

Matthias Vodel

Energieeffiziente Kommunikation
in verteilten, eingebetteten Systemen

Wissenschaftliche Schriftenreihe

EINGEBETTETE, SELBSTORGANISIERENDE SYSTEME

Band 13

Prof. Dr. Wolfram Hardt (Hrsg.)

Matthias Vodel

**Energieeffiziente Kommunikation
in verteilten, eingebetteten Systemen**



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
CHEMNITZ

Universitätsverlag Chemnitz
2014

Impressum

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Angaben sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Chemnitz, Techn. Univ., Habil., 2014

Technische Universität Chemnitz/Universitätsbibliothek

Universitätsverlag Chemnitz

09107 Chemnitz

<http://www.bibliothek.tu-chemnitz.de/UniVerlag/>

Herstellung und Auslieferung

Verlagshaus Monsenstein und Vannerdat OHG

Am Hawerkamp 31

48155 Münster

<http://www.mv-verlag.de>

ISSN 2196-3932 (Druck)

ISSN 2196-4815 (online)

ISBN 978-3-944640-05-1

<http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-131891>

VORWORT ZUR WISSENSCHAFTLICHEN SCHRIFTENREIHE "EINGEBETTETE, SELBSTORGANISIERENDE SYSTEME"

Der vorliegende Band der wissenschaftlichen Schriftenreihe *Eingebettete, Selbstorganisierende Systeme* widmet sich verteilten, eingebetteten Systemen im Kontext energieeffizienter Kommunikationsprozesse. Getrieben durch technologische Weiterentwicklungen und neue Nutzungsprofile nimmt der Vernetzungsgrad elektronischer Geräte in unserem täglichen Leben rapide zu. Neben einem ausgeprägten Netzwerkcharakter sind aktuelle und zukünftige Anwendungsszenarien wesentlich durch einen hohen Mobilitätsgrad geprägt. Daraus ergeben sich zunehmend Problemstellungen bzgl. geeigneter Kommunikationskonzepte und der hierfür benötigten Energieressourcen.


Im Rahmen dieser Arbeit stellt Dr. Vodel Technologien, Konzepte und Protokolle vor, die der Optimierung von Kommunikationsprozessen in verteilten, stark ressourcenbeschränkten Systemen dienen. Die einzelnen Ansätze arbeiten auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen innerhalb der Systemarchitektur und umfassen sowohl Hardwarekomponenten als auch die Datenverarbeitungsprozesse in der softwareseitigen Laufzeitumgebung. Es erfolgt eine strukturierte Betrachtung von Basistechnologien sowie darauf aufbauend Verfahren des Netzwerk-, Daten- und Energiemanagements.

Ein weiterer Schwerpunkt der Arbeit bezieht sich auf den Prozess der Systemintegration und der damit einhergehenden Systemkonfiguration. Unter Beachtung applikationsspezifischer Rahmenbedingungen sowie funktionaler Anforderungen können gezielt geeignete Optimierungsstrategien ausgewählt und in einer ganzheitlich angepassten Systemarchitektur kombiniert werden.

Anhand konkreter Fallstudien wird das Optimierungspotential verschiedener Ansätze sowohl simulativ als auch auf Basis realer Hardwareplattformen evaluiert und diskutiert. Zur Bewertung der Energieeffizienz kommt ein neu entwickeltes Quantifizierungsmodell zum Einsatz, welches die kommunikativen Aspekte verteilter Applikationsszenarien vollständig einbezieht.

Die vorliegende Arbeit stellt ein umfassendes Nachschlagewerk im Bereich verteilter, eingebetteter Systeme dar und ist gleichzeitig ein wichtiges Werkzeug zur Unterstützung von Entwicklern im Rahmen des Designprozesses stark ressourcenbeschränkter Kommunikationsplattformen.

Ich freue mich, Dr. Vodel für die Veröffentlichung seiner Arbeit in dieser wissenschaftlichen Schriftenreihe gewonnen zu haben, und wünsche allen Lesern einen interessanten Einblick in dieses vielschichtige Themengebiet.



Prof. Dr. Wolfram Hardt

Professur Technische Informatik

Wissenschaftlicher Leiter Universitätsrechenzentrum

Technische Universität Chemnitz

Januar 2014



Fakultät für Informatik

Energieeffiziente Kommunikation in verteilten, eingebetteten Systemen

Habilitationsschrift

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur habilitatus
(Dr.-Ing. habil.)

vorgelegt

der Fakultät für Informatik
Technische Universität Chemnitz

von: Dr.-Ing. Matthias Vodel
geboren am: 22.03.1982
geboren in: Rodewisch

Gutachter: Prof. Dr.-rer. nat. Wolfram Hardt
Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauschert
Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Gerhard Fettweis

Danksagung

Drei aufregende, zugleich aber auch lehrreiche Jahre sind an der TU Chemnitz vergangen und eine umfassende Habilitationsschrift ist entstanden. An dieser Stelle möchte ich mich bei jenen Menschen bedanken, die mir in diesem Lebensabschnitt zur Seite gestanden haben.

An erster Stelle soll hier mein Doktorvater, Prof. Dr. Wolfram Hardt, genannt werden. Sein Vertrauen in meine Arbeit gab mir den Freiraum zur eigenständigen Bearbeitung unterschiedlicher Forschungsthemen. Die zahlreichen, fachlich fundierten Diskussionen halfen mir bei der Fokussierung dieser Arbeit und trugen wesentlich zur Schärfung der Struktur bei. Für die gemeinsame Zeit und die intensive Betreuung möchte ich mich in jeder Form bedanken.

Auch Prof. Dr. Thomas Bauschert gilt mein Dank. Seine konstruktiven Rückmeldungen und Vorschläge haben die Qualität dieser Arbeit verbessert. Prof. Dr. Dr. h.c. Gerhard Fettweis danke ich für den freundlichen Kontakt und seine Expertise im Bereich drahtloser Kommunikationstechnologien.

Ich möchte mich weiterhin bei meinen Kollegen an der Professur Technische Informatik bedanken. Trotz vieler Projekte im Industrie- und Wissenschaftsumfeld war stets ein positives Arbeitsklima vorzufinden, in dem Fragen offen besprochen werden konnten. Ein besonderer Dank gilt hier meinem Bürokollegen und Freund Mirko Caspar in Hinblick auf sein intuitives Gespür für kritische Zusammenhänge. In unzähligen Stunden interessanter Gespräche hat mich unser direkter und konstruktiver Diskussionsstil tiefgreifend geprägt. Ein großer Dank richtet sich auch an Mirko Lippmann, auf dessen Fachwissen in vielen gemeinsamen Projekten immer Verlass war. Selbiges gilt auch für René Bergelt, den ich als wissenschaftliche Hilfskraft bis zum Diplom begleiten durfte und nun als neuen Kollegen an der Professur schätze. Stephan Blokzyl danke ich für die spannende Zeit im Rahmen des Sagitta Projektes. Die gewonnene Expertise im Bereich der Nachrichtentechnik sowie der Bildverarbeitung gab mir viele neue fachliche Impulse. Sein Ehrgeiz hat mich nachhaltig beeindruckt und motiviert.

Meinem weiteren Freundeskreis innerhalb sowie außerhalb der TU Chemnitz danke ich, dass sie mir auch abseits wissenschaftlicher Themen immer zur Seite standen. Trotz teils sehr großer Distanzen und wenig Zeit fanden sich immer Möglichkeiten für gemeinsame Treffen, um das so wichtige Gleichgewicht zwischen Arbeit und Freizeit sicherzustellen.

Natürlich danke ich auch meinen Eltern und meiner Schwester für das Vertrauen und die Unterstützung. Auch wenn die gemeinsame Zeit in der Heimat immer seltener und somit kostbarer wird, begleiten sie mich auf meinem Weg und helfen in jeder erdenklichen Art.

Die letzten Zeilen dieser Danksagung widme ich meiner Frau, Stefanie, die mir seit mehr als zwölf Jahren zur Seite steht. Für das Verfassen dieser Habilitationsschrift musste Sie einen teils chaotischen Ehemann ertragen und auf viele gemeinsame Stunden verzichten. Ihre Liebe und ihr Einfühlungsvermögen gaben mir den nötigen Rückhalt, um diese Arbeit dennoch zielstrebig und konsequent zu vollenden. Danke, dass es dich gibt . . .

. . . Mi amas vin . . .

Kurzfassung

Verteilte, Eingebettete Systeme beeinflussen unser tägliches Leben in unzähligen Bereichen. Durch die technologische Weiterentwicklung im Kontext hochgradig mobiler, drahtlos vernetzter Anwendungsszenarien treten verstärkt Problemstellungen bezüglich der Kommunikation in den Vordergrund. Folglich repräsentieren effiziente und robuste Kommunikationskonzepte eine wesentliche Anforderung an die Systemarchitektur. Hinzu kommen komplexe Datenverarbeitungsprozesse, welche in einer heterogenen Systemumgebung und unter Beachtung anwendungsspezifischer Rahmenbedingungen effizient koordiniert werden müssen.

Die vorliegende Habilitationsschrift greift die Thematik Kommunikation in verteilten, stark ressourcenbeschränkten Systeme unter dem Aspekt der Energieeffizienz auf und vermittelt hier einen umfassenden Einblick in die verschiedenen Forschungsschwerpunkte. In diesem Zusammenhang werden zunächst grundlegende Begrifflichkeiten definiert und inhaltlich klar abgegrenzt. Relevante, technologische Entwicklungen der beiden letzten Dekaden werden vorgestellt, thematisch eingeordnet und kritisch diskutiert. Anschließend erfolgt die funktional getrennte Betrachtung eingebetteter Kommunikationsplattformen auf Netzwerk-, Daten- sowie Energiemanagementebene. Im Rahmen der Systemintegration und Konfiguration erfolgt schließlich die Anpassung aller Teilkomponenten in eine applikationsspezifisch angepasste Gesamtarchitektur.

Der inhaltliche Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf der strukturierten Betrachtung von Optimierungsstrategien für energieeffiziente Kommunikationsprozesse, sowohl hardware- als auch softwareseitig. Erst durch das präzise Zusammenspiel von *Kommunikationsparadigma*, *Kommunikationstechnologien* und *Kommunikationsprotokollen* wird ein ganzheitlich optimiertes System zur Verfügung gestellt, welches die vorhandenen Ressourcen effizient nutzt.

Im weiteren Verlauf der Arbeit werden ausgewählte Optimierungsstrategien anhand konkreter Anwendungsszenarien im Kontext ressourcenbeschränkter, verteilter Systeme analysiert und bewertet. Ausgehend von einem Referenzsystem erfolgt die stufenweise Einbindung mehrerer Verfahren und Konzepte auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen:

- Überführung in ein *asynchrones, gepuffertes Kommunikationsparadigma*
- Integration von *Wake-Up-Receiver-Technologien*
- Einbindung unterschiedlicher *Datenaggregations- / Datenfusionsverfahren*

Aus den Ergebnissen werden qualitative und quantitative Rückschlüsse auf das Optimierungspotential hinsichtlich der Energieeffizienz von Kommunikationsprozessen gezogen. Die gewonnenen Erkenntnisse dienen als wichtige Richtgrößen für zukünftige Entwicklungen sowohl auf Hardware- als auch auf Softwareebene.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	XIII
Tabellenverzeichnis	XVII
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	2
1.2 Zielsetzung	3
1.3 Inhaltliche Strukturierung	4
2 Definitionen & Thematische Abgrenzung	7
2.1 Verteilte, eingebettete Systeme	7
2.1.1 Eingebettete Systeme	7
2.1.2 Verteilte Systeme im Kontext eingebetteter Architekturen	8
2.2 Energieeffizienz	11
2.3 Optimierung der Energieeffizienz	12
2.3.1 System-Ebene	13
2.3.2 Hardware-Ebene	14
2.3.3 Software-Ebene	15
2.4 Modell zur Quantifizierung der Energieeffizienz	16
2.4.1 Quantifizierung auf lokaler Ebene	17
2.4.2 Quantifizierung auf globaler Ebene	18
2.5 Zusammenfassung	21
3 Basistechnologien & Konzepte	23
3.1 Eingebettete, verteilt agierende Systeme	23
3.1.1 Drahtlose Ad Hoc Netzwerkstrukturen	23
3.1.2 Drahtlose Low-Power Kommunikationsstandards	39
3.1.3 Hardwareplattformen	44
3.1.4 Betriebssysteme	51
3.1.5 Middleware-Architekturen	55
3.1.6 Anwendungsszenarien	58
3.1.7 Technologietransfer	62
3.2 Selbstorganisation	65
3.2.1 Self-X Eigenschaften	68
3.2.2 Schwarmintelligenz	70
3.2.3 Grenzen der Selbstorganisation	72
3.3 Aktuelle Entwicklungen im Bereich Übertragungstechnologien	72
3.3.1 Smart Antenna Systeme	72
3.3.2 Ultra-Breitband Technologien	75
3.3.3 Li-Fi Technologien	77

Inhaltsverzeichnis

3.4	Wake-Up-Receiver Technologien	78
3.4.1	Grundlagen	78
3.4.2	Konzeptionelle Rahmenbedingungen	80
3.4.3	Funktionsweise & Vor-/Nachteile	82
3.4.4	Klassifizierung	86
3.4.5	WuRx Systeme	88
3.4.6	Anwendungsszenarien	90
3.5	Zusammenfassung	92
4	Netzwerkmanagement	95
4.1	Netzwerkmodellierung	95
4.2	Medienzugriff / Sicherungsschicht	96
4.2.1	MAC Protokolle	97
4.2.2	Anwendungsoptimierte und Energieeffiziente MAC Protokolle	100
4.3	Topologiemanagement	104
4.3.1	Optimierungsziele	104
4.3.2	Prozeduraler Ablauf	106
4.3.3	Optimierungsansätze und -verfahren	107
4.4	Routing	111
4.4.1	Broadcast Storms	115
4.4.2	Klassifizierung	116
4.4.3	Geo-Routing	122
4.4.4	Multipath-Routing	124
4.4.5	Clustering Algorithmen	126
4.4.6	Kooperative Routingstrategien	128
4.4.7	Anwendungsspezifische Routingstrategien	130
4.4.8	WRTA - WuRx-Optimised Routing and Topology Optimisation Approach	131
4.4.9	Evaluierung WRTA	135
4.5	Cross-Layer Strategien	140
4.5.1	Cross-Layer Routing	142
4.5.2	Cross-Layer Architekturen	142
4.5.3	RMU - Cross-Layer-Ressourcenmanagement	145
4.6	Zeitsynchronisation	147
4.6.1	Ursachen & Auswirkungen	147
4.6.2	Klassifizierung & Umsetzung	148
4.6.3	CE-TimeSync	154
4.6.4	Evaluierung CE-TimeSync	155
4.7	Lokalisierung & Ortung	156
4.7.1	Trilateration	159
4.7.2	Triangulation	161
4.7.3	Szenenanalyse	161
4.7.4	Näherungsanalyse	161
4.7.5	Nutzung von Heuristiken	162

4.8	Transportprotokolle	163
4.8.1	Optimierungsansätze im Bereich der Transportprotokolle	164
4.9	Zusammenfassung	165
5	Datenmanagement	167
5.1	Thematische Abgrenzung	167
5.2	Aufgabenplanung	168
5.3	Datenaggregation	172
5.3.1	Klassische Aggregationsansätze	174
5.3.2	Datenbankorientierte Verfahren	176
5.3.3	PLANetary	177
5.3.4	Betrachtung aus Energieeffizienzaspekten	180
5.4	Datenfusion	181
5.4.1	Mehrheitsvotum	182
5.4.2	Dynamische Datenfusion mit Hilfe mobiler Agenten	183
5.5	Datenverwaltung & Datenverteilung	184
5.6	GREASE Framework	185
5.7	Zusammenfassung	187
6	Energiemanagement	189
6.1	Energiewandlerkonzepte	191
6.2	Energiespeicherung & -verteilung	193
6.3	Energiegetriebene Kommunikationsparadigmen	195
6.4	Zusammenfassung	196
7	Systemintegration	197
7.1	Designprozess	197
7.2	Konfigurationsprozess	199
7.3	Optimierung	202
7.3.1	Auswahl Kommunikationsparadigmen	203
7.3.2	Auswahl Kommunikationstechnologien	205
7.3.3	Auswahl Kommunikationsprotokolle	207
7.4	Simulation & Evaluierung	209
7.5	Zusammenfassung	210
8	Fallstudien & Analyse	211
8.1	Evaluierungsplattformen	212
8.1.1	Simulation	212
8.1.2	Hardwareplattformen	213
8.2	Fallstudie 1 - Einflüsse durch asynchrone Kommunikation & WuRx Konzepte	217
8.2.1	Hardwarerealisierung Single-Hop-Szenarien	218
8.2.2	Simulation Multi-Hop-Szenarien	222
8.2.3	Energieeffizienzbetrachtungen in verteilten, heterogenen Systemen	226
8.2.4	Schlussfolgerungen	230

Inhaltsverzeichnis

8.3	Fallstudie 2 - Einflüsse durch Datenmanagementverfahren	231
8.3.1	Energieeffizienzbetrachtungen von Datenaggregationsverfahren	231
8.3.2	Qualitative Einflüsse durch Datenaggregationsverfahren	236
8.3.3	Schlussfolgerungen	240
8.4	Fallstudie 3 - Energieeffizienzbetrachtung bei stufenweiser Integration	241
8.4.1	Schlussfolgerungen	244
8.5	Zusammenfassung	244
9	Résumé & Ausblick	247
9.1	Im Rahmen der Arbeit entwickelte Verfahren und Werkzeuge	249
9.1.1	WRTA	249
9.1.2	RMU	249
9.1.3	GREASE	250
9.1.4	PLANetary	250
9.1.5	CE-TimeSync	250
9.1.6	Weiterentwicklungen & Optimierungen	250
9.2	Ausblick	251
	Eigene Veröffentlichungen	253
	Studentische Arbeiten	257
	Literaturverzeichnis	258
	Nomenklatur	292
	Curriculum Vitae	294

Abbildungsverzeichnis

1.1	Abstraktionsebenen der Sensordatenverarbeitung	1
2.1	Effizienzmetrik auf Hard- und Softwareebene	13
3.1	Car2Car & Car2X Kommunikation	27
3.2	Kommunikationshierarchien in Sensornetzen	29
3.3	Regelschleifen	31
3.4	Verarbeitungsprozess Sensor-Aktor-System	32
3.5	Semi-automatisierte und automatisierte SANET Strukturen	33
3.6	Abstraktionsebenen Sensor-Aktor-Netzwerk	34
3.7	DTN Protokollstackerweiterung	35
3.8	DTN Datenübertragung	36
3.9	DTN Architektur - Beispielszenario	38
3.10	IEEE 802.15.4 / ZigBee Protokollstack	41
3.11	IEEE 802.15.4 Topologien	42
3.12	Struktur Sensorknotenplattform	44
3.13	Vergleich Energieeffizienz Mikrocontroller	46
3.14	Vergleich Energieeffizienz Transceiver	48
3.15	Sensorknoten	48
3.16	Qualitativer Vergleich Sensorknotenarchitekturen	50
3.17	Vergleich Kernelarchitekturen	52
3.18	Vergleich verfügbarer Betriebssysteme für eingebettete Systeme	54
3.19	Middleware Architektur	56
3.20	Mires Middleware Architektur	57
3.21	DART und GITEWS Frühwarnsystem	59
3.22	Aktives System zur Tsunami-Erkennung und Abschwächung	60
3.23	Klassifizierung bekannter Feldbussysteme	61
3.24	Einsatzbereiche verteilter Sensor-Aktor-Systeme	64
3.25	Determinismus vs. Skalierbarkeit	65
3.26	Zentralisierte, Verteilte und Selbstorganisierende Systeme	68
3.27	Adaptive / Smarte Antennensysteme.	73
3.28	Adaptive Antennensysteme - Beispiele	74
3.29	Kommunikationsstandards	76
3.30	Mehrwege-Empfangsfehler / Echosignale	77
3.31	Energiebedarf Funkmodule in Abhängigkeit vom Betriebsmodus	80
3.32	Gegenüberstellung Duty Cycle / WuRx Kommunikationkonzepte	82
3.33	Kommunikationsschnittstellen - Vergleich Energiebedarf Standby	83
3.34	Auswirkungen von WuRx Technologien auf die Übertragungslatenz	84
3.35	Laufzeitverhalten: Energiebedarf Kommunikation	85

Abbildungsverzeichnis

3.36	WuRx Knoten - Systemarchitektur	87
3.37	Funktionsprinzip NEMS WuRx (passiv)	89
3.38	eXtreme Scale Mote (XSM)	90
3.39	Selektive Nutzung von Netzwerkknoten	91
4.1	Einordnung der zentralen Protokolle des TCP/IP Stacks	97
4.2	Hidden- / Exposed Terminal Problem	99
4.3	Schrittweise Topologieoptimierung	104
4.4	Beispiel Topologieoptimierung	106
4.5	Einordnung Topologiekontrolle	108
4.6	Routing - Prozeduraler Ablauf	111
4.7	Modell eines Kommunikationsnetzes	112
4.8	Netzoptimierungsphasen	114
4.9	Broadcast Storm Szenario	116
4.10	Trade-Off: Routing im Bereich WSN & SANET	117
4.11	Bewertung Routingalgorithmen	119
4.12	Vergleich datenzentrischer und adresszentrischer Routingverfahren	122
4.13	Beispiel Geo-Routing	123
4.14	Beispiel GPSR	124
4.15	Beispielszenario für Multipath-Routing	125
4.16	Clustering Konzepte im Bereich WSN / SANET Routing	126
4.17	Kooperative Routingstrategien	129
4.18	Impllosion und Overlap	130
4.19	WRTA Betriebsphasen	132
4.20	WRTA - Informationsverteilung	134
4.21	WRTA Evaluierung- Testkonfiguration	136
4.22	WRTA Evaluierung - Zustandsautomat Demonstratorplattform	137
4.23	WRTA Evaluierung - Berechnete Kommunikationsgraphen	137
4.24	WRTA Evaluierung - Oszilloskopmessung Konfigurationszeiten	138
4.25	WRTA Evaluierung - Latenzzeiten	138
4.26	WRTA Evaluierung - Gesamtkonfigurationszeiten	139
4.27	Cross-Layer Struktur	140
4.28	Beispiel Cross-Layer Architektur	141
4.29	Sensor Protocol Architecture	143
4.30	TinyCubus Architektur	144
4.31	RMU - Resource Management Unit	145
4.32	Anwendungsbeispiel Ressourcenmanagement	146
4.33	Relevanz von Zeitsynchronisation im Bereich WSN	147
4.34	Zeitsynchronisation - Auseinanderdriften der Zeitstempel	148
4.35	Zeitsynchronisation - Round-Trip-Time	151
4.36	Kritischer Pfad Zeitsynchronisation	152
4.37	TPSN Synchronisationsphasen	152
4.38	Verfahren zur Zeitsynchronisation im Vergleich	153
4.39	CE-TimeSync Verfahren	155

Abbildungsverzeichnis

4.40	CE-TimeSync Verfahren - Messergebnisse	156
4.41	relative Positionsbestimmung	157
4.42	absolute Positionsbestimmung	160
4.43	Optimierte Positionsbestimmung durch die Nutzung von Heuristiken.	162
5.1	Lokale Aufgabenplanung knotenintern	169
5.2	Verteilte Aufgabenplanung in der Netzwerktopologie	169
5.3	Paradigmen zur Aufgabenverarbeitung	171
5.4	In-Network-Aggregation	173
5.5	Datenaggregationsformen	174
5.6	Baumaggregation - Topologieexploration	175
5.7	Hierarchische Datenaggregation	176
5.8	PLANetary - Ablaufphasen	178
5.9	PLANetary - periodische Abfragen	179
5.10	PLANetary Konfigurations- und Monitoringtool	179
5.11	Beispiel Datenfusion	181
5.12	Datenfusion durch einfache Mehrheitsentscheidung	182
5.13	GREASE Datenverarbeitungskette	184
5.14	GREASE Framework	185
5.15	GREASE Struktur	186
5.16	GREASE - GUI	186
6.1	Battery Gap Problematik	189
6.2	Energiemanagementkonzepte	190
6.3	Energy Harvesting Konzepte	191
6.4	Energy Harvesting Knoten	192
6.5	Energiemanagement	194
7.1	Applikationsgetriebener Designprozess	198
7.2	Entwicklungsprozess	199
7.3	Energieeffiziente Systemintegration	200
7.4	Lösungsstrategien für energieeffiziente Systemarchitekturen	201
7.5	Systemkonfiguration	201
7.6	Mehrdimensionale Konfigurationsebenen	203
7.7	Operationsmodi für asynchrone WuRx Applikationsumgebungen	206
8.1	Simulationsframework: <i>SimANet</i>	212
8.2	Modellierung in <i>SimANet</i>	213
8.3	Evaluierungsplattform: <i>PLANet</i>	213
8.4	<i>PLANet</i> - Systemarchitektur	214
8.5	nanett Evaluierungsplattform	215
8.6	Verwendete Hardwareplattformen	217
8.7	Fallstudie asynchrone Kommunikation & WuRx - Testaufbau	218
8.8	Fallstudie asynchrone Kommunikation & WuRx - Vergleich Betriebsmodi	220
8.9	Fallstudie asynchrone Kommunikation & WuRx - Messergebnisse Hardware I	221

Abbildungsverzeichnis

8.10	Fallstudie asynchrone Kommunikation & WuRx - Messergebnisse Hardware II	221
8.11	Fallstudie asynchrone Kommunikation & WuRx - Testszzenarien Simulation	222
8.12	Fallstudie asynchrone Kommunikation & WuRx - Beispieldiagramm	223
8.13	Fallstudie asynchrone Kommunikation & WuRx - Simulationsergebnisse	224
8.14	WSN Applikationen: Inhomogene energetische Belastung	225
8.15	Fallstudie asynchrone Kommunikation & WuRx - Heterogenes Testszzenario	227
8.16	Fallstudie asynchrone Kommunikation & WuRx - Energieverbrauch	228
8.17	Fallstudie Datenmanagementverfahren - Testaufbau	232
8.18	Fallstudie Datenmanagementverfahren - Datenvolumen bei Datenbündelung	233
8.19	Fallstudie Datenmanagementverfahren - Energiewerte Datenbündelung	234
8.20	Fallstudie Datenmanagementverfahren - Kommunikationsoverhead	235
8.21	Fallstudie Datenmanagementverfahren - Testszzenarien	237
8.22	Fallstudie Datenmanagementverfahren - Datenaggregation	238
8.23	Fallstudie Datenmanagementverfahren - Umsetzung Tokenstrategie	239
8.24	Fallstudie Datenmanagementverfahren - Tokenverfahren	240
8.25	Fallstudie Stufenweise Integration - Anwendungsszenario	241
8.26	Fallstudie Stufenweise Integration - Energiebedarf	242
9.1	Strukturierung der Arbeit	247

Tabellenverzeichnis

3.1	Übersicht Mikrocontroller	46
3.2	Übersicht Transceiver	47
3.3	Übersicht WSN Plattformen	49
4.1	Übersicht MAC Protokolleigenschaften	98
4.2	Bewertungsfaktoren für Metriken	114
8.1	Leistungsaufnahme PLANet und nanett Evaluationsboards	215
8.2	Fallstudie asynchrone Kommunikation & WuRx - Energieeffizienzwerte	229
8.3	Fallstudie Datenmanagementverfahren - Datenbündelung	233
8.4	Fallstudie Datenmanagementverfahren - Energieeffizienzwerte Datenbündelung	236
8.5	Fallstudie Stufenweise Integration - Energieeffizienzwerte	243

1 Einleitung

Verteilte Systeme finden in nahezu allen Bereichen der Technik und Wissenschaft Anwendung. Beginnend bei einfachen elektronischen Geräten des Alltags, über moderne Assistenzsysteme im Automotive und Aviation Sektor, bis hin zu komplexen Steuerungssystemen im industriellen Umfeld beeinflussen sie den Alltag in unzähligen Bereichen. Hochgradig adaptive und vernetzte Systeme im mobilen, eingebetteten Anwendungskontext repräsentieren dabei einen wesentlichen Entwicklungstrend. Komplexe Sicherheitslösungen zur Gebäude- oder Gebietsüberwachung ermöglichen schon heute die Integration unterschiedlichster Sensorikkomponenten. Immer häufiger werden dabei statische Sensornetze mit mobilen Roboterplattformen oder Drohnen erweitert. Die gewonnenen Informationen werden über eine drahtlose Kommunikationsinfrastruktur in eine gemeinsame Wissensbasis eingepflegt und erhöhen so die Güte innerhalb der Entscheidungslogik. Der Prozess einer stufenweisen Abstraktion von Einzeldaten hin zu umfassendem Wissen ist dabei sehr komplex und stark anwendungsspezifisch. Abbildung 1.1 verdeutlicht diese einzelnen Abstraktionsstufen schematisch.

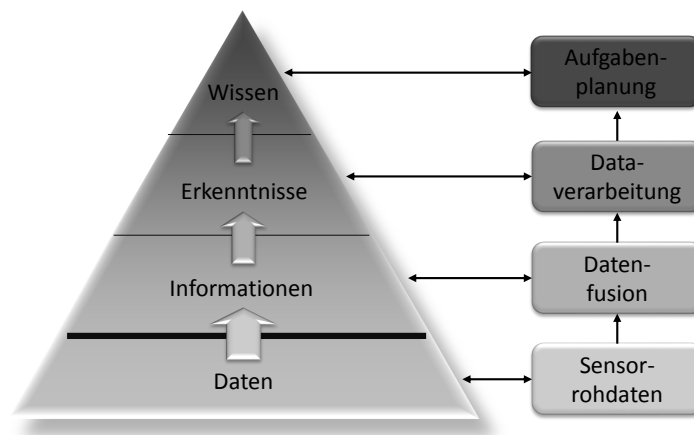


Abbildung 1.1: Abstraktionsebenen der Sensordatenverarbeitung beginnend bei den gemessenen Rohdaten bis zur Wissensbasis auf globaler Systemebene.

Die Datenverarbeitungsprozesse innerhalb solcher heterogenen, verteilten Systeme erfordern Kompromisse hinsichtlich der Verarbeitungsgeschwindigkeit, der Ergebnisqualität sowie des Energiebedarfs und der Kosten. Gleichzeitig steigen die Anforderungen in Bezug auf die Zuverlässigkeit rapide an. Als wesentliche Kriterien treten hierbei Kommunikationsprozesse sowie die zugrundeliegenden Kommunikationskonzepte in den Vordergrund. Sollen verteilt agierende, eingebettete Systeme kooperativ und zeitlich koordiniert zusammenwirken, so sind effiziente und robuste Kommunikationsstrategien eine zentrale Anforderung [223].

1.1 Motivation

Mit dem Wandel von konventionellen, statisch geplanten Netzwerkinfrastrukturen hin zu mobilen, energieautarken Topologien ergeben sich vielfältige Möglichkeiten. Damit einhergehend müssen jedoch nun auch mehrere Herausforderungen gelöst werden. Zum einen betrifft dies die dynamisch veränderlichen Netzwerkkonnektivität auf Basis störungsempfindlicher, drahtloser Funktechnologien. Zum anderen verfügen die mobilen Hardwareplattformen meist nur über sehr stark begrenzte Ressourcen, sowohl bezüglich der Betriebsmittel als auch in Hinblick auf die Energiespeicher. Sind diese Speicher erschöpft, bedeutet dies den Totalausfall des Systems. Ziel muss es demnach sein, die Betriebsbereitschaft der Systeme zu verlängern.

Werden nun energieautarke Langzeitapplikationen betrachtet, wie beispielsweise die genannten Sicherheitssysteme, so besteht die heterogene Netzwerklandschaft aus einer Vielzahl einzelner Subsysteme, die jeweils Messdaten aufnehmen und Informationen austauschen. Resultierend aus den kleinen Abmaßen der eingebetteten Systeme sind auch die Energiespeicher verhältnismäßig klein dimensioniert. Hier beeinflussen die Kommunikationsprozesse den Energiebedarf der Systemplattform erheblich und wirken sich somit signifikant auf die maximale Betriebszeit aus. Bei einer Analyse aktuell am Markt verfügbarer Referenzplattformen zeigt sich hier ein erhebliches Optimierungspotential für die Energieeffizienz der Kommunikationssysteme [160].

Die technologischen Entwicklungen der letzten Dekaden bieten in diesem Kontext vielversprechende Optimierungsansätze auf Hardware- und Softwareebene. Entscheidend für die Effizienz des Gesamtsystems ist dabei die sinnvolle und applikationsspezifische Kombination geeigneter Verfahren in eine angepasste Systemarchitektur [28, 31].

Hierfür ist zunächst eine klare Strukturierung der unterschiedlichen Optimierungsstrategien erforderlich. Des Weiteren sind mehrere Perspektiven auf das Gesamtsystem zu berücksichtigen. So ergeben sich aus der Sicht des Netzwerkmanagements unter Umständen andere Anforderungen an das System als aus Sicht des Datenmanagements. Soll eine energieeffiziente Kommunikationsinfrastruktur geschaffen werden, sind zudem vielfältige Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Subsystemen und Prozessen auf Hardware- sowie Softwareebene von Relevanz. Änderungen im Systementwurf wirken sich dabei unter Umständen unvorhergesehen auf das Kommunikationsverhalten und somit auf die Energiebilanz aus.

Die komplexen Herausforderungen im Zuge einer energieeffizienten Abstimmung aller Kommunikationsprozesse im Kontext verteilt agierender, ressourcenbeschränkter Systeme sowie die ganzheitliche Integration in die Gesamtarchitektur bilden die Motivation dieser Arbeit.

1.2 Zielsetzung

Unter dem Aspekt der Energieeffizienz in verteilten, eingebetteten Systemen sollen im Rahmen dieser Arbeit Optimierungsansätze sowohl auf Hardware- als auch auf Softwareebene vorgestellt, analysiert und strukturiert werden. Ziel ist die Senkung des Energiebedarfs unter Berücksichtigung aller funktionalen und nicht funktionalen Anforderungen im System. Hierzu greifen unterschiedliche Verfahren auf mehreren Abstraktionsebenen ineinander, um ein effizientes Gesamtkonzept für die Kommunikation zu realisieren. Erst durch die gezielte Kombination geeigneter Kommunikationsparadigmen, Kommunikationstechnologien sowie Kommunikationsprotokolle wird ein anwendungsspezifisch optimiertes Kommunikationsverhalten sichergestellt. In diesem Kontext vermittelt die vorliegende Arbeit dem Leser ein grundlegendes und breites Wissensspektrum. Zentrale Themenkomplexe umfassen:

Kommunikationskonzepte & Basistechnologien

Strukturierte Betrachtung eingebetteter, verteilter Systeme auf Hardwareebene, Betriebssystemebene, Middlewareebene und Anwendungsebene. Vorstellung von Konzepten im Bereich mobiler Ad Hoc Netzwerke und der Selbstorganisation.

Netzwerkmanagement

Betrachtung einer verteilt agierenden, eingebetteten Systemarchitektur aus der Perspektive des Netzwerkmanagements. Vermittlung relevanter Themenbereiche wie z.B. Netzwerkmodellierung, Medienzugriff, Routing, Topologiemanagement, Zeitsynchronisierung, Lokalisierung, Transportprotokolle sowie Cross-Layer Strategien.

Datenmanagement

Betrachtung einer verteilt agierenden, eingebetteten Systemarchitektur aus der Perspektive des Datenmanagements. Vermittlung der Themenkomplexe Aufgabenplanung, Datenvorverarbeitung, Datenfusion und Datenverwaltung.

Energiemanagement

Betrachtung einer verteilt agierenden, eingebetteten Systemarchitektur aus der Perspektive des Energiemanagements. Vorstellung von Energiewandler-Konzepten, Energiespeicher-Technologien. Einführung in energiegetriebene Kommunikationsparadigmen.

Systemintegration

Zusammenführung der vorangegangenen Themenbereiche in einem applikationsspezifischen Design- und Konfigurationsprozess. Herausarbeitung von Methoden zur Integration unterschiedlicher Verfahren in eine anwendungsspezifisch optimierte Gesamtarchitektur.

In den Themenkomplexe werden verschiedene Optimierungsstrategien zur Steigerung der Energieeffizienz von Kommunikationsprozessen vorgestellt und diskutiert. Dabei werden wichtige Schlüsselparameter sowie Rahmenbedingungen für den sinnvollen Einsatz der jeweiligen Ansätze identifiziert.

1 Einleitung

Sowohl auf Simulations- als auch auf Hardwareebene erfolgt die Analyse konkreter Optimierungsverfahren hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf das Kommunikationsverhalten und auf die Energieeffizienz. Auf dieser Grundlage sind anschließend qualitative sowie quantitative Aussagen für die Anwendbarkeit in spezifischen Anwendungsbereichen möglich. Die Schlussfolgerungen dienen gleichzeitig als wichtige Entscheidungshilfe für die Konzeption zukünftiger Systemarchitekturen im Bereich verteilt agierender, eingebetteter Systeme. Die Ergebnisse sollen schließlich die Wichtigkeit eines applikationsspezifisch angepassten Entwicklungsprozesses als wesentlicher Qualitätsparameter energieeffizienter Kommunikationsplattformen verdeutlichen.

Neben der strukturierten Aufarbeitung und Analyse aktueller Forschungsthemen werden im Rahmen dieser Arbeit mehrere neu entwickelte Ansätze und Protokolle auf den Gebieten Routing, Ressourcenmanagement, Datenaggregation sowie der Zeitsynchronisation vorgestellt.

1.3 Inhaltliche Strukturierung

Die vorliegende Arbeit untergliedert sich in 9 Kapitel. Einhergehend mit den verwendeten Begrifflichkeiten im Arbeitstitel befasst sich das nachfolgende Kapitel zunächst mit grundlegenden *Definitionen* innerhalb des Themengebietes. Im Hinblick auf die Energieeffizienz von Kommunikationsprozessen wird anschließend ein Modell zur Quantifizierung auf lokaler und globaler Systemebene vorgestellt.

Im Anschluss vermittelt Kapitel 3 grundlegende Informationen zu *Basistechnologien*, die den Einstieg in diesen Themenkomplex erleichtern und somit zum besseren Verständnis beitragen. Es beinhaltet eine Vorstellung relevanter Forschungsbereiche, wie beispielsweise drahtlose Ad Hoc Netzwerktopologien mit den verschiedenen Ausprägungen und Anwendungsbereichen. Außerdem repräsentieren hier Wake-Up-Receiver-Technologien (*WuRx*) und die zugrundeliegenden Kommunikationskonzepte einen weiteren Schwerpunkt des Kapitels. Grundlegende Information zum Thema Selbstorganisation runden den Komplex ab.

Kapitel 4 widmet sich dem *Netzwerkmanagement* in verteilten, eingebetteten Systemstrukturen. Dies umfasst die Netzwerk-Modellierung, den Medienzugriff sowie Topologieoptimierung und Routing. Weitere Themenbereiche befassen sich mit der Zeitsynchronisation und Strategien zur Lokalisierung von Knoten im Bereich mobiler, dezentraler Netzwerke. Auch auf Cross-Layer Strategien wird detailliert eingegangen.

Das *Datenmanagement* bildet den inhaltlichen Rahmen für Kapitel 5. Es befasst sich mit den Themengebieten der dynamischen Aufgabenplanung sowie der lokalen und dezentralen Datenvorverarbeitung im Kontext von Datenaggregation und -fusion.

Im 6. Kapitel erfolgt die Betrachtung der Systemarchitektur aus der Perspektive des *Energiemanagements*. Hier werden auf einer weiteren Abstraktionsebene Energiewandler-, Energiespeicher- und Energieverteilungskonzepte vorgestellt und thematisch in den Kontext energiegetriebener Kommunikationsparadigmen eingeordnet.

1 Einleitung

Kapitel 7 bildet mit der *Systemintegration* einen weiteren Themenschwerpunkt. Hier wird der Design- & Evaluierungsprozess für ein energieeffizientes Kommunikationssystem betrachtet und somit die Integration von Kommunikationsparadigma, Kommunikationstechnologien und Kommunikationsprotokollen. Erst ein gezieltes Zusammenwirken aller Teilbereiche und deren anwendungsspezifische Konfiguration ermöglicht eine optimierte Gesamtarchitektur.

Das darauffolgende Kapitel 8 thematisiert die Analyse konkreter Optimierungsstrategien und -technologien im Rahmen von *Fallstudien*. Diese werden sowohl in Form von Simulationen als auch mittels komplexer Demonstratoren durchgeführt. Es erfolgt dabei die stufenweise Integration asynchroner Kommunikationskonzepte, WuRx Technologien und erweiterter Datenaggregationsansätze. Die möglichen Effizienzsteigerungen bezüglich des Energiebedarfs sind dabei einerseits isoliert, andererseits auch integriert als Verbund zu quantifizieren.

Kapitel 9 bildet den Abschluss dieser Arbeit und resümiert die Ergebnisse in stark komprimierter Form. Weiterführende Themen und Fragestellungen ergänzen dieses Kapitel.

2 Definitionen & Thematische Abgrenzung

Diese Arbeit befasst sich mit verteilt agierenden, eingebetteten Systemen im Kontext einer energieeffizienten Umsetzung aller Kommunikationsprozesse. Grundlage für die weiteren Betrachtungen ist daher zunächst eine thematische Abgrenzung des Forschungsthemas und eine entsprechende Eingliederung in den Anwendungskontext.

2.1 Verteilte, eingebettete Systeme

Die im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Verfahren und Konzepte eignen sich für den Einsatz in *verteilten, eingebetteten Systemen*. Dieses Anwendungsfeld bildet die Schnittmenge aus zwei Mengen digitaltechnischer Systeme - die der eingebetteten Systeme sowie die der verteilten Systeme.

2.1.1 Eingebettete Systeme

Eingebettete Systeme beschreiben zunächst eine spezifische Anwendungsklasse. Hardt [182] und Wolf [399] definieren diese Klasse wie folgt:

„Ein eingebettetes System ist ein technisches System, welches in einen definierten Kontext eingebunden wird. Das System übernimmt Aufgaben zur Daten- beziehungsweise Signalverarbeitung, meist im Kontext von Steuerungs-, Überwachungs- oder Regelfunktionen. Das Verhalten eines eingebetteten Systems lässt sich an den verfügbaren Schnittstellen definieren.“

Dabei wird grundlegend zwischen einem *eingebetteten System* und dem entsprechenden *einbettenden System* unterscheiden, welches einen definierten Anwendungskontext und somit funktionale wie auch nichtfunktionale Anforderungen für das eingebettete System liefert. Folglich sind eingebettete Systeme in ihren Eigenschaften stark an das jeweilige Einsatzszenario adaptiert.

Eine weitere zentrale Eigenschaft eingebetteter Systeme beschreibt den *ressourcenbeschränkten* Charakter der Systemarchitektur. Als *Systemarchitektur* wird dabei allgemein der strukturierte Verbund aus Hardware- und Softwarekomponenten in einem Systems bezeichnet. Diese wirken koordiniert zur Funktionserfüllung zusammen. Eingebettete Systemarchitekturen unterliegen in mehreren Dimensionen starken Ressourcenbeschränkungen:

Speicherbeschränkung:

Einschränkungen bezüglich der Systemfunktionalität sowie der Nutzdatenspeicherung durch klein dimensionierten Programm- und Datenspeicher.

Rechenleistung:

Kostengetriebene, einfache Prozessorarchitekturen führen zu einer Verlängerung der absoluten Ausführungszeiten.

Abmaße:

Einschränkungen des Gesamtvolumens oder der Abmessungen aufgrund von Einbauort und Gewichtsbeschränkungen.

Kommunikationsleistung:

Einschränkungen in der systeminternen Datenübertragungsrate durch einfache Bussysteme. Reduzierte externe Kommunikationsleistung und Reichweite durch ein einfaches Transceiverdesign.

Energie:

Einschränkungen bezüglich der Systemlaufzeit bei energieautarken Plattformen und somit treibender Faktor aller anderen Systemparameter.

Der Grad der Ressourcenbeschränkung ist demnach in eingebetteten Systemarchitekturen erheblich stärker ausgeprägt, als es bei klassischen Computersystemen der Fall ist. Eingebettete Systeme besitzen aufgrund ihres spezifischen Anwendungsfeldes häufig eine stark kostengetriebene Architektur. Die einzelnen Komponenten sind daher meist schlank dimensioniert und bieten durch stark applikationsspezifisch angepasste Eigenschaften nur wenig Leistungsreserven für neue Funktionalitäten.

2.1.2 Verteilte Systeme im Kontext eingebetteter Architekturen

Häufig werden mehrere logische Funktionen eines eingebetteten Systems getrennt in Form unterschiedlicher Systemkomponenten realisiert. Die Separierung kann innerhalb einer einzelnen Systemarchitektur erfolgen, aber auch in Form räumlich getrennter Komponenten, die dann als *Subsysteme* bezeichnet werden. Die Gründe für eine solche Verteilung sind dabei vielfältig. Sie können aus der Applikation resultieren, die eine bestimmte räumliche Ausbreitung erfordert. Aber auch physische Beschränkungen oder wirtschaftliche Gründe (Kostensenkungen) können eine Verteilung erforderlich machen.

Im Zuge der Funktionserfüllung entstehen aus jeder Aufteilung logische Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Komponenten beziehungsweise Subsystemen, wodurch Möglichkeiten zur Kommunikation geschaffen werden müssen. Die jeweiligen Gründe für eine logische Trennung haben dabei direkte Auswirkungen auf die Umsetzung der Kommunikation. Arbeiten folglich mehrere, räumlich aufgeteilte Subsysteme über eine Netzwerkinfrastruktur logisch als Verbund zusammen, wird von einem *verteilten System* gesprochen [78, 114]. Jedes Subsystem verfügt dabei über eigene, teils stark unterschiedliche Systemressourcen zur Erfüllung bestimmter Aufgaben. Nach [269] wird ein verteiltes System dabei wie folgt definiert:

2 Definitionen & Thematische Abgrenzung

”Ein verteiltes System besteht aus einer Zusammenstellung unabhängiger Computer (oder Komponenten), die nutzerseitig als ein ganzheitliches (kohärentes) Gesamtsystem auftreten.”

Im Kontext eingebetteter Systeme ist diese Definition jedoch in mehreren Punkten unzureichend. Zunächst betrifft dies die nutzerseitige Sicht, welche sich in eingebetteten Systemen auf die bereitgestellten Funktionen und Dienste über verfügbare Schnittstellen beschränkt. Ein detailliertes Wissen bezüglich der Ressourcenverteilung in den einzelnen Komponenten ist nur stark eingeschränkt verfügbar. Des Weiteren arbeiten die im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Systeme als ein logischer Ressourcenverbund zusammen. Dementsprechend bezieht sich die Unabhängigkeit nur auf die physischen Instanzen der Komponenten, nicht jedoch auf die logischen Abhängigkeiten der Systeme im Zuge der gemeinsamen Bearbeitung von Aufgaben.

In Anlehnung an [269] wird daher die folgende Definition für ein verteiltes System verwendet und mit den Eigenschaften eingebetteter Systeme verknüpft:

”Ein verteiltes System im Kontext eingebetteter Systeme besteht aus einer räumlich dezentralen Zusammenstellung physisch unabhängiger Subsysteme beziehungsweise Komponenten, die gemeinsam als logischer Verbund eine Menge von Funktionen und Diensten über Systemschnittstellen zur Verfügung stellen. Jedes Subsystem verfügt außerdem über Kommunikationsschnittstellen, auf deren Hilfe ein Informationsaustausch (direkt oder über eine Netzwerkinfrastruktur) realisiert werden kann.”

Ein eingebettetes, verteiltes System (auch als *verteilt agierendes System* bezeichnet) wird demnach als ein logisch ganzheitliches Gesamtsystem mit verteilten Ressourcen betrachtet, welches sich über seine verfügbaren, externen Schnittstellen beschreiben lässt. Hinsichtlich dieser Schnittstellen muss nun abstrakt zwischen *Systemschnittstellen* und *Kommunikationsschnittstellen* unterschieden werden. Systemschnittstellen realisieren die externe Datenanbindung, über die der Außenwelt Funktionen und Dienste bereitgestellt werden. Kommunikationsschnittstellen dienen dem Informationsaustausch zwischen einzelnen Subsystemen im Zuge der verteilten Bearbeitung von Aufgaben. In der konkreten technischen Umsetzung können Kommunikationsschnittstellen auch als Systemschnittstellen eingesetzt werden. Auch der umgekehrte Fall ist möglich.

Mit verteilten Ressourcen und Funktionen müssen je nach Anwendung unterschiedliche gemeinsame Zielstellungen erfüllt werden, welche ein kooperatives beziehungsweise koordiniertes Zusammenwirken der Subsysteme voraussetzen. Die logische Trennung von Funktionen und die physische Verteilung der Subsysteme bedingen dabei angepasste Konzepte, Technologien und Verfahren zur Kommunikation. Der Fokus aktueller Entwicklungen in diesem Bereich liegt klar bei drahtlos vernetzten Strukturen, die dadurch *mobil* agieren können und unter Umständen günstiger in den Herstellungs- beziehungsweise Wartungskosten sind.

*Mobilität*¹ ist dabei die Fähigkeit einzelner Subsysteme, ihre Position zu ändern. Für mobile Anwendungen ist in Folge dessen ein *energieautarker* Betrieb sicherzustellen. Die Systeme

¹konkret räumliche Mobilität

2 Definitionen & Thematische Abgrenzung

nutzen hierfür integrierte Energiespeicher sowie gegebenenfalls natürliche Energiequellen aus ihrer Umgebung. Diese Ressourcen sollten effizient genutzt und verwaltet werden. Die applikationsspezifische Dimensionierung der Energiespeicher und Energiewandler muss dabei auch unter schlechten Rahmenbedingungen eine Mindestsystemlaufzeit sicherstellen. Sind die Energieressourcen aufgebraucht, führt dies im mobilen Kontext meist unmittelbar zu einem Totalausfall des Subsystems. Daraus resultieren wiederum eingeschränkte Ressourcen, eine reduzierte Funktionalität im verteilten System oder im schlimmsten Fall ein Verlust der Gesamtsystemfunktionalität.

Die Positionsänderungen durch Mobilität können ebenfalls Einfluss auf die Netzwerktopologie des verteilten Systems haben. Speziell in drahtlosen Netzwerkinfrastrukturen mit stark begrenzter Kommunikationsreichweite kann dabei nicht ausgeschlossen werden, dass eine Positionsänderung zur Isolierung einzelner Subsysteme oder Teilen der Topologie führt. Dementsprechend sind die in einem verteilten System bereitgestellten Ressourcen *dynamisch*.

Dynamik bezeichnet in diesem Zusammenhang die Eigenschaft verteilter Systeme, über eine zur Laufzeit veränderliche Anzahl von Subsystemen und damit über nicht konstante Ressourcen zu verfügen. Mobilität kann diese Dynamik zusätzlich verstärken. In logischer Konsequenz beinhaltet die Menge der im Rahmen dieser Arbeit betrachteten, verteilten Systemarchitekturen dynamische Eigenschaften. Dies hat wiederum Auswirkungen auf die genutzten Kommunikationsstrategien sowie auf die Zuverlässigkeit auf Applikationsebene.

Vorteile verteilter Systeme ergeben sich durch die Möglichkeiten einer dynamischen Last- und Aufgabenverteilung sowie durch die redundante Auslegung kritischer Subsysteme. So kann die Wahrscheinlichkeit eines *Single Point of Failure* deutlich reduziert werden, was die Robustheit gegenüber externen Störeinflüssen oder partiellen Ausfällen entsprechend erhöht. Gleichzeitig können aus den Kommunikationsaspekten auch negative Auswirkungen auf das Gesamtsystem resultieren. Einschränkungen der Kommunikationsleistung beeinflussen unter Umständen Systemfunktionen oder erhöhen die Bearbeitungszeit.

Weitere allgemeine Zielstellungen und Eigenschaften verteilter Systeme werden wie folgt aufgeschlüsselt:

Flexibilität / Anpassungsfähigkeit:

bezüglich der Aufgabenverteilung und Ressourcenbereitstellung.

Skalierbarkeit:

Dynamische Anpassung der verfügbaren Ressourcen durch Hinzufügen oder Entfernen von Subsystemen (Lastverteilung,).

Ressourcenzugriff:

Bezieht sich auf die Verfügbarkeit aller Subsysteme und Funktionen.

Transparenz:

Gegenüber dem Nutzer, der das verteilte System als ein ganzheitliches Konstrukt wahrnimmt.

Echtzeitanforderungen:

Repräsentieren eine optionale, jedoch im Kontext eingebetteter Systeme häufig eine wichtige Eigenschaft.

Fehlertoleranz / Robustheit:

Gegenüber partiellen Störungen, sowohl externer als auch interner Natur.

2.2 Energieeffizienz

Der thematische Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf *Energieeffizienzbetrachtungen* in verteilt agierenden, eingebetteten Systemarchitekturen. Hierzu sind zunächst die Begriffe Energie und Effizienz formal zu fassen. Die elektrische Energie E beschreibt dabei die elektrische Leistungsaufnahme P über einen Zeitraum t . Sie ergibt sich aus dem Integral des Produkts von elektrischer Spannung $u(t)$ und Stromstärke $i(t)$ über die Zeit t (Zeitspanne t_0 bis t_1):

$$E = P * t ; t \geq 0$$
$$E = \int_{t_0}^{t_1} u(t) * i(t) * dt$$

E entspricht dabei der elektrischen Arbeit W , welche über den betrachteten Zeitraum t der Energieversorgung, im Kontext eingebetteter, mobiler Systeme meist einem Akkumulator, entnommen wird. Der *Energieverbrauch* entspricht der umgewandelten elektrischen Energie, die für den Betrieb eines gegebenen Systems über eine definierte Zeit t benötigt wird. t kann sowohl als direkte Messgröße definiert werden, oder aber sie bildet die benötigte Zeit für die Durchführung eines *Vorgangs* V ab. Jeder Vorgang V umfasst dabei eine Menge von Einzelaktionen, die koordiniert durchgeführt werden. Jede Aktion kann wiederum auf einen Zustandsraum des verteilten Systems sowie jedes einzelnen Subsystems abgebildet werden, der dabei durchlaufen wird.

Der Begriff *Energieeffizienz* ist in der Literatur je nach Anwendungsbereich unterschiedlich definiert. Um verschiedene Technologien, Konzepte und Verfahren bezüglich ihrer Energieeffizienz im Rahmen dieser Arbeit vergleichen zu können, ist es nötig, den Begriff auf den relevanten Abstraktionsebenen formal zu fassen. Im allgemeinen Kontext beschreibt die *Effizienz* ϕ zunächst das Verhältnis von *Nutzen* N und *Kosten* K für einen *Vorgang* V :

$$\phi_V = \frac{N_V}{K_V} \text{ bei } N \in \mathbb{N} ; K, \phi \in \mathbb{R} ; K \geq 1 ; 0 \leq \phi_V \leq 1$$

Auch hier kann eine Abbildung des Vorgangs V auf einen Zustandsraum erfolgen. Unter der Annahme, dass Zustandswechsel nur in festen Zeitperioden erfolgen, ist eine Quantifizierung jedes Zustands sowohl auf Nutzen- als auch auf Kostenseite möglich. Alternativ ist auch eine

rein zeitbasierte Betrachtung möglich. Dann umfasst der Vorgang V eine bestimmte Zeitspanne, in der alle Nutzen- und Kostenwerte aufsummiert werden können.

Eine Maximierung der Effizienz beschreibt zwei wesentliche Zielstellungen.

1. Die *Minimierung* der Kosten K bei *konstantem* Nutzen N (Minimalprinzip / ökonomisches Prinzip).
2. Eine *Maximierung* des Nutzens N bei *konstanten* Kosten K .

Bei einer Einschränkung der Betrachtungen auf den Aspekt Energie besteht auch unter dem Begriff *Energiekonservierung* die Zielstellung, Energie einzusparen. Jedoch wird hier die Möglichkeit offen gehalten, eine maximale Energieeinsparung durch Nicht-Ausführen eines Vorgangs zu erreichen. Hierdurch wären die Kosten sofort minimal und die Energieeffizienz maximal. Dies unterscheidet die Definition grundlegend von den hier gewünschten Energieeffizienzbetrachtungen, bei denen der Nutzen in jedem Fall erhalten bleiben soll und Vorgänge aus energetischer Sicht optimiert durchgeführt werden.

Für das Anwendungsfeld verteilter, eingebetteter Systeme erscheint es im Weiteren sinnvoll, die Kosten K zur Erfüllung des Nutzen N über eine geeignete Kostenfunktionen in Relation zum Energiebedarf E zu setzen, da die verfügbaren Energieressourcen hier eine kritische Beschränkung darstellen. Sind diese Ressourcen aufgebraucht, ist dies gleichbedeutend mit einem Totalausfall des Subsystems und folglich kann die Funktionalität hier nicht mehr gewährleistet werden. Folglich sinkt der Nutzen N auf 0, wodurch sich eine Energieeffizienz $\phi = 0$ ergibt.

2.3 Optimierung der Energieeffizienz

Eine *Optimierung* repräsentiert im Allgemeinen das Streben, den bestehenden Ist-Zustand zu verbessern. Der Begriff beschreibt die Verbesserung der (System-)Eigenschaften bezüglich bestimmter Leistungsparameter [206]. Diese Leistungsparameter müssen quantitativ bewertbar und somit vergleichbar sein. Der Optimierungsprozess umfasst dabei Entscheidungen, Methodiken und konkrete Zielvorgaben.

In Bezug auf technische Systeme wird häufig die Optimierung der Energieeffizienz mit einer Erhöhung des *Wirkungsgrades* gleichgesetzt. Bei einfachen Systemen, wie z.B. aktiven elektronischen Bauelementen, kann dieser Wirkungsgrad über die Verlustleistung als Quotient zwischen abgeführter Leistung P_{ab} (auch Nutzleistung genannt) und zugeführter Leistung P_{zu} berechnet werden. Sowohl Nutzen als auch Kosten können objektiv gemessen werden und die Bestimmung des Effizienzwertes ist trivial.

Bei komplexeren digitaltechnischen Systemen sind Aussagen zur Energieeffizienz deutlich schwieriger. Zum einen beinhalten die Ausführungsplattformen meist eine Vielzahl unterschiedlicher Bauteile, deren Abhängigkeiten berücksichtigt werden müssen. Zum anderen unterteilt sich der Energiebedarf auf zwei Ebenen für Hardwarekomponenten sowie für die

programmierbaren und modifizierbaren Softwarefunktionalitäten. Jede Softwareroutine nutzt dabei Hardwareressourcen zur Ausführung, wodurch indirekt ein Energiebedarf entsteht. Eine direkte Quantifizierung des Energiebedarfs von Softwarefunktionen ist kaum realisierbar, eine Abschätzung des Einflusses auf den Gesamtenergieverbrauch der Systemplattform ist jedoch mit unterschiedlichen Ansätzen möglich. Diese werden im späteren Verlauf des Kapitels näher vorgestellt.

Aufbauend auf den Energieeffizienzdefinitionen besteht das Optimierungsziel im Rahmen dieser Arbeit in der Minimierung der Kosten K bei gleichbleibenden Nutzen N , wodurch ein Wert für die Effizienzwert von $\phi \rightarrow 1(100\%)$ angestrebt wird. In realen Szenarien ist dieser Wert von 100% nicht umsetzbar. In einem verteilt agierenden Systemen resultiert dies aus der Annahme, dass zur Funktionserfüllung nicht stets alle Subsysteme zeitgleich benötigt werden, alle Komponenten aber einen gewissen Energiebedarf für die grundlegende Betriebsbereitschaft aufweisen. Es gilt daher, den sich daraus ergebenden energetischen Overhead zu minimieren, um somit die Kosten K zu senken.

Um festzustellen, ob eine Technologie (Hardware) oder ein Verfahren (Software, d.h. Konzept / Algorithmus / Protokoll) die Energieeffizienz des Gesamtsystems positiv beeinflusst, muss eine Betrachtung auf unterschiedlichen Ebenen erfolgen. Es besteht dabei die Annahme, dass alle funktionalen Anforderungen an das Gesamtsystem zu jedem Zeitpunkt vollständig erfüllt bleiben.

2.3.1 System-Ebene

Auf System-Ebene wird das Gesamtsystem ganzheitlich als Verbund mehrerer verteilt agierender Einzelsysteme betrachtet. Ziel auf dieser Ebene ist die Senkung des Gesamtenergiebedarfs über die Summe aller Subsysteme bei Aufrechterhaltung voller Funktionalität. Auswirkungen von Veränderungen in einzelnen Subsystemen bezüglich der Gesamtenergieeffizienz sind hier leicht beobachtbar.

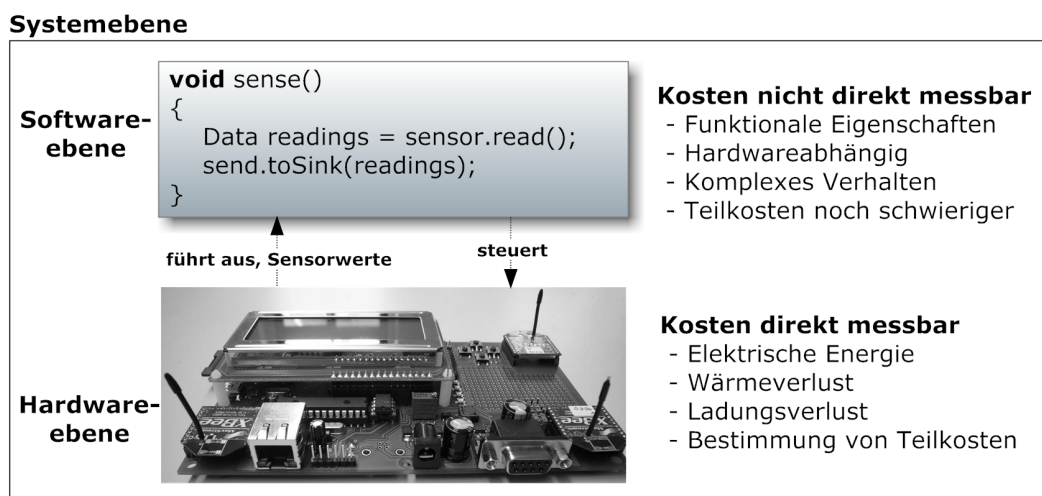


Abbildung 2.1: Differenzierung von Effizienzmetriken auf Hard- und Softwareebene.

Um Optimierungsstrategien gezielt bewerten zu können ist es jedoch sinnvoll, dedizierte Effizienzmetriken (Maßeinheiten) auf Hard- sowie auf Softwareebene einzuführen (siehe Abbildung 2.1), welche präzise Aussagen zulassen und auf Systemebene wieder kombiniert werden können.

Beide Ebenen ermöglichen eine *lokale* Sicht auf das Optimierungspotential in einem Knoten (und damit auf Subsystemebene), wirken sich aber in Summe auf den *globalen* Energieverbrauch des verteilten Gesamtsystems aus.

2.3.2 Hardware-Ebene

Die Bestimmung von Effizienzmetriken auf Hardwareseite ist in der Regel deutlich einfacher als auf Softwareseite. Die einzelnen physischen Komponenten können dazu jeweils getrennt voneinander betrachtet werden. Dies umfasst in eingebetteten, digitaltechnischen Systemen primär die Verarbeitungseinheiten, Netzwerkkomponenten, sowie Peripherie und Speicherbausteine. Um eine Energieeffizienz zu steigern, ist es in logischer Konsequenz wichtig, den Kosten K dieser Hauptverbraucher zu senken. Dies wiederum kann primär durch eine Reduzierung des Energieverbrauchs erreicht werden.

Bezüglich zentraler Datenverarbeitungseinheiten (Mikrocontroller / CPU) ergeben sich beispielsweise durch neue Fertigungstechnologien (Stichwort Miniaturisierung) Möglichkeiten zur Optimierung. Auch die Integration von mehr Systemkomponenten in einen Chip (*SOC*²) bewirkt meist eine Senkung des Energiebedarfs auf Systemebene. Weitere Verfahren auf Hardwareebene umfassen beispielsweise *Undervolting* oder *DVS*³ Konzepte, bei denen Hardwarekomponenten je nach Situation mit niedrigeren Versorgungsspannungen betrieben werden können, im Falle von *Undervolting* gegebenenfalls auch außerhalb der Herstellerspezifikation. Beim *Untertakten* (*engl. Underclocking*) wird die Taktrate manuell gesenkt um somit die Stromaufnahme zu reduzieren. Derartige Verfahren machen dann Sinn, wenn die Rechenleistung der Systemplattform für die jeweilige Applikation deutlich überdimensioniert ist. Dies ist im Bereich der eingebetteten Systeme eher selten der Fall.

In Hinblick auf drahtlose Kommunikationsszenarien in mobilen, eingebetteten Systeme repräsentieren die Netzwerkschnittstellen meist die Hauptenergieverbraucher [160]. In Bezug auf die Funkmodule wird in der Literatur eine einfache Möglichkeit zur Quantifizierung der Energieeffizienz definiert [328]:

”Die Energieeffizienz der Netzwerkschnittstelle wird durch das Verhältnis zwischen Gesamtenergieverbrauch und Gesamtanzahl übertragener [Nutz-]Dateneinheiten für die Kommunikation beschrieben.”

Wird dabei eine komplexe Netzwerktopologie betrachtet, so kann beispielsweise das Verhältnis zwischen *Energie*, *Datenmenge* und *Übertragungreichweite* optimiert werden.

²System on Chip

³Dynamic Voltage Scaling

2 Definitionen & Thematische Abgrenzung

$$\phi_{\text{Funkmodul}} \sim \frac{\text{Energie}}{1 \text{ Paket} * 1 \text{ Hop}}$$

Das verwendete Zeichen \sim soll dabei keine direkte oder indirekte Proportionalität darstellen. Es repräsentiert die Abhängigkeit des Energieeffizienzwertes ϕ zu den jeweiligen Parametern. Die Übertragungsdistanz wird an dieser Stelle durch *Hops* angegeben. Ein Hop ist nach [8] wie folgt definiert:

”Im Kontext der Rechnernetzkommunikation bezeichnet ein Hop den Weg einer Informationseinheit von einem Netzwerkknoten zum folgenden auf dem Pfad von der Datenquelle zur Senke.”

Alternativ bietet sich hardwareseitig auch die Relation zwischen *Energie, Datenmenge und absoluter Sendereichweite* an:

$$\phi_{\text{Funkmodul}} \sim \frac{\text{Energie}}{1 \text{ Paket} * 1 \text{ Meter}}$$

Kann folglich die benötigte Energie für die Übertragung eines Datenpaketes gesenkt werden, so erhöht sich bei gleichbleibend erfülltem Nutzen die Energieeffizienz ϕ durch gesunkene Kosten.

2.3.3 Software-Ebene

Softwareseitige Anpassungen in der Systemarchitektur sind deutlich einfacher umsetzbar als Hardwareanpassungen. Im Gegensatz dazu sind Optimierungsmetriken zur Steigerung der Energieeffizienz auf Softwareebene schwerer definierbar als innerhalb der Hardwareebene. Kommt ein dediziertes Betriebssystem zum Einsatz, so erfolgt die Quantifizierung häufig über die jeweilige CPU-Zeit (beziehungsweise auch CPU-Last), die an jeden Prozess gebunden ist und gemessen werden kann. Werden Softwareroutinen ineffizient implementiert, steigt die CPU Zeit entsprechend an. Unter Umständen können dann auch die Energiesparmodi von Prozessoren oder Peripherie weniger häufig verwendet werden. Speziell Mikrocontroller und CPUs arbeiten hierbei je nach Lastbereich mit unterschiedlichen Taktraten und angepassten Betriebsmodi.

Sind mehrere Prozesse oder auch das gesamte System für die Erfüllung der Funktionalität involviert, kann der Idle-Prozess (CPU-Leerlauf) über die Zeit gemessen werden. Daraus sind dann wiederum Rückschlüsse auf die Systemauslastung innerhalb der Softwareapplikationen möglich. Auf Betriebssystemebene regelt das *DPM*⁴ die Leistungsaufnahme der einzelnen Subsysteme und Komponenten. Derartig komplexe Managementsysteme werden jedoch meist

⁴Dynamic Power Management

nur auf Desktop- und Serverplattformen umgesetzt, im Embedded Bereich seltener und meist weniger umfangreich.

Häufig werden in der Laufzeitumgebung aber gar keine dedizierten Betriebssysteme eingesetzt. Daher müssen andere Möglichkeiten zur Quantifizierung gefunden werden, die sich speziell an den Kommunikationsprozessen orientieren. Derartige Prozesse werden meist über Softwarekomponenten gesteuert und koordiniert. So hat beispielsweise auch die Wahl der Kommunikationspfade über einen in Software umgesetzten Routingalgorithmus erheblichen Einfluss auf den Kommunikationsaufwand. Sinnvolle Effizienzkriterien auf Softwareseite können daher z.B. die *Paketanzahl pro Zeitintervall* Δt oder die *Paketanzahl pro Vorgang* V sein.

$$\phi_{Software} \sim \frac{\#Pakete}{\Delta t}$$

$$\phi_{Software} \sim \frac{\#Pakete}{V}$$

Jede Paketübertragung bindet dabei Energieressourcen der Kommunikationshardware. Dieser Energieverbrauch wirkt sich auf die Kosten K und damit auf die Energieeffizienz ϕ aus. Kann die Menge der benötigten Datenpakete für einen definierten Vorgang V unter Beachtung aller funktionaler Anforderungen reduziert werden, so sinken durch den reduzierten Energieverbrauch die Kosten. Da aber auch zeitliche Aspekte bei der Datenübertragung zu berücksichtigen sind, kann erst auf globaler Ebene entschieden werden, inwiefern sich eine solche Änderung positiv auf die Energieeffizienz auswirkt. Eine weitere aussagekräftige Bewertungsgröße ist in diesem Zusammenhang die *Aktivitätszeit der Kommunikationshardware* t_{KommHW} pro Zeitintervall Δt .

$$\phi_{Software} \sim \frac{t_{KommHW}}{\Delta t}$$

So sinkt Energieverbrauch und folglich die Kosten, wenn für den gleichen Kommunikationsprozess weniger Aktivitätszeit an den relevanten Hardwarekomponenten gebunden wird.

2.4 Modell zur Quantifizierung der Energieeffizienz

Im Rahmen dieser Arbeit werden in mehrerer Fallstudien konkrete Optimierungsstrategien für die Kommunikation in verteilten, eingebetteten Systemen analysiert. Für die Quantifizierung von Energieeffizienzwerten muss nun auf Basis der vorgestellten Definitionen ein vereinfachtes Modell geschaffen werden, welches einen direkten Vergleich unterschiedlicher Ansätze auf Soft- und Hardwareebene ermöglicht. Dies soll zunächst auf *lokaler* Ebene erfolgen. Hier wird ein einzelnes Subsystem innerhalb der verteilt agierenden Gesamtstruktur betrachtet. Anschließend folgt ein Modell zur Quantifizierung auf *globaler* Ebene, welches sich dann auf die Menge aller vernetzten Einzelsysteme als Verbund bezieht.

2.4.1 Quantifizierung auf lokaler Ebene

Die Repräsentation des Nutzens umfasst eine Menge funktionaler Anforderungen beziehungsweise Eigenschaften, die zur Laufzeit in jedem Fall erfüllt werden müssen. Da für die Erfüllung dieser Anforderungen zur Laufzeit dynamisch Prozesse abgearbeitet werden müssen, lässt sich der Nutzen selbst nicht quantifizieren. Folglich wird der Nutzen N bezüglich der funktionalen Spezifikation für einen gegebenen Vorgang vereinfacht ausgedrückt. Weiterhin muss er sowohl auf *lokaler* Ebene (System) als auch auf *globaler* Ebene (Netzwerkverbund) betrachtet werden. Während sich der lokale Nutzen auf das Ausführen von Aufgaben auf dem gekapselten Subsystem beschränkt, beinhaltet der globale Nutzen ebenfalls Abhängigkeiten unterschiedlicher Teilsysteme und damit alle kommunikativen Anteile zur Erfüllung einer Aufgabe. Es gilt dabei die Annahme, dass alle Ressourcen zur Erfüllung globaler Aufgaben verfügbar sind und nur die Kommunikation den Austausch behindern kann. Bei einer Beschränkung auf Normalfälle im Modell nimmt der lokale Nutzen N_{Lokal} für ein gegebenes System s und einen Vorgang V grundsätzlich nur zwei mögliche Werte ein:

$$N_{Lokal_s}^V = \begin{cases} 1 \rightarrow \text{funktionale Spezifikation vollständig erfüllt} \\ 0 \rightarrow \text{sonst} \end{cases}$$

Dies bedeutet jedoch auch, dass das vollständige Wissen über alle definierten funktionalen Anforderungen eine zwingende Voraussetzung für eine Abschätzung der Energieeffizienz repräsentiert. Ist dies nicht gegeben, so kann kein Nutzen abgeleitet und folglich auch keine Effizienzwerte berechnet werden.

Der benötigte Aufwand für einen Vorgang zur Funktionserfüllung wird über eine Kostenfunktion k auf abstrakte reelle Kostenwerte $K \geq 1$ abgebildet. Dabei können neben dem Energieverbrauch auch weitere Systemparameter oder nicht-funktionale Anforderungen über die Kostenfunktion in die Kosten einfließen. So spielen je nach Anwendungsszenario zeitliche Einschränkungen (Antwortzeiten) oder applikationsseitige Rahmenbedingungen (Prioritäten) eine wichtige Rolle. Daraus folgt ein allgemeines Modell zur Abschätzung von Energieeffizienzwerten auf lokaler Ebene:

$$\phi_{Lokal_s}^V = \frac{N_{Lokal_s}^V}{K_{Lokal_s}^V} \quad \text{bei } K \in \mathbb{R}, K \geq 1$$

Da die Kostenwerte in Abhängigkeit von anwendungs- und implementierungsspezifischer Parameter berechnet werden, sind relative Aussagen bezüglich der Energieeffizienz sinnvoll. Bei einer Betrachtung von *Änderungen der Kostenwerte bei gleichbleibender Erfüllung aller funktionalen Anforderungen und unter Beachtung nicht-funktionaler Randbedingungen* wird somit eine Tendenz für die lokale Energieeffizienz ϕ_{Lokal} eines Systems s ersichtlich, welche durch:

$$\Delta\phi_{Lokal_s^V} \sim \frac{1}{\Delta K_{Lokal_s^V}}$$

beschrieben werden kann. Unter der Annahme, dass die benötigten Energieressourcen in verteilten, mobilen Systeme meist aus einem lokal verfügbaren und begrenzten Energiespeicher entnommen werden, so ist die Betrachtung der Gesamtbetriebszeit T_{up} kritisch. Sind diese Energieressourcen erschöpft, kollabiert das Subsystem und steht folglich nicht mehr für die Aufgabenerfüllung zur Verfügung. Die Gesamtbetriebszeit T_{up} des Subsystems s ist also direkt abhängig vom Energieverbrauch. Kann nun diese Betriebszeit verlängert werden, ohne dass funktionale Einschränkungen auftreten, wirkt sich dies positiv auf die Energieeffizienz aus. Es gilt folglich:

$$\Delta\phi_{Lokal_s} \sim \Delta T_{up_s}$$

Diese Tendenz folgt somit dem ökonomischen Minimalprinzip, bei dem gleichbleibender Nutzen mit minimalem Ressourcenaufwand erreicht werden soll.

