöglicht, Energie für Nachrichtenübertragung nur dann aufzuwenden, wenn auch tatsächlich Zustandsänderungen in der Umgebung aufgetreten sind. Unter Verwendung des sendOnDelta-Prinzips wurden Messungen realer physikalischer Größen aus dem Gebiet der Gebäudeautomatisierung untersucht. Die Ergebnisse zeigen zum einen, dass es eine Anzahl von physikalischen Größen gibt, die sich nur sehr langsam ändern und deshalb nur wenige Nachrichten pro Zeit verursachen. Zum anderen konnte bei den Anstiegen der physikalischen Größen eine Exponentialverteilung festgestellt werden. Damit ergibt sich eine exponentialverteilte Zwischenankunftszeit für den damit verbundenen Verkehr. Außerdem wurde die Diskussion auf den Zusammenhang mit der Regelbarkeit einer Strecke ausgeweitet. Dazu konnte eine Abschätzung vorgestellt werden, welche die Ankunftsrate in ein Verhältnis mit der Verzögerungszeit setzt, die sich wiederum auf die Regelbarkeit auswirkt. Diese Betrachtung stellt einen Ansatzpunkt für weitere Arbeiten dar.

Weiterhin musste aus der Sicht der Übertragungseigenschaften geklärt werden, welche Techniken derzeit existieren, mit denen Energie in drahtlosen Sensornetzen gespart werden kann. Die Untersuchungen haben ergeben, dass zahlreiche Ansätze verfügbar sind, die die Einsparung der Energie ermöglichen. Auch bei der Entwicklung von Standards

sind diese Ideen bereits eingeflossen. Es konnte festgestellt werden, dass keine adäquaten Methoden existieren, die Verkehrsbeobachtungen für die automatische Einstellung des Arbeitszyklus ausnutzen. Lediglich bei dem T-MAC-Ansatz ist ein Teil des Protokolls von der Ankunftsrate abhängig.

Basierend auf den Analysen der Energiespartechiken und des Verkehrs wurde ein Vorschlag zur Anpassung des Arbeitszyklus während der Laufzeit eines drahtlosen Sensornetzes unterbreitet. Er stützt sich auf die kontinuierliche Beobachtung des Verkehrs von einem entfernten Sensorknoten. Aus den Nachrichtenankünften wird der Bedarf für die Veränderung des Arbeitszyklus abgeleitet. Wenn zu viele Nachrichten pro Zeiteinheit an der Vermittlungsstation eingetroffen sind, erhöht sie den Arbeitszyklus, um das Übertragungsmedium zu entlasten. Umgekehrt verringert sie bei nur wenigen Nachrichten den Arbeitszyklus, um Energie zu sparen. Dieser vorgestellte Ansatz zur Arbeitszyklusanpassung stellt den Kernbeitrag der Arbeit dar. Erstmals wurde untersucht, wie die ereignisgetriebene Nachrichtenerzeugung mit der zeitbasierten Vermittlungstätigkeit verknüpft werden kann.

Die Anpassung des Arbeitszyklus steht im direkten Konflikt mit dem Energieverbrauch und der Verzögerungszeit bzw. der Warteschlangenlänge. Je geringer der Arbeitszyklus ist, desto geringer ist auch der Energieverbrauch bei gleichzeitig höherer Verzögerungszeit und Warteschlangenlänge.

Im Rahmen von Simulationen wurde der Ansatz zur Arbeitszyklusanpassung einer Bewertung unterzogen. Sowohl Szenarien mit einer konstanten als auch mit einer veränderlichen Ankunftsrate wurden betrachtet. Bei der Analyse der Szenarien mit konstanter Ankunftsrate konnte die Abhängigkeit des Verkehrs und der Parametrierung quantifiziert werden. Ferner liegt mit der relativen Verzögerungszeit ein Maß vor, das die Entwicklung des Arbeitszyklus unabhängig vom Verkehr charakterisiert. Der Anwender kann es für die Einstellung der Regelbarkeit von Strecken benutzen.

Die Ergebnisse zeigen weiterhin, dass auch das Verhalten in Szenarien mit veränderlicher Ankunftsrate vom Verkehr und der Parametrierung beeinflusst wird. In diesem Zusammenhang konnte dargestellt werden, dass kleinere Änderungen der Ankunftsrate nicht zu kritischen Situationen führen. Bei größeren Änderungen der Ankunftsrate können allerdings große Warteschlangenlängen und unverhältnismäßig hohe Verzögerungszeiten zustande kommen. Daher ist vor dem Einsatz der Arbeitszyklusanpassung zu prüfen, welche Bedingungen für den Einsatz bestehen. Wenn nur geringer Verkehr und wenige Änderungen der Ankunftsrate auftreten, ist die vorgeschlagene Arbeitszyklusanpassung geeignet. Für Anwendungen, bei denen starke Ankunftsratenänderungen auftreten, kann die Anpassung des Arbeitszyklus nicht generell empfohlen werden. Vielmehr wäre in solchen Fällen vor dem Einsatz zu prüfen, wie sich das Übertragungsverhalten in Zusammenhang mit der Regelbarkeit der Strecke verhält.

Außerdem wurde der vorgeschlagene Ansatz zur Arbeitszyklusanpassung mit dem T-MAC-Ansatz verglichen. Es konnte gezeigt werden, welche Unterschiede beim Verhal-

ten bestehen. Nur mit Wissen über den Verkehr können die Parameter des T-MAC-Ansatzes geeignet eingestellt werden. Alle Ergebnisse der simulativen Analyse beziehen sich auf ein verallgemeinertes zeitliches Modell, das für die Bewertung von speziellen Übertragungstechniken angepasst werden kann.

Um die Leistungsanalyse für den Praxiseinsatz der Arbeitszyklusanpassung zu vereinfachen, wurden im letzten Teil der Arbeit analytische Modelle entwickelt. Sie basieren auf MARKOW-Ketten und Differenzgleichungen. Ein Vergleich der Ergebnisse aus den analytischen und den simulativen Modellen konnte die Eignung der analytischen Modelle bestätigen. Zudem wurde gezeigt, dass sie sich auf spezielle Übertragungstechniken anpassen lassen. Damit kann ein Anwender die analytischen Modelle für die Abschätzung des Verhaltens benutzen. Ergänzend dazu wird eine Vorgehensweise skizziert, die den Einsatz der analytischen Modelle für die Dimensionierung in praktischen Szenarien beschreibt.

8.2 Ausblick

Neben Betrachtungen, die sich direkt auf die Übertragungseigenschaften eines Sensornetzes beziehen, wurde in dieser Arbeit angesprochen, welcher Zusammenhang mit der Regelbarkeit einer Strecke besteht. Diese Betrachtungen stellen den Kern möglicher weiterer Arbeiten dar, da dadurch die Eigenschaften der drahtlosen Sensornetze enger mit denen der Anwendungen verknüpft werden. Ausgangspunkt kann dabei das beschriebene Kriterium für die Regelbarkeit sein. Ausgehend von dem bereits angedeuteten Zusammenhang mit der Ankunftsrate und der relativen Verzögerungszeit, könnten Dimensionierungsregeln für den Arbeitszyklus in drahtlosen Sensornetzen entwickelt werden. Systemtheoretische Formulierungen derartiger Zusammenhänge werden bisher noch nicht untersucht. Wenn Ergebnisse auf diesem Gebiet vorlägen, könnte ein Anwender aus der Dynamik einer Regelstrecke oder eines Regelkreises direkt die Parametrierung des Sensornetzes ableiten. Außerdem wären Rückschlüsse auf die notwendige Energie einfach zu ziehen. Die Ergebnisse wären nicht nur für die Dimensionierung drahtloser, sondern auch drahtgebundener Sensornetze nützlich.

Neben den systemtheoretischen Eigenschaften von drahtlosen Sensornetzen bietet auch der eigentliche Algorithmus zur Anpassung des Arbeitszyklus Potenzial für Verbesserungen. Folgende Aspekte können dafür Ansatzpunkte sein:

- In dem vorgeschlagenen Ansatz werden die Ankünfte über feste Zeiträume beobachtet. Eine Verbesserung kann erreicht werden, indem stets die letzten n aktiven Phasen beobachtet werden. Dadurch wird der gleitende Mittelwert über die Verkehrscharakteristik gebildet. Anstatt die Verkehrscharakteristik nur zu diskreten Zeitpunkten zu bewerten, würde nach jeder aktiven Phase geprüft werden, ob der

Arbeitszyklus verändert werden sollte. Die gemessenen Verkehrswerte können in einem Ringpuffer gespeichert werden.