2.4.2 Quantifizierung auf globaler Ebene

Ausgehend von den lokalen Betrachtungen bezüglich der Energieeffizienz kann nun ein Modell zur Quantifizierung auf globaler Ebene erfolgen, in der mehrere Subsysteme kooperativ zusammenwirken. Auf globaler Ebene repräsentieren Kommunikationsprozesse im Rahmen der Informationsbeschaffung und -weitergabe einen essentiellen Bestandteil zur Aufgabenerfüllung. Folglich müssen die Kommunikationsaspekte mit in die Energieeffizienzbetrachtungen einfließen. Dabei sind unterschiedliche Vorgänge zu unterscheiden. Einige Applikationen bedingen Systeme, in denen alle verfügbaren Ressourcen und Komponenten benötigt werden. Andere nutzen nur eine Teilmenge aller Ressourcen innerhalb des verteilten Systems. Zwingende Voraussetzung ist aber in jedem Fall eine Kommunikationsinfrastruktur, die gültige Kommunikationspfade g zwischen den beteiligten Subsystemen zur Verfügung stellt. Um diese Anforderungen formal fassen zu können, sei zunächst eine $n \times n$ Adjazenzmatrix \mathcal{G} für den Zeitpunkt t definiert, wobei n der Anzahl aller Subsysteme im Netzwerkverbund entspricht.

$$\mathcal{G}_t = \begin{pmatrix} 1 & \dots & g_{1,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{n,1} & \dots & 1 \end{pmatrix}$$

Jedes Matricelement $g_{i,j}$ ($i, j \in \mathbb{N}; 1 \leq i, j \leq n$) entspricht dabei einem gültigen Kommunikationspfad zwischen Knoten i und Knoten j zum Zeitpunkt oder auch Zeitraum t (für die Bearbeitung eines Vorgangs V). Folglich gilt:

2 Definitionen & Thematische Abgrenzung

$$g_{i,j} = \begin{cases} 1 \rightarrow \exists \text{ ein gültiger Pfad zwischen Knoten } i \text{ und Knoten } j \text{ zum Zeitpunkt } t \\ 0 \rightarrow \text{sonst} \end{cases}$$

Da jeder Knoten mit sich selbst kommunizieren kann, ist jedes Matrixelement der Hauptdiagonale $g_{i,i}$ gleich 1. Zusätzlich ist *zustandsspezifisch* die Entscheidung zu treffen, ob ein Knoten i zur Erfüllung seiner aktuellen Aufgaben den Kommunikationspfad $g_{i,j}$ zum jeweiligen Kommunikationspartner j und zum Zeitpunkt t nutzen muss oder nicht. Dabei ist nicht ausgeschlossen, dass mehrere Kommunikationspartner gleichzeitig benötigt werden. Hierfür wird eine weitere $n \times n$ Matrix \mathcal{H} definiert, welche die *Kommunikationsbedürfnisse* repräsentiert.

$$\mathcal{H}_t = \begin{pmatrix} 1 & \dots & h_{1,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{n,1} & \dots & 1 \end{pmatrix}$$

Die einzelnen Matrixelemente $h_{i,j}$ ($i, j \in \mathbb{N}; 1 \leq i, j \leq n$) entsprechen dem Kommunikationsbedürfnis zwischen Knoten i und j zum Zeitpunkt / Zeitraum t :

$$h_{i,j} = \begin{cases} 1 \rightarrow \text{Knoten } i \text{ benötigt zum Zeitpunkt } t \text{ die Kommunikation zu Knoten } j \\ 0 \rightarrow \text{sonst} \end{cases}$$

Auch hier ist die Hauptdiagonale mit den Matrixelementen $h_{i,i}$ gleich 1, da jeder Knoten zwingend auf die lokale Kommunikation innerhalb des eigenen Systems angewiesen ist. Auf Basis der beiden Matrizen kann nun der globale Nutzen N_{Global} für ein einzelnes System s und den Vorgang V bestimmt werden:

$$N_{Global_s^V} = \underbrace{N_{Lokal_s^V}}_{\text{Lokale Aufgabe}} * \underbrace{\left[\frac{\sum_{\forall i \in n} g_{s,i}^V * h_{s,i}^V}{\sum_{\forall i \in n} h_{s,i}^V} \right]}_{\text{Kommunikation}}$$

Auch für den globalen Nutzen eines Systems ist zunächst die lokale Aufgabenerfüllung von Relevanz. Mittels Kommunikation werden hier aber benötigte Eingabegrößen von anderen Systemen im Verbund empfangen oder Daten über das Netzwerk entsprechend versendet. Aus der lokalen Aufgabe und den Kommunikationsaspekten resultieren die beiden Hauptterme für den globalen Nutzen $N_{Global_s^V}$. Für den Kommunikationsanteil werden im Nenner alle Kommunikationsbedürfnisse h zu den jeweiligen Kommunikationspartnern aufsummiert. Im Zähler erfolgt über das Produkt $g * h$ die Prüfung der Kommunikationsbedürfnisse auf einen gültigen Kommunikationspfad g . Bei Erfüllung aller Kommunikationsbedürfnisse mit entsprechenden Pfaden ergeben Zähler und Nenner stets den gleichen Wert. Folglich ist der

2 Definitionen & Thematische Abgrenzung

Kommunikationsterm hier immer 1. Existiert mindestens ein benötigter Kommunikationspfad nicht, so wird das entsprechende Produkt im Zähler ($g * h = 0 * 1$) sofort 0. In Summe ist dann der Zähler in jedem Fall kleiner als der Nenner. Durch die Abrundung des Ergebniswertes ergibt der Kommunikationsterm dann 0. Daraus folgt ein globaler Nutzen von 0 und die Aufgabe kann nicht erfüllt werden.

Wird der Sonderfall betrachtet, bei dem für eine Funktion keine externe Kommunikation notwendig ist, so entsprechen nur die jeweiligen Hauptdiagonalelemente der Matrix \mathcal{G} und \mathcal{H} gleich 1. Der Term für die Kommunikation ergibt automatisch 1. In Folge dessen entspricht der globale Nutzen dem lokalen Nutzen.

Auf der Kostenseite ergeben sich die globalen Gesamtkosten aus der Summe aller Teilkosten K der einzelner Subsysteme s im Netzwerkverbund n für den Vorgang V . Die globale Energieeffizienz ϕ_{Global}^V entspricht demnach:

$$\phi_{Global}^V = \frac{\sum_{\forall s \in n} N_{Global_s}^V}{\sum_{\forall s \in n} K_s^V}$$

Werden für die Erfüllung funktionaler Anforderungen alle Komponenten eines verteilten Systems benötigt, so kann anstatt des Summenzeichens ein Produkt über alle Teilnutzenwerte gebildet werden.

$$\phi_{Global}^V = \frac{\prod_{\forall s \in n} N_{Global_s}^V}{\sum_{\forall s \in n} K_s^V}$$

Folglich erlischt in diesem Fall die Funktionalität des Gesamtsystems sobald mindestens ein Subsystem seinen Nutzen verliert, d.h. ein Faktor des Produktes 0 wird.

Durch Minimierung der Kosten K bei gleichbleibendem Nutzen N resultiert das Streben der Energieeffizienz von ϕ_{Global} gegen 100% beziehungsweise 1. Um diesen Wert zu erreichen, müssten der Nutzen N im Zähler als auch die Kosten K im Nenner den gleichen Wert annehmen. Das gewählte Modell muss dabei aber auch sicherstellen, dass die Energieeffizienz ϕ_{Global} keinen Wert > 1 annimmt. Dieser Fall kann dann eintreten, wenn im Nenner Werte ($0 < K < 1$) auftreten. Um dies auszuschließen, werden die einzelnen Kosten K_s über die jeweilige Kostenfunktion k stets größer 1 definiert ($K_s \in \mathbb{R}; K \geq 1$).

2.5 Zusammenfassung

Dieses Kapitel vermittelte zunächst eine grundlegende thematische Einordnung des Arbeitstitels. Dies umfasste Begriffsdefinitionen für Energieeffizienz und Optimierung sowie für verteilte Systeme im Kontext eingebetteter Hardwareplattformen. Anschließend wurde ein Modell zur Quantifizierung der Energieeffizienz vorgestellt, welches sowohl eine lokale Betrachtung auf Subsystemebene als auch eine globale Betrachtung auf Netzwerkebene erlaubt. Es ist nun möglich, unterschiedliche Optimierungsstrategien zur Steigerung der Energieeffizienz qualitativ und quantitativ zu bewerten und zu vergleichen.

Aufbauend auf diesen Definitionen und Modellen werden in den folgenden Kapiteln verteilte, eingebettete Systeme aus Sicht effizienter Kommunikationsprozesse betrachtet. Dabei erfolgt die Einführung verschiedener Abstraktionsebenen für das Netzwerkmanagement, Datenmanagement sowie das Energiemanagement. Zunächst konzentrieren sich die weiteren Ausführungen jedoch auf die dafür relevanten Basistechnologien und Kommunikationskonzepte.

3 Basistechnologien & Konzepte

In Hinblick auf die effiziente Kommunikationsprozesse in verteilten, eingebetteten Systemen sind die hardwareseitigen Basistechnologien sowie grundlegende Kommunikationskonzepte zu betrachten. Ziel dabei ist es, den drahtlosen Informationsaustausch auf den hardwarenahen Ebenen effizienter zu gestalten. Dieses Kapitel vermittelt einen Überblick über aktuelle technologische Entwicklungen, stellt relevante Systemarchitekturen vor und vergleicht diese anhand wesentlicher Leistungsparameter.

3.1 Eingebettete, verteilt agierende Systeme

Konzepte und Technologien für verteilt agierende, eingebettete Systeme umfassen mehrere Themenkomplexe aus der Elektrotechnik, Nachrichtentechnik sowie der Informatik. In den einzelnen Abschnitten werden nachfolgend verschiedene Themenschwerpunkte vorgestellt, welche mittel- beziehungsweise langfristig zunehmend von Bedeutung sein werden.

3.1.1 Drahtlose Ad Hoc Netzwerkstrukturen

Mit dem Schwerpunkt vernetzter, heterogener Systemstrukturen entstehen mehrere neue Herausforderungen. Zunächst betrifft dies die kooperativen Fähigkeiten zur Erfüllung globaler Zielstellungen bei nicht vollständig definierten Rahmenbedingungen. Diese können sich unter Umständen dynamisch zur Laufzeit ändern. Weiterhin müssen durch diesen erhöhten Unsicherheitsgrad applikationsseitig Anforderungen bezüglich Leistungsfähigkeit sowie Robustheit angepasst werden. Dies wirkt sich wiederum signifikant auf die Systemkomplexität aus. Die Beherrschbarkeit der Komplexität, speziell im Entwurfsprozess hochgradig verteilter Systeme, wächst zu einem kritischen Faktor heran [28, 31]. Dies betrifft die Bereitstellung und Pflege effizienter Kommunikationsinfrastrukturen sowie die Skalierbarkeit [105]. Hier sollen neuartige Kommunikationskonzepte und Strategien helfen.

Um den genannten Herausforderungen zu begegnen, bieten *Ad Hoc* Kommunikationsansätze und die damit verbundene dezentrale Organisation vielfältige Möglichkeiten. Ad Hoc Netze beschreiben im Rahmen dieser Arbeit *Mesh*-Netzwerkarchitekturen, welche sich aus der Kopplung vieler unterschiedlicher (*heterogener*), drahtloser Endgeräte zusammensetzen. Für den weiteren Verlauf dieser Arbeit wird Ad Hoc wie folgt definiert:

”Im Kontext der Netzwerktechnik ist der lateinische Ausdruck ’Ad hoc’ gleichbedeutend mit ’für diesen Augenblick gemacht’. Folglich impliziert der Begriff Ad Hoc spontane, situationsabhängige Entscheidungen, die meist nur zeitlich begrenzt Anwendung finden. Konkret bedeutet dies, dass sich zwei oder mehr Kommunikationspartner direkt und ohne vorgegebene Infrastruktur zum temporären Informationsaustausch verbinden können.”

In Bezug auf die Heterogenität wird dabei die folgende Begriffsdefinition verwendet:

”Der Begriff heterogen leitet sich aus dem Griechischen von heterogenis ab und drückt eine Verschiedenartigkeit aus. Unter Heterogenität versteht man die Uneinheitlichkeit von Elementen einer Menge hinsichtlich eines oder mehrerer Merkmale. Heterogene Netzwerkstrukturen besitzen somit ungleichartige Subsysteme. Die Objekte eines Netzwerkes können dabei nach [391] auf verschiedenen Ebenen heterogen sein.”

Zur Erfüllung ihrer Aufgaben sind an verteilte Ad Hoc Systeme mehrere Anforderungen gebunden. Diese umfassen im Wesentlichen:

Multi-Hop Kommunikation:

Übertragung von Daten über mehrere Zwischenstationen hinweg und ohne zentrale Koordinierungsinstanz.

Energieeffizienter Betrieb:

Bei mobilen Applikationen muss ein energieautarker Betrieb sichergestellt werden. Im Zuge der Dimensionierung und der gewünschten Betriebsdauer spielt die Energieeffizienz die entscheidende Rolle.

Auto-Konfiguration:

Durch das Fehlen zentraler Steuerungsinstanzen muss das System in der Lage sein, sich selbstständig zu initialisieren und zu konfigurieren.

Kooperation:

Das verteilte System stellt die operative Funktionalität erst durch ein kooperatives Zusammenwirken vieler Einzelinstanzen zur Verfügung. Folglich ist das gemeinsame Bearbeiten von Aufgaben und die lokale Verarbeitung von Teilprozessen eine entscheidende Voraussetzung für Ad Hoc Strukturen.

Lokalität & Konnektivität:

Durch begrenzte Leistungsparameter für die drahtlose Kommunikation ist die Sendereichweite begrenzt. Die Konnektivität der Netzwerkstruktur ist jedoch zwingende Voraussetzung für den operativen Betrieb und folglich der Funktionserfüllung. Folglich repräsentiert das Verhältnis von Lokalität und Skalierungsgrad einen wichtigen Parameter.

Innerhalb des Forschungsbereiches drahtloser Ad Hoc Netzwerkstrukturen sind auf dieser Basis verschiedene Klassifizierungsmerkmale (Eigenschaften und Ausprägungen) zu unterscheiden.

Infrastruktur und Topologieausprägung:

Reine Ad Hoc Struktur, Zelluläre Netze, Verwendung von hybriden Strategien wie beziehungsweise Clustering sowie Hierarchien. Damit einhergehend entsprechende Stern- oder Baumtopologien, Redundanzgrad bis hin zur Vollvermaschung, Unterteilung in Multi-Hop oder Single-Hop Topologien.

Energieversorgung:

Interne/externe Stromversorgung, regenerative Energiequellen.

Konnektivität:

Kontinuierlich, periodisch synchronisiert, spontan asynchron.

Skalierungsgrad:

Netzwerkgröße, zusammengesetzt aus Knotendichte und abzudeckender Fläche.

Mobilität:

Grad der Beweglichkeit einzelner Knoten in der Topologie.

Knotenplatzierung:

zufällige oder individuelle/musterbasierte Platzierung der Sensorknoten.

Heterogenität:

Homogene Knotenlandschaft oder Mischbetrieb, Einsatz von Middlewarekonzepten zur Systemintegration.

Kommunikationsmechanismen:

Umsetzung der Netzwerkschnittstellen.

Räumliche Sensorabdeckung:

Flächendeckend, partielle beziehungsweise selektive Messpunkte/Messbereiche, überdeckend redundant.

Dimensionierung der Subsysteme:

Physische Abmaße, Systemlaufzeit und Kosten der einzelnen Teilsysteme im Netzwerkverbund.

Datenpriorisierung:

Unterschiede in der Wichtigkeit der Daten im Netzwerk sowie Echtzeitaspekte bezüglich kritischer Ereignisse oder Kontrolldaten.

Protokolle:

Angepasste Verfahren auf den jeweiligen Abstraktionsebenen sowie geeignete Architekturen für etwaige Echtzeitanforderungen [96, 191].

Anwendungsbereich:

Unterscheidung nach Einsatzszenarien und somit die Integration mehrerer Merkmale und Eigenschaften.

Die Strukturierung der folgenden Abschnitte orientiert sich an den jeweiligen *Anwendungsbereichen* der Ad Hoc Netzwerke. Dabei werden spezifische Merkmale sowie Einschränkungen und Rahmenbedingungen erörtert und diskutiert.

Mobile Ad Hoc Networks - MANET

Der Forschungsbereich *mobiler Ad Hoc Netzwerke (MANET¹)* befasst sich mit neuartigen Kommunikationskonzepten, welche sich auf spontaner, meist drahtloser Vernetzung mehrerer Endgeräte stützen. Aus dieser Fähigkeit ergeben sich hochgradig adaptive und dynamische Netzwerktopologien, welche ohne zentralisierte Kontrollinstanzen beziehungsweise stationäre Infrastruktur deutlich robuster gegen Störungen sind und flexibel auf partielle Ausfälle reagieren.

Im Gegensatz zu zellulären Mobilfunktechnologien oder sternförmig organisierten Netzwerktopologien kommunizieren die Geräte innerhalb ihrer Sendereichweite auf direktem Weg ohne Umwege über Relaisstationen oder anderen übergeordneten Netzwerkkomponenten. Im Falle einer indirekten Kommunikation zwischen Geräten die sich nicht in der direkten Sendereichweite befinden, steht jeder Netzwerkknoten in einer solchen *Mesh*-Topologie für die Weiterleitung von Daten zur Verfügung. In Folge dessen resultieren speziell in MANETs besondere Ansprüche an das Routing. Dies betrifft vor allem die Skalierbarkeit der verwendeten Verfahren und Fähigkeiten zur dynamischen Lastverteilung.

Der Begriff impliziert direkt einen hinreichenden Grad an Mobilität für die Topologie. Diese kann durch individuelle Bewegungsfreiräume einzelner mobiler Komponenten oder auch durch koordinierte Bewegungen des Gesamtsystems realisiert werden. Hier sind entsprechend robuste Protokolle auf allen Funktionsebenen erforderlich, um den operativen Betrieb in den dynamischen Umgebungsbedingungen jederzeit sicherzustellen [269]. Auf den unteren Netzwerkebenen betrifft dies besonders eine ressourcensparende Topologieverwaltung sowie ein angepasstes Routing, welche die Netzwerkinfrastruktur je nach Situation umorganisieren beziehungsweise verwalten können [138].

Kommunikationskonzepte auf Basis von MANETs weichen in ihrer Funktionsweise deutlich von klassischen Kommunikationsparadigmen ab und fokussieren *Peer-to-Peer* Konzepte (*P2P*) in einem gleichberechtigten, nicht hierarchischen Rechnerverbund [257]. Jeder Netzwerkknoten stellt dabei seine Ressourcen mittels dedizierter Dienste anderen Knoten kooperativ zur Verfügung. Ab einem bestimmten Skalierungsgrad sind aber auch in solchen hochdynamischen Topologien hierarchische Verwaltungskonzepte unabdingbar. Entsprechende *Clustering*-Ansätze widersprechen dabei nicht der grundlegenden Arbeitsweise von MANETs. In jedem Fall skalieren MANETs deutlich besser als jede Form zellulärer Netzinfrastrukturen mit klassischen Kommunikationshierarchien.

Neben der erhöhten Ausfallsicherheit bieten MANETs noch weitere grundlegende Vorteile. Dies betrifft vor allem die bessere Verteilung der Netzlast und folglich die Reduzierung von

¹Mobile Ad Hoc Networks

Lastspitzen. Daher sind diese Kommunikationstechnologien besonders in Zusammenhang mit der rasant steigenden Anzahl mobiler Endgeräte von besonderem Interesse. Aus den funktionalen Rahmenbedingungen des jeweiligen Anwendungsszenarios ergeben sich Parameter für die zugrundeliegende Hardwareplattform. Diese umfassen die Kommunikationsreichweite und somit die verwendete Funktechnologie, die benötigte Rechenleistung, den Umfang der Energieressourcen für eine Mindestlaufzeit sowie optional benötigte Zusatzkomponenten und die daraus resultierenden, physischen Abmaße der Netzwerkknoten.

Je nach Anwendungsszenario gliedern sich MANETs in weitere Untergruppen und Teilmengen. Zum besseren Verständnis der Gemeinsamkeiten und Unterschiede soll auf die wesentlichen Bereiche näher eingegangen werden.

Vehicular Ad Hoc Network - VANET

*VANETs*² befassen sich mit den spezifischen Problemstellung beim Einsatz von Ad Hoc Kommunikationsansätzen im Automotive-Sektor. Hier repräsentiert die hohe Dynamik der Netzwerkteilnehmer eine zentrale Problemstellung [254]. Die Problematiken im Rahmen der Signalverarbeitung für hochgradig dynamische, drahtlos vernetzte Fahrzeuge stehen dabei im Fokus der Betrachtungen [365].



Erkennung und Prävention von Gefahrensituationen



Informationen über Verkehrsfluss und Verkehrseinschränkungen

Abbildung 3.1: Anwendungsbeispiele für Car2X Kommunikation nach [102].

²Vehicular Ad Hoc Networks

Car2Car beziehungsweise Car2X Kommunikation gewinnt in diesem Kontext verstärkt an Bedeutung und repräsentiert einen wichtigen Forschungsbereich bei vielen Automobilherstellern. Ziel ist es, durch Vernetzung der Fahrzeuge untereinander (Car2Car) oder durch die aktive Einbindung von Verkehrsleitsystemen (Car2X - Car2Infrastructure / Car2Roadside) die Verkehrssicherheit nochmals deutlich zu verbessern. Damit einhergehend sollen Car2X Konzepte auch die Verkehrseffizienz und den Reisekomfort erhöhen. Hierbei besteht die Vision aus *intelligenten Verkehrssystemen (ITS)*³, welche die Verkehrssituation ganzheitlich erfassen, fahrzeugspezifisch individuelle Lösungsstrategien berechnen und diese anschließend aktiv im Fahrzeug umsetzen. Abbildung 3.1 zeigt typische Anwendungsszenarien in diesem Forschungsbereich.

Im europäischen Raum ist das C2C-CC⁴ [102] für diese Entwicklungen federführend. Es besteht aus einem Zusammenschluss von Forschungseinrichtungen, Automobilherstellern und weiteren Kooperationspartnern aus der Automotive Branche. In diesem Kontext wurde der IEEE 802.11p Standard spezifiziert, über den ein Großteil der Kommunikation auf Basis der Wireless LAN Technologie (IEEE 802.11) realisiert werden soll.

In Hinblick auf die technischen Realisierungen repräsentieren Car2x-Kommunikations-szenarien dynamische, heterogene Sensornetze, bei denen die Datenmenge sowie die effiziente Datenverteilung zentrale Herausforderungen bilden. Die Anforderungen hinsichtlich Effizienz liegen somit mehr auf den eigentlichen Kommunikationsprozessen, da Datenumfang und Übertragungslatenzen erhöhte Priorität haben.

Wireless Sensor Networks - WSN

Eine weitere Spezialisierung mobiler Ad Hoc Netzwerke bilden drahtlose Sensornetzwerke (engl. WSN⁵). Der Forschungsbereich fokussiert dabei den Einsatz einer Vielzahl autarker Sensorsubsysteme zur Überwachung der Umwelt hinsichtlich ausgewählter Parameter. Die großflächige Verteilung solcher Systeme in weitläufigen Gebieten, in denen kabelgebundene Lösungen nicht praktikabel sind, erlaubt die ganzheitliche Erfassung von spezifischen Phänomenen. Kann das Auftreten von bestimmten Ereignissen nicht auf ein überschaubares Gebiet eingeschränkt werden, bieten WSN interessante Möglichkeiten für eine sichere und zeitnahe Erkennung. Abbildung 3.2 zeigt zwei typische Kommunikationshierarchien im Bereich WSN. Zur Unterscheidung wird dabei die folgende Definition nach [8] verwendet.

”Bei einer Single-Hop-Kommunikation liegt zwischen Datenquelle und Senke genau ein Hop. Im Gegensatz dazu besitzt der Verbindungspfad einer Multi-Hop-Kommunikation n Hops zwischen den beiden Kommunikationspartnern, wobei $n \in \mathbb{N}, n > 1$. Die einzelnen Informationseinheiten werden somit über mehrere Zwischenstationen [zielgerichtet] weitergeleitet.”

³Intelligent Transport Systems

⁴Car2Car Communication Consortium

⁵Wireless Sensor Networks

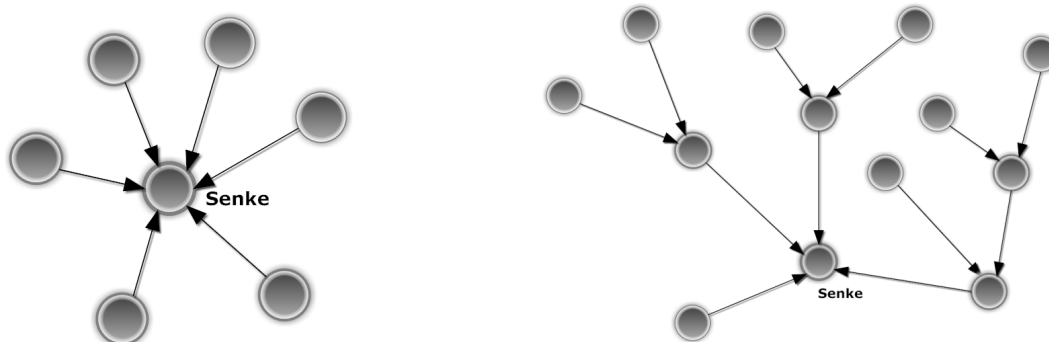


Abbildung 3.2: Verschiedene Kommunikationshierarchien in Sensornetzen. Single-Hop Sensornetzwerkstruktur *links* und die meist deutlich komplexere Multi-Hop Sensornetzwerkstruktur *rechts*, bei der keine direkte Verbindung zur Datensenke existiert.

Im Gegensatz zur allgemeinen Definition von MANETs beschränken sich WSN meist auf eine homogene Hardwareplattform mit gleichartigen Netzwerkknoten und einheitlichen Kommunikationsschnittstellen. In [126, 358] beschreiben die Autoren ein WSN als eine Topologie hunderter bis tausender einzelner, autarker Sensorknoten. Aufgrund der drahtlosen Vernetzung kann der Installations- und Wartungsaufwand minimiert werden.

Aktuelle Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet legen ihren Schwerpunkt auf *selbstorganisierende Kommunikations- und Organisationskonzepte* (siehe Abschnitt 3.2), wodurch eine dezentrale Koordinierung sowie eine gute Skalierbarkeit ermöglicht werden soll [49, 50]. Die spezifischen Eigenschaften klassischer Sensornetze gliedern sich wie folgt auf [93]:

Datenzentrisches Kommunikationsverhalten:

Im Gegensatz zu klassischen Kommunikationsnetzen spielt das Einzelobjekt eine untergeordnete Rolle. Von Relevanz ist das Gesamtnetz sowie dessen Eigenschaften zur Funktionserfüllung.

Applikationsspezifisch:

Die Funktionalität von WSN-Architekturen ist stark reduziert und eng an das Anwendungsszenario angepasst.

Ressourcenbeschränkungen:

In Zusammenhang mit der Funktionsreduzierung unterliegen die Einzelsysteme meist starken Einschränkungen in puncto Energie-, Kommunikations- sowie Speicher- und Berechnungsressourcen.

Dynamisch:

Im Kontext mobiler Ad Hoc Strukturen ist häufig die Mobilität eine wesentliche Eigenschaft von WSN.

Verteilung:

In Folge der Dynamik wird die Verteilung der Einzelentitäten meist als nicht planbar vorausgesetzt, wodurch Fähigkeiten zur dynamischen Rekonfiguration und Adaption benötigt werden.

Skalierung:

Die durchschnittliche Menge von Einzelknoten in der Topologie wird im Allgemeinen deutlich höher angesetzt als bei klassischen Netzwerkinfrastrukturen.

Laufzeit:

WSN weisen häufig eine deutlich längere Betriebszeit auf, in der die Einzelsysteme energieautark operieren.

Die einzelnen Netzwerkknoten verfügen über eine minimale, anwendungsspezifische Funktionalität, welche primär eine periodische beziehungsweise ereignisgesteuerte Messwertaufnahme sowie lokale Datenvorverarbeitungsprozesse umfasst. Durch die strikte Reduktion der Leistungsfähigkeit wird der Energiebedarf minimiert und folglich die Gesamtlaufzeit der Knoten auf ein Maximum verlängert [81]. Primäre Anwendungsszenarien sind meist Langzeitmessungen in weitflächigen oder schwer handhabbaren Umgebungen. In Folge dessen ist die Systemlaufzeit des Sensorknoten ein entscheidender Parameter während der Konzeption. Dabei ist auch die Erreichbarkeit aller Knoten von besonderem Interesse [51]. Bereits bei Ausfall eines einzelnen Knotens können im schlimmsten Fall Teile der Netzwerktopologie nicht mehr erreicht sein und disjunkte Knotenmengen entstehen.

Wie zuvor aufgeführt, übertragen klassischen WSN Architekturen die gemessenen Rohdaten beziehungsweise lokal gewonnenen Informationen an eine oder mehrere zentrale Datensinken (datenzentrisch). Dabei kommt die geschaffene Netzwerkinfrastruktur zum Einsatz, in der jeder Knoten als Relaisstation dienen kann. Eine weiterführende Auswertung erfolgt außerhalb des eigentlichen Sensornetzwerkes in eine Koordinierungs-/ Kontrollinstanz, welche mit der Datensinke beziehungsweise mit der Datenbasis verbunden ist. Hier stehen hinreichend viele Hardwareressourcen zur Verfügung, welche eine detaillierte Messwertanalyse gewährleisten und entsprechende Schlussfolgerungen ermöglichen. Daraus resultierende Ergebnisse geben Rückschlüsse auf globale/systemweite Zustände oder regional begrenzte Ereignisse. Je nach nutzer- beziehungsweise applikationsseitigen Anforderungen erfolgt die Analyse entweder direkt zur Laufzeit auf Basis eines kontinuierlichen Sensordatenstroms oder anderenfalls auf einer abgegrenzten Datenbasis zu definierten Zeitpunkten beziehungsweise Ereignissen.

Die von WSN zu erfüllenden Aufgaben lassen sich wie folgt untergliedern [91, 216]:

Ereignisdetektion:

Asynchrone Erkennung einzelner, anwendungsspezifischer Ereignisse in der Umwelt oder gebunden an bestimmte Objekte. Dies beinhaltet auch Methoden zur Plausibilitätsprüfung und zur Klassifizierung.

Messwertaufzeichnung & Logging:

Kontinuierliche beziehungsweise periodische Aufnahme von Messdaten in einem vordefinierten oder auch dynamisch adaptiven Aufzeichnungszyklus.

Objektverfolgung & Identifikation:

Durch die Erfassung lokaler Ereignisse und entsprechenden Zeitstempel ist die Nachverfolgung einzelner Objekte oder Objektgruppen realisierbar. Unter der Voraussetzung geeigneter Sensorik können Einzelobjekte zusätzlich identifiziert oder klassifiziert werden.

Viele Sensornetzwerkszenarien haben die Aufgabe, dedizierte und vordefinierte Ereignisse zu triggern. In derartigen Anwendungsszenarien weisen aktuelle Systeme einen teils erheblichen Kommunikationsoverhead auf, bieten somit aber auch gleichzeitig ein erhebliches Potential für Optimierungsansätze.

Sensor Actor Networks - SANET

Kombiniert man informationserfassende Sensorikkomponenten mit aktiven Subsystemen in einer gemeinsamen Netzwerkstruktur, entsteht ein verteiltes Gesamtsystem, welches Regelungs- und Steueraufgaben übernehmen kann. Der Zusammenschluss voneinander unabhängiger und funktional eigenständiger Teilsysteme zu einer heterogenen Gesamtstruktur wird als Sensor-Aktor-Netzwerk (*SANET*⁶) bezeichnet [110]. Im Rahmen dieser Arbeit wird nach [223] die folgende Definition verwendet:

„Ein Sensor-Aktor-Netzwerk beschreibt die Integration von Komponenten zur Erfassung von spezifischen Messdaten, Komponenten zur Auswertung dieser Sensordaten sowie ausführende Komponenten (Aktuatoren), welche auf Basis der analysierten Daten koordinierte Aktionen innerhalb des Systems oder auch extern bezüglich der Umwelt ausführen.“

Die Grundlagen adaptiver Sensor-Aktor-Netzwerke basieren auf einfachen regelungstechnischen Verfahren und Prinzipien [249], wie sie in Abbildung 3.3 schematisch dargestellt sind. Diese verarbeiten alle verfügbaren Eingabegrößen mit Hilfe vorgegebener Regelungsprozesse. Über definierte Regelungsparameter fließen die berechneten Korrekturwerte wieder in das System ein. Ziel dabei ist die Herstellung und Aufrechterhaltung vordefinierter Zustände beziehungsweise einer Folge von Zuständen. Je häufiger die Regelschleife zyklisch durchlaufen und berechnet wird, desto präziser kann ein gegebenes System nachgeregelt werden. Neben der Regelungshäufigkeit stellen die Regelungsparameter das zweite Kernkriterium dar. Diese müssen effiziente Reaktionen auf mögliche externe und interne Ereignisse gewährleisten.

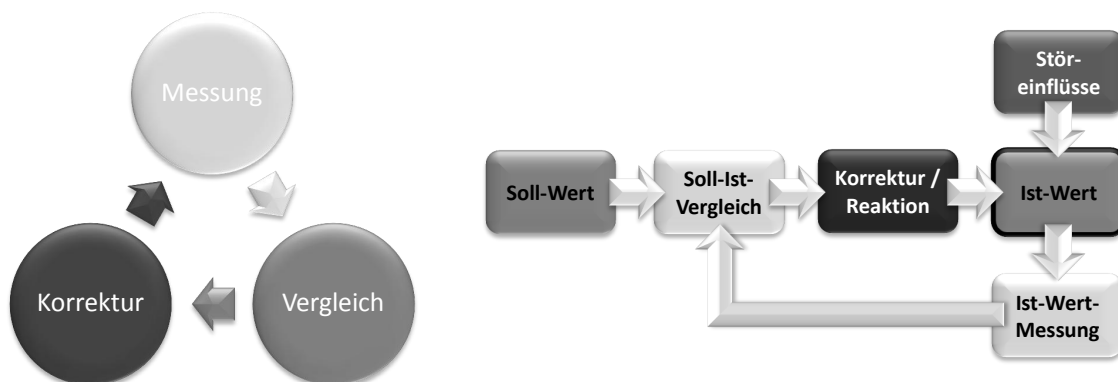


Abbildung 3.3: Zwei Darstellungsformen für klassische Regelschleifen und deren Wirkungsweise.

⁶Sensor Actor Networks

Die regelungstechnischen Prinzipien können sehr gut auf *programmgesteuerte, digitaltechnische Systeme* abgebildet werden. Mit Hilfe von Sensorikkomponenten und den entsprechenden Sensordaten können softwareseitige, systeminterne Anpassungen an veränderliche Rahmenbedingungen erfolgen. Auf einer zweiten Ebene schließen derartige Regelungsprozesse dann aktive Reaktionen gegenüber der Umwelt ein, welche durch *Aktuatoren*⁷ realisiert werden (siehe Abbildung 3.4).

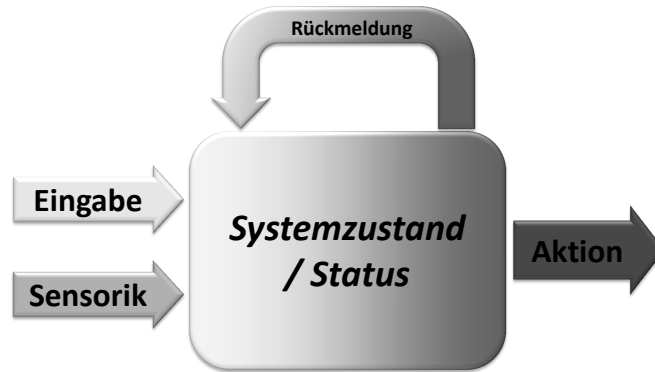


Abbildung 3.4: Verarbeitungsprozess innerhalb eines Sensor-Aktor-Systems.

Technologische Weiterentwicklungen eröffnen hier zunehmend neue Anwendungsgebiete, in denen Sensor-Aktor-Systeme als verteilte Ressource für informationstechnische Anwendungsszenarien genutzt werden.

An dieser Stelle ist kritisch zwischen *Aktuatoren* und *Effektoren* zu differenzieren. Aktuatoren werden allgemein als Komponenten eines Systems bezeichnet, welche Informationen über beliebige Schnittstellen an die Umwelt abgeben. Im Gegensatz dazu bilden Effektoren eine Teilmenge der Aktuatoren, die in der Lage sind, ihre Umwelt oder Relationen des eigenen Systems zur Umwelt durch spezifische Fähigkeiten aktiv zu beeinflussen. Betrachtet man hierzu nochmals das Konzept eines klassischen Regelkreises, so bewirkt ein Effektor den direkten oder auch indirekten Einfluss auf die jeweilige Führungsgröße zur Einhaltung der Regelungsparameter beziehungsweise Steuerungsprozesse. Diese Eigenschaft muss ein Aktuator nicht zwingend bereitstellen, wenn er beispielsweise passiv Ereignisse visualisiert.

Abbildung 3.5 zeigt zwei unterschiedliche Ausprägungen von SANET als semi- und voll-automatisierte Architektur. Während bei semi-automatisierten Systemen alle Aktionen über eine zentrale Kontrollinstanz ablaufen, können bei automatisierten Strukturen direkte Prozesse zwischen Sensorik und Aktuatorik realisiert werden. Diese direkten Kommunikationswege ermöglichen einen deutlich schnelleren Informationsaustausch, stützen sich jedoch auf eine lokal beschränkte Wissensbasis zur Entscheidungsfindung und binden lokale Ressourcen. Bei semi-automatisierten Konzepten werden diese Nachteile durch einen erheblich höheren Kommunikationsaufwand sowie erhöhte Latenzen umgangen. Keine der beiden Architekturen ist besser, sondern jede bietet spezifische Charakteristiken, die bei der Konzeption je nach Skalierungsgrad der Topologie sowie Systemkomplexität zu beachten sind.

⁷häufig auch als *Aktor* bezeichnet

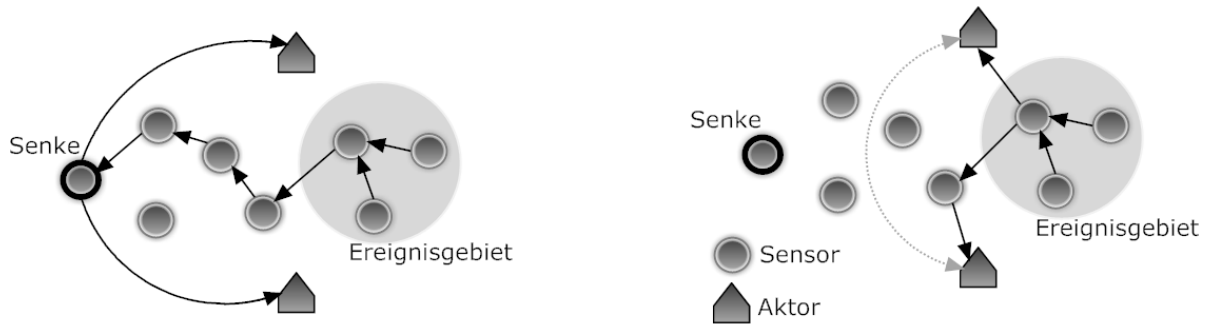


Abbildung 3.5: Semi-automatisierte (*links*) und automatisierte (*rechts*) SANET Strukturen.

SANETs repräsentieren somit eine weitere Teilmenge der Ad Hoc Netzwerke, welche aktiv auf Änderungen in der Umwelt sowie systeminterne Ereignisse reagieren können. Die Funktionalität der Sensorik und Aktorkomponenten kann auf unterschiedliche Elemente des Gesamtsystems verteilt sein. Einhergehend mit den Fähigkeiten, aktiv auf interne und externe Ereignisse reagieren zu können, bieten derartige Systeme im Gegensatz zu rein passiv agierenden Plattformen ein deutlich breiteres Anwendungsspektrum. Im Gegensatz zu WSN wird bei SANETs auch selten von einer homogenen Knotenmenge ausgegangen. Die Mobilität der Teilsysteme ist per Definition nicht zwingend vorausgesetzt. Das grundlegende Design von SANETs umfasst folglich spezifische Kernkomponenten, die auf funktionaler Ebene zusammenwirken [384]:

- Sensorikkomponenten zur Erfassung spezifischer Messdaten.
- Auswertungskomponenten für Sensordaten.
- Aktoren zur Realisierung aktiver Maßnahmen auf spezifische externe/interne Ereignisse.
- (heterogene) Kommunikationsinfrastruktur & Subsystemarchitekturen.
- Räumliche Verteilung in unterschiedlicher Skalierung.

Die räumliche Verteilung des SANET Gesamtsystems ist je nach Anwendungsszenario unterschiedlich skalierbar und nicht statisch vordefiniert. Im Falle dynamischer Systeme stellt die Mobilität eine zusätzliche Herausforderung dar. Treten hierbei kontinuierlich Änderungen in der Topologie auf, wird unter Umständen die Funktion des Gesamtsystems gestört und die Funktionserfüllung kann nicht sichergestellt werden. In diesem Zusammenhang repräsentieren Steuerung- und Verwaltungsinstanzen kritische Elemente, da diese Komponenten das zeitlich und funktional abgestimmte Verhalten aller Sensor- und Aktor-Komponenten zur Laufzeit sicherstellen. Die zugrundeliegenden Kontrollparadigmen repräsentieren Gegenstand aktueller Forschungen. In Hinblick auf konkrete Umsetzungen von SANET Applikationen sind nach [384] unterschiedlicher Strategien anwendbar:

Zentral koordiniert:

Ein dediziertes Steuerungssystem überwacht auf globaler Ebene alle Prozesse und koordiniert alle verfügbaren Subsysteme.

Dezentral geplant:

Die verschiedenen Subsysteme arbeiten eigenständig oder kooperativ nach vordefinierten Regeln und Synchronisationsprotokollen. Innerhalb dieser Rahmenbedingungen existiert Handlungsfreiheit. Eine zentrale Koordinierung ist nicht erforderlich.

Dezentral rollenbasiert:

Jedes Subsystem repräsentiert eine vordefinierte Rolle mit spezifischen Ressourcen, Fähigkeiten und Einschränkungen. Die vorgegebenen Aufgabenstellungen werden zur Laufzeit dynamisch auf die Fähigkeiten der Subsysteme abgebildet, wobei Rahmenbedingungen wie beispielsweise zeitliche Abhängigkeiten beachtet werden müssen. Über externe Sensorik können kooperative Aktionen koordiniert werden.

Aktuelle Forschungsarbeiten und Technologien auf dem Gebiet der SANETs untergliedern die Systemstruktur auf unterschiedlichen Abstraktionsschichten (siehe Abbildung 3.6). Aufbauend auf den jeweiligen, heterogenen Hardwareplattformen realisiert eine Middleware zunächst die Hardwareabstraktion. Hierdurch wird allen Applikationen eine einheitliche, geschlossene Schnittstelle zur Verfügung gestellt. Applikationen auf den jeweiligen Teilkomponenten übernehmen selbstständig spezifische *Tasks* (Aufgaben), welche die verfügbaren Hardwareressourcen über die Middleware-Schnittstellen nutzen. Eine weitere, zusätzliche Abstraktionsschicht stellt eine globale Koordinierungsinstanz dar, welche einzelne Aufgaben auf die jeweiligen Subsysteme verteilt. Die gewonnenen Sensordaten sowie Statusinformationen werden von allen relevanten Teilkomponenten auf lokaler Ebene an diese Kontrollinstanz übermittelt. Um die Datenlast hierbei zu minimieren, kommen auf lokaler Informationsverarbeitungsebene Datenaggregations- und Datenfusionsansätze zum Einsatz, auf die im späteren Verlauf dieser Arbeit noch näher eingegangen wird.

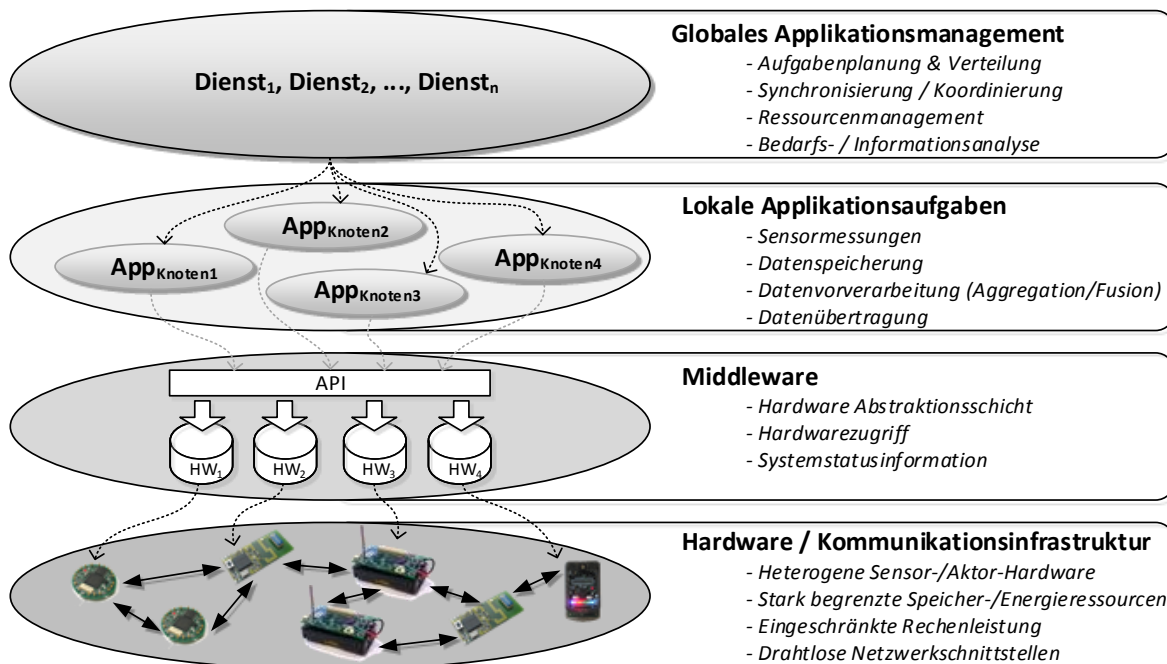


Abbildung 3.6: Sensor-Aktor-Netzwerk mit den einzelnen Abstraktionsebenen.

Forschungen konzentrieren sich auf mögliche Lösungskonzepte zur Steigerung des Autonomiegrades verteilter, hochgradig integrierter Systeme. Ziel dabei ist eine selbstorganisierende Kooperation heterogener Systemplattformen zur Erfüllung gemeinsamer Aufgaben [344]. Begrenzte Energieressourcen schränken die Möglichkeiten energieautarker Systeme zur Laufzeit erheblich ein. Folglich repräsentiert auch hier eine Steigerung der Energieeffizienz ein wichtiges Optimierungsziel.

Delay / Disruption Tolerant Networks - DTN

DTN⁸ oder auch *verzögerungstolerante Netzwerke* stellen eine robuste Protokollarchitektur dar, die es ermöglicht, Kommunikationsprozesse auch bei massiven Verbindungsproblemen und Störeinflüssen fortzusetzen [70, 149]. Zeitliche Aspekte der Datenübertragung werden dabei vernachlässigt. Derartige Netzwerke kommen primär in spärlich verbundenen Kommunikationsinfrastrukturen mit geringer Verbindungsstabilität zum Einsatz [150]. WSN und SANET Szenarien sind je nach Rahmenbedingungen als DTN Architektur realisierbar, wobei bestimmte Einschränkungen hinsichtlich funktionaler und nichtfunktionaler Anforderungen auf Applikationsseite berücksichtigt werden müssen. Auf die Funktionsweise und konkrete Anwendungsszenarien wird im Folgenden näher eingegangen.

Konzepte und Funktionsweise

Die zugrundeliegenden Kommunikationskonzepte wurden von der NASA⁹ [279] entwickelt und dienen der Realisierung von Übertragungsprozessen im Luft- und Raumfahrtsektor. Darauf aufbauend wurden 2007 Eigenschaften und Funktionen von DTN Architekturen im RFC 4838 zusammengefasst [103]. Im November 2007 folgte die Spezifikation der *Paket-Bundle-Protokolle* im RFC 5050 [336]. Hier sind die Konzepte zur gekapselten Bündelung von Daten oberhalb der Transportschicht als *Overlay Network* beschrieben (siehe Abbildung 3.7).

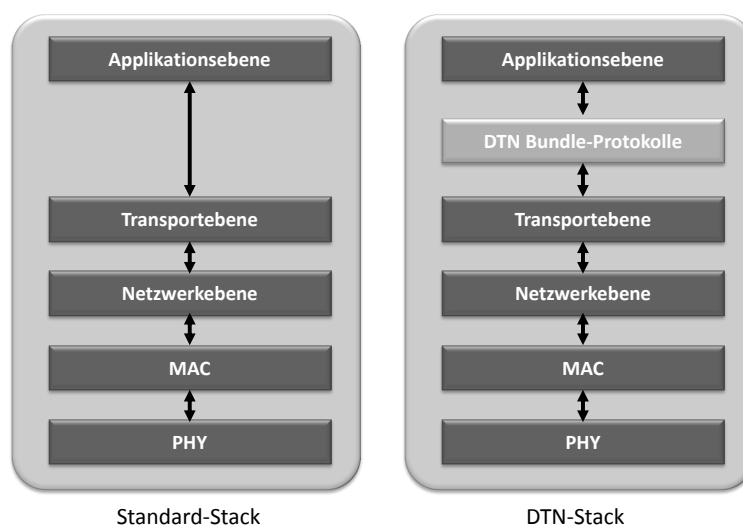


Abbildung 3.7: DTN Protokollstackerweiterung zur gekapselten Paketbündelung.

⁸Delay Tolerant Network

⁹National Aeronautics and Space Administration

3 Basistechnologien & Konzepte

Ziel von DTN ist es, Datenpakete bei erhöhter Störanfälligkeit und auch bei stark verlängerten Paketlaufzeiten zu übertragen. Um eine solche Kommunikation zu ermöglichen, wird bei der Verbindungsinitialisierung auf die Prüfung kompletter Ende-zu-Ende Verbindungskanäle verzichtet. Dementsprechend existieren für DTN Szenarien angepasste Verfahren für das Routing sowie zur Sicherstellung der Datenverlässlichkeit.

In Bezug auf das Routing stellt das Fehlen dauerhafter Verbindungen eine wesentliche Herausforderung dar [66, 205]. So können weder aktuelle Routingtabellen gepflegt werden, noch können bei Bedarf kurzfristig neue vollständige Routenpfade von der Quelle zur Senke gesucht und bewertet werden. Folglich können Standard-Routingverfahren, wie sie im Kontext drahtloser Kommunikationsnetzwerke bereits vorgestellt wurden, nicht beziehungsweise nur sehr stark eingeschränkt genutzt werden. Aus diesem Grund haben sich für DTN Szenarien *store-and-forward* Prinzipien bewährt. Hierbei wird eine Kommunikation stufenweise von Hop zu Hop abgewickelt [210]. Mehrere Datenpakete werden hierbei zu sogenannten *Bundles* zusammengefasst und in jedem Zwischenknoten gepuffert. Dort können sie über einen längeren Zeitraum vorgehalten werden, bis ein entsprechender Link zu einem nächsten Hop in Richtung Senke verfügbar ist. Das Konzept ist in Abbildung 3.8 illustriert.

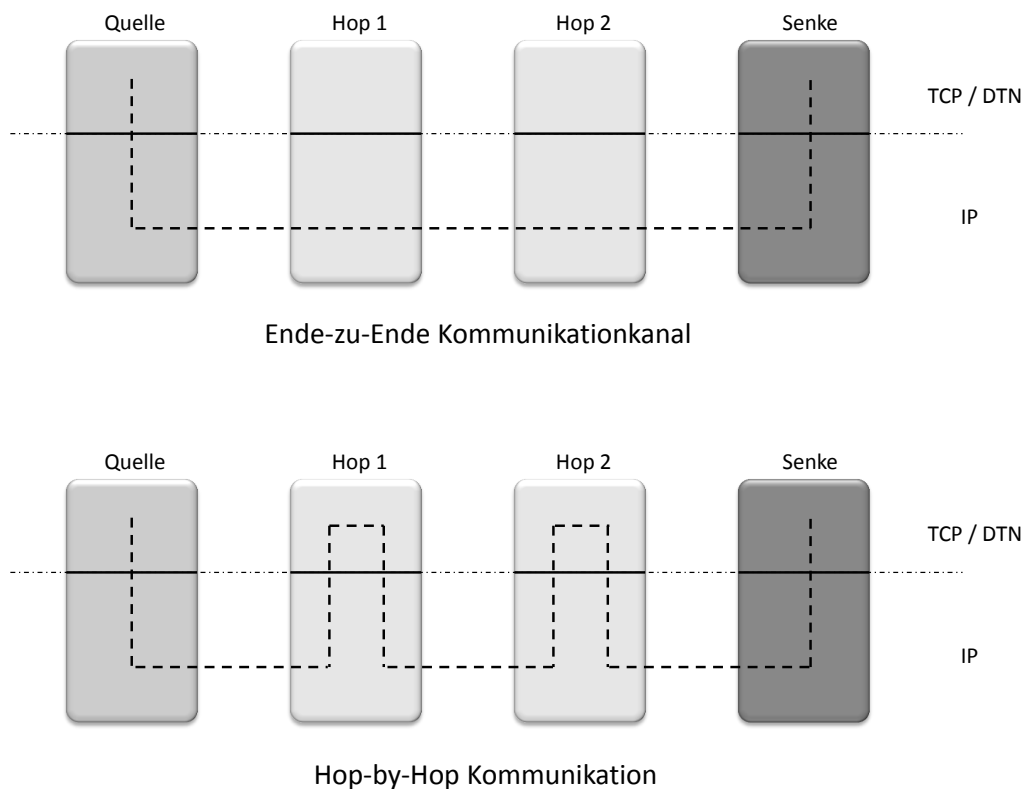


Abbildung 3.8: Vergleich zwischen einer konventionellen Ende-zu-Ende Übertragung (*oben*) und einer DTN Datenübertragung (*unten*).

Die Zwischenknoten werfen die gepufferten Daten erst dann, wenn eine Empfangsbestätigung vom Zielrechner eintrifft beziehungsweise wenn der Pufferspeicher ausgelastet ist. Demnach werden während der Übertragung implizit Sicherungskopien der jeweiligen Datenfragmente angefertigt.

*SWIM*¹⁰ [351] ist ein solcher Routing-Ansatz, der nur mit derartigen Kopiermechanismen arbeitet. Das Modell beruht auf der Annahme, dass in Folge der Knotenmobilität eine der Kopien schließlich den Empfänger erreicht. Die zeitlichen Aspekte der Übertragung sowie die erreichte Paketverlustrate hängen dabei stark von den Rahmenbedingungen ab. Ein weiteres Routingprotokoll für DTN repräsentiert *DHR*¹¹ [244], welches speziell für groß skalierte Netzwerktopologien konzipiert wurde. Auch hier wird eine *Hop-by-Hop* Routingstrategie angewendet, mit der Daten etappenweise in Richtung Empfänger transportiert werden sollen.

Zusätzlich wird im Bereich DTN verstärkt mit *Multipath*- sowie *Multicast*-Strategien gearbeitet [150]. Multipath-Protokolle erhöhen hier die Empfangswahrscheinlichkeit der Daten in einer stark stör anfälligen Umgebung und senken unter Umständen die Übertragungsdauer. Multicast-Mechanismen dienen wiederum der effizienten Adressierung mehrerer Empfänger. Da keine separate Übertragung an jeden einzelnen Zielknoten erforderlich ist, wird die Datenlast im Netzwerk deutlich reduziert. Dies ist bei DTN Architekturen von besonderer Relevanz, da konzeptbedingt sehr viele Ressourcen für die Zwischenspeicherung von Daten gebunden werden.

Die DTN Ansätze bringen jedoch konzeptionell bedingt auch Nachteile mit sich. Eine wesentliche Schwachstelle repräsentiert dabei der Wegfall klassischer Timeout-Prinzipien. So erhalten zeitliche Aspekte bezüglich der Aktualität von Informationen automatisch eine untergeordnete Priorität, da durch das Routing und die sporadisch Netzinfrastruktur weder *QoS*¹² Anforderungen eingehalten noch fest spezifizierte Antwort- und Reaktionszeiten sichergestellt werden können. Bundle-Protokolle ermöglichen zwar eingeschränkt die Berücksichtigung funktionaler Anforderungen der Applikation seitens des Kommunikationskanals, jedoch kann die Einhaltung dieser Parameter aufgrund der konzeptionellen Rahmenbedingungen nicht sichergestellt werden [351]. Informationen sind somit unter Umständen beim Eintreffen am Empfänger schon sehr stark veraltet und nicht mehr entscheidungsrelevant. Dies hat besonders auf klassische Sensornetzwerkapplikationen Einfluss, welche vordefinierte Ereignisse zeitnah detektieren sollen [266].

Ein weiterer Nachteil resultiert aus der Datenpufferung in den Knoten. Hierfür sind entsprechende Ressourcen bereitzustellen, die je nach Anwendung dimensioniert werden müssen. Im praktischen Einsatz kann es unter schlechten Bedingungen trotzdem zu jedem Zeitpunkt zu Speicherengpässen kommen. In diesem Fall müssen zwangsläufig Daten verworfen werden. Das Risiko eines Datenverlustes bleibt folglich weiterhin bestehen und lässt sich nur durch die Schaffung von Redundanzen in der Topologie (Stichwort Multipath-Routing) verringern.

DTN stellen häufig ein letztes und essentielles Kommunikationsmittel in kritischen Situationen und Umgebungen dar. Da auf Basis der übertragenen Daten unter Umständen weitreichende Entscheidungen und Aktionen ausgelöst werden, repräsentiert die Datensicherheit ein essentielles Kriterium [340]. Besonders im WSN und SANET Kontext sind daher Sicherheitsaspekte kritisch. In DTN Strukturen sind diese Sicherheitsmechanismen aber als kritische Schwachstelle

¹⁰Shared Wireless Infostation Model

¹¹DTN Hierarchical Routing

¹²Quality of Service

zu identifizieren [83]. Bedingt durch die Datenpufferungskonzepte und das Fehlen kompletter Ende-zu-Ende-Verbindungskanäle greifen klassische kryptographische Protokolle nur eingeschränkt. Daten können folglich relativ einfach manipuliert oder auch umgeleitet werden. Hier sind zusätzliche Sicherheitsmechanismen nötig, die eine Prüfung der Informationen auf Integrität, Vertraulichkeit und Authentizität gewährleisten.

Anwendungen

Praktische Umsetzungen von DTN wurden bereits in mehreren Forschungsprojekten realisiert, so z.B. *DieselNet* der University of Massachusetts [369], bei dem Daten zwischen statischen Endpunkten über mobile Knoten (Fahrzeuge) übermittelt werden. Auch das *N4C* Projekt innerhalb des EU Forschungsprogramms FP7 befasst sich mit einem DTN, über das Internetanbindungen in abgelegenen Regionen verfügbar gemacht werden sollen [117, 151]. Das *TIER*¹³ Projekt [379] der Berkeley Universität verfolgt ähnliche Zielstellungen.

Ein viertes interessantes DTN Projekt ist *Haggle* [304], welches ebenfalls von der Europäischen Union gefördert wird. Haggle stellt eine datenzentrische Netzwerkarchitektur bereit, mit der Informationen über mobile Endgeräte ausgetauscht werden. Die Datenübertragungen finden dabei immer direkt zwischen den Geräten statt. Durch die Mobilität können die Information dann auch ohne zelluläre Netzinfrastruktur verbreitet werden. Die verwendeten Prinzipien ähneln jenen Strategien zur Blütenbefruchtung durch Insekten, welche den Pollen mittransportieren und so großflächig verteilen. Abbildung 3.9 zeigt beispielhaft ein Einsatzszenario von DTN Architekturen, welches den Konzepten von Haggle ähnelt und beliebige mobile Kommunikationsgeräte einbindet.

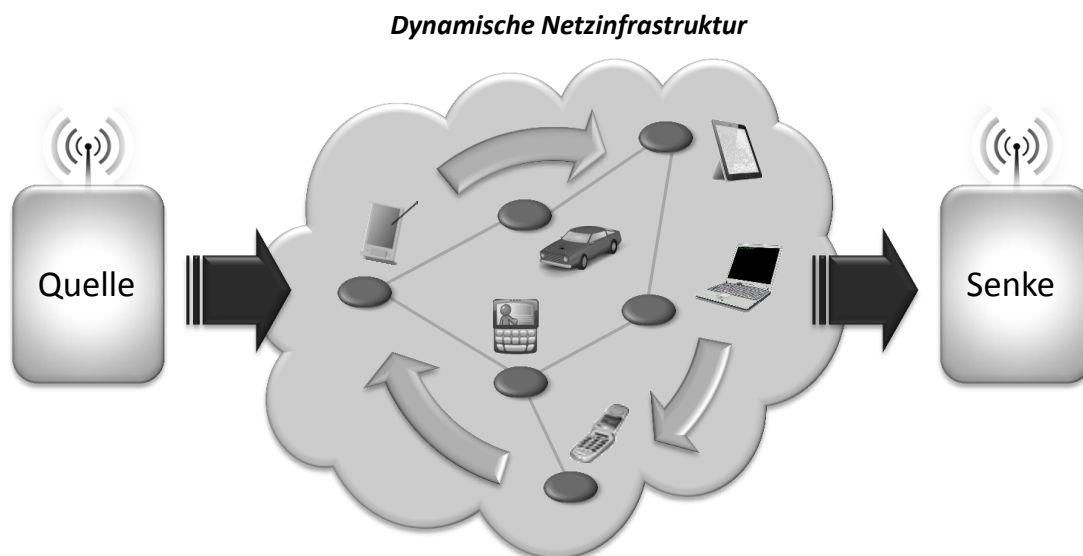


Abbildung 3.9: Beispielszenario für den Einsatz einer DTN Architektur. Hier sind sowohl Quelle und Senke statisch positioniert und nicht in Kommunikationsreichweite. Zwischen den Stationen befindet sich eine hochgradig dynamische Netzinfrastruktur mit einer Vielzahl heterogener, mobiler Kommunikationsplattformen. Diese werden für den stufenweisen Weitertransport der gebündelten Daten verwendet.

¹³Technology and Infrastructure for Emerging Regions

Aus militärischer Sicht sind DTN ebenfalls sehr interessant, um taktische Informationen robust aus den vielen Einsatzgebieten zu verarbeiten. Die *DARPA*¹⁴ forscht in diesem Kontext an dem *WNaN*¹⁵ Projekt [45], in dem mehrere Funktechnologien mit jeweils unterschiedlichen Charakteristiken und Spezifikationen zusammengefasst werden, um Information störunempfindlich übertragen zu können.

3.1.2 Drahtlose Low-Power Kommunikationsstandards

In Zusammenhang mit dem steigenden Grad der drahtlosen Vernetzung müssen einheitliche Standards geschaffen werden, welche den Informationsaustausch sowie die zugrundeliegenden Basistechnologien definieren. Einhergehend mit herstellerübergreifend kompatiblen Kommunikationsstandards können Entwicklungskosten gesenkt und technologische Weiterentwicklungen beschleunigt werden. Die Standards sind dabei an die jeweiligen Anwendungsbereiche angepasst und spezifizieren wesentliche Übertragungsparameter wie die maximale Datenrate, die effektive Kommunikationsreichweite sowie die damit verbundenen Energieverbrauchswerte und die maximale Übertragungslatenzen. Weitere Faktoren, beispielsweise das genutzte Frequenzband sowie integrierte Kollisionsmechanismen beeinflussen die Robustheit und die Zuverlässigkeit der Kommunikation, speziell in stör anfälligen Umgebungen.

Im Rahmen der Standardisierung von drahtlosen Kommunikationstechnologien wurde 1980 das *Projekt 802* des *IEEE*¹⁶ [121] initiiert. Hauptaufgabe innerhalb der Struktur ist die koordinierte Standardisierung auf den hardwarenahen Protokollebenen.

Für die komplexen Anforderungen in verteilten Sensor-Aktor-Systemen hinsichtlich Mobilität, Konnektivität sowie Flexibilität stehen mehrere Funkstandards und Protokollstacks zur Verfügung, die speziell in Hinblick auf *Low Power* und *Low Data Rate* Anwendungsszenarien interessante Ansätze darstellen.

Nanotron

Die Firma Nanotron [275] bietet unterschiedliche Funklösungen, welche sich speziell mit der Thematik Funklokalisierung auseinandersetzen. Zu den bekanntesten Übertragungsstacks gehören *NanoLOC* und *NanoPAN*, die im 2.4 GHz Band Datenraten von 125 kBit/s bis 2 MBit/s über 200 Meter *Line of Sight* bei 50 mW Sendeleistung erzielen. In Gebäuden und bei Hindernissen verringert sich entsprechend die Datenrate und die Reichweite (maximal 30 Meter). Die Besonderheit der Kommunikationstechnologie ist das *Zirpenfrequenzspreizungs-Verfahren* (*CSS*¹⁷) nach IEEE 802.15.4a, welches als Modulationstechnik verwendet wird. Ein *Chirp-Impuls* stellt dabei ein sinusförmiges Signal dar, dessen Frequenz im zeitlichen Verlauf kontinuierlich ansteigt oder abfällt. Ein abfallender Frequenzverlauf repräsentiert das logische Symbol "0", ein ansteigender Verlauf die logische "1".

¹⁴US Defense Advanced Research Projects Agency

¹⁵Wireless Network after Next

¹⁶Institute of Electrical and Electronics Engineers

¹⁷Chirp Spread Spectrum

Mit Hilfe der Chirp-Impulse sind auch Lokalisierungsinformationen zwischen den Knoten auf Basis von Signallaufzeiten berechenbar. Nanotron integriert diese Fähigkeiten direkt in den Protokollstack, wodurch sich die Technologien für viele Applikationsszenarien zur Objektlokalisierung und -verfolgung in hochdynamischen Topologien eignen.

Durch die Chirp-Modulationstechnik deckt ein Kommunikationsprozess einen verhältnismäßig großen Frequenzbereich ab, was die Übertragung relativ störunempfindlich macht, jedoch gleichzeitig andere Kommunikationsprozesse in der Umgebung stark beeinträchtigen kann. Folglich wirken sich die Eigenschaften von CSS bei mehreren simultanen Übertragungsprozessen beziehungsweise Übertragungstechnologien unter Umständen negativ auf das Kommunikationsverhalten aus. Als Topologie nutzen die Nanotron Standards ausschließlich sternförmige Topologien über ein Wireless Backbone. Eine Mesh-Vernetzung ist nicht vorgesehen und muss zusätzlich implementiert werden.

802.15.4 / Zigbee

Einer der vielversprechendsten Low-Power Kommunikationsstandards wird innerhalb von 802.15.4 spezifiziert und beschreibt die Übertragungsmechanismen auf beiden unteren ISO/OSI Protokollebenen. *ZigBee* als Funkstandard setzt auf diesen unteren Protokollebenen (siehe Abbildung 3.10) an und ermöglicht eine einfache Kanalverwaltung / Kanalnutzung auf Applikationsebene. Der Name ZigBee leitet sich dabei vom Kommunikationsverhalten der Honigbiene ab. Im Rahmen eines kollektiven Schwarmverhaltens kommunizieren die einzelnen Bienen auf Basis komplexer Bewegungsmuster miteinander. Auf diese Weise sind die Bienen imstande, Lageinformationen von Objekten auszutauschen, beispielsweise Positionsangaben, Bewegungsrichtungen oder Entfernungen.

IEEE 802.15.4 und die Protokolle von ZigBee weisen einen sehr geringen Energiebedarf auf, bieten jedoch auch nur geringe Datenraten von maximal 250 kBits/s. In Folge dessen richtet sich der Anwendungsfokus primär auf Sensornetzwerkapplikationen und Embedded Plattformen, welche einen schlanken und effizienten Protokollstack für die Übertragung nutzen. ZigBee fokussiert dabei ein stabiles und latenzminimiertes Übertragungsverhalten. Je nach genutztem Frequenzband (2.4 GHz, 868 MHz oder 900 MHz ISM¹⁸ Band) unterscheidet sich die maximale Übertragungsreichweite erheblich. Unter Beachtung der zulässigen Sendeleistung von 10 mW liegt diese im 2.4 GHz Band bei lediglich 10 bis ca. 30 Meter. Im 868 MHz Band können maximale Reichweiten von bis zu 2km oder 40 km (bei 500 mW Sendeleistung) überbrückt werden (jeweils *Line of Sight*, ohne Hindernisse). Es stehen jeweils 16 vordefinierte Kommunikationskanäle zur Auswahl, um möglichen Interferenzeinflüssen zu entgehen.

2007 wurde der Standard in der 802.15.4a Spezifikation um eine angepasste Architektur auf physischer Ebene (Layer 1) erweitert. Hier stehen nun zwei zusätzliche Übertragungsverfahren zur Verfügung. Einerseits wurden *UWB*¹⁹ Technologien in den Standard integriert, die auf Basis breiter Frequenzbänder (3-5 GHz, 6-10 Ghz) hohe Übertragungsraten auf kurze Distanzen

¹⁸Industrial, Scientific and Medical Band

¹⁹Ultra Wide Band

3 Basistechnologien & Konzepte

ermöglichen. Des Weiteren ist nun eine Übertragung mittels CSS möglich, wie es bei den vorgestellten Nanotron Technologien verwendet wird. Diese Technologie verbessert das Übertragungsverhalten in störungsbehafteten Umgebungen und bietet integrierte Knotenlokalisierungsmechanismen.

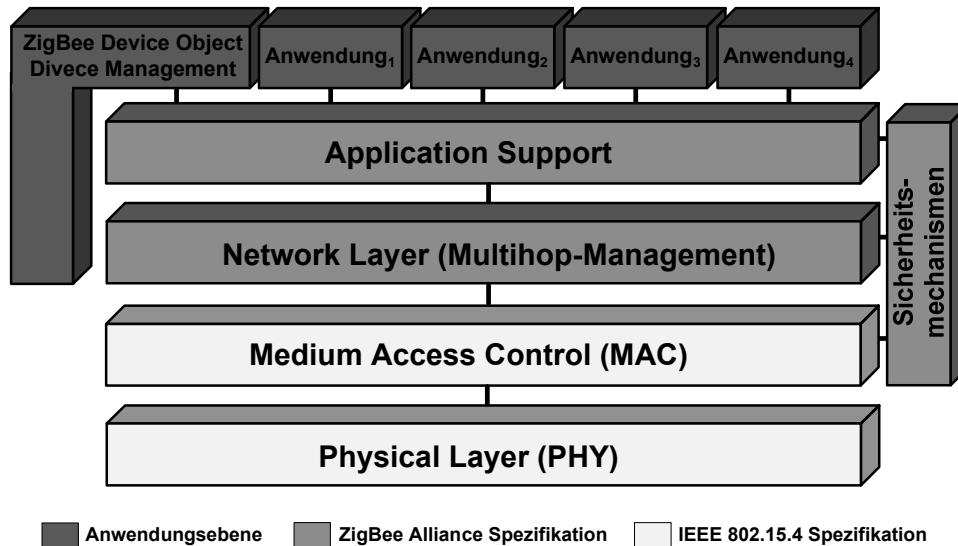


Abbildung 3.10: IEEE 802.15.4 / ZigBee Protokollstack.

Netzwerktopologien auf Basis der IEEE 802.15.4 Spezifikation prägen sich entweder in sternförmigen, teils hierarchisch strukturierten Anordnungen oder alternativ in rein dezentralen *Peer-to-Peer (P2P)* Strukturen aus. Abbildung 3.11 zeigt die verschiedenen Varianten.

In den jeweiligen Topologien übernimmt ein *PAN²⁰-Kordinator* die Verwaltung des Netzwerkes. Weiterhin existieren *FFD²¹* mit voller Funktionalität sowie *RFD²²* mit eingeschränktem Kommunikations- beziehungsweise Funktionsumfang. Die Knoteninstanzen melden sich initial im Netzwerk an und erhalten die benötigten Kommunikationsressourcen individuell je nach Bedarf. Störeinflüsse und Datenkollisionen infolge mehrerer simultaner Übertragungen können minimiert werden. Hinsichtlich klassischer Anwendungsszenarien im Bereich drahtloser Sensornetze entstehen durch die PAN-Koordinatoren jedoch Flaschenhälse in Bezug auf den Datendurchsatz. Bei energieautarken Anwendungen werden die PAN-Koordinatoren überdurchschnittlich belastet und verbrauchen in Folge dessen die verfügbaren Energieressourcen deutlich schneller, was sich negativ auf die Laufzeit der gesamten Netzwerktopologie auswirkt. P2P Konfigurationen definieren ebenfalls PAN-Koordinatoren, welche aber keinen Einfluss auf die Kommunikationsabläufe im Netzwerk haben, da ein Verbindungsaufbau jeweils direkt zwischen Sender und Empfänger erfolgt. Da somit nur Single-Hop Datenübertragungen realisiert werden können, müssen Multi-Hop-Kommunikationsszenarien auf einer höheren Ebene abstrahiert umgesetzt werden.

²⁰Personal Area Network

²¹Full Function Devices

²²Reduced Function Devices

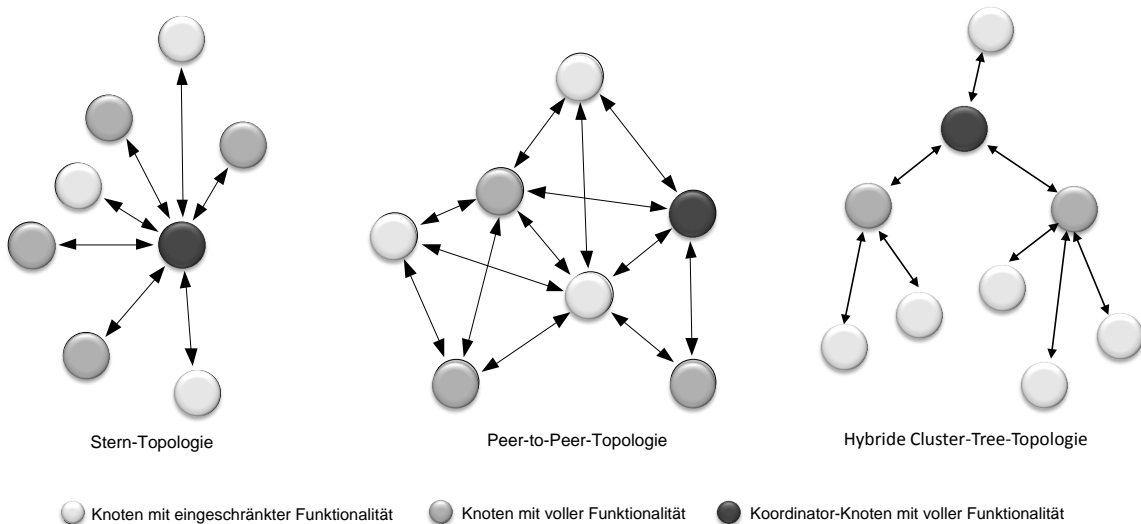


Abbildung 3.11: IEEE 802.15.4 Netzwerk-Topologien: *Stern*topologie links, *Peer-to-Peer (P2P)* Topologien mittig sowie *hybride Cluster-Tree* Topologien rechts. Der *PAN-Koordinator* in der Sterntopologie ist dunkel markiert. Er koordiniert die gesamte Topologie.

Z-Wave

Z-Wave [412] wurde 1999 von der dänischen Firma Zensys entwickelt und repräsentiert eine vereinfachte Variante der ZigBee Technologie. Z-Wave arbeitet innerhalb des 868 MHz und 900 MHz Frequenzbandes bei einer Datenrate von 9-40 kBit/s über 200 Meter (bei freier Sicht, in Gebäuden ca. 30 Meter). Der Kommunikationsstandard dient primär der Steuerung von Regelungssystemen in der Gebäude- und Prozessautomatisierung sowie als Kommunikationsinterface für Entertainment-Elektronik. Durch die geringe Leistungsaufnahme soll ein energieautarker Betrieb über mehrere Jahre realisierbar werden. Der Z-Wave Standard unterstützt dabei Stern- und Mesh-Topologien mit bis zu 232 Knoten und kann über Netzwerk-Bridges erweitert werden.

MiWi

Der MiWi Kommunikationsstack [156] wurde von Microchip entwickelt und stellt ebenfalls eine vereinfachte Form des ZigBee Standards dar. So arbeitet MiWi oberhalb der in IEEE 802.15.4 spezifizierten Protokolle und ist konzeptionell auf maximal 1024 Knoteninstanzen beschränkt. Als Topologievarianten stehen Stern- und Mesh-Vernetzung zur Verfügung. Vergleicht man die vereinfachte Umsetzung von MiWi mit ZigBee, so kann der Bearbeitungsaufwand für die Kommunikation im Mikrocontroller um 40-60 % reduziert werden [231]. Zusätzlich ist der Einsatz von MiWi für Entwickler in Hinblick auf Lizenzierungskosten interessant, da der komplette Protokollstack lizenzfrei nutzbar ist.

Bluetooth & Wibree

IEEE 802.15.1 alias Bluetooth ist eine bekannte Kommunikationstechnologie im Bereich mobiler Kommunikationsgeräte und Smartphones, welche sich aus mehreren Protokollebenen zusammensetzt. Bluetooth umfasst einen kompletten Protokollstack, beginnend bei Layer 1 (Physical Layer) bis hin zur Service Discovery auf Transportebene (Layer 4). Bluetooth ermöglicht das einfache und direkte Koppeln von Endgeräten und die anschließende Datenübertragung. Je nach Protokollstack-Version sind Datenraten bis zu 2 MBit/s über eine Distanz von maximal 100 Metern *Line of Sight* bei 100 mW Sendeleistung möglich. Eine Besonderheit von Bluetooth ist das Handshakeverfahren bei der Verbindungsinitialisierung, bei dem ein *Frequenzhoppingschema (FHSS²³)* ausgehandelt wird. Nach diesem Schema werden die Übertragungsfrequenzen mit einer Wechselrate von 1600 Kanälen pro Sekunde angepasst. Diese Strategie erschwert zum einen Manipulationen während der Übertragung und gleichzeitig wird hierdurch die Robustheit für den Übertragungskanal erhöht [8].

Wibree [394] wurde von Nokia im Jahr 2006 vorgestellt und hat ähnliche Kommunikationseigenschaften wie Bluetooth. Auch Wibree arbeitet im 2.4 GHz ISM Band und ermöglicht Sterntopologien nach dem Master-Slave-Prinzip. Im Vergleich zu Bluetooth wurde die Energieeffizienz nochmals erheblich gesteigert, so dass der Energiebedarf bei ca. einem Zehntel liegt (maximal 15 mW) [231]. Somit liegt der Anwendungsfokus der Wibree Technologie bei Ultra-Low-Power Geräten, wie beispielsweise Uhren und Sportsensoren im Bereich der *BANs²⁴*. In Mobiltelefonen und Laptopsystemen ist Wibree seit 2009 als *Bluetooth Low Energy* innerhalb der Bluetooth 4.0 Spezifikation verfügbar und voll integriert. Die Übertragungreichweite beträgt unter optimalen Bedingungen ca. 10 bis maximal 30 Meter. Die theoretische, maximale Datenrate liegt bei 1 MBit/s, wobei die Nettodatenrate auf Applikationsebene bei ca. 200 kBit/s liegt.

Im Bereich der WSN und SANET spielen Bluetooth-basierte Technologien aufgrund ihrer Eigenschaften eine untergeordnete Rolle. So erlaubt Bluetooth keine Mesh-Topologien, sondern ausschließlich einzelne Punkt-zu-Punkt-Verbindungen sowie *PicoNets*, welche eine Sterntopologie mit einem Masterknoten und maximal sieben Slave-Endpunkten repräsentieren. Zwar können mehrere PicoNets zu einem *Scatternet* verbunden werden, der administrative Aufwand ist dabei aber verhältnismäßig hoch.

Des Weiteren basiert der komplexe Protokollstack auf einer Vielzahl dedizierter und applikationsspezifischer Dienste (*Profile*), welche aufwendige Handshake- und Initialisierungsmechanismen erfordern. Diese erschweren den generischen Einsatz in klassischen SANET Szenarien.

²³Frequency Hopping Spread Spectrum

²⁴Body Area Network

WirelessHART

WirelessHART²⁵ [183] ist ein drahtloser Kommunikationsstandard, der derzeit ausschließlich im Industriebereich zur Steuerung und Überwachung von Maschinen und Produktionsanlagen zum Einsatz kommt. Die Spezifikation umfasst mehrere Protokolle auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen und basiert auf den Protokollen des *HART* Standards, der als drahtgebundener Feldbus konzipiert wurde. Technologisch stützt sich WirelessHART auf den in IEEE 802.15.4 spezifizierten Protokollebenen. HART als industrieller Feldbus ist weitverbreitet und die drahtlosen Knotenpunkte sind voll in die Kommunikationstopologie integrierbar. Als Frequenzband wird der 2.4 GHz Bereich genutzt. WirelessHART integriert standardmäßig eine AES128 Bit Verschlüsselung und ist für Datenraten bis 250 kBit/s über 3000 Meter Reichweite ausgelegt.

3.1.3 Hardwareplattformen

Die vorgestellten Kommunikationskonzepte konzentrieren sich auf Anwendungsbereiche eingebetteter Systeme. Daher sind auf technologischer Ebene entsprechend kompakte Hardwareplattformen erforderlich, deren Architektur die spezifischen Anforderungen von WSN / SANET und Ad Hoc Applikationen erfüllt [202, 353]. Aus den Entwicklungen der letzten Dekade gingen daher Systemplattformen mit unterschiedlicher Komplexität hervor. Jede Systemplattform integriert dabei mehrere Einzelkomponenten und Subsysteme, die in Abbildung 3.12 schematisch dargestellt werden.

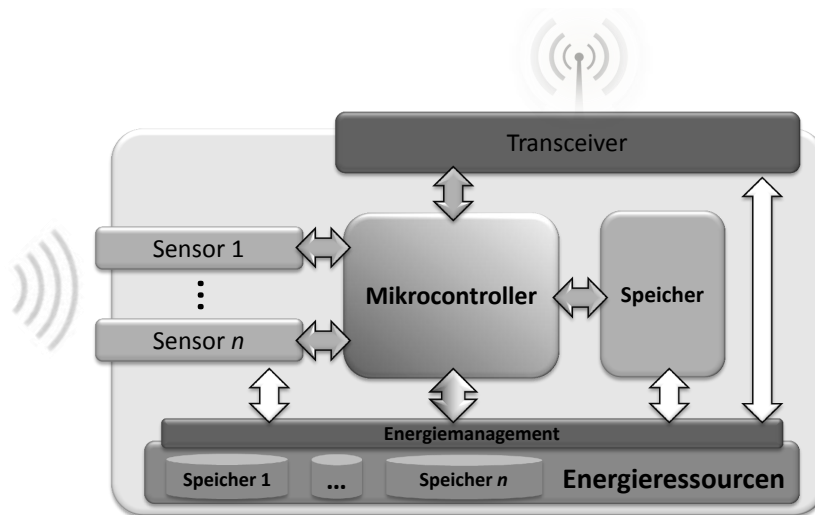


Abbildung 3.12: Schematische Darstellung der Struktur einer typischen Sensorknotenplattform.

Während im Bereich der Energiespeicher und Sensoren unzählige, anwendungsspezifische Lösungen am Markt verfügbar sind, bleibt die Menge der anwendungsspezifisch optimierten Mikrocontroller und Transceiver überschaubar. Auf diese zentralen Komponenten wird im

²⁵Wireless Highway Addressable Remote Transducer

Folgenden näher eingegangen, bevor im Anschluss komplette Systemplattformen Gegenstand der Betrachtungen sind.

Mikrocontroller

Mikrocontroller (auch μ Controller - μ C, MCU²⁶) bilden die zentrale Datenverarbeitungseinheit im Kontext eingebetteter, ressourcenbeschränkter Systeme. Im Gegensatz zu bekannten x86 und x64 CPU Architekturen besitzen μ Controller eine deutlich geringere Abwärme und arbeiten meist ohne zusätzliche Kühlkörper, was in Bezug auf Gewicht und Abmessungen erheblichen Einfluss hat. Im Gegenzug sind aber auch die Leistungsparameter deutlich geringer und auch auf applikationsspezifische Befehlssätze wird verzichtet. Für die primären Anwendungsfälle im WSN / SANET Umfeld sind die verfügbaren Ressourcen jedoch meist ausreichend.

Einen wesentlichen Vorteil von MCU repräsentiert die vollständige Integration zusätzlicher Funktionen und Komponenten direkt auf dem Chip. Neben den reinen Berechnungseinheiten verfügt ein MCU über Peripheriekomponenten, beispielsweise Kommunikationsbusse wie USB²⁷, CAN²⁸, I2C²⁹, SPI³⁰ oder RS485/EIA485³¹, aber auch analoge und digitale Einbeziehungsweise Ausgänge. DSP³² und ADC/DAC³³ Funktionalitäten sowie *Hardware-Timer* oder nichtflüchtige Speicher stellen weitere Komponenten dar.

Durch diesen hohen Integrationsgrad sind MCU vielseitige und häufig genutzte Verarbeitungseinheiten. Die Flexibilität mikrocontroller-basierter Softwarefunktionen und die niedrigen Anschaffungskosten grenzen die Hardware auch von *anwendungsspezifischen integrierten Schaltungen (ASIC³⁴)* und *frei programmierbaren Logikkomponenten (FPGA³⁵)* ab. FPGAs sind zwar ebenfalls sehr flexibel nutzbar und bieten erhebliche Leistungsvorteile durch die Hardwareparallelierung, kosten jedoch deutlich mehr und verfügen über einen geringeren Integrationsgrad für zusätzliche Peripherie. ASICs sind speziell für eine Anwendung entwickelte Schaltungen und daher hochgradig optimiert und angepasst. Aus Effizienzbetrachtungen stellen ASICs ideale Lösungen dar. Jedoch sind derartige Schaltungen nicht mehr anpassbar beziehungsweise modifizierbar, wodurch bei jeder Funktionsänderung oder Erweiterung ein neues Design erforderlich ist. Obwohl die eigentlichen Hardwarekosten bei entsprechender Stückzahl sehr gering sind, bindet der Entwicklungsprozess immense Kosten, wodurch der Einsatz nur bei Massenproduktionen sinnvoll erscheint.

Eine Auswahl bekannter Mikrocontroller und deren Eigenschaften wird in Tabelle 3.1 zusammengefasst.

²⁶Micro Controller Unit

²⁷Universal Serial Bus

²⁸Controller Area Network

²⁹Inter-Integrated Circuit

³⁰Serial Peripheral Interface

³¹Radio Sector / Electronic Industries Alliance 485

³²Digital Signal Processor

³³Analog-Digital-Converter / Digital-Analog-Converter

³⁴Application-Specific Integrated Circuit

³⁵Field Programmable Gate Array

3 Basistechnologien & Konzepte

Mikrocontroller	FLASH (kB)	SRAM (kB)	EEPROM (kB)	Sleep (μ A)	1 MIPS (mA)
Atmel AT89C51RE2 (8051)	128,0	8	0	75,00	7,40
Atmel ATmega1281	128	8	4	5,00	0,50
Atmel AT91SAM7X	128	32	0	26,00	1,10
Freescale M68HC08	61	2	0	22,00	3,75
Microchip PIC18LF8722	128	4	1	2,32	1,00
Microchip PIC24FJ128	128	8	0	21,00	1,60
Semtech XE8802 (CoolRisc)	22	1	0	1,90	0,30
TI MSP430F1611	48	10	0	1,30	0,33

Tabelle 3.1: Übersicht bekannter Mikrocontrollerplattformen und relevanter Leistungsparameter für WSN / SANET Anwendungen.

In Bezug auf die Energieeffizienz der einzelnen Mikrocontroller lassen sich nur schwer vergleichbare Parameter definieren. Nach [231] wurde hierzu die erzielte Rechenleistung pro Watt als Richtwert herangezogen. Die Ergebnisse sind im Diagramm 3.13 dargestellt. Mögliche Peripheriekomponenten werden an dieser Stelle jedoch nicht berücksichtigt.

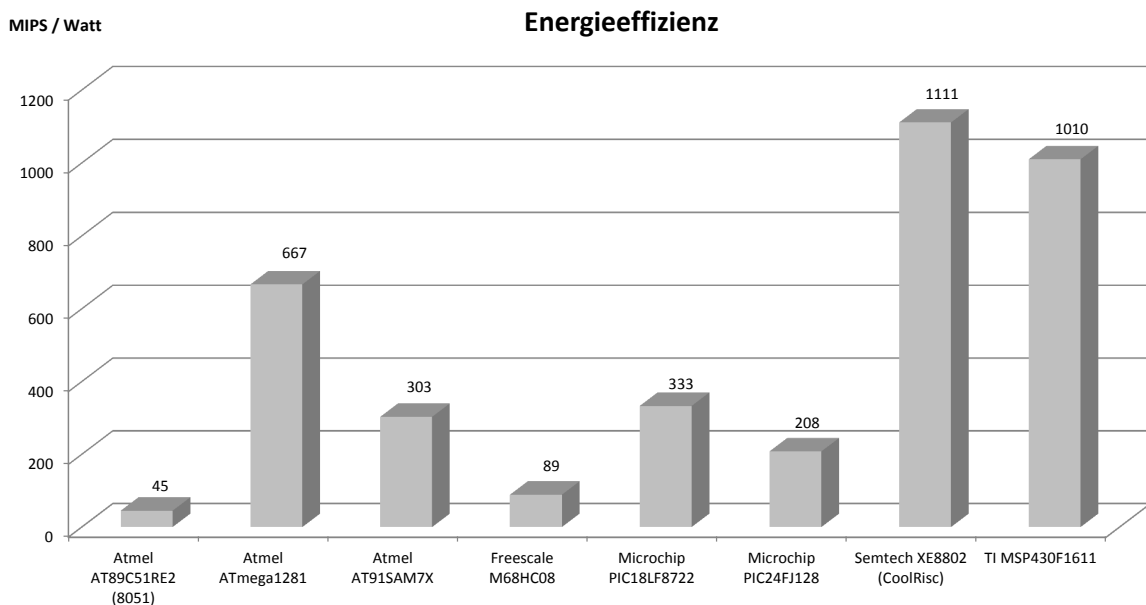


Abbildung 3.13: Vergleich der Energieeffizienz von Mikrocontrollern, dargestellt anhand der verfügbaren Rechenleistung pro Watt.

Die Tabelle dient dabei nur dem Vergleich der Relation von Rechenleistung und Energiebedarf. In Hinblick auf die Energieeffizienz eines Gesamtsystems sind natürlich die funktionalen Anforderungen ausschlaggebend. Je nach Komplexität muss hier ein Mikrocontroller gewählt werden, der ausreichend Kapazitäten liefert und in seinem Leistungsbereich den geringsten Energiebedarf aufweist.

Transceiver

Der Begriff Transceiver ($TxRx$) stellt eine Wortkombination aus *Transmitter* (Sender) und *Receiver* (Empfänger) dar und wird als Sammelbegriff für Hardwaremodule zur Netzwerkkommunikation genutzt. Die Komponenten regeln dabei das Senden (Tx^{36}) sowie das Empfangen (Rx^{37}) auf den hardwarenahen Protokollebenen (meist Layer 1 - PHY und Layer 2 - MAC). Dem softwareseitigen Kommunikationssystem wird eine entsprechende Schnittstelle zur Verfügung gestellt, über die Daten an den Transceiver übermittelt und von diesem entgegengenommen werden können.

In eingebetteten, ressourcenbeschränkten Kommunikationssystemen stellen Transceiver neben der Datenverarbeitungseinheit die wichtigste Komponente innerhalb der Systemarchitektur dar. Dies betrifft sowohl die Eigenschaften als Energiekonsument als auch die Übertragungscharakteristika bezüglich Datenrate und Sendereichweite. Eine Übersicht bekannter Transceiver mit deren spezifischen Eigenschaften wird in Tabelle 3.2 tabellarisch zusammengefasst.

Transceiver	Datenrate (kBit/s)	Frequenzband (MHz)	Sensitivität (dBm)	Sleep (μ A)	Idle (mA)	Rx (mA)	Tx (mA)
TI - CC1000	76,8	433/868/915	-101	0,20	0,10	9,30	10,40
TI - CC1020	153,6	433/868/915	-81	0,20	0,08	19,90	16,20
TI - CC1100	500,0	433/868/915	-88	0,40	1,60	16,50	15,50
TI - CC2400	1000,0	2400	-87	1,50	1,20	24,00	19,00
TI - CC2420	250,0	2400	-95	0,02	0,40	18,80	17,40
TI - CC2500	500,0	2400	-82	0,40	1,50	17,00	21,20
REM - TR1001	115,2	868	-91	0,70	k.A.	3,80	12,00
REM - TR3100	576,0	433	-85	0,70	k.A.	7,00	10,00
Nordic - nRF2401A	1000,0	2400	-85	0,90	0,01	19,00	13,00
Nordic - nRF24L01	2000,0	2400	-82	0,90	0,03	12,30	11,30
Nordic - nRF905	50,0	433/868/915	-100	2,50	0,03	14,00	12,50
MicroChip - MRF24J40	250,0	2400	-91	2,00	k.A.	18,00	22,00
Semtech - XE1201A	64,0	433	-102	0,20	0,06	6,00	11,00
Semtech - XE1203F	152,3	433/868/915	-101	0,20	0,85	14,00	33,00

Tabelle 3.2: Übersicht bekannter Transceiver im Bereich der Low Power, Low Data Rate Applikationen.

Im Gegensatz zu Mikrocontrollern ist ein Vergleich der Energieeffizienz für Transceiver einfacher realisierbar. Auf Basis spezifizierter Werte für die Datenrate und den Energiebedarf im Empfangs- und Sendemodus kann recht einfach ein Vergleichsparameter definiert werden. Dieser repräsentiert den Energiebedarf pro empfangenem oder gesendetem Bit Nutzdaten (*Payload*). Technologie- und protokoll-spezifische Paketgrößen sowie integrierte Metadaten (Header/Footer) müssen dabei mit in die Berechnungen einbezogen werden. Das Diagramm 3.14 zeigt die Ergebnisse anschaulich.

³⁶Transmit Data X

³⁷Receive Data X

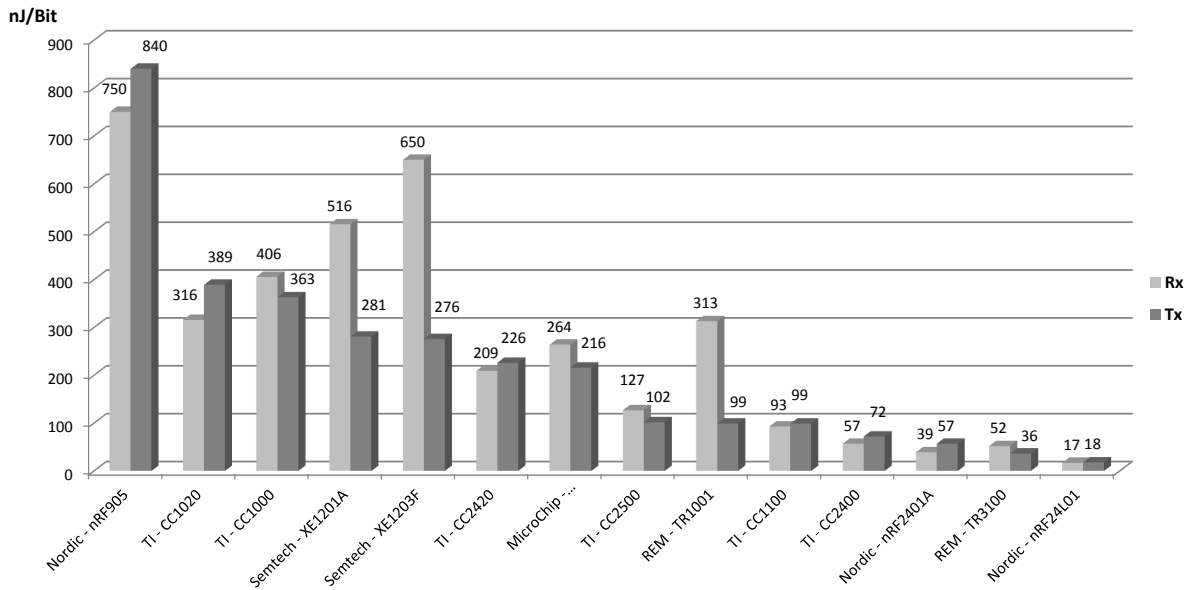


Abbildung 3.14: Vergleich der Energieeffizienz von Transceivern, dargestellt anhand des benötigten Energiebedarfs pro empfangenem beziehungsweise gesendetem Bit (aufgearbeitet nach Daten aus [231]).

Systemarchitekturen

Im Laufe der letzten Dekade entstanden aus den einzelnen Systemkomponenten komplette Systemplattformen für den Einsatz in drahtlos vernetzten, eingebetteten Applikationsbereichen. Mittlerweile existieren auf dem Markt unzählige *COTS*³⁸ Plattformen, darunter Systeme von *SunSponWorld*, *CrossBow*, *Freescale*, *Ubisense*, *Ubiwave* sowie *Ambient Systems*, *BTnotes* oder *Arch Rock* [231].

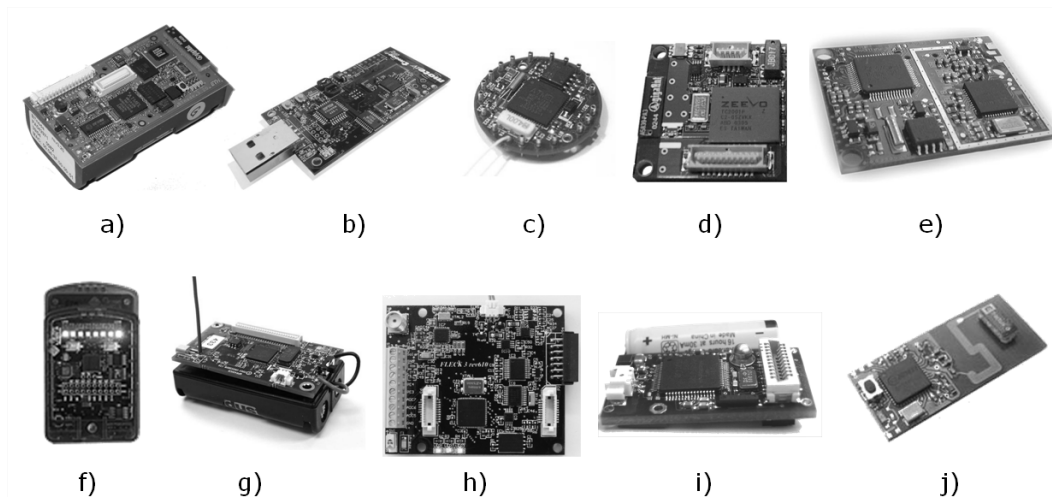


Abbildung 3.15: Eine Auswahl verschiedener Sensor-Hardwareplattformen: a) BTNode, b) Tmote Sky, c) Mica2Dot, d) Imote, e) TinyNode 584, f) Sun SPOT, g) MicaZ, h) Fleck3, i) Particles, j) WeBee.

³⁸Commercial Off The Shelf

3 Basistechnologien & Konzepte

Bei den verschiedenen Entwicklungen stand stets der Kompromiss zwischen Leistungsfähigkeit, Kosten, Betriebszeit und Abmaße im Vordergrund. Meist lassen sich die Hardwarearchitekturen in zwei Kategorien einteilen. Einerseits in leistungsfähige Plattformen, die primär zur Evaluierung neuer Konzepte dienen und vielfältige Peripheriekomponenten bieten. Die Dimensionierung der Energieressourcen ist hier nicht für Langzeitapplikationen ausgelegt. Auf der anderen Seite stehen miniaturisierte Plattformen mit stark beschränkter Funktionalität, welche kostengünstig produziert und in hoher Stückzahl nutzbar sind. Die integrierten Komponenten sind dabei stark an das bestimmte Einsatzszenario gebunden [331]. Der Fokus hier liegt auf der Maximierung der Betriebslaufzeit und der Minimierung von Hardwarekosten.

Zusätzlich unterscheiden sich viele Plattformen hinsichtlich der integrierten Sensorik. Während einige Systeme über eine feste Menge integrierter Sensoren verfügen, bieten andere Plattformen universal nutzbare Bussysteme zur Ansteuerung individueller Peripherie. Derartige Bussysteme sind auf der einen Seite flexibel in ihren Einsatzmöglichkeiten, benötigen aber häufig auch mehr Bauraum. Abbildung 3.15 zeigt dazu beispielhaft eine Auswahl bekannter Plattformen im Bereich eingebetteter Systeme.

WSN Plattform	µController	Transceiver	Sensorik	Energieeffizienz
nanett V1	MSP430	CC2420	Temperatur Beschleunigung	Gut
PLANet	ARM7	CC2420 F2M03GLA OWSPA311g RN-131G	nutzerspezifisch	Schlecht
Mica	ATmega103L	TR1000	nutzerspezifisch	Schlecht
Mica2	ATmega128L	CC1000	nutzerspezifisch	Mittelmäßig
Mica2Dot	ATmega128L	CC1000	nutzerspezifisch	Mittelmäßig
MicaZ	ATmega128L	CC2420	nutzerspezifisch	Mittelmäßig
BTnode V3	ATmega128L	ZV4002+CC1000	nutzerspezifisch	Schlecht
Medusa-II	ATmega128L+ARM7	TR1000	Temperatur Helligkeit Beschleunigung	Mittelmäßig
EYES node	MSP430	TR1001	nutzerspezifisch	Gut
ScatterWeb ESB	MSP430	TR1001	Helligkeit Lautstärke Beschleunigung Infrarot (passiv)	Gut
TinyNode	MSP430	XE1205	nutzerspezifisch	Gut
Tmote Sky	MSP430	CC2420	Temperatur Luftfeuchtigkeit Helligkeit	Gut
ProSpeckz	CY8C29666	CC2420	nutzerspezifisch	Schlecht
WiseNET SoC	Cool-RISC	WiseNET	nutzerspezifisch	Sehr Gut

Tabelle 3.3: Zusammenfassung relevanter WSN Plattformen im akademischen Anwendungskontext.

3 Basistechnologien & Konzepte

Um die Charakteristika verschiedener Plattformen vergleichen zu können, wurde auf Basis von [231] eine tabellarische Zusammenstellung der genutzten Komponenten erstellt und eine Bewertung hinsichtlich ihrer Energieeffizienz vorgenommen (siehe Tabelle 3.3). Besonders das *ScatterWeb Embedded Sensor Board (ESB)* [333] kommt in mehreren Forschungsprojekten zum Einsatz und ist am Markt fertig bestückt verfügbar. Das oben aufgeführte *WiseNET* ist eine miniaturisierte *SoC* Plattform, die durch ihren hohen Integrationsgrad bekannt wurde. Im akademischen Anwendungsbereich stellen *Telos* [297] und das *Smart-ITS* Projekt der ETH Zürich [418] weitere interessante Plattformen dar, welche als Ultra-Low-Power Architekturen konzipiert wurden.

Neben Energieeffizienzbetrachtungen können einzelne Systemarchitekturen aber auch hinsichtlich anderer Qualitätsparameter verglichen werden. Das Spinnendiagramm 3.16 verdeutlicht dies beispielhaft.

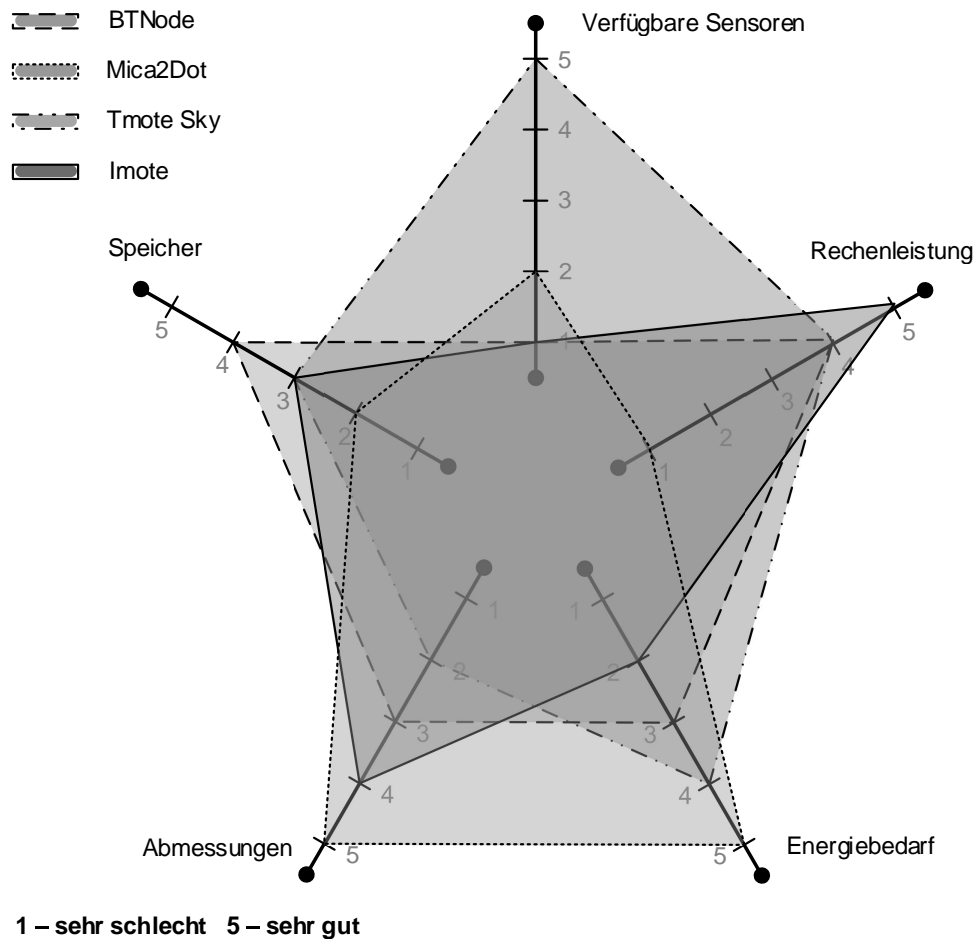


Abbildung 3.16: Qualitativer Vergleich einiger Sensorknotenarchitekturen nach wesentlichen Bewertungskriterien.

So sind für den praktischen Einsatz auch die Rechenleistung, Speicherkapazitäten oder physischen Abmaße von Interesse. Je nach Applikationsszenario sind unterschiedliche Sensorik- und Peripherie-Komponenten erforderlich. Die Verfügbarkeit entsprechender Erweiterungsmodule ist demnach ebenfalls relevant. Im Spinnendiagramm sind beispielsweise die Mica2Dot

Plattform und die Tmote Sky Plattform deutlich unterschiedlich in ihrer Auslegung. Je nach anwendungsspezifischer Gewichtung der Parameter muss hier ein Kompromiss bei der Hardwareauswahl eingegangen werden.

3.1.4 Betriebssysteme

Die zentrale Aufgabe eines Betriebssystems ist die Verwaltung und zeitliche Koordinierung zur Verfügung stehender (Hardware-)Ressourcen für mehrere Applikationen beziehungsweise Prozesse, welche um diese Ressourcen konkurrieren. Parallel laufende Anwendungen werden hierbei durch den *Scheduler* nach einer gewählten Metrik zeitlich partitioniert. Zusätzlich stellen Betriebssysteme dem Nutzer Methoden und Funktionen zur Verfügung, um die im System integrierten Hardwarefunktionalitäten auf einer abstrahierten Ebene zu nutzen (*HAL*³⁹). Essentielle Betriebssystemfunktionen umfassen u.a. *Timer* und die entsprechenden Methoden zur *Synchronisation*, *Speicher-* und *Prozessmanagement* (inklusive *Interprozess-Kommunikation*) sowie die *Peripherieansteuerung*. Häufig werden auch zusätzliche Funktionen, so beispielsweise für das *Energiemanagement* integriert.

Auch Betriebssysteme im Kontext eingebetteter Plattformen bieten diese Funktionalitäten und erfüllen entsprechende Koordinierungsaufgaben. Jedoch unterscheiden sich die Anforderungen in einigen Merkmalen von denen klassischer Betriebssysteme im Server- und Desktopbereich. Diese umfassen:

Minimaler Speicherbedarf & Speichermanagement:

Innerhalb ressourcenbeschränkter Systeme beziehungsweise Mikrocontroller ist der Speicherbedarf des Grundsystems ein kritischer Aspekt, um funktionale Anforderungen auf Applikationsebene nicht einzuschränken. In direktem Zusammenhang mit dem Speicherbedarf steht auch das Speichermanagement aller Tasks im laufenden Betrieb.

Energiemanagement:

Für den Einsatz in energieautarken Kleinstsystemen müssen die wenigen, verfügbaren Energieressourcen effizient verwaltet werden. Daher sind entsprechende Managementfunktionalitäten im Gegensatz zu vielen Desktopbetriebssystemen essentiell.

Echtzeitfähigkeit:

Echtzeit-Betriebssysteme sind im Desktop und Serverumfeld eher selten anzutreffen. Im Kontext eingebetteter Betriebssysteme (*Embedded RTOS*⁴⁰) ist diese Eigenschaft von deutlich höherer Priorität. Besonders wichtig ist diese Eigenschaft bei Mess-, Steuerungs- und Regelungsaufgaben für Industrieanlagen sowie sicherheitskritischen Komponenten. Hier kommen Systeme wie z.B. *QNX* oder *VxWorks* zum Einsatz. Für WSN und SANET Anwendungen können diese Systeme aber aufgrund ihres hohen Ressourcenbedarfs nur eingeschränkt genutzt werden. Dementsprechend findet man hier häufig proprietäre und anwendungsspezifisch optimierte Systemkerne.

³⁹Hardware Abstraction Layer

⁴⁰Realtime Operating System

I/O Zugriff & Hardwareabstraktion:

SANET Architekturen integrieren häufig eine Vielzahl von Sensorikkomponenten und Aktoren. Folglich ist die Anbindung und der effiziente Zugriff auf diese Peripherie sehr wichtig.

Robustheit:

Aufgrund erhöhter Laufzeitanforderungen, einem autarken Betrieb sowie stark eingeschränkter Debug-Möglichkeiten ist die Ausfallsicherheit und die Robustheit gegenüber externen und internen Störeinflüssen entscheidend für die Zuverlässigkeit des Systems.

Modularität & Konfiguration:

Während Desktopbetriebssysteme meist nur in einigen wenigen Konfigurationen betrieben werden, sind im Bereich eingebetteter Systeme deutlich mehr applikationsspezifische Anpassungen erforderlich. Dies betrifft benötigte Systemmodule für die verwendete Peripherie sowie das Laufzeitverhalten.

Verfügbare Betriebssysteme unterteilen sich zusätzlich in *monolithische* und *Microkernel*-Architekturen. Ein monolithischer Betriebssystemkern integriert neben Basisfunktionalitäten für Speicher- und Prozessverwaltung eine Vielzahl zusätzlicher Betriebssystemkomponenten, primär in Form von Treibern. Dies macht das Gesamtsystem komfortabel in der Bedienung und viele Funktionen können in einer getesteten Umgebung genutzt werden. Im Gegenzug erhöht sich der Speicherbedarf des Grundsystems erheblich und die Wahrscheinlichkeit für Fehler steigt aufgrund der erhöhten Komplexität an. Eine Mikrokernel-Architektur reduziert den Integrationsgrad auf essentielle Basisfunktionalitäten. Alle weiteren Funktionen werden als Programmmodule auf Applikationsebene gekapselt. Durch diese Kapselung von Treibern und Zusatzfunktionen in externe Module erweitern sich die Kommunikationspfade und folglich sinkt dadurch die Leistungsfähigkeit gegenüber eines monolithischen Kernels. Jedoch steigt durch den schlanken Systemkern auch die Robustheit und Zuverlässigkeit des Systems, da weniger potentielle Fehlerquellen kritische Systemfehler auslösen können.

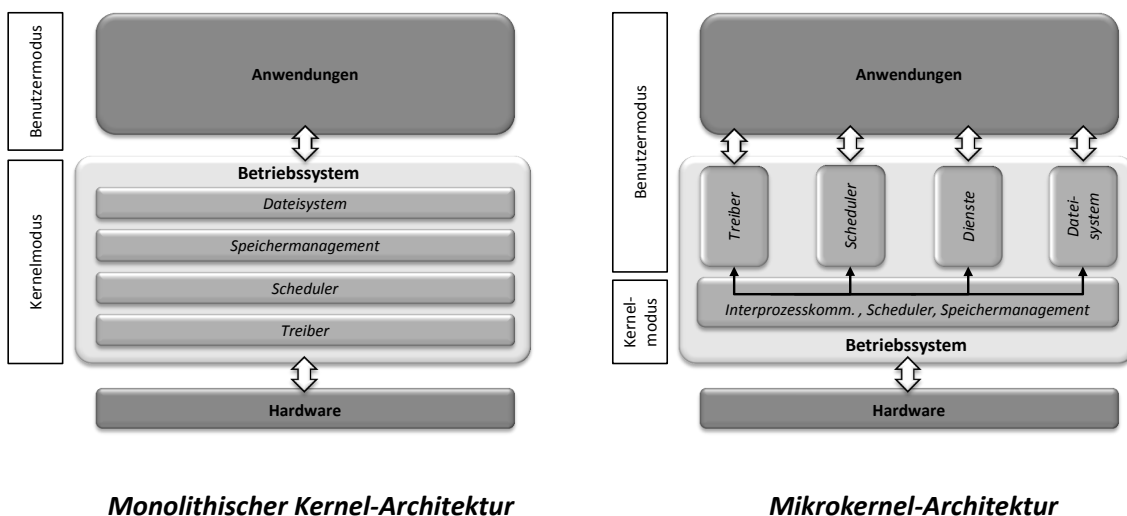


Abbildung 3.17: Vergleich zwischen monolithischer Kernelarchitektur und Mikrokernelarchitektur.

Im Kontext ressourcenbeschränkter Systeme überwiegen an dieser Stelle die Vorteile von Mikrokernarchitekturen deutlich, da sie wesentliche Anforderungen nach Robustheit, Speicherbedarf und Anpassbarkeit implizit erfüllen. Demzufolge ist ein Großteil verfügbarer Betriebssysteme für eingebettete Plattformen als Mikrokern-Architektur implementiert. Abbildung 3.17 zeigt beide Architekturen im direkten Vergleich.

Eine weitere Unterscheidung erfolgt nach den Ansätzen für Scheduling und somit dem Umgang mit mehreren simultan auszuführenden Tasks (*Multitasking*). Auch sind zwei grundsätzliche Verarbeitungsstrategien zu unterscheiden. Einerseits ein *präemptives Multitasking*, welches auf Basis von Warteschlangen mit unterschiedlichen Prioritäten arbeitet. Ereignisse werden in diese Warteschlangen eingeordnet und verarbeitet. Zur Ausführung wird jeder Prozess als eine funktional unabhängige Einheit betrachtet, die in ihrem eigenen Kontext ausgeführt wird. Der Scheduler wechselt nach einem vorgegebenen Zeitplan zwischen den Prozessen beziehungsweise Threads und stellt somit eine gewisse Fairness in der pseudoparallelen Ausführungsumgebung sicher. Prioritäten werden dabei beachtet. Beim Umschalten zwischen den einzelnen Tasks wird der Kontext jeweils gesichert und der Task in einen Sleep-Modus versetzt. Bei der nachfolgenden Ressourcenzuteilung durch den Scheduler kann schließlich der letzte Zustand des Tasks wiederhergestellt und die Ausführung reibungslos fortgesetzt werden.

Im Gegensatz dazu wird in *ereignis-getriebenen Betriebssystemen* von einer wohldefinierten und geordneten Abfolge von Prozessen zur Laufzeit ausgegangen. *Event-Handler* reagieren auf eintretende Ereignisse durch entsprechende *Interrupts* (z.B. Sensorereignisse, Timer, eingehende Daten, interne Systemstati). Das System unterbricht daraufhin die normale Verarbeitungsschleife und führt die entsprechende Routine für das Ereignis aus. In Folge der kompletten Abarbeitung auftretender Ereignisse ist kein speicherintensiver Kontextwechsel notwendig, was speziell im Bereich eingebetteter Systeme von Vorteil ist. Jedoch kann es mit einem solchen Ansatz zu Problemen bezüglich der Fairness führen, da im Worst Case kontinuierlich hochpriorisierte Ereignisse abgearbeitet werden und alle anderen Prozesse die zur Laufzeit benötigten Ressourcen nicht erhalten. Treten Ereignisse in zu kurzer Folge auf und das System hat die vorherige Interrupt-Routine noch nicht beendet, so können Ereignisse verloren gehen und nötige Verarbeitungsschritte werden übersprungen. Aufgrund der einfachen Realisierung wird dennoch ein Großteil der Betriebssystemplattformen im WSN und SANET Umfeld ereignisbasiert umgesetzt.

Neben der *Multiprozess-* beziehungsweise *Multithread-Behandlung* umfassen die Funktionalitäten eines Embedded OS grundlegende Konstrukte zur Prozesssynchronisation, beispielsweise *Mutex* oder auch *Semaphoren*. Für die Speicherverwaltung sind bereits Datenstrukturen wie *Queues* und *Events* nutzbar. Diese Funktionalitäten binden ihrerseits Ressourcen innerhalb der Systemarchitektur in Form von Speicher und Rechenzeit. Zusätzlich wird die Koordination für das Laufzeitverhalten und die Ressourcenverteilung dem Betriebssystem überlassen, wodurch eine manuelle Kontrolle stark eingeschränkt wird. Jedoch überwiegen die konzeptionellen Vorteile eines Embedded OS ab einem gewissen Komplexitätsgrad der Systemarchitektur und des Applikationsszenarios deutlich. Für den Entwickler hat der Einsatz des Betriebssystems, speziell im Kontext eingebetteter Systeme, einen wesentlichen Vorteil. Ihm stehen für die Systementwicklung bereits viele Rahmenbedingungen und Konstrukte

3 Basistechnologien & Konzepte

der Laufzeitumgebung durch das Betriebssystem zur Verfügung. Aufwendige Anpassungen und Optimierungen an die Hardware entfallen weitestgehend. Der Implementierungsprozess konzentriert sich zu großen Teilen auf die funktionalen Aspekte des Systems. Auf einige ausgewählte Vertreter eingebetteter Betriebssysteme wird im Folgenden näher eingegangen.

TNKernel [370] repräsentiert in seiner Struktur ein effizientes Betriebssystem im embedded Bereich. Das OS ist echtzeitfähig, besitzt ein präemptives, prioritätenbasiertes Multitasking und bietet wichtige Basiskonstrukte wie Queues, Semaphoren und Events. In Hinblick auf den Ressourcenbedarf ist TNKernel sehr effizient. Erweiterungen und Anpassungen sind durch die Quellcodestruktur vergleichsweise unkompliziert.

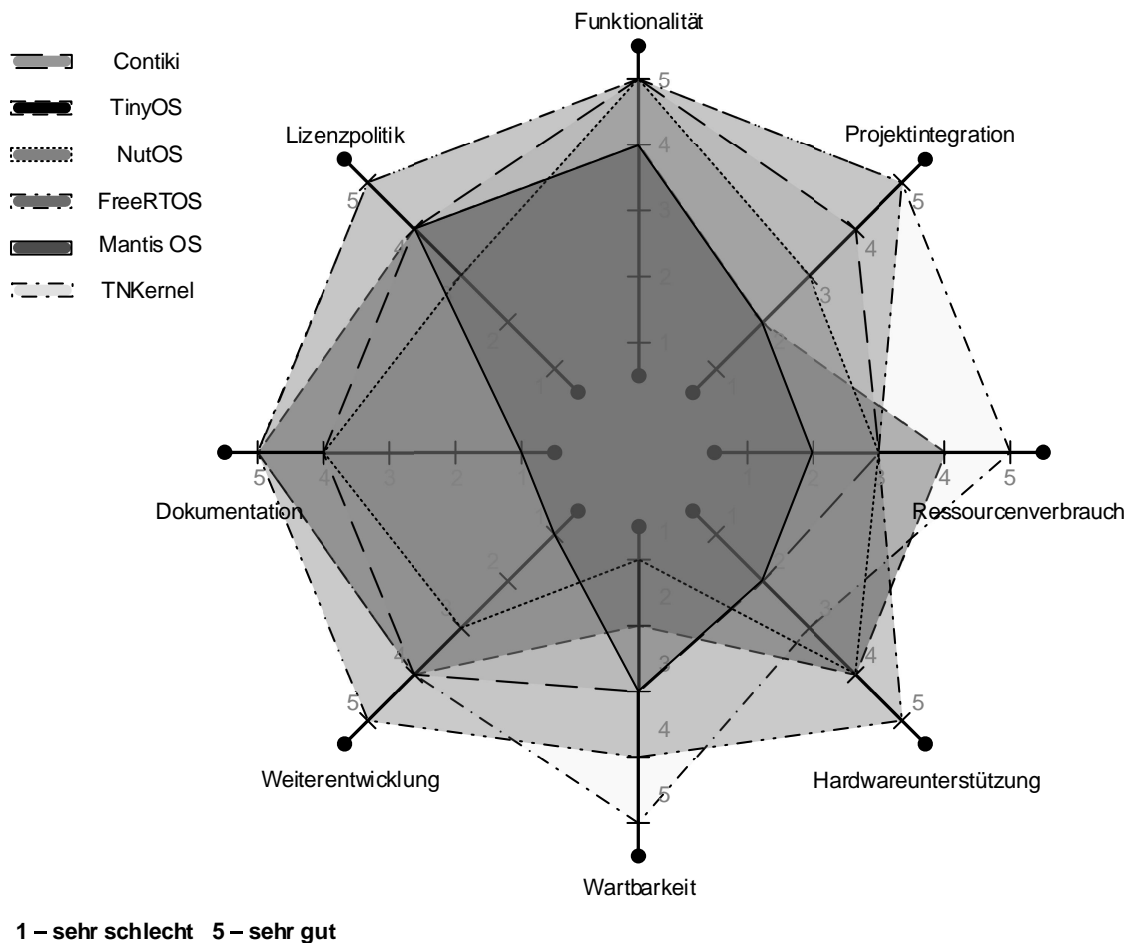


Abbildung 3.18: Bewertung aktuell verfügbarer Betriebssysteme für ressourcenbeschränkte, eingebettete Systeme. Durch das Verbinden der verschiedenen Bewertungsparameter wird eine Fläche aufgespannt. Ein ideales System hat einen maximalen Flächeninhalt.

Contiki [143] ist ein weiterer Vertreter leichtgewichtiger Betriebssysteme für ressourcenbeschränkte, eingebettete Systeme. Es integriert sowohl ein kooperatives als auch ein präemptives Multitasking Modell und basiert auf einem ereignisgetriebenen Ausführungskonzept. Mehrere Kommunikationsprimitive und ein TCP/IP Protokollstack stehen ebenfalls zur Verfügung. Die Menge unterstützter Hardwareplattformen ist vergleichbar mit der von TinyOS und damit überschaubar.

TinyOS [380] ist ein weit verbreitetes Betriebssystem, welches umfangreiche Funktionen bietet und auf spezifische Anforderungen im WSN Umfeld adaptiert wurde. Das System ist jedoch an einige wenige kompatible Hardwareplattformen gebunden, wodurch einerseits zwar ein reibungsloser Betrieb sichergestellt werden kann, andererseits ein flexibler Einsatz in einem heterogenen Systemumfeld nur eingeschränkt möglich ist. Durch die vielen Entwicklungen für *TinyOS* ist die Codebasis recht komplex gewachsen und mit hoher Einarbeitungszeit verbunden.

Mantis OS [82, 262] und *Nut/OS* [145] sind echtzeitfähige Betriebssysteme mit Fokus auf drahtlosen Sensornetzwerkszenarien und somit umfassenden Funktionen im Bereich der Netzwerkkonnektivität. Hinzu kommen eine dynamische Speicherverwaltung, ein kooperatives Multitasking und eine priorisierte Event-Behandlung.

Die wohl bekannteste Betriebssystemplattform für ressourcenbeschränkte, eingebettete Systeme ist *FreeRTOS* [71]. Das Open Source Projekt ist im Gegensatz zu vielen anderen Softwareplattformen für nahezu jede Mikrocontroller-Architektur verfügbar und wird ständig weiterentwickelt. Die flexible Struktur sowie die gute Dokumentation und die Lizenzmodelle gestalten den Einsatz von *FreeRTOS* einfach. Alle grundlegenden Komponenten und Basisfunktionalitäten sind vorhanden.

Weitere bekannte Betriebssystemimplementierungen aus dem Embedded Bereich sind *MagnetOS*, *EYES OS* sowie *EMERALDS* und *PicOS* [353]. Um die vielfältigen Ausprägungen der jeweiligen Plattformen zu verdeutlichen, vergleicht das Netzdiagramm 3.18 ausgewählte Betriebssysteme hinsichtlich wesentlicher Eigenschaften.

In der Darstellung bieten hier TNKernel und *FreeRTOS* die besten Voraussetzungen für die Anwendungsbereiche im Kontext dieser Arbeit. Die Bewertungen sind jedoch nicht zwingend für jedes Anwendungsszenario beziehungsweise alle Rahmenbedingungen gleichermaßen anwendbar. Eine sinnvolle Auswahl des Betriebssystems ist demnach nur individuell für den jeweiligen Anwendungskontext durchführbar.

3.1.5 Middleware-Architekturen

Middleware-Architekturen erfüllen in den Systemarchitekturen mehrere Aufgaben, die speziell in einer verteilten, heterogenen Systemlandschaft von Vorteil sind. Im Rahmen dieser Arbeit wird folgende Definition gewählt:

”Middleware stellt eine zusätzlich Ebene in einem komplexen (verteilten) Software-System dar, die als Dienstleister anderen ansonsten entkoppelten (Hardware und Software)-Komponenten die Kommunikation untereinander ermöglicht.”

Die Integration von Middleware-Konzepten ist dabei stets als optional zu betrachten und muss sowohl aus Ressourcenaspekten als auch bezüglich der funktionalen Anforderungen abgewogen werden. Abbildung 3.19 zeigt die Einbindung einer Middleware in ein verteiltes Gesamtsystem.

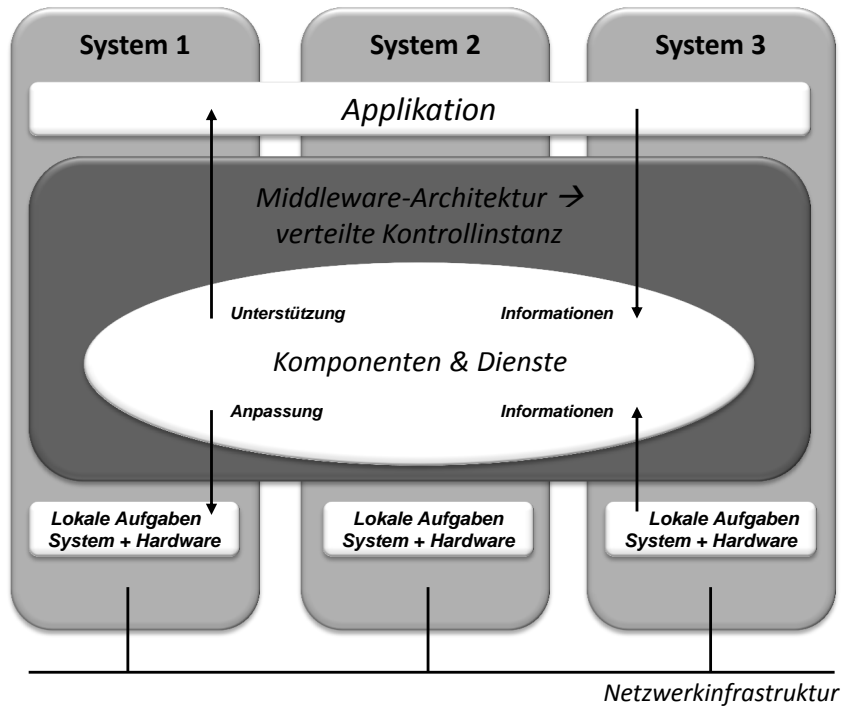


Abbildung 3.19: Middleware Architektur eines verteilten Systems. Ein verteiltes Anwendungsszenario kann über die gemeinsame Middleware ohne zusätzlichen Aufwand auf unterschiedlichen Hardwareplattformen arbeiten.

Im Kontext verteilter Sensor-Aktor-Systeme koppeln Middleware-Ansätze die einzelnen Subsysteme auf logischer Ebene und stellen nutzerseitig ein geschlossenes Gesamtsystem zur Verfügung. Primäre Aufgaben von Middleware-Ansätzen können wie folgt zusammengefasst werden:

Abstraktion:

Ziel ist die Bereitstellung einer plattform-unabhängigen API für Zugriffe auf Hardware und Dienste von Applikationsebene.

Task Allokation und Koordination:

Und somit die Verteilung von Teilaufgaben an geeignete Subsysteme und Komponenten zur Erfüllung globaler Zielvorgaben beziehungsweise Missionszielen.

Task Formulierung:

Die eindeutige Definition von Aufgaben bezüglich Parameter für Eingaben, Zielstellungen/-größen und Rahmenbedingungen.

Ressourcenmanagement:

Die Verwaltung aller Dienste und Ressourcen innerhalb des verteilten Systems.

Datenaggregation und Datenfusion:

Die Verfahren können wahlweise auf Applikationsebene oder innerhalb der Middleware umgesetzt werden und beinhalten die Datenvorverarbeitung zu Optimierungszwecken (Datenvolumen, Semantik, Plausibilität, etc.).

Externe Schnittstellen:

Für den einheitlichen Daten- und Informationsaustausch über das Netzwerk (Protokolle, Dienste, Prioritäten, etc.).

QoS:

Befasst sich mit der Abbildung von *QoS* Anforderungen innerhalb der Anwendungsebene auf Protokolle, die auf Middlewareebene einheitlich für alle Knoten definiert und somit interpretierbar sind. Zur effizienteren Erfüllung von *QoS* Aufgaben kommen häufig *Cross-Layer* Ansätze auf den verschiedenen Protokollebenen zum Einsatz.

Zu unterscheiden sind im Wesentlichen *kommunikationsorientierte* Middlewareansätze (z.B. Web Services), *anwendungsorientierte* Ansätze (z.B. verteilte Betriebssysteme) sowie *nachrichtenorientierte* Ansätze (beispielsweise im Bereich der Enterprise Service Busse).

Middlewareansätze können auf unterschiedliche Weisen realisiert werden. Dazu zählt beispielsweise die einfache Implementierung von *dedizierten Interfaces* oder Nutzung von angepassten *Datenbanksystemen*, wie beispielsweise *SINA*⁴¹, *SQTL*⁴², *COUGAR* [123, 407] oder *TinyDB* [80, 252]. *TinyLIME* und *TeenyLIME* repräsentieren Erweiterungen der *LIME*⁴³ Middlewarearchitektur, welche speziell für den Einsatz in eingebetteten, drahtlosen Sensor-beziehungswise Sensor-Aktor-Netzwerken konzipiert wurden. Die Verfahren können aber nur auf die Menge der Netzwerkknoten in direkter Nachbarschaft zur Basisstation angewendet werden [127]. Multi-Hop-Topologien werden nicht unterstützt.

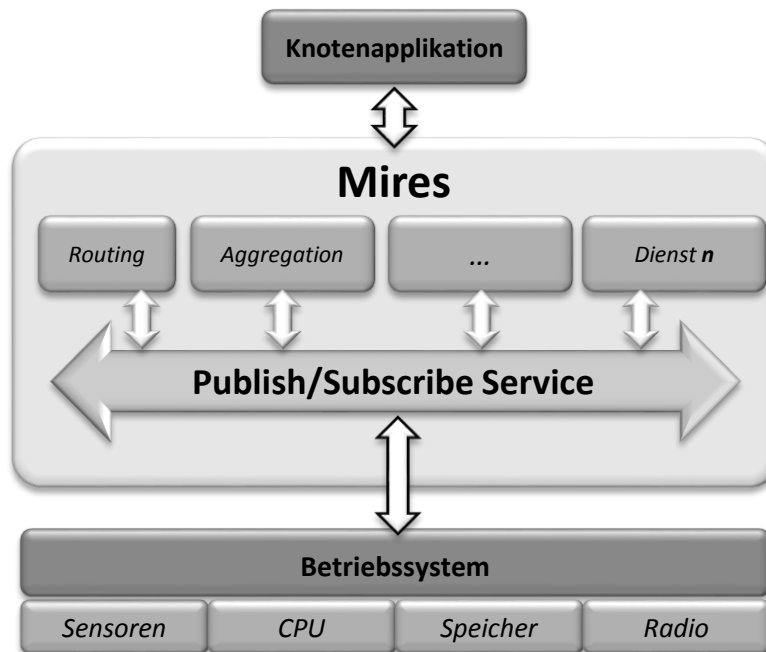


Abbildung 3.20: Mires Middleware Architektur.

⁴¹Sensor Information and Networking Architecture

⁴²Sensor Querying and Tasking Language

⁴³Linda in a Mobile Environment

Aber auch *mobile Agenten* oder *Virtuelle Maschinen* können als Middleware zum Einsatz kommen. *Agilla*, *MagnetOS* sowie *MARE*⁴⁴ [287] sind bekannte Vertreter für Implementierungen mobiler Agenten in WSN und SANET Umgebungen. *Maté* und *CLMF*⁴⁵ [353] als Umsetzungen in virtuellen Maschinen sind Bytecode-Interpreter für ressourcenbeschränkte, eingebettete Systeme.

Im Bereich der *applikationsgetriebenen Middlewarelösungen* ist *MiLAN*⁴⁶ oder *Impala* als Applikationsadapter zu nennen [231]. Beide realisieren die Abbildung von applikationsseitigen QoS Anforderungen auf die verfügbaren Hardwarekomponenten und Netzwerkprotokolle.

Eine andere Architektur repräsentiert die *OSWA*⁴⁷ Architektur, welche als generisch anpassbare und universell einsetzbare Middleware konzipiert wurde. Der Anwendungsfokus liegt bei drahtlosen Sensornetzwerkszenarien und der Integration unterschiedlicher Systemplattformen in eine geschlossene Gesamtstruktur.

Mires [212] ermöglicht die Kommunikation zwischen sensorbasierten Applikationen unter Verwendung von TinyOS. Es basiert auf einem Publish-Subscribe Konzept und stellt über diese Kommunikationskanäle Informationen für die einzelnen Funktionsblöcke bereit. In Abbildung 3.20 wird die Struktur der Architektur dargestellt.

3.1.6 Anwendungsszenarien

Mit der zunehmenden Miniaturisierung elektronischer Bauteile sinken die Materialkosten kontinuierlich. Gleichzeitig steigt dabei die Leistungsfähigkeit rapide an, was sich wiederum positiv auf die Messwertqualität sowie auf die Sensordatenverarbeitung auswirkt. In Folge dessen steigt auch die Menge möglicher Anwendungsbereiche rasant an. In Kombination mit immer effizienteren Verfahren zur Energiewandlung (Energy Harvesting) und einem optimierten Energiemanagement liegt die Vision in *Smart Dust* oder *Sensordust*, bei dem die einzelnen Systeme die Größe von Staubkörnern besitzen und in einer verbundenen Netzwerkstruktur gemeinsame Aufgaben erfüllen. Nach [213] werden derartige Entwicklungen für das Jahr 2020 prognostiziert.

Aber auch schon heute existiert bereits eine Vielzahl interessanter Anwendungsbereiche und Forschungsprojekte, speziell im Bereich der Sensor- und Sensor-Aktor-Netzwerke. Typische Szenarien ist hier der *Katastrophenschutz* beziehungsweise die *Katastrophenprävention*. Aufgrund der vielen tragischen Ereignisse durch natürliche Phänomene innerhalb der letzten Dekaden wurden vielfältige Forschungsprojekte ins Leben gerufen, um deren Auswirkungen vorherzusagen und gegebenenfalls zu reduzieren. Hier können mit Hilfe von WSN präventiv großflächige Areale in Hinsicht auf bestimmte Ereignisse überwacht werden. Der Installations- und Wartungsaufwand wird dabei minimiert. Im Falle einer bereits bestehenden Katastrophe bieten derartige Systeme die Möglichkeit, schnell und effizient Informationen verschiedenster Art aus dem betroffenen Gebiet zu sammeln.

⁴⁴Mobile Agent Runtime Environment

⁴⁵Cluster-Based Lightweight Middleware Framework

⁴⁶Middleware Linking Applications and Networks

⁴⁷Open Sensor Web Architecture

3 Basistechnologien & Konzepte

Besonderes Interesse besteht derzeit in der Ozeanüberwachung und der Tsunami-Vorhersage. Ein großes Projekt repräsentiert hier *DART*⁴⁸, welches aktuell in einer zweiten Ausbaustufe Anwendung findet [267]. *DART* stellt ein zweiteiliges Frühwarnsystem dar, bei dem ein Teil des Sensorsystems auf dem Meeresgrund zur Messung von Vibration und Druck verankert wird. Der zweite Teil schwimmt als Boje an der Meeresoberfläche und sendet die Daten bei Bedarf via Satellit an die Kontrollstation.

Das Deutsch-Indonesisches Tsunami Frühwarnsystems (*GITEWS*⁴⁹) [321] ist ein weiteres internationales Forschungsprojekt umgesetzt wurde in diesem Anwendungskontext. Durch die Integration aktiver Schutzmaßnahmen, wie z.B. Alarmierungssysteme, wurde das System zu einem umfassenden Sensor-Aktor-Netzwerk erweitert. Abbildung 3.21 zeigt eine Funktions-skizze der beiden Systeme *DART* und *GITEWS*.

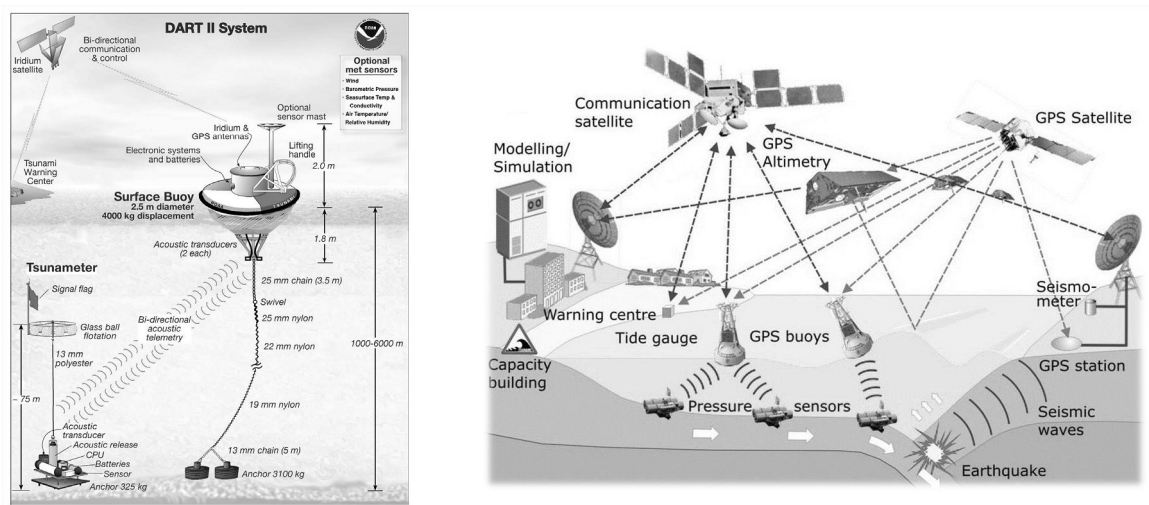


Abbildung 3.21: *DART* [267] und *GITEWS* Frühwarnsystem [321].

Weiterführende Entwicklungen im Bereich der Tsunami-Frühwarnsysteme befassen sich mit komplexen Analyseverfahren zur Vorbestimmung der Wellenbewegung und der Auftreffenergie bei Erreichen der Küste. Für die aktive Abschwächung der Wellen werden auch zeitlich synchronisierbare Barriersysteme entwickelt (siehe Abbildung 3.22) [101]. Das Vorgehen für die Wellenanalyse und die zeitliche Synchronisation für die Aktuatoren basiert dabei grundlegend auf den Signalweiterleitungsmechanismen neuronaler Netze. So wird beim Eintreffen der Welle an einem Messkontenpunkt die Wellengeschwindigkeit sowie die resultierende Auftreffenergie bestimmt. Je nach Wellencharakteristik kann dann bei Überschreitung vordefinierter Schwellwerte situationsabhängig mit anderen Knotenpunkten im Zuge koordinierter Aktionen kommuniziert werden.

⁴⁸Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis

⁴⁹German Indonesian Tsunami Early Warning System

3 Basistechnologien & Konzepte

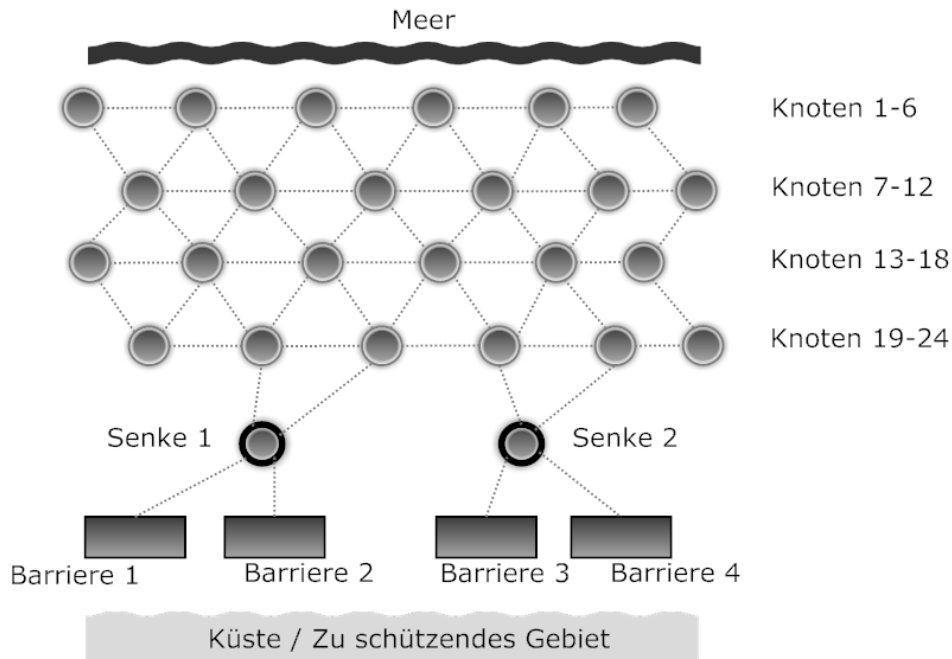


Abbildung 3.22: Aktives System zur Tsunami-Erkennung und Abschwächung.

Im Anwendungsbereich der *Objekt- und Arealüberwachung* ist das *ZebraNet* [211] Projekt zu nennen. Es wurde in Kenia umgesetzt und ermöglicht Studien über die Verhaltensweisen von Tieren. Die Messungen lieferten Ergebnisse auf einer bisher nicht realisierbaren qualitativen Ebene, wodurch ZebraNet weltweite Beachtung fand. Neben GPS-gestützten Informationen bezüglich der Tierbewegungen ermöglicht das Netzwerk auch Rückschlüsse auf aktuelle Umwelteinflüsse sowie mögliche Interaktionen mit anderen Tieren.

ARGO [152] ist ein weiteres Forschungsprojekt, welches auf Basis vieler tausend Hochseebojen das Ozeanklima erfassen. Die Bojen sind nicht stationär und bewegen sich mit den Meeresströmungen kontinuierlich. Die Sensorik erfasst Temperatur, Salzgehalt und Wellengang. Die Systeme tauchen periodisch mehrere Tage ab, um so unter Wasser bis zum 2000 Meter Tiefe die verschiedenen Wasserschichten zu analysieren. Die gesammelten Daten werden anschließend übertragen. Die Betriebszeit ist auf 4-5 Jahre ausgelegt, wobei keine Konzepte zur selbstständigen Regenerierung des Energiespeichers vorgesehen sind (Energy Harvesting).

Weitere Projekte, wie *Wisden* oder *VigiNet* [231], befassen sich mit der Detektion und Nachverfolgung von Fahrzeugen in sicherheitskritischen Bereichen. *Wisden* [403] ist ein experimentelles WSN System zur Erkennung von Vibrationen in Gebäudestrukturen. Es dient zur frühzeitigen Erkennung von Materialermüdung und zur Katastrophenprävention. Das hawaiianische *PODS* und *CORIE*⁵⁰ [231] sind Projekte, die Umwelt- und Wettereinflüsse bezüglich Temperatur, Luftdruck, etc. nachvollziehen und speichern. Ein weiteres Sensornetzwerk ist *NIMS*⁵¹ [298], welches die Intensität der Sonneneinstrahlung in Wäldern detektiert und so hilft, Wachstumseinflüsse und Parameter besser zu verstehen. *GlacsWeb* [265] befasst sich mit Gletscherbewegungen und Schmelzprozessen im Rahmen der globalen Erwärmung.

⁵⁰Columbia RivEr Observation Network

⁵¹Networked Infomechanical Systems

In industriellen Sektor repräsentieren DCS⁵² (verteilte Kontrollsysteme) oder auch ICN⁵³ einen wesentlichen Anwendungsbereich im Kontext der *Industrieautomatisierung*. Abbildung 3.23 zeigt hierzu eine vereinfachte Klassifizierung bekannter Feldbussysteme im industriellen Umfeld.

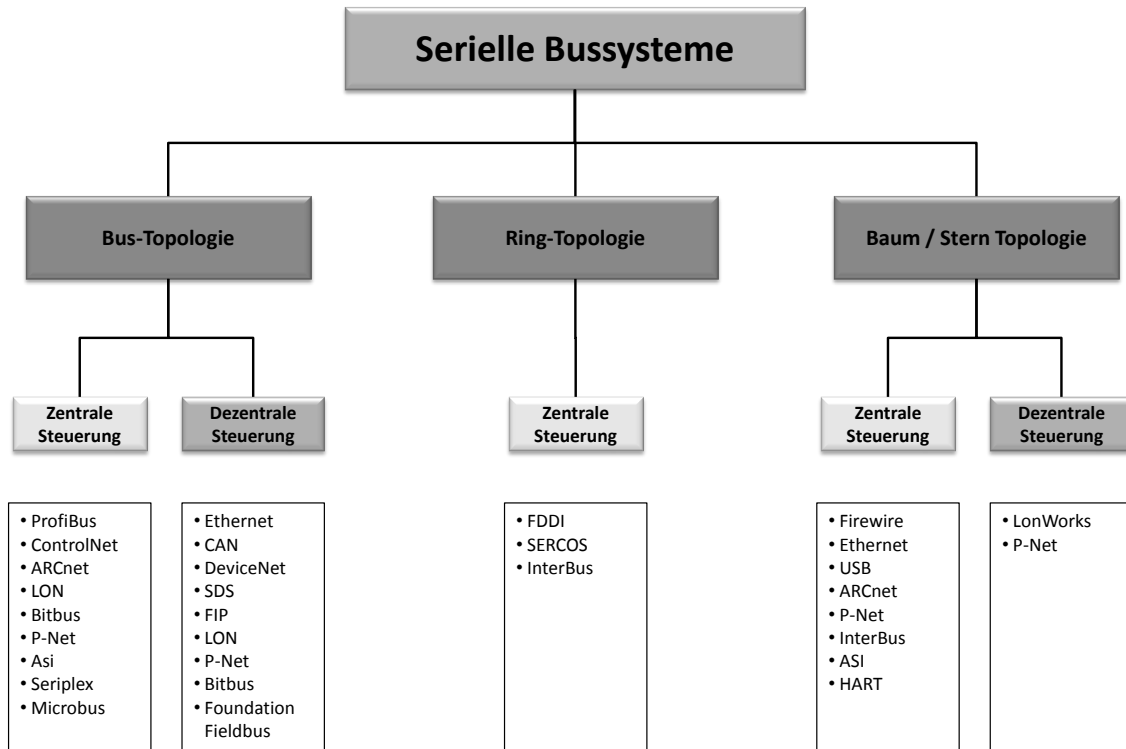


Abbildung 3.23: Klassifizierung bekannter Feldbussysteme (vereinfacht nach [255]).

In der Umsetzung bestehen DCS aus einer Menge von Netzwerkknoten, welche als Sensor, Kontrollinstanz oder Aktuator klassische Aufgaben aus dem SANET Kontext ausführen. Zur Interaktion kommt eine entsprechende Netzwerkinfrastruktur zum Einsatz, welche an die spezifischen Rahmenbedingungen im Industriebereich angepasst ist. Dies betrifft primär Robustheitsanforderungen in puncto Redundanz und Ausfallwahrscheinlichkeit sowie Sicherheitsaspekte in Form von Verschlüsselungsmechanismen. Auf abstrakter Ebene repräsentieren DCS eine Teilmenge der SANET Anwendungen, in der großes Optimierungspotential bezüglich Energieeffizienz und Kosten vorhanden ist. Aktuelle Forschungen befassen sich mit dem Übergang von drahtgebundenen zu drahtlosen Kommunikationsinfrastrukturen. Dies bringt viele Herausforderungen aber auch Möglichkeiten mit sich, speziell in Hinblick auf die Skalierbarkeit und die Flexibilität.

Weitere potentielle Anwendungsbereiche können wie folgt aufgeschlüsselt werden:

- Sicherheitsbereiche und Überwachung (Pipeline, Großveranstaltung)
- Urban Management (Infrastruktur)

⁵²Distributed Control System

⁵³Industrial Communication Networks

- Präzisionslandwirtschaft und Viehzuchtüberwachung
- Gebäudeautomatisierung (Smart Home, Smart Metering, Power Monitoring)
- Gesundheitswesen (*Body Area Networks / Gesundheitszustandsüberwachung, Lebensmittelüberwachung*)
- Telemetrieanwendungen und Logistik

Effiziente Kommunikationskonzepte im Bereich verteilter, eingebetteter Systeme bleiben auch für die absehbare Zukunft von zentraler Bedeutung auf wissenschaftlicher sowie kommerzieller Ebene. Die Integration neuer Basistechnologien fördern diese Entwicklungen zusätzlich und erhöhen die praktische Relevanz nachhaltig.

3.1.7 Technologietransfer

Der Übergang von Forschungsprojekten zu kommerziell orientierten, professionellen Produkten ist meist anspruchsvoll. Im Bereich verteilter eingebetteter Systeme sind Umsetzungen aufgrund der hohen technologischen Komplexität sehr kosten- und ressourcenintensiv. Auch Zertifizierungen zur Sicherstellung der ganzheitlichen Systemfunktionalität stellen kritische Herausforderungen dar. In Folge dessen ist nachvollziehbar, dass erste Projekte häufig im militärischen Kontext entwickelt werden. Hier stehen entsprechende finanzielle Mittel zur Verfügung und die gesetzlichen Rahmenbedingungen hinsichtlich der Sicherheit sind weniger streng gefasst. Viele Projekte konzentrieren sich in diesem Zusammenhang auf Einsätze in Krisen- oder Katastrophengebieten sowie auf die Grenz-, Objekt- oder Umweltüberwachung.

Ein früher Vertreter verteilter Sensornetzwerke ist beispielsweise *SOSUS*⁵⁴, welches dem US Militär eine flächendeckende, unterseeische Überwachung der Meerenge zwischen England, Island und Grönland ermöglichte [393]. Später wurde das System innerhalb des *SURTASS*⁵⁵ Projektes erweitert und schließlich in das *IUSS*⁵⁶ integriert.

Aktuelle Entwicklungen im militärischen Bereich befassen sich verstärkt mit der Detektion und Lokalisierung von Feindbewegungen. Dies beinhaltet die optische magnetfeldbasierte Ortung von Fahrzeugen aber auch akustische Überwachung zur Schusslokalisierung. Hier werden charakteristische Schemata des Überschallknalls von Projektilen analysiert, welche in der Natur nicht vorkommen und folglich einfach detektierbar sind. Durch das *Fingerprinting* sind Rückschlüsse auf den Waffentyp möglich. Entsprechende Lokalisierungsverfahren erlauben zusätzlich eine Positionsbestimmung der Quelle.

Im Bereich verteilter Sensor-Aktor-Netzwerke werden adaptive, intelligente Minenfelder entwickelt, welche zivile Schäden minimieren und bestimmte Zielklassifizierungen unterscheiden können. So ist eine individuelle Anpassung der Schadenswirkung möglich.

⁵⁴Sound Surveillance System

⁵⁵Surveillance Towed Array Sensor System

⁵⁶Integrated Undersea Surveillance System

Neben militärischen Systemen existieren aber auch im zivilen Sektor mehrere Anwendungsbereiche, in denen zunehmend SANET Konzepte in Produkte überführt werden. Unter dem Schlagwort *Intelligent Buildings* sind in der *Gebäudeautomatisierung* vielfältige Konzepte zusammengefasst, die auf Basis verteilter, eingebetteter Systemkomponenten automatisiert komplexe Steuerungsaufgaben in Gebäuden realisieren und sich dabei adaptiv der aktuellen Situation anpassen. Somit steht auch hier die *Situation Awareness*, wie sie auch im Kontext der Selbstorganisation angestrebt wird, im Fokus der Bemühungen. Die Kommunikationsinfrastruktur in diesem Anwendungsbereich benötigt meist nur sehr geringe Datenraten von 1-100 kBit/s. Entsprechend sind hier die bereits vorgestellten drahtlosen Low- und Ultra-Low-Power Kommunikationsstandards hervorragend geeignet.

Die Zielstellungen innerhalb der Gebäudeautomatisierung sind dabei vielseitig. Sie umfassen beispielsweise die vollautomatisierte und selbstregelnde Klimatisierung von Räumen oder Gebäuden, wobei Heizungssteuerung, Raumbelüftung und Klimaanlage integriert werden. Auch Beleuchtungssteuerungen, welche situationsabhängig die Beleuchtungsquellen regeln, sind beliebte Anwendungen. Hinzu kommen sicherheitskritische Bereiche wie z.B. Zugangssteuerungen, Rauchmeldesysteme und speziell Alarmanlagen, welche meist aus vernetzten, heterogenen Detektorsystemen bestehen.

Ein Großteil der am Markt verfügbaren Gebäudeautomatisierungssysteme besteht derzeit aus drahtgebundenen Konzepten, die Sensorik, Aktuatorik und Steuerungskomponenten statisch vernetzen. Der Entwicklungstrend richtet sich aber auch in diesem Bereich klar auf drahtlose Systeme, da hier die Nachrüstung sowie Anpassung und Erweiterung deutlich flexibler und einfacher gestaltet werden kann. Auch der Faktor der Skalierbarkeit gewinnt hierbei zunehmend an Bedeutung, da mit der stetig wachsenden Anzahl zu integrierender Teilsysteme der Aufwand für die Installation rapide ansteigt. Gleichzeitig steigen die Kosten für drahtlose Kommunikationsschnittstellen kontinuierlich, was sich teils auch mit dem Ressourcenaufwand für die Verkabelung begründen lässt [316]. Neben der Zuverlässigkeit repräsentieren auch in diesem Anwendungsbereich Wartungsaufwand und Gesamtkosten wichtige Faktoren. Die Gesamtkosten setzen sich zum einen aus den Anschaffungskosten aber im späteren Verlauf auch zu großen Teilen aus den Betriebskosten zusammen. Auch hier bieten drahtlose Konzepte ein erhebliches Optimierungspotential [345].

SANETs spielen auch im Automotive Bereich eine zentrale Rolle. Hier werden durch einen logischen Verbund unterschiedlichster Sensoren, Steuergeräte und entsprechenden Aktoren komplexe Funktionalitäten realisiert, welche das Fahrzeug und den Fahrbetrieb sicherer und komfortabler gestalten. Speziell das breite Feld komplexer *Fahrerassistenzsysteme* (FAS, engl. *ADAS*⁵⁷) bietet hier unzählige Anwendungsszenarien (siehe Abbildung 3.24 rechts).