- Bisher ist für die Arbeitszyklusanpassung ein dem Zwei-Punkt-Regler ähnlicher Algorithmus vorgesehen. Außerdem wird der Arbeitszyklus nur durch Veränderung der passiven Phase um einen Zeitslot beeinflusst. Eine Verbesserung kann die Verwendung einer PID-ähnlichen Reglerstruktur darstellen. Dabei könnten z. B. die letzten n Verkehrsbeobachtungen zur Bewertung herangezogen werden. Die Änderung des Arbeitszyklus wäre dann abhängig von der gelieferten Stellgröße des PID-Reglers und z. B. bei starken Änderungen der Ankunftsrate besser geeignet. Der Arbeitszyklus könnte schneller als bisher an die neue Situation angepasst werden.
- Im vorliegenden Vorschlag zur Arbeitszyklusanpassung wird davon ausgegangen, dass die Dauer der aktiven Phase konstant bleibt. Durch eine veränderliche aktive Phase könnte die Flexibilität bei der Anpassung in Situationen mit höherer Auslastung erhöht werden. Eine Möglichkeit zur Realisierung ist der Einsatz des T-MAC-Ansatzes. Eine aktive Phase kann dann abgebrochen werden, wenn keine weiteren Nachrichten vorliegen. Eine weitere Möglichkeit besteht im Anpassen der Dauer der aktiven Phase je nach den letzten Auslastungen. Es können damit kurzzeitig höhere Lasten schneller abgebaut werden.

Derzeit wird die Analyse der Leistungsfähigkeit auf wenige wesentliche Parameter konzentriert. Weitere Einflussgrößen, von denen die Leistungsfähigkeit abhängt, sind beispielsweise die Art des Medienzugriffs (kollisionsbehaftet oder zeitgeteilt), Synchronisationsgenauigkeit, Asymmetrie der Kommunikationsverbindungen und Mobilität. Aufgrund der Komplexität der Untersuchungen konnten sie im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet werden.

Neben den Untersuchungen zu den genannten Einflussgrößen besteht auch der Bedarf, die Anpassung des Arbeitszyklus in größeren vermaschten Topologien zu betrachten. Dabei ergeben sich weitere Probleme, wenn der Arbeitszyklus in den Sensorknoten verändert wird. Beispielsweise müssten die Abläufe der Routingmechanismen im Zusammenhang mit intermittent zur Verfügung stehenden Knoten betrachtet werden.

In der Arbeit wurde die Leistungsfähigkeit anhand von Simulationen bewertet. In weiteren Arbeiten sollte eine Implementierung der vorgeschlagenen Algorithmen angestrebt werden. Somit könnte die Leistungsfähigkeit anhand von realer Hardware in realen Szenarien untersucht werden. Grundlage dafür können die vorgestellten Studien zur Anwendbarkeit auf Standards sein.

A Standard IEEE 802.15.4

Im Folgenden werden die wesentlichen Charakteristika des Standards IEEE 802.15.4 dargestellt, die für die vorliegende Arbeit bedeutsam sind. Nach einer kurzen Darstellung der Bitübertragungsschicht werden die Eigenschaften des Beacon-Enabled-Modus, die über die Beschreibung in Abschnitt 3.4.1 hinausgehen, erläutert. Insbesondere die Details zur Berechnung der Zeit für die aktive und passive Phase werden ausgeführt. Tiefergehende Details zu IEEE 802.15.4 können der Standardspezifikation [Ins03] entnommen werden.

A.1 Bitübertragungsschicht

Im Standard IEEE 802.15.4 stehen drei Frequenzbereiche zur Verfügung, um Symbole (und damit Bits) zu übertragen. Im weltweiten 2,4 GHz Bereich sind 16 Kanäle, im nord-amerikanischen Bereich von 915 MHz zehn Kanäle und im europäischen Bereich von 868 MHz ein Kanal verfügbar. In den einzelnen Frequenzbändern sind Bitraten von 20 kBit/s (bei 868 MHz), 40 kBit/s (bei 915 MHz) und 250 kBit/s (bei 2,4 GHz) festgelegt.

Die Bits werden in den Frequenzbereichen 868/915 MHz mit Binary Phase Shift Keying (BPSK) und bei 2,4 GHz mit Orthogonal Quadrature Phase Shift Keying (O-QPSK) moduliert. Dadurch können bei 868/915 MHz ein Bit und bei 2,4 GHz vier Bit in einem Symbol kodiert werden.

A.2 Beacon-Enabled-Modus

Betrieht man ein Netz mit dem Beacon-Enabled-Modus, sendet der Koordinator periodisch eine Beacon-Nachricht, mit der der Arbeitszyklus für die untergeordneten Knoten vorgegeben wird. In dieser Beacon-Nachricht sind unter anderem zwei für den Arbeitszyklus entscheidende Parameter enthalten: Beacon Order *BO* und Superframe Order *SO*. Gemäß dem Standard sind für diese Parameter die Grenzen

$$0 \leq SO \leq BO \leq 14 \quad (\text{A.1})$$

vorgeschrieben.

Die Dauer einer aktiven Phase ist direkt an die Symboldauer gekoppelt. Im Bereich 868/915 MHz beträgt die Symbolrate 20/40 kSymbols/s und im Bereich von 2,4 GHz 62,5 kSymbols/s. Der grundlegende Parameter `aBaseSuperframeDuration` wird mit

$$\text{aBaseSuperframeDuration} = 60 \cdot \text{Symboldauer} \cdot 16 \quad (\text{A.2})$$

berechnet. Im Bereich von 2.4 GHz mit 62,5 kSymbols/s ergibt sich eine Dauer von 15,36 ms für `aBaseSuperframeDuration`. Mit diesem Parameter kann die Dauer einer aktiven Phase

$$T_{\text{aktiv}} = \text{aSuperframeDuration} \cdot 2^{SO} \quad (\text{A.3})$$

und die Zeit zwischen zwei aufeinander folgenden Beacon-Nachrichten

$$T_{\text{Intervall}} = \text{aBaseSuperframeDuration} \cdot 2^{BO} \quad (\text{A.4})$$

berechnet werden. Der Arbeitszyklus ist direkt von der Einstellung von `BO` und `SO` abhängig. In Abbildung A.1 wird der Zusammenhang für eine Auswahl von Parametern dargestellt. Wenn `BO = SO` gilt, dann liegt der Arbeitszyklus bei 100%. Der geringste Arbeitszyklus wird erreicht, wenn die kürzeste mögliche aktive Phase mit `SO = 0` und das längste Intervall zwischen zwei aufeinander folgenden aktiven Phasen mit `BO = 14` eingestellt wird.

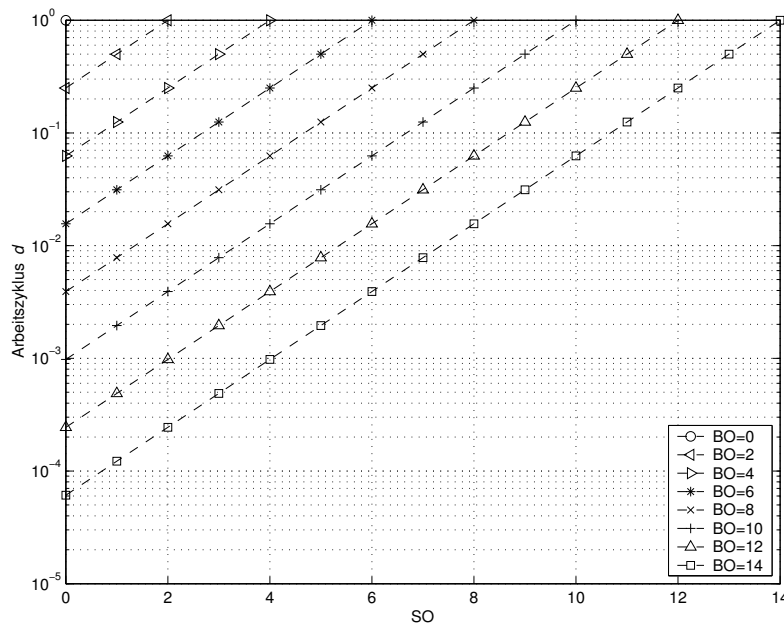


Abbildung A.1: Beacon Order und Superframe Order beeinflussen den Arbeitszyklus.