- Spurerkennungs- und Spurhalteassistent
- Toter Winkel Assistent
- Regensensor und Fernlichtassistent

⁵⁷ Advanced Driver Assistance Systems

3 Basistechnologien & Konzepte

- Einparkhilfe und -assistent
- Tempomat mit optionaler Abstandsregelung
- Notbremsassistent
- Antiblockiersystem und Antriebsschlupfregelung
- Elektronisches Stabilitätsprogramm
- Reifendruckkontrollsystem
- Verkehrszeichenerkennung

Ein zentraler Aspekt im Automotive Bereich sind hierbei die Anforderungen bezüglich Echtzeitfähigkeit. Die verzögerungsfreie und planbare Datenverarbeitung ist für die meisten Systeme zwingende Voraussetzung für den einwandfreien Betrieb. Aus diesem Grund sind derzeit alle aktuellen Architekturen drahtgebunden umgesetzt und kommunizieren in einer festen Struktur nach einem vordefinierten Zeitplan. Drahtlose Systeme sind zudem aus aktueller Sicht im Rahmen einer wirtschaftlichen und kostengetriebenen Umsetzung nicht realisierbar.

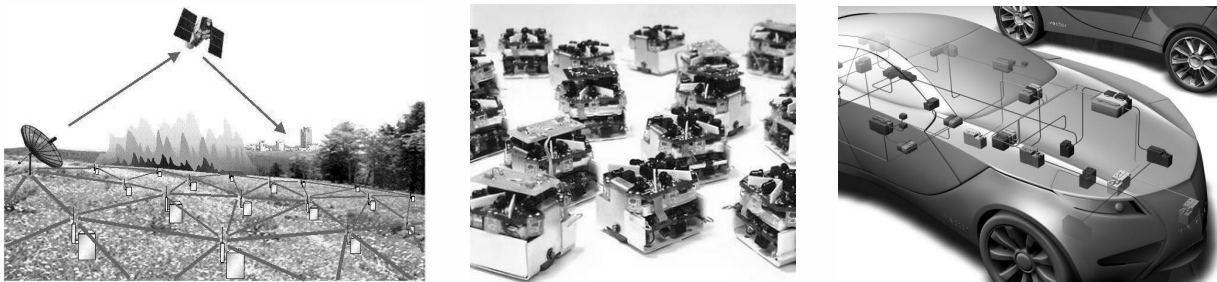


Abbildung 3.24: Einsatzbereiche verteilter Sensor-Aktor-Systeme: Katastrophenschutz und Prävention (*links*); Roboternetzwerke und schwarmintelligente, mobile Systeme (*Mitte*); Adaptive Fahrerassistenz- und Sicherheitssysteme (*rechts*). Im Fokus stehen jeweils heterogene Systemarchitekturen und erweiterte Anforderungen hinsichtlich der Energieeffizienz.

Aber auch in diesem Anwendungsbereich wird die kontinuierlich steigende Anzahl integrierter Komponenten beziehungsweise Steuergeräte (*ECU*⁵⁸) zu einer Herausforderung. Die Verkabelung bringt ein hohes Gewicht mit sich, benötigt viel Bauraum und ist teuer. Als Gegenmaßnahme wird versucht, unterschiedliche Steuergerätefunktionalitäten in eine ECU zu integrieren oder die funktionale Aufteilung dynamisch zu gestalten. Drahtlose Vernetzungsstrategien bieten in diesem Zusammenhang viel Potential und würden viele Probleme lösen, bergen aber gleichzeitig auch Risiken in Hinblick auf Zuverlässigkeit und Sicherheit. Aktuelle Entwicklungen befassen sich daher mit der Einbindung drahtloser Kommunikationsstandards für niedrig priorisierte Datenströme, so z.B. im Bereich der Infotainmentsysteme.

⁵⁸Electronic Control Unit

Zuverlässigkeit, Wartungsaufwand und Energieeffizienz sind bei den vorgestellten Projekten häufig wesentliche Faktoren für einen Einsatz in Massenproduktion. Je größer die Anzahl der integrierten Teilsysteme skaliert, desto mehr Optimierungspotential bieten hier effiziente, drahtlose Kommunikationskonzepte.

3.2 Selbstorganisation

Selbstorganisation im Kontext digitaltechnischer Systeme beschreibt ein Organisationsparadigma für komplexe, verteilte Systeme. Ziel dabei ist die Erhöhung der Skalierbarkeit verteilter Systeme durch selbstorganisierende Mechanismen, wie sie in der Natur in vielen Bereichen Anwendung finden. Abbildung 3.25 zeigt in diesem Zusammenhang den klassischen Konflikt zwischen Planbarkeit und Skalierbarkeit.

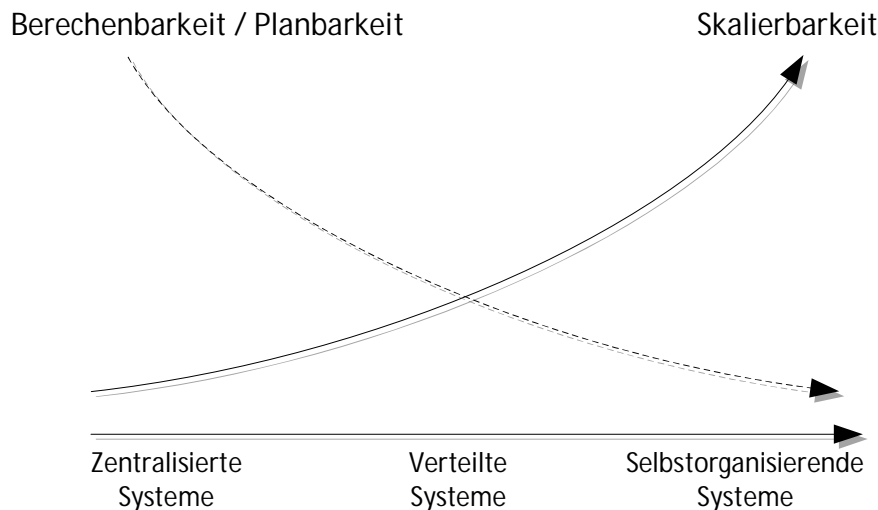


Abbildung 3.25: Konflikt zwischen Skalierbarkeit und Kontrolle in verteilten und selbstorganisierenden Systemen.

Bevor näher auf die Thematik Selbstorganisation und selbstorganisierendes Verhalten eingegangen wird, muss zunächst die Begriffsdefinition kritisch betrachtet und eingegrenzt werden. In der Literatur werden häufig selbstregulierende Prozesse in der Natur und deren Umsetzung in technische Systeme im Allgemeinen betrachtet. *Selbstorganisierende Systeme* und ihre spezifischen Eigenschaften können nach [97] zunächst allgemein wie folgt definiert werden:

”Selbstorganisation ist ein Prozess, in dem sich Muster auf globaler Systemebene allein aus zahlreichen Interaktionen zwischen untergeordneten Komponenten ergeben. Darüber hinaus basieren die Regeln für diese Interaktionen ausschließlich auf lokal verfügbaren Informationen, ohne einen Bezug auf globale Muster oder Strategien.

Selbstorganisation bezieht sich auf ein breites Feld von Prozessen zur Generierung und Aufrechterhaltung vordefinierter Muster und Systemzustände sowohl in

3 Basistechnologien & Konzepte

physikalischen als auch in biologischen Systemen. In selbstorganisierenden Systemen erfolgt die Generierung dieser Muster allein durch Interaktionen innerhalb des Systems, ohne externe Eingriffe.”

In Folge der deutlich gestiegenen Komplexität vernetzter, digitaltechnischer Systeme und den damit einhergehenden technischen Entwicklungsprozessen ermöglichen selbstorganisierende Konzepte neue Lösungsstrategien [157]. Im Kontext verteilter Kommunikations- und Informationsarchitekturen soll langfristig durch einen solchen grundlegenden Paradigmenwechsel die Beherrschbarkeit hinsichtlich Systementwurf und Systemkontrolle gewährleistet werden.

Dressler erweitert in [138] die Definition der Selbstorganisation unter dem Aspekt der Steuerungsmechanismen:

”Selbstorganisation ist ein Prozess, in dem sich die Struktur und die Funktionalität (Muster) auf globaler Systemebene ausschließlich aus zahlreichen Interaktionen zwischen den untergeordneten Komponenten ergeben, ohne externe oder zentrale Steuerung. Die Komponenten des Systems interagieren in einem lokalen Kontext durch direkte Kommunikation auf Basis von Umweltbeobachtungen und ohne Bezug auf die globalen Strukturen.”

Hierbei stehen folglich das Fehlen zentralisierter und externer Steuerungsinstanzen sowie das nicht vorhandene lokale Wissen über globale Missionsziele im Fokus der Betrachtungen. Hinsichtlich der gegebenen Kontrollinstanzen wird der Begriff Selbstorganisation nach [339] in *starke* und *schwache* selbstorganisierende Systeme untergliedert:

”Starke Selbstorganisation umfasst die (Um-)Organisation ohne explizite, interne oder externe, zentrale Steuerung ... Schwache Selbstorganisation beschreibt Systeme, bei denen Neu- beziehungsweise Umorganisationen als Folge interner, zentraler Kontroll- oder Planungsaufgaben eintreten.”

Die Auseinandersetzung mit dem Thema Selbstorganisation erfolgt dabei in der jeweiligen Literatur auf unterschiedlichen Ebenen und in verschiedenen Dimensionen. Daher existieren mehrere Definitionen, welche auf sinnvolle Weise zu kombinieren sind. Hierbei steht die Anwendbarkeit der Definition auf Konzepte im Bereich Informationstechnik und Informatik im Vordergrund. Inhalt als auch Rahmenbedingungen sollten anwendbar und direkt umsetzbar sein. Im Umkehrschluss muss folglich jede konkrete technische Realisierung unabhängig vom Anwendungsszenario auf die Definition abbildbar sein. In [398] wird Selbstorganisation speziell im technischen Bereich ausschließlich auf die zugrundeliegende Kontrollstruktur reduziert und wie folgt umschrieben:

”Selbstorganisation ist ein dynamischer und adaptiver Prozess, bei dem Systeme ihre Struktur selbstständig und ohne externe Steuerung organisieren beziehungsweise aufrechterhalten.”

[187], [301] sowie [339] erweitern diese Beschreibung jeweils und einzelne Aspekte:

3 Basistechnologien & Konzepte

„Ein sich selbst organisierendes System schafft eine eigene Organisation und ein angepasstes Regelungsverhalten, welches spontan auf Veränderungen in der Umwelt reagiert. In dieser Hinsicht unterscheidet es sich grundlegend vom heutigen Entwicklungsstand technischer Systeme, die einem statischen Design und Entwicklungsprozess unterliegen.“

... Die Interaktion der einzelnen Einheiten erfolgt direkt und ähnlich zu Peer-to-Peer-Konzepten.“

Für die konkrete Umsetzung selbstorganisierender Aspekte in technischen Systemen ist keine der genannten Definitionen fokussiert genug. Aus den genannten Definitionen wird daher die folgende begriffliche Erklärung für Selbstorganisation im Rahmen dieser Arbeit abgeleitet:

„Ein selbstorganisierendes System besteht aus einer Menge von Subsystemen und beeinflussbaren Relationen zwischen diesen Subsystemen. Ziel auf globaler Ebene ist die Generierung und Aufrechterhaltung eines stabilen Zustandes. Ein System wird dabei ohne eine zentrale, alleinverantwortliche Kontrolleinheit gesteuert. Die komplexe Organisation des Gesamtsystems basiert dabei auf einfachen Regeln auf Subsystem-Ebene. Entscheidungen der Subsysteme erfolgen dabei ohne Kenntnis über mögliche Auswirkungen auf Systemebene.“

Für Anwendungen auf verteilt agierenden Systemen bietet die Selbstorganisation interessante Konzepte für adaptive Regelungs- und Steuerungsmechanismen. Die primären Einsatzbereiche selbstorganisierender Verhaltensweisen werden sich jedoch mittelfristig auf wissenschaftliche Anwendungen beschränken. Die Anwendungsfelder reichen hier von der Robotik bis hin zu Bildverarbeitungsansätzen und Cloud-Konzepten. Auch andere Forschungszweige wie beispielsweise der Maschinenbau, speziell auf dem Gebiet des Strukturleichtbaus oder der Materialforschung, bieten ein breites Spektrum für Anwendungen. Der Übergang von zentralisierten, monolithischen Systemen über verteilte Systeme bis hin zu selbstorganisierenden Systemen wird in der folgenden Abbildung 3.26 grafisch dargestellt.

In Verbindung mit dem Begriff Selbstorganisation wird häufig von *Autonomie* oder *autonomen Systemen* gesprochen. Ähnlich schwierig ist auch hier eine klare Begriffsfindung. Im Zuge der klaren Themenabgrenzung sei hier der wesentliche Unterschied zu *automatisierten Systemen* zu nennen. Konkret betrifft dies alle Prozesse zur Entscheidungsfindung in automatisierten und autonomen Systemen [46].

„In einer auf Regeln basierten, durch Fakten gespeisten Systemumgebung kann es bei autonomen Systemen durch ihre Entscheidungsfreiheit zu Konfliktmengen kommen. Dies ist bei klassischen automatisierten Systemen nicht der Fall.“

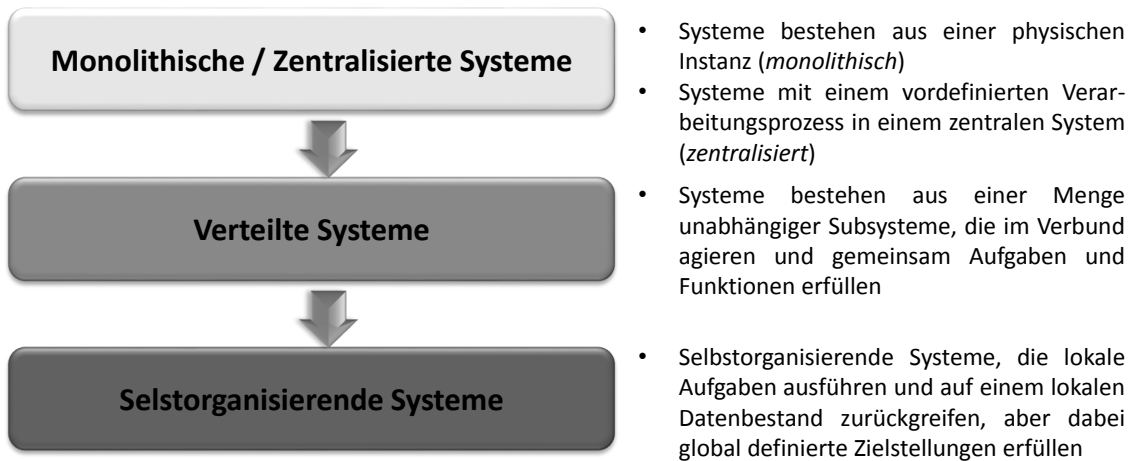


Abbildung 3.26: Zentralisierte, Verteilte und Selbstorganisierende Systeme repräsentieren unterschiedliche Evolutionsstufen bezüglich der Datenverarbeitung und Aufgabenverwaltung.

Autonome Systeme können demnach im Gegensatz zu automatisierten Systemen ihr Regelwerk zur Entscheidungsfindung aufgrund von Erfahrungen selbstständig anpassen und erweitern. In direkter Konsequenz ist der Einsatz von Selbstorganisation und autonomen Systemen in industriellen Anwendungen als kritisch einzustufen. Grund hierfür sind die nicht planbaren Entscheidungen und Reaktionen selbstorganisierender Systeme. Mit entsprechenden Konzepten kann die durchschnittliche Ergebnisqualität oder auch die Verarbeitungszeit optimiert werden, in einem worst case Szenario kann es jedoch zu vollkommen falschen Entscheidungen kommen. In professionellen Anwendungsbereichen ist jedoch dieses worst case Verhalten entscheidend für die Güte des Systems. Freiheitsgrade innerhalb der Menge möglicher Entscheidungen müssen ausgeschlossen werden. Die konzeptionellen Vorteile selbstorganisierender Paradigmen können hier nicht genutzt werden.

3.2.1 Self-X Eigenschaften

In Zusammenhang mit Selbstorganisation wird häufig von *Self-X* Eigenschaften gesprochen, welche von selbstorganisierenden Systemen realisiert werden oder auch implizit gegeben sind. Ursprünglich wurden diese Eigenschaften von Verhaltensmustern und Arbeitskonzepten biologischer Systeme abgeleitet. Hinsichtlich technischer Anwendbarkeit befasste sich zunächst die *Systemtheorie* sowie die *künstliche Intelligenz* (*künstliche neuronale Netze*, *Multiagentensysteme*) wissenschaftlich mit dem Thema. In einem weiteren Schritt wurde versucht, die Eigenschaften auf technische Realisierungen anzuwenden und selbstorganisierende Verhaltensweisen auf physische, digitale System beziehungsweise Kommunikationskonzepte abzubilden. Im Bereich der Informatik und Informationstechnik ermöglicht Selbstorganisation vielfältige Konzepte zur Realisierung hochkomplexer, technischer Systeme. Denn speziell die Beherrschbarkeit des Entwurfsprozesses repräsentiert hier eine zentrale Problemstellung [84, 227, 352]. Kooperative beziehungsweise kollektive Fähigkeiten und selbstorganisierende Verhaltensweisen bieten die Grundlage für mögliche neue Lösungsstrategien. Bezugnehmend auf die Menge der Self-X Eigenschaften sind folgende Begriffe von Relevanz:

Selbst-Konfiguration:

Umfasst Fähigkeiten des Systems, sich unmittelbar nach der Inbetriebnahme eigenständig und adaptiv an die Rahmenbedingungen der Umwelt sowie an andere Systeme anzupassen. Selbst-Konfiguration bildet die Menge aller dynamischen, applikationsspezifischen Initialisierungsprozesse ab. Das Verhalten wirkt sich primär auf die Skalierbarkeit der jeweiligen Verfahren aus. Hier besteht ein wesentlicher Vorteil gegenüber klassischen Umsetzungen, bei denen die Skalierbarkeit nach oben meist deutlich stärker beschränkt ist.

Selbst-Diagnose:

Beschreibt Verfahren, die es dem System ermöglichen, den eigenen Betriebszustand zu prüfen und gegebenenfalls Fehlfunktionen selbstständig zu erkennen. Da eine solche Systemanalyse auf unterschiedlichen Ebenen erfolgen kann, beschreibt diese Eigenschaft sowohl einfache Sensorik zur Detektion kritischer Systemparameter als auch mehrstufige Diagnosealgorithmen auf Basis einer heterogenen Wissensbasis und komplexer Entscheidungsbäume. Diese Eigenschaft kann und wird zu großen Teilen auch in klassischen Systemen umgesetzt.

Selbst-Schutz:

Beinhaltet präventive Maßnahmen zur Abwehr von Schaden am System. Im Falle akuter Gefährdungsszenarien reagiert das System eigenständig. Solche Schutzmaßnahmen können sowohl aktive als auch passive Verfahren umfassen. Auch diese Eigenschaft ist nach aktuellem Entwicklungsstand auf technische Systeme abbildbar.

Selbst-Heilung:

Umfasst die Menge der Verfahren, die dann zum Einsatz kommen, wenn der Selbst-Schutz keine hinreichende Wirkung gezeigt hat. Im Bereich der Selbstorganisation wird folglich von anpassbaren System ausgegangen, die in der Lage sind, detektierte Störungen sowie partielle Systemausfälle eigenständig zu beheben.

Selbst-Adaption:

Steht in direktem Zusammenhang mit den wesentlichen Charakteristika selbstorganisierender Systeme. Die Flexibilität eines verteilten, dezentral verwalteten Systems ermöglicht hier die eigenständige Anpassung an die Umgebung hinsichtlich verschiedener Rahmenparameter. Dabei muss jedoch beachtet werden, dass die realisierten technischen Systeme, völlig unabhängig vom Grad der Selbstorganisation, nur auf Umweltparameter reagieren, welche während der Konzeption des Systems berücksichtigt wurden. Intuitive Reaktionen auf unbekannte Situationen und nicht explizit spezifizierte Rahmenbedingungen fallen in den Bereich *kognitiver Entscheidungssysteme* [46] und der *Situation Awareness* [69], welche hier nicht weiter betrachtet werden sollen.

Selbst-Management:

Kann auf mehreren Ebenen realisiert werden. Auf der unteren Ebene wird diese Eigenschaft häufig mit der Selbst-Konfiguration gleichgesetzt und umfasst hier die koordinierte Initialisierung des Systems in einen vordefinierten Arbeitszustand. Zur Laufzeit steht das Selbst-Management für die zeitliche und funktionale Koordinierung aller Subsysteme sowohl auf lokaler Ebene als auch auf verteilter Ebene des Gesamtsystems.

Selbst-Organisation:

Steht vorrangig als übergeordneter Begriff für die Gesamtheit der Self-X Fähigkeiten. In einigen Szenarien wird Selbst-Organisation aber auch als dedizierte Eigenschaft betrachtet. Hier bezieht sich der Begriff auf die räumliche Koordinierung aller Einzelelemente in einem verteilten Gesamtsystem. Ziel ist die Bildung von Strukturen oder die Aufrechterhaltung spezifischer Funktionalitäten. Somit bezieht sich diese Eigenschaft vorrangig auf aktive, mobile Systemplattformen. Organisationsaufgaben innerhalb der Einzelelemente auf Subsystemebene fallen in den Aufgabenbereich des Selbst-Managements.

Selbst-Optimierung:

Ist ebenfalls eine weit gefasste Eigenschaft und wird in der Literatur sehr unterschiedlich ausgelegt. Selbst-Optimierung vereint meist verschiedene Aspekte anderer Self-X Eigenschaften und muss folglich immer hinsichtlich eines definierten Kriteriums oder einer definierten Metrik betrachtet werden. Eine Umschreibung von Selbst-Optimierung lässt sich daher in jedem Fall aus den Definitionen der vorangegangenen Self-X Eigenschaften ableiten.

In der vorgestellten Literatur und in den aktuellen wissenschaftlichen Veröffentlichungen werden die Begriffe sehr unterschiedlich ausgelegt. Die jeweiligen Auslegungen sind in vielen Fällen nicht hinreichend konkret, wodurch klare Abgrenzungen nur selten möglich sind. Das Grundkonzept basiert auf einer verteilten Kontroll- und Steuerinstanz, welche in einer flachen Hierarchie gemeinsame Ziele verfolgt. Dies kann die Aufrechterhaltung eines bestimmten Systemzustandes sein, aber auch die kollektive und kooperative Bearbeitung vordefinierter Aufgaben. Im Zuge der Koordinierung einzelner *Tasks* steht innerhalb des verteilten Gesamtsystems eine unter Umständen stark eingeschränkte Wissensbasis zur Verfügung. Folglich ist die Sicht eines jeden Einzelelements auf das Gesamtsystem stark begrenzt. Je nach Anwendungsszenario und Kommunikationskonzept sind Entscheidungen dann ausschließlich auf Basis lokal begrenzter Informationen möglich. Zur Erfüllung der Aufgaben wird ein vordefinierter, durch Lernen dynamisch erweiterbarer Regelsatz angewendet, welcher das Agieren und Reagieren der Einzelelemente festlegt.

3.2.2 Schwarmintelligenz

Ein spezieller Aspekt aus dem Bereich der Selbstorganisation stellt das *Schwarmverhalten* und die zugrunde liegende Intelligenz dar. In der Literatur wird diese oft auch unter dem Begriff *Verteilte Künstliche Intelligenz* aufgeführt und steht in engem Zusammenhang mit *Multiagentensystemen*. Auch hier dient die Natur und deren Artenvielfalt als Vorbild für unterschiedlichste Forschungsprojekte. Das kooperative Verhalten einzelner Objekte bewirkt hier ein koordiniertes Verhalten des Gesamtsystems. Im Bereich der *Schwarmintelligenz* tritt sehr häufig ein *emergentes Verhalten* auf. Es wird nach [301] wie folgt definiert:

”Emergentes Verhalten eines Systems ist durch die scheinbar sinnvolle Zusammenarbeit von Komponenten (Individuen) gegeben, wenn die bereitgestellten Fähigkeiten des Gesamtsystems die der einzelnen Komponenten (weit) übersteigen.”

3 Basistechnologien & Konzepte

In diesem Zusammenhang beschreibt Schwarmintelligenz das Phänomen eines nicht vorhersehbaren, kooperativen Verhaltens aller Einzelelemente, welches nicht explizit für das Gesamtsystem geplant wurde. Dieses Schwarmverhalten ermöglicht einen erweiterten Funktionsumfang der Gruppe, in der Natur beispielsweise das Überwinden von Hindernissen oder das erfolgreiche Jagen und Erlegen deutlich größerer Beutetiere. Das globale Verhalten ergibt sich somit aus einer nicht linearen Kombination von Verhaltensweisen der Einzelobjekte [334]:

”Wenn ein globales Verhalten als eine nicht-lineare Kombination von lokalem Verhalten zu beobachten ist, wird dieser Effekt als Emergenz bezeichnet.”

Durch das kollektive Verhalten der Einzelknoten ergeben sich also Emergenzeffekte, welche die Effizienz des Gesamtsystems bezüglich unterschiedlicher Parameter steigern können. Zur Anwendung auf technische Systeme im Kontext verteilter, eingebetteter Kommunikationsinfrastrukturen sind diese Aussagen jedoch nicht hinreichend. Aufbauend auf derartigen Emergenzeffekten definieren [87, 179] schwarmbasierte oder schwarmintelligente Verhaltensweisen wie folgt.

”Schwarmintelligenz beschreibt die Eigenschaft eines verteilten Systems, bestehend aus nicht intelligenten Einzelelementen / Subsystemen, ein kollektiv intelligentes Verhalten zu zeigen.

... Als schwarmintelligent werden Systeme bezeichnet, deren Lösungsstrategie auf einer Vielzahl individuell agierender Agenten basiert. Diese beeinflussen sich gegenseitig in ihrer Handlungsweise ausschließlich durch lokalen Informationsaustausch sowie lokale Interaktionsmechanismen und reagieren hierdurch gemeinsam auf innere und äußere Einflüsse. Die kollektiven Fähigkeiten des Schwarms übersteigen die der einzelnen zugrundeliegenden Agenten.”

Aktuelle Forschungen beschreiben Möglichkeiten, auf Basis einfacher Regeln Schwarmverhalten zu emulieren. Schwarmintelligenz stellt dabei ein wichtiges Prinzip zur Problemoptimierung dar. Im Rahmen einer technischen Umsetzung solcher Konzepte ist die Anwendung einfacher Regeln auf lokaler Ebene unkritisch. Durch das feste Regelwerk beschränkt sich die dafür erforderliche Intelligenz auf ein Minimum. Mit Hilfe der externen Sensorik können Reaktionen aus der Umwelt detektiert werden, welche positive oder auch negative Rückkopplungen auf das System ermöglichen. Ein emergentes Verhalten lässt sich daraus allerdings nicht zwingend ableiten.

Aufgrund des lokalen Handelns stellt die Skalierbarkeit und die Koordinierung auch in vergleichbar großen Netzwerktopologien mit mehreren 1000 Knoten kein Problem dar. Zusätzlich sind Fähigkeiten für Einzelsysteme umsetzbar, die ein sukzessives Lernen und folglich eine dynamische Adaption an die Aufgaben ermöglichen. In der Kommunikations- und Informationstechnik wird versucht, Methoden aus dem Bereich der Schwarmintelligenz auf Routing-Problematiken abzubilden [342]. Auch in der Robotik bieten die konzeptionellen Grundlagen Raum für eine Vielzahl unterschiedlicher Forschungsprojekte [73, 79, 259].

3.2.3 Grenzen der Selbstorganisation

Nach dem Leitsatz - *Einfache Regeln, komplexe Modelle* - sollen mit Selbstorganisation und Schwarmintelligenz komplexe Systeme mit einfachen Regeln gelöst werden. Nach diesem Paradoxon soll die Komplexität zukünftiger Systeme beherrschbar bleiben [139], speziell auch in Bezug auf:

- Kontrollierbarkeit / Wartungsaufwand
- Erhöhung der Robustheit gegenüber Störeinflüssen und Seiteneffekten (Self-X Mechanismen)
- Aufwand für den Entwicklungsprozess auf Softwareebene & System Tests

Die vorgestellten Fähigkeiten und Möglichkeiten fokussieren dabei primär verteilte, dezentrale Systeme. Dies korreliert mit den aktuellen Entwicklungen im Bereich moderner Kommunikationstechnologien und hochgradig vernetzter Systeme. Folglich eignen sich speziell verteilte, eingebettete Sensor-Aktor-Systeme sehr gut, um selbstorganisierende Konzepte und *schwarmintelligente* Lösungsansätze umzusetzen und zu erproben.

Im Gegensatz dazu eignen sich die vorgestellten Konzepte auch mittelfristig nicht für die Umsetzung sicherheitskritischer Systeme. Hier ist ein planbares Verhalten essentiell um Sicherheit und Zuverlässigkeit nachweisen zu können. Dies wiederum widerspricht grundlegend den Konzepten der Selbstorganisation, in denen eine selbstständige Anpassung an veränderte Rahmenbedingungen und neue Problemstellungen gewünscht wird.

3.3 Aktuelle Entwicklungen im Bereich Übertragungstechnologien

Nachdem in den vorangegangenen Abschnitten Kommunikationskonzepte und Systemarchitekturen vorgestellt wurden, sollen nun aktuelle Übertragungstechnologien Gegenstand der Betrachtungen sein. Dabei richtet sich der Fokus auf mögliche Ansätze kommender Generationen drahtloser Kommunikationsnetze. Die Themenauswahl ist dabei keinesfalls vollständig, sondern soll lediglich Alternativen und innovative Ansätze auf der Hardwareebene aufzeigen. Der Schwerpunkt liegt auch hier auf der Anwendbarkeit für Szenarien im Bereich verteilter, eingebetteter Systeme.

3.3.1 Smart Antenna Systeme

Intelligente Antennensysteme oder *Smart Antennas* befassen sich mit den physikalischen Beschränkungen bei Kommunikationsprozessen über das Medium Luft [378]. Hier sind durch gesetzliche Beschränkungen nur wenige Frequenzbänder frei nutzbar. Auf diesen schmalen

Frequenzbereichen kommt es häufig zu Beeinträchtigungen in Form von Interferenzen, welche durch mehrere simultane Datenübertragungen hervorgerufen werden. In Folge von Zugriffskonflikten bei der Medienallokation wird die nutzbare Übertragungsrate stark reduziert und es kann zu partiellen Netzwerkausfällen kommen [148].

Smart Antennas versuchen, diese Problemstellung bereits auf der physikalischer Ebene zu lösen oder abzuschwächen [60]. Sie ermöglichen die aktive Beeinflussung des Sendebereichs (*Beam-Forming*) in Abhängigkeit von den aktuellen Rahmenbedingungen sowie applikationsseitigen Anforderungen [122]. Konkret bedeutet dies, Fähigkeiten zur adaptiven Ausrichtung jeder einzelner Übertragungsinstanz (Antenne) bereitzustellen. Bei gegebener Interaktion mit den Algorithmen für die Topologiekontrolle und das Routing können so spezifische Bedürfnisse, beispielsweise Redundanz oder Datenrate erfüllt werden, die mit herkömmlichen Antennensystemen bei gleicher Sendeleistung nicht realisierbar sind [77]. Auch Optimierungen bezüglich Paketlaufzeit auf Routingebene sind möglich, indem durch die gezielte Ausrichtung des Antennenabstrahlkegels weiter entfernte Netzwerkknoten erreicht werden können und auch Störeinflüsse reduziert werden. Die konzeptionellen Grundlagen derartiger Antennensysteme sind in Abbildung 3.27 schematisch dargestellt.



(a) *Switched-Beam Antennensystem* - Durch den Einsatz von Motorik oder mehrerer Antennensektoren kann der Abstrahlwinkel des Systems gezielt auf einen Bereich gerichtet werden.

(b) *Adaptives Antennensystem* - Das System kann den Sendebereich zusätzlich in der Distanz anpassen, wodurch wahlweise ein großflächiger oder ein gerichteter Sendebereich erzeugt wird. In Summe bleibt die Abstrahlleistung konstant.

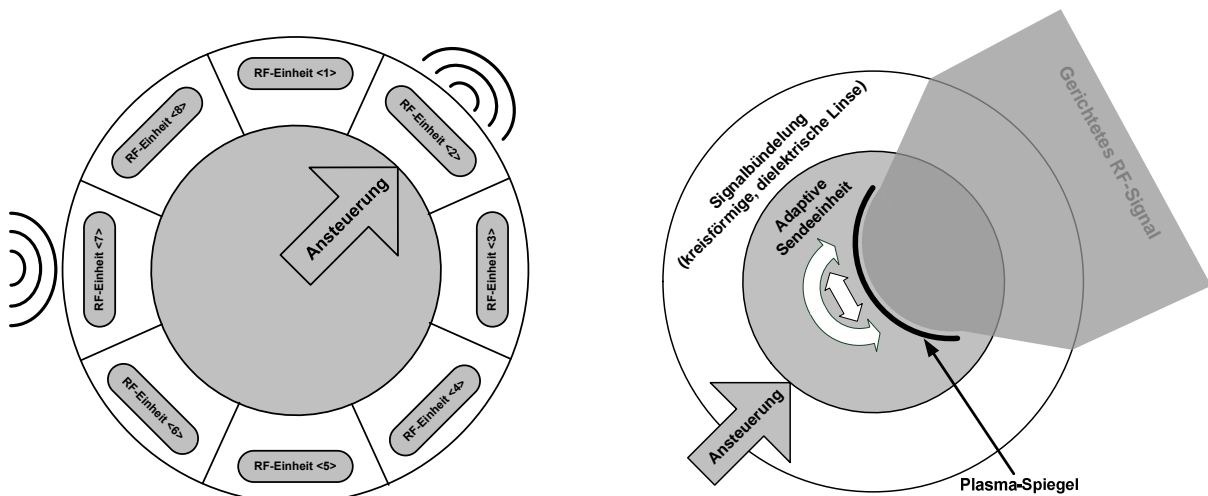
Abbildung 3.27: Funktionsweise smarter / adaptiver Antennensysteme.

Anpassung der *Abstrahlrichtung* (a) sowie der *Abstrahldistanz/-fläche* (b).

Durch die Anwendung von Smart Antenna Konzepten sinkt das Interferenzniveau im Netzwerk und die Kollisionswahrscheinlichkeit wird reduziert. Dies wirkt sich in der Gesamttopologie

stark auf den möglichen Skalierungsgrad aus. Es können nun deutlich mehr Netzknoten auf gleicher Fläche und auf einem höheren Qualitätsniveau agieren, als es mit konventionellen Antennensystemen möglich wäre [341]. Daraus ergeben sich wiederum neue Anwendungsszenarien in störungsempfindlichen und sicherheitskritischen Umgebungen, in denen bisher nur drahtgebundene Kommunikationslösungen zum Einsatz kamen [218].

Smart Antennas untergliedern sich in zwei wesentliche Kategorien - *Switched-Beam* Systeme [190, 248, 278] und *Adaptive-Array* Systeme [113, 315, 323]. Die Klassifizierung der *Switched-Beam* Systeme wird auch als *Semi-Smart* bezeichnet. Die Antennensysteme integrieren eine Vielzahl einzelner Antennen, welche selektiv angesteuert und koordiniert verwendet werden können. Das in Abbildung 3.28a) beschriebene System besteht beispielsweise aus einer ringförmigen Anordnung. Jede Antenneneinheit verfügt über einen vordefinierten Abstrahlbereich. Die zentralen Steuerungskomponenten sind für die Zuordnung eingehender Signale zu den jeweiligen Antennen verantwortlich. Der Signalverarbeitungsprozess muss dabei gepuffert erfolgen und ist erheblich komplexer als bei traditionellen Einzelantennensystemen. Auf Basis der ausgewerteten Zuordnung von Signal und Antenneneinheit sind im Anschluss zielgerichtete Entscheidungen für die ausgehende Datenübertragung möglich. Bei zeitlich synchronisierten Übertragungsprozessen kann zusätzlich die systeminterne Aufgabenplanung angepasst werden, wodurch weitere Optimierungen möglich sind [147].



(a) *Adaptives Antennensystem* für den gerichteten Signaltransport zum Empfänger (*Switched-Beam* System [77]).

(b) *Adaptives Antennensystem* auf Basis von *frei formbaren Plasma Spiegeln*. Ein solches System benötigt für die räumliche Signalanpassung keinerlei mechanische Komponenten. Eine zusätzliche Vorrichtung für die Signalbündelung fokussiert das Funksignal (*Adaptive-Array* System [77]).

Abbildung 3.28: a) *Adaptives Antennensystem*, b) *Adaptive Plasma Antenne*.

Adaptive-Array arbeiten als *voll rekonfigurierbare Antennensysteme* nach einem anderen Grundprinzip. Anstatt mehrere Einzelantennen simultan anzusteuern und zu koordinieren, wird hier die Abstrahlcharakteristik der Antenne dynamisch angepasst. Dies erfolgt sowohl in Abstrahlwinkel als auch im Abstrahlbereich bezüglich Sendedistanz. Somit kann bei

gleichbleibender Sendeleistung eine unterschiedliche Sendeabdeckung und Kegelausprägung erreicht werden.

Das Prinzip wird in Abbildung 3.27(b) schematisch visualisiert. Das dargestellte *Plasma-Antennen* System realisiert beispielsweise ein solches voll rekonfigurierbares Antennensystem. Aktuelle Forschungen auf dem Gebiet nutzen hierbei *Plasmaspiegel* zur flexiblen Anpassung des Abstrahlverhaltens [308]. Durch entsprechende elektromagnetische Felder wird ein frei formbares Plasmafeld bereitgestellt, dessen Reflektions- und Abschirmverhalten das Antennensignal ablenkt. In Folge dessen werden für den Betrieb keinerlei mechanische Komponenten benötigt und die Reaktionszeiten des Systems sind äußerst gering. Auf Änderungen in der Umwelt oder veränderte Rahmenbedingungen des Kommunikationsszenarios kann in Bruchteilen einer Sekunde reagiert werden. [395] zeigt in diesem Zusammenhang das mögliche Optimierungspotential in Hinblick auf die Kommunikationsqualität und den Energiebedarf.

Smart Antennas bieten vielversprechende Anwendungsfelder im Bereich verteilter Sensor-Aktor-Systeme. Besonders im industriellen Umfeld der Prozessautomatisierung, bei der die Kommunikationsinfrastruktur robust und störunempfindlich konzipiert sein muss, bieten Smart Antennas entscheidende Vorteile. Auch in energieautarken Applikationsszenarios können auf Basis adaptiver Antennensysteme größere Kommunikationsdistanzen überwunden und die Energieressourcen effizienter genutzt werden.

3.3.2 Ultra-Breitband Technologien

UWB Technologien befassen sich mit ähnlichen Problemstellungen wie die vorgestellten Smart Antenna Konzepte. Auch in diesem Forschungsgebiet wird auf physikalischer Ebene versucht, die Übertragungsprozesse zu optimieren. Allerdings setzen *UWB* Technologien ihren Schwerpunkt auf die Bandbreitenproblematik und damit den effektiv nutzbaren Datendurchsatz. *UWB* fasst dabei die Klasse von Trägersignalen zusammen, die eine absolute Bandbreite von 500 MHz überschreiten [286]. Da derart breite Frequenzbänder zu erheblichen Störungen anderer drahtloser Kommunikationstechnologien führen können, ist *UWB* für den *WPAN*⁵⁹ Bereich konzipiert (siehe Abbildung 3.29a). Im Gegensatz zu *WLAN*⁶⁰ und *WWAN*⁶¹ Technologien bietet *UWB* extrem hohe Datenraten von 480 - 1320 Mbit/s auf einem Frequenzspektrum von 3,1 bis zu 10,6 GHz. Innerhalb des Frequenzbereichs können die Systeme jeweils 500 MHz breite Bänder nach Bedarf nutzen.

Im Zuge der Medienallokation sind für *UWB* zwei spezifizierte Zugriffsverfahren zu unterscheiden. *MB-OFDM*⁶² als *Frequenz-Multiplexing* Verfahren, das auch für *DAB*⁶³ Technologien, *WiMAX* (IEEE 802.16) beziehungsweise auch *WLAN* (IEEE 802.11) in ähnlicher Form genutzt wird [286, 349]. *DS-CDMA*⁶⁴ repräsentiert ein zweites Verfahren, welches auf

⁵⁹Wireless Personal Area Networks

⁶⁰Wireless Local Area Networks

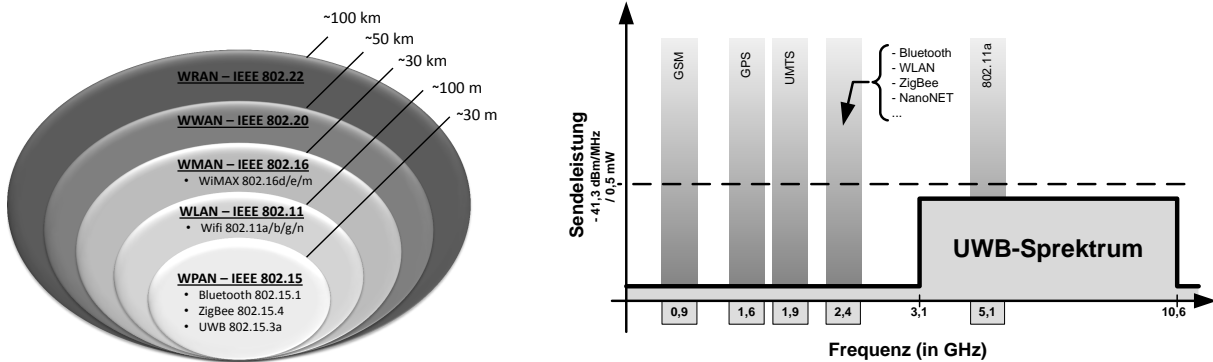
⁶¹Wireless Wide Area Networks

⁶²Multiband Orthogonal Frequency Division Multiplexing

⁶³Digital Audio Broadcasting

⁶⁴Direct Sequence Code Division Multiple Access

dem DSSS⁶⁵ Verfahren basiert. DSSS ist ein Frequenzspreizverfahren im Bereich drahtloser Datenübertragung, bei dem der (Nutzdaten-)Signalverlauf nach einem festen Bitmuster über die Breite des Trägerfrequenzbandes aufgeteilt (aufgespreizt) wird. Folglich wird hier mit Bandbreite anstatt Signalstärke gearbeitet, um die Nutzdaten zuverlässig zu übertragen. Bei DS-CDMA wird in diesem Zusammenhang jedem Netzwerkteilnehmer ein individuelles Bitmuster zugewiesen. Mehrere Sender können somit simultan senden. Empfängerseitig können die jeweiligen Signale rekonstruiert und den einzelnen Sendern zugeordnet werden.



(a) Unterschiedliche drahtlose Kommunikationsstandards nach IEEE 802.x mit optimierten Eigenschaften für die jeweiligen Anwendungsbereiche.

(b) Aktuell verwendete Frequenzbänder unterschiedlicher Funkstandards. Im Vergleich dazu die von UWB genutzten Frequenzspektren mit deutlich verringerter Sendeleistung.

Abbildung 3.29: a) Nach IEEE spezifizierte Kommunikationsstandards
b) Übersicht über Frequenzbänder und Sendeleistung.

Zu den primären Vorteilen der UWB Konzepte zählt die Robustheit gegenüber elektromagnetischen Störeinflüssen durch physische Hindernisse. Das breite Frequenzband ermöglicht eine Minimierung der Beeinträchtigungen während der Kommunikation. Ein weiteres klassisches Problem im Bereich drahtloser Kommunikationstechnologien sind die physikalischen Ausbreitungsphänomene der Funksignale (*Mehrwege-Empfangsfehler*). Beugung, Reflexion und Streuung bewirken hier die Entstehung von *Echosignalen*, welche zeitverzögert und in vielfacher Ausführung beim Empfänger eintreffen. Die Problematik wird in Abbildung 3.30 beispielhaft illustriert. UWB-Systeme bieten hier ebenfalls eine erstaunlich hohe Resistenz gegenüber derartigen Echo-Effekten [166].

Die Sendeleistung von UWB Konzepten ist entsprechend gering ausgelegt, um die Kollisionen auf dem Medium einzuschränken. Die maximale Sendeleistung ist auf 0,56 mW begrenzt, also weitaus weniger als die Sendeleistung aktueller Mobilfunktechnologien (ca. um Faktor 1000 höher) [286]. Mit dieser Leistung sind effektiv Distanzen bis maximal 50 Meter realisierbar (*Line-of-Sight*, ohne Hindernisse) [55].

UWB Konzepte etablierten sich zunehmend als technologische Lösung für drahtlose Hochgeschwindigkeitsübertragungen. Mit der Entwicklung und Einführung von *WUSB*⁶⁶ erfolgt die

⁶⁵Direct Sequence Spread Spectrum

⁶⁶Wireless Universal Serial Bus

drahtlose Realisierung der weltweit am meisten genutzten Schnittstellentechnologie USB. Mit der geplanten Integration von UWB Technologie in den Bluetooth Standard kommt eine weitere Funktechnologie im Bereich der Consumer-Elektronik hinzu. Dementsprechend ist auch in absehbarer Zeit mit neuen UWB-Schnittstellen auf dem Massenmarkt zu rechnen, um den Anforderungen aktueller multimedialer Applikationen gerecht zu werden. Hier ist speziell die Übertragung hochauflösender, digitaler Videosignale (Wireless HDMI) zu nennen, die zukünftig mit UWB-Technologien realisiert wird.

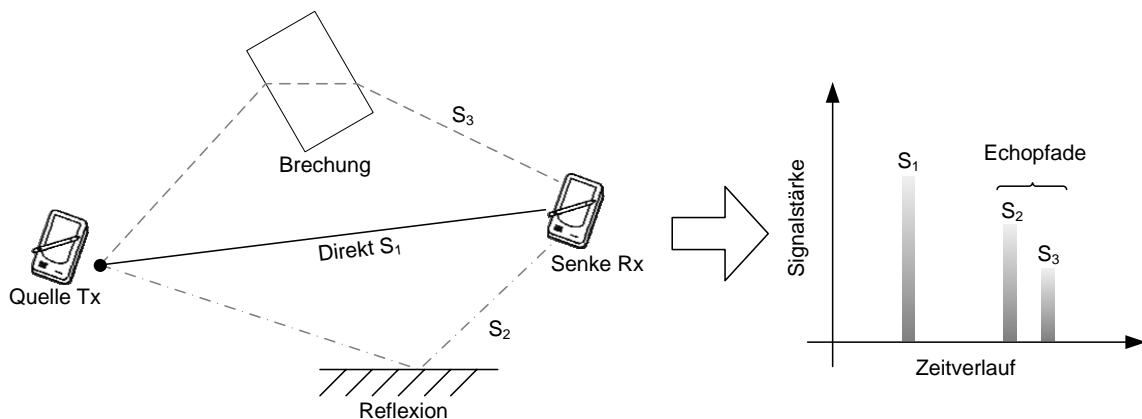


Abbildung 3.30: *Mehrwege-Empfangsfehler*: Reflexion und Brechung bewirken eine mehrfache, zeitversetzte Übertragung des Signals. Hinzu kommen Einflüsse durch Interferenzen, welche in diesem Beispiel zu Gunsten der Übersichtlichkeit vernachlässigt werden.

Im Bereich der SANET und WSN Anwendungen bieten UWB-Technologien interessante Möglichkeiten für zeitkritische Übertragungsszenarien mit großen Datenmengen. Auch in schwer zugänglichen Systemen, in denen eine Verkabelung zu aufwendig ist oder viele Hindernisse die Datenübertragung erschweren, bieten sich UWB-Konzepte an.

3.3.3 Li-Fi Technologien

*Li-Fi*⁶⁷, auch als *VLC*⁶⁸ bezeichnet, repräsentiert eine innovative Kommunikationstechnologie auf Basis des sichtbaren Lichtspektrums. Dabei sollen Übertragungsraten von ca. 1 GBit/s realisiert werden, wodurch es auch für breitbandige Übertragungen aktueller Multimediaanwendungen hervorragend geeignet ist [119].

Die Universität Edinburgh entwickelt VLC als kostengünstige Alternative für traditionelle Übertragungstechnologien. Bei einer Umsetzung wird das Datensignal einfach über gepulste, herkömmliche Lichtquellen (LED⁶⁹ Leuchtmittel) moduliert. Die Frequenz ist dabei so hoch, dass das menschliche Auge keine Veränderungen der Helligkeit o.ä. wahrnimmt. Li-Fi generiert keinerlei Störeinflüsse gegenüber anderen technischen Systemen oder

⁶⁷ von WiFi abgeleitetes Kunstwort für die drahtlose Datenübertragung auf Basis des sichtbaren Lichtspektrums

⁶⁸ Visible Light Communication

⁶⁹ Light Emitting Diode - Leuchtdiode

Übertragungstechnologien. Neben dieser Eigenschaft bietet Li-Fi noch einen weiteren, entscheidenden Vorteil. So können die Systeme nahezu überall auf Basis vorhandener LED-basierten Leuchtmittel nachgerüstet werden. So ist es zukünftig möglich, alltägliche Objekte, z.B. Straßenlaternen, Beleuchtungseinrichtungen in Industrieanlagen oder auch Scheinwerfer in Automobilen mit derartigen Technologien auszustatten. Der einzige Nachteil besteht in der Notwendigkeit einer direkten oder zumindest geeigneten indirekten Sichtverbindung zwischen Sender und Empfänger. Aus Sicht von Sicherheitsaspekten muss also neben der reinen Datenverschlüsselung auch eine Sichtverbindung sichergestellt werden. Betrachtet man jedoch die derzeit installierten Beleuchtungssysteme für relevante Anwendungsszenarien, so ist der Redundanzgrad der Beleuchtungsquellen mehr als ausreichend, um eine grundlegende, kontinuierliche Funktionalität sicherzustellen.

In Hinblick auf diese Anwendungsszenarien kann Li-Fi überall dort zum Einsatz kommen, wo traditionelle Funktechnologien auf Basis von elektromagnetischen Wellen nicht genutzt werden können. Als typische Anwendungsfälle seien hier vor allem sicherheitskritische Bereiche, wie beispielsweise Ölbohrinseln, Krankenhäuser oder Flugzeuge, genannt. Auch unter Wasser bieten sich derartige Verfahren an. In Kombination mit geeigneten Kommunikationsparadigmen ergeben sich aus Sicht eingebetteter, verteilt agierender Systeme viele neue Nutzungsstrategien und Möglichkeiten zur Steigerung der Energieeffizienz. Noch im Jahr 2012 sollen erste Li-Fi Transceiver am Markt verfügbar sein - dementsprechend sind die Entwicklungen in diesem jungen Forschungsbereich mit Spannung zu verfolgen.

3.4 Wake-Up-Receiver Technologien

Wake-Up-Receiver (WuRx⁷⁰) stellen neben den bereits vorgestellten Technologien einen weiteren, besonders vielversprechenden Optimierungsansatz auf Hardwareebene dar, welcher sich mit vielen anderen Verfahren kombinieren lässt. Die zugrundeliegenden Kommunikationskonzepte sind im weiteren Verlauf dieser Arbeit von besonderem Interesse. Daher befasst sich dieser Abschnitt detailliert mit der Wake-Up-Receiver Technologien, deren Funktionsweise und Klassifizierungen sowie konkreten Anwendungsszenarien und verfügbaren Systemen.

3.4.1 Grundlagen

Klassische drahtlose Kommunikationstechnologien arbeiten traditionell auf Basis eines primären Transceivers, der als Netzwerkschnittstelle zur Übertragung und zum Empfang von Daten dient. Wird diese Netzwerkschnittstelle deaktiviert, ist keine Kommunikation zwischen den Netzwerkknoten möglich. Sollen Daten übertragen werden, muss im Rahmen der Initialisierungsphase die Betriebsbereitschaft und somit eine aktive Netzwerkschnittstelle gewährleistet sein. Ohne entsprechende Anpassungen in der Systemarchitektur oder

⁷⁰Wake Up Receiver

3 Basistechnologien & Konzepte

in den Kommunikationsprotokollen bleiben die Netzwerkschnittstellen durchgehend aktiv, um jederzeit Daten entgegennehmen zu können. Die Leistungsaufnahme einer Netzwerkschnittstelle P_{Radio} kann dabei wie folgt definiert werden:

$$P_{Radio} = \underbrace{N_{tx}[P_{tx}(T_{aktiv} + T_{init})]}_{\text{Sendeanteil}} + \underbrace{N_{rx}[P_{rx}(T_{aktiv} + T_{init})]}_{\text{Empfangsanteil}}$$

$$N_{tx} = \text{Anzahl aktiver Sendephasen pro Sekunde} > 0$$

$$N_{rx} = \text{Anzahl aktiver Empfangsphasen pro Sekunde} > 0$$

$$P_{tx} = \text{Leistungsaufnahme im Sendemodus} > 0$$

$$P_{rx} = \text{Leistungsaufnahme im Empfangsmodus} > 0$$

$$T_{aktiv} = \text{Zeit im aktiven Zustand} > 0$$

$$T_{init} = \text{Zeit für die Initialisierungsphase} \geq 0$$

Da aber häufig nur ein Bruchteil der Betriebszeit für die Kommunikation genutzt wird, ergibt sich aufgrund der so verschwendeten Energieressourcen eine schlechte Gesamtenergiebilanz auf Systemebene. Speziell beim Einsatz von Funktechnologien im Rahmen von Langzeitmessungen und energieautarken Systemplattformen bindet die kontinuierliche Empfangsbereitschaft der Netzwerkschnittstellen häufig mehr Energie als das sporadische Senden von Daten. Es liegt folglich die Idee nahe, die Netzwerkschnittstellen in nicht benötigten Zeitabschnitten vollständig zu deaktivieren. Wird dies jedoch durch entsprechende Energiesparmechanismen umgesetzt, ist das Kommunikationssystem in diesen Zeitperioden *taub* und *stumm*. Folglich können weder eigene Nachrichten abgesetzt, noch auf externe Kommunikationsanfragen reagiert werden.

Um diesen Problemstellungen zu entgegnen wurden schnell spezielle *Sleep*- und *Standby*-Modi für die einzelnen Hardwarekomponenten entwickelt, welche den Energiebedarf im Leerlauf reduzieren. Beispielhaft verdeutlicht hierzu Abbildung 3.31 den Sachverhalt anhand verfügbarer Funkmodule und Betriebsmodi [239].

Auffällig sind besonders die hohen Verbrauchswerte im Empfangs- und Idle-Modus des Chipcon CC2420 Transceivers. Die Werte übersteigen die für das Senden benötigte Energie deutlich. Dies unterstreicht den Einfluss der Netzwerkkommunikation auf den Energiebedarf auf Systemebene und gleichzeitig das Energieeinsparungspotential durch den gezielten Einsatz von Sleep-Phasen oder alternativen Kommunikationsstrategien. In den stromsparenden Sleep-Modi sinkt der Energiebedarf auf Systemebene signifikant. Durch die Einführung synchronisierter Netzwerkinfrastrukturen und koordinierter Übertragungsphasen lassen sich diese Stromsparmodi auf konzeptioneller Ebene noch effizienter nutzen.

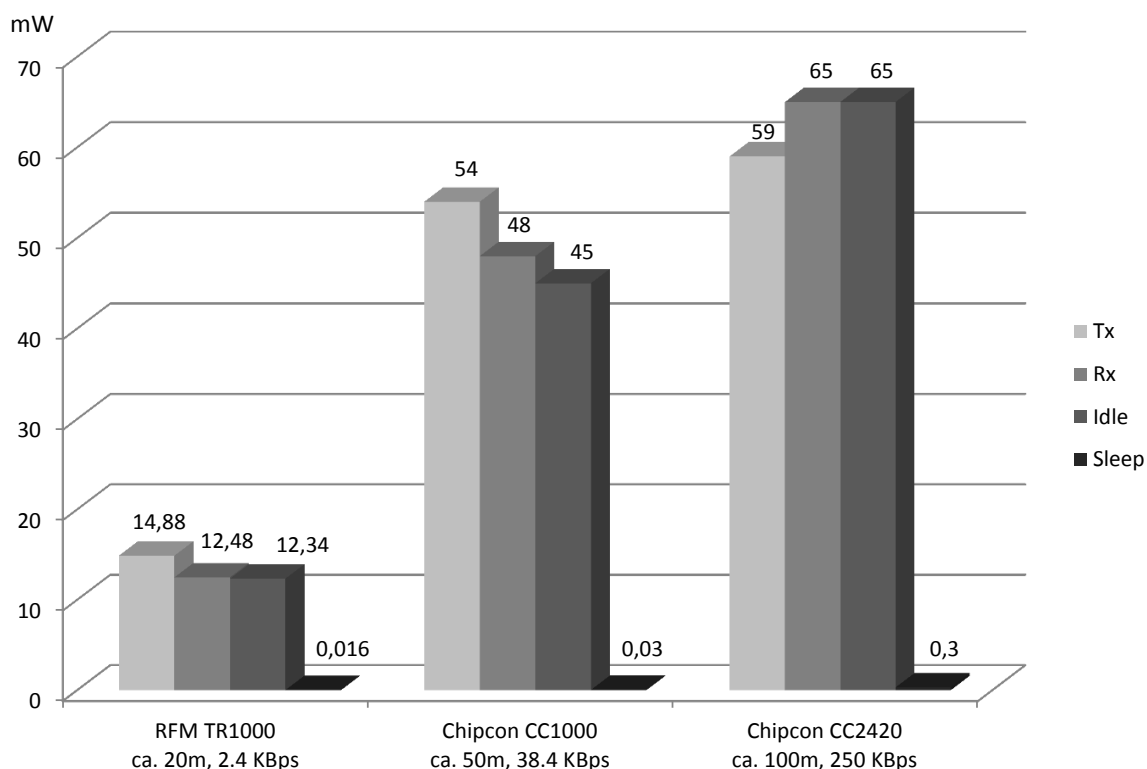


Abbildung 3.31: Energiebedarf verschiedener Funkmodule in Abhängigkeit vom jeweiligen Betriebsmodus. Links: *RFM TR1000* - genutzt in den *MICA* und *Medusa MK-II* Sensorknoten; Mitte: *Chipcon CC1000* - genutzt in den *MICA2* Sensorknoten; Rechts: *Chipcon CC2420* - genutzt in den *MICAz*, *Telos* sowie *XYZ* Sensorknoten.

Jedoch ist hierfür häufig eine globale Zeitsynchronisation aller Systeme im Netzwerk erforderlich. In drahtlosen Kommunikationsinfrastrukturen sind die Mechanismen je nach Rahmenbedingungen teils sehr komplex (siehe auch Kapitel 4.6). Gleichzeitig ergeben sich durch die Einführung zeitlich definierter und begrenzter Aktivitätsphasen erhöhte Latenzen bei der Übertragung kritischer Ereignisse. Der Einsatz von Wake-Up-Receiver Strategien stellt in diesem Kontext eine effiziente Alternative dar und führt auf Konzeptebene ein erweitertes Kommunikationsparadigma ein. So stehen durch die WuRx-Technologie Möglichkeiten für asynchrone Verbindungsanfragen zur Verfügung.

3.4.2 Konzeptionelle Rahmenbedingungen

Mit dem Ziel einer Steigerung der Energieeffizienz durch WuRx müssen bestimmte Voraussetzungen und Rahmenbedingungen erfüllt werden. Voraussetzung einer anstehenden Datenübertragung bleibt weiterhin die Empfangsbereitschaft der beteiligten Kommunikationspartner. Dieser Vorgang zur Sicherstellung der Übertragungsbereitschaft wird als *Rendezvous* bezeichnet [242]. Er repräsentiert dabei eine Menge initialer Handshake-Prozeduren, die sich je nach Übertragungstechnologie und Anwendungsszenario unterscheiden. Dies umfasst auch Mechanismen zur Behandlung temporärer Störungen, die aus erhöhter Datenlast, Schwankungen innerhalb des Verbindungskanal oder aus fehlenden Ressourcen

resultieren. Ein Rendezvous-Punkt kann somit als der Zeitpunkt des gezielten und koordinierten Aufweckens zweier oder mehrerer Knoten im Zuge einer anstehenden Datenübertragung interpretiert werden.

In Abhängigkeit der gewählten Kommunikationsverfahren können Rendezvous-Mechanismen in drei Kategorien unterteilt werden [235, 295]:

Komplett synchronisierte Rendezvous-Punkte:

Die einzelnen Uhren aller Netzwerkknoten arbeiten synchronisiert und die Systeme kommunizieren nach einem vordefinierten Zeitplan. Zusätzlich zum Synchronisationsaufwand ergibt sich konzeptbedingt der Nachteil, dass die Knoten gegebenenfalls auch ohne konkrete Übertragungsaufgaben erwachen und somit Energie verschwenden. Im Gegenzug sind solche Szenarien ohne dedizierte Hardware (WuRx) realisierbar.

Pseudo-asynchrone Rendezvous-Punkte:

Im Zuge einer anstehenden Datenübertragung sendet der jeweilige Knoten das erste Datenpaket mit einer stark verlängerten Präambel. Die Länge des Präambel-Signals ist hinreichend, um den entsprechenden Zielknoten in volle Empfangsbereitschaft zu versetzen und das Paket zu verarbeiten. Eine explizite Zeitsynchronisation ist hierbei nicht nötig. Die Knoten arbeiten jedoch weiterhin in einem *Duty Cycle* Kommunikationsverfahren ohne spezielle WuRx Hardware. In der Literatur werden derartige Verfahren häufig in Zusammenhang mit dem Schlagwort *LPL*⁷¹ diskutiert [239].

Rein asynchrone Rendezvous-Punkte:

Hier kommen dedizierte Ultra-Low-Power WuRx Module zum Einsatz, welche in Lage der sind, bei Bedarf das gesamte System eines Knotens aus dem Deep-Sleep-Modi zu wecken. Die Haupttransceiver werden nur bei Bedarf aktiviert.

Die bekannten Rendezvous-Mechanismen für synchronisierte Duty Cycle-basierte Kommunikationsansätze nutzen für die Übertragung koordiniert zugewiesene Zeitschlitze innerhalb eines zyklischen Zeitabschnittes. Nur innerhalb dieser ausgewiesenen Zeitschlitze ist der Transceiver aktiv. Der Duty-Cycle bestimmt folglich das Verhältnis zwischen Aktivzeit und Schlafzeit einer Netzwerkschnittstelle. Der Prozentwert ergibt sich hierbei aus:

$$\text{Duty cycle} = \frac{\text{aktive Zeit in Empfangsbereitschaft}}{\text{Periodendauer}} \quad \text{Periodendauer} > 0$$

In direkter Konsequenz ist das System über die Laufzeit auch nur in diesen partiellen Zeitbereichen empfängsbereit. Rendezvous-Mechanismen können nun hier initialisiert werden. Es ist also sicherzustellen, dass eingehende Kommunikationsanfragen in den definierten Zeitfenstern sicher erkannt und bearbeitet werden können.

Im Bereich der Sensornetze stehen meist nur stark ressourcenbeschränkte Systemplattformen zur Verfügung. In Folge dessen sollen aufwendige Prozeduren, beispielsweise für die

⁷¹Low Power Listening

Zeitsynchronisation, vermieden werden. Des Weiteren konzentriert sich ein Großteil der Applikationsszenarien von Sensornetzwerke auf die Detektion bestimmter Schlüsselereignisse in der Topologie, welche über die Gesamtlaufzeit verhältnismäßig selten auftreten. Wünschenswert sind daher asynchrone Kommunikationsinfrastrukturen, in denen Kommunikationsprozesse ereignisgesteuert ausgelöst werden. Da hier Ereignisse nicht planbar sind, existieren keine zeitlich koordinierten Synchronisationspunkte. Nach Möglichkeit befinden sich alle Kommunikationskomponenten standardmäßig in einem deaktivierten oder Standby-Modus und werden erst bei Bedarf aktiviert. Dies kann beispielsweise ein internes Kommunikationsanliegen darstellen, bei dem Informationen übertragen werden sollen, oder es handelt sich um eine externe Kommunikationsanfrage. In dem gewünschten, asynchronen Kommunikationsumfeld ist die Erkennung solcher externen Anfragen ohne hardwareseitige Zusatzkomponenten nicht möglich. Hier stellt der Wake-Up-Receiver eine zusätzliche Empfängereinheit dar, welche auf externe Kommunikationsanfragen in Form von speziellen Wake-Up-Signalen reagiert und das gesamte System kommunikationsseitig in einen betriebsbereiten Zustand versetzt.

Das Ziel einer so umgesetzten, rein asynchronen Kommunikationsinfrastruktur ist es, den Energiebedarf zu reduzieren, indem auf Synchronisationsverfahren verzichtet wird und die Aktivitätsphasen aller Systemkomponenten auf ein Minimum reduziert wird. Durch die effizientere Nutzung der Energieressourcen verbessert sich wiederum die Gesamtlaufzeit des Systems.

3.4.3 Funktionsweise & Vor-/Nachteile

Wake-Up Receiver repräsentieren folglich eine Basistechnologie für die Umsetzung einer asynchronen Kommunikationsinfrastruktur. Die asynchronen Kommunikationsprozesse unterscheiden sich dabei grundlegend von Duty Cycle-basierten Konzepten. Innerhalb geeigneter Rahmenparameter bietet sich hier ein erhebliches Optimierungspotential hinsichtlich der Energieeffizienz [173, 343].

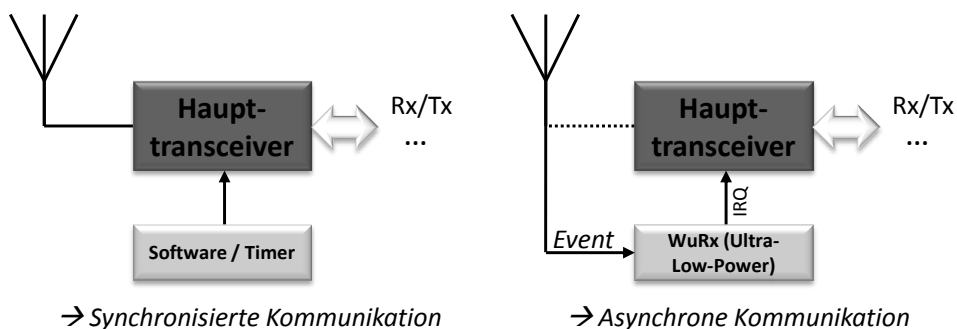


Abbildung 3.32: Gegenüberstellung einer Duty Cycle-basierten und einer WuRx-basierten Kommunikation. Während bei einer klassischen Kommunikation (*links*) Software-Timer zur Synchronisierung genutzt werden, arbeiten WuRx Konzepte (*rechts*) mit Hilfe spezieller Wake-Up Signale zur Initialisierung einer Kommunikation.

Die Idee der Wake-Up-Receiver basiert auf dem *PicoRadio* Project der Berkeley Universität [309]. Es sollte dabei eine dedizierte Hardwarekomponente zum Aufwecken einer drahtlosen

Kommunikationsplattform entwickelt werden. Nach dem Prinzip der reduzierten Funktionalität sollte eine Verringerung der Designkomplexität zu einem deutlich niedrigeren Energiebedarf führen. Durch die geringe Komplexität bleiben auch die Herstellungs- und Integrationskosten überschaubar.

Wake-Up Receiver sind zur Detektion bestimmter Wake-Up-Signale konzipiert und benötigen durch diese Einschränkungen nur einen Bruchteil des Energiebedarfs herkömmlicher Transceiver. Das Einsatzspektrum der Technologie konzentriert sich dabei auf drahtlose Sensornetzwerkszenarien mit hohen Laufzeitanforderungen und geringen, azyklischen Datenmengen. Hier kommen die konzeptionellen Vorteile gegenüber klassischen Kommunikationsverfahren zum Tragen und das Optimierungspotential bezüglich der Energieeffizienz kann genutzt werden [343]. Alle Systemkomponenten, inklusive Haupttransceiver, können von der Energiezufuhr getrennt werden, da der WuRx in der Lage ist, das System im Bedarfsfall komplett aufzuwecken [108, 288]. Folglich ist im Idle-Betrieb keine Synchronisierung oder Empfangsbereitschaft seitens der primären Funktransceiver nötig. Abbildung 3.32 verdeutlicht dieses Konzept.

Die sich daraus ergebenden Vorteile sind erheblich, sofern diese applikationsseitig sinnvoll genutzt werden können. Die Unterschiede werden in Abbildung 3.33 beispielhaft visualisiert. Durch die asynchrone Kommunikation wird gleichzeitig der Kommunikationsoverhead minimiert, da die primären Netzwerkschnittstellen keine zyklischen Synchronisationsmechanismen durchführen müssen. Konzeptbedingt hat das asynchrone Verhalten noch einen weiteren positiven Nebeneffekt. So sind die Kommunikationsinfrastrukturen deutlich flexibler an die jeweiligen Rahmenbedingungen anpassbar. WuRx Konzepte repräsentieren folglich ein dynamisches Duty Cycling, dessen Parameter sich je nach Anwendung adaptieren [135]. Auch Störeinflüsse, die sich durch Interferenzen in der drahtlosen Netzwerkinfrastruktur ergeben, können durch das overhead-minimierte Verhalten asynchroner Kommunikationsszenarien reduziert werden.

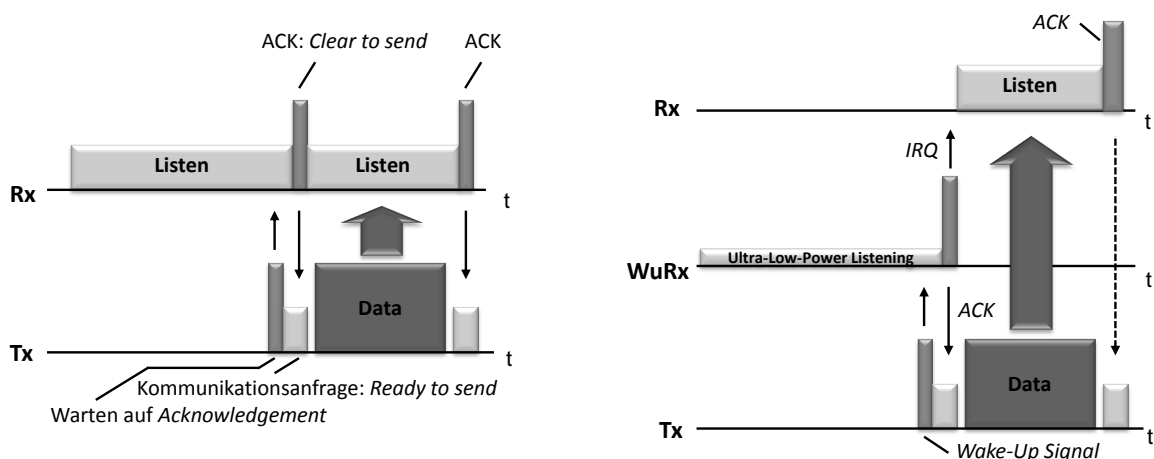


Abbildung 3.33: Vergleich von Stand-By-Modi ohne und mit WuRx.

Gleichzeitig müssen jedoch auch mehrere Problemstellungen und Herausforderungen gelöst werden. Zunächst betrifft dies die Systemkomplexität und die damit verbundenen Kosten für

zusätzliche Hardwarekomponenten. Ein wesentlicher Nachteil ergibt sich beispielsweise aus den erhöhenden Latenzen im Netzwerk. Da sich die einzelnen Knoten in einem Standby-Modus befinden, müssen alle Subsysteme im Bedarfsfall hochgefahren werden. Der Zeitraum bis zur vollen Betriebsbereitschaft hängt dabei stark von der jeweiligen Systemarchitektur ab und ist bei der Konzeption des Anwendungsszenarios zu beachten. Besonders im Bereich der Multi-Hop Kommunikation können die auftretenden Latenzen und Latenzschwankungen in Summe kritisch werden. Erschwerend kommt hinzu, dass die Zeitspannen zur Detektion und Auswertung eines Wake-Up-Signals häufig stark mit der Knotendistanz variieren. Je nach WuRx Technologie schwanken die Wake-Up-Latenzen zwischen 5 und 500 ms. Abbildung 3.34 verdeutlicht zunächst die Einflüsse von WuRx Technologien auf die Übertragungslatenz.

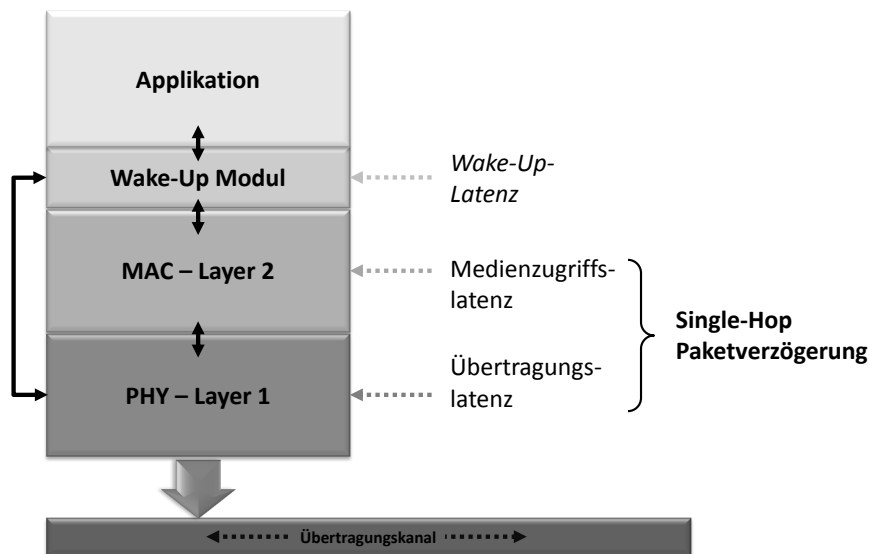


Abbildung 3.34: Auswirkungen von WuRx Technologien auf die Übertragungslatenz. Zusätzlich zur Paketverzögerung durch Medienzugriff und Übertragung müssen alle Netzwerkkomponenten initial durch das WuRx Modul aktiviert werden.

Betrachtet man dynamische Netzwerkstrukturen, so gestaltet sich durch diese Einschränkungen auch die initiale Netzexploration schwierig. Diese erfolgt zu Beginn des operativen Betriebes und hat die Aufgabe, die Verfügbarkeit aller Knoteninstanzen in der Topologie sicherzustellen. Je nach Knotenverteilung dauern hierbei die Aufwach-Phasen unterschiedlich lang. Über mehrere Hops hinweg summieren sich diese Latenzen unter Umständen auf und verhindern eine vollständige Exploration der Topologie. In Folge dessen bleiben einzelne Knoten oder auch partielle Knotenmengen isoliert beziehungsweise werden erst nachträglich eingebunden.

Weiterhin reagieren WuRx Szenarien sehr träge auf Topologieänderungen, da diese nur in Phasen der Systemaktivität detektierbar sind. Alle Anpassungen hinsichtlich Topologieoptimierung, Routing oder Aufgabenscheduling können erst während einer aktiven Phase berechnet werden. Für die Bearbeitung zeitkritischer Ereignisse im Netzwerk stellt dieses Verhalten einen zentralen Flaschenhals dar. Aus diesem Grund liegt der Anwendungsfokus von WuRx Konzepten primär auf Topologien mit geringer Dynamik, in denen die Wahrscheinlichkeit beziehungsweise die Häufigkeit von Änderungen niedrig ist.

Das in Abbildung 3.35 realisierte Szenario basiert auf einem synchronisierten Kommunikationsverhalten, ermöglicht aber durch den Einsatz von WuRx-Technologien eine unmittelbare Behandlung asynchroner Ereignisse und Kommunikationsanfragen. In dieser Konfiguration können somit im Bedarfsfall die Antwortzeiten im Netzwerk reduziert werden. In Phasen der Inaktivität wird der Haupttransceiver komplett deaktiviert, wodurch sich der Energiebedarf verringert.

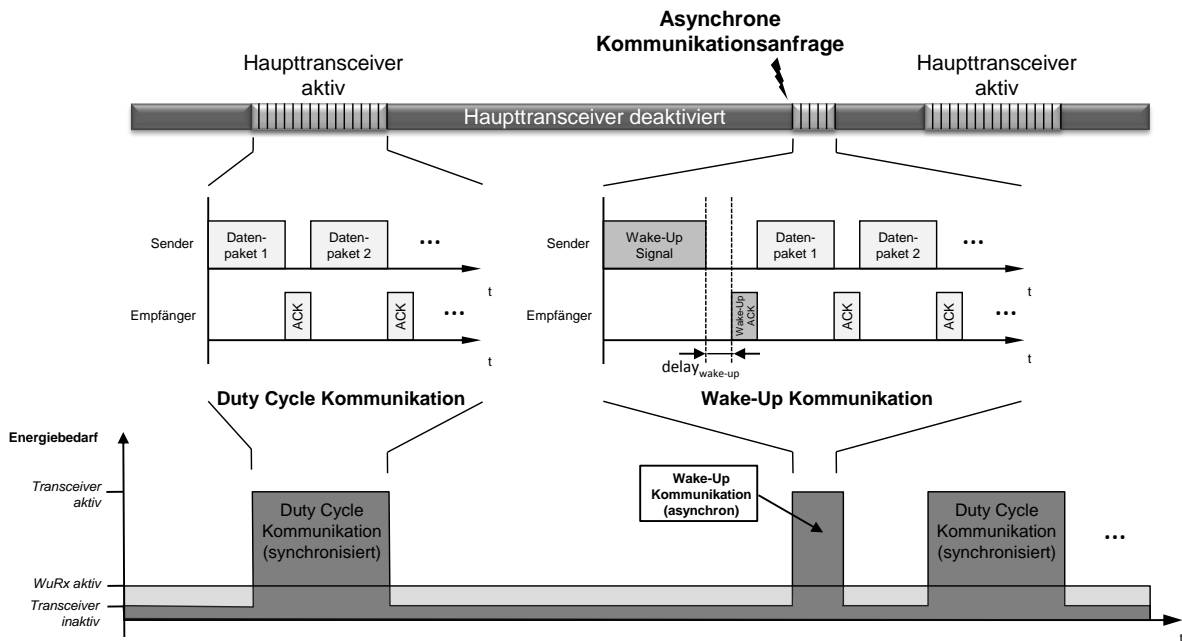


Abbildung 3.35: Laufzeitverhalten bezüglich des Energiebedarfs der Kommunikationsschnittstellen unter Verwendung konventioneller Übertragungsstrategien und WuRx-Technologien.

Die Kommunikationsprotokolle für den Einsatz von WuRx Konzepten sind ebenfalls entsprechend anzupassen. Dazu gehören primär die *Wake-Up Schemes*, also die Rendezvous-Verfahren im Zuge einer Verbindungsinitialisierung. Geeignete Ansätze sind hier zum Beispiel STEM⁷² [335]) und dessen Weiterentwicklungen *STEM-B*, eine Variante mit Möglichkeiten zur selektiven Kodierung der aufzuweckenden Kommunikationspartner (*identitätsbasiert*), sowie *STEM-T* als reichweiten-basierte Variante. Alternativ ist hier PTW⁷³ [406] als latenzoptimiertes Verfahren und SLAM⁷⁴ [219] zu nennen.

Auch auf MAC Ebene wurden angepasste Zugriffverfahren entwickelt, beispielsweise nach [175, 270]. Im Bereich der Topologieoptimierung und des Routings müssen die Verfahren auf die Randbedingungen einer asynchronen Kommunikation abgestimmt sein. Im Rahmen dieser Arbeit wurde hierzu ein kombiniertes Protokoll entwickelt (*WRTA*⁷⁵), welches beide Aufgabenbereiche abdeckt und die Vorteile der WuRx-Technologie nutzt [35].

⁷²Sparse Topology and Energy Management

⁷³Pipelined Tone Wake-Up Scheme

⁷⁴Sleep-Wake Aware Local Monitoring

⁷⁵WuRx-optimised Routing and Topology Optimisation Approach

3.4.4 Klassifizierung

Wake-Up Receiver Konzepte können dabei hinsichtlich unterschiedlicher Parameter klassifiziert werden [135]:

Energieversorgung:

intern (*aktiv*), extern (*passiv*)

Wake-Up Codierung:

identitätsbasierend (selektiv/kodiert), reichweitenbasierend (global/unkodiert)

Wake-Up Signal:

funkbasiert (elektromagnetisch), optisch, akustisch

Wake-Up Kanal:

gemeinsam genutzter einzelner Kanal, exklusiv genutzter einzelner Kanal, mehrere separate Kanäle

In Hinblick auf die Energieeffizienz ist die Klassifizierung bezüglich der Energieversorgung von besonderem Interesse. Hierbei ist zwischen zwei Arten zu unterscheiden - *aktive* und *passive* Systeme. Aktive WuRx Konzepte verfügen über eine digitale Schaltung als Auswertelogik, die zur Laufzeit durchgehend mit Energie versorgt werden muss. Passive Systeme hingegen benötigen keine kontinuierliche Spannungsversorgung und nutzen die Energie des Wake-Up-Signals, um das Ereignis des Aufweckens zu detektieren und zu verarbeiten. Dies geschieht durch die mechanische Anregung eines entsprechenden *MEMS*⁷⁶/*NEMS*⁷⁷ Bauteils, welches auf die Frequenz des Wake-Up-Signals abgestimmt ist. Der mechanische Schwinger gerät in Resonanz und erzeugt am Ausgang einen Interrupt zum Aufwecken des Systems. Das benötigte Wake-Up Signal ist demnach für passive WuRx-Receiver deutlich hochenergetischer als für aktive WuRx Schaltungen. Auch die Dauer des Signals ist zumeist deutlich länger als bei aktiven WuRx Konzepten, da nur so die nötige Energie im WuRx System umgesetzt werden kann.

Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal besteht in den Methoden für das Aufwecken von Kommunikationspartnern. Einfache WuRx Systeme detektieren eingehende Wake-Up Signale ohne jede weitere Auswertung beziehungsweise Kodierung und wecken die Kommunikationshardware unmittelbar auf. Dieses einfache Verfahren führt jedoch häufig zum Aufwecken unbeteiligter Knoten, welche sich ebenfalls in Sendereichweite des Wake-Up-Signals befinden. Dies wirkt sich negativ auf Energieeffizienz der Gesamttopologie aus. Die Wake-Up Signale repräsentieren hier Broadcast Nachrichten, wie sie in vielen Kommunikationsprotokollen zum Einsatz kommen. Um diese Problematik zu vermeiden, wurden in Folge dessen Konzepte zur selektiven Aktivierung der Knoten entwickelt [264]. Eine mehrstufige Auswertelogik detektiert zunächst das eingehende Wake-Up-Signal. Daraufhin wird dieses in einer nachgeschalteten Stufe analysiert und dekodiert. Auf Basis der Analyse erfolgt die Entscheidung, ob das Wake-Up-Signal für den eigenen Host bestimmt ist und die relevanten Systemkomponenten zu

⁷⁶Micro-Electro-Mechanical Systems

⁷⁷Nano-Electro-Mechanical Systems

aktivieren sind. Die Systemarchitektur für einen entsprechenden Knoten ist in Abbildung 3.36 schematisch dargestellt. Durch die Kodierung sind neben Unicast Signalen auch weiterhin Broadcast oder Multicast Adressierungen möglich.

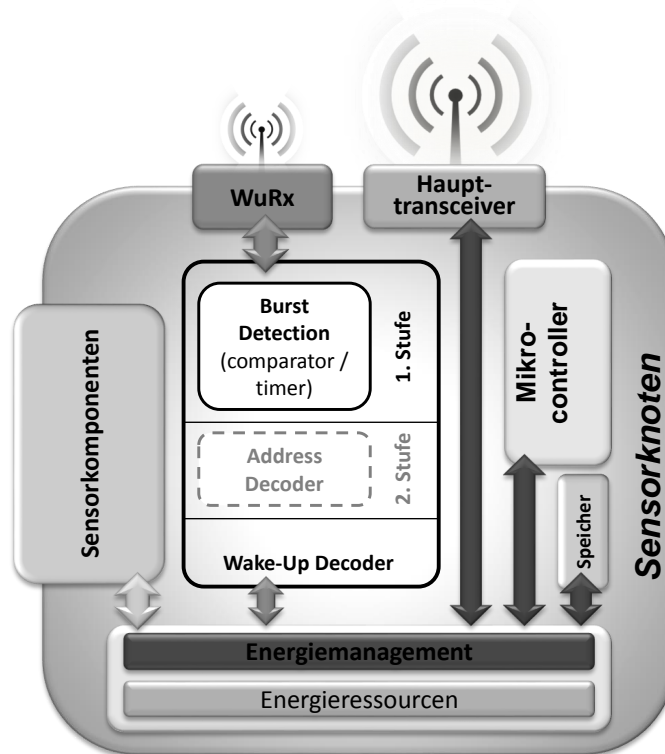


Abbildung 3.36: Sensorknoten mit vollintegriertem Wake-Up-Receiver.

Die zentralen Bestandteile der Systemarchitektur umfassen neben Mikrocontroller, Speicher sowie Sensoren und Transceiver auch ein dediziertes Energiemanagement, welches auf alle Komponenten Zugriff hat. Eingehende Wake-Up-Signale werden über eine entsprechende Logik detektiert und sind an das Energiemanagement gekoppelt. Optional erfolgt dabei eine vorgeschaltete Signaldekodierung, um das selektive Aufwecken von Knoten zu ermöglichen. Parallel dazu können spezifische Sensorereignisse zum Aufwecken des Systems führen. Hierzu existiert eine separate Anbindung an das Energiemanagement.

Neben funkbasierten WuRx Systemen existieren auch unterschiedliche Forschungsprojekte, die sich mit alternativen Wake-Up-Signalübertragungen befassen. So nutzen einige Ansätze beispielsweise das optische Lichtspektrum zur Detektion von Kommunikationsanfragen (siehe auch Li-Fi Kommunikation). Eine entsprechende Umsetzung auf Basis von empfindlichen Photodioden ist einfach und energieeffizient realisierbar, jedoch auch sehr störanfällig. Ähnlich ist auch das Verhalten bei akustischen WuRx Systemen zu beschreiben, die im normalen Schall- oder Ultraschallbereich arbeiten. Da solche Systeme derzeit für den praktischen Einsatz als ungeeignet eingestuft werden können, soll auf eine nähere Betrachtung verzichtet werden.

3.4.5 WuRx Systeme

Die Entwicklung gekapselter WuRx Systeme startete bereits vor einigen Jahren mit der Modifikation bestehender Mobilfunkgeräte [343]. Hier wurden beispielsweise handelsübliche Low-Power Funkmodule eingebaut, welche bei Bedarf einen WLAN Adapter aktivieren konnte. Der Energiebedarf des zusätzlichen Funkmoduls betrug 7 mW im Empfangsmodus und lag damit bereits weit unter den Verbrauchswerten des damals genutzten Haupttransceivers. Das von Gu und Stankovic in [172] entwickelte WuRx System erreicht eine Wake-Up-Latenz von ca. 55ms über 30m Entfernung zum Zielknoten. Die Autoren wollten hierdurch aufwendige Synchronisations- und Schedulingmechanismen auf Softwareebene umgehen.

Der gegenwärtige Entwicklungsstand von WuRx umfasst vier Unterkategorien:

- Direktempfänger (Hüllkurvendetektor + Verstärker)
- Superheterodynempfänger (Überlagerungempfänger)
- Superregenerativempfänger
- Superheterodyn-Prinzip mit MEMS-Resonatoren

Direktempfänger haben dabei einen geringen Schaltungsaufwand, verfügen über einen mittleren bis geringen Energiebedarf und sind unempfindlich gegenüber mechanischen Störungen. Ein selektives Coding zur adressierten Kommunikation ist möglich. Im Gegenzug liegen die erreichbaren Empfindlichkeiten bei nur ca. -40 bis -60 dBm. Als Direktempfänger wurde 2007 ein 65 μ W System vorgestellt, welches im 1,9 GHz Bereich mit -56 dBm Sensitivität arbeitet [294]. 2009 wurde ein Low-Cost WuRx im 868 MHz Band mit -51 dBm und 171 μ W präsentiert [137]. 2010 präsentierte das Fraunhofer Institut für integrierte Schaltungen einen WuRx, dessen Leistungsaufnahme im empfangsbereiten Betrieb 30 μ W beträgt. [159]. Die Sendeleistung des μ RX1080 liegt bei 10 mW, die effektive Datenrate bei 1 kbps. Der Empfänger weist eine maximale Wake-Up-Latenz von 32 ms auf und unterstützt dabei ein selektives Aufwecken einzelner Knoten.

[411] befasste sich 2008 mit einem *Superregenerativempfänger* im 2,4 GHz Bereich, der bei 53 μ W (10% Duty Cycling) eine Sensitivität von -75 dBm aufweist. Pelissier [291] erreichte 2009 sogar -99 dBm im Bereich 3 - 5 GHz, benötigte für seinen WuRx jedoch auch 1000 μ W. Mit Superregenerativempfänger lassen sich allgemein sehr hohe Empfindlichkeiten erzielen und auch hier ist ein selektives Aufwecken realisierbar. Jedoch ist sowohl der schaltungstechnische Aufwand als auch der Energiebedarf relativ hoch.

2008 zeigte [296] einen 2 GHz *Superheterodynempfänger*, der mit nur 52 μ W eine Sensitivität von -72 dBm erreicht. Auch Superheterodynempfänger erreichen hierbei Empfindlichkeiten bis -90 dBm, vereinen aber auch die gleichen Nachteile wie Superregenerativempfänger.

Ein Großteil aller Entwicklungen im WuRx Bereich befasst sich mit der hardwareseitigen Optimierung zentraler Qualitätsparameter, d.h. Sensitivität, Energiebedarf und Frequenzband

[144, 235]. Bereits am Markt erhältliche Systeme kommen unter anderem von Austria Microsystems [59]. Die Firma bietet beispielsweise WuRx Module mit selektivem Coding an, die im 19 - 150 KHz Bereich arbeiten und -60 dBm bei $6,6 \mu\text{W}$ erreichen.

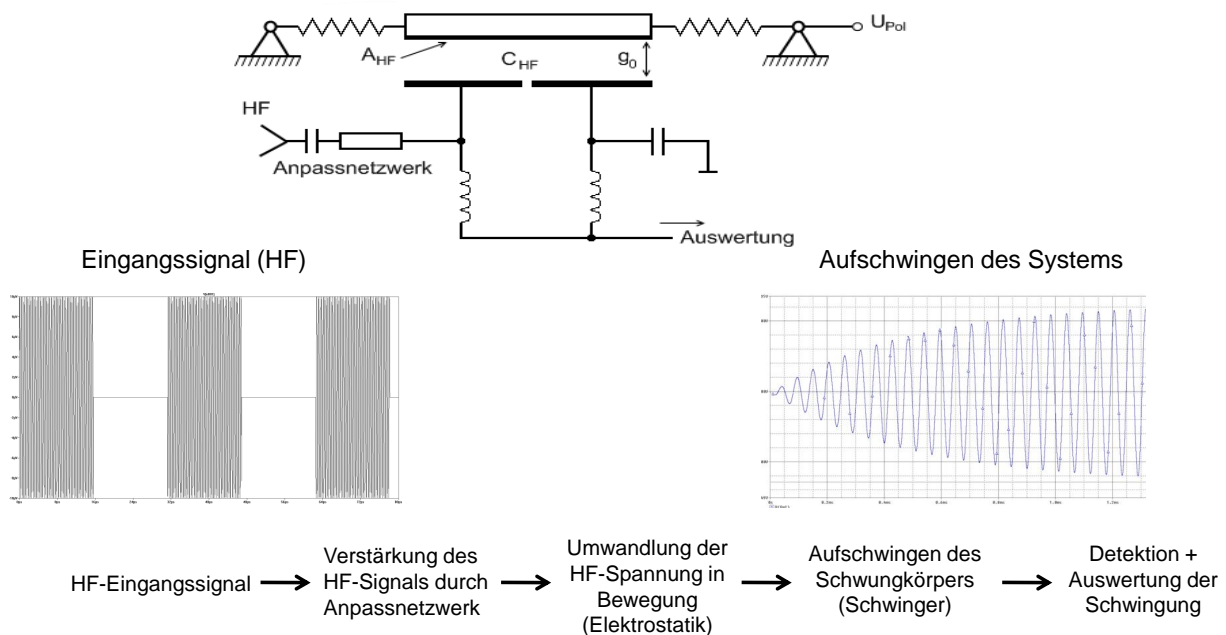


Abbildung 3.37: Funktionsprinzip eines passiven WuRx Empfängers, der als mechanischer Schwinger angeregt wird, in Resonanz aufschwingt und das Wake-Up-Signal erzeugt.

Auf wissenschaftlicher Ebene werden aber zunehmend auch alternative Konzepte untersucht, so unter anderem:

- HF-Elektrostatik
- Elektromechanische Resonanz-Schwingungsdetektion
- NEMS-Resonatoren

MEMS/NEMS basierte Systeme bieten in diesem Zusammenhang einen wesentlichen Vorteil hinsichtlich des Energieverbrauches, sind aber im Gegenzug recht empfindlich gegenüber mechanischen Störeinflüssen, speziell bei kontinuierlichen Schwingungen. Innerhalb des nanett Projektes [274] wird ein solcher passiver WuRx als NEMS entwickelt, dessen mechanischer Schwinger im 2,4 GHz Bereich angeregt wird. Das Funktionsprinzip wird in Abbildung 3.37 veranschaulicht.

Der Schwingkörper wird durch die Trägerfrequenz angeregt und in Resonanz versetzt. Durch das Aufschwingen wird an der Ausgangsleitung ein Wake-Up-Signal generiert, welches in einer nachgeschalteten Auswertelogik analysiert wird. Im Anschluss daran kann das System aufgeweckt und in Betriebsbereitschaft versetzt werden.

Neben der reinen Wake-Up-Funktionalität stehen im nanett Projekt vor allem MEMS/NEMS-basierte Fertigungsverfahren für den späteren Einsatz in der Massenproduktion im Vordergrund.

Ein Prototyp des WuRx soll bei minimalen Abmaßen von nur 3 x 1,5 mm (Gesamtpackage) eine Sensitivität von -50 dBm erreichen und weniger als 60 μ W Energiebedarf aufweisen (20 μ A bei 3 V). Die Gesamtlatenz des WuRx wird bei maximal 300 ms liegen.

Parallel wird aber auch aktiv an Integrationsmöglichkeiten von WuRx Technologien in Cross-Layer-Architekturen für drahtlose Sensornetzwerke geforscht, um die Fähigkeiten einer asynchronen Kommunikation effizienter zu nutzen. So z.B. unter [354], wo die XSM⁷⁸ Plattform präsentiert wird. XSM ist eine erweiterte Sensorknotenplattform auf Basis der bekannten *Mica2* Knoten (siehe Abbildung 3.38) [401].



Abbildung 3.38: eXtreme Scale Mote (XSM) mit ATmega 128L Mikrocontroller, 4 MBit Flash Speicher und 433 MHz Chipcon CC1000 Transceiver in einem wasserdichten Gehäuse. Als Sensorik sind Infrarot-Abstandssensoren sowie magnetische und akustische Sensoren vorhanden.

Hier wurden unterschiedliche Wake-Up-Mechanismen getestet und experimentell integriert, so auch ein akustischer Wake-Up-Kanal. Die Zielstellung für die Umsetzung war eine Laufzeitverlängerung im Rahmen von sensornetz-typischen Langzeitmessungen. Applikationsseitig kommt *ExScal*⁷⁹ [54] zum Einsatz, ein komplexes Software-Framework, welches zusammen mit dem Protokollstack an die Hardwarekomponenten und Applikationsszenarien angepasst wurde.

3.4.6 Anwendungsszenarien

Aus energetischer Sicht muss der Einsatz von WuRx Technologien individuell abgewogen werden. Nicht immer ist das explizite Abschalten und Aufwecken von Hardwarekomponenten sinnvoller als das Nutzen konventioneller Duty-Cycle-Verfahren. Je nach Häufigkeit auftretender Ereignisse und Aktivitäten ist es durchaus möglich, dass ein stark frequentiertes Aufwecken komplett abgeschalteter Netzwerkschnittstellen mehr Energie bindet, als der einfache Wechsel zwischen Standby- und Aktiv-Zustand. Hinzu kommt die Eigenschaft,

⁷⁸Extreme Scale Mote

⁷⁹Elements of an Extreme Scale Wireless Sensor Network

dass mit zunehmender Entfernung zwischen den Knoten die Wake-Up-Verzögerung meist deutlich ansteigt, speziell bei passiven WuRx Systemen. Dies muss beim Entwurf geeigneter Systemarchitekturen beachtet werden. Im Rahmen der Konzeption erfolgt dabei stets ein Kompromiss zwischen Latenzen (*Delay*) und Reichweite (*Range*) sowie zwischen Latenz und Energiebedarf.

Applikationsseitig ist die Unterscheidung zwischen *always-on* und *always-off* Szenarien von großer Wichtigkeit. Diese Unterscheidung kann wiederum auf *lokaler* Ebene und *globaler* Ebene (Netzwerk) vorgenommen werden. Auf lokaler Ebene erfordern *Always-on*-Szenarien eine kontinuierliche (sehr häufige) Abtastung der Umgebung durch die Sensorik, um bestimmte Ereignisse, z.B. Bewegungen, sicher detektieren zu können. In *Always-off*-Applikationen ist es nicht erforderlich, kontinuierliche Messungen durchzuführen. Es genügen periodische Messungen in einem festgelegten Intervall, um bestimmte Aussagen bezüglich relevanter Parameter zu erhalten, so beispielsweise die Aufzeichnung des Temperaturverlaufes. Auf globaler Netzwerkebene ist diese Unterscheidung für Kommunikationsprozesse anzuwenden. *Always-on* bezieht sich hier auf zeitkritische Anwendungsszenarien, in denen Ereignisse möglichst zeitnah kommuniziert werden müssen, so z.B. in sicherheitskritischen Bereichen (Alarmanlagen, Regelungssysteme im industriellen Umfeld, etc.). *Always-off* umfasst im Gegensatz dazu Applikationen, bei denen Daten über einen gewissen Zeitraum lokal gepuffert werden können. Die Netzwerkkommunikation ist nur bei Bedarf oder in langen Zeitperioden erforderlich.

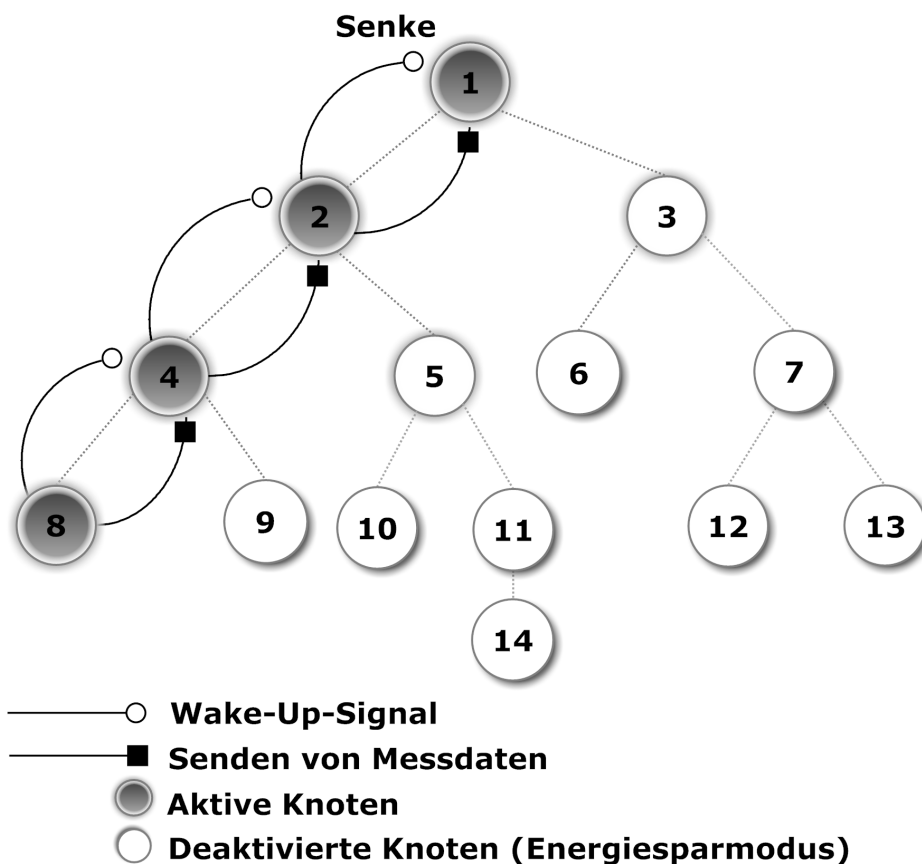


Abbildung 3.39: Selektive Nutzung von Netzwerkknoten mit Hilfe von WuRx Komponenten.

Der Anwendungsfokus von WuRx Technologien liegt klar bei asynchronen, ereignisgesteuerten Szenarien. Hier kann die Menge globaler Kommunikationsprozesse losgelöst von lokalen Datenverarbeitungsaufgaben betrachtet werden. So ist z.B. der Einsatz für meteorologische Systeme oder Smart Metering Applikationen sinnvoll, die lokal zwar kontinuierlich Messdaten über Sensoren verarbeiten, jedoch nur im Falle vordefinierter Ereignisse oder Anfragen aktiv über das Netzwerk kommunizieren. Auch Langzeit-Sensornetzwerkszenarien (Katastrophenprävention, zoologische Messsysteme) repräsentieren ein interessantes Einsatzgebiet. Hier können die gemessenen Datensätze über einen großen Zeitraum lokal gepuffert beziehungsweise vorverarbeitet werden, währenddessen keine aktiven Netzwerkkomponenten notwendig sind.

Müssen Informationen übertragen werden, ist auf Basis von WuRx Komponenten ein selektives Aufwecken bestimmter Topologiebereiche möglich (siehe Abbildung 3.39). Nicht benötigte Netzwerkknoten können demnach im Energiesparmodus verharren und verbessern dadurch die Energiebilanz des gesamten Systems auf Netzwerkebene.

Im Gegensatz zu den beschriebenen, ereignisgetriebenen Einsatzszenarien sind Anwendungen mit kontinuierlichen Sensordatenströmen weniger geeignet für WuRx Konzepte [362]. Auch bei zeitkritischen Messdaten ist eine lokale Pufferung weder zielführend noch hinreichend. Je nach Priorität und Umfang der Messungen beziehungsweise der Messhäufigkeit müssen die Daten stark frequentiert übertragen werden. Demnach sind auch die Netzwerkkomponenten ständig zwingend aktiv. Die konzeptionellen Vorteile von WuRx Technologien sind nicht anwendbar und die WuRx Hardware stellt eine nicht nutzbare Komponente dar, die unnötig Energieressourcen bindet. An dieser Stelle stehen besser geeignete Möglichkeiten für eine Energieeffizienzsteigerung zur Verfügung. Intelligente Strategien zur Aufgabenplanung [24, 32] im Bereich eingebetteter, ressourcenbeschränkter Systeme sowie der Zeitsynchronisierung [10] bieten in diesem Anwendungskontext deutlich mehr Potential bei geringerem Aufwand.

3.5 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden verschiedene Basistechnologien und Kommunikationskonzepte vorgestellt, welche im Bereich eingebetteter, verteilt agierender Systeme von Relevanz sind oder aus wissenschaftlicher Sicht vielversprechend erscheinen.

Hierbei wurden zunächst grundlegende Kenntnisse auf dem breiten Gebiet drahtloser Ad Hoc Netzwerke in eine logische Gesamtstruktur eingeordnet. Dieses Basiswissen dient primär dem allgemeinen Verständnis der Thematik und bietet einen ganzheitlichen Einstieg für den weiteren Verlauf dieser Arbeit. Dazu tragen auch die kritischen Betrachtungen der Forschungsbereiche Selbstorganisation und Schwarmintelligenz bei.

Anschließend wurde näher auf technologische, hardwarenahe Entwicklungen im Bereich der Funkübertragung eingegangen, welche unter Umständen einen großen Einfluss auf zukünftige Systeme innerhalb vernetzter, eingebetteter Kommunikationsstrukturen haben könnten.

3 Basistechnologien & Konzepte

Hierbei wurde speziell die Wake-Up-Receiver Technologie vorgestellt, die eine entscheidende technologische Grundlage für neuartige, asynchrone Kommunikationskonzepte darstellt. Die sich daraus ergebenden Möglichkeiten zur Steigerung der Energieeffizienz in hochgradig vernetzten Systemen stellen einen wichtigen Baustein des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Gesamtkonzeptes dar. Durch die sinnvolle Integration weiterer Optimierungsaspekte kann so eine energieeffiziente und flexible Kommunikationsarchitektur geschaffen werden.

Das folgende Kapitel widmet sich nun der logischen Abstraktionsebene des *Netzwerkmanagements*, welches in einem verteilten System alle Kommunikationsaspekte kapselt.

4 Netzwerkmanagement

Jede Form verteilt agierender Systeme benötigt eine Kommunikationsinfrastruktur zum Austausch von Nutzdaten sowie von Steuerungs- und Statusinformationen. Im Gegensatz zu vielen konventionellen Systemen konzentriert sich diese Ausarbeitung auf drahtlose Kommunikationstechnologien, wie sie langfristig noch häufiger zum Einsatz kommen werden. Innovative Verfahren auf den verschiedenen Protokollebenen ermöglichen dabei die Bereitstellung adaptiver Kommunikationskanäle, welche sich den jeweiligen Nutzeranforderungen und Rahmenbedingungen dynamisch anpassen. In Hinblick auf den Einsatz in ressourcenbeschränkten, energieautarken Systemarchitekturen müssen dabei verstärkt Kompromisse zwischen der Leistungsfähigkeit und dem Energiebedarf eingegangen werden.

Unter dem Begriff *Netzwerkmanagement* kapselt diese Abstraktionsebene im Folgenden alle Mechanismen zur Generierung und Aufrechterhaltung einer ganzheitlichen Netzwerkinfrastruktur.

4.1 Netzwerkmodellierung

Die Modellierung der Netzwerkstruktur erfolgt zunächst auf abstrakter Ebene und wird meist mit Hilfe von gerichteten, gewichteten Graphen abgebildet. Hier repräsentieren die einzelnen Knoten entsprechende Subsysteme, welche in Relation zu anderen Netzwerkkomponenten stehen. Die Kanten dienen der Darstellung aller relevanten Kommunikationsprozesse zwischen den Knoten und sind folglich sehr stark an die Applikation angepasst, jedoch losgelöst von technischen Realisierungen. Neben den funktionalen Repräsentationen ist es zusätzlich möglich, nicht funktionale Anforderungen wie Prioritäten oder Datenraten durch eine Abbildung auf Kantengewichte mittels einer Fitnessfunktion zu integrieren.

In diesem Zusammenhang müssen auf konzeptioneller Ebene Entscheidungen über Informationsverteilungsstrategien getroffen werden. Typische Klassifizierungen unterscheiden zwischen *Unicast*, *Multicast*, *Anycast* und *Broadcast* Adressierung. Die Bezeichnung bezieht sich dabei auf die Anzahl der Empfänger einer gesendeten Nachricht. Während bei *Unicast* exklusiv ein Kommunikationspartner angesprochen wird, existiert bei *Multicast* eine Empfängergruppe, die mit Hilfe der entsprechenden Zieladresse kodiert wird. Im Falle einer *Anycast*-Adressierung wird aus einer möglichen Empfängergruppe derjenige gewählt, welcher am schnellsten auf die Anfrage reagiert und antwortet. Diese Methodik ermöglicht beispielsweise die Realisierung einer Lastverteilungsstrategie in der Topologie. *Broadcast* Nachrichten werden von jedem Netzwerkknoten in Kommunikationsreichweite empfangen, verarbeitet und gegebenenfalls weitergeleitet.

Alternativ sind auch andere Informationsverteilungsstrategien möglich, so z.B. *Publisher-Subscriber-Systeme*, bei denen sich die einzelnen Netzwerkknoten für relevante Informationskanäle oder Themen explizit registrieren. Eine typische Implementierung solcher Konzepte findet man bei *Enterprise Service Bus* Konzepten, die im betriebswirtschaftlichen Anwendungskontext den unternehmensinternen Informationsfluss über die verschiedenen Abteilungen und Hierarchieebenen hinweg effizienter gestalten.

Wurden diese Entscheidungen getroffen, so bildet die modellierte Netzwerkinfrastruktur nun wesentliche Rahmenparameter des Applikationsszenarios sowie alle benötigten Ende-Zu-Ende Kommunikationsbeziehungen der jeweiligen Netzwerkknoten ab. Die logischen Kommunikationspfade sind anschließend auf die jeweiligen Übertragungstechnologien und physischen Gegebenheiten abzubilden. So können hier z.B. unterschiedliche logische Knoten zu einem physischen System zusammengeführt und Ressourcen verteilt werden. Alle Kommunikationsbeziehungen müssen auf die verfügbare Technologie und die Menge integrierter Knoten abbildbar sein. Nach einer Auswahl geeigneter Basistechnologien kann der gesamte Kommunikationsstack an die modellierten Konzepte angepasst werden.

4.2 Medienzugriff / Sicherungsschicht

Nachdem die Netzwerk-Modellierung auf konzeptioneller Seite alle Rahmenbedingungen spezifiziert und funktionale sowie nicht funktionale Anforderungen definiert wurden, untergliedert sich das Netzwerkmanagement im operationellen Betrieb in mehrere Aufgabenkomplexe.

Die gewählten Kommunikationstechnologien auf Hardwareseite und damit einhergehend die entsprechenden Medienzugriffsverfahren innerhalb der Sicherungsschicht bilden hierbei die zweite Ebene des Netzwerkmanagements. Relevante Basistechnologien wurden bereits in Kapitel 3 vorgestellt. In Folge dessen konzentrieren sich die folgenden Betrachtungen auf verwendete Protokolle innerhalb der Sicherungsschicht. Konkret umfasst dies den geordneten Medienzugriff zur Minimierung von interferenzbedingten Störungen. Zum besseren Verständnis fasst Abbildung 4.1 die unterschiedlichen Abstraktionsschichten des ISO/OSI Modells zusammen.

Sollen also mehrere Netzwerkknoten ein gemeinsames Übertragungsmedium nutzen, muss diese Ressource exklusiv und zeitlich begrenzt allozierbar sein. Diese *Arbitrierung* wird durch geeignete Zugriffsprotokolle innerhalb der Sicherungsebene realisiert und als *Medienzugriffssteuerung (MAC)*¹ bezeichnet. Ziel der Zugriffsprotokolle ist somit das effiziente Sequentialisieren und damit die zeitliche Verteilung aller anliegenden Datenübertragungsprozesse. Kollisionen auf dem Medium und folglich negative Einflüsse durch die hervorgerufenen Interferenzen können damit vermieden werden.

Für die jeweiligen Anwendungsbereiche und Ausprägungen von Netzwerkinfrastrukturen existieren unterschiedliche Verfahren und Konzepte. Neben vielen kanal-basierten und somit

¹Media Access Control

statisch zuweisenden Ansätzen (z.B. *FDMA*², *TDMA*³ sowie *CDMA*⁴ und *SDMA*⁵) konzentrieren sich die weiteren Betrachtungen auf *dynamisch bzw. zufällig allozierende* Verfahren auf Basis von *Polling* oder *Kanalreservierung*. Hier wiederum unterscheiden sich im Bereich der paketorientierten, drahtlosen Datenübertragung *kollisionsfreie*, *kollisionsvermeidende* sowie *kollisionsauflösende* Konzepte.

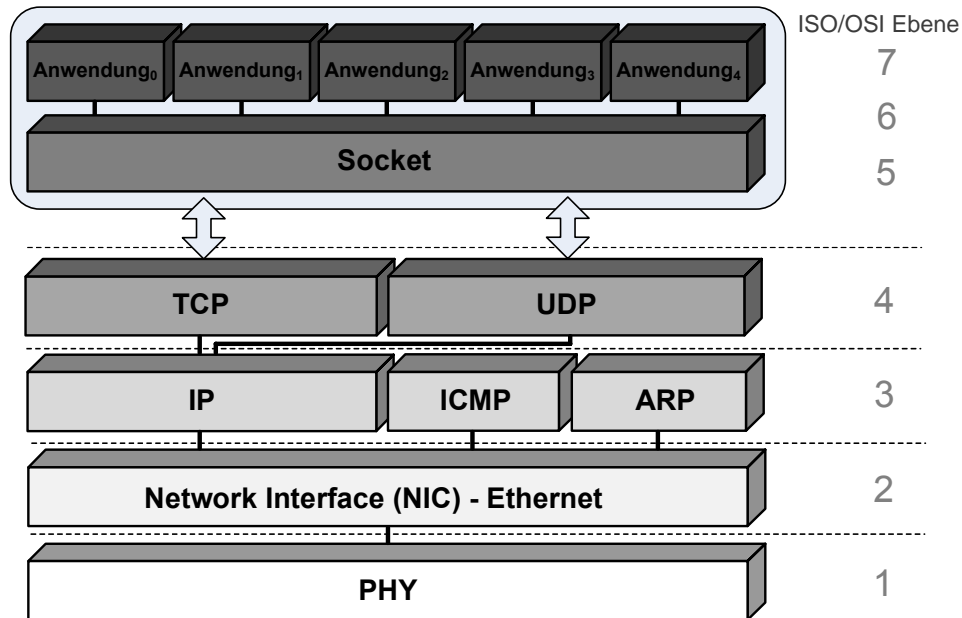


Abbildung 4.1: Einordnung der zentralen Protokolle des TCP/IP Stacks in das ISO/OSI Referenzmodell.

In Hinblick auf den Themenfokus verteilter Sensor-Aktor-Netzwerke und den damit einhergehenden Rahmenbedingungen sollen nun ausgewählte MAC Protokolle vorgestellt und näher betrachtet werden.

4.2.1 MAC Protokolle

Bevor auf die einzelnen Verfahren näher eingegangen wird, fasst Tabelle 4.1 zunächst zentrale Eigenschaften und entsprechende Gewichtungen in unterschiedlichen Anwendungsumgebungen zusammen. Um diese nutzerseitigen Eigenschaften hinreichend zu erfüllen, muss das jeweilige MAC Protokoll auf funktionaler Ebene mehrere Problemstellungen lösen.

Kollisionen:

Müssen auf dem Übertragungsmedium erkannt, vermieden oder durch geeignete Mechanismen ausgeschlossen werden.

²Frequency Devision Multiple Access

³Time Devision Multiple Access

⁴Code Devision Multiple Access

⁵Space Devision Multiple Access

Overhearing:

Bei Unicast Übertragungen hören ungewünscht andere Kommunikationsinstanzen die Signale, wodurch laufende Übertragungsprozesse beeinträchtigt werden können.

Idle Listening:

Resultiert vorrangig aus Overhearing Effekten. Obwohl keine Daten für den eigenen Host vorliegen, werden andere Signale empfangen, welche ohne weiteren Nutzen verarbeitet werden und folglich Energiere Ressourcen verschwenden.

Protokolloverhead:

Je nach Grad der Robustheit, sind protokollspezifisch Zusatzinformationen in den Protokollheadern und -footern integriert. Aufwand und Nutzen muss hierbei in einer sinnvollen Relation stehen, um das Verhältnis zwischen Nutzlast und Protokollfunktionalität praktikabel zu halten.

Ein sehr bekanntes und einfaches Verfahren im Bereich der kollisionsauflösenden Ansätze ist das *ALOHA* Protokoll, ein stochastisches Zugriffsprotokoll, welches keine Koordination im Netzwerk erfordert und eventuell auftretende Kollisionen auf dem Medium erkennt [61]. Neben dem klassischen *ALOHA* existiert ein erweitertes, *slotted ALOHA* Protokoll, welches eine synchronisierte Netzwerktopologie erfordert und auf Basis von *Time Slots* (Zeitschlitzzen / Zeitabschnitten) arbeitet. Hier darf jeder Knoten ausschließlich in vordefinierten Zeitabschnitten Daten senden. Auch *R-ALOHA (Reservation-ALOHA)* [222] repräsentiert eine ähnliche Variante des Protokolls.

Wichtigkeit Eigenschaft	Drahtlose Kommunikations- umgebung (Heimanwendungen)	Energieautarke Drahtlos- anwendungen (Embedded)	Drahtgebundene Kommunikations- umgebung (Industrieumfeld)
Energieeffizienz	Mittel	Hoch	Niedrig
Adaptivität	Mittel	Hoch	Niedrig
Skalierbarkeit	Niedrig	Hoch	Hoch
Fairness	Mittel	Hoch	Mittel
Latenz	Hoch	Niedrig	Hoch
Datendurchsatz	Hoch	Niedrig	Niedrig
Echtzeitfähigkeit	Niedrig	Mittel	Hoch

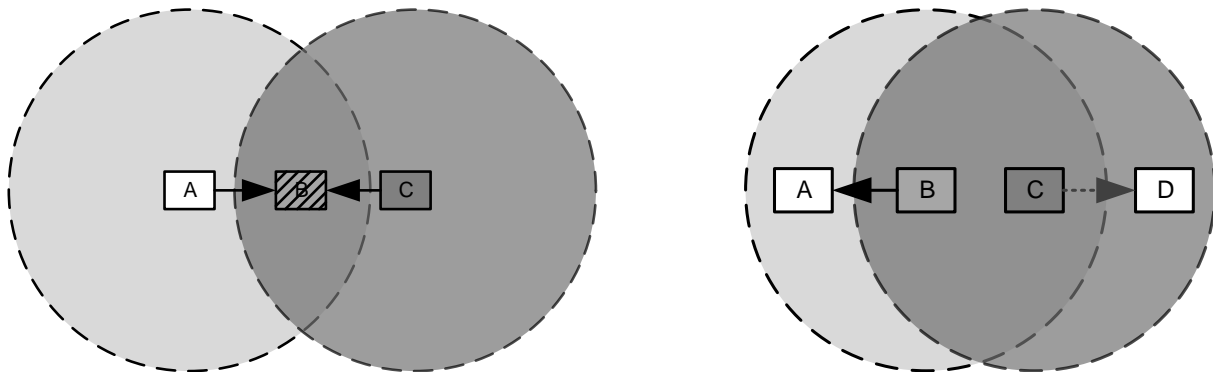
Tabelle 4.1: Übersicht zentraler Eigenschaften von MAC Protokollen und deren Bedeutung in unterschiedlichen Einsatzszenarien.

Kollisionsfreie Verfahren sind in drahtlosen Kommunikationsszenarien nur schwer realisierbar. In klassischen, drahtgebundenen Netzen sind alle *Token Ring* Verfahren in diese Kategorie einzuordnen. Auch die Kanalarbitrierung im *CAN-Bus*⁶ erfolgt auf Basis einer prioritäten-gesteuerten Sequentialisierung kollisionsfrei. *MS-ALOHA (Mobile Slotted ALOHA)* ist eines der wenigen kollisionsfreien Protokolle für drahtlose Netzinfrastrukturen, welches nur unter

⁶Controller Area Network

stark eingeschränkten Rahmenbedingungen hinsichtlich Systemarchitektur und Kommunikationsstruktur umgesetzt werden kann.

Viele bekannte Verfahren, speziell der CSMA⁷ Ansatz, repräsentieren durch ihre Lösungsstrategien kollisionsvermeidende Ansätze. CSMA erweitert den Ansatz von ALOHA um einen Mechanismus zur Prüfung des Mediums bei jeder Verbindungsinitialisierung (Trägerprüfung - *carrier sense*) [224]. Ist der Kanal zu diesem Zeitpunkt belegt, wird der Sendevorgang unterbrochen und es erfolgt eine zufällige, zeitlich vordefinierte Wartephase bis zum nächsten Versuch. Durch diesen kooperativen Prozess können negative Einflüsse auf andere Datenübertragungen vermieden werden. Durch die räumliche Verteilung kann es aufgrund mehrerer simultaner Übertragungen dennoch zu Störungen bzw. Kollisionen auf dem Medium kommen. Diese werden dann empfängerseitig erkannt und ermöglichen ein erneutes Übertragen des entsprechenden Paketes (*Kollisionserkennung - Collision Detection - CD*). Zum Einsatz kommt CSMA beispielsweise bei Ethernet-Netzen. Darauf aufbauend existieren weiterentwickelte Verfahren zur *Kollisionsvermeidung (Collision Avoidance - CA)*, die durch Einführung kurzer, zufällig gewählter Wartephasen versuchen, Störeinflüsse zu minimieren. Zum Einsatz kommt CSMA/CA in vielen drahtlosen Kommunikationsstandards, unter anderem in der IEEE 802.11 Spezifikation (WLAN).



(a) *Hidden Terminal Problem*: Knoten B liegt in der Sendereichweite von A; C jedoch nicht. Somit erhält C keine Informationen über die laufende Kommunikation zwischen A und B. Unter der Annahme, dass das Kommunikationsmedium nicht belegt ist, beginnt C mit dem Senden an B. In Knoten B tritt daraufhin eine Kollision auf und sowohl die Nachrichten von A als auch von C gehen verloren. A ist somit für C nicht sichtbar (*hidden*).

(b) *Exposed Terminal Problem*: Bei der dargestellten Ausgangssituation könnte während der Kommunikation zwischen B und A eine parallele Übertragung zwischen C und D erfolgen, da empfängerseitig keine Datenkollisionen erfolgen würden. Durch die Trägerprüfung (*carrier sense*) von C wird eine Übertragung jedoch verhindert, da ein belegtes Kommunikationsmedium durch Knoten B detektiert wird.

Abbildung 4.2: Hidden- / Exposed Terminal Problem.

Zwei wesentliche Phänomene, die trotz Einsatz von Medienzugriffsprotokollen in drahtlosen Topologien auftreten, sind das *Hidden Terminal* sowie das *Exposed Terminal Problem* (siehe Abbildung 4.2). Um diesen Problemstellungen entgegenzuwirken, kommt das *RTS/CTS*

⁷Carrier Sense Multiple Access

*Verfahren*⁸ zum Einsatz. Es minimiert die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Hidden Terminal Szenarien wesentlich und erweitert das Handshake-Verfahren im Zuge des Verbindungsinitialisierungsprozesses. Betrachtet man die Konstellation einer *Exposed Terminal* Situation, so wird durch den Einsatz von RTS/CTS die nutzbare Bandbreite eingeschränkt, da einige Knoten präventiv blockieren. Jedoch ist dieses Verhalten aus einer globalen Betrachtungsweise deutlich besser als die Generierung von Kollisionen auf dem Medium.

Kollisionsvermeidende Übertragungsschemen im Kontext drahtloser Kommunikationstechnologien arbeiten daher auf Basis von RTS/CTS mit einem fünfstufigen Informationsaustausch (RTS-CTS-DS-DATA-ACK) und sind in der Literatur häufig unter dem Begriff (*MACAW*⁹) zu finden. So ist es beispielsweise auch dem *MARCH*¹⁰ [372] Protokoll möglich, auf Basis eines angepassten Handshake-Verfahrens die beschriebenen Phänomene zu umgehen.

Eine besondere Strategie zur Vermeidung von Hidden- und Exposed Terminal Situationen nutzen *Busy Tone* Verfahren, wie beispielsweise *DBTMA*¹¹ [177]. Derartige Verfahren arbeiten recht einfach und nutzen spezielle Signale, um benachbarten Systemen aktive Übertragungsphasen mitzuteilen. Die Übertragungskanäle werden zusätzlich in Subkanäle für Nutzdaten und Kontrolldaten aufgeteilt. Ein Sender startet dabei seine Übertragungsanfrage mit einem RTS Signal. Der empfangsbereite Empfänger quittiert die Anfrage mit dem Senden eines *Busy Tone Signals*, gefolgt von einer CTS Nachricht. Benachbarte Knoten, welche das Busy Tone Signal empfangen, sind nicht mehr berechtigt, Daten zu übertragen. Der Sender empfängt das CTS Signal und strahlt daraufhin ein zweites Busy Tone Signal aus. Dessen Nachbarschaft empfängt dieses Signal und ist folglich ebenso nicht mehr berechtigt, Daten zu übertragen. Eine störungsfreie Übertragung ist nun gewährleistet. Gleichzeitig werden dabei auch eingehende Datenübertragungen ignoriert bis der aktuelle Übertragungsvorgang abgeschlossen ist und die Busy Tone Signale enden. Analysen derartiger Verfahren zeigen erhebliche qualitative Vorteile gegenüber klassischen RTS/CTS Verfahren, was sich wiederum sehr positiv auf die Energieeffizienz des gesamten Kommunikationssystems auswirkt.

4.2.2 Anwendungsoptimierte und Energieeffiziente MAC Protokolle

MAC Protokolle können mit ihren Zugriffsmetriken an unterschiedliche Rahmenbedingen und Nutzeranforderungen angepasst werden. Wesentliche Parameter zur Klassifizierung schlüsseln sich wie folgt auf:

- *Latenz*

- Hopanzahl
- Wechsel des Kommunikationsstandards (bei Unterstützung von Multi-Standard, Multi-Interface Kommunikationsplattformen)

⁸Ready To Send / Clear To Send

⁹Multiple Access with Collision Avoidance for Wireless

¹⁰Media Access with Reduced Handshake

¹¹(Dual) Busy Tone Multiple Access

- Datendurchsatz

- Minimale oder durchschnittliche Datenrate
- Multipath Fähigkeiten (*Stream Splitting*)

- Energiebedarf

- Funkmodulhardware (Standby, Rx/Tx)
- Kompromiss zwischen Reichweite und Pfadlänge

- Sicherheitsaspekte

- Kanalstabilität/ Robustheit
- Kanalpriorisierung

- Kapazitätsauslastung

- Netzlast auf der Schnittstelle
- Protokoll-Overhead

TRAMA¹² [311] repräsentiert ein bekanntes und sehr robust konzipiertes MAC Protokoll, welches versucht, Kollisionen während der Datenübertragung weitestgehend auszuschließen. TRAMA arbeitet mit individuellen Zeitslots für den Medienzugriff, die unter den verfügbaren Netzwerknoten koordiniert werden. Die Ressourcenaufteilung erfolgt dabei in Abhängigkeit der Anforderungen an die jeweiligen Applikationen und den Rahmenbedingungen des Anwendungsszenarios [282]. Dazu kombiniert es koordinierte Aktivitätsphasen und zusätzliche Phasen für zufällige, nicht synchronisierte Kommunikationsanfragen. Benötigt ein Knoten temporär mehr Übertragungsressourcen, kann er dies im Rahmen dieser zusätzlichen Zeitslots mitteilen. TRAMA kann in Folge dessen das zeitliche Kommunikationsverhalten entsprechend anpassen. Eine im Vergleich zu anderen MAC Protokollen deutlich flexiblere Ressourcenaufteilung steht dabei einem erhöhten Protokoll-Overhead gegenüber, der durch die teils ungenutzten Zeitslots generiert wird.

S-MAC¹³ [282] und T-MAC¹⁴ [129] arbeiten ebenfalls mit synchronisierten Zeitplänen. Diese enthalten aktive und passive Phasen, in denen die Knoten koordiniert Daten übertragen können oder in einem Ruhezustand Energie sparen. Eine Besonderheit dieser Medienzugriffsprotokolle besteht im Informationsaustausch während der Rendezvous-Phase. Beide Verfahren kommunizieren während jeder Verbindungsinitialisierung die voraussichtliche Dauer der Übertragung. Diese Informationen werden auch von benachbarten, aktiven Knoten ausgewertet und erleichtern somit die zeitliche Koordinierung nachfolgender Verbindungsanfragen. Beide MAC Protokolle sind bekannt für ihre hohe Energieeffizienz und speziell für den Einsatz in ressourcenbeschränkten, eingebetteten Kleinstgeräten konzipiert.

¹²Traffic-Adaptive Medium Access Protocol

¹³Sensor-Media Access Control

¹⁴Timeout-Media Access Control

T-MAC erweitert die Energiesparkonzepte von S-MAC. Während die Knoten bei S-MAC statisch nach Zeitplan aus Ihrem Ruhezustand erwachen und sich wieder in diesen begeben, ist bei T-MAC ein frühzeitiger Wechsel in den Energiesparmodus möglich. Dieser erfolgt im Falle einer zeitlich festgelegten Kommunikationsinaktivität innerhalb der aktiven Betriebsphase. Dieser Aktivitäts-*Timeout* repräsentiert die zentrale Eigenschaft des Protokolls. Des Weiteren ermöglicht T-MAC im Gegensatz zu vielen anderen Protokollen die Realisierung von Prioritäten.

Im Bereich der Forschung repräsentieren weiterhin *DMAC*¹⁵, *SMACS*¹⁶ sowie *PACT*¹⁷ und *SRSA*¹⁸ synchronisierte Duty-Cycle MAC Protokolle [231].

Das *EE-MAC*¹⁹ [409] Medienzugriffsprotokoll legt ebenfalls den Fokus auf die Energieeffizienz. Es arbeitet auf einem *Master-Slave-Prinzip*, in dem Master-Knoten in der Topologie dynamisch gewählt werden. Diese müssen über hinreichend Energieressourcen verfügen, um alle Koordinierungs- und Weiterleitungsaufgaben zu übernehmen. Slave-Knoten nutzen die Netzwerkstruktur in einer passiven Rolle und kommunizieren ausschließlich über verfügbare Master-Knoten. Somit leiten sie selbst keine Daten aktiv weiter. Dies schont die Energieressourcen entsprechend. Zusätzlich werden zeitlich synchronisierte Sleep-Phasen für Slave-Knoten eingeführt, wodurch diese nur noch periodisch in einzelnen Zeitslots aktiv kommunizieren. Zur Laufzeit wird ein Rotationsansatz gewählt, wodurch Master und Slave Knoten zyklisch und fair verteilt werden. Der Protokolloverhead für die Prüfung von Energieressourcen kostet jedoch selbst wieder Energie, wodurch sich Vorteile hinsichtlich der Energieeffizienz erst bei hinreichend großen Datenmengen ergeben.

Das *LASA*²⁰ Protokoll [195] arbeitet ebenfalls auf Basis von TDMA und teilt die Zeitslots in Abhängigkeit aktueller Energieniveaus dynamisch ein. Somit wird ein global faires Kommunikationsverhalten erreicht, bei dem Knoten mit kritischem Energieniveau ihre Ressourcen schonen können. Zur Minimierung der Latenzen in zeitkritischen Anwendungsszenarien ist *LEEM*²¹ [136]) spezialisiert und stellt in diesem Kontext effiziente Mechanismen zur priorisierten Kanalallokation bereit. *PAMAS*²² [346] ist ein auf *MACA*²³ [374] basierendes, erweitertes MAC Zugriffsverfahren. Das Verfahren nutzt einen separaten Übertragungskanal zur Abwicklung des Hand-Shake Verfahrens. PAMAS ist in der Lage, einzelne Knoten selektiv zu deaktivieren, wenn keine Daten übertragen oder empfangen werden.

*PCM*²⁴ [328] nutzt spezielle RTS, CTS und ACK Pakete für die Aushandlung des Energieniveaus der Übertragung. RTS und CTS werden dabei mit maximaler Leistung gesendet, wobei die jeweiligen Leistungswerte in den Paketen enthalten sind. Empfängerseitig wird auf Basis der

¹⁵Distributed Media Access Control

¹⁶Self-Organizing Medium Access Control for Sensor Networks

¹⁷Power Aware Clustered TDMA

¹⁸Self-Organizing Slot Allocation

¹⁹Energy-Efficient Media Access Control

²⁰Low-Energy Adaptive Slot Allocation Scheduling Algorithm

²¹Latency Minimized Energy Efficient MAC

²²Power-Aware Multi-Access Protocol with Signaling

²³Multiple Access with Collision Avoidance

²⁴Power Control MAC

Differenz zwischen diesem Wert und gemessener Signalstärke sowie dem aktuellen Störpegel eine minimale Sendeleistung für das ACK Paket errechnet. Gleiches geschieht anschließend mittels CTS Paket in die andere Richtung. Nach Abschluss der Verbindungsinitialisierung nutzen beide Kommunikationspartner eine optimal angepasste Sendeleistung. Auch *DCA*²⁵ [100] arbeitet nach einem ähnlichen Prinzip. Gleiches gilt für *PCMA*²⁶ MAC Protokoll [328], das ebenfalls Konzepte zur dynamischen Anpassung der Sendeleistung nutzt. Somit sollen interferenzbedingte Störungen und Overhearing-Effekte minimiert und gleichzeitig die eigenen Energieressourcen geschont werden.

*MMAC*²⁷ und *HRMA*²⁸ sind bekannte Multichannel MAC Protokolle, welche für den Bereich drahtloser Ad Hoc Infrastrukturen konzipiert wurden [231]. *MMAC* nutzt ein Zeitschlitzverfahren für Koordinierung mehrerer simultaner Layer 2 Übertragungskanäle. *HRMA* nutzt FHSS und ist folglich sehr robust gegen externe Störungen innerhalb des verwendeten Frequenzspektrums. Ein weiteres MAC Protokoll, welches besonders auf die Anforderungen hochgradig mobiler Anwendungsszenarien angepasst wurde, ist *MS-MAC*²⁹ [293]. Das Verfahren ist so konzipiert, dass Änderungen der Signalstärke empfängerseitig als relative Änderungen der Position interpretiert werden. Auf diese Weise arbeitet *MS-MAC* in Topologiebereichen mit geringer Mobilität sehr energieeffizient, ist aber gleichzeitig in der Lage, stabile Kommunikationskanäle bei hoher Knotendynamik zur Verfügung zu stellen.

*WiseMAC*³⁰ [239] arbeitet in einem nicht synchronisierten Netzwerk auf Basis periodischer Aktiv-Phasen, in denen das Medium auf Kommunikationsaktivitäten geprüft wird. Im Zuge einer Übertragungsinitialisierung bestätigt der Empfänger die Kommunikationsanfrage des Senders und übermittelt dabei gleichzeitig den nächsten Zeitslot seiner Aktivität. Somit synchronisieren sich die Kommunikationspartner jeweils paarweise bei Bedarf. In Folge dessen können die Ressourcen für eine topologieweite zeitliche Synchronisierung eingespart werden und die Energieeffizienz des Gesamtsystems steigt entsprechend. Gleichzeitig ergeben sich durch dieses Konzept jedoch Schwachstellen hinsichtlich einer Multi-Hop-Übertragung, bei der es durch die paarweise Synchronisation zu Verzögerungen kommen kann.

Viele der genannten, optimierten Zugriffsverfahren im Bereich verteilter, eingebetteter Systeme arbeiten auf Basis synchronisierter Zeitpläne und erfordern zwingend eine synchrone Zeitbasis. Ohne diese Synchronisation sind Medienzugriffsverfahren auf TDMA oder FDMA Basis nur eingeschränkt umsetzbar [374]. In zellulären Netzen oder Topologien mit strengen Hierarchieebenen ist eine solche Synchronisation unkritisch. Im Bereich der Multi-Hop Kommunikation und mobilen Ad Hoc Strukturen sind hierfür jedoch komplexere Mechanismen erforderlich, auf die im späteren Verlauf dieses Kapitels noch näher eingegangen wird. Die Koordinierung und Verteilung der Zeitslots in einer dynamischen Netzinfrastruktur mit stark begrenzten Energieressourcen und stark schwankenden Rahmenbedingungen stellen hier die zentralen Problemstellungen dar.

²⁵Dynamic Channel Assignment

²⁶Power-Controlled Multiple Access

²⁷Multichannel Media Access Control

²⁸Hop Reservation Multiple Access

²⁹Mobile Sensor MAC

³⁰Wireless Sensor MAC

4.3 Topologiemanagement

Im Rahmen des Topologiemanagements kommen Konzepte zum Aufbau und zur Optimierung der Kommunikationsinfrastruktur auf Punkt-zu-Punkt Verbindungsebene zum Einsatz. Die Topologiekontrolle stellt im Kontext des Netzwerkmanagements eine dritte Ebene dar. Soll die drahtlose Kommunikation unter gegebenen Rahmenbedingungen und hinsichtlich eines spezifischen Anwendungsszenarios optimiert werden, sind häufig keine hardwareseitigen Modifikationen der Netzwerkschnittstellen realisierbar. Die Kommunikationshardware kapselt meist die unteren Ebenen des Kommunikationsstacks und somit Funktionalitäten wie beispielsweise den Medienzugriff. Topologiemanagementverfahren bieten oberhalb der gekapselten Hardware erste softwareseitige Möglichkeiten für Optimierungen [192]. Abbildung 4.3 zeigt in diesem Zusammenhang beispielhaft die Aufgaben innerhalb des Topologiemanagements.

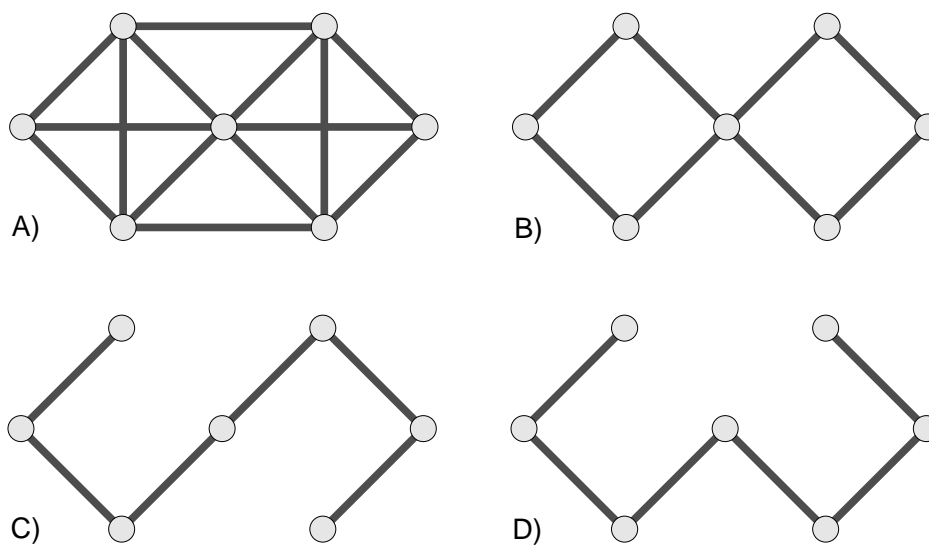


Abbildung 4.3: Schrittweise Topologieoptimierung beginnend mit der maximal möglichen Vernetzung (A) bis zu zwei möglichen minimalen Vernetzungen (C/D).

4.3.1 Optimierungsziele

Ziel aller Verfahren der Topologiekontrolle und der Topologieoptimierung ist die Generierung und Aufrechterhaltung einer Kommunikationsinfrastruktur, die bestimmte strukturelle Eigenschaften erfüllt und somit die Kommunikation im Netzwerk effizienter gestaltet [355]. Diese Zielstellung betrifft besonders mobile Netzwerktopologien, in denen der Vernetzungsgrad und somit die Anzahl möglicher Kommunikationspfade teils stark schwankt. Je höher der Mobilitätsgrad und die Knotendichte, desto stärker und häufiger treten derartige Schwankungen auf. Das Topologiemanagement und die damit verbundenen Topologiekontrollverfahren ermöglichen in diesem Zusammenhang eine direkte Beeinflussung der Menge aktiv gepflegter Punkt-zu-Punkt Verbindungen (*Single Hop Links*) [383]. Wichtige Kenngrößen im Zuge dieses Optimierungsprozesses sind unter anderem:

- *Konnektivität*
- *Redundanzgrad*
- *Datendurchsatz*
- *Robustheit gegenüber Mobilität*
- *Protokolloverhead*

Von primärer Relevanz sind dabei meist globale Zielvorgaben, d.h. aus der Summe aller Anpassungen sollen positive Auswirkungen auf das gesamte Kommunikationsverhalten resultieren [237, 245]. Die globalen Zielstellungen können dabei vielfältig definiert sein. Im Kontext mobiler Netzwerktopologien mit einer großen Anzahl integrierter Netzwerkknoten steigt bei erhöhter Knotendichte der administrative Aufwand für die Verbindungsverwaltung in jedem Knoten drastisch an. Grund hierfür sind die zahlreichen Nachbarschaftsknoten in direkter Kommunikationsreichweite. Der administrative Aufwand für diese Verbindungsverwaltung auf den unteren Ebenen des Protokollstack ist keinesfalls zu unterschätzen. Die für die Pflege aller aktiven Kommunikationskanäle benötigten Verwaltungsressourcen erreichen schnell ein kritisches Niveau, besonders in Bezug auf die verfügbaren Gesamtressourcen eingebetteter, funktionsreduzierter Systeme. Folglich liegt hier der Fokus auf einer Reduzierung bzw. Ausdünnung der Netzwerktopologie bis zu einem bestimmten Grad. Dabei muss der Kompromiss zwischen Pfad-Redundanz und Kommunikationseffizienz anwendungsspezifisch definiert werden. In sicherheitskritischen Anwendungsszenarien aus den Bereichen WSN und SANET können die Ziele im Gegensatz dazu völlig anders ausgelegt werden. Hier spielen Faktoren wie Übertragungslatenzen, Stabilität und Zuverlässigkeit von Kommunikationspfaden sowie die Energieeffizienz in Hinblick auf die Gesamtsystemlaufzeit eine wesentliche Rolle. In Folge dessen werden die verwendeten Metriken zur Anpassung der Topologie auf die jeweils kritischen Parameter des Anwendungsszenarios abgestimmt. Auf den höheren Ebenen des Protokollstacks wird dann bereits auf einer optimierten Kommunikationsinfrastruktur gearbeitet. Auch auf die Berechnungsdauer von Routingalgorithmen hat eine topologieweite Reduzierung der Verbindungspfade erheblichen Einfluss.

Die sich auf unterer Protokollebene ergebenden Vorteile sind ersichtlich. Der Verarbeitungsaufwand sowie die Netzlast sinkt erheblich, was sich positiv auf die Energiebilanz auswirkt. Besonders kritische Lastspitzen, welche bei hoher Knotendichte und Knotenanzahl schnell zu Störungen und partiellen Netzausfällen führen können, werden eingeschränkt. Speziell in drahtlos vernetzten Sensor und Sensor-Aktor-Netzwerken ist neben Pufferüberläufen ein zweiter, wesentlicher Störfaktor das Interferenzverhalten und die dadurch verursachten Übertragungsfehler. Durch den gezielten Einsatz von Topologieoptimierungsverfahren kann die Wahrscheinlichkeit für Datenkollision auf dem Übertragungsmedium reduziert und in Folge dessen interferenzbedingte Netzwerkstörungen eingegrenzt werden. In direkter Konsequenz skalieren Systemarchitekturen mit einem effizienten Topologiemanagement deutlich besser als klassische Implementierungen [326, 371], was sich anhand komplexer Netzwerkstrukturen leicht verdeutlichen lässt (siehe Abbildung 4.4).

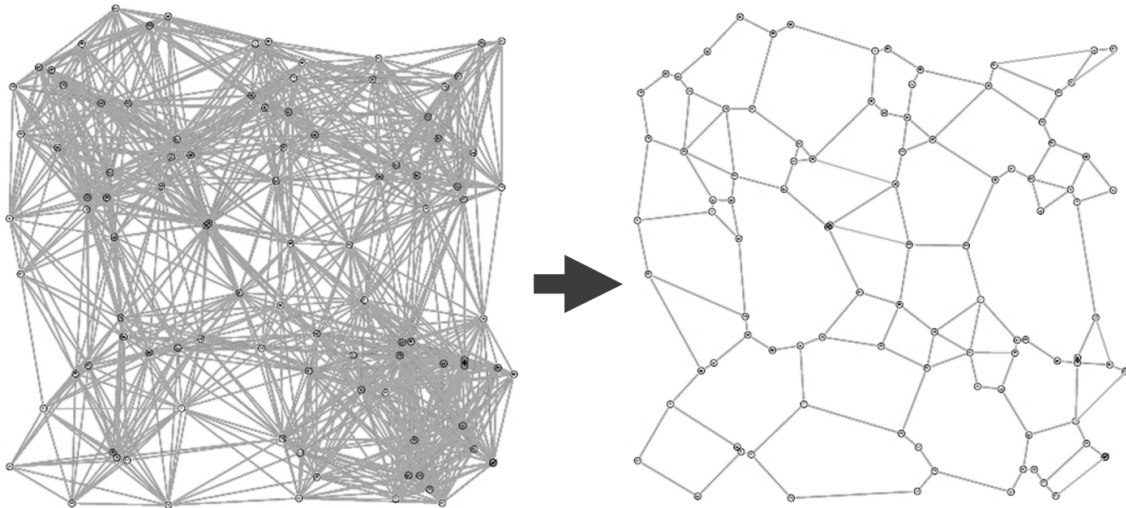


Abbildung 4.4: Beispiel für den Einsatz von Topologieoptimierungsverfahren. *Links* die ursprüngliche Topologie mit maximalem Vernetzungsgrad unter Nutzung aller verfügbarer Kommunikationspartner. *Rechts* eine reduzierte Topologie. Überflüssige Kommunikationskanäle werden auf logischer Ebene durch die Knoten nicht mehr genutzt und verwaltet. Eine Erreichbarkeit aller Knoten sowie ein spezifischer Redundanzgrad ist weiterhin gegeben.

Die Systemkomplexität erhöht sich durch den Einsatz entsprechender Managementverfahren nur geringfügig. Dieser Sachverhalt ist in der Literatur teils umstritten, wie beispielsweise in [94] beschrieben. Da die meisten Verfahren jedoch ausschließlich lokal auf den einzelnen Knoten arbeiten und verfügbare Statusinformationen nutzen, kann davon ausgegangen werden, dass der Einsatz gerechtfertigt und sinnvoll erscheint. Dies trifft speziell auf Netzwerktopologien mit hoher Knotendynamik und im Kontext ressourcenbeschränkter Systemplattformen zu. Die Relation zwischen Aufwand und Nutzen eines umfassenden Topologiemanagements muss aber individuell in Abhängigkeit vom Anwendungsszenario abgeschätzt werden.

4.3.2 Prozeduraler Ablauf

Die zentrale Aufgabe des Optimierungsprozesses besteht in einer hinreichenden und sinnvollen Auswahl logischer Verbindungen aus der Menge aller verfügbaren, direkten Kommunikationspartner [88]. Zur Laufzeit sind zwei operative Phasen für den *Topologieaufbau* und die anschließende, kontinuierliche *Optimierung* zu unterscheiden. Im Rahmen des Topologieaufbaus erfolgt die Initialisierung einer grundlegenden Netzwerkstruktur, welche die Erreichbarkeit aller Netzwerkknoten sicherstellt. Dies wird im einfachsten Fall durch die Nutzung aller verfügbaren Netzwerkverbindungen erreicht. Diese Struktur steht den Pfadfindungsalgorithmen auf höherer Ebene zur Verfügung.

Im weiteren Betrieb kann nun geprüft werden, welche Single-Hop-Kommunikationsverbindungen selten genutzt werden oder welche kritisch für die Erreichbarkeit bestimmter Topologiebereiche sind. Auch der aktuelle Redundanzgrad bezüglich der Knotenvernetzung ist ein wichtiger Parameter für weitere Optimierungen. Existieren folglich viele alternative

Multi-Hop-Routenpfade zwischen zwei Knoten, so kann die Topologieoptimierung wenig genutzte Verbindungen logisch trennen und den Redundanzgrad senken. Im Anschluss stehen diese Verbindungen nicht mehr für Verfahren auf höherer Abstraktionsebene zur Verfügung.

Das Anwendungsfeld drahtloser Sensornetzwerke mit vordefinierten Datensinken kann im Kontext des Topologiemanagements einen Spezialfall repräsentieren. Hier ist eine *Netzexploration* als vorgelagerter Prozess der Netzinitialisierung realisierbar. Dieser kommt dann zum Einsatz, wenn beispielsweise die gesamte Berechnungs- und Verarbeitungsintelligenz von den einzelnen Sensorknoten auf die Datensinken ausgelagert werden soll. In der Senke stehen meist deutlich mehr Berechnungsressourcen zur Verfügung, um eine effiziente Kommunikationsstruktur zu definieren. Um in der Datensenke eine umfassende Wissensbasis aufbauen zu können, müssen jedoch zunächst mit Hilfe der Netzexploration grundlegende Knoteninformationen inklusive aller Nachbarschaftsrelationen sowie gegebenenfalls Metadaten (Prioritäten, Energiestatus, etc.) an die Senke übermittelt werden. Dies erfolgt meist mittels Broadcast. Da die Senke(n) häufig vordefiniert und somit bekannt sind, stellt dies kein Problem dar. Basierend auf diesen Informationen kann nun ein reduzierter und applikationsspezifischer Kommunikationsgraph generiert werden. Die Ergebnisse der Netzexploration umfassen neben der reinen Kommunikationsinfrastruktur bereits häufig konkrete Routingtabellen, welche in der Senke für die jeweilige Topologie einfach und schnell vorkonfiguriert werden können. Abschließend erfolgt dann die initiale Konfiguration aller Netzwerkknoten mit dieser Kommunikationsstruktur. Ausgehend von der Senke werden dabei alle Knoten nach einem bevorzugten Traversierungsart besucht (Tiefensuche / Breitensuche). Bei Bedarf kann der Prozess der Netzexploration und Konfiguration im weiteren Verlauf periodisch oder nach bestimmten Ereignissen in der Topologie wiederholt werden.

4.3.3 Optimierungsansätze und -verfahren

Auf einige grundlegende Verfahren der Topologiekontrolle und -optimierung soll im Folgenden näher eingegangen werden. Dabei sind grundlegend global und lokal arbeitende Ansätze zu unterscheiden. Während sich globale Ansätze auf eine topologieweit ganzheitliche Wissensbasis stützen, arbeiten lokale Verfahren ausschließlich auf Basis direkt verfügbarer Netzwerkinformationen aus ihrer unmittelbaren Umgebung. Lokale Verfahren schränken das Optimierungspotential entsprechend ein. Gleichzeitig reduziert sich hier aber auch der Kommunikationsaufwand erheblich. Daher liegt das Hauptaugenmerk für Entwicklungen in diesem Bereich klar auf lokal arbeitenden Verfahren.

Eine weitere Unterscheidung erfolgt nach dem Merkmal der Homogenität. Abbildung 4.5 zeigt hierzu eine mögliche Aufgliederung.

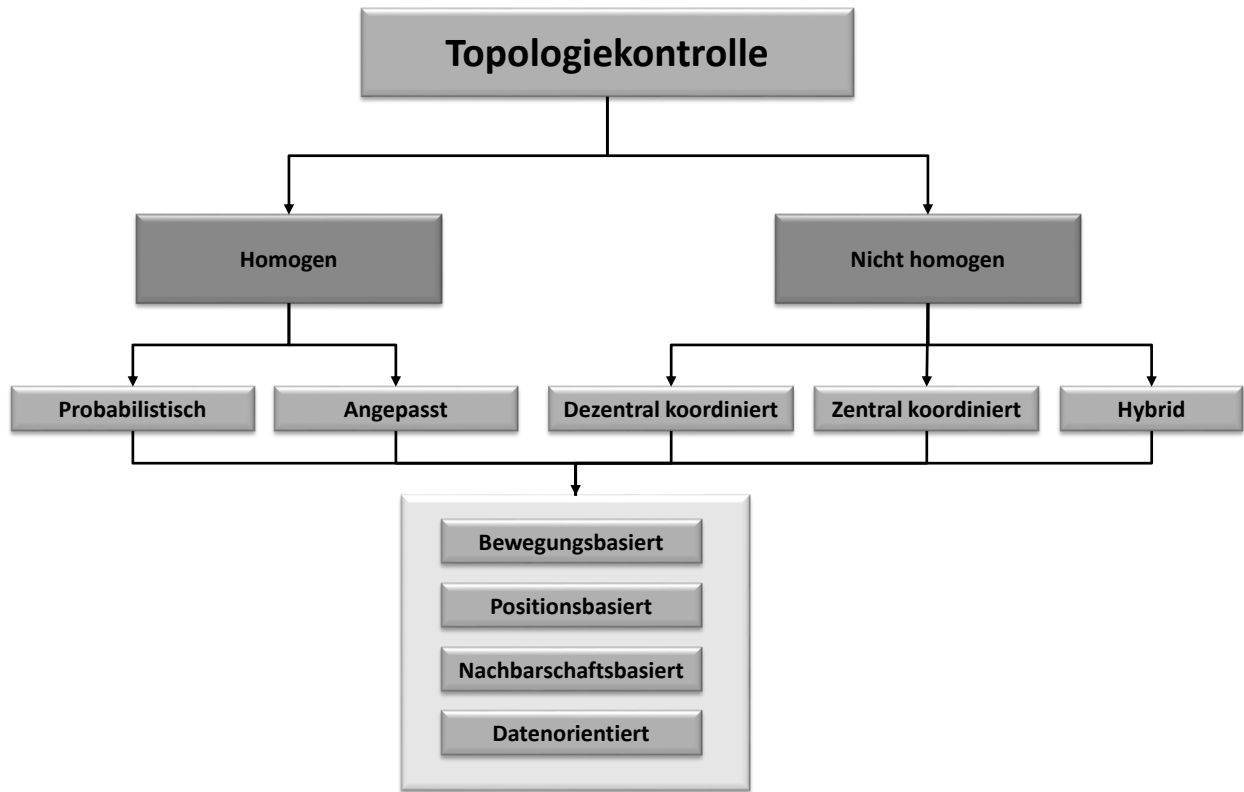


Abbildung 4.5: Aufgliederung der Thematik Topologiekontrolle nach Optimierungsansätzen.

Homogene Verfahren arbeiten auf allen Knoten nach einem festen Schema und bieten keine Dynamik hinsichtlich Änderungen in den Rahmenbedingungen. Nicht homogene Verfahren bieten die Möglichkeit, ihre Strategien zur Laufzeit an die Situation anzupassen. Dies erfolgt entweder vollkommen dezentral durch lokale Kommunikation oder auch mit Hilfe von Koordinierungsinstanzen mit unterschiedlichen Hierarchieausprägungen. Der Kern eines jeden Verfahrens beschränkt sich dann auf wenige Metriken und Entscheidungsmerkmale. Homogene Verfahren nutzen dann eine feste Konfiguration. Nicht homogene Konzepte binden je nach Situation unterschiedliche oder mehrere Metriken ein.

Selektive Vernetzung

Ein globales Verfahren zur Optimierung der Topologie ist die gezielte, selektive Auswahl optimaler Kommunikationspartner für jeden Knoten unter Beachtung der aktuellen Rahmenbedingungen. Abhängig vom konkreten Anwendungsszenario werden hierbei, wie bereits zuvor in diesem Abschnitt beschrieben, unterschiedliche Auswahlparameter integriert. Da für die Berechnung einer optimalen Vernetzung alle möglichen Varianten unter den Nachbarschaftsknoten hinsichtlich der Kommunikationsgüte getestet werden müssen, steigt der Berechnungs- und Zeitaufwand erheblich an [89, 90]. Weiterhin benötigen die Berechnungen Netzwerkinformationen aus weiten Teilen der Topologie, was sich negativ auf die Netzlast auswirkt.