Innerhalb der aktiven Phase kann auf das Medium mit CSMA/CA oder TDMA zugegriffen werden. Bei dem CSMA/CA-Verfahren muss jeder Teilnehmer mit einem Sendewunsch eine Zufallszahl generieren. Er muss dann die der Zufallszahl entsprechende

Zeit warten und anschließend einen Zugriffsversuch starten. Ist das Medium zu diesem Zeitpunkt bereits belegt, darf der Teilnehmer nicht senden, sondern muss erneut eine Zufallszahl für den nächsten Zugriffsversuch bestimmen. Wenn zwei Teilnehmer die gleiche Zufallszahl würfeln, kann es zu einer Kollision der Nachrichten beider Teilnehmer kommen. Wenn das TDMA-Verfahren für den Medienzugriff in der aktiven Phase eingesetzt wird, muss der Koordinator jedem Teilnehmer einen Zeitschlitz zuweisen. Der entsprechende Zeitbereich ist dann exklusiv für einen Teilnehmer reserviert, kein anderer darf zur gleichen Zeit auf das Medium zugreifen. Wenn sich alle Teilnehmer an die Vereinbarungen des TDMA-Verfahrens halten, können Nachrichten nicht kollidieren.

B RTS/CTS Mechanismus

In drahtlosen Netzen kann es aufgrund der Ausbreitungseigenschaften der elektromagnetischen Wellen zu speziellen Problemen bei der Nachrichtenübertragung kommen. Eine Sondersituation entsteht beim Problem des versteckten Teilnehmers. Es wird im folgenden Abschnitt dargestellt. Anschließend wird mit dem RTS/CTS Verfahren ein möglicher Lösungsvorschlag unterbreitet.

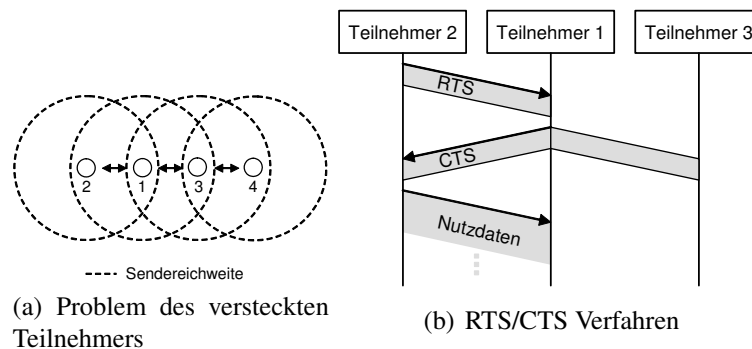


Abbildung B.1: In drahtlosen Netzen kann das (a) Problem des versteckten Teilnehmers auftreten. (b) Das RTS/CTS Verfahren ist eine Möglichkeit um die negative Wirkung dieses Problems zu verringern.

B.1 Versteckter Teilnehmer

Ein Beispiel für eine Situation mit einem versteckten Teilnehmer ist in Abbildung B.1 (a) dargestellt. Der Teilnehmer 1 befindet sich in der Mitte zwischen Teilnehmer 2 und 3. Er kann direkt mit Teilnehmer 2 und 3 Nachrichten austauschen. Die Teilnehmer 2 und 3 können sich allerdings nicht direkt miteinander verständigen. Diese Situation kann beim Medienzugriff zu Kollisionen von Nachrichten führen. Wenn der Teilnehmer 2 eine Nachricht an Teilnehmer 1 senden möchte, kann der Teilnehmer 3 diese Aktivität nicht feststellen. Falls er während der Übertragung von 2 an 1 auch einen Sendewunsch hat, würde er sofort mit der Übertragung beginnen. Die Nachrichten von Teilnehmer 2 und 3 würden dann bei Teilnehmer 1 kollidieren. Obwohl weder Teilnehmer 2 noch 3 eine Kollision feststellen, schlagen beide Übertragungsversuche fehl. Diese Problematik wird als das Problem des versteckten Teilnehmers (*engl. Hidden Terminal*) bezeichnet.

Zusätzlich kann bei dieser Art der Teilnehmeranordnung ein weiteres Problem auftreten. Wenn der Teilnehmer 1 an 2 eine Nachricht sendet, registriert Teilnehmer 3 die Aktivität auf dem Medium. Besteht bei Teilnehmer 3 ebenfalls ein Sendewunsch, allerdings mit dem Ziel Teilnehmer 4, kann er nicht befriedigt werden. Obwohl aufgrund der Reichweite keine Kollision bei Teilnehmer 1 oder 4 auftreten würde, wird der Sendewunsch zurückgestellt. Teilnehmer 3 kann nicht erkennen, dass seine Sendung zu keiner Kollision führen würde. In diesem Fall ist der Teilnehmer 3 ein ausgelieferter Teilnehmer, da seine Aktivität unterbleiben muss.

B.2 Ablauf der Reservierung bei RTS/CTS

Für das Problem des versteckten Teilnehmers sind verschiedene Lösungen möglich. Eine Variante wird im Standard IEEE 802.11 vorgeschlagen - die Verwendung von RTS/CTS-Nachrichten für die Reservierung. Eine andere Möglichkeit wäre die Vereinbarung eines Token-Verfahrens, bei dem nur der Teilnehmer mit dem Token die Berechtigung zum Senden von Nachrichten besitzt. Bei dem RTS/CTS-Verfahren werden vor der eigentlichen Übertragung der Nutzdaten zwei verschiedene Nachrichten zwischen den Teilnehmern ausgetauscht.

Der Ablauf des RTS/CTS-Verfahrens ist in Abbildung B.1 (b) beispielhaft dargestellt. Wenn beispielsweise der Teilnehmer 2 einen Sendewunsch hat, prüft er zunächst, ob das Medium bereits von anderen Teilnehmern belegt wird. Ist das nicht der Fall, sendet der Teilnehmer eine Anfrage zum Senden (Request To Send - RTS). Die RTS-Nachricht beinhaltet unter anderem die Adresse des Anfragenden. Wenn der Teilnehmer 1 die Nachricht korrekt empfangen hat und kein anderer Teilnehmer einen Sendewunsch signalisiert, antwortet er mit einer Bereitschaftsnachricht (Clear To Send - CTS). Die Nachricht enthält die spezielle Freigabe für den Teilnehmer 2. Hat dieser wiederum die CTS-Nachricht empfangen, kann er mit dem Senden der eigentlichen Nutzdaten beginnen. Der Teilnehmer 3 kann die RTS-Nachricht nicht empfangen. Dennoch erkennt er, nachdem der Teilnehmer 1 die CTS-Nachricht gesendet hat, dass im Folgenden das Übertragungsmedium belegt sein wird. Ein Vorteil des Verfahrens liegt in den geringen Kosten für die Signalisierung. Wenn große Mengen Nutzdaten übertragen werden, nehmen die RTS- und CTS-Nachrichten im Verhältnis nur wenig Übertragungskapazität in Anspruch. Bei geringen Mengen von Nutzdaten machen die Signalisierungsnachrichten einen größeren Teil der Kommunikation aus.

Kaixin [XGB02] hat die Leistungsfähigkeit dieses Verfahrens untersucht. In dem Beitrag wird das Verfahren analytisch modelliert. Die Ergebnisse zeigen, dass die Effektivität des RTS/CTS-Verfahrens von der Topologie und den Ausbreitungsbedingungen abhängt. Bei Interferenzen und hohen Lasten nimmt die Leistungsfähigkeit ab.

C Einfluss der relativen Verzögerungszeit auf die Regelbarkeit

In diesem Abschnitt wird der Zusammenhang zwischen der netzspezifischen Verzögerungszeit und der Regelbarkeit einer Strecke diskutiert. Er kann als Ausgangspunkt für die Dimensionierung der relativen Verzögerungszeit bei der Anwendung der Arbeitszyklusanpassung dienen.

Die mittlere Ankunftsrate λ hängt von dem mittleren zu erwartenden Anstieg $|x'(t)|_{mean}$ und dem Parameter Δx ab (siehe Gleichung (2.5)).

$$\lambda = \frac{|x'(t)|_{mean}}{\Delta x} \quad (C.1)$$

An dieser Ankunftsrate wird sich auch der Arbeitszyklus orientieren, der durch die Anpassung im Mittel erreicht werden kann. Die Ankunftsrate wiederum ist durch die relative Verzögerungszeit δ mit der mittleren Verzögerungszeit $t_{PackDelay}$ verknüpft.

$$\delta = t_{PackDelay} \cdot \lambda \quad (C.2)$$

Aus regelungstechnischer Sicht kann die Ausgleichszeit T_g auf den maximalen Signalanstieg bezogen werden. Dafür muss allerdings die Amplitude des Signals abgeschätzt werden. Die Ausgleichszeit kann dann näherungsweise mit

$$T_g = \frac{\hat{x}}{|x'(t)|_{max}} \quad (C.3)$$

bestimmt werden. Aus Abschnitt 2.4 ist außerdem bekannt, dass das Zeitkonstantenverhältnis $T_g/(T_t + T_u)$ die Regelbarkeit bestimmt. Dieser Zusammenhang wird hier aufgegriffen und vereinfacht. Es wird angenommen, dass im Wesentlichen nur die Totzeit T_t die Verzögerung der Strecke bestimmt. Mit den vorangegangenen Gleichungen (C.1) bis (C.3) ergibt sich daher

$$\begin{aligned} \frac{T_g}{T_t + T_u} &\approx \frac{T_g}{T_t} = \frac{T_g}{t_{PackDelay}} = \frac{\frac{\hat{x}}{|x'(t)|_{max}}}{\frac{\delta \cdot \Delta x}{|x'(t)|_{mean}}} = \frac{\hat{x}}{\delta \cdot \Delta x} \cdot \frac{|x'(t)|_{mean}}{|x'(t)|_{max}} \\ \frac{T_g}{T_t + T_u} &\approx \frac{\hat{x}}{\delta \cdot \Delta x} \cdot \frac{|x'(t)|_{mean}}{|x'(t)|_{max}}. \end{aligned} \quad (C.4)$$

Diese Gleichung kann für eine vereinfachte Abschätzung der Regelbarkeit von Strecken herangezogen werden. Wenn eine gute Regelbarkeit erreicht werden soll, muss die Ungleichung entsprechend der Regel in Gleichung (2.6) formuliert werden:

$$\frac{\hat{x}}{\delta \cdot \Delta x} \cdot \frac{|x'(t)|_{mean}}{|x'(t)|_{max}} \geq 10. \quad (C.5)$$

In Gleichung (C.5) sind jetzt noch drei Parameter enthalten, die sich auf das zu beobachtende Signal beziehen: \hat{x} , $|x'(t)|_{mean}$ und $|x'(t)|_{max}$. Der Parameter Δx bezieht sich auf die Einstellung des Sensors und kann vom Anwender entsprechend der geforderten Genauigkeit gewählt werden. Wenn diese Größen bekannt sind, kann die relative Verzögerungszeit durch

$$\delta \leq \frac{\hat{x}}{10 \cdot \Delta x} \cdot \frac{|x'(t)|_{mean}}{|x'(t)|_{max}} \quad (C.6)$$

berechnet werden. Wenn zusätzlich das Verhältnis $|x'(t)|_{mean}/|x'(t)|_{max}$ abgeschätzt werden kann (ähnlich Tabelle 2.1 auf Seite 16), ist nur noch der Parameter \hat{x} zu bestimmen. Damit kann eine bestimmte relative Verzögerungszeit δ gefordert werden. Ist sie nicht zu realisieren, muss durch den Parameter Δx Einfluss auf die Regelbarkeit genommen werden.

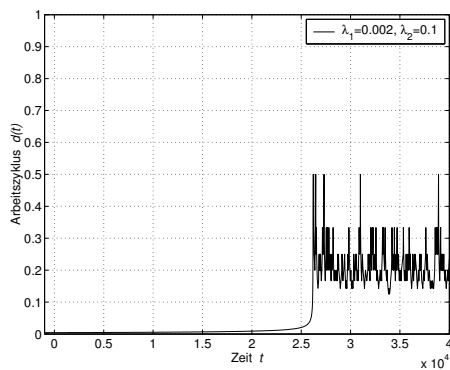
Eine weitere Möglichkeit, die netzbedingte Totzeit zu begrenzen, ist der Einsatz eines Heartbeat-Mechanismus. Dabei wird von dem Sensor eine Nachricht generiert, falls eine bestimmte Zeit verstrichen ist, ohne dass eine signalbedingte Nachricht ausgelöst wurde. Die Ankunftsrate kann damit auf ein Minimum begrenzt werden, wodurch sich auch der Arbeitszyklus auf ein entsprechendes Minimum einstellen würde.

In diesem Abschnitt wurde der Zusammenhang basierend auf $|x'(t)|_{mean}$ und $|x'(t)|_{max}$ analysiert. Die Analyse beruht auf reinen Mittelwertberechnungen und berücksichtigt keine Kriterien, die beispielsweise die Stabilität von Regelkreisen prüfen. Die Darstellung in diesem Abschnitt bietet keine vollständige Klärung des Zusammenhangs zwischen den netzspezifischen Eigenschaften und der Regelbarkeit. Vielmehr soll sie als Ansatzpunkt für weitere Arbeiten dienen, um den Zusammenhang zu formulieren.

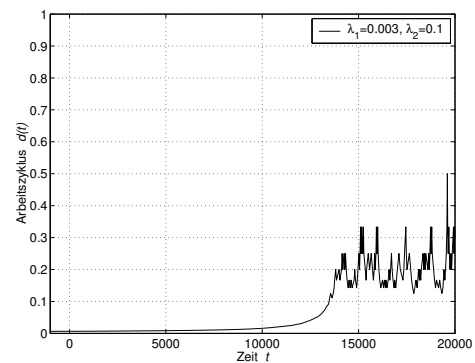
D Weitere Ergebnisse

In Abschnitt 5.4.2 wurde gezeigt, dass bei einem Sprung der Ankunftsrate eine kritische Situation entstehen kann, da die aufgelaufenen Nachrichten nicht schnell genug über das Medium transportiert werden können. Der Übergang zu einer weniger kritischen Situation beim Sprung der Ankunftsrate um zwei Zehnerpotenzen ist im Bereich von $0,001 \leq \lambda \leq 0,1$ Nachrichten pro Zeiteinheit zu finden. Ergänzend zu den Ergebnissen in Abschnitt 5.4.2 werden in den Abbildungen D.1 bis D.3 die Ergebnisse zu den Ankunftsraten $\lambda_1 = \{0,002; 0,003; 0,004; 0,005\}$ dargestellt.

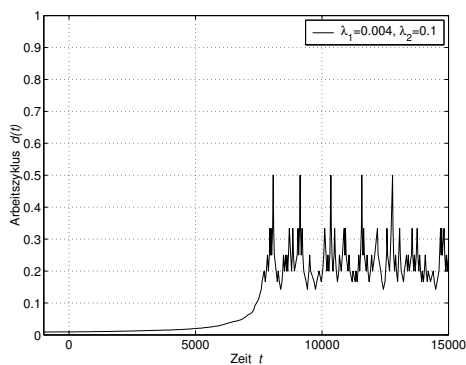
Die Abbildungen D.2 und D.3 zeigen die direkte Auswirkung des Sprungs auf die Verzögerungszeit und die Warteschlangenlänge. Es ist zu beobachten, dass bei einem Sprung von $\lambda_1 = 0,004$ auf $\lambda_2 = 0,1$ sowohl die Verzögerungszeit als auch die Warteschlangenlänge nur noch um ein geringes Vielfaches vom Normalwert abweicht. Wenn die Ankunftsrate von $\lambda_1 = 0,005$ auf $\lambda_2 = 0,1$ springt, entsteht hinsichtlich der Warteschlangenlänge und der Verzögerungszeit keine kritische Situation.