Einen Kompromiss stellt hierbei das *EOSC-Verfahren*³¹ dar, welches das Grundprinzip der selektiven Vernetzung mit Ansätzen evolutionärer Algorithmen kombiniert [3, 6, 14]. Ziel dabei ist es, eine annähernd global optimale Topologie zu erzielen und dabei den Aufwand hinsichtlich Berechnungs- und Zeitressourcen zu reduzieren.

Ausgangspunkt ist eine zufällig gewählte Vernetzungsvariante innerhalb der gegebenen Rahmenparameter. Anschließend kommen Mechanismen, wie sie in der Natur zu finden sind, zum Einsatz - *Selektion, Mutation* und *Rekombination*. Dabei startet das Verfahren mit zufällig generierten Änderungen in der Vernetzung. Die geänderte Vernetzungsvariante wird getestet und auf Basis einer Fitnessfunktion bewertet. Änderungen mit negativen Auswirkungen auf die Kommunikation werden rückgängig gemacht, Änderungen mit positiven Auswirkungen übernommen. Nach einer vordefinierten Anzahl an Iterationen bzw. erfolglosen Änderungen bricht das Verfahren ab. Die Fitnessfunktion und deren Parameter können an die Applikation angepasst werden. Der EOSC Ansatz optimiert in einem iterativen, stufenweisen Prozess und ähnelt dabei Ansätzen aus dem Bereich *Hardware/Software-Codesign*, wie dem *Kernighan-Lin* Optimierungsverfahren [181], welches bei der Systempartitionierung zum Einsatz kommt.

Im Gegensatz zum ursprünglichen Verfahren der selektiven Vernetzung kann auch durch das EOSC keine global optimale Lösung sichergestellt werden. Jedoch ist die vollständige Erreichbarkeit aller Knoten nach dem Optimierungsvorgang in jedem Fall gewährleistet.

Lokale minimale Spannbäume

Eine einfache, dezentrale und zugleich höchst effiziente Umsetzung einer Topologiekontrolle repräsentiert das *LMST-Verfahren*³² [236]. Konzeptionell bilden minimale Spannbäume die Basis für Optimierungen auf lokaler Ebene. Jeder Knoten berechnet hierbei über die Menge seiner n -Hop Nachbarschaft (n statisch und vordefiniert) einen minimalen *lokalen* Spannbaum. Das Verfahren kann dabei vollständig lokal ($n = 1$) oder als Clusterverfahren ($n > 1$) in entsprechend unterteilten Netzwerktopologien genutzt werden.

Zur Berechnung kommen jeweils bekannten Algorithmen, wie der von *Prim* oder *Kruskal*, zum Einsatz. Dementsprechend kann die Worst-Case Laufzeit auf $O(|V| \cdot \log(|V|) + |E|)$ beschränkt werden ($V \Rightarrow$ Anzahl Knoten, $E \Rightarrow$ Anzahl Kanten). Aufgrund der lokalen Begrenzung des Spannbaums arbeitet das Verfahren auch in großen Topologien effizient [14]. Eine Umsetzung auf ressourcenbeschränkten und eingebetteten Systemen ist problemlos möglich.

Aus den lokalen Optimierungsergebnissen auf Knotenebene leitet sich eine vollständig erreichbare Gesamtopologie auf globaler Ebene ab³³. Dies bedeutet nicht, dass das Gesamtergebnis ein Optimum darstellt, jedoch können mit Hilfe von LMST sehr gute Vorhersagen bezüglich Vernetzungsgrad und Redundanzgrad getroffen werden. Auf lokalen Spannbäumen basieren auch weiterführende Verfahren, so z.B. *FGSS*³⁴ und *FLSS*³⁵ [255].

³¹Evolutionary Optimization Selective Connectivity

³²Local Minimum Spanning Tree

³³unter Voraussetzung, dass die ursprüngliche Topologie ebenfalls erreichbar war

³⁴Fault-tolerant Global Spanning Subgraph

³⁵Fault-tolerant Local Spanning Subgraph

Dynamische Adaption der Sendeleistung

Verfahren zur dynamischen Sendeleistungsanpassung arbeiten in einem anderen Kontext global. Hier steht keine ganzheitliche Informationsbasis über die Topologie zur Verfügung und es ist kein explizites Optimierungsziel definiert. Stattdessen wird ein global gültiger Regelsatz bereitgestellt, der besagt, nach welcher Charakteristik die Knoten in bestimmten Situationen kommunizieren. Somit wird ein optimaler Arbeitsbereich angestrebt, der durch aktive und adaptive Beeinflussung der Knoten zu realisieren ist [313, 314]. Konkret bedeutet dies hier die Festlegung einer Ober- und Untergrenze für die maximale Anzahl möglicher Verbindungspartner pro Knoten. Aus der lokalen Umsetzung dieser Zielstellungen in jedem Knoten ergibt sich eine Gesamttopologie, die nicht global koordiniert wurde.

Das Verfahren beschränkt sich auf eine zyklische und individuelle Prüfung aller aktiven, direkten Verbindungskanäle in jedem Knoten. Wurde der definierte Minimalwert in einem Knoten unterschritten, wird die Sendeleistung entsprechend erhöht. Ist im Gegensatz dazu die obere Schwelle an aktiv gepflegten Verbindungen überschritten, kann die Sendeleistung reduziert werden. Die Kommunikationsreichweite wird somit eingeschränkt, das Energieniveau im Knoten sinkt und die mögliche Systemlaufzeit wird erhöht. Die Rahmenparameter für die Zyklendauer sowie für die Adaptionstufen der Sendeleistung müssen je nach Kommunikationstechnologie, Mobilitätsgrad sowie Topologiegröße applikationsspezifisch angepasst werden.

Die generierte Gesamttopologie muss dabei nicht zwingend die Anforderungen des Nutzers erfüllen. Durch die statische Regelschleife kann auf globaler Ebene keine Erreichbarkeit aller Knoten sichergestellt werden. Isolierte Netzwerkbereiche können auf Basis dieses Verfahrens nicht ausgeschlossen werden. In direkter Konsequenz hat dies auch negative Auswirkungen für bestimmte Vorgaben hinsichtlich Redundanz, welche ebenfalls nicht sicher gewährleistet werden können. Somit ist eine sinnvolle Auswahl der oberen und unteren Schranke entscheidend für die Effizienz des Verfahrens.

Eine mögliche Erweiterung des Verfahrens integriert eine globale Kontrollinstanz, welche gegebene Minimalanforderungen an die Gesamttopologie überwacht. Hierbei könnten die Grenzwerte für die Sendeleistungsanpassung nicht topologieweit einheitlich sondern selektiv und individuell definiert werden. Eine entsprechende Realisierung widerspricht jedoch dem Anspruch geringer Komplexität und einer dezentralen Umsetzung von Topologieoptimierungsverfahren.

Verfahren der Topologiekontrolle und der Topologieoptimierung sind im Kontext drahtloser Sensornetze oder verteilter Sensor-Aktor-Netzwerke bei steigender Systemkomplexität von besonderem Interesse [327]. Hier kommt es speziell bei heterogenen Systemarchitekturen häufig zu negativen Auswirkungen im Kommunikationsverhalten. Hinsichtlich der Energieeffizienz bieten Verfahren der Topologiekontrolle hohes Optimierungspotential.

4.4 Routing

In direktem Zusammenhang mit der Topologieoptimierung steht das *Routing* im Netzwerk, welches konsequent auf der geschaffenen Kommunikationsinfrastruktur arbeitet [268]. Als Routing wird die Menge der Algorithmik zur Wegfindung über eine, gegebenenfalls dynamische, vernetzte Kommunikationsinfrastruktur zusammengefasst [320]. Routing beschreibt folglich alle Vorgänge im Rahmen einer Exploration möglicher Pfade von einer Quelle zu einer Senke durch eine zunächst unbekannte Netzwerktopologie [174]. Jeder dieser Pfade umfasst eine Anzahl von Zwischenstationen (*Hops*), welche die Informationen zielgerichtet weiterleiten.

Darauf aufbauend umschreibt der *Request for Comments (RFC) 1983* [258] den Routing-Prozess von Datenpaketen wie folgt:

”Routing ist der Prozess der Auswahl der richtigen Schnittstelle und des nächsten Hops für Pakete, die weitergeleitet werden sollen.”

Wird für den Routenpfad nur ein Hop benötigt, sprechen wir von *Single-Hop-Routing*. Verfahren, die Pfade über mehrere Zwischenstationen zur Verfügung stellen, repräsentieren ein *Multi-Hop-Routing*.

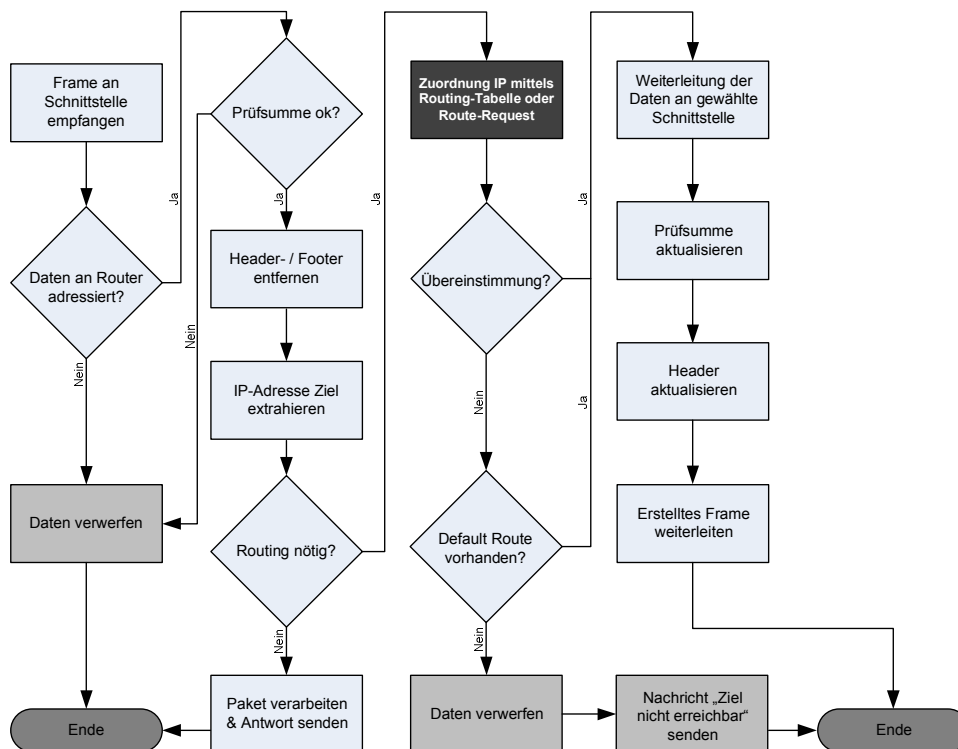


Abbildung 4.6: Verarbeitungsprozess für die gezielte Weiterleitung eines Datenpaketes (Forwarding) innerhalb eines umfassenden Routingvorgangs.

In diesem Zusammenhang ist begrifflich weiterhin zwischen *Routing* und *Forwarding* zu differenzieren. Auch wenn die Begriffe häufig gleichbedeutend verwendet werden, so beschreibt

per Definition Routing den gesamten Prozess der Pfadsuche über mehrere Zwischenstationen hinweg von der Quelle zur einer oder mehreren Senken. Im Gegensatz dazu umfasst Forwarding nur den Weiterleitungsprozess zum nächsten Knoten innerhalb eines Routenpfades über eine definierte Netzwerkschnittstelle [174]. Der prozedurale Ablauf eines zielgerichteten Forwardingprozesses im Rahmen eines Routingvorgangs wird in Abbildung 4.6 verdeutlicht.

In Hinblick auf die hier behandelte Thematik verteilter, eingebetteter wird der Themenkomplex Routing im Rahmen dieser Arbeit eingeschränkt. Die weiteren Ausführungen konzentrieren sich dabei auf *paketorientierte* Verfahren, bei denen ein *Datenpaket* die elementare *Übertragungseinheit* einer definierten Größe darstellt. Auf leitungsorientierte Verfahren, wie sie im klassischen Mobilfunk (GSM, GPRS) zum Einsatz kommen, wird an dieser Stelle nicht näher eingegangen.

Weitere Einschränkungen ergeben sich aus dem hohen Mobilitätsgrad der betrachteten Sensor-Aktor-Systeme, wodurch der Fokus auf hochgradig adaptiven Verfahren liegt [165, 376]. Aus der Mobilität der Knoten resultieren beschränkte Energieressourcen, woraus sich neue Herausforderungen hinsichtlich der Energieeffizienz ergeben. Auch hinsichtlich der Organisationsform existieren deutliche Unterschiede zu traditionellen, zellulären Netzwerken, bei denen zu jedem Zeitpunkt vordefinierte Kommunikationspunkte für jedes mobile Endgerät zur Verfügung stehen.

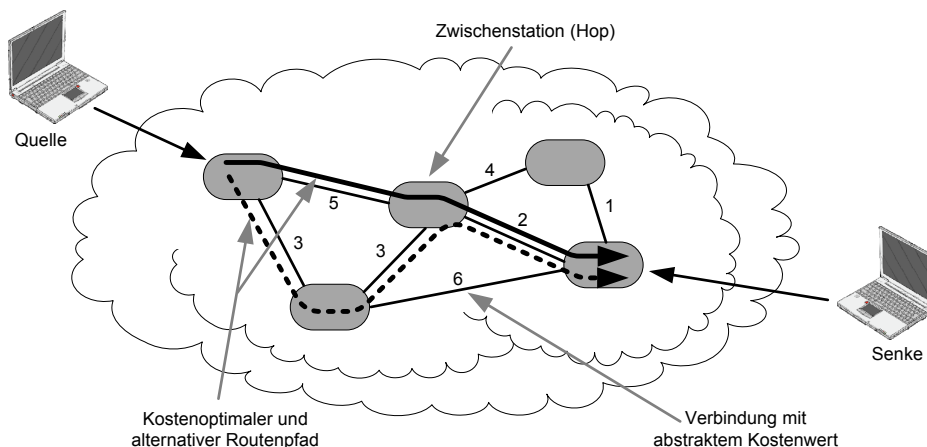


Abbildung 4.7: Beispielhaftes Kommunikationsnetz mit Quell- und Zielknoten sowie einer Netzwerktopologie mit abstrakten Kosten.

Ein beispielhaftes Routingsszenario wird in Abbildung 4.7 illustriert. Es verdeutlicht die Problemstellung anhand mehrerer möglicher Kommunikationspfade durch die Netzwerktopologie, welche je nach gewählter *Metrik* ein Optimum hinsichtlich bestimmter Leistungsparameter darstellen. Ein gegebenes Routingverfahren kann dabei auf Basis unterschiedlicher Eigenschaften qualitativ und in Abhängigkeit vom jeweiligen Anwendungsszenario bewertet werden:

Antwortzeit / Routenberechnungsdauer:

Benötigte Zeit für die Suche und Berechnung eines Routenpfades von der Quelle zur Senke nach einer gegebenen Metrik.

Ende-zu-Ende Latenz:

Übertragungsdauer eines Datenpaketes von der Quelle zur Senke über einen berechneten Routenpfad.

Ressourcenbelastung:

Gebundene Speicher und CPU Ressourcen für die Routenberechnung und Routenpflege.

Skalierbarkeit / Adaptivität:

Anwendbarkeit bei unterschiedlichen Topologiegrößen und veränderlichen Rahmenbedingungen.

Datendurchsatz:

Nutzbare Datenrate in Bits pro Sekunde.

Paketverlustrate / Pfadstabilität:

Prozentualer Anteil verlorengangener Datenpakete.

Dauer Routenrekonstruktion:

Zeit zwischen Erkennung einer Störung auf einem Routenpfad und der Bereitstellung einer Alternativroute (unter der Voraussetzung existierender Alternativrouten).

Die Eigenschaften repräsentieren folglich zentrale Indikatoren für die Leistungsfähigkeit eines gegebenen Routingverfahrens und charakterisieren das Verhalten des Algorithmus auf mögliche Ereignisse in der Topologie. Die Übersicht ist dabei nicht mit der verwendeten Metrik gleichzusetzen, welche den funktionalen Kern eines jeden Routingverfahrens bildet. Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Metrik wie folgt definiert [8]:

”Im Kontext von Routing in der Netzwerkkommunikation beschreibt eine Metrik die Qualität eines Routenpfades hinsichtlich ausgewählter Faktoren. Die Ergebnisse entsprechen numerischen Werten, welche auf einfache Weise verglichen werden können und eine Priorisierung nach der Pfadgüte ermöglichen.”

Eine gegebene Routen-Metrik wirkt sich auf die Eigenschaften des Routingverfahrens aus und beeinflusst dessen Ergebnisse. Dabei sind *statische* und *dynamische* Metriken zu unterscheiden. Während statische Metriken nur einmal die Güte eines Pfades errechnen, passen dynamische Verfahren ihre Werte situationsbedingt oder periodisch über die Zeit an. Eine weitere Unterscheidung besteht in *symmetrischen* und *asymmetrischen* Verfahren. Symmetrische Verfahren setzen hierbei gleiche Bedingungen in beide Kommunikationsrichtungen voraus. Asymmetrische Metriken berechnen separate Gütewerte für jede Richtung, wodurch sich diese deutlich besser an reale Rahmenbedingungen im Bereich der drahtlosen Kommunikation anpassen. Auch die Anzahl integrierter Bewertungsfaktoren ermöglicht eine Unterscheidung in *eindimensionale* und *mehrdimensionale* Metriken. Wesentliche Faktoren, die innerhalb einer Metrik die Güte eines Routenpfades berechnen [47, 48], umfassen unter anderem:

4 Netzwerkmanagement

	Additiv	Multiplikativ	Konkav
Datendurchsatz			x
Latenz / Verzögerung	x		x
Anzahl benötigter Hops (Hop Count)	x		
Zuverlässigkeit		x	x
Auslastung bzw. Lastverteilung		x	x
Mobilität	x		x
Topologie (Distanz, Anzahl Nachbarn)	x		x
Ressourcen (Energie, Kosten)	x		x

Tabelle 4.2: Bewertungsfaktoren für Metriken und deren Einordnung hinsichtlich der genutzten Berechnungsvorschrift.

Die Tabelle 4.2 zeigt neben den einzelnen Bewertungskriterien auch die Einordnung in die jeweils genutzte Berechnungsvorschrift. *Additive* Verfahren summieren dazu die Werte von jeder Zwischenstation des Routenpfades auf und geben den Gesamtwert zurück. Im Gegensatz dazu kommen *multiplikative* Verfahren zum Einsatz, wenn Einzelwahrscheinlichkeiten auf dem Routenpfad die Bewertungsgrundlage bilden und diese zur Ermittlung der Gesamtwahrscheinlichkeit multipliziert werden müssen. Andere Faktoren wie beispielsweise der Datendurchsatz suchen nach kritischen Kommunikationskanälen auf dem Routenpfad, die einen Flaschenhals repräsentieren. Die erforderlichen *konkaven* Berechnungsvorschriften identifizieren aus einer Menge von Einzelwerten entsprechend das Minimum oder Maximum [72].

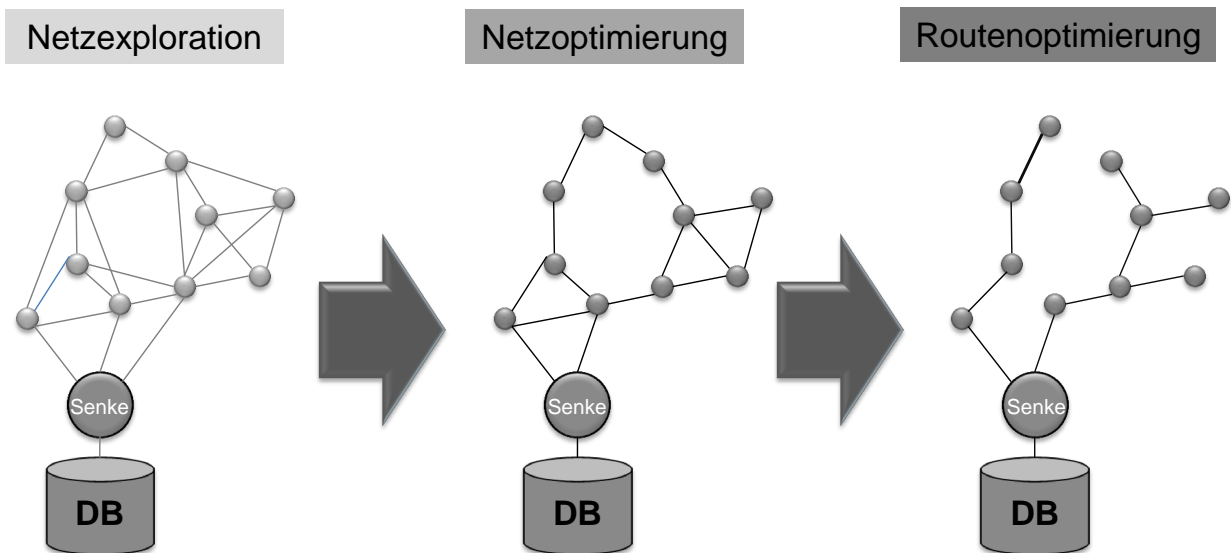


Abbildung 4.8: Umsetzung unterschiedlicher Netzoptimierungsphasen im Rahmen einer klassischen WSN Applikation. Nach einer initialen *Netzexploration* erfolgt eine erste Optimierung der Topologie hinsichtlich des Vernetzungsgrades (auf Layer 2). Im Rahmen der Wegfindung auf Layer 3 erfolgt eine weitere anwendungsspezifische Optimierung der Routingpfade.

Eine Abbildung jeder Metrik auf jedes beliebige Routingverfahren ist dabei nicht gewährleistet, da der Zugriff auf alle für die Metrik relevanten Informationen nicht auf jedem System

sichergestellt werden kann. Klassische Verfahren arbeiten auf der Vermittlungsschicht und verfügen nur über begrenzte Informationen. Immer mehr Ansätze nutzen jedoch im *Cross-Layer* Bereich mehrdimensionale Metriken, die aus den einzelnen Protokollebenen unterschiedliche Informationen, sowohl netzwerk- als auch hardware- und anwendungsseitig, verarbeiten.

Das Zusammenspiel zwischen Topologiemanagement und Verfahren des Routings wird in 4.8 verdeutlicht. So sind grundsätzlich drei Phasen zu unterscheiden. Zunächst startet die Applikation initial mit einer Netzexploration, in der der Gesamtumfang einer gegebenen Topologie ermittelt wird. Anschließend erfolgt durch die Topologieoptimierung eine Reduktion des Vernetzungsgrades unter Beachtung geforderter Rahmenbedingungen durch die Applikation. Auf Basis dieser optimierten Struktur greifen in dritter Instanz die Optimierungsverfahren der Wegfindung, welche innerhalb der Netzinfrastruktur situationsabhängig effiziente Wege bezüglich einer gewählten Metrik errechnen.

4.4.1 Broadcast Storms

Die Suche nach möglichen Kommunikationspfaden in einer unbekanntem Topologie führt kurzzeitig zu einer erhöhten Netzlast in Folge der ausgesendeten *Broadcast-Pakete*. Bei der drahtlosen Kommunikation über das Medium Luft ist diese Situation kritisch, da mehrere parallele Übertragungen zu Störungen in Folge von Interferenzen führen können. *Broadcast Storms* resultieren vorrangig aus den *Flooding*-Mechanismen unterschiedlicher Protokolle [283]. Abbildung 4.9 veranschaulicht ein solches Szenario beispielhaft. Die jeweiligen Knoten senden mit voller Leistung Benachrichtigungspakete, um alle verfügbaren Nachbarschaftsknoten zu erreichen. Alle Empfänger leiten diese Pakete unmittelbar weiter, um so möglichst schnell die gesamte Topologie zu explorieren. Ohne entsprechende Gegenmaßnahmen kommt es dabei nach dem Schneeball-Prinzip zu einer rasanten Vervielfältigung der Daten auf dem Medium, was in weiten Teilen der Topologie unzählige Überlagerungen von Signalen hervorruft. Das erhöhte Interferenzniveau wirkt sich negativ auf das Kommunikationsverhalten aus und kann zu partiellen Netzwerkausfällen führen.

Um solche negativen Störeinflüsse zu vermeiden, beinhalten Routingverfahren, die für den Einsatz in drahtlosen, hochdynamischen Netzwerkstrukturen konzipiert sind, effiziente Lösungsstrategien. Dazu werden die Broadcast-Mechanismen im Rahmen der Informationsverteilung modifiziert [194, 377]. Effiziente und leicht zu implementierende Verfahren sind hier z.B. *Jitter / Random Assessment Delay*, bei dem die Weiterleitung jedes Broadcast-Paketes im Bereich einiger Millisekunden zufällig verzögert wird und so Kollisionen auf dem Medium reduziert werden. Durch die Vermeidung von Übertragungsspitzen sinken die Latenzen sowie das Interferenzniveau im Netzwerk deutlich.

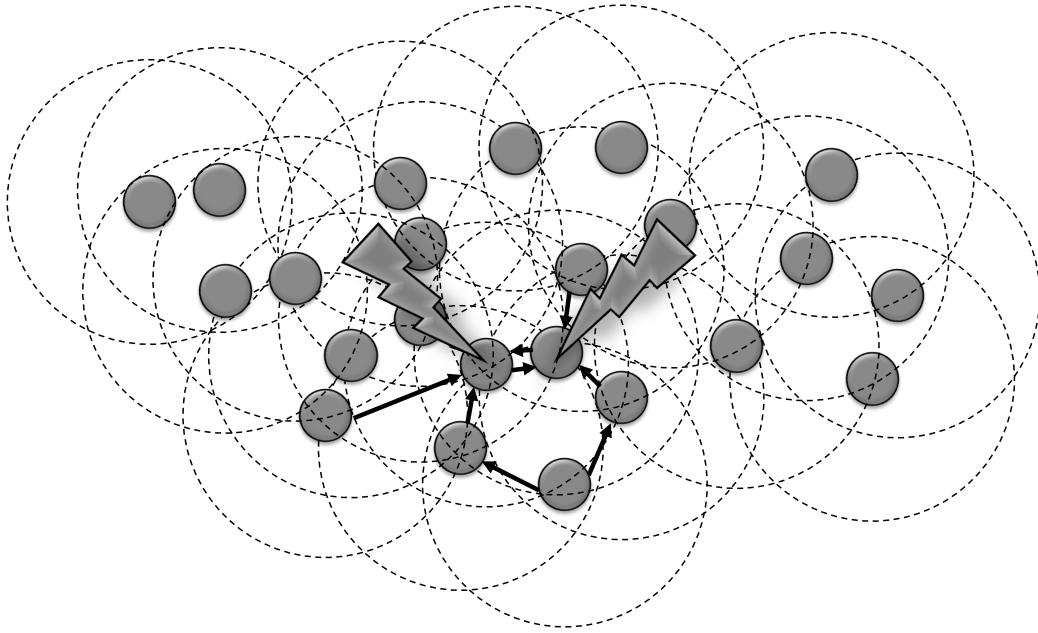


Abbildung 4.9: Broadcast Storm Szenario durch *Flooding* - Die sofortige Weiterleitung von Broadcast-Paketen in allen Empfängerknoten resultiert in unzähligen simultanen Übertragungen, die sich gegenseitig beeinflussen und teils erhebliche Störungen in der Kommunikation hervorrufen können.

Counter-based Retransmission Schemes sind einfache, zählerbasierte Verfahren, bei denen die Häufigkeit der Paketweiterleitungen analysiert wird. Ein Broadcast-Paket mit seiner eindeutigen ID wird dabei nur einmal weitergeleitet, wodurch Broadcast-Stürme weitestgehend vermieden werden können. Andere Verfahren verwerfen eingehende Broadcast-Pakete mit einer vordefinierten Wahrscheinlichkeit. Durch solche probabilistischen Ansätze ist das Verhalten jedoch kaum planbar, wodurch ein Einsatz nur bedingt sinnvoll erscheint.

4.4.2 Klassifizierung

Nachdem die Thematik Routing vorgestellt und Qualitätsparameter diskutiert wurden, stehen im Folgenden konkrete Routingansätze und deren Umsetzung in Form von Algorithmen im Vordergrund. Diese werden hinsichtlich zentraler Merkmale klassifiziert und verglichen. Ziel hierbei ist die Ausarbeitung einer Organisationsstruktur für die Vielzahl aktuell entwickelter Routingansätze. Je nach konkretem Anwendungsfokus sind unterschiedliche Qualitätsparameter, wie beispielsweise Latenz, Speicher- oder Energiebedarf, von besonderem Interesse. Im Kontext energieeffizienter, verteilter Sensor-Aktor-Systeme ist auch der jeweilige Protokoll-Overhead und die generierte Netzlast von großer Bedeutung. Die jeweiligen Kompromisse zwischen den einzelnen Qualitätskriterien müssen anwendungsspezifisch und individuell getroffen werden. Abbildung 4.10 zeigt hierzu einen solchen Kompromiss am Beispiel der beiden Parameter Latenz und Energiebedarf.

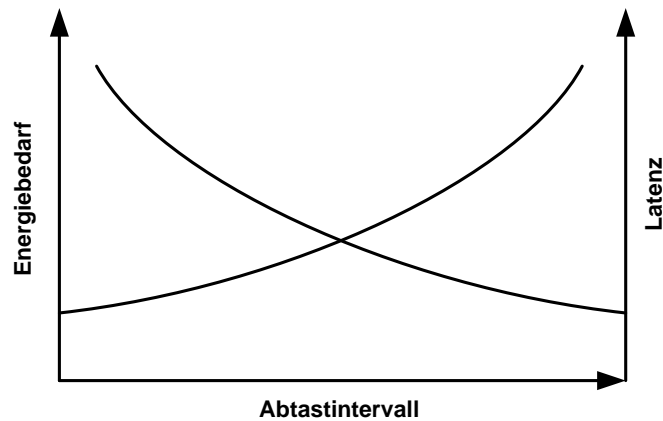


Abbildung 4.10: Eine zentrale Herausforderung im Bereich Routing in eingebetteten, ressourcenbeschränkten Systemen: Kompromisse zwischen dem für das Routing benötigtem Energiebedarf und den realisierbaren Übertragungslatenzen.

Soll eine Struktur zur Klassifizierungen von Routingprotokollen erarbeitet werden, so müssen zunächst alle relevanten Kriterien identifiziert werden. Durch die teils sehr speziellen Ausprägungen der Verfahren, erscheint eine Einordnung in primäre Eigenschaftsmerkmale sinnvoll.

Hierarchie:

Flaches Routing ↔ Hierarchisches Routing

Adressierung:

Unicast-Routing, Multicast-Routing, Broadcast- sowie Anycast-Mechanismen

Routenselektion:

Single-Path-Routing ↔ Multi-Path-Routing

Ausbreitung / Sicherheit:

Interne Routingprotokolle ↔ Externe Routingprotokolle

Wissensbasis

Level-3 Routingprotokolle ↔ Cross-Layer Routingprotokolle

Positiondaten:

topologiebasiertes Routing ↔ geographisches Routing

Routenausrichtung:

datenzentrisches Routing ↔ adresszentrisches Routing

Zielauswahl:

Source-Routing ↔ Hop-by-Hop-Routing

Energieeffizienz:

Minimierung des lokalen Energiebedarfs auf Paket-/ Knotenebene ↔ Minimierung des globalen Energiebedarfs auf Netzwerkebene ↔ Balancierung des globalen Energieniveaus auf Netzwerkebene

Informationsverteilung:

Distanzvektor-Routing ↔ *Link-State-Routing*

Informationsgewinnung:

Reaktives Routing ↔ *Proaktives Routing*

Eines der wichtigsten Unterscheidungsmerkmale ist in diesem Zusammenhang die *Informationsgewinnung*. Dieses Merkmal hat hierbei sehr hohen Einfluss auf das Kommunikationsverhalten und die spätere Energieeffizienz des Gesamtsystems [415]. *Proaktive Verfahren* pflegen dabei eine stets aktuelle Routingtabelle und werden daher als (*table-driven*) bezeichnet. Es wird dabei eine *ORA-Strategie*³⁶ verfolgt. Konkret bedeutet dies, dass für jede in der Topologie mögliche Kommunikation zwischen zwei Knoten zu jedem Zeitpunkt eine gültige und zu diesen Zeitpunkt optimale Route verfügbar ist. Daraus resultieren hervorragende Eigenschaften bezüglich der Antwortzeiten. Übertragungslatenzen in Folge von Routingaktivitäten werden durch diese Strategie minimiert. Gleichzeitig hat dies aber auch eine kontinuierliche Aktualisierung aller Routinginformationen zur Folge, wobei das Aktualisierungsintervall stark von den jeweiligen Rahmenbedingungen abhängt. In dynamischen Netzwerkinfrastrukturen wird ein entsprechend kurzes Intervall benötigt. Dies kann wiederum zu Lastspitzen bei der Übertragung führen. Grund hierfür ist die große Menge an Statuspaketen, die für die Routenpflege generiert werden müssen. Folglich kommen proaktive Routingverfahren nur bei überschaubaren Topologiegrößen zum Einsatz. Die schlechte Skalierbarkeit derartiger Verfahren repräsentiert eine zentrale Schwachstelle. Wichtige Vertreter sind hier unter anderem *OLSR*³⁷ [115], *LRR*³⁸ sowie *DSDV*³⁹ [292] und *WRP*⁴⁰ [374].

Reaktive Routingverfahren arbeiten mit einer gegensätzlichen Strategie und berechnen Kommunikationspfade erst bei Bedarf (*on-demand*). Die Klasse von *on-demand* Routing Protokollen verwendet häufig einen sogenannten *LORA-Ansatz*⁴¹ [374]. Dies bedeutet, dass eine effiziente Route errechnet und daraufhin weiter gepflegt wird, auch wenn diese zwischenzeitlich durch Topologieänderungen nicht mehr optimal ist. Diese Arbeitsweise stützt sich auf die Annahme, dass bei zunehmend großen bzw. hochgradig mobilen Topologien ein erheblicher Aufwand an Ressourcen und Zeit für die Pflege aller Routenpfade gebunden wird. Während bei kleinen Szenarien mit geringer Knotendynamik die Vorteile einer stets gepflegten Routingtabelle überwiegen, verschieben sich ab einem bestimmten Skalierungsgrad diese Relationen zwischen Nutzen und Aufwand. Reaktive Routingverfahren bieten somit einen anders gewichteten Kompromiss zwischen Energieeffizienz und Antwortzeiten [68, 416]. Sie skalieren im Allgemeinen besser als proaktive Ansätze, bringen aufgrund des reaktiven Charakters jedoch höhere Latenzen mit sich.

Zur Pfadsuche kommen häufig triviale Flooding-Mechanismen zum Einsatz. Jedoch benötigen diese sehr viel Energieressourcen und die Broadcast-Pakete verursachen eine

³⁶Optimum Routing Approach

³⁷Optimized Link State Routing

³⁸Link Reversal Routing

³⁹Destination-Sequenced Distance-Vector

⁴⁰Wireless Routing Protocol

⁴¹Least Overhead Routing Approach

erhebliche Netzlast (siehe Abschnitt 4.4.1). Um diese Nachteile zu minimieren, werden temporäre Zwischenspeicher implementiert, welche gefundene Routenpfade für einen definierten Zeitraum vorhalten. Durch diese Pufferung, auch als *Caching* bezeichnet, können unter realen Rahmenbedingungen viele erneute Routenanfragen zwischen gleichen Kommunikationspartnern vermieden werden. Der Protokoll-overhead reduziert sich deutlich und die durchschnittliche Übertragungslatenz sinkt. Gleichzeitig bleiben die Vorteile eines reaktiven Verfahrens erhalten. Im Gegenzug dazu muss im Extremfall mit einer erhöhten Paketverlustrate gerechnet werden, falls zwischengespeicherte und noch als gültig markierte Routenpfade aufgrund von Topologieänderungen nicht mehr verfügbar sind. Folglich muss dann eine erneute Routenanfrage initialisiert werden, was zu nochmals erhöhten Antwortzeiten führt. Im Bereich reaktiver Routingprotokolle sind unter anderem *AODV*⁴² [104] und *DSR*⁴³ [57] von großer Relevanz, da diese bereits in unterschiedlichsten Anwendungen zum Einsatz kommen.

Abbildung 4.11 vergleicht nachfolgend vier Routingalgorithmen, jeweils zwei proaktive und zwei reaktive Ansätze, hinsichtlich wesentlicher Eigenschaften und Parameter.

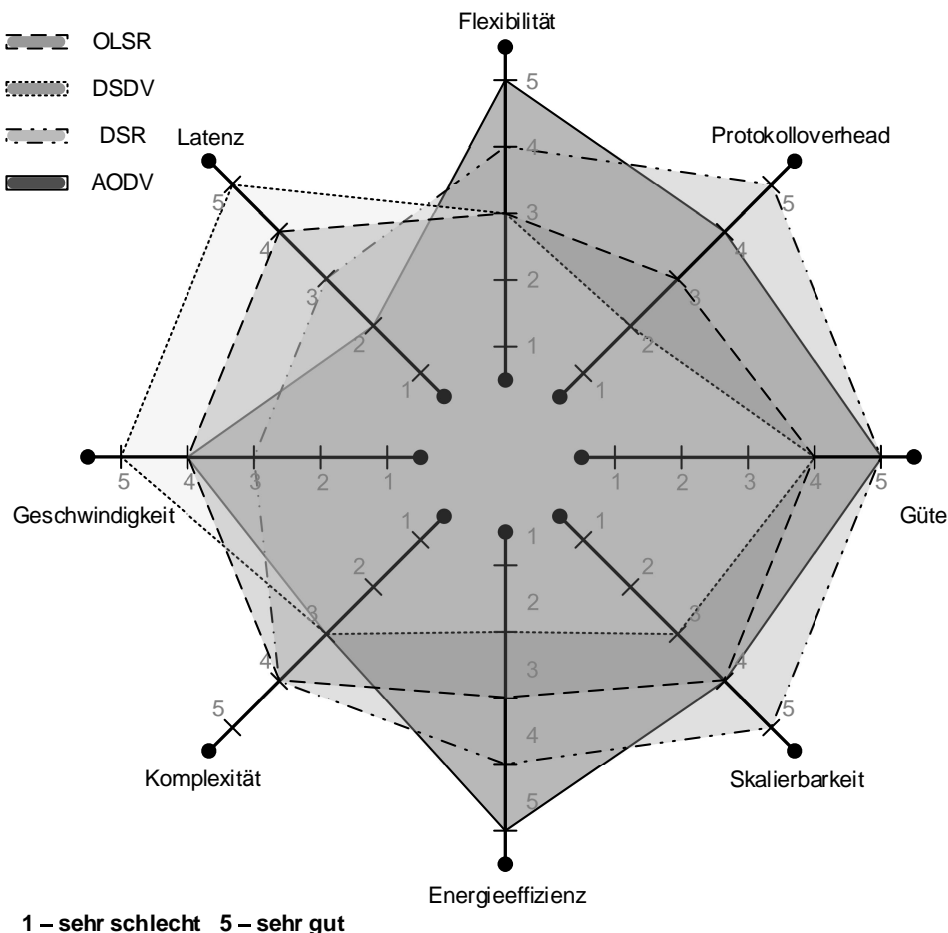


Abbildung 4.11: Einige wichtige Routingverfahren im direkten Vergleich. Die anwendungsspezifischen Vor- und Nachteile hinsichtlich der verschiedenen Parameter sind deutlich erkennbar. Somit werden je nach Einsatzbereich unterschiedliche Verfahren präferiert.

⁴²Ad-hoc On-Demand Distance Vector

⁴³Dynamic Source Routing

Aus dem Netzdiagramm wird sichtbar, dass je nach Anwendungsszenario und Rahmenbedingungen unterschiedliche Routingverfahren geeignet sind. In der Betrachtung fehlt dabei das ZRP⁴⁴ [178]. Es nimmt an dieser Stelle eine Sonderstellung ein und repräsentiert ein hybrides Routingverfahren, welches die Vorteile reaktiver und proaktiver Verfahren kombiniert. Das Protokoll verwaltet in einer definierten n Hop Nachbarschaftszone proaktiv eine Routingtabelle. Außerhalb der Zone wird dann reaktiv geroutet, was den administrativen Aufwand beschränkt. ZRP bietet somit einen guten Kompromiss zwischen Skalierbarkeit, Latenz und Protokoll-overhead. Auch STAR⁴⁵ [164] ist ein hybrides Verfahren, das auf Basis von Routentabellen arbeitet, jedoch eine LORA Strategie verwendet, wie sie sonst bei reaktiven Routingverfahren Anwendung findet. TORA⁴⁶ [290] nimmt ebenfalls eine Sonderstellung ein. Das Verfahren kann sowohl im Bereich Routing als auch in den Optimierungsbereich der Topologiekontrolle eingeordnet werden, da die Ergebnisse von Verarbeitungsprozessen auf Routingebene für Aktionen der Topologieanpassung genutzt werden.

ABR⁴⁷ [273, 373] sei an dieser Stelle ebenfalls explizit erwähnt, da es im Gegensatz zu vielen klassischen Verfahren die spezifischen Eigenschaften mobiler Knotentopologien berücksichtigt. So wird bei ABR nicht die Hop-Anzahl zur Bestimmung der Pfadgüte genutzt, sondern der Konnektivitätsgrad der einzelnen Knoten. Dieser beschreibt die Anzahl und die Qualität der direkten Nachbarschaftsbeziehungen eines Knoten. Für die Berechnung stabiler Routenpfade, die auch in mobilen Netzwerkstrukturen mit hoher Wahrscheinlichkeit über einen langen Zeitraum zuverlässig genutzt werden können, ist der Konnektivitätsgrad wiederum ein hervorragender Indikator. ABR nutzt diese Indikatoren und ermöglicht dadurch eine effiziente und stabile Kommunikation im Netzwerk.

Viele der genannten Routingprotokolle können auch hinsichtlich anderer Merkmale klassifiziert werden. Betrachtet man hier beispielsweise eine Klassifizierung nach dem Merkmal der *Informationsverteilung*, so arbeiten *Link-State* Routingverfahren nach einem Prinzip des globalen Wissenstransfers. Jeder Knoten streut seine aktuelle Wissensbasis mit allen Pfadinformationen bezüglich der umliegenden Topologie komplett an seine Nachbarschaft. In Folge dessen ist es jedem Knoten nach einem gewissen Zeitraum möglich, die ganzheitliche Topologie zu rekonstruieren und effiziente Pfade zu berechnen. Veränderungen werden aktiv kommuniziert und kontinuierlich verarbeitet. Bei einer gebündelten, zyklischen Informationsvermittlung ist die zusätzliche Netzlast zu beachten. Zusätzlich stellt der Aufwand für die Pflege der Topologieinformationen einen kritischen Flaschenhals dar. OSPF⁴⁸ ist hierbei ein bekannter Vertreter.

Im Gegensatz dazu beschränken sich *Distanzvektor-Verfahren*, wie z.B. RIP⁴⁹ [184], welches 1969 als Teil des dezentralen Forschungsnetzes ARPANET⁵⁰ [130] entwickelt wurde, auf einen lokalen Informationsaustausch. Die Protokolle sind daher im Allgemeinen von geringerer

⁴⁴Zone Routing Protocol

⁴⁵Source Tree Adaptive Routing

⁴⁶Temporally Ordered Routing Algorithm

⁴⁷Associativity-Based Routing

⁴⁸Open Shortest Path First

⁴⁹Routing Information Protocol

⁵⁰Advanced Research Projects Agency Network

Komplexität als *Link-State* Ansätze. *BGP*⁵¹ [317], ein weiteres sehr bekanntes Distanzvektor-Routingverfahren, gewährleistet hier im Gegensatz zu RIP eine schleifenfreie Pfadsuche.

Die lokale Informationsbasis von Distanzvektorverfahren umfasst ausschließlich Weiterleitungsregeln an die jeweiligen Nachbarschaftsknoten in Abhängigkeit vom jeweiligen Zielknoten. Im Falle von RIP basieren die Distanzwerte auf einem einfachen Distanzvektoralgorithmus nach *Bellman-Ford* [76] und die Metrik bewertet Pfade anhand der Anzahl nötiger Hops von der Quelle zur Senke. In einer entsprechenden Kosten- bzw. Fitnessfunktion fließen diese Werte ein und eine Güte wird errechnet. Das Ergebnis stellt eine Distanz-Kosten-Matrix dar, welche lokal gespeichert und gepflegt wird. Zusätzlich können auch weitere Parameter in die Metrik integriert werden. Dies umfasst alle Rahmeninformationen, die Rückschlüsse auf die aktuelle Netzwerksituation ermöglichen, so unter anderem Datendurchsatzwerte oder Verzögerungszeiten. Die zu integrierenden Informationen müssen jedoch in jedem Fall für die Entscheidungslogik auf Netzwerkebene (Layer 3) zugänglich sein, was in konkreten Realisierungen teils nicht möglich ist.

Eine weiteres Klassifizierungsmerkmal ist die *Zielauswahl* und damit einhergehend die Unterscheidung zwischen *Source-Routing* und *Hop-zu-Hop-Routing*. Bei der ersten Variante stellt das Routingprotokoll bei einer Routenanfrage einen vollständigen Pfad zur Verfügung, der im Header der nachfolgenden Datenpakete hinterlegt wird. Die einzelnen Einträge der Routenabfolge müssen somit nur schrittweise abgearbeitet werden. Alle Weiterleitungsaktionen sind implizit enthalten. Dies macht derartige Protokolle sehr anfällig für nachträgliche Manipulationen und ab einer gewissen Skalierungsstufe können nicht alle Pfadinformationen in die Paketheader integriert werden. Die direkte Abhängigkeit zwischen Protokolloverhead und Topologiegröße repräsentiert einen wesentlichen Nachteil dieser Protokollgruppe.

Hop-zu-Hop-Routingprotokolle kommunizieren ausschließlich Weiterleitungsregeln für die nächste Zwischenstation auf dem Weg zum Ziel. Folglich ist der Platzbedarf für Routinginformationen in den Datenpaketen konstant und unabhängig vom Skalierungsgrad. In jeder Zwischenstation wird anschließend die Weiterleitung neu ausgehandelt. Dadurch ergeben sich höhere Latenzwerte aber auch eine deutlich bessere Anpassungsfähigkeit bei Änderungen in der Topologie, was besonders in hochgradig dynamischen Netzwerkszenarien von hoher Relevanz ist.

Beim Unterschied zwischen *datenzentrischen* und *adresszentrischen* Routingansätzen tritt das Anwendungsszenario in den Vordergrund. In klassischen Sensornetzwerken werden die Messdaten zu vordefinierten Datensenzen übertragen und auf dem Weg häufig vorverarbeitet. Für das Zusammenfassen bzw. Verschmelzen von Sensordaten haben die Kommunikationspfade Einfluss auf die Datenverarbeitung und die zu übertragende Datenmenge. Hier werden datenzentrische Routingverfahren gewählt. In mobilen Ad Hoc Netzwerkszenarien mit häufig wechselnden Kommunikationspartnern kommen bevorzugt adresszentrische Verfahren zum Einsatz, die Routenpfade auf Basis hop-optimierter oder energie-optimierter Metriken berechnen. Abbildung 4.12 verdeutlicht den Unterschied.

⁵¹Border Gateway Protocol

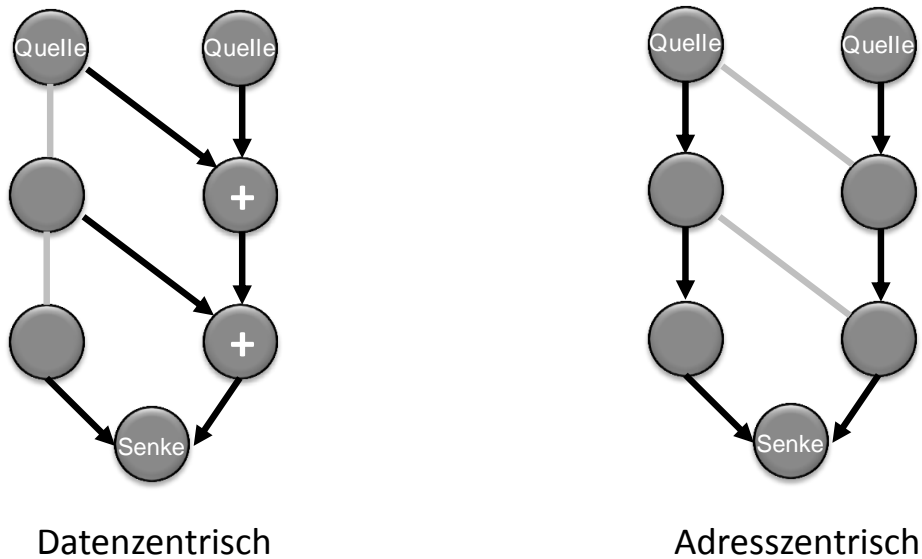


Abbildung 4.12: Vergleich datenzentrischer und adresszentrischer Routingverfahren. Während bei adresszentrischen Verfahren kürzeste und effiziente Pfade bevorzugt werden, nutzen datenzentrische Verfahren unter Umständen auch längere oder energetisch ungünstige Pfade, um beispielsweise im Rahmen von Datenaggregations- oder Datenfusionsverfahren die Daten vorzuverarbeiten und das zu übertragende Datenvolumen zu verringern.

Auf die Besonderheiten weiterer Routingkategorien hinsichtlich Funktionsweise und Einsatzmöglichkeiten wird nun separat eingegangen.

4.4.3 Geo-Routing

Mehrere Verfahren im Bereich des Routings in mobilen Kommunikationsinfrastrukturen nutzen Informationen bezüglich der räumlichen Verteilung einzelner Elemente für die gezielte Verarbeitung von Routinganfragen und Weiterleitungsaufgaben [284, 285]. Folglich erfordern derartige *geobasierte Routingverfahren* absolute oder auch relative Positionsdaten aus der Topologie (siehe Abbildung 4.13). Zum Einsatz kommen dabei Trackingsysteme, die Positionsinformationen aus Inertialmessungen⁵² oder satellitengestützten Geodaten errechnen.

Auch ohne dedizierte Lokalisierungskomponenten ist möglich, auf Basis kontinuierlicher Netzwerkkommunikation Rückschlüsse auf relative Positionen der Knoten bezüglich ihrer Nachbarschaft zu berechnen. Diese eingeschränkte Wissensbasis ist häufig ausreichend, um Kommunikationspfade effizienter zu gestalten [167, 203]. Mit steigendem Mobilitätsgrad wird die Berechnung von Lokalisierungsinformationen zunehmend komplex [132, 337]. Somit ist anwendungsspezifisch abzuwägen, in wie weit die Verfügbarkeit von Geodaten notwendig und sinnvoll erscheint. Die für Geodaten benötigten Verfahren zur absoluten und relativen Positionsbestimmung können zur Optimierung auf unterschiedlichen Protokollebenen verwendet werden. Daher werden diese in einem späteren Abschnitt (4.7) separat vorgestellt und diskutiert.

⁵²bestehend aus Informationen bezüglich Beschleunigung auf jeder Achse, Ausrichtung und Geschwindigkeit

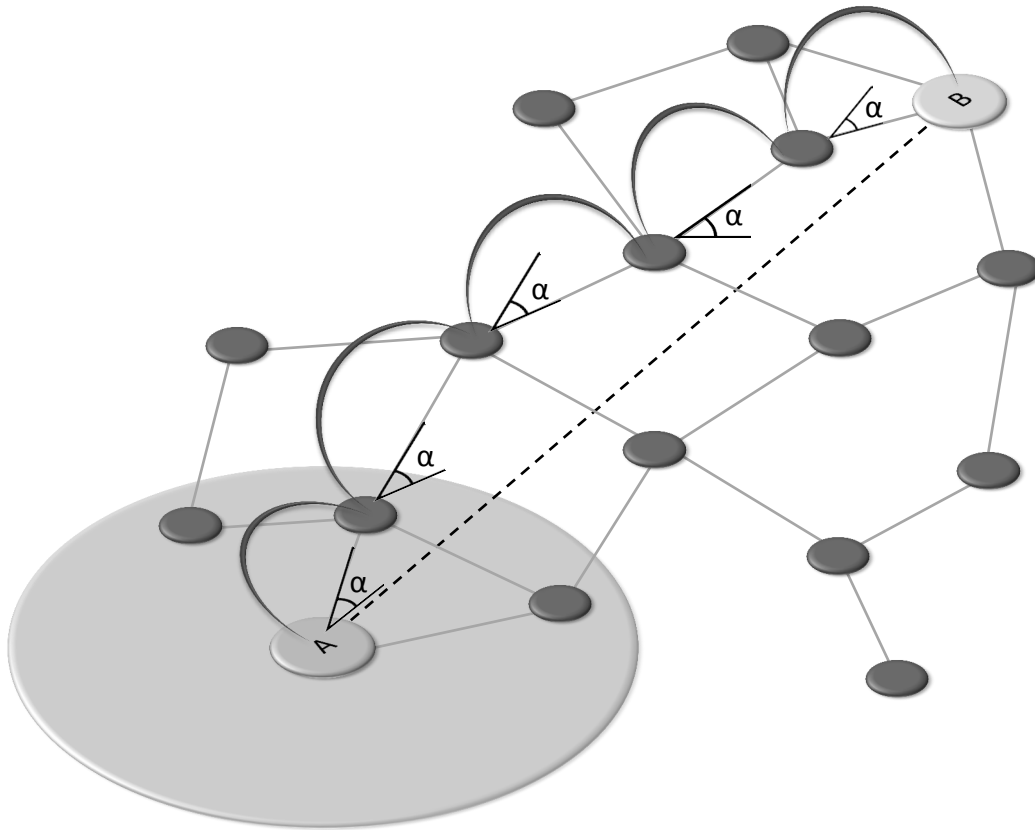


Abbildung 4.13: Beispiel für die auf Geodaten basierte, gezielte Weiterleitung von Daten.

Unter dem Titel *LAR*⁵³ [226] werden in der Literatur unterschiedliche Algorithmen vorgestellt, welche die Möglichkeiten verfügbarer Geodaten effizient nutzen. Der Fokus liegt hier besonders auf der Minimierung des Protokolloverheads in mobilen und großflächigen Netzwerktopologien [225, 280].

Im Bereich der Geo-Routing-Verfahren ist speziell *GPSR*⁵⁴ [217] zu nennen. Das Verfahren sendet Datenpakete nicht an Knoten-IDs bzw. Adressen, sondern an Geo-Koordinaten oder abstrakte Positionsangaben. Der Algorithmus arbeitet dabei in zwei Betriebsmodi. Im *Greedy-Modus* werden Datenpakete zielgerichtet und richtungsbasiert zum Empfänger geleitet. Wie in Abbildung 4.14 dargestellt, ist dies auf Basis von Geodaten leicht realisierbar. Im *Perimeter-Modus* wird die Umgebung kreisförmig abgesucht. Als nächste Zwischenstation für die Datenübertragung wird derjenige Nachbarschaftsknoten gewählt, bei dem die Winkelabweichung zwischen Vektor *aktueller Knoten - Zielknoten* und Vektor *aktueller Knoten - Nachbarschaftsknoten* am geringsten ausfällt. GPSR kann in klassischen Netzwerktopologien eine Kreisfreiheit nicht ausschließen, da hierfür *planare Graphen* vorausgesetzt werden müssen. Bei planaren Strukturen ergeben sich unter der Menge verfügbarer Kanten (Verbindungskanäle) keine räumlichen Überschneidungen. Dies ist in mobilen Strukturen jedoch nur durch angepasste Topologieoptimierungsverfahren realisierbar.

⁵³Location-Aided Routing

⁵⁴Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Networks

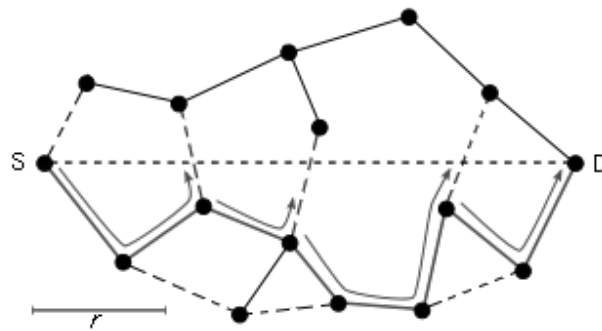


Abbildung 4.14: Anwendungsbeispiel für das GPSR Verfahren im Greedy-Modus.

Im Jahr 2001 präsentierte Yu et. al. mit *GEAR*⁵⁵ [255] ein weiteres, sehr interessantes Geo-Routing Verfahren, welches speziell zur Minimierung des Energiebedarfs konzipiert wurde. Bei der Pfadsuche integriert GEAR Metainformationen in Form virtueller Quadranten in die Routingpakete und nutzt diese zur effizienten Weiterleitung in Richtung Ziel. GEAR arbeitet in zwei Phasen. Nachdem mittels *Location-based Routing* die Zielregion erreicht wurde, greift anschließend ein *Recursive Geographic Routing*, bei dem davon ausgegangen wird, dass innerhalb der gefundenen Region der Zielknoten bekannt ist und Pfadinformationen in den umliegenden Knoten vorliegen. Ist dies nicht der Fall, wird mittels Flooding versucht, den Zielknoten zu erreichen.

4.4.4 Multipath-Routing

Klassische Routingprotokolle übertragen Datenpakete eines Datenstroms über genau einen gewählten Routenpfad, der sich im Laufe der Kommunikation situationsabhängig ändern kann. Derartige *Single-Path*-Verfahren berechnen folglich einen optimalen Pfad von der Quelle zur Senke. Im Gegensatz dazu verfolgen *Multi-Path*-Protokolle eine andere Strategie [162, 163, 277]. Im Zuge der Pfadevaluierung wird nicht nur die beste Route vorgehalten, sondern mehrere Pfade, welche sich unter idealen Bedingungen nicht gegenseitig stören. Abbildung 4.15 zeigt ein solches Multipath-Routing-Szenario

*LMR*⁵⁶ [193] ist beispielsweise ein solches Multipath Protokoll, welches die Datenlast bei Bedarf auf die verfügbaren Routenpfade verteilt. Da hierbei das zeitliche Verhalten der einzelnen Datenpakete je Routenpfad stark variiert, muss im Zielknoten sichergestellt werden, dass sich der ursprüngliche Datenstrom in der korrekten Reihenfolge wieder zusammenfügen lässt [272, 385]. Entsprechende Transportprotokolle übernehmen diese Aufgabe und werden im weiteren Verlauf dieses Kapitels noch näher betrachtet.

⁵⁵Geographical and Energy Aware Routing

⁵⁶Label-based Multipath Routing

Auf globaler Ebene kann durch Multipathrouten durchaus ein Vorteil hinsichtlich der Energieeffizienz gezogen werden [95, 232]. So nutzt beispielsweise das *REER*⁵⁷ Protokoll [404] Zusatzinformationen bezüglich des Energiestatus, der aktuellen Pufferauslastung und des lokalen *SNR*⁵⁸ zur Bestimmung effizienter Routenpfade.

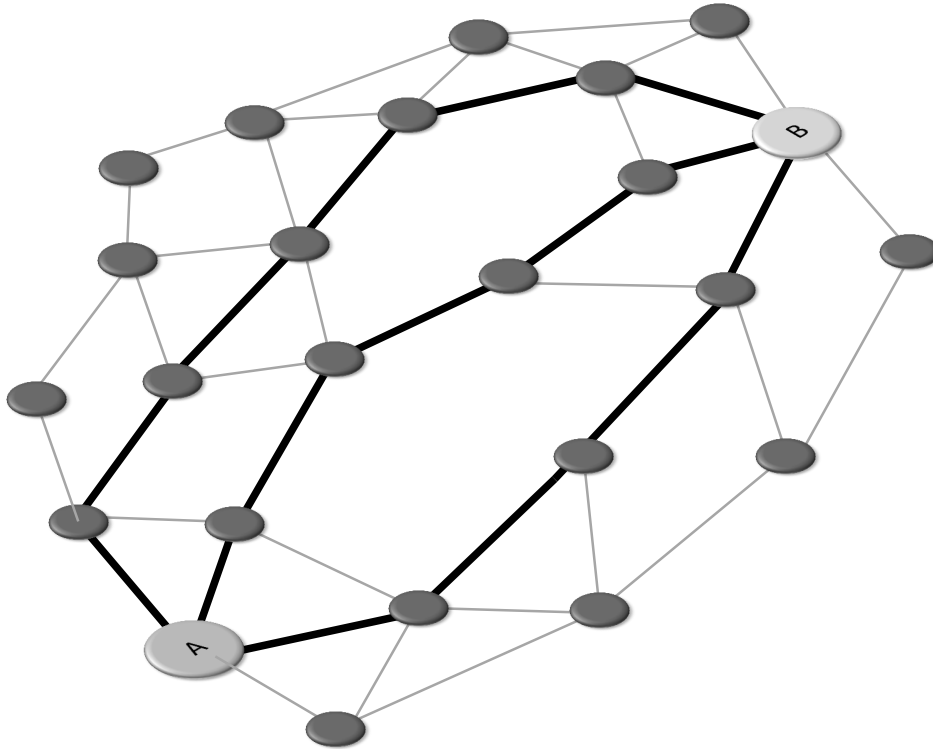


Abbildung 4.15: Beispielszenario für Multipath-Routing mit drei aktiven Routenpfaden zwischen A und B, auf denen die Netzlast verteilt werden kann.

Die durch Multipath-Verfahren geschaffene Redundanz erhöht die Ausfallsicherheit und optimiert das Kommunikationsverhalten im Zuge partieller Störungen. Bei Ausfall eines Pfades stehen ohne Verzögerung alternative Routen zur Verfügung, sofern diese existieren. Bei entsprechenden Übertragungskapazitäten kann die durchschnittliche Übertragungszeit reduziert werden. Im Gegenzug ist mit einem erhöhten Ressourcenaufwand in den einzelnen Knoten zu rechnen, da die Menge zu verwaltender Routinginformationen ansteigt und sich die Verarbeitung der Datenströme komplexer gestalten kann. In diesem Zusammenhang zeigen aktuelle Forschungsarbeiten auch die Kombination von Multi-Path-Routingverfahren mit kooperativen Kommunikationsansätzen aus dem Bereich der Schwarmintelligenz [220, 342]. Derartige Konzepte basieren auf einfachen Prinzipien und Regelsätzen und lassen sich leicht umsetzen. In ausgewählten Anwendungsszenarien bieten sich auf dieser Basis interessante Optimierungsansätze.

⁵⁷Robust and Energy Efficient Multipath Routing

⁵⁸Signal to Noise Ratio / Signal-Rausch-Verhältnis

4.4.5 Clustering Algorithmen

Wie bereits diskutiert, sind auch in mobilen Ad Hoc Netzwerkstrukturen ab einem kritischen Skalierungsgrad bzw. Komplexität hierarchische Strukturen unvermeidlich. Sie ermöglichen eine gekapselte Organisation der Topologie auf mehreren Ebenen. Mit Hilfe von Clustering-Verfahren können solche Hierarchien elegant abgebildet und realisiert werden. Dies ist jedoch nicht zwingend gegeben. So können Clustering-Verfahren auch in gleichberechtigten, flachen Strukturen arbeiten. Abbildung 4.16 veranschaulicht das Clusteringkonzept anhand eines einfachen Beispiels im Bereich drahtloser Sensornetzwerke.

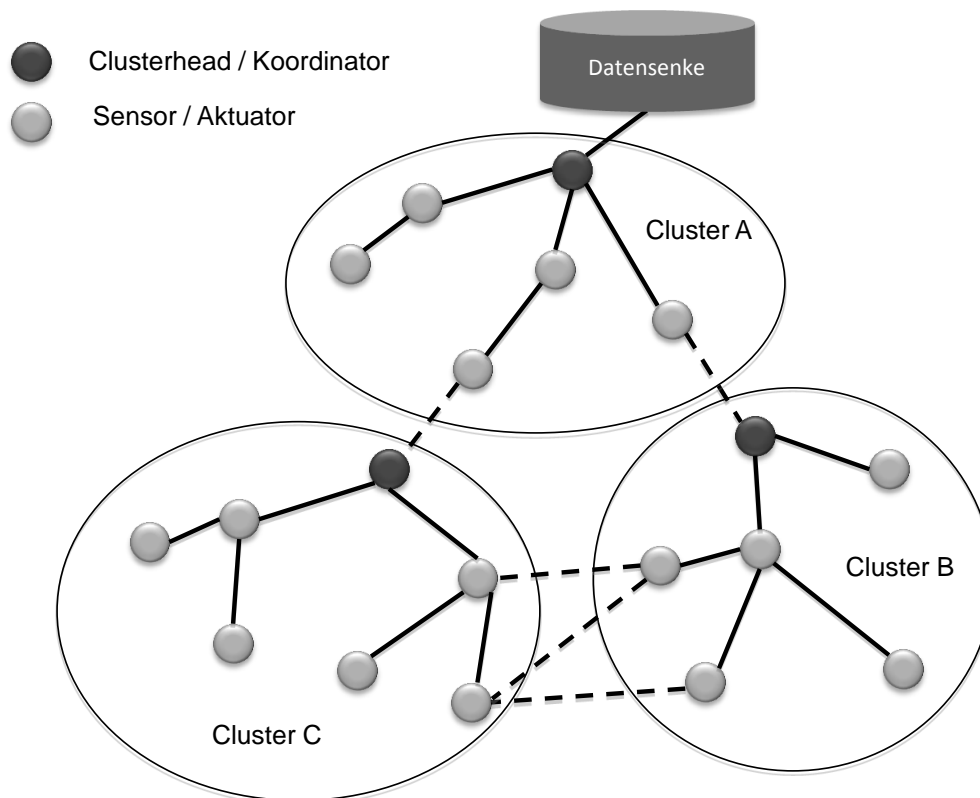


Abbildung 4.16: Clustering, hier am Beispiel einer klassischen WSN Anwendung, ermöglicht eine bessere Skalierung und erhöht die Flexibilität.

Neben der besseren Skalierbarkeit bieten die Konzepte noch weitere Vorteile in Hinblick auf die genutzten Systemressourcen [246, 322, 381]. Diese Ressourcenschonung betrifft den Verarbeitungsaufwand innerhalb der Knoten, die Datenmenge im Rahmen der Kommunikation sowie die benötigten Energieressourcen, welche durch Routingmechanismen gebunden werden [281].

Für praktische Anwendungen existieren drei grundlegende Clustering Schemen: *ID-basiert*, *topologie-basiert* und *energie-basiert*. ID-basierte Verfahren fassen die Knoten anhand ihrer eindeutigen Identität zusammen. Topologie-basierte Ansätze betrachten absolute und relative Positionsangaben der Knoten (*distanzbasiert*) sowie Nachbarschaftsbeziehungen und Struktureigenschaften (Topologiedichte, Knotenanzahl, etc.). Im Gegensatz dazu fassen energie-

basierte Cluster-Verfahren Knotenmengen bestimmter Energieniveaus zusammen bzw. wählen für eine Menge Knoten den aus energetischer Sicht sinnvollsten Clusterhead. Zusätzlich kann eine Klassifizierung nach *zentralisiertem* und *dezentralem* Clustering vorgenommen werden. Zentrale Verfahren koordinieren die gesamte Topologie mit allen Clustern mittels einer gemeinsamen Steuerungsinstanz, welche demnach über ein topologieweites Wissen verfügt. Dezentrale Verfahren realisieren die Clusterverwaltung kooperativ und gegebenenfalls verteilt. Da hier keine umfangreiche Wissensbasis auf Netzwerkebene notwendig ist, werden dezentrale Verfahren vorrangig im Bereich mobiler Ad Hoc und Sensornetze eingesetzt.

Im Bereich der Topologiekontrolle restrukturieren entsprechende Cluster-Verfahren wie *HEED*⁵⁹ [410] die Knotenkommunikation auf Basis der ausgewerteten Energieniveaus und Nachbarschaftsbeziehungen. Die Energieeffizienz der gesamten Netzwerktopologie steht dabei im Vordergrund. Neben der Topologiekontrolle kommen Cluster-Algorithmen häufig auch im Bereich des Routings zum Einsatz. Hier können die Eigenschaften bzw. Vorteile unterschiedlicher Routingstrategien kombiniert werden. Innerhalb eines Clusters erlaubt dies beispielsweise die Anwendung eines latenzoptimierten Routing-Verfahrens, bei dem proaktiv aktuelle Routingtabellen gepflegt werden. Bei der Kommunikation mit weit entfernten Knoten und folglich mit anderen Clusterbereichen wird dann reaktiv geroutet, um hier Ressourcen für aufwendigere Routenpflege einzusparen.

*LEACH*⁶⁰ [185] ist ein bekannter Vertreter der cluster-basierten Routingverfahren. Durch die Generierung von Hierarchien wird versucht, eine möglichst gleichmäßige Lastverteilung zu erreichen und den Energiebedarf zu reduzieren. Jeder der generierten Cluster verfügt über einen *Clusterhead*, welcher den zentralen Verwaltungsknoten repräsentiert. Er koordiniert die Kommunikation zwischen den einzelnen Clustern und organisiert cluster-interne Übertragungsprozesse. In Folge dessen ist die Ressourcenbelastung auf den Clusterheads deutlich höher als in den untergeordneten passiven Netzwerkknoten. Bei *LEACH* werden daher die Clusterheads dynamisch und periodisch zufällig realloziert, wodurch eine Fairness in der Topologie sichergestellt wird.

Wie die Protokolle *CBRP*⁶¹ [208] und *CSGR*⁶² [374] zeigen, repräsentieren die jeweiligen *Clusterheads* zur Laufzeit eine kritische Schwachstelle. Sie stellen einen *Single-Point-of-Failure* für den gesamten Cluster dar. Bei einem Ausfall kann es zu erheblichen Störungen kommen. Die Bestimmung geeigneter Clusterheads sowie das Clustermanagement repräsentieren folglich wesentliche Herausforderungen [62, 207, 241]. Eine zufällige Wahl des Clusterheads wie bei *LEACH* kann beispielsweise nicht sicherstellen, ob die jeweiligen Ressourcen sowie die Positionierung des Clusters hinreichend für die funktionalen Anforderungen sind. Folglich ist es sinnvoll, erweiterte Prüfregele zu integrieren, welche die Clusterwahl effizienter gestalten.

Beim *Max-Min* Verfahren [239] ändern sich im Gegensatz zu *LEACH* die Clusterheads nicht periodisch und zufällig, sondern nur bei Topologieänderungen. Dies hat aus administrativer Sicht entscheidende Vorteile, jedoch wirkt sich dieses statische Verhalten energetisch negativ

⁵⁹Hybrid, Energy-Efficient, Distributed Clustering Approach

⁶⁰Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy

⁶¹Cluster Based Routing Protocol

⁶²Cluster Switch Gateway Routing

auf die betroffenen Clusterhead-Knoten aus. Eine faire Verteilung nach dem jeweiligen Energieniveau und der Positionierung der Knoten wären sinnvoll.

Die Autoren in [131] beschreiben mit dem *Spine* Ansatz ein Cluster-Routingverfahren, welches auf zwei Ebenen arbeitet. Innerhalb der Cluster auf unterer Ebene kommen dynamische, selbstorganisierende Strukturen zum Einsatz, währenddessen auf der oberen Ebene ein klassischer Link-State-Ansatz greift. In [118] wird die Thematik der dynamischen Clusterhead-Bestimmung auf einer rekonfigurierbaren Systemplattform beschrieben. Dementsprechend werden die Clustering-Konzepte hier auf einer deutlich komplexeren, ganzheitlichen Ebene umgesetzt. Die einzelnen Knoten arbeiten jeweils auf Basis eines FPGAs, der je nach Situation zur Laufzeit eine angepasste Konfiguration wählt. Folglich kann hier die gesamte Software- bzw. Funktionsarchitektur an die aktuelle Rolle als passiver Knoten oder Clusterhead adaptiert werden.

Clustering-Konzepte dienen also der Strukturierung großer Netzwerktopologien und erfüllen wichtige Aufgaben, so auch die eines *Load Balancing*. Durch die dynamische Anpassung der Cluster sowie der Clusterheads ist eine bessere Verteilung der Netzlast möglich.

4.4.6 Kooperative Routingstrategien

Neben klassischen Parametern zur Berechnung der Pfadeffizienz berücksichtigen die Metriken *kooperativer Routingstrategien* auch Auswirkungen der Kommunikation auf andere Teile der Netzwerktopologie [350][17]. Dies betrifft in erster Linie involvierte Zwischenstationen, deren Energiebedarf durch die Weiterleitung von Datenpaketen temporär erhöht wird. Weiterhin kann sich dies aber auch auf die Erreichbarkeit der Gesamttopologie auswirken, wenn in Folge verbrauchter Energieressourcen einzelne Knoten nicht mehr zur Verfügung stehen und isolierte Teilmengen entstehen. In direkter Konsequenz versuchen kooperative Routingansätze die vollständige Erreichbarkeit der Gesamttopologie sicherzustellen [106]. Dies gelingt durch ein gezieltes Verteilen der Netzlast und somit durch das Ausbalancieren der Energieniveaus aller Knoten in der Topologie.

Das *PAR*-Protokoll⁶³ [347, 359] realisiert eine solche kooperative Strategie und berechnet Routen auf Basis der Energieeffizienz. Dabei werden Knoten mit kritischem Energieniveau geschont und Knoten mit hinreichend guten Energieressourcen bevorzugt gewählt. Die Metrik errechnet dabei pro Pfad das durchschnittliche Energieniveau und wählt ein Optimum. Auch das *PCCB*⁶⁴ Protokoll [328] verfolgt einen ähnlichen Ansatz. Hier dient das minimale Energieniveau auf jeder Route als primäres Entscheidungsmerkmal der Metrik. Nach diesem Flaschenhalsprinzip zählt pro Pfad folglich nur der Knoten mit den geringsten Energieressourcen. Aus dieser Menge wird die Route mit dem höchsten Wert ausgewählt. Abbildung 4.17 verdeutlicht das Vorgehen solcher Verfahren anhand eines einfachen WSN Szenarios. Bei kritischen Änderungen im Energieniveau werden alternative Pfade genutzt, um so die Ressourcen zu schonen und die Erreichbarkeit zu verlängern.

⁶³Power-Aware Routing

⁶⁴Power Cost Calculate Balance Routing

4 Netzwerkmanagement

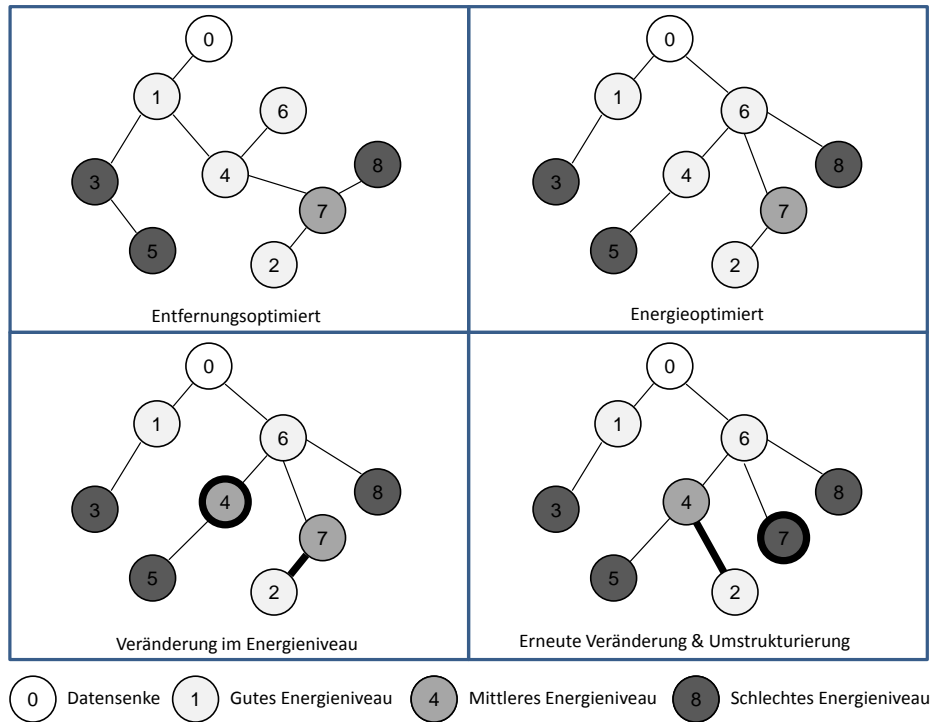


Abbildung 4.17: Kooperative Routingstrategien. Der nach Distanzen optimal berechnete Kommunikationsgraph in diesem WSN Szenario mit zentraler Datensenke weicht deutlich vom energieoptimierten Graph ab. Bei Bedarf wird dynamisch umorganisiert.

*LEAR-AODV*⁶⁵ und *LPR-AODV*⁶⁶ [328, 400] sind modifizierte Varianten von AODV und integrieren ebenfalls Energieaspekte in die Routenberechnung. Die letztere Variante berechnet mit Hilfe von Netzwerk- und Energiestatus die voraussichtliche Lebensdauer einer Route. Somit arbeitet die Metrik kooperativ, d.h. sie berücksichtigt die energetischen Auswirkungen auf die Gesamtopologie. Gleichzeitig wird aber auch das Kommunikationsverhalten hinsichtlich der Verfügbarkeit und Routenstabilität optimiert. Analog dazu modifiziert *ESDSR*⁶⁷ [366] in ähnlicher Form den klassischen DSR Ansatz.