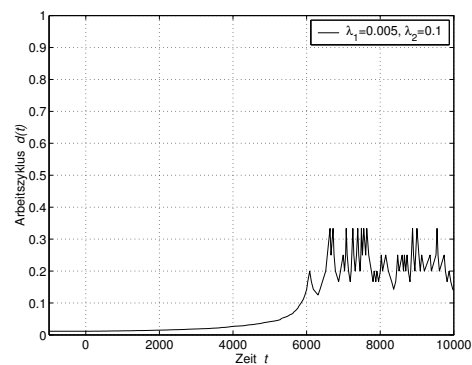
(a) Arbeitszyklus bei $\lambda_1 = 0,002$ und $\lambda_2 = 0,1$ Nachrichten pro Zeiteinheit



(b) Arbeitszyklus bei $\lambda_1 = 0,003$ und $\lambda_2 = 0,1$ Nachrichten pro Zeiteinheit

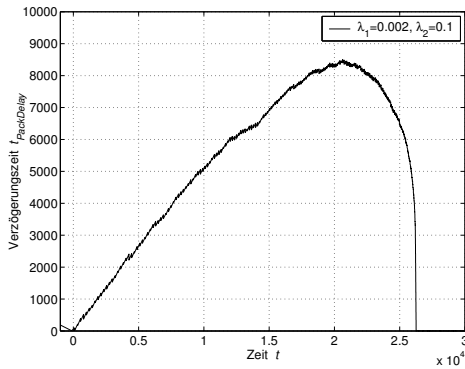


(c) Arbeitszyklus bei $\lambda_1 = 0,004$ und $\lambda_2 = 0,1$ Nachrichten pro Zeiteinheit

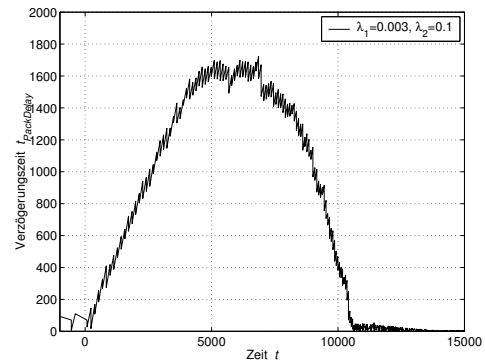


(d) Arbeitszyklus bei $\lambda_1 = 0,005$ und $\lambda_2 = 0,1$ Nachrichten pro Zeiteinheit

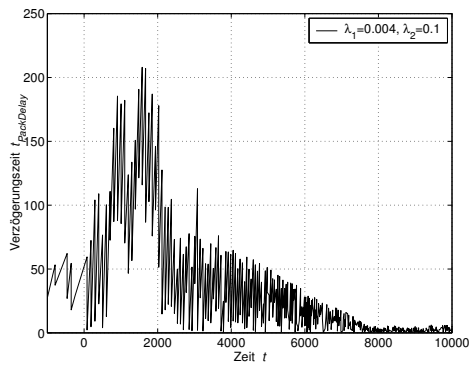
Abbildung D.1: Bei einer sprunghaften Veränderung der Ankunftsrate wird der Arbeitszyklus angepasst.



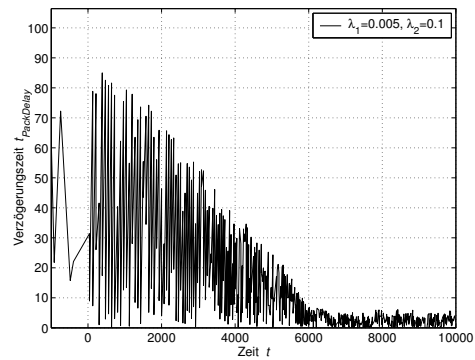
(a) Verzögerungszeit bei $\lambda_1 = 0,002$ und $\lambda_2 = 0,1$ Nachrichten pro Zeiteinheit



(b) Verzögerungszeit bei $\lambda_1 = 0,003$ und $\lambda_2 = 0,1$ Nachrichten pro Zeiteinheit

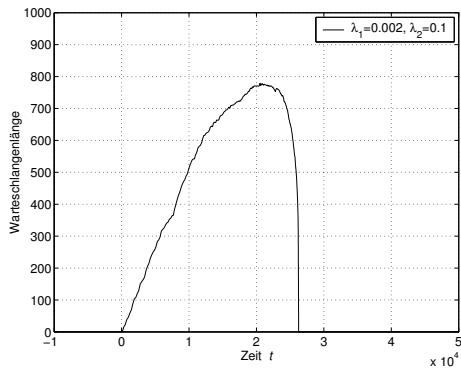


(c) Verzögerungszeit bei $\lambda_1 = 0,004$ und $\lambda_2 = 0,1$ Nachrichten pro Zeiteinheit

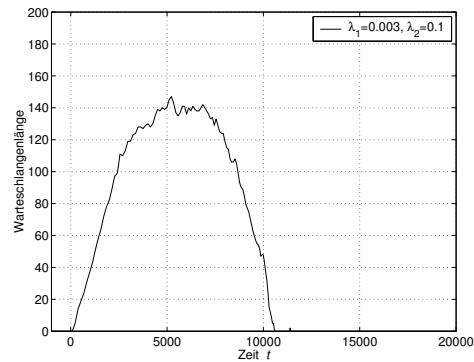


(d) Verzögerungszeit bei $\lambda_1 = 0,005$ und $\lambda_2 = 0,1$ Nachrichten pro Zeiteinheit

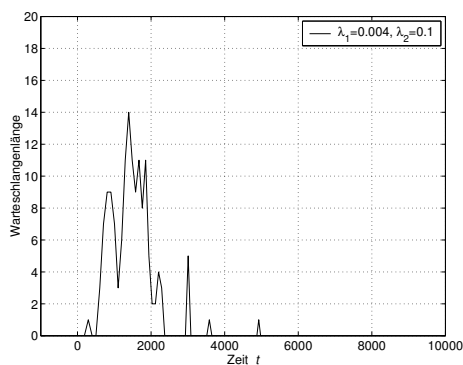
Abbildung D.2: Bei einer sprunghaften Veränderung der Ankunftsrate steigt die Verzögerungszeit zum Teil unverhältnismäßig hoch an. Bei einem Sprung der Ankunftsrate beginnend bei $\lambda_1 = 0,004$ steigt die Verzögerungszeit nur um ein geringes Vielfaches.



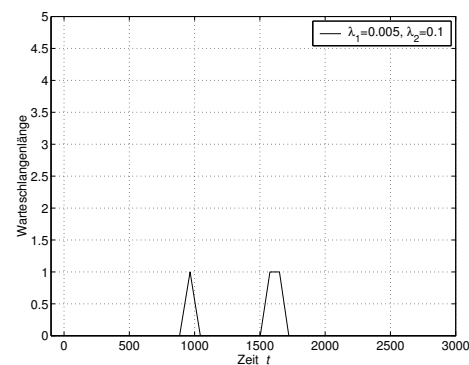
(a) Warteschlangenlänge bei $\lambda_1 = 0,002$ und $\lambda_2 = 0,1$ Nachrichten pro Zeiteinheit



(b) Warteschlangenlänge bei $\lambda_1 = 0,003$ und $\lambda_2 = 0,1$ Nachrichten pro Zeiteinheit



(c) Warteschlangenlänge bei $\lambda_1 = 0,004$ und $\lambda_2 = 0,1$ Nachrichten pro Zeiteinheit



(d) Warteschlangenlänge bei $\lambda_1 = 0,005$ und $\lambda_2 = 0,1$ Nachrichten pro Zeiteinheit

Abbildung D.3: Bei einer sprungartigen Veränderung der Ankunftsrate steigt die Warteschlangenlänge zum Teil unverhältnismäßig hoch an. Bei einem Sprung der Ankunftsrate beginnend bei $\lambda_1 = 0,004$ steigt die Warteschlangenlänge nur um ein geringes Vielfaches.

Literatur- und Quellenverzeichnis

- [ACGP03] Giuseppe Anastasi, Marco Conti, Enrico Gregori und Andrea Passarella. Balancing Energy Saving and QoS in the Mobile Internet: An Application-Independent Approach. In *Proceedings of the 36th Annual Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS'03) - Track 9*, Seite 305.1. IEEE Computer Society, Washington, DC, USA, 2003. ISBN 0-7695-1874-5.
- [ALG⁺04] Nevine AbouGhazaleh, Patrick Lanigan, Sameh Gobriel, Daniel Mosse und Rami Melhem. Dynamic Rate-Selection for Extending the Lifetime of Energy-Constrained Networks. In Hossam Hassanein, Richard L. Oliver, Golden G. Richard III und Linda F. Wilson (Herausgeber), *Proceedings of the 23rd IEEE International Performance, Computing and Communications Conference (IPCCC 2004)*, Seiten 553–558. Phoenix, Arizona, April 2004.
- [ASD⁺06] Muneeb Ali, Umar Saif, Adam Dunkels, Thiemo Voigt, Kay Römer, Koen Langendoen, Joseph Polastre und Zartash Afzal Uzmi. Medium Access Control Issues in Sensor Networks. *ACM Computer Communication Review*, 36(2):33–36, April 2006.
- [Atm03] Atmel Corporation. *Datasheet AT90S2323/LS2323/S2343/LS2343 Summary*, 2003. www.atmel.com.
- [AvHK⁺01] Karen Aardal, Stan van Hoesel, Arie Koster, Carlo Mannino und Antonio Sassano. Models and Solution Techniques for Frequency Assignment Problems. Technischer Bericht, Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik Berlin, Dezember 2001. ZIB Report 01-40.
- [BC02] Manish Bhardwaj und Anantha P. Chandrakasan. Bounding the Lifetime of Sensor Networks Via Optimal Role Assignments. In *Proceedings of INFOCOM*, Seiten 1587–1596. Juni 2002.
- [BCH⁺05] Sebnem Baydere, Erdal Cayirci, Isa Hacioglu, Onur Ergin, Anibal Otero, Ivan Maza, Phillipe Bonnet und Maria Lijding. Applications and Application Scenarios. Project Report EW-T311-YTU-001-04, Oktober 2005.

- [BDMC⁺94] P. Buchholz, J. Dunkel, B. Müller-Clostermann, M. Sczittnick und S. Zäske. *Quantitative Systemanalyse mit Markovschen Ketten*. Teubner Verlag, 1994.
- [Ber99] Jürgen Bergmann. *Lehr- und Übungsbuch Automatisierungs- und Prozessleittechnik - Eine Einführung für Ingenieure und Wirtschaftsingenieure*. Fachbuchverlag Leipzig, 1999.
- [Blu03] BlueChip Communication AS. *Datasheet RFB433*. Lysaker, Norway, 2003. www.bluechip.no.
- [BP04] Peter Buchholz und Jörn Plönnigs. Analytical Analysis of Access-schemes of the CSMA-type. In *Proceedings of the 5th International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS 2004)*. Vienna, Austria, September 2004.
- [CBD02] Tracy Camp, Jeff Boleng und Vanessa Davis. A Survey of Mobility Models for Ad Hoc Network Research. In *Wireless Communication & Mobile Computing (WCMC): Special issue on Mobile Ad Hoc Networking: Research, Trends and Applications*, Band 2, Seiten 483–502. April 2002.
- [CBG01] Anantha P. Ch, Manish Bhardwaj und Timothy Garnett. Upper Bounds on the Life of Sensor Networks. Seiten 785–790, Februar 2001.
- [CEE⁺01] Alberto Cerpa, Jeremy Elson, Deborah Estrin, Lewis Girod, Michael Hamilton und Jerry Zhao. Habitat Monitoring: Application Driver for Wireless Communications Technology. In *Proceedings of the First ACM SICOMM Workshop on Data Communications in Latin America and the Caribbean*. San Jose, Costa Rica, April 2001.
- [Chi06] Chipcon AS. *CC2420 - 2.4 GHz IEEE 802.15.4 / ZigBee-ready RF Transceiver*, April 2006. Datasheet.
- [CJBM02] Benjie Chen, Kyle Jamieson, Hari Balakrishnan und Robert Morris. Span: An Energy-Efficient Coordination Algorithm for Topology Maintenance in Ad Hoc Wireless Networks. *ACM Wireless Networks*, 8(5), September 2002.
- [CKK03] Jong-Mu Choi, Young-Bae Ko und Jai-Hoon Kim. Enhanced Power Saving Scheme for IEEE 802.11 DCF Based Wireless Networks. In Marco Conti, Silvia Giordano, Enrico Gregori und Stephan Olariu (Herausgeber), *Proceedings of the IFIP-TC6 8th International Conference on Personal and Wireless Communication (PWC 2003)*, Nummer 2775 in LNCS, Seiten 835–840. Springer Verlag, Venice, Italy, September 2003.
- [DLS98] Dietmar Dietrich, Dietmar Loy und Hans-Jörg Schweinzer. *LON-Technologie, Verteilte Systeme in der Anwendung*. Hüthig Verlag, Heidelberg, 1998.

- [dSLF04] R. I. da Silva, J. C. B. Leite und M. P. Fernandez. A Heuristic Approach to Energy Saving in Ad Hoc Networks. In Jose Neumann de Souza, Petre Dini und Pascal Lorenz (Herausgeber), *Proceedings of the 11th International Conference on Telecommunications*, Nummer 3124 in LNCS, Seiten 437–442. Fortaleza, Brazil, August 2004.
- [EGK02] Andreas Eisenblätter, Martin Grötschel und Arie M. C. A. Koster. Frequenzplanung im Mobilfunk. *DMV-Mitteilungen*, (1):18–25, 2002.
- [EGPS01] Deborah Estrin, Lewis Girod, Greg Pottie und Mani Srivastava. Instrumenting the World with Wireless Sensor Networks. In *Proceedings of the International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP 2001)*. Salt Lake City, Utah, Mai 2001.
- [EM85] Horst Elschner und Albrecht Möschwitzer. *Einführung in die Elektrotechnik-Elektronik*. VEB Verlag Technik Berlin, Berlin, 1985.
- [FDF⁺99] Jörg Fischer, Jürgen Deissner, Gerhard Fettweis, Dietrich Hunold, Ralf Lehnert, Mathias Schweigel, Jens Voigt und Jörg Wagner. Object-Oriented Modeling of a Generic Mobile Radio System for Dynamic System Simulation. In *Symposium on Performance Evaluation of Computer and Telecommunication System*, Seiten 240–247. Juli 1999.
- [FJ86] H. Fortak und A. Jahn. Entwicklung von Testreferenzjahren (TRY) für Klimaregionen der Bundesrepublik Deutschland. Technischer Bericht, Institut für Geophysikalische Wissenschaften, FU Berlin, 1986. BMFT FB T 86 051.
- [GKSG03] Ingmar Glauche, Wolfram Krause, Rudolf Sollacher und Martin Greiner. Continuum Percolation of Wireless Ad Hoc Communication Networks. *Physica A*, Seiten 577–600, 2003.
- [GNC⁺01] Jose A. Gutierrez, Marco Naeve, Ed Callaway, Monique Bourgeois, Vinay Mitter und Bob Heile. IEEE 802.15.4: A Developing Standard for Low-Power Low-Cost Wireless Personal Area Networks. *IEEE Network*, 15(5):12–19, September 2001.
- [HCB00] Wendi Heinzelman, Anantha Chandrakasan und Hari Balakrishnan. Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks. In *Proceedings of the Hawaii International Conference on System Sciences*. Januar 2000.
- [HDB04] Barbara Hohlt, Lance Doherty und Eric Brewer. Flexibel Power Scheduling for Sensor Networks. In *Proceedings of the 3rd International Symposium on Information Processing in Sensor Networks - (IPSN 2004)*, Seiten 205–214. Berkeley, CA, USA, April 2004.