Das *EBCR*⁶⁸ Verfahren [16, 18] erweitert die PAR Strategie für Multi-Interface, Multi-Standard Szenarien. Hierbei werden funktechnologie-spezifische Parameter in die kooperative Routingmetrik integriert.

Diese Bewertungsparameter, d.h. alle Informationen bezüglich Energiestatus und Übertragungstechnologie sind jedoch nicht auf Layer 3 verfügbar. Traditionelle Routingverfahren können derartige Informationen folglich nicht nutzen. In Konsequenz müssen die relevanten Systeminformationen über geeignete Schnittstellen zugänglich gemacht werden. An dieser Stelle greifen *Cross-Layer* Ansätze, die Zugriff auf eine erweiterte Informationsbasis aus verschiedenen Abstraktionsebenen bieten. Auf aktuelle Entwicklungen in diesem Bereich wird im späteren Verlauf dieses Kapitels unter 4.5 noch detailliert eingegangen.

⁶⁵Local Energy-Aware Routing auf Basis von AODV

⁶⁶Lifetime Prediction Routing auf Basis von AODV

⁶⁷Energy Saving Dynamic Source Routing

⁶⁸Energy-Balanced Cooperative Routing

4.4.7 Anwendungsspezifische Routingstrategien

In Hinblick auf die verschiedenen Applikationsbereiche sind viele Routingverfahren anwendungsspezifisch optimiert und daher nur schwer zu klassifizieren. Hier ist unter anderem *DREAM*⁶⁹ zu nennen. Der Routingalgorithmus passt das Aktualisierungsintervall für die Erreichbarkeit der Knotennachbarschaft dynamisch und in Abhängigkeit von den jeweiligen Distanzwerten an. Somit eignet er sich besonders für ressourcenbeschränkte Kommunikationssysteme im WSN und SANET Umfeld. Die Arbeitsweise von *DREAM* stützt sich auf die Annahme, dass Knoten mit einer hohen Bewegungsdynamik häufiger geprüft und abgefragt werden müssen als statische Knoten. Nachbarschaftsknoten in der direkten Umgebung sind mit höherer Wahrscheinlichkeit über einen längeren Zeitraum zuverlässig erreichbar als Knoten am Rande der Übertragungsreichweite.

Auch *SPIN*⁷⁰ [230] sowie darauf aufbauend *Directed Diffusion* [204] sind für drahtlose Ad Hoc und Sensornetzwerke angepasste Routingprotokolle. Sie setzen klassische *Flooding*-Mechanismen auf eine effiziente Weise ein. Routinginformationen der jeweiligen Knoten werden dabei zunächst über eine Broadcast-Nachricht angeboten. Werden die Informationen von Empfängern in Reichweite gewünscht oder benötigt, bestätigen diese das Angebot und fordern relevante Datensätze explizit an. Erst im Anschluss überträgt der Sender die verfügbaren Routinginformationen. Das genutzte Handshake-Verfahren ist in ähnlicher Weise in vielen Kommunikationsprotokollen zu finden und dient der Minimierung von unnötigen Datenübertragungen. Die Effizienz steigt und der Protokolloverhead ist minimal. Die Kombination auf Flooding-Prinzipien und Initial-Handshake verhindert auch *Overlap* sowie *Implosionsszenarien*. Abbildung 4.18 zeigt beide Phänomene, die konzeptbedingt sehr häufig bei klassischen Flooding-Verfahren auftreten.

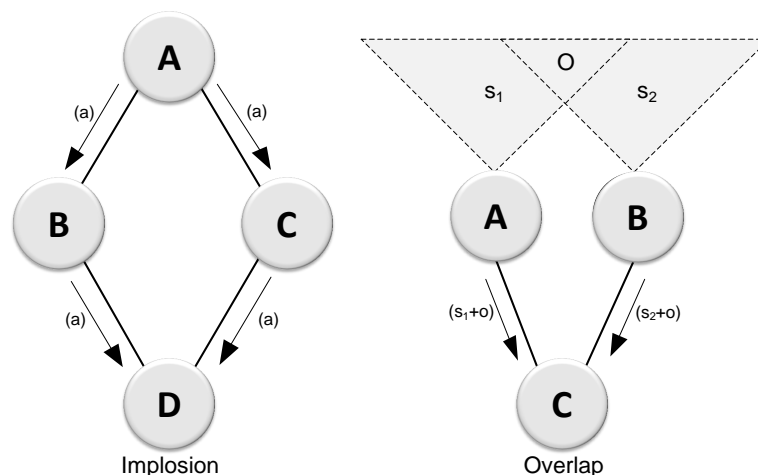


Abbildung 4.18: Flooding Problemstellungen: links *Implosion* - über B und C werden Informationen von Knoten A mehrfach an D propagiert; rechts *Overlap* - Überschneidung untersuchter Bereiche im Rahmen der Netzexploration. Die Informationsbasis in Knoten C ist redundant bezüglich der Schnittmenge O.

⁶⁹Distance Routing Effect Algorithm for Mobility

⁷⁰Sensor Protocols for Information via Negotiation

Viele Routingansätze nutzen gezielt die konzeptionellen Eigenschaften drahtloser Sensornetzwerke. Diese besitzen meist eine oder mehrere vordefinierte Datensinken, welche die gemessenen Datensätze aller Sensorknoten zentral verarbeiten. Dieser Umstand vereinfacht Routingprozesse erheblich, da die Anzahl der zu berechnenden und zu verwaltenden Pfade stark reduziert wird. Im Falle einer statischen Topologie können diese Pfade sogar zentral berechnet und optimiert werden. *TEEN*⁷¹ [260] ist ein weiteres Verfahren, welches für mobile Sensornetzwerkstrukturen konzipiert wurde. So erlaubt der reaktive Ansatz eine direkte Anpassung des Kommunikationsverhaltens an Änderungen in der Topologie. Hierzu senden die Knoten kontinuierlich Statusinformationen an die Datensenke, welche auf dieser Basis die Situation im Netzwerk analysiert. *APTEEN*⁷² [261] kombiniert die konzeptionellen Ansätze von *TEEN* und dem cluster-basiertem *LEACH*, nutzt aber für den Anwendungskontext drahtloser Sensornetze ein periodisches Übertragungsschema.

Für Multicast-Kommunikationsszenarien stehen ebenfalls angepasste Routingverfahren zur Verfügung. So beispielsweise das *MAODV*⁷³ Routing Protokoll als modifizierte *AODV* Variante sowie *SRMP*⁷⁴ oder *ODMRP*⁷⁵ [328].

4.4.8 WRTA - WuRx-Optimised Routing and Topology Optimisation Approach

Das bereits kurz erwähnte WRTA Verfahren stellt ein weiteres, stark angepasstes Routingprotokoll dar, welches speziell auf die Anforderungen von asynchronen Kommunikationsszenarien mit WuRx-Komponenten eingeht [35]. Es wurde im Rahmen dieser Arbeit und im wissenschaftlichen Kontext des nanett Projektes [274] konzipiert und implementiert. WRTA kombiniert dabei klassische Routingfunktionalitäten sowie Mechanismen zur Topologiekontrolle auf der Low-Level-Verbindungsebene. Das Protokoll ist bewusst sehr schlank gehalten und richtet sich an drahtlose Netzwerktopologien mit einer oder mehreren, dedizierten Datensinken, wie sie typischerweise im WSN oder SANET Kontext existieren. WRTA hat dabei das primäre Ziel, den Energiebedarf für Routingfunktionalitäten in den Netzwerkknoten zu minimieren. Die Priorität liegt folglich auf der Energie- und Ressourceneffizienz. Um dies zu erreichen, werden bei dem Verfahren alle aufwendigen Routenverarbeitungs- und Routenberechnungsprozesse von den Netzwerkknoten in die Datensenke verlagert. Hier stehen hinreichend viele Ressourcen in Form von Rechenleistung und Speicher zur Verfügung, um auch für große Topologien optimierte Kommunikationsgraphen zeitnah zu berechnen.

Der funktionale Ablauf innerhalb von WRTA zur Bereitstellung gültiger Routenpfade für alle Netzwerkknoten wird in vier Betriebsphasen unterteilt, wie sie in Abbildung 4.19 schematisch dargestellt sind.

⁷¹Threshold-Sensitive Energy Efficient Sensor Network Protocol

⁷²Adaptive Periodic Threshold-Sensitive Energy Efficient Sensor Network Protocol

⁷³Multicast Ad Hoc On-Demand Distance Vector

⁷⁴Source Routing-Based Multicast Protocol

⁷⁵On-Demand Multicast Routing Protocol

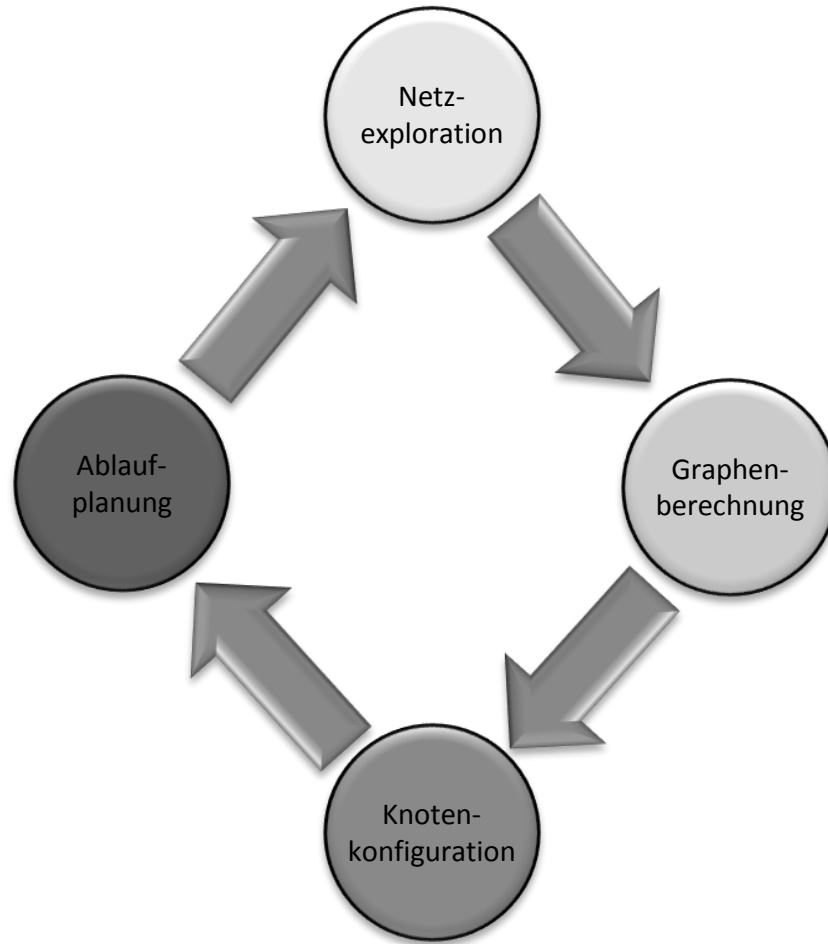


Abbildung 4.19: Die vier WRTA Betriebsphasen, welche je nach Bedarf zyklisch durchlaufen werden.

Netzexploration:

Mit dem Auslösen eines dedizierten Signals (beispielsweise ein Wake-Up-Signal bei integriertem WuRx) starten alle Knoten mit der initialen Abfrage der direkt erreichbaren Nachbarschaft. Da zu diesem Zeitpunkt noch keine Routeninformationen vorliegen, wird anschließend die Menge aller Nachbarschaftsrelationen zusammen mit der jeweiligen Knoten-ID sowie zusätzlichen Metadaten (Energieressourcen, Auslastung, Systemzustand, etc.) per Broadcast an eine vordefinierte Senke übermittelt. Die Datensinke sammelt alle eingehenden Informationen und stellt diese in einer umfassenden Wissensbasis zusammen. Ein wichtiges Ziel innerhalb dieser Phase ist die Minimierung des Protokolloverheads im Rahmen der Datenübermittlung. Hier können entsprechende Ansätze aus dem Netzwerkmanagement zum Einsatz kommen.

Berechnung Routengraph:

In dieser Phase folgt die Berechnung eines optimierten Kommunikationsgraphen. Die Berechnung erfolgt lokal auf der Datensinke und nutzt die vorhandene Wissensbasis über die Topologie. Auf Basis dieser ganzheitlichen Wissensbasis liegt das Optimierungspotential für den Kommunikationsgraph deutlich über den Möglichkeiten lokaler Ansätze mit begrenzter Sicht. Die Berechnung eines global optimierten Routengraphs ist

dabei keinesfalls trivial und je nach Menge der integrierten Parameter und Entscheidungsmerkmale sehr komplex. WRTA nutzt derzeit ein angepasstes Verfahren zur Generierung eines minimalen Spannbaumes⁷⁶. Die verwendete Metrik (*Fitness-Funktion*) fokussiert primär Energieparameter und beachtet Prioritätsmerkmale, arbeitet jedoch kooperativ im Kontext eines global ausbalancierten Optimums. Das Ergebnis stellt gleichzeitig eine reduzierte Netzwerktopologie dar, die auf Topologiekontrollebene einfach umsetzbar ist.

Weiterhin ist anzumerken, dass zum Zeitpunkt der Berechnung etwaige Änderungen in der Topologie nicht mehr berücksichtigt werden können. Folglich sind diese erst beim nächsten periodischen Aufruf der Berechnungsphase einzubeziehen und im Rahmen einer Routenaktualisierung auf die Knoten zu propagieren.

Knotenkonfiguration:

In dieser Phase besteht die Herausforderung in der effizienten Auswahl einer Strategie zur Knotenkonfiguration. Diese kann je nach Topologieausprägung und Netzwerkgröße unterschiedlich realisiert werden, z.B. ebenenweise, per Tiefensuche, parallelisiert oder geclustert. Das entsprechende Optimierungsproblem zur Informationsverteilung muss Laufzeit, Ressourcenbedarf und Störverhalten auf dem Netzwerk berücksichtigen.

WRTA nutzt zur Konfiguration sogenannte *RCP*⁷⁷. Diese können über spezielle Header-Elemente gezielt in vordefinierte Teilbereiche der Topologie gestreut werden und konfigurieren auf ihrem Weg alle besuchten Knoten. Neben der Routingkonfiguration werden hier gleichzeitig auf Low-Level Ebene die verfügbaren Verbindungskanäle auf die Menge zu nutzender Kommunikationspartner beschränkt. An dieser Stelle wird auch die Begrifflichkeit von WRTA als kombiniertes Routing- und Topologieoptimierungsverfahren deutlich. Diese Kombination reduziert aus ganzheitlicher Sicht die Anzahl von Status- und Kontrollpaketen im Netz deutlich, was sich folglich positiv auf die Energieeffizienz auswirkt.

Abbildung 4.20 verdeutlicht den Konfigurationsprozess beispielhaft an einer einfachen Netzwerktopologie. Diese kann entweder komplett mit einem RCP schrittweise konfiguriert werden (im oberen Teil der Grafik abgebildet), oder aber auch parallelisiert durch mehrere, simultan versendete RCPs, die jeweils einen definierten Topologiebereich abdecken (im unteren Teil der Grafik abgebildet). Die jeweiligen Sektoren könnten alternativ auch einzelne Cluster repräsentieren, welche wiederum eine Vielzahl einzelner Knoten enthalten.

Ablaufplanung Tasks:

Nach Abschluss der Konfiguration kann der operative Betrieb des verteilten Gesamtsystems starten. Parallel dazu können durch entsprechende Kontrollpakete Änderungen im zeitlichen Ablauf auf den Knoten vorgenommen werden. Dies erfolgt z.B. über *token-basierte* Koordinierungsmechanismen oder über selektive Abfragen von einzelnen Knoten. Je nach Applikation sind hier unterschiedliche Strategien sinnvoll.

⁷⁶basierend auf dem *Dijkstra* Algorithmus

⁷⁷Route Configuration Packet

4 Netzwerkmanagement

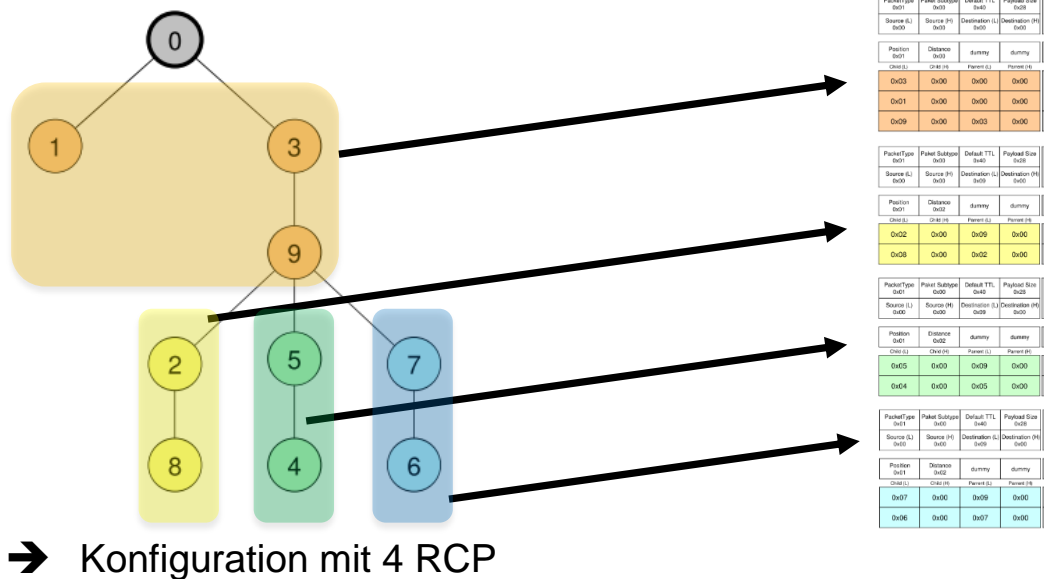
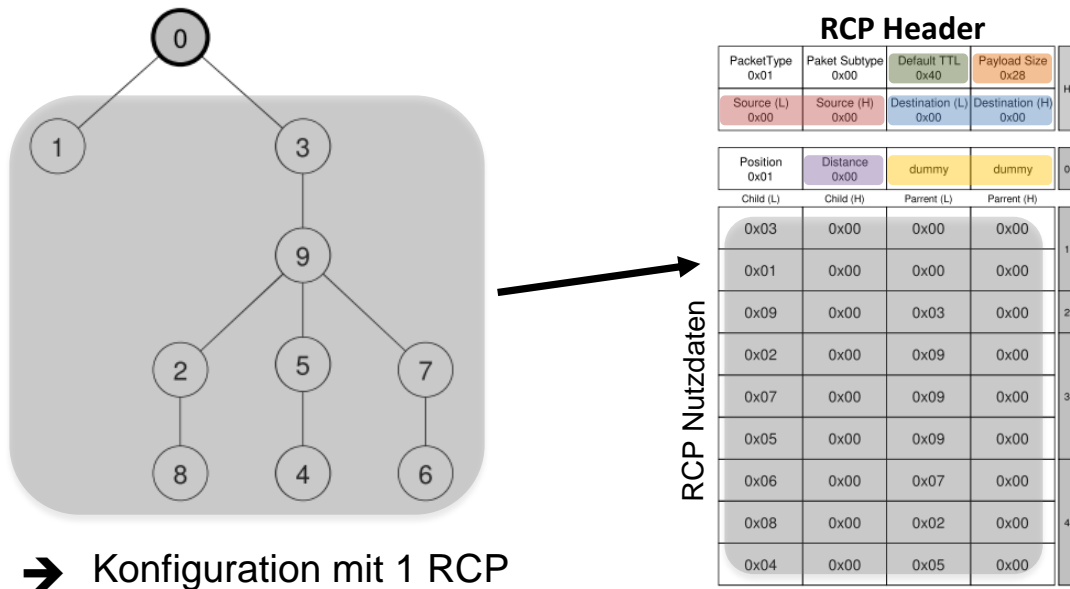


Abbildung 4.20: WRTA Routing - Informationsverteilung über *Route Configuration Pakete (RCPs)*. Bei entsprechender Skalierung ist eine cluster-basierte Knotenkonfiguration möglich.

Aus konzeptionellen Gründen ist WRTA nicht auf den Einsatz in hochgradig mobilen Topologien optimiert. Häufige Änderungen in der Struktur erfordern an dieser Stelle vielfache Aktualisierungs- und Reorganisationsprozesse, die sich negativ auf die Energieeffizienz auswirken. Das Protokoll eignet sich besonders für große und statische Kommunikationsszenarien mit wenigen, zeitlich weit auseinanderliegenden Topologieänderungen. Auf Basis eines asynchronen, gepufferten Kommunikationsmodells, wie es in 3.4 bei den Anwendungsszenarien von WuRx Systemen vorgestellt wurde, kann WRTA seine Vorteile in vollem Maße nutzen. Diese Vorteile können zusammenfassend wie folgt aufgeschlüsselt werden:

- Zentralisierte, topologieweite Optimierung der Kommunikationspfade
- Minimierung des Ressourcenbedarfs in den Netzwerkknoten
- Sehr gute Skalierbarkeit durch Mechanismen zur hierarchischen / geclusterten Konfiguration
- Kompatibilität in heterogenen Kommunikationsinfrastrukturen durch Unterstützung vieler existierender Hardwareplattformen (es werden keine hardware-spezifischen Funktionen benötigt)
- Effiziente Nutzung von WuRx Konzepten und asynchronen Kommunikationsparadigmen

Bei einer Betrachtung des gesamten Protokollablaufes wirkt sich die aufwendige Initialisierungsphase (*Netzexploration*) von WRTA natürlich stark negativ auf die Energiebilanz aus. Dabei müssen von allen Knoten umfangreiche Daten an die Senke übermittelt werden. Diese Aufwände relativieren sich nur über eine entsprechend lange Laufzeit des Gesamtsystems und durch die global optimierten Routenpfade. Dementsprechend ist WRTA für Langzeitanwendungen im WSN und SANET Bereich konzipiert und angepasst.

4.4.9 Evaluierung WRTA

Die praktische Umsetzbarkeit von WRTA soll im Folgenden evaluiert werden. Hierfür kam sowohl eine Simulationsumgebung als auch eine Hardwareimplementierung in Form einer verteilten, heterogenen Systemarchitektur zum Einsatz [35]. Die Ergebnisse aus beiden Bereichen analysiert und verglichen werden, um so Aussagen bezüglich der Anwendbarkeit unter Realbedingungen treffen zu können. Als Simulator diente die *SimANet* Umgebung, welche im Bereich der WSN und SANET Applikationen ein flexibles Simulationswerkzeug repräsentiert. *SimANet* wird im Rahmen der Fallstudien in Kapitel 8 noch einmal detaillierter vorgestellt. Gleiches gilt für die verwendeten Hardware-Evaluierungsplattformen aus dem *nanett* Projekt sowie der *PLANet* Plattform. Ein Basissystem für die Nutzung des WuRx wurde für beide Systeme bereitgestellt. Auf Betriebssystemebene erfolgte die Umsetzung eines minimalen Systemkerns, bei dem die Energieeffizienz der Gesamtplattform im Vordergrund steht. Die Funktionen und Aufgaben beschränken sich auf die treiberseitige Einbindung der Sensorik beziehungsweise Peripherie, die Bereitstellung einer API zur Hardwareabstrahierung, die Ressourcenverwaltung zur Laufzeit sowie auf das Scheduling aller Tasks unter Berücksichtigung gegebener Prioritäten. Die funktionsreduzierte Implementierung des Systemkerns nutzt die Ressourcen auf dem Mikrocontroller deutlich effizienter als ein umfassendes Embedded Betriebssystem, in dem aus Gründen der Flexibilität meist ein breiter Funktionsumfang bereitgestellt wird.

In Hinblick auf den primären Anwendungskontext energieautarker Langzeitapplikationen im WSN und SANET Bereich wurden zur Evaluierung von WRTA die in Abbildung 4.21 dargestellten heterogenen Testtopologien umgesetzt.

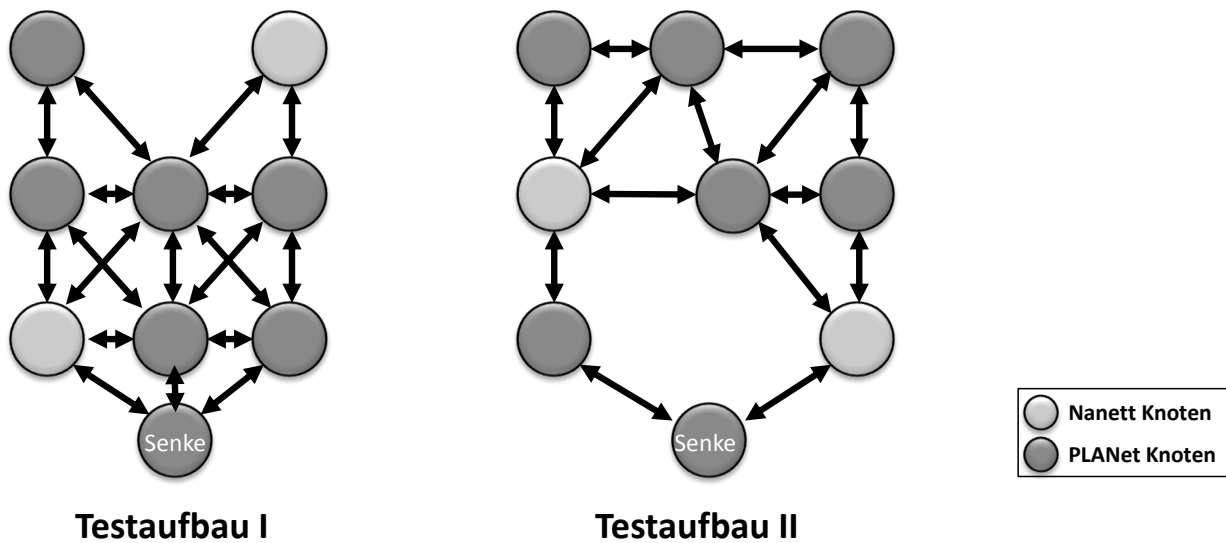


Abbildung 4.21: Fallstudie WRTA - initialer Testaufbau zur Evaluierung von WRTA. Zwei klassische WSN Topologien mit zentraler Datensenke

In diesen initialen, nicht optimierten Konfigurationen messen und speichern die einzelnen Knoten zyklisch Temperaturwerte über ihre Sensorik. Die Netzwerkschnittstellen sind standardmäßig deaktiviert und die Empfangsbereitschaft wird über den WuRx sichergestellt. Im Falle eines Wake-Up-Signals wird zunächst der Konfigurationsstatus für das Routing überprüft. Liegt keine Konfiguration vor, werden gemäß der WRTA Ablaufphasen (siehe Kapitel 4.4.8) verfügbare Nachbarschaftsinformationen sowie zusätzliche Metadaten bezüglich des eigenen Systemstatus via Broadcast in Richtung Senke übertragen. Anschließend wartet jeder Knoten auf die WRTA Konfigurationspakete (*RCP*), um so die eigene Routingtabelle entsprechend anzupassen. Gleichzeitig erfolgt dabei die Topologieanpassung auf Layer 2. Ungenutzte oder ungünstige Verbindungen werden nicht weiter gepflegt. Nach dem erfolgreichen Konfigurationsprozess erfolgt abschließend die Übertragung aller lokal gepufferten Daten. Alternativ werden Datensätze von der Senke selektiv abgefragt und über den optimierten Kommunikationsgraph übertragen. Abbildung 4.22 zeigt den entsprechenden Zustandsautomaten für die Hardwareimplementierung, der aus Gründen der Lesbarkeit vereinfacht dargestellt wurde.

4 Netzwerkmanagement

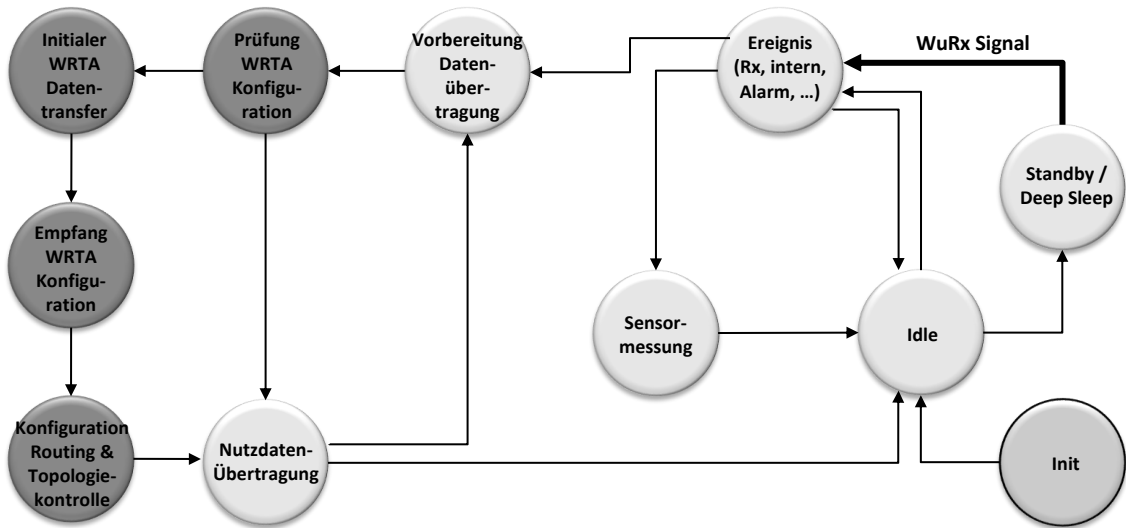


Abbildung 4.22: Zustandsautomat für die beiden Demonstratorplattformen. Die WRTA-relevanten Zustände sind dunkel hervorgehoben.

Zur Laufzeit berechnet WRTA mit Hilfe der verfügbaren Wissensbasis aus der Netzexploration jeweils optimierte Kommunikationsgraphen. Die Ergebnisse der berechneten Testszenarien in Simulation und Hardwareimplementierung sind in Abbildung 4.23 dargestellt. Dabei wurden ausschließlich Nachbarschaftsrelationen zwischen den Knoten als Informationsbasis für die Berechnung verwendet. WRTA kann jedoch problemlos zusätzliche Statusinformationen mit in die Berechnungsfunktion für den Kommunikationsgraph einfließen lassen. Dementsprechend sind dann auch andere Topologieausprägungen möglich.

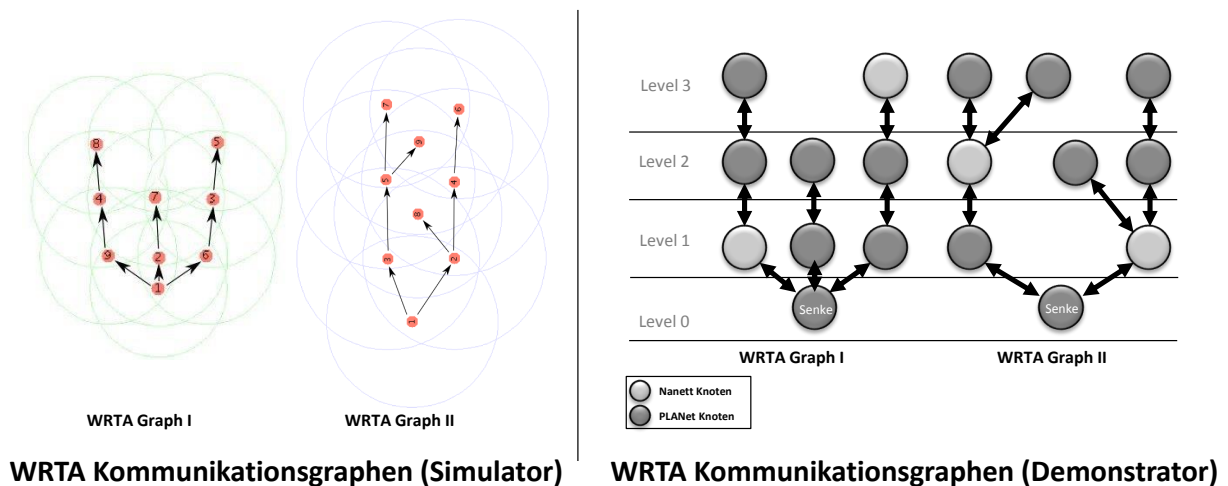


Abbildung 4.23: Die von WRTA berechneten, optimierten Kommunikationsgraphen für die beiden Testkonfigurationen. Simulation via SimANet *links* sowie Hardwareevaluierung mit nanett und PLANet Boards *rechts*.

Um die vollständige Umsetzbarkeit von WRTA zu evaluieren, sind nun die beiden letzten Phasen für die Konfiguration und die Koordinierung der Übertragung zu untersuchen. In Bezug

auf die Konfigurationsphase ist für praktische Anwendungen vor allem die Verzögerungszeit bis zur vollständigen Kommunikationsbereitschaft der gesamten Topologie von Interesse. Mit Hilfe eines Oszilloskops ist dabei sehr gut nachvollziehbar, welche Zeitspannen für die Konfiguration der einzelnen Graphebenen vergehen. In den Testszenarien wurde nur ein RCP für die gesamte Topologie verwendet. Abbildung 4.24 verdeutlicht die Messprozedur.

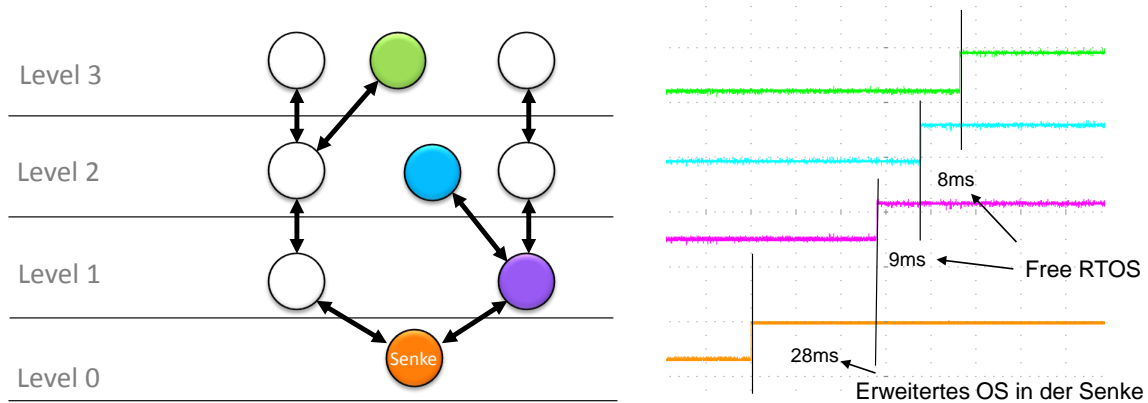


Abbildung 4.24: WRTA - Ebenenweise Messung der WRTA Konfigurationszeiten mittels Oszilloskop.

Zu erkennen ist dabei die erhöhte Latenz auf Ebene 1, die sich durch die komplexeren Verarbeitungsprozesse in der Senke ergeben [35]. Auf den nachfolgenden Konfigurationsebenen zeigen sich konstante Zeitmessungen von unter 10 ms. Eine Übersicht über alle Messungen in der Simulation sowie in der Hardwareumsetzung wurde in Abbildung 4.25 zusammengefasst. Die Werte entsprechen dabei Durchschnittsangaben von 10 Messdurchläufen.

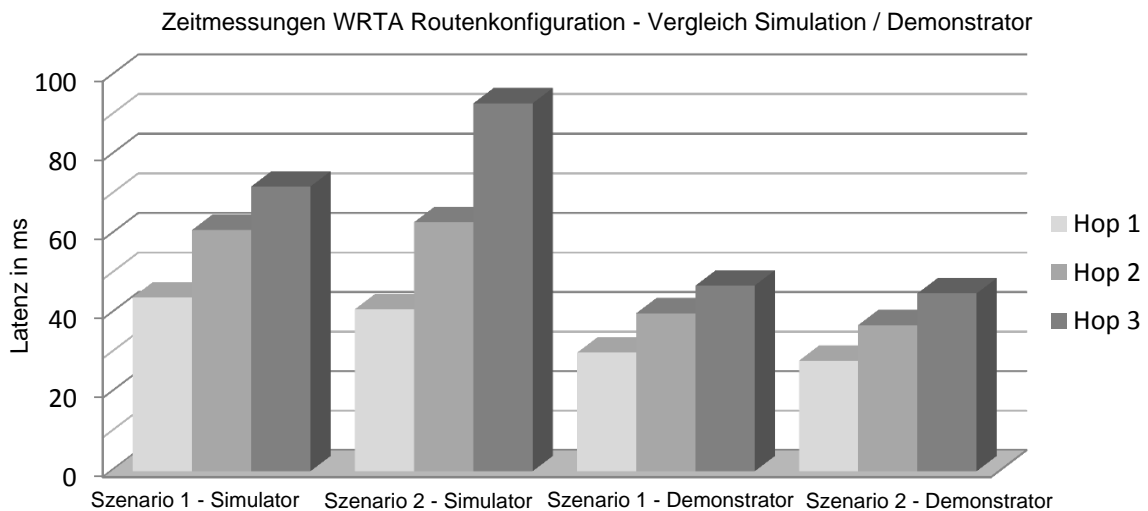


Abbildung 4.25: WRTA - gemessene Latenzen in den einzelnen Topologieebenen (Simulation *links*, Demonstrator *rechts*).

Die Ergebnisse zeigen dabei deutlich die Unterschiede zwischen Simulation und Demonstrator, allerdings zu Gunsten der Anwendbarkeit von WRTA unter Realbedingungen. Die

Simulationsumgebung trifft erheblich konservativere Annahmen als sie im Demonstrator tatsächlich beobachtbar sind. Ein wesentlicher Grund hierfür sind die in SimANet verwendeten Modellierungen für das Übertragungsmedium und den Kommunikationsstack. Diese sind abstrakt gefasst und müssen einem Kompromiss zwischen Worst- und Best-Case Abschätzung finden [8]. Dennoch erlaubt die Analyse der Ergebniswerte die Schlussfolgerung, dass WRTA im Kontext stark ressourcenbeschränkter Sensornetzwerke effizient arbeiten kann [22, 23, 35].

In einer letzten Messreihe wurde schließlich der gesamte WRTA Prozess beginnend von der Kommunikationsgraphberechnung bis hin zur abschließenden Datenübertragung analysiert. Das Messszenario startet mit Beginn der zentralen WRTA Berechnungsphase und endet nach der vollständigen Übertragung von 10 Datenpaketen je Netzwerkknoten an die Datensinke. Mit der Konfigurationen wird gleichzeitig ein Ablaufplan für die zeitliche Koordinierung aller Übertragungsprozesse an alle Netzwerkknoten übermittelt. So erfolgt erst die Datenübermittlung von Ebene 1, anschließend die Übertragung von allen Knoten in Ebene 2 und abschließend Ebene 3. Alle Nutzdatenpakete werden von Hop zu Hop dediziert bestätigt. Maximal sind drei Wiederholungen der Übertragung möglich. Die Werte in Abbildung 4.26 zeigen zusammenfassend die gemessenen Gesamtzeiten.

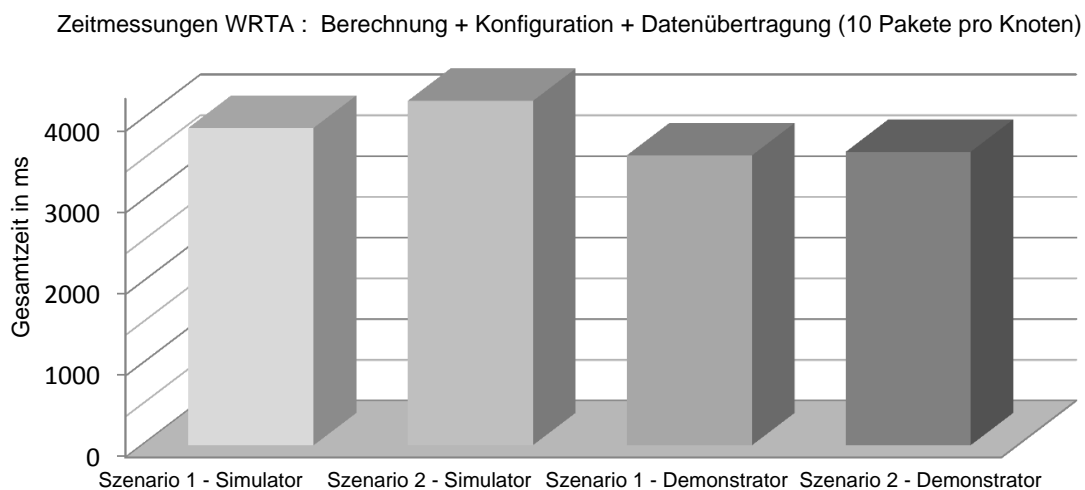


Abbildung 4.26: WRTA - gemessene Gesamtkonfigurationszeiten in den einzelnen Topologieebenen (Simulation *links*, Demonstrator *rechts*).

Ausgehend von einer initialen, nicht konfigurierten Topologie vergehen sowohl simulativ als auch unter Realbedingungen zwischen 3,5 und 4,5 Sekunden für das gesamte Messszenario. Dabei wurden wiederum Durchschnittswerte aus 10 Messzyklen zusammengefasst. Gleichzeitig gestaltete sich der Kommunikationsoverhead in den Netzwerkknoten minimal. Nach der Netzinitialisierung sind in den Knoten keinerlei Prozesse für die Berechnung und Prüfung von Kommunikationspfaden notwendig. Folglich wirkt sich dies sehr positiv auf die Energieeffizienz aus, da die Netzwerkschnittstellen ausschließlich für die Übertragung von Nutzdaten verwendet werden müssen. Die WuRx Integration und die lokale Messwertpufferung verlief problemlos und zuverlässig. WRTA kann demnach seine konzeptionellen Vorteile auch unter Realbedingungen umsetzen. Das Verfahren ist besonders im Anwendungskontext verteilt agierender, stark ressourcenbeschränkter Systeme und für Langzeitapplikationen im WSN / SANET Bereich geeignet.

4.5 Cross-Layer Strategien

Cross-Layer-Ansätze sind eng an Middleware-Architekturen gebunden, wie sie in Kapitel 3.1.5 vorgestellt wurden. Der Begriff lässt darauf schließen, dass im Zuge der Informationsgewinnung und Funktionserfüllung unterschiedliche Abstraktionsebenen eines gegebenen Protokollstacks betrachtet werden. Im Gegensatz zu klassischen Kommunikationssystemen, bei denen nach dem ISO/OSI Modell eine strikte Kapselung der Funktionen erfolgt, sollen in Cross-Layer Ansätzen möglichst viele Informationen aus unterschiedlichen Ebenen ganzheitlich betrachtet werden, um so bessere Entscheidungen für die jeweiligen Aufgaben treffen zu können (siehe Abbildung 4.27).

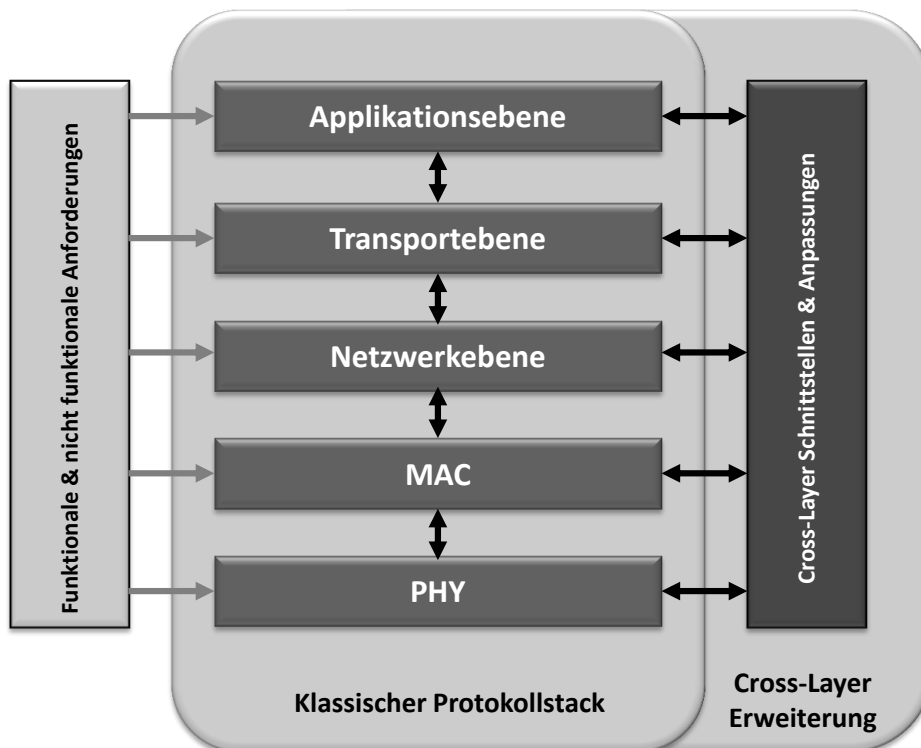


Abbildung 4.27: Cross-Layer Modell - hier dargestellt als Erweiterung klassischer Protokollstacks. Alternativ wird die Darstellung auch als Auflösung der traditionellen Funktionskapselung in Protokollebenen interpretiert.

Die im Rahmen dieser Arbeit verwendete Definition richtet sich nach [212] und beschreibt *Cross-Layer-Design* wie folgt:

”Cross-Layer Design im Kontext einer in Abstraktionsebenen strukturierten Systemarchitektur repräsentiert Algorithmen, Protokolle oder Verfahren, die eine Menge von Schnittstellen zur Verfügung stellen, um direkte Interaktionen zwischen den unterschiedlichen Ebenen zu ermöglichen (Interlayer Interactions). Die geschaffenen Interaktionsmöglichkeiten stellen dabei eine Übermenge der Funktionen aller Standardschnittstellen dar, welche durch das Ebenenreferenzmodell bereitgestellt werden.”

Folglich umfasst Cross-Layer-Design eine Menge von Funktionen und Interaktionen, die sich Informationen unterschiedlicher Protokollebenen bedienen. Es wird dabei *schichtenübergreifend* kommuniziert. Die Ziele eines solchen Designs umfassen neben der Effizienzsteigerung auch eine erhöhte Robustheit gegenüber Fehlinformationen sowie die Reduzierung von Protokolloverhead durch unnötige Kommunikation zwischen den Protokollebenen. Daraus ergeben sich wiederum verbesserte Datendurchsatzraten, reduzierte Latenzzeiten, eine bessere Fairness in der Topologie. Bei energieautarken Systemen kann in Folge dessen häufig eine Verlängerung der Batterielaufzeit erzielt werden.

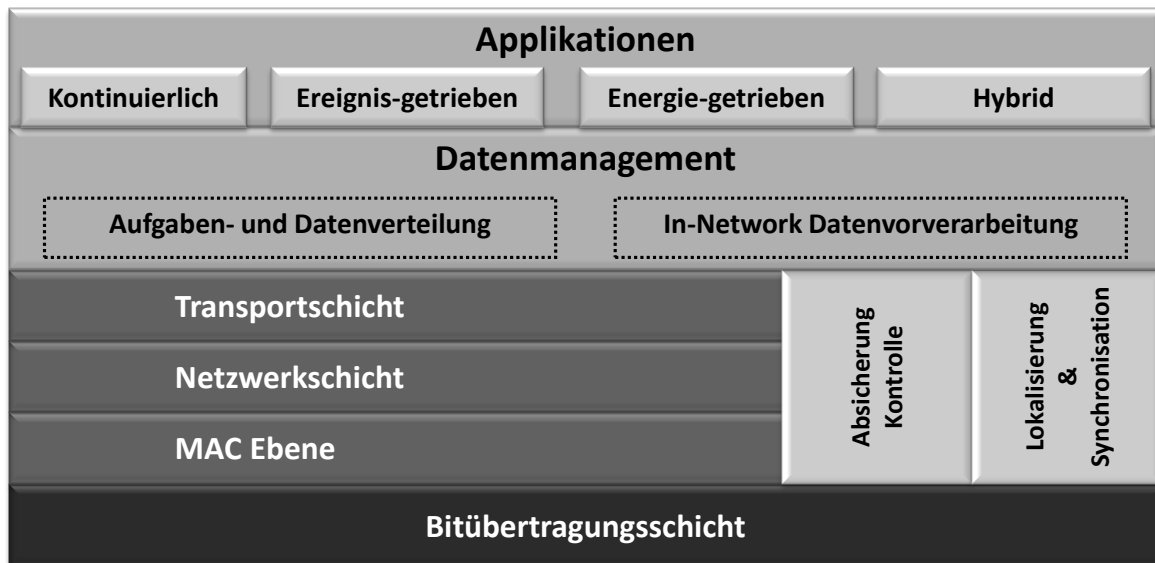


Abbildung 4.28: Cross-Layer Architektur nach *Lu's Reference Architecture*. Die vertikalen Schichten bzw. Funktionsblöcke sind für die Pflege der dynamischen Netzwerkinfrastruktur sowie Zusatzdienste, wie beispielsweise Lokalisierung und Synchronisation, zuständig. Durch die Schnittstellen auf unterschiedlichen Ebenen kann die Wissensbasis im System deutlich erweitert werden und effizientere Entscheidungen sind möglich.

Dem gegenüber stehen auf konzeptioneller Ebene auch Nachteile. Dies betrifft primär die partielle oder vollständige Auflösung des klassischen Schichtenmodells, wie es heute meist bei der Umsetzung von Kommunikationslösungen zur Anwendung kommt. Durch die Zusammenführung unterschiedlicher Informationsebenen ist eine Kapselung einzelner Funktionen in den Abstraktionsebenen nur noch eingeschränkt möglich, da sich die Entscheidungsregeln jeweils auf die erweiterte Cross-Layer-Wissensbasis stützen. Des Weiteren umfassen die im Rahmen von Cross-Layer und Middleware-Konzepten eingeführten vertikalen Funktionsblöcke umfangreiche Schnittstellen, welche sich ohne Anpassung des gesamten Protokollstacks nur schwer integrieren lassen. Abbildung 4.28 zeigt beispielhaft die Struktur einer typischen Cross-Layer Architektur (angelehnt an *Lu's Reference Architecture*).

4.5.1 Cross-Layer Routing

Am Beispiel von Routingfunktionalitäten lassen sich Cross-Layer Strategien sehr gut beschreiben. Hier nutzen klassische Algorithmen ausschließlich verfügbare Informationen auf Netzwerk-Ebene und agieren daher innerhalb der 3. Ebene des ISO/OSI Protokollstacks. Im Zuge der gesteigerten Mobilität in drahtlosen Ad Hoc und Sensornetzwerkszenarien liefern diese Daten jedoch häufig nur unzureichend Informationen für die Berechnung effizienter und stabiler Routenpfade. Betrachtet man jedoch die Gesamtmenge verfügbarer Informationen innerhalb der Systemarchitektur eines Netzwerkknotens, so erstreckt sich die nutzbare Wissensbasis über alle Protokollebenen. In direkter Konsequenz befassen sich viele Entwicklungen im Bereich effizienter Routingverfahren mit Cross-Layer Ansätzen [405]. Zur Routenberechnung/-optimierung können z.B. aktuelle Statusinformationen auf Medienzugriffsebene ausgewertet werden. Paketverlustrate, Antwortzeiten oder auch kritische Ereignisse, wie z.B. häufige Verbindungsabbrüche und stark einbrechende Datenraten, sind im Zuge der Routenberechnung von hoher Relevanz. Auch weitere hardwarenahe Kanalinformationen, so beispielsweise die Signalqualität, sind verwertbar [196, 414]. Oberhalb der Netzwerkebene kann die Menge der virtuellen Ende-zu-Ende Kommunikationskanäle ausgewertet werden, um Rückschlüsse auf die strategische Wichtigkeit des Knotens in der Gesamtstruktur zu ziehen. Dabei sind auch qualitative Analysen hinsichtlich der genutzten Dienste zu beachten. Oberhalb des verwendeten Transportprotokolls bieten nutzer- und anwendungsspezifische Rahmenparameter weitere Entscheidungsparameter.

Im Bereich Routing ist das SSA Protokoll⁷⁸ [142] ein typisches Cross-Layer Verfahren. Zur Bestimmung einer effizienten Route werden neben Netzwerkinformationen auch hardwarenahe Daten verwendet. So steht die Signalstärke als zentraler Qualitätsparameter ursprünglich nur auf Layer 1 beziehungsweise eingeschränkt innerhalb der Medienzugriffsebene auf Layer 2 zur Verfügung. SSA ist durch diese Informationen in der Lage, stabile und zuverlässige Pfade deutlich einfacher zu finden. Die Integration von netzwerkunabhängigen Systeminformationen, seien es Energieressourcen, Geodaten oder Information über die aktuelle Systemauslastung, ermöglichen innerhalb der Routenmetrik folglich präzisere Entscheidungen bei geringem Aufwand. Da die zusätzliche Komplexität bei Verwendung derartiger Strategien überschaubar ist, resultiert daraus speziell im Bereich verteilter, ressourcenbeschränkter Systeme ein wachsendes Interesse [212].

4.5.2 Cross-Layer Architekturen

Betrachtet man die gesamte Systemarchitektur, so findet durch die Anwendung von Cross-Layer Strategien ein Übergang von einem *Schichtenmodell* hin zu einem *komponentenbasierten Modell* statt, welches sich aus interagierenden Blöcken (*Modulen*) zusammensetzt. Zwischen den einzelnen Komponenten stehen wohldefinierte Schnittstellen zur Verfügung, jedoch sind diese nicht mehr in Hierarchien gekapselt. Um die Vorteile solcher Cross-Layer-Strategien nutzen zu können, müssen jedoch unterschiedliche Anforderungen erfüllt werden. Diese untergliedern sich nach [212] in:

⁷⁸Signal Stability-Based Adaptive Routing

4 Netzwerkmanagement

- *Design Coupling Approaches* (Schnittstellendesign der Komponenten)
- *Information Sharing Approaches* (Informationszugriffsanforderungen)
- *Global Performance Goals* (Anforderungen hinsichtlich der topologieweiten Leistungsfähigkeit)
- *Target Networks* (spezifische Anforderungen bezüglich der genutzten Netzwerkinfrastruktur)
- *Input Aspects* (Anforderungen an die Eingabe und an Informationsquellen)
- *Configuration Optimisations* (Optimierungen der Konfiguration, speziell im Kontext dynamischer Rekonfiguration)
- *Implementation* (Richtlinien und Anforderungen bei der Umsetzung)

Im Zuge einer praktischen Umsetzung stellt die TinyOS Plattform [80, 252] ein gutes Beispiel für eine solche Architektur dar. Sie gestattet den Informationsaustausch zwischen Komponenten unterschiedlicher Funktionsebenen über entsprechende Schnittstellen. Weitere bekannte Vertreter sind unter anderem Lu's Reference Architecture sowie die *Sensor Protocol Architecture*, welche in Abbildung 4.29 dargestellt wurde [212]. Das *Sensor Net Protocol* ist hier für das systemweite Ressourcenmanagement verantwortlich und bietet entsprechende Schnittstellen für die jeweiligen Funktionskomponenten.

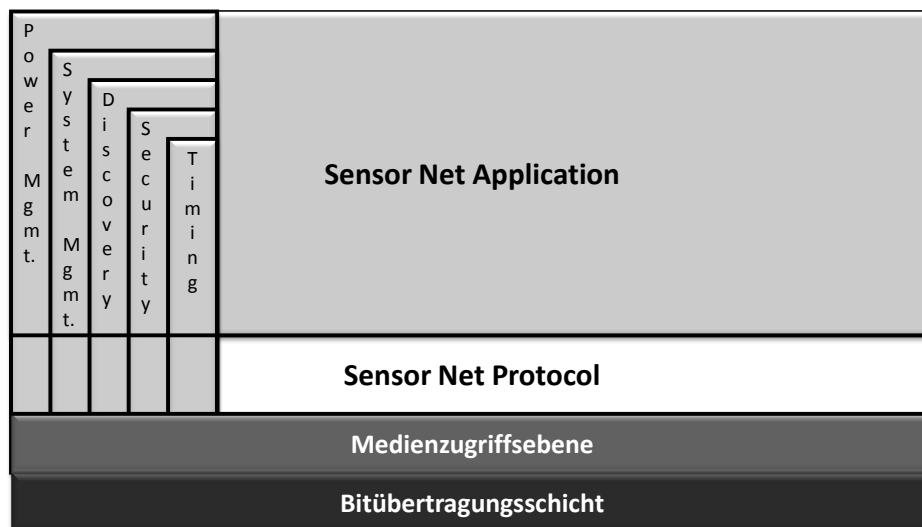


Abbildung 4.29: Funktionsblöcke innerhalb der komponentenbasierten *Sensor Protocol Architecture*.

TinyCubus [212] (siehe Abbildung 4.30) repräsentiert eine weitere, komplexe Cross-Layer-Architektur im Bereich heterogener, drahtloser Sensornetze. Das Konzept wurde von der Universität Stuttgart entwickelt und konzentriert sich auf dynamisch rekonfigurierbare Sensorknoten, die ihre Aufgaben je nach Mission und Rahmenbedingungen wechseln. *TinyCubus* selbst basiert auf TinyOS. Die Gesamtarchitektur untergliedert sich in drei Kernkomponenten:

Tiny Data Management Framework, *Tiny Cross Layer Framework* und *Tiny Configuration Engine*, welche zusammen eine flexible Rekonfiguration der Sensorknoten zur Laufzeit ermöglichen.

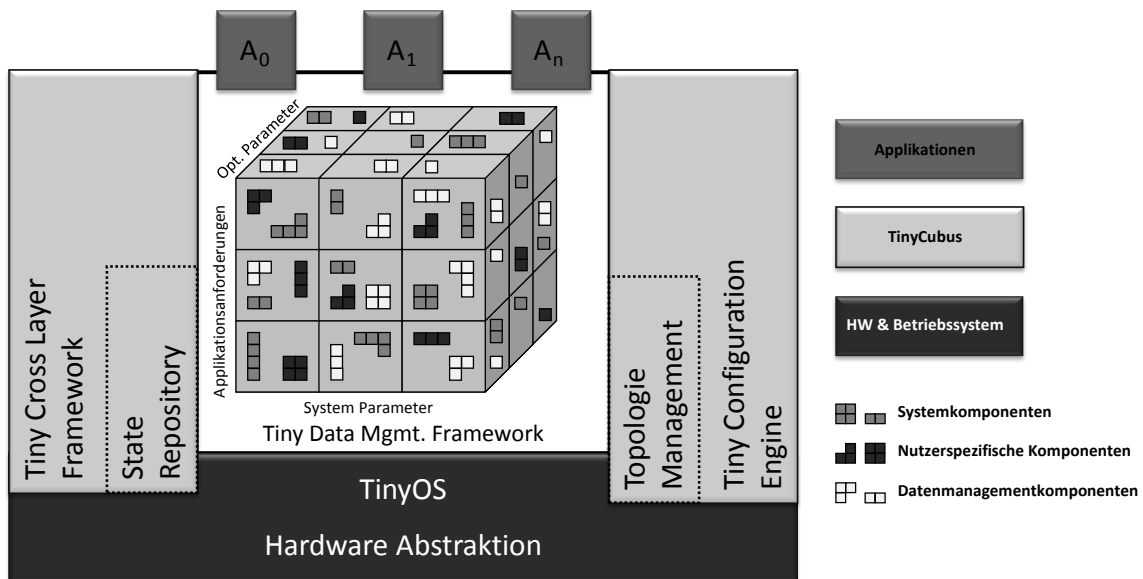


Abbildung 4.30: TinyCubus Architektur.

Auch *MobileMan* [120] sowie *CrossTalk* [396] stellen Cross-Layer Architekturen dar. Diese konzentrieren sich primär auf mobile Ad Hoc Netzwerke und weniger auf die stark ressourcenbeschränkten Hardwareplattformen im Bereich der Sensornetzwerke. Beide Architekturen ermöglichen es jedem Knoten in der Topologie, ihren eigenen Status gegenüber der Nachbarschaft zu evaluieren. Diese zusätzlichen Informationen fließen in die Algorithmen für Routing oder Load Balancing ein. *MobileMan* versucht dabei, die traditionelle Protokollstack-Architektur zu erhalten. Die zusätzliche Funktionalität wird mittels separater Schnittstellen realisiert. So können Entwickler weiterhin Protokolle für einzelne Ebenen entwickeln und diese später bei Bedarf in die *MobileMan* Architektur integrieren. *CrossTalk* basiert auf einer anderen Strategie und fasst die unterschiedlichen Informationen auf zwei Ebenen zusammen. Auf lokaler Ebene fließen alle knotenintern verfügbaren Daten ein. Auf globaler Ebene kommen verteilte Netzwerk- und Statusinformationen aus der Topologie hinzu. Somit ist es dem jeweiligen Knoten möglich, die lokale und globale Sicht zu vergleichen und Entscheidungen sinnvoll abzuwägen. In der Literatur wird hier beispielsweise die dynamische Anpassung des Duty Cycle Wertes aufgeführt [212]. Ist der Wert im Vergleich zum Rest der Topologie deutlich zu hoch, wird er entsprechend gesenkt um Energieressourcen zu schonen.

TIMELY [100] ist eine adaptive Ressourcenmanagement-Architektur von der Universität Illinois, welche Cross-Layer Konzepte speziell zur Energieeffizienzsteigerung nutzt. Dabei fokussiert *TIMELY* zwei wesentliche Problemstellungen. Zum einen ist dies die dynamische Kanalallokation und -reallokation. Weiterhin ist die Architektur für die frühzeitige und ebenenübergreifende Ressourcenplanung verantwortlich.

4.5.3 RMU - Cross-Layer-Ressourcenmanagement

Aus den optimierten Cross-Layer Systemarchitekturen und Protokollen ergeben sich viele Ansatzpunkte zur Steigerung der Energieeffizienz [228] auf lokaler und globaler Ebene. Aus dem gezielten Zusammenspiel aller Protokollebenen zur Bereitstellung einer umfassenden Wissensbasis für Kommunikationsprozesse resultieren erhebliche Vorteile in puncto Verarbeitungsgeschwindigkeit und Entscheidungsgüte [221, 250].

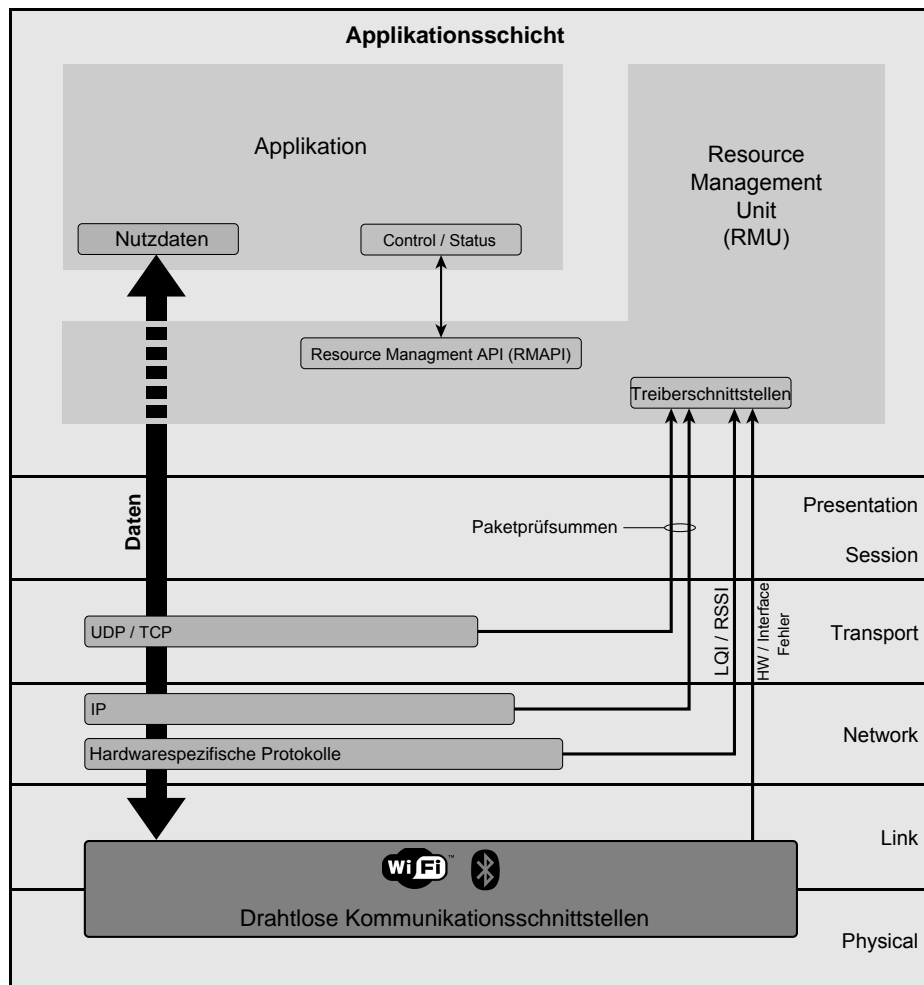


Abbildung 4.31: Die Resource Management Unit (RMU) arbeitet auf Applikationsebene parallel zu den Nutzerapplikationen und bietet auf Basis standardisierter Schnittstellen eine erweiterte Wissensbasis, die für Cross-Layer Routingkonzepte genutzt werden kann.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde untersucht, inwieweit diese Vorteile nutzbar sind. Gleichzeitig war es ein wichtiges Ziel, konzeptionelle Schwachstellen bekannter Cross-Layer-Ansätze zu identifizieren. Dies betrifft primär die Auflösung des klassischen Schichtenmodells. Aus dieser Motivation entstand ein umfassendes *Cross-Layer-Ressourcenmanagement Konzept*, welches im Gegensatz zu TIMELY ganzheitlich auf der Applikationsebene arbeitet. Somit können die zentralen Nachteile vieler bekannter Architekturen vermieden beziehungsweise umgangen werden. Das Konzept nutzt standardisierte Systemschnittstellen für unterschiedliche Status-

und Systeminformationen [33, 34, 36]. Die zentrale Instanz, *RMU*⁷⁹ genannt, ist in der Lage, Kommunikationsressourcen auf Applikationsebene für alle Prozesse zu verwalten und Kommunikationskanäle gezielt zu koordinieren. Durch die Integration verschiedener Informationsebenen steht eine umfassende Wissensbasis für die Entscheidungsfindung zur Verfügung. Abbildung 4.31 verdeutlicht diese Integration der RMU in die Kommunikationsarchitektur.

Für die Aufgaben der RMU wird eine dedizierte *API*⁸⁰ genutzt - die *RMAPI*⁸¹. Für Applikationen stellt sie eine Zwischenschicht dar, welche Verbindungsanfragen stellvertretend für das Betriebssystem entgegennimmt, analysiert und entsprechend der aktuellen Netzwerksituation über ein optimales Interface koordiniert. Abbildung 4.32 zeigt die Anwendung des Ressourcenmanagements an einem einfachen Beispiel.

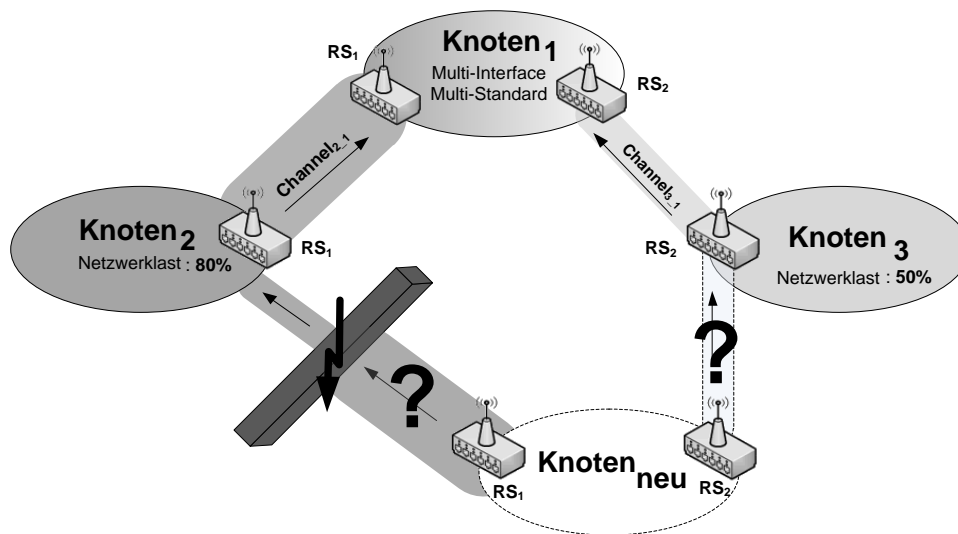


Abbildung 4.32: Ressourcenmanagement am Beispiel der Kanalallokation.

Hierbei soll ein neuer Knoten $Node_{new}$ in die bestehende Topologie integriert werden. Dabei stehen unterschiedliche Möglichkeiten der Anbindungen zur Verfügung, sowohl über Funkstandard 1 (RS_1) als auch über RS_2 als schmalbandiger Backup-Kanal. Aufgrund von Hindernissen sinkt jedoch die effektiv nutzbare Datenrate über RS_1 erheblich. In Abhängigkeit der applikationsspezifischen Anforderungen kann die RMU benötigte Ressourcen kalkulieren und einen geeigneten Kommunikationskanal bereitstellen. Dabei müssen alle bereits gebundenen Kapazitäten berücksichtigt werden.

Multi-Interface, Multi-Standard Kommunikationskonzepte wie z.B. *EAN*⁸² [8, 15, 19–21] können mit diesem Konzept hervorragend kombiniert werden. Unter der Voraussetzung eines kompatiblen Routingverfahrens, beispielsweise EBCR oder auch das in [405] beschriebene Routing-Schema, nutzen die Netzwerkknoten bei Multi-Hop Kommunikation eine erweiterte Metrik, die von der RMU zur Verfügung gestellt wird.

⁷⁹Resource Management Unit

⁸⁰Application Programming Interface

⁸¹Resource Management Application Programming Interface

⁸²Embedded Ambient Networking

4.6 Zeitsynchronisation

Sensor-Aktor-Netzwerke stellen besondere Anforderungen in Bezug auf die Genauigkeit der verfügbaren Informationen und die zeitlichen Zusammenhänge zwischen den einzelnen Daten. Alle Kommunikationsparameter wie Übertragungsverzögerungen, Paketverlustrate, sowie die Paketreihenfolge wirken sich bei zeitkritischen Anwendungen auf die Güte der Messdaten aus. In den jeweiligen Szenarien müssen koordiniert Sensordaten verarbeitet, ausgewertet und anschließend entsprechende Reaktionen ausgelöst werden.

4.6.1 Ursachen & Auswirkungen

Eine zeitliche Koordinierung trägt entscheidend dazu bei, die Messqualität zu erhöhen und die Energieressourcen effizient zu nutzen. Dies umfasst sowohl die lokale Synchronisation aller Ereignisse und Komponenten auf dem Knoten, als auch das koordinierte Zusammenwirken aller Teilsysteme zur Erfüllung globaler Zielstellungen. Das folgende Beispiel in 4.33 zeigt die Problematik anhand eines Monitoring-Szenarios für bewegte Objekte.

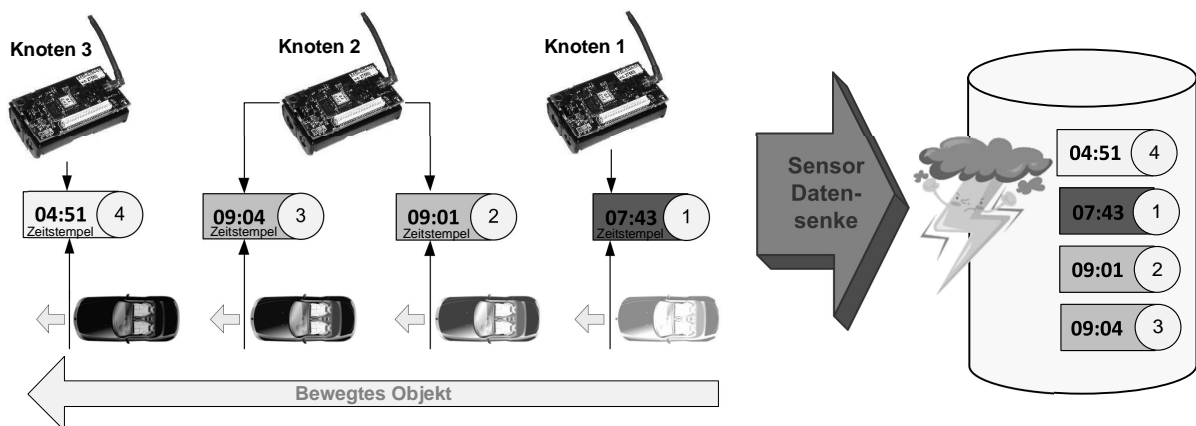


Abbildung 4.33: Relevanz von Zeitsynchronisation im Bereich WSN.

Es wird hierbei deutlich, dass durch abweichende Zeitgeber in einem verteilten Detektionssystem das Nachverfolgen eines bewegten Objektes nur eingeschränkt möglich ist. Durch die unterschiedlichen Zeitstempel der einzelnen Detektoren ist eine nachträgliche Analyse des zeitlichen Verhaltens ausgeschlossen. In der Daten-senke können die Informationen ohne zusätzliche Mechanismen nicht sinnvoll verwertet werden. Aber selbst unter der Gegebenheit einer synchronisierten Netzwerktopologie driften die Zeitgeber eines jeden Subsystems stetig auseinander. Die Gründe für derartige Abweichungen sind dabei vielfältig [239]:

Temperaturabweichungen:

Durch die Platzierung der einzelnen Knoten können Differenzen in den Umgebungstemperaturen zu Abweichungen der Zeitgeber führen.

Phasenrauschen:

Über externe Schnittstellen und die einzelnen Komponenten auf Systemebene kann ein Rauschen zu Abweichungen des Zeitgebers führen.

Frequenzrauschen:

Ungenauere interne Quarzoszillatoren führen zu Abweichungen in der Taktrate und folglich des Zeitsignals

Asymmetrische Latenzen:

Im Falle eines Zeitsynchronisationsverfahrens in drahtlosen Netzwerktopologien kann es bei einer bidirektionalen Kommunikation zu unterschiedlichen Paketlaufzeiten kommen, was die Berechnung des korrekten Zeitstempels negativ beeinflusst.

Störungen im Zeitgeber:

Sprünge im Zähler der Zeitgeber durch Hardware- oder Softwareanomalien.

Über eine längere Systemlaufzeit betrachtet, wachsen diese minimalen Abweichungen zunehmend an und machen ein koordiniertes Handeln unmöglich (siehe Abbildung 4.34).

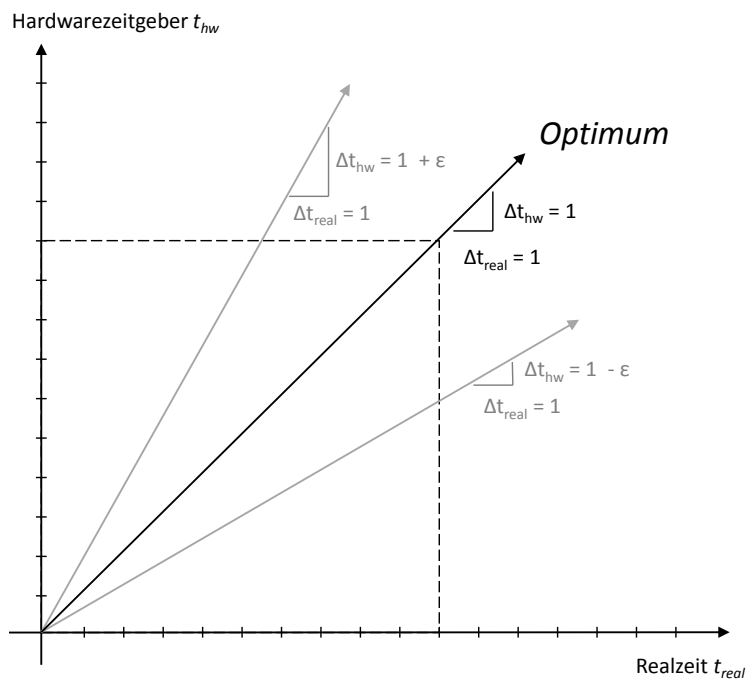


Abbildung 4.34: Auseinanderdriften der hardwareseitigen Zeitgeber und der Realzeit.

4.6.2 Klassifizierung & Umsetzung

Zeitsynchronisationsverfahren repräsentieren folglich wesentliche Mechanismen zur Steigerung der Informationsqualität und sind von großem Interesse sowohl für wissenschaftliche Betrachtungen als auch für Entwicklungen im kommerziellen Umfeld. Hierbei existieren mehrere qualitative Parameter und Eigenschaften, die im Kontext von Zeitsynchronisati-

onsverfahren von besonderem Interesse sind, auch in Hinblick auf eine Optimierung der Energieeffizienz [402]:

Genauigkeit:

Maximale bzw. relative Abweichung von der Zeitreferenz. Die notwendige Genauigkeit ist dabei sehr stark applikationsspezifisch.

Berechnungskomplexität:

Steht in direktem Zusammenhang mit der Genauigkeit und hat wiederum hohen Einfluss auf die gebundenen Energieressourcen, die für die Synchronisation benötigt werden. Die Komplexität bezieht sich hierbei primär auf die Berechnungszeit und folglich auf den funktionalen Aufwand

Ressourcenanforderungen:

Anforderungen an Speicher und Netzwerkkapazitäten.

Fehlertoleranz / Robustheit:

Bezieht sich auf die Ausfallsicherheit bei einem Betrieb in einem autarken System. Störeinflüsse sollen hier im Idealfall nur geringe Einflüsse auf den Synchronisationsprozess und die Genauigkeit haben.