- [HHS01] Uwe Hatnik, Jürgen Haufe und Peter Schwarz. Objektorientierte Simulation von heterogenen Kommunikations-Systemen. In *4th GI/ITG/GMM-Workshop „Rechnergestützter Schaltungs- und Systementwurf“*. Februar 2001.
- [HLV04] David H. Hwang, Bo-Cheng Charles Lai und Ingrid Verbauwhede. Energy-Memory-Security Tradeoffs in Distributed Sensor Networks. In Ioanis Nikolaidis, Michel Barbeau und Evangelos Kranakis (Herausgeber), *Proceedings of the Third International Conference on Ad-Hoc, Mobile and Wireless Networks (ADHOC-NOW 2004)*, Nummer 3158 in LNCS, Seiten 70–81. Springer Verlag, Vancouver, Canada, Juli 2004.
- [HMR⁺04] Robert Hänsel, Olga Mauch, Ilja Radosch, Stephan STeglich und Radu Popescu-Zeletin. Distributed Middleware for Global Knowledge in Sensor Networks. *Frequenz*, 2004.
- [HSPRM05] Jussi Haapola, Zach Shelby, Carlos Pomalaza-Raez und Petri Mähönen. Cross-layer Energy Analysis of Multi-hop Wireless Sensor Networks. In Erdal Cayirci, Sebnem Baydere und Paul Havinga (Herausgeber), *Proceedings of the 2nd European Workshop on Wireless Sensor Networks*, Seiten 33–44. Istanbul, Turkey, Februar 2005.
- [Ins01] Texas Instruments. *MSP430x13x, MSP430x14x Mixed Signal Microcontroller*, Februar 2001. Datasheet.
- [Ins02] Institute of Electrical and Electronics Engineers. IEEE Std 802.15.1. Technischer Bericht, IEEE, Juni 2002.
- [Ins03] Institute of Electrical and Electronics Engineers. IEEE Std 802.15.4. Technischer Bericht, IEEE, Mai 2003.
- [Jas02] Jürgen Jasperneite. *Leistungsbewertung eines lokalen Netzwerkes mit Class-of-Service Unterstützung für die prozessnahe Echtzeitkommunikation*. Dissertation, Otto-von-Guericke Universität Magdeburg, Magdeburg, 2002.
- [JD04] Jie Jiang und Wenhua Dou. A Coverage-Preserving Density Control Algorithm for Wireless Sensor Networks. In Ioanis Nikolaidis, Michel Barbeau und Evangelos Kranakis (Herausgeber), *Proceedings of the Third International Conference on Ad-Hoc, Mobile and Wireless Networks (ADHOC-NOW 2004)*, Nummer 3158 in LNCS, Seiten 42–55. Springer Verlag, Vancouver, Canada, Juli 2004.
- [JMA03] Neha Jain, Dilip K. Madathil und Dharma P. Agrawal. Energy Aware Multipath Routing for Uniform Resource Utilization in Sensor Networks. In *Information Processing in Sensor Networks - IPSN 2003*, Band 2634 von LNCS, Seiten 473–487. Palo Alto, CA, USA, April 2003.

- [Kab87] Klaus Kabitzsch (Herausgeber). *Mikrorechner in der Automatisierungspraxis*. Akademie-Verlag, Berlin, 1987. ISBN 3-05-500243-1.
- [Kar03] Holger Karl (Herausgeber). *An Overview of Energy Efficiency Techniques for Mobile Communication Systems*. Telecommunication Networks Group, TU Berlin, Berlin, September 2003. Report of the Working Group 7 Low-power broadband wireless communication of the Arbeitsgruppe Mobilkommunikation, DLR/BMBF.
- [KBP] Klaus Kabitzsch, Peter Buchholz und Jörn Plönnigs. *Netze der Automation - Analyse und Planung von CSMA basierten Systemen*. In Vorbereitung.
- [KDP02] Klaus Kabitzsch, Dietmar Dietrich und Gerhard Pratl (Herausgeber). *Lon-Works - Gewerkeübergreifende Systeme*. VDE Verlag GmbH, Berlin, 2002.
- [Kop97] Hermann Kopetz. *Real-Time Systems - Design Principles for Distributed Embedded Applications*. Kluwer Academic Publishers, 1997.
- [KS04] Ramin Khalili und Kave Salamatian. Evaluation of Packet Error Rate in Wireless Networks. In *Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems - (MSWIM 2004)*. Venice, Italy, Oktober 2004.
- [KW03] Holger Karl und Andreas Willig. A short survey of wireless sensor networks. Technischer Bericht TKN Technical Report TKN-03-018, Oktober 2003.
- [LJ79] Peter Langrock und Walter Jahn. *Einführung in die Theorie Markovscher Ketten und ihre Anwendung*. Teubner Verlag, Leipzig, 1979.
- [LKR04a] Gang Lu, Bhaskar Krishnamachari und Cauligi Raghavendra. An Adaptive Energy-Efficient and Low-Latency MAC for Data Gathering in Sensor Networks. In *Proceedings of the 4th International Workshop on Algorithms for Wireless, Mobile, Ad Hoc and Sensor Networks (WMAN 04)*. April 2004.
- [LKR04b] Gang Lu, Bhaskar Krishnamachari und Cauligi S. Raghavendra. Performance Evaluation of the IEEE 802.15.4 MAC for Low-Rate Low-Power Wireless Networks. In Hossam Hassanein, Richard L. Oliver, Golden G. Richard III und Linda F. Wilson (Herausgeber), *Proceedings of the 23rd IEEE International Performance, Computing and Communications Conference (IPCCC 2004)*, Seiten 701–706. IEEE, Phoenix, Arizona, April 2004.
- [Lun04] Jan Lunze. *Regelungstechnik 1*. Springer Verlag, 2004.
- [Mah97] Bruce A. Mah. An Empirical Model of HTTP Network Traffic. In *Sixteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 97)*. Kobe, Japan, April 1997.

- [Mis06] Marek Miskowicz. Efficiency of Level-Crossing Sampling for Bandlimited Gaussian Random Processes. In *6th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems*. Torino, Italy, Juni 2006.
- [MLN03] Raquel A. F. Mini, Antonio A. F. Loureiro und Badri Nath. Prediction-Based Energy Map for Wireless Sensor Networks. In Marco Conti, Silvia Giordano, Enrico Gregori und Stephan Olariu (Herausgeber), *Proceedings of the IFIP-TC6 8th International Conference on Personal and Wireless Communication (PWC 2003)*, Nummer 2775 in LNCS, Seiten 12–26. Springer Verlag, Venice, Italy, September 2003.
- [MOS05] Diba Mirza, Maryam Owrang und Curt Schurgers. Energy-efficient Wakeup Scheduling for Maximizing Lifetime of IEEE 802.15.4 Networks. In *Proceedings of the First International Conference on Wireless Internet (WICON 2005)*, Seiten 130–137. Budapest, Hungary, Juli 2005.
- [Mot95] Motorola. *LonWorks - Technology Device Data*, 1995.
- [NBD05] Rohit Naik, Subir Biswas und Samir Datta. Distributed Sleep-Scheduling Protocols for Energy Conservation in Wireless Networks. In *Proceedings of the 38th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS'05)*. Hawaii, Januar 2005.
- [NK04a] Mario Neugebauer und Klaus Kabitzsch. A New Protocol for a Low Power Sensor Network. In Hossam Hassanein, Richard L. Oliver, Golden G. Richard III und Linda F. Wilson (Herausgeber), *Proceedings of the 23rd IEEE International Performance, Computing and Communications Conference (IPCCC 2004)*, Seiten 393–399. IEEE, Phoenix, Arizona, April 2004.
- [NK04b] Mario Neugebauer und Klaus Kabitzsch. Proposal and Application Aware Analysis of a Wireless Sensor Network Protocol. In *Proceedings of the 11th International Telecommunications Network Strategy and Planning Symposium*. Vienna, Austria, Juni 2004.
- [NK04c] Mario Neugebauer und Klaus Kabitzsch. Sensor Lifetime Using SendOn-Delta. In *Informatik 2004 - Workshop on Sensor Networks*, Lecture Notes in Informatics. Ulm, Germany, September 2004.
- [NKSK02] S. Narayanaswamy, V. Kawadia, R. S. Sreenivas und P. R. Kumar. Power Control in Ad-Hoc Networks: Theory, Architecture, Algorithm and Implementation of the COMPOW Protocol. In *Proceedings of the European Wireless Conference – Next Generation Wireless Networks: Technologies, Protocols, Services and Applications*, Seiten 156–162. Florence, Italy, Februar 2002.
- [NPK05a] Mario Neugebauer, Jörn Plönnigs und Klaus Kabitzsch. A New Beacon Order Adaptation Algorithm for IEEE 802.15.4 Networks. In *Proceedings*

- of the 2nd European Workshop on Wireless Sensor Networks (EWSN 2005)*, Seiten 302–311. Istanbul, Turkey, Januar 2005.
- [NPK05b] Mario Neugebauer, Jörn Plönnigs und Klaus Kabitzsch. Duty Cycle Adaptation with Respect to Traffic. In *Proceedings of the 10th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA 2005)*. Catania, Italy, September 2005.
- [NPK06] Mario Neugebauer, Jörn Plönnigs und Klaus Kabitzsch. Analysis of Duty Cycle Adaptation in Wireless Sensor Networks. In *Proceedings of the 11th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA 2006)*. Prague, Czech Republic, September 2006.
- [OMT02] Paul G. Otanez, James R. Moyne und Dawn M. Tilbury. Using Deadbands to Reduce Communication in Networked Control Systems. In *Proceedings of the American Control Conference*. Mai 2002.
- [PBNK06] Jörn Plönnigs, Peter Buchholz, Mario Neugebauer und Klaus Kabitzsch. Automated Modeling and Analysis of CSMA-Access Schemes for Building Automation Networks. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2(2):103–111, Mai 2006.
- [Per] Perpetuum Ltd. <http://www.perpetuum.co.uk/>. Visited: September, 2005.
- [PNK04] Jörn Plönnigs, Mario Neugebauer und Klaus Kabitzsch. A Traffic Model for Networked Devices in the Building Automation. In *Proceedings of the 5th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS 2004)*, Seiten 137–145. Vienna, September 2004.
- [PR99] Charles E. Perkins und Elizabeth M. Royer. Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing. In *Proceedings of the 2nd IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications*, Seiten 90–100. New Orleans, LA, Februar 1999.
- [Pro95] J. G. Proakis. *Digital Communications*. McGraw-Hill, New York, dritte Auflage, 1995.
- [PSS00] Sung Park, Andreas Savvides und Mani B. Srivastava. SensorSim: A Simulation Framework for Sensor Networks. In *Proceedings of the 3rd ACM International Workshop on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile systems*, Seiten 104–111. ACM Press, 2000. ISBN 1-58113-304-9.
- [Röm05] Kay Römer. *Time Synchronisation and Localization in Sensor Networks*. Dissertation, ETH Zürich, Zürich, Switzerland, 2005.

- [ROGLA03] V. Rajendran, K. Obraczka und J. J. Garcia-Luna-Aceves. Energy-Efficient, Collision-Free Medium Access Control for Wireless Sensor Networks. In *Proceedings of the First International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, Seiten 181–192. Los Angeles, USA, November 2003.
- [Ros75] J. A. Rosanow. *Stochastische Prozesse - Eine Einführung*. Akademie-Verlag, Berlin, 1975.
- [Ros97] Sheldon M. Ross. *Introduction to Probability Models*. Academic Press, San Diego, 1997.
- [Rou03] Shad Roundy. *Energy Scavenging for Wireless Sensor Nodes with a Focus on Vibration to Electricity Conversion*. Dissertation, University of California at Berkeley, Berkeley, CA, USA, 2003.
- [SA03] Saswati Sarkar und Maria Adamou. A Framework for Optimal Battery Management for Wireless Nodes. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 21(2):179–188, Februar 2003.
- [SB00] Erwin Samal und Wilhelm Becker. *Grundriß der praktischen Regelungstechnik*. Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, 2000.
- [Sch03] Frank Schmidt. Wartungsfreie Funksensoren für Gebäudetechnik, Industrie und Automobiltechnik. In *Proceedings Wireless Technologies Congress*. Sindelfingen, Oktober 2003.
- [Sch06] Katja Schwieger. *Betrachtung zur Effizienz in Funknetzwerken mit geringer Datenrate*. Dissertation, Technische Universität Dresden, 2006.
- [SD97] Peter Schwarz und Ulrich Donath. Simulation-based Performance Analysis of Distributed Systems. In *International Workshop Parallel and Distributed Real-Time Systems*, Seiten 244–249. Geneva, Switzerland, 1997.
- [SGAP00] Katayoun Sohrabi, Jay Gao, Vishal Ailawadhi und Gregory J. Pottie. Protocols for Self-Organisation of a Wireless Sensor Network. *IEEE Personal Communications*, Seiten 16–27, Oktober 2000.
- [SK02] Gunnar Stein und Klaus Kabitzsch. Concept of an Architecture for Wireless Building Automation. In *Proceedings of the 6th IEEE AFRICON Conference*, Band 1, Seiten 139–142. George, South Africa, September 2002.
- [SK03] Gunnar Stein und Klaus Kabitzsch. A Radio Protocol For Low Power Wireless Sensor Networks. In *Proceedings of the 5th IFAC Conference on Fieldbus Systems and their Applications (FeT 2003)*, Seiten 53–58. Aveiro, Portugal, Juli 2003.
- [Ste97] Stefan Rüping and Ralf Hunstock and Uwe Gunreben. Simulation of LonWorks Systems. In *Proc. of the LonUsers International Fall 97 Conference*. 1997.

- [Tan90] Andrew S. Tanenbaum (Herausgeber). *Computer-Netzwerke*. Wolfram's Fachverlag, zweite Auflage, 1990. ISBN 3-925328-79-3.
- [TG02] Godfrey Tan und John Guttag. A Locally Coordinated Scheduling Algorithm. In *27th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks*. Tampa, USA, November 2002.
- [TUKY01] Toyoaki Tomura, Kiyoshi Uehiro, Satoshi Kanai und Susumu Yamamoto. Developing Simulation Models of Open Distributed Control System by Using Object-Oriented Structural and Behavioral Patterns. In *Fourth IEEE International Symposium on Object-Oriented Real-Time Distributed Computing*, Seiten 428–437. Magdeburg, Germany, Mai 2001.
- [Unb90] Rolf Unbehauen. *Systemtheorie - Grundlagen für Ingenieure*. Oldenbourg Verlag, München, 1990.
- [vDL03] Tijs van Dam und Koen Langendoen. An Adaptive Energy-efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks. In *Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems - (Sensys 03)*, Seiten 171–180. ACM Press, 2003.
- [VRS03] Thiemo Voigt, Hartmut Ritter und Jochen Schiller. Solar-Aware Routing in Wireless Sensor Networks. In Marco Conti, Silvia Giordano, Enrico Gregori und Stephan Olariu (Herausgeber), *Proceedings of the IFIP-TC6 8th International Conference on Personal and Wireless Communication (PWC 2003)*, Nummer 2775 in LNCS, Seiten 847–852. Springer Verlag, Venice, Italy, September 2003.
- [WAJR⁺05] Geoffrey Werner-Allen, Jeff Johnson, Mario Ruiz, Jonathan Lees und Matt Welsh. Monitoring Volcanic Eruptions with a Wireless Sensor Network. In *Proceedings of the 2nd European Workshop on Wireless Sensor Networks (EWSN 2005)*. Istanbul, Turkey, Januar 2005.
- [XGB02] Kaixin Xu, Mario Gerla und Sang Bae. How Effective is the IEEE 802.11 RTS/CTS Handshake in Ad Hoc Networks. In *Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference 2002, (GLOBECOM '02)*. Los Angeles, CA, USA, Nov 2002. ISBN 0-7803-7632-3.
- [YHE02] Wei Ye, John Heidemann und Deborah Estrin. An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks. In *Proceedings of the IEEE Infocom*, Seiten 1567–1576. USC/Information Sciences Institute, IEEE, New York, NY, USA, Juni 2002.
- [ZGE02] Jerry Zhao, Ramesh Govindan und Deborah Estrin. Residual Energy Scans for Monitoring Wireless Sensor Networks. In *Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC'02)*. Orlando, FL, USA, März 2002.