Skalierbarkeit / Kompatibilität:

Beschreibt die Eigenschaft, auf welche Zielsysteme das Verfahren anwendbar ist. Bestehen hardware- oder softwareseitig spezifische Anforderungen an die Systemarchitektur, so schränkt dies die Kompatibilität und Flexibilität stark ein. Gleiches gilt für das Verhalten bei großen Topologien und erhöhter Knotendichte. Existieren hier harte Grenzwerte, so wirkt sich dies negativ auf die Skalierbarkeit aus.

Die grundlegende Problematik der *Zeitsynchronisation* ist auf dem Gebiet der verteilter, eingebetteter Kommunikationssysteme allgegenwärtig [348, 363]. Sehr viele Verfahren und Konzepte arbeiten ausschließlich auf einer einheitlichen Zeitbasis effizient und zuverlässig. Eine synchronisierte Zeitbasis wird beispielsweise bei einem Medienzugriff per Zeitmultiplex oder für das gleichzeitige Aufwachen aller Geräte benötigt. Auf diese Weise können klassische Netzwerktopologien die verfügbaren Energieressourcen durch optimierte *sleep-Phasen* schonen. Verfahren zur Zeitsynchronisation lassen sich nach den folgenden Klassifizierungen unterscheiden:

- *kontinuierlich* ↔ *nur bei Bedarf*
- *absolut* ↔ *relativ*
- *hardware-* ↔ *software-basiert*
- *global* ↔ *lokal*
- *zentral* ↔ *verteilt*
- *Zeitpunkte* ↔ *Intervalle*

- *Skalentransformation* \leftrightarrow *Uhrensynchronisation*
- *Divergenz* \leftrightarrow *Offset*

Ungenauigkeiten der einzelnen Verfahren resultieren im Wesentlichen aus Latenzen, die sich durch Signallaufzeiten ergeben. Die Verfahren müssen somit versuchen, diese Verzögerungen möglichst exakt in die Berechnungen zu integrieren. Die Latenz L_{gesamt} zwischen Sender und Empfänger ergibt sich dabei aus:

$$L_{gesamt} = \sum_{i=1}^4 P_i$$

P_1 : <i>Sendezeit</i>	- Aufbau der Nachricht - Verzögerung durch das Betriebssystem - Datenübertragung zum Netzwerkinterface
P_2 : <i>Zugriffszeit</i>	- Wartezeit bis zum Zugriff auf den Übertragungskanal
P_3 : <i>Ausbreitungszeit</i>	- Verweildauer auf dem Medium (vernachlässigbar)
P_4 : <i>Empfangszeit</i>	- empfängerseitige Verarbeitung der Nachricht durch das Netzwerkinterface, Bearbeitung durch die jeweiligen Protokollschichten bis auf Anwendungsebene

Die aufgeführten Parameter werden in Abbildung 4.35 im Rahmen einer RTT ⁸³ Berechnung dargestellt. Die beiden Synchronisationspartner *SyncCaller* und *SyncCallee* kommunizieren dazu ein Synchronisationspaket. Die dabei auftretenden Verzögerungen sind klar ersichtlich und müssen bei der Berechnung eines synchronen Zeitsignals beachtet werden.

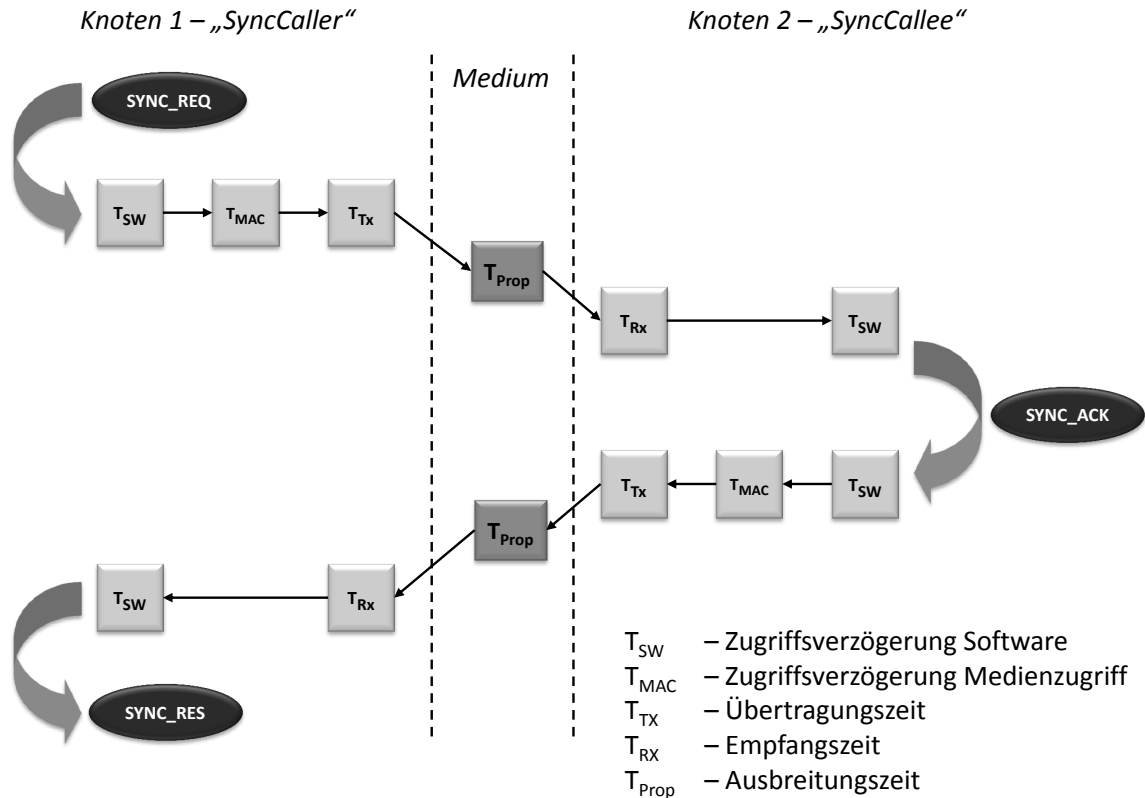
Der Sender startet die Berechnung mit einem Synchronisationsrequest *SYNC_REQ* und sendet dieses mit entsprechender Priorität an den Synchronisationspartner. Dieser antwortet mit einem entsprechenden Acknowledgement *SYNC_ACK*, welches anschließend vom Sender ausgewertet werden kann. Auf Basis der Ergebnisse in diesem Antwortpaket *SYNC_RES* kann eine entsprechende Synchronisation des Zeitsignals erfolgen.

Die Abschätzung der einzelnen Übertragungslatenzen ist aufgrund der vielen Parameter schwierig vorhersagbar und nicht präzise. Viele Algorithmen gehen im Zuge einer Vereinfachung von *symmetrischen Latenzen* aus. Durch diese Annahme kann die Latenzzeit L_{gesamt} auf einfache Art und Weise in die Berechnungen einfließen, da sie nun für beide Kommunikationsrichtungen als identisch angenommen wird.

Der bekannteste Vertreter unter den Zeitsynchronisationsprotokollen ist *NTP*⁸⁴, welches je nach vorhandener Infrastruktur Genauigkeiten im Bereich von 10ms bis 200 μ s ermöglicht. NTP wurde im Rahmen des RFC 958 [271] 1985 veröffentlicht und primär für drahtgebundene Netzstrukturen konzipiert. Im Bereich mobiler Ad Hoc Netzwerke ergeben sich aufgrund unterschiedlicher Übertragungsmedien und Netzwerkstrukturen einige Einschränkungen hinsichtlich asynchroner Latenzen und vielfältigen Störeinflüssen.

⁸³Round-Trip-Time

⁸⁴Network Time Protocol

Abbildung 4.35: Zeitsynchronisation auf Basis einer *Round-Trip-Time* Messung.

Die meisten weiterführenden Synchronisationsmechanismen für drahtlose Kommunikationsszenarien arbeiten auf MAC und PHY Ebene oder brauchen hier entsprechenden Zugriff. *LTS*⁸⁵ [171], *TDP*⁸⁶ [361] sowie *TPSN*⁸⁷ [161] und *RBS*⁸⁸ Verfahren [146] wurden speziell für den Bereich mobiler Sensornetze entwickelt. *RBS* fokussiert dabei die dauerhafte Synchronisierung der Zeitgeber und nicht den zyklischen Abruf einer neuen Referenzzeit. Das Verfahren versucht primär, den kritischen Pfad für den Synchronisationsprozess zu verkürzen (dargestellt in Abbildung 4.36).

Dies erfolgt, indem bei *RBS* alle Empfänger den eigenen Zeitstempel mit dem des Referenzzeitsignals vergleichen, anschließend den durchschnittlichen Zeitdrift errechnen und daraufhin ihren eigenen Taktgeber nachkalibrieren. Dieser Prozess wird periodisch in vordefinierten Zeitabständen wiederholt. Die sich daraus ergebende Genauigkeit von wenigen Mikrosekunden erfordert jedoch einen erheblichen Protokolloverhead in Form von zusätzlicher Netzlast.

⁸⁵Lightweight tree-based Time Synchronization

⁸⁶Time Diffusion Synchronization Protocol

⁸⁷Timing-sync Protocol for Sensor Networks

⁸⁸Reference-Broadcast Synchronization

4 Netzwerkmanagement

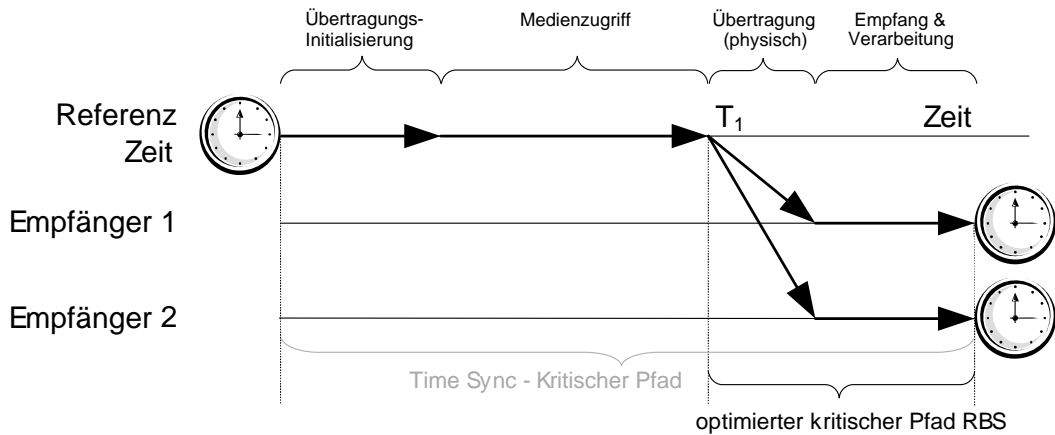


Abbildung 4.36: Kritischer Pfad für Zeitsynchronisation. RBS verkürzt diesen Pfad.

LTS nutzt dabei die paarweise Synchronisation des Zeitsignals in der Topologie. Bei n Knoten sind dabei nur $n - 1$ Schritte notwendig. Im Vergleich zu Verfahren die auf Flooding basieren, beispielsweise *FTSP*⁸⁹ oder RBS, welches Broadcasts auf der physikalischen Ebene nutzt, reduziert sich dabei die Netzlast erheblich. Mit Hilfe zusätzlicher Algorithmen zur Bildung minimaler Spannbäume kann LTS auch in hoch skalierten Multi-Hop-Szenarien effizient eingesetzt werden.

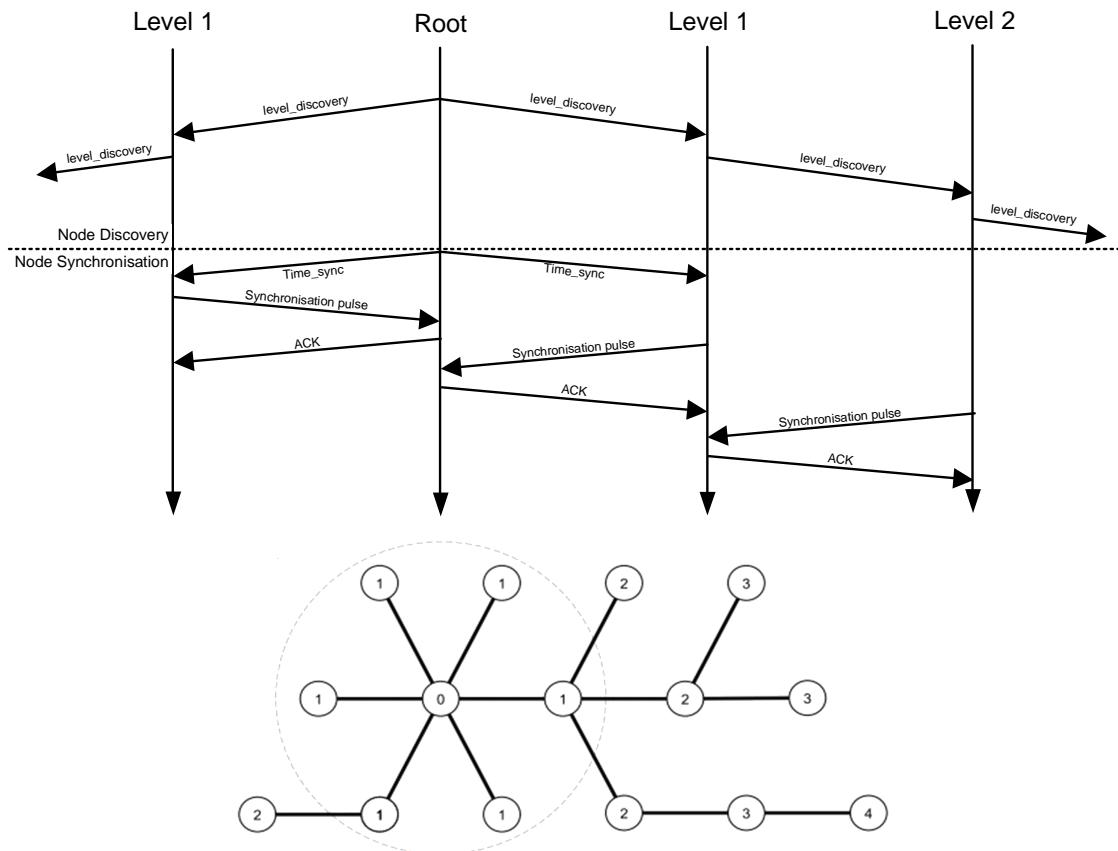


Abbildung 4.37: TPSN Phasen mit der Synchronisation auf den jeweiligen Ebenen.

⁸⁹Flooding Time Synchronization Protocol

TPSN bietet eine ähnliche Genauigkeit wie RBS und benötigt keinen MAC Zugriff. Der Synchronisierungsprozess umfasst ein aufwendiges Handshake-Verfahren und arbeitet in zwei Phasen - *Node Discovery* zum Auffinden vorhandener Knoten sowie die eigentliche *Sync* Phase, in der die vorhandene Topologie ebenenweise synchronisiert wird (Abbildung 4.37). Durch die periodische Knotensuche werden Änderungen in der Topologie zuverlässig erkannt. Jedoch ist die algorithmische Komplexität sowie die benötigte Zeit bis zu einem synchronen Zustand sehr hoch.

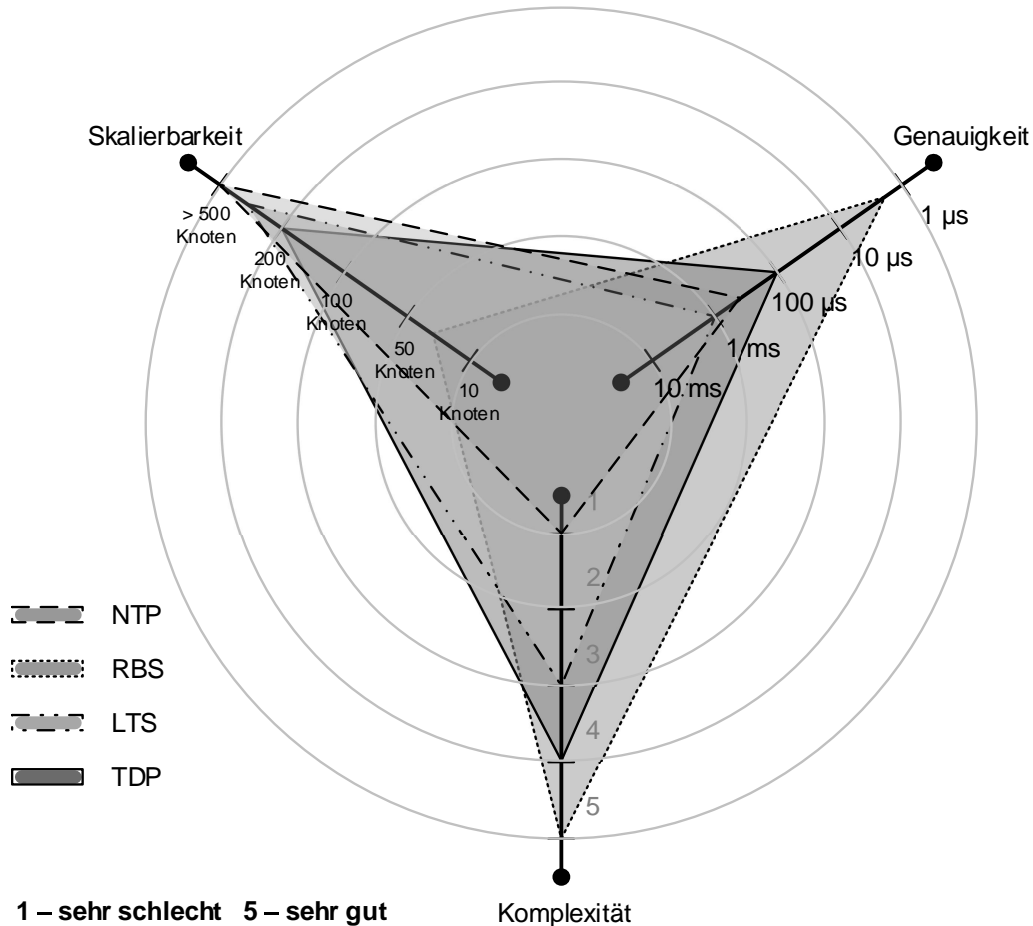


Abbildung 4.38: Vier Verfahren zur Zeitsynchronisation im Vergleich: NTP, RBS, LTS und TDP. TDP bietet hier den besten Kompromiss zwischen Skalierbarkeit, Genauigkeit und Komplexität.

Weitere bekannte Verfahren im Bereich mobiler Ad Hoc und Sensornetze umfassen unter anderem *DMTS*⁹⁰ [360] sowie *TinySync*. Das *TSync* Verfahren mit dem Subprotokoll *HRTS*⁹¹ [128] synchronisiert alle Knoten in Sendereichweite auf Basis von Broadcast Mechanismen. Zusätzlich wird ein Synchronisationsbaum generiert, um nachfolgend die gesamte Topologie zu synchronisieren. Um die unterschiedlichen Ausprägungen verschiedener Synchronisationsverfahren zu veranschaulichen, vergleicht und bewertet Abbildung 4.38 im Folgenden ausgewählte Vertreter in Hinsicht auf Skalierbarkeit, Genauigkeit und Komplexität.

⁹⁰Delay Measurement Time Synchronization

⁹¹Hierarchy Referencing Time Synchronization

Je nach Anwendungsszenario müssen diese protokollspezifischen Eigenschaften beachtet werden. Durch das Zusammenführen der einzelnen Merkmale lassen sich Rückschlüsse auf die gebundenen Aufwände in Form von Energiekosten ziehen. Eine genaue Spezifikation aller Rahmenparameter, primär Topologiegröße, Mobilitätsgrad und Genauigkeit, ist daher entscheidend für die Auswahl eines geeigneten und effizienten Zeitsynchronisationsverfahrens.

4.6.3 CE-TimeSync

Im Rahmen dieser Arbeit wurde auch ein neues, flexibles Zeitsynchronisationsverfahren konzipiert, implementiert und anschließend evaluiert [24, 32]. *CE-TimeSync*⁹² arbeitet im Gegensatz zu den meisten bekannten Ansätzen ausschließlich auf Applikationsebene und ist damit unabhängig von der jeweiligen Hardwareplattform. Durch die geringe Komplexität ist CE-TimeSync besonders für den Einsatz in SANET und WSN Umgebungen geeignet. Die spezifizierte Genauigkeit im Bereich ± 10 ms ist dabei hinreichend für einen Großteil möglicher Einsatzszenarien.

Das Netzwerk wird dabei als eine Baumstruktur organisiert, bei dem die Wurzel eine Daten-senke repräsentiert. Wie bei TPSN wird die Topologie auch hier ebenenweise synchronisiert. Jedoch wird keine *Discovery* Phase benötigt. Jeder Knoten bezieht seine Referenzzeit von seinem Vaterknoten im Baum. Die Abweichung pro Ebene darf dabei nicht mehr als 10 ms betragen. Unter der Annahme, dass eine Gesamtabweichung des Zeitstempels von 100 ms in der Topologie grenzwertig für die praktische Anwendung ist, kann die Baumstruktur somit mindestens 10 Ebenen umfassen. Folglich können auch sehr große Topologien hinreichend effizient synchronisiert werden.

CE-TimeSync arbeitet auf Basis von zwei Synchronisationsphasen. Eine erste gleicht die absolute Zeit mit der des Referenzsignals ab. Ziel in dieser Phase ist die Annäherung an die Referenzzeit auf maximal 10% Abweichung. In der anschließenden Optimierungsphase wird versucht, die Geschwindigkeit des knoteninternen Taktgebers anzupassen, um den kontinuierlichen Zeitdrift zu verlangsamen beziehungsweise auszugleichen. Die Synchronisation ist abgeschlossen, wenn die Abweichung weniger als 1% beträgt. Abbildung 4.39 zeigt den entsprechenden Zustandsgraphen von CE-TimeSync.

Ausgehend von nicht synchronisierten Zustand (*NOSYNC*) werden Sync-Pakete mit Referenzzeitsignalen empfangen und analysiert (*STAGE1*). Nach Abschluss der ersten Phase wechselt das Verfahren in den Zustand *STAGE2*, wo die Optimierung des internen Taktgebers erfolgt. Hier dient jedes eintreffende Sync-Paket der weiteren Feinabstimmung. Der Synchronisationsprozess endet mit Erreichen einer entsprechenden Güte im *SYNC* Zustand.

⁹²CE steht für den Computer Engineering (Technische Informatik) Lehrstuhl der TU Chemnitz

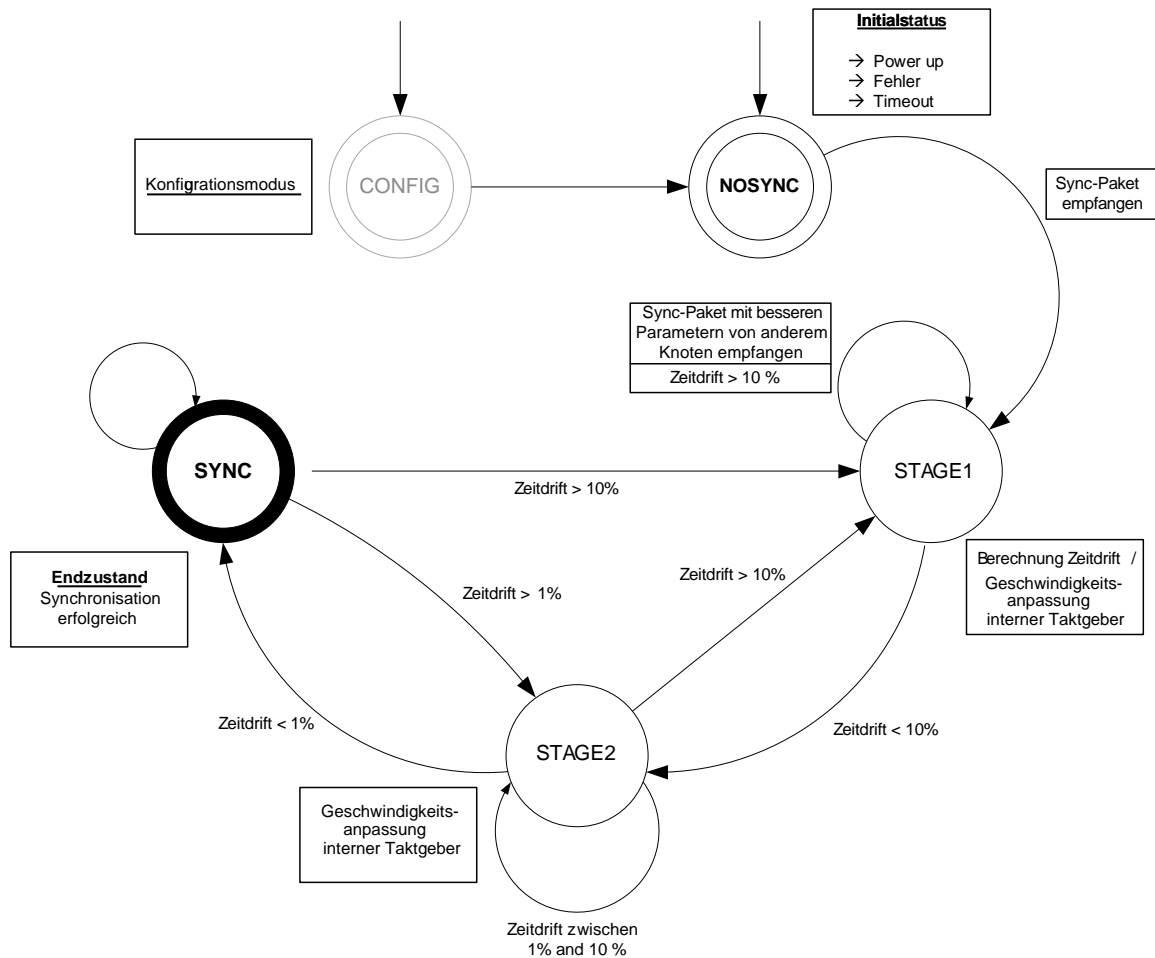


Abbildung 4.39: Vereinfachter Zustandsgraph für das CE-TimeSync Verfahren.

4.6.4 Evaluierung CE-TimeSync

In Rahmen der Evaluation des CE-TimeSync Verfahrens kam die *PLANet* Plattform zum Einsatz [20, 21]. Für nähere Informationen zur Hardware sei an dieser Stelle nochmals auf Kapitel 8 verwiesen.

Das umgesetzte Messszenario besteht aus vier Knoten und entspricht einer einfachen Topologie mit 2 Ebenen (siehe Abbildung 4.40 links). Per Oszilloskop konnten dabei sehr gut die Synchronisationspunkte auf den jeweiligen Knoten gemessen werden. Die Messungen erfolgten direkt an der Hardware und wurde über entsprechende Pins abgegriffen. Ungenauigkeiten auf Softwareebene durch Betriebssysteme oder applikationsseitige Laufzeitverzögerungen konnten so umgangen werden. Abbildung 4.40 zeigt neben dem Messaufbau die gemessenen Zeitdifferenzen bei einer Langzeitmessung über 2 Stunden bei 120 Synchronisationsphasen.

Die obere Linie zeigt dabei die Zeitreferenz in der Senke. Die Synchronisierung jedes Knoten wird nun über einen getrennten Messkanal aufgezeichnet. Jede fallende Taktflanke repräsentiert dabei eine erfolgreiche Synchronisation zwischen Referenzzeit und der lokalen Zeit auf dem jeweiligen Knoten. Der Zeitdrift zwischen den Knoten beträgt dabei minimal -7.2 ms bis

maximal +8.8 ms. Im Durchschnitt wurden etwa 5 ms Abweichung auf jeder Ebene gemessen [24]. Somit liegen die Ergebnisse deutlich innerhalb der maximal zulässigen beziehungsweise spezifizierten Toleranzen von 10 ms pro Ebene.

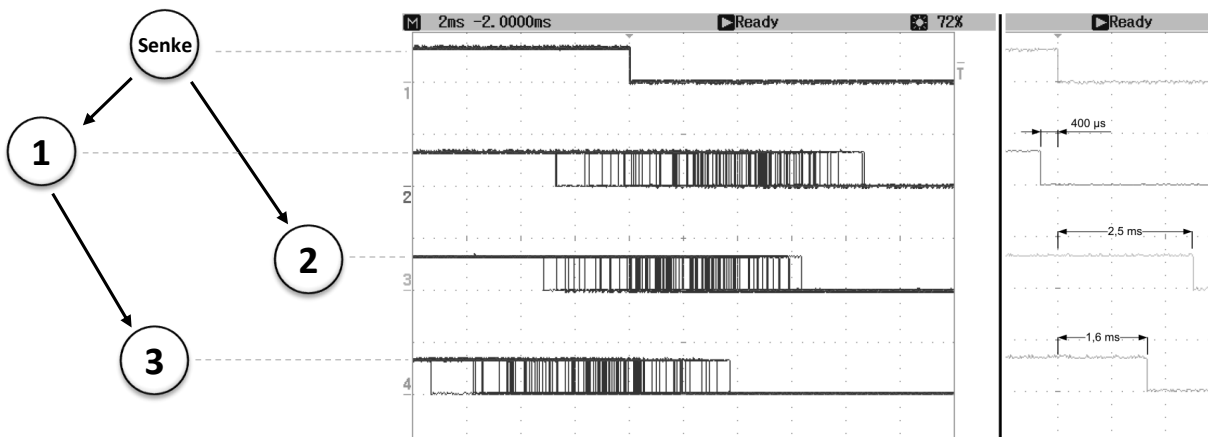


Abbildung 4.40: CE-TimeSync Evaluierung: Links Messaufbau mit PLANet-Knoten, rechts die Messergebnisse der Langzeitmessung mit 120 Synchronisationspunkten über 2 Stunden.

Softwareseitig benötigt der erste, initiale Synchronisationsprozess im Durchschnitt 3 Iterationsschritte bis zur Erfüllung des Schwellwertes von 1%. Bei dem periodischen Wiederaufruf der Synchronisation sind dann aber meist nur noch minimale Korrekturen mit einer Iterationsstufe nötig. Hier kommen die Vorteile der Taktgeberanpassung zum Tragen. Über eine längere Laufzeit können folglich die Synchronisationsperioden kontinuierlich verlängert werden, was sich deutlich positiv auf die Energiebilanz auswirkt.

Zusammenfassend konnte gezeigt werden, dass die Mechanismen von CE-TimeSync auch unter Realbedingungen effizient und robust arbeiten. Die erzielten Ergebnisse und der geringe Ressourcenbedarf lassen die Schlussfolgerung zu, dass auch eine Umsetzung in groß skalierten Topologien hinreichend gute Genauigkeitswerte aufweisen.

4.7 Lokalisierung & Ortung

In verteilten, eingebetteten Systemarchitekturen stellt neben der Zeitsynchronisation vor allem die Lokalisierung einzelner Knoten einen interessanten und vielversprechenden Ansatzpunkt für Optimierungen dar [263]. Dabei ist zwischen den Begriffen *Ortung* und *Lokalisierung* zu unterscheiden. Im Rahmen dieser Arbeit werden folgende Definitionen genutzt:

„Lokalisierung befasst sich mit der Positionsabschätzung von Objekten. Hierbei können sowohl absolute als auch relative Positionsangaben zum Einsatz kommen. Die erreichte Güte der Informationen ändert sich dabei je nach Rahmenbedingungen dynamisch und kann stark variieren.“

”Ortung bezieht sich auf die absolute Positionsbestimmung von Objekten in Weltkoordinaten. Ortung stellt folglich ein Teilgebiet der Lokalisierung dar, bei dem meist eine erhöhte Genauigkeit gefordert wird.”

Grundlegende Prinzipien zur Lokalisierung umfassen dabei neben bildverarbeitenden Ansätzen (optischer Fluss, Laser) und schallbasierten Verfahren (Echolot) vor allem funkgestützte Konzepte. Die möglichen Anwendungsbereiche und Rahmenbedingungen im Logistikumfeld wurden in [44] diskutiert. Mit dem Anwendungskontext verteilter, mobiler eingebetteter Systeme arbeiten wiederum unterschiedliche Routing- und Topologieoptimierungsverfahren auf Grundlage relativer oder absoluter Positionsangaben beziehungsweise Positionsabschätzungen. Geoinformationen erleichtern hierbei die Datenverarbeitung erheblich und ermöglichen somit ressourcenschonende Verfahren in den unterschiedlichen Optimierungsbereichen.

Um entsprechende Positionsangaben zu erhalten, wurden unter anderem spezielle Systeme entwickelt, welche Objekte mit einer hohen Genauigkeit orten können, beispielsweise *GPS*⁹³ (USA), *Galileo* (Europa) sowie *GLONASS* (Russland) und *Compass* (China) [52, 247]. Diese dedizierten (*Tracking*-)Systeme und die genutzten Technologien stehen jedoch nicht im Fokus dieser Arbeit.

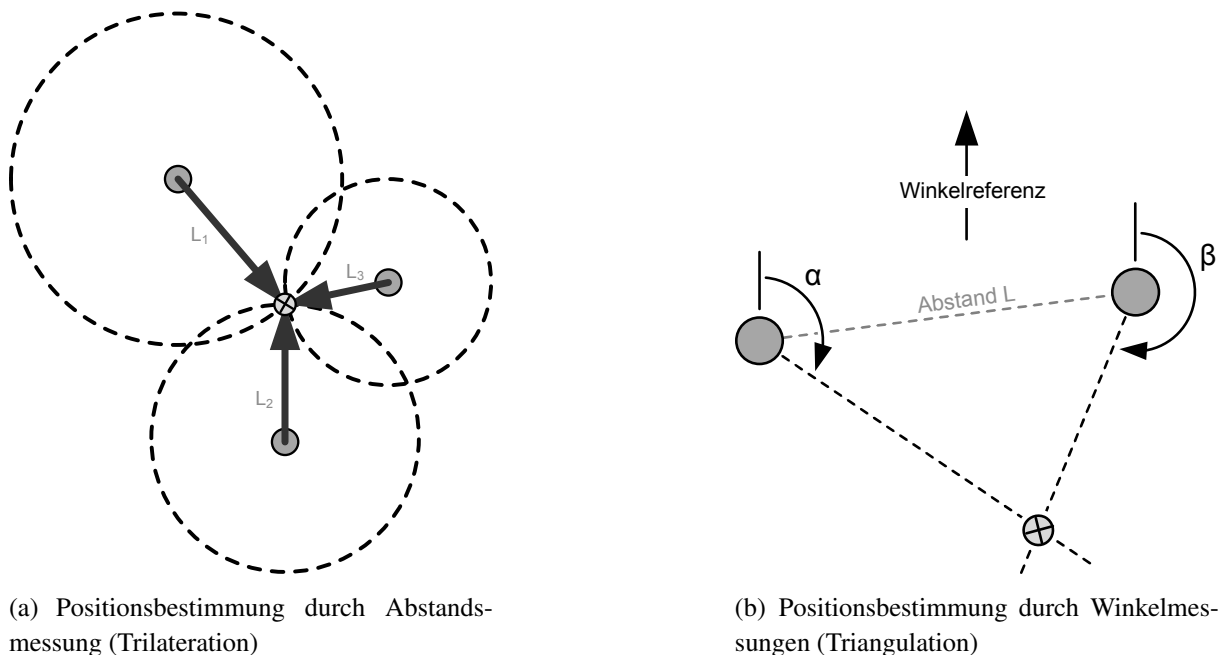


Abbildung 4.41: Zwei wesentliche Verfahren zur relativen Positionsbestimmung mittels *Distanzmessung* (a) und *Winkelmessung* (b).

Primäres Ziel der *Objektlokalisierung* im Kontext mobiler Ad Hoc Netzwerke ist die Gewinnung absoluter oder relativer Positionsdaten ohne dedizierte Ortungssysteme [99, 188, 368]. Ausschließlich auf Basis verfügbarer Parameter der genutzten Funktechnologie sollen Rückschlüsse auf die eigene Position und auf Positionen benachbarter Objekte gezogen

⁹³Global Positioning System

werden. Sind dabei statische Referenzpunkte vorhanden, so z.B. in heutigen Mobilfunknetzen, können auch hier absolute Positionsangaben des Objektes ermittelt werden. Bei einem Einsatz in dynamischen Netzwerktopologien ohne feste Infrastruktur ergeben sich relative Positionsangaben bezüglich der Nachbarschaft [169, 329, 330]. Durch das Zusammenführen mehrerer relativer Positionsangaben einzelner Objekte kann wiederum ein Gesamtbild der Infrastruktur abgeleitet werden, so beispielsweise umgesetzt im *SpotOn* Ortungssystem [189].

Die technischen Realisierungen können nach unterschiedlichen Gesichtspunkten klassifiziert werden. Dabei stellen viele Projekte hybride Systeme dar, welche mehrere Lösungsansätze kombinieren, um somit bessere Ergebnisse bei der Positionsbestimmung zu erhalten. Eine mögliche Klassifizierung von Lokalisierungssystemen gliedert sich wie folgt:

Absolute/Relative Positionsangaben:

Systeme mit absoluten Positionsangaben liefern ihre Ergebnisse unabhängig von vorhergehenden Messungen und haben somit Kenntnis über die exakte Position eines Objektes innerhalb des gegebenen Koordinatensystems. Bekannte Vertreter solcher Systeme sind *satellitengestützte Ortungssysteme* (Abbildung 4.42a). Relative Positionsangaben stützen sich im Gegensatz dazu auf Positionsänderungen in einem Zeitintervall T . Hier werden folglich relative Abweichungen vom Zustand S_{i-1} zum aktuellen Zustand S_i ausgewertet. Auch die Zuordnung von Objekten zu bestimmten Ortsbereichen oder Sektoren sowie Aussagen über relative Positionen in Bezug zu anderen Objekten fallen in diese Kategorie.

Lokale/Zentrale Positionsbestimmung:

Lokal arbeitende Systeme errechnen die eigene Position selbst und damit lokal. Zentral arbeitende Systeme lassen ihre Position durch ein externes Netzwerk bestimmen.

Genauigkeit und Auflösung:

Die *Auflösung* gibt die maximale oder auch durchschnittliche Abweichung der errechneten Position von der tatsächlichen Position an. Je nach Anwendungsgebiet variieren die Anforderungen an die Positionsbestimmung von einigen Metern bis hin zu wenigen Zentimetern. Die *Genauigkeit* beschreibt die Häufigkeit, mit der eine bestimmte Auflösung erreicht wird.

Skalierung:

Beschreibt die maximale Anzahl zu ortender Objekte und den Bereich, welcher durch das Ortungssystem abgedeckt wird.

Einschränkungen:

In Bezug auf Anforderungen an die Umwelt, wie z.B. maximale Werte für die Dämpfung der Funksignale oder die technologiebedingte, maximale Distanz zwischen Objekten.

Auch die Anforderungen an ein optimales Verfahren im Kontext mobiler WSN und SANET Umgebungen lassen sich auf einfache Weise aufschlüsseln und ähneln stark den Anforderungen im Bereich der Zeitsynchronisation (Abschnitt 4.6):

Verteilte Ausführung:

Lokalisierungsansätze sind innerhalb eines verteilten Systems nutzbar und ohne zentrale Koordinierungsinstanz voll einsatzfähig.

Antwortzeiten:

Die Verarbeitungskomplexität und folglich die durchschnittliche Latenz für Positionsangaben sind zu minimieren.

Energieeffizienz:

In direktem Zusammenhang mit der Komplexität ist die Energieeffizienz für die Positionsermittlung besonders im Umfeld eingebetteter, ressourcenbeschränkter Systeme von hoher Relevanz.

Skalierbarkeit:

Die Anwendbarkeit des jeweiligen Lokalisierungsverfahrens sollte unabhängig von der Topologiegröße gegeben sein.

Genauigkeit:

Die Genauigkeit des Lokalisierungsverfahrens sowie der erzielte Kompromisse bezüglich Komplexität, Energieeffizienz repräsentieren wesentliche Qualitätsindikatoren.

Im Folgenden soll nun auf die unterschiedlichen, zugrundeliegenden Verfahren eingegangen werden, welche dann durch entsprechende technische Systeme abzubilden sind.

4.7.1 Trilateration

Trilateration stellt das am häufigsten verwendete Verfahren für eine Objektlokalisierung dar. Hierbei wird die Position eines Objektes durch die Distanzmessung zu Referenzpunkten berechnet. Im zweidimensionalen Raum werden mindestens *drei nicht colineare Referenzpunkte* benötigt um eindeutige Aussagen über die Position treffen zu können (Abbildung 4.41a). Für die Erweiterung auf die dritte Dimension ist dann ein *vierter nicht coplanarer Referenzpunkt* notwendig. Die Güte der Ergebnisse hängt dabei wesentlich von den Störeinflüssen in der Umgebung ab, welche eine Dämpfung bzw. Reflexion der Signale bewirken und in Folge dessen die Ergebnisse verfälschen. Sind neben der minimalen Anzahl von Referenzpunkten weitere Bezugspunkte verfügbar, kann die Genauigkeit der Positionsangaben dementsprechend erhöht werden.

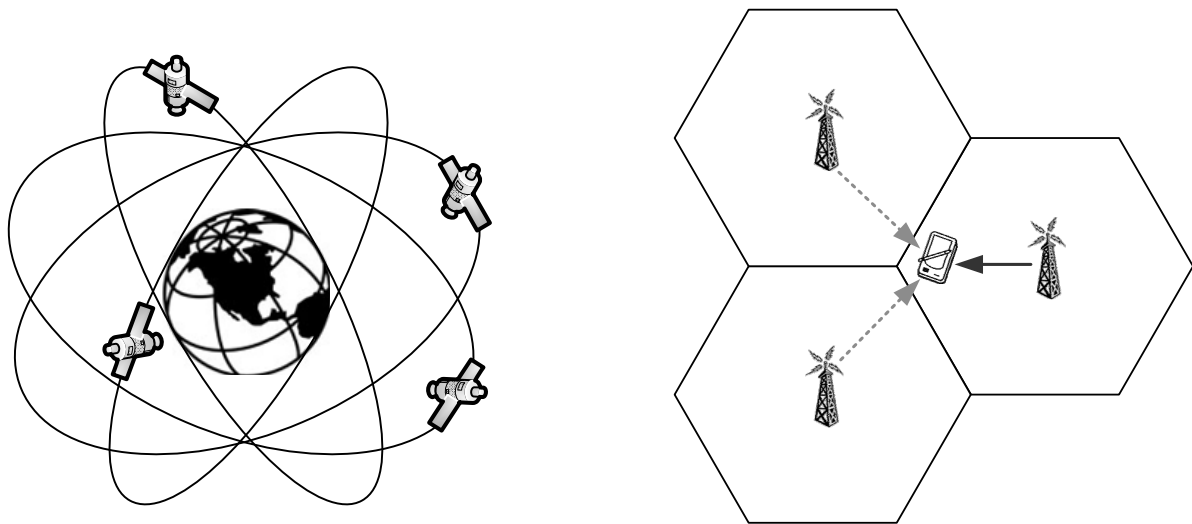
Auf Basis von Trilateration entstanden mehrere Lokalisierungstechniken, welche unterschiedliche Eigenschaften einer Funktechnologie nutzen. Wichtigste Parameter für die Distanzmessung sind dabei die *Signalstärke* und die *Signallaufzeit*. TOA^{94} misst die Laufzeit für den Hin- und Rücktransport eines Signals zum Zielobjekt. Daraus lässt sich dann auf einfache Weise die Distanz berechnen. $TDOA^{95}$ analysiert den Laufzeitunterschied beim Empfang der Signale mehrerer synchron sendender Objekte und kann somit ebenfalls die Position errechnen.

⁹⁴Time of Arrival

⁹⁵Time Difference of Arrival

Hierbei stellt eine hinreichend genaue Messung der Signallaufzeit hohe Anforderungen an die Hardware. Weiterhin ist eine exakte *Zeitsynchronisation* zwischen Sender und Empfänger nötig, da selbst durch geringe Abweichungen erhebliche Verfälschungen der Ergebnisse resultieren. Das vom MIT⁹⁶ entwickelte *Cricket Lokalisierungssystem* [303] basiert beispielsweise auf der Messung der Signallaufzeit.

Im Gegensatz zu den genannten Methoden interpretiert *RSSI*⁹⁷ [367]) die *Signalstärke* und zieht daraus Rückschlüsse auf die Entfernung zum Zielobjekt. *RSSI* umgeht somit die Nachteile von *TOA* und *TDOA* und erleichtert die Auswertung erheblich. Die Aussagen über die Qualität eines Signals sind jedoch sehr stark an die spezifischen Eigenschaften der verwendeten Funktechnologie gebunden, was eine präzise Anpassung des Verfahrens an die jeweils genutzte Technologie voraussetzt. Ein bekannter Vertreter ist das von der *University of California* in Berkeley entwickelte *Calamari-System* [392], welches die Signalqualität für die Positionsbestimmung mit einbezieht.



(a) Satellitengestütztes Ortungssystem (z.B. GPS oder Galileo)

(b) Positionsbestimmung durch die Nutzung vorhandener Zellinformationen (COO Verfahren)

Abbildung 4.42: Zwei Techniken zur absoluten Positionsbestimmung auf der Basis *satellitengestützter Systeme* (a) oder mittels *statischer Zellinformationen* (b).

Ebenfalls basierend auf der Signalqualität nutzt *COO*⁹⁸ die *Zellinformationen stationärer Mobilfunk-Infrastrukturen*, um daraus absolute Positionsangaben mit hoher Genauigkeit zu errechnen (Abbildung 4.42b). Mobilfunkbetreibern und ihren Kunden sowie Rettungsdiensten wird somit die Ortung einzelner Endgeräte ermöglicht.

Alle der genannten Verfahren unterliegen in hohem Maße den Auswirkungen durch äußere Einflüsse wie *Signaldämpfung* und *Interferenzen durch Signalreflexion*, was die Qualität der Positionsangaben entsprechend reduziert.

⁹⁶Massachusetts Institute of Technology

⁹⁷Received Signal Strength Indicator

⁹⁸Cell of Origin

4.7.2 Triangulation

Ein weiteres Verfahren basiert auf der *Winkelmessung* eingehender Signale. Sind die Eingangswinkel eines Signals bekannt, so kann mittels *Kreuzpeilung* (Abbildung 4.41(b)) die Position ermittelt werden. Wichtige Voraussetzung ist hierbei die bekannte Distanz der beiden Referenzpunkte, wodurch der Anwendungsbereich des Verfahrens deutlich eingeschränkt wird. Die *AOA Methode*⁹⁹ nutzt dieses Verfahren zur Positionsbestimmung.

Die Auswirkungen durch äußere Einflüsse sind bei der Triangulation geringer als bei der Trilateration, da hier die Dämpfung des Signals kaum Auswirkungen auf die Messergebnisse hat. Ausschließlich Signalreflexion und Brechung verfälschen das Ergebnis. In den primären Anwendungsbereichen der Luft- und Seefahrt können diese Faktoren vernachlässigt werden.

4.7.3 Szenenanalyse

Eine recht neue Verfahrensweise nutzt die *Szenenanalyse*, mit der durch kontinuierliches Auswerten des Ist-Zustands Aussagen über die eigene Position in der Umgebung getroffen werden können. Hierbei ist nicht nur der aktuelle Zustand S_i relevant, sondern auch Änderungen in der Umgebung vom Zustand S_{i-1} zum Zustand S_i . Grundlage des Verfahrens ist die Annahme, dass jede Position eines Objektes durch eine endliche Anzahl Empfangsparameter in Form von ortsbezogenen Kenngrößen eindeutig repräsentiert werden kann [188]. Die Analyse der Umgebung mit Hilfe der Signaleigenschaften kann durch unterschiedliche Sensorik erweitert werden. Primär kommen dabei optische Sensoren in Form von Kameras zum Einsatz, welche eine Objekterkennung und -verfolgung durch entsprechende Bildverarbeitungsalgorithmen ermöglichen. Die extrahierten Positionsdaten werden gespeichert und erleichtern den späteren Situationsabgleich mit bereits bekannten Positionen. Aktuelle Forschungsprojekte kommen hauptsächlich aus dem militärischen Umfeld und befassen sich mit autonomen Systemen, welche sich selbstständig in ihrer Umgebung orientieren und definierte Zielobjekte erfassen können. Ein bekanntes Ortungssystem dieser Art ist *MS RADAR* [64], welches zwar ohne visuelle Sensorik arbeitet, aber eine zentrale Datenbank für den Situationsabgleich der Objekte nutzt.

4.7.4 Näherungsanalyse

Das vierte Verfahren greift auf die Informationen verfügbarer Nah- und Fernbereichssensorik zurück, um Relationen zu bekannten Objekten zu detektieren. Algorithmen der *Näherungsanalyse (Proximity)* nutzen dabei Technologien wie beispielsweise *RFID*, Ultraschall, Infrarot oder auch Drucksensoren für die physikalische Erfassung eines Objekts.

⁹⁹Angle of Arrival

4.7.5 Nutzung von Heuristiken

Ein weiterer Ansatz zur Lösung der gegebenen Problemstellungen ist die Nutzung einer Heuristik. Hierbei handelt es sich um Verfahren, die sich neben wissenschaftlich gesicherten Erkenntnissen auch auf *Hypothesen*, *Analogien* und *Erfahrungen* stützt [114]. Ziel dabei ist eine Beschleunigung der Lösungsfindung für komplexe Problemstellungen bei gleichzeitigem Akzeptieren einer suboptimalen Lösung.

Durch die Vielzahl möglicher äußerer Störeinflüsse im Bereich der Funklokalisierung kommt es häufig zu einer starken Verfälschung der Ergebnisse. Um die Lösungsmenge auf den Bereich mit möglichst hoher Wahrscheinlichkeit zu reduzieren, können für alle Verfahren probabilistische Ansätze integriert werden. Die Optimierung durch Heuristiken wird in Abbildung 4.43 verdeutlicht. Hierbei werden Koordinaten mit geringer Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen (hellgraue Schnittpunkte) und aus den wahrscheinlichsten Positionsangaben die Koordinaten ermittelt.

Mit der Entwicklung und Einführung von *RFID*¹⁰⁰ [155] ist heute nicht nur die Identifizierung von Objekten möglich, sondern auch die Realisierung neuer, kostengünstiger Lokalisierungssysteme [7, 25–27, 41], welche ähnlich dem *Active Badge System* [388] funktionieren, dabei aber deren Nachteile auf der technischen Ebene minimieren. Ein mit entsprechenden Lesegeräten ausgestattetes Gebäude könnte die Positionsabschätzung bestimmter Objekte mit hoher Genauigkeit ermöglichen, indem das Passieren von Schlüsselpositionen wie Türen oder Treppen detektiert wird. *RFID* stellt somit eine Alternative zu Lokalisierungssystemen mit aktiven Empfängern dar.

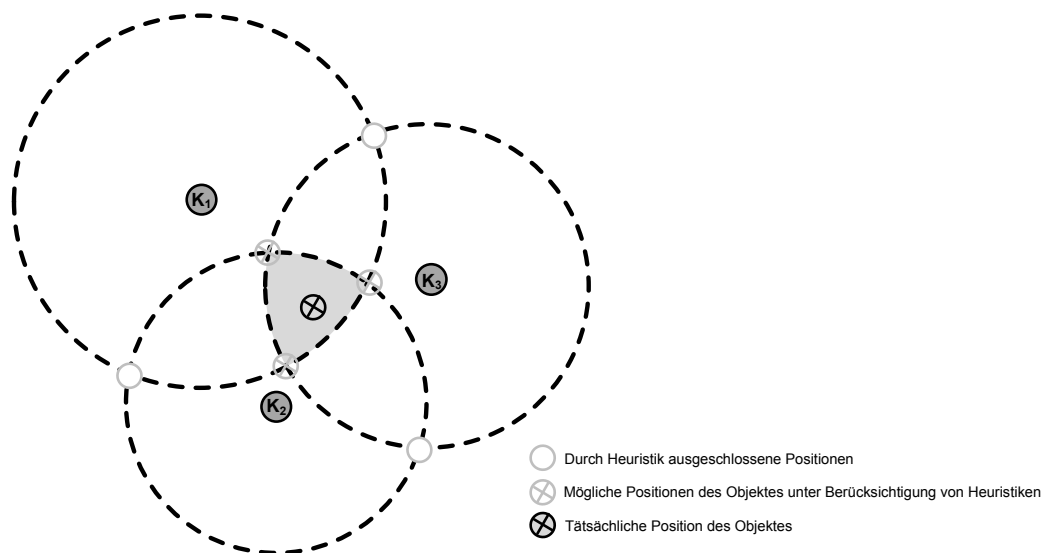


Abbildung 4.43: Optimierte Positionsbestimmung durch die Nutzung von Heuristiken. Die Ortungsgenauigkeit kann mit dem Ausschließen unwahrscheinlicher Positionen deutlich erhöht werden.

¹⁰⁰Radio Frequency Identification

4.8 Transportprotokolle

Völlig unabhängig von den verwendeten Verfahren für Routing oder Topologieoptimierung gewährleisten die im Protokollstack darüber angeordneten Transportmechanismen eine korrekte Übertragung der Nutzdaten sowie die Bereitstellung mehrerer virtuell paralleler Ende-zu-Ende-Übertragungskanäle. Im Anwendungskontext verteilter, eingebetteter Systeme müssen geeignete Verfahren gefunden werden, die die spezifischen Anforderungen stark ressourcenbeschränkter, drahtlos vernetzter Strukturen berücksichtigen:

Zuverlässiger Datentransport:

Beinhaltet die Erkennung und Reparatur beschädigter oder fehlender Datenpakete (Datenintegrität).

Flusskontrolle:

Zur Detektion von Überlastsituationen auf Empfängerseite im Zuge des Paketverarbeitungsprozesses. Dies repräsentiert speziell auch in Hinblick auf die erhöhte Knotenmobilität eine wichtige Anforderung.

Kontrolle von Blockierungen:

Erkennen von Störungen auf den Übertragungspfaden im Netzwerk. Beinhaltet entsprechende Regelungsmechanismen der Datenrate

Netzwerkabstraktion:

Bereitstellen umfassender Schnittstellen für die Applikationsebene.

Klassische Netzwerkarchitekturen bieten dabei zwei Möglichkeiten, virtuelle Ende-zu-Ende Kommunikationskanäle innerhalb der Transportschicht zur Verfügung zu stellen [116]. *UDP*¹⁰¹ [299] als *verbindungsloses Transportprotokoll* richtet sich an zeitkritische Kommunikationskanäle, bei denen nicht jedes Datenpaket explizit nach dem Empfang bestätigt wird. Primäre Vorteile ergeben sich in Folge dessen durch die geringeren Übertragungslatenzen und minimale Laufzeitschwankungen sowie einem vernachlässigbaren Protokolloverhead. UDP ist einfach implementierbar und interpretierbar, was den Einsatz in ressourcenbeschränkten, eingebetteten Systemen fördert. Aufgrund der fehlenden Mechanismen zur Empfangsbestätigung sind bei UDP mögliche Paketverluste zu beachten. Bei vielen Anwendungsszenarien im Bereich verteilter Sensor-Aktor-Systeme ist dieser Nachteil jedoch als kritisch einzustufen, da der Verlust einzelner Informationseinheiten zu Fehleinschätzungen der Situation und folglich zu Fehlentscheidungen führen kann.

Als eine Alternative kann *TCP*¹⁰² [300, 356, 357] als *verbindungsorientiertes Transportprotokoll* eingesetzt werden. Im Gegensatz zu UDP muss hier jedes empfangene Datenpaket vom Empfänger explizit bestätigt werden. Im Falle einer nicht empfangenen Bestätigung oder beschädigter Daten wird das Paket vom Sender erneut übertragen. Durch die Kombination von Prüfsummen und Paketbestätigungen kann eine vollständige Übertragung aller Informationen

¹⁰¹User Datagram Protocol

¹⁰²Transmission Control Protocol

sichergestellt werden. Fehler sind zuverlässig detektierbar. Diese Zuverlässigkeit wird jedoch durch eine höhere Netzlast sowie höhere Übertragungslatenzen erzielt. Der Protokolloverhead spiegelt sich in einem höheren Energiebedarf wieder, was speziell im Bereich mobiler, eingebetteter Systeme negative Auswirkungen auf die Systemlaufzeit hat.

Daher werden im weiteren Verlauf alternative Transportprotokolle vorgestellt, die im Kontext dieser Arbeit bessere Eigenschaften besitzen und in ihrer Charakteristik besonders für WSN / SANET Anwendungen geeignet erscheinen.

4.8.1 Optimierungsansätze im Bereich der Transportprotokolle

Um den spezifischen Anforderungen verteilter, eingebetteter Architekturen Rechnung zu tragen, wurden unterschiedliche, angepasste Transportprotokolle entwickelt [256]. Sie bieten *Unicast*-, *Multicast*- oder auch *Broadcast*-Mechanismen über *Multi-Hop*-Kommunikationspfade. In dynamischen Netzwerktopologien ist mit häufigen und starken Schwankungen der Signalstärke zu rechnen, was die Bereitstellung effizienter Kommunikationskanäle erschwert.

Alternative Lösungsstrategien arbeiten häufig auf Basis von *AACK* (*Adaptive Acknowledgements*), bei denen je nach Rahmenbedingungen entweder Einzelpakete oder auch größere Paketgruppen gebündelt bestätigt werden. Unter der Annahme einer durchschnittlichen Paketverlustrate ergibt sich im Gegensatz zum klassischen TCP mit expliziter Einzelbestätigung ein deutlich geringerer Protokolloverhead. Um diesen Overhead nochmals zu reduzieren, arbeiten andere Transportprotokolle mit *Selective Negative Acknowledgements* [111]. Hier erfolgt nur dann eine Rückantwort an den Sender, wenn bestimmte Pakete nach einer definierten Zeitspanne nicht eintreffen. Alle korrekt empfangenen Pakete werden ohne Bestätigung weiterverarbeitet. Derartige Verfahren sind nur dann sinnvoll einsetzbar, wenn die Störanfälligkeit in der Topologie in einem beherrschbaren Rahmen bleibt. Steigt die Paketverlustrate erheblich an, können die konzeptionellen Vorteile derartiger Verfahren nicht genutzt werden. Verfahren wie *RMST*¹⁰³, *ERTP*¹⁰⁴ [234] oder *PSFQ*¹⁰⁵ [353] nutzen diese Art der Paketbestätigung.

Ein speziell an Ad Hoc Topologien angepasstes Transportprotokoll repräsentiert das *ATP*¹⁰⁶ [328]. Das Verfahren ist grundsätzlich konträr zu TCP konzipiert. Es verfügt beispielsweise über eine datenrate-basierte Paketübertragung (TCP nutzt window-based Übertragungsverfahren), Quick-Start Eigenschaften bei einem Routenwechsel beziehungsweise bei Verbindungsinitialisierungen (TCP nutzt Slow-Start) sowie keine Timeouts für Retransmissions. Durch diese Mechanismen steigt die Robustheit im Kontext hochgradig mobiler Topologien erheblich an. Auf ähnliche Weise funktionieren auch die Transportprotokolle *CODA*¹⁰⁷ sowie *ESRT*¹⁰⁸ [353].

¹⁰³Reliable Multisegment Transport

¹⁰⁴Energy Efficient and Reliable Transport Protocol

¹⁰⁵Pump Slowly, Fetch Quickly

¹⁰⁶Ad Hoc Transport Protocol

¹⁰⁷Congestion Detection and Avoidance

¹⁰⁸Event-to-Sink Reliable Transport

*RBC*¹⁰⁹ [413] als weiteres angepasstes Transportprotokoll versucht die Verlustrate von Acknowledgement-Paketen zu minimieren, um so die Kanalauslastung zu verbessern. Ebenfalls von Relevanz ist *ACTP*¹¹⁰ [328]. Es handelt sich dabei um ein schlankes Transportprotokoll und ähnelt konzeptionell dem UDP Protokoll. Die primären Erweiterungen umfassen Mechanismen zur Paketbestätigung und der Kanalüberwachung. Somit ist ACTP zwischen TCP und UDP einzuordnen und bietet hier einen guten Kompromiss zwischen Komplexität und Funktionalität.

4.9 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde das Netzwerkmanagement mit seinen unterschiedlichen funktionalen Ebenen vorgestellt und diskutiert. Aufbauend auf Basistechnologien wurden innerhalb des Netzwerkmanagements vielfältige Verfahren und Herausforderungen zusammengefasst, die für die Kommunikation in einer verteilten Systemlandschaft von Relevanz sind. Dazu wurde zunächst auf die Netzwerkmodellierung und den Medienzugriff eingegangen.

Das Topologiemanagement und das Routing waren anschließend zwei Themenschwerpunkte dieses Kapitels. Hierbei wurden grundlegende Aufgaben und Probleme vorgestellt sowie aktuelle Entwicklungen im Bereich eingebetteter, ressourcenbeschränkter Systeme diskutiert. Die unterschiedlichen Herangehensweisen und Lösungsstrategien konnten dabei klassifiziert und in eine logische Struktur eingeordnet werden. In diesem Kontext wurde auch WRTA als kombiniertes Routing- und Topologieoptimierungsverfahren vorgestellt. Im Bereich der Cross-Layer-Strategien wurde das entwickelte RMU Ressourcenmanagementkonzept präsentiert.

Aus wissenschaftlicher Sicht wurden zwei weitere Themenkomplexe behandelt, die innerhalb des Netzwerkmanagements vielversprechende Möglichkeiten eröffnen. Die Zeitsynchronisation stellt eine einheitliche Zeitbasis zur energieeffizienten Kommunikation in heterogenen Netzwerktopologien sicher. Das entwickelte CE-TimeSync Verfahren ist dabei ein ressourcensparendes und flexibel einsetzbares Synchronisationskonzept für eingebettete Systemarchitekturen im WSN / SANET Bereich bereit. Der zweite Themenkomplex befasste sich mit Lokalisierungsansätzen, mit deren Hilfe absolute oder auch relative Positionsangaben für einzelne Netzwerkknoten errechnet werden können. Die Metadaten erlauben wiederum effizientere Routingstrategien und eine optimierte Nutzung der zur Verfügung stehenden Energieressourcen.

Auf Grundlage der durch das Netzwerkmanagement geschaffenen Kommunikationsinfrastruktur müssen nun die Nutzdaten effizient verarbeitet, aufbereitet und verwaltet werden. Diese Funktionen werden durch das Datenmanagement gekapselt. Das folgende Kapitel widmet sich dieser logisch höheren Abstraktionsebene einer verteilten, eingebetteten Systemarchitektur.

¹⁰⁹Reliable Bursty Convergecast

¹¹⁰Application-Controlled Transport Protocol

5 Datenmanagement

Aufbauend auf den bereitgestellten Diensten des Netzwerkmanagements verarbeitet das Datenmanagement die heterogenen, verteilten Nutzdaten und leitet daraus Information auf einer abstrakteren Ebene ab. Im Zuge der Erfüllung global definierter Zielstellungen übernimmt das Datenmanagement sowohl auf lokaler als auch auf globaler, dezentraler Systemebene die zeitliche Koordinierung aller Einzelaufgaben. Dies beinhaltet die Ressourcenverwaltung sowie die effiziente Speicherung aller Informationen. Das Datenmanagement ist aber auch für Optimierungsprozesse im Zuge der Informationsvorverarbeitung und -aufbereitung verantwortlich [160].

5.1 Thematische Abgrenzung

Zunächst muss jedoch für den Begriff Datenmanagement eine Abgrenzung zu bekannten, datenbankbasierten Systemen erfolgen. Datenmanagementverfahren für verteilte, eingebettete Umgebungen unterscheiden sich dabei in mehreren Eigenschaften von klassischen, verteilten Datenbanksystemen [239]. Ein wesentlicher Aspekt von Datenmanagementverfahren für funktionsreduzierte, eingebettete Systeme besteht in der Eigenschaft, Daten bereits lokal am Entstehungsort oder in dessen unmittelbarer Umgebung vorzuverarbeiten. Somit verlagern sich Teile des Datenverarbeitungs- bzw. Datenanalyseprozesses von zentralen Komponenten direkt in die Netzwerkstruktur. Diese sind dann folglich implizit in die Kommunikationsprozesse eingebunden. Im Gegensatz dazu vereinen verteilte Datenbanksysteme alle Rohdaten zunächst in einer gemeinsamen Datenbasis, auf der dann in einem dedizierten Prozess Analysen durchgeführt werden. Verteilte Datenbanksysteme werden primär zur Lastverteilung eingesetzt, um eine große Datenmenge effizient verarbeiten und speichern zu können. Die Synchronisation zur Aufrechterhaltung eines einheitlichen Datenbestandes ist hier jeweils die zentrale Herausforderung. Im SANET Umfeld arbeiten die einzelnen Verarbeitungsinstanzen aufgrund gekapselter Funktionen in einer räumlich verteilten Umgebung zusammen. Engpässe in der Verarbeitungszeit treten hier in den Hintergrund, währenddessen Synchronisierungsprozesse in ihrer Komplexität und Wichtigkeit zunehmen.

Des Weiteren ist die gegebene Netzwerktopologie für verteilte Datenbanksysteme nur von untergeordneter Relevanz, da Applikationen und Prozesse unabhängig von der Netzwerkstruktur agieren. Im Kontext von Datenmanagementfunktionalitäten in stark ressourcenbeschränkten Umgebungen ist die Dynamik innerhalb der Topologie sowie deren Struktur jedoch ausschlaggebend für eine (energie-)effiziente Daten(vor)verarbeitung.

Der zentrale Unterschied besteht jedoch in der Eigenschaft der Behandlung von redundanten Daten. Während Datenbanksysteme jeden einzelnen Datensatz speichern und bewusst archivieren, zielt das Datenmanagement im Kontext eingebetteter, verteilt agierender Systeme auf

eine Reduzierung der Datenmenge ab. Nicht relevante Daten sollen zeitnah herausgefiltert werden, um die Netzwerkkommunikation zu entlasten. Redundante Daten werden bewusst komprimiert. Unterschiedliche Rohdaten werden nach Möglichkeit bereits lokal zu abstrakteren Informationen zusammengeführt.

In energieautarken und stark ressourcenbeschränkten Architekturen binden Kommunikationsprozesse meist deutlich mehr Energie als die Verarbeitungsprozesse, wodurch hier die Minimierung der Datenlast Priorität hat. Die dezentralen Verfahren arbeiten dabei stark situationsabhängig und berücksichtigen die jeweilige Knotenverteilung. In Folge dessen greifen hier auch keine klassischen Optimierungstechniken für Datenanfragen, wie sie häufig in Datenbanksystemen zum Einsatz kommen. Diese beruhen auf statischen Kostenmodellen und statistischen Informationen, welche in dynamischen Netzwerktopologien nicht zuverlässig zur Verfügung stehen.

Zur Rekonstruktion globaler Ereignisse auf Basis verteilter, unter Umständen redundanter Informationen kommen häufig numerische Verfahren zum Einsatz. Diese nutzen beispielsweise Monte-Carlo- oder Finite-Element-Methoden, um den möglichen Zustandsraum zu diskretisieren. Im Bereich eingebetteter, ressourcenbeschränkter Systeme sind diese Verfahren aufgrund ihrer Komplexität meist nicht anwendbar [223].

Die Thematik Sicherheit in verteilt agierenden, eingebetteten Systemen bezüglich der Datenverarbeitung und Datenübertragung repräsentiert an dieser Stelle ebenfalls ein wichtiges Teilgebiet. Problemstellungen umfassen hier Störungen auf den verschiedenen Protokollebenen (*Jamming*, *Flooding*) sowie Manipulationen von Nutzdaten, Identitäten oder Transportwegen. Da die Aufarbeitung dieses Themenfeldes den Umfang der Arbeit zu stark erweitert, wird auf Sicherheitsaspekte und Mechanismen zur Gewährleistung authentischer Daten nicht näher eingegangen.

5.2 Aufgabenplanung

Sollen in einer verteilten Systemarchitektur global definierte Zielstellungen erreicht oder gemeinsame Aufgaben erfüllt werden, so müssen mehrere Teilsysteme in der Topologie zielorientiert zusammenwirken. Jedes Teilsystem stellt dabei spezifische Dienste und Ressourcen zur Verfügung. In einem kooperativen Prozess werden dann die globalen Zielstellungen auf mehrere lokal zu bearbeitende Aufgaben (*Tasks*) verteilt. Ergebnisse müssen dabei unter Umständen zeitkritisch kommuniziert werden. Auch funktionale und zeitliche Abhängigkeiten sind hierbei zu berücksichtigen. Verfahren zur Aufgabenplanung realisieren dieses kooperative Zusammenwirken auf unterschiedlichen funktionalen Ebenen. Sie koordiniert sowohl die Messzeitpunkte und Orte als auch spezifische Mess- beziehungsweise Aktionsparameter, welche in Abhängigkeit vom beobachteten Phänomen zu wählen sind. Ein Ziel dabei ist es, mit Hilfe einer sinnvollen Ablaufplanung Unsicherheiten über das beobachtete Phänomen sowie falsche Ereignismeldungen zu reduzieren. Dazu muss im Rahmen eines kontinuierlichen Messszenarios eine anwendungsspezifische Diskretisierung der Messungen umgesetzt werden.

Dabei wirkt sich die Quantität und die Qualität der geplanten Messungen unmittelbar auf den Energiebedarf des Gesamtsystems aus. Auf dieser Basis ist folglich auch die Effizienz einer gewählten Planungsstrategie bewertbar.

Für die im Rahmen dieser Arbeit betrachteten eingebetteten Kommunikationssysteme ist die Bandbreite für Übertragungskanäle dabei grundsätzlich stark beschränkt. Die Aufgabenplanung stellt hier eine effiziente Messkonfiguration sicher, um Informationen in hinreichender Menge und Qualität zu übertragen. Speziell zeitliche Aspekte sowie die Sicherstellung einer synchronen Zeitbasis sind dabei zu lösende Problemstellungen. Durch abweichende Zeitstempel sinkt die Qualität der Sensordaten bezüglich der Analyse und Auswertung signifikant. In vielen Fällen ist die genaue Reihenfolge der Messergebnisse sowohl lokal als auch global entscheidend für eine präzise Interpretation der Ereignisse.

Die beiden folgenden Abbildungen 5.1 und 5.2 verdeutlichen die zeitliche Koordinierung durch die Aufgabenplanung anhand einer klassischen WSN Applikation. Dabei ist klar zwischen lokaler, knoteninterner Planung und netzwerkübergreifender, globaler Planungsebene zu differenzieren.

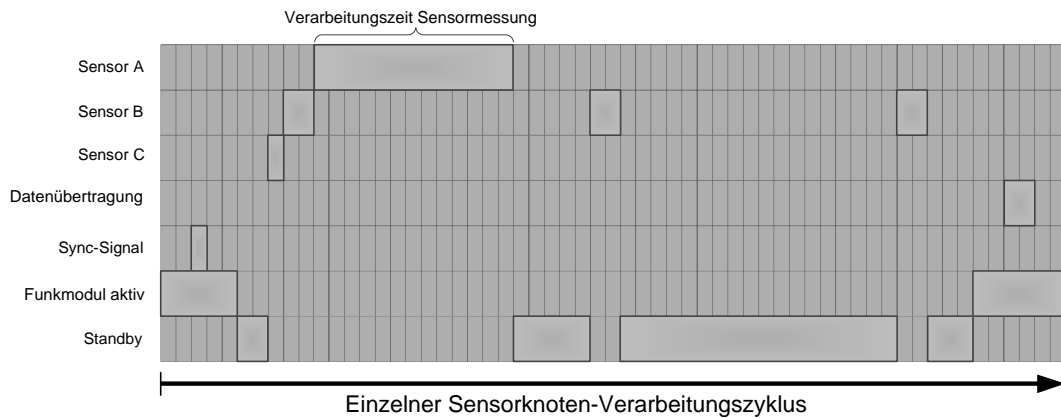


Abbildung 5.1: Zeitlich koordinierte Abfolge von Aktionen innerhalb eines Netzwerkknotens. Eine exakte Planung erfordert ein hinreichend präzises Zeitsignal.

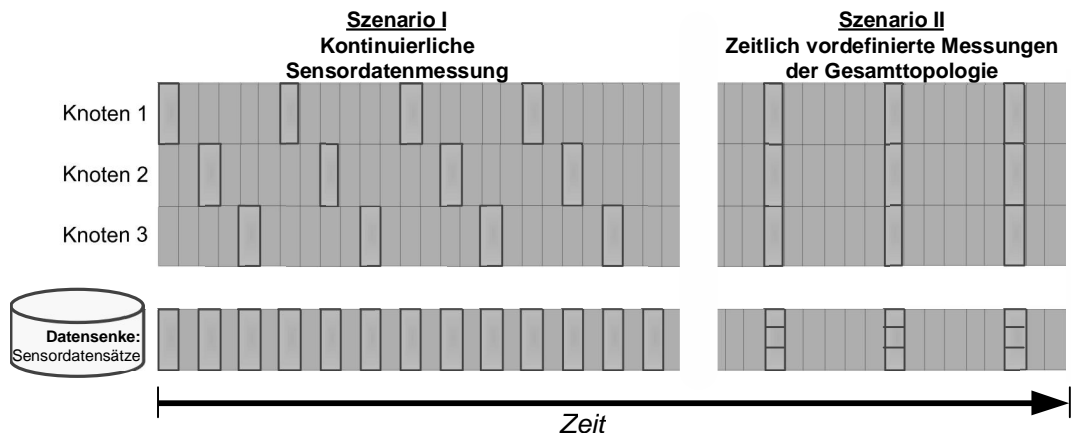


Abbildung 5.2: Aufgabenplanung auf Netzwerkebene umfasst die zeitlich synchronisierte Koordination von Aktionen auf den einzelnen verfügbaren Knoten. Eine entsprechend synchronisierte Zeitbasis ist dabei entscheidend.

Knotenintern wirken sich Abweichungen in der Ablaufplanung primär auf den Energiebedarf aus, da die so wichtigen Sleep-Phasen nicht genutzt werden können. Auch die Kapselung von Prozessen und Aufgaben in unterschiedliche, dedizierte Betriebsmodi ist abhängig von einer koordinierten Aufgabenplanung.

Auf globaler Ebene möchte der Nutzer entweder kontinuierliche Messwerte in konstanten Zeitperioden und von vordefinierten Subsystemen (5.2 Szenario I) oder zeitlich synchrone Momentaufnahmen (*Snapshots*) des Gesamtsystems zur ganzheitlichen Erfassung der aktuellen Situation des verteilten Gesamtsystems (5.2 Szenario II). In beiden Fällen ist die zeitliche Koordination und somit die Aufgabenplanung entscheidend für die Qualität der Informationen. Die erforderliche Synchronisation kann entweder ereignisgetrieben stattfinden oder mit Hilfe von dedizierten Zeitsynchronisationsmechanismen, auf die in Kapitel 4.6 bereits gezielt eingegangen wurde. In [24, 32] wird die Problematik im Bereich der Sensor-Aktor-Netzwerke vertieft thematisiert und anhand konkreter Anwendungsbeispiele verdeutlicht.

Bei der Aufgabenerfüllung müssen je nach Applikation verschiedene Rahmenbedingungen, Ereignisse, Regeln und Restriktionen sowie die Ableitung benötigter Fähigkeiten und Ressourcen beachtet werden. Dabei ist Aufschlüsselung und die Analyse wesentlicher Merkmale zur Lösung einer gegebenen Aufgabenstellung nicht trivial. Die jeweils abgeleiteten Einzelaufgaben müssen effizient koordiniert werden. Hierfür ist eine erweiterte Wissensbasis erforderlich. Die Verwaltung einer verteilten Wissensbasis und der latenzoptimierte Austausch relevanter Informationen über die verfügbare Kommunikationsinfrastruktur repräsentiert einen weiteren Schwerpunkt. Speziell im Bereich mobiler, eingebetteter Systeme müssen dabei alle Verwaltungsprozesse mit begrenzten Ressourcen, sowohl hinsichtlich der Energie als auch in Hinblick auf Rechen- und Kommunikationskapazitäten, sichergestellt werden. Die hierzu erforderlichen Kommunikationsdienste sind durch das Netzwerkmanagement bereitzustellen.

Im Rahmen der Umsetzung sind sowohl die Konfiguration sowie die Eigenschaften des Sensor-Aktor-Netzwerkes zu beachten. Speziell Faktoren wie die Topologieausprägung, die Skalierung oder verfügbare Kommunikationstechnologien sind von Relevanz. In heterogenen Systemlandschaften sind mögliche Wechselwirkungen von Bedeutung. Bei der Implementierung sind drei unterschiedliche Paradigmen anwendbar. Einerseits die *rein sequentielle Abarbeitung* aller Teilaufgaben nach einer vordefinierten Reihenfolge. Andererseits ist eine *prozess-basierte Abarbeitung* realisierbar, welche eine situationsspezifische Interaktion zwischen mehreren Prozessen ermöglicht. Die dritte Möglichkeit repräsentiert die *rein ereignisgetriebene Umsetzung*. Diese arbeitet in einer regulären Abarbeitungsschleife und unterbricht diese im Falle definierter Ereignisse mit einem spezifischen Verarbeitungsprozess. Diese Umsetzung eignet sich hervorragend für Mikrocontroller-Implementierungen mit entsprechenden *IRQs*¹.

¹Interrupt Request / Unterbrechungsanforderung

Abbildung 5.3 zeigt die vorgestellten Paradigmen.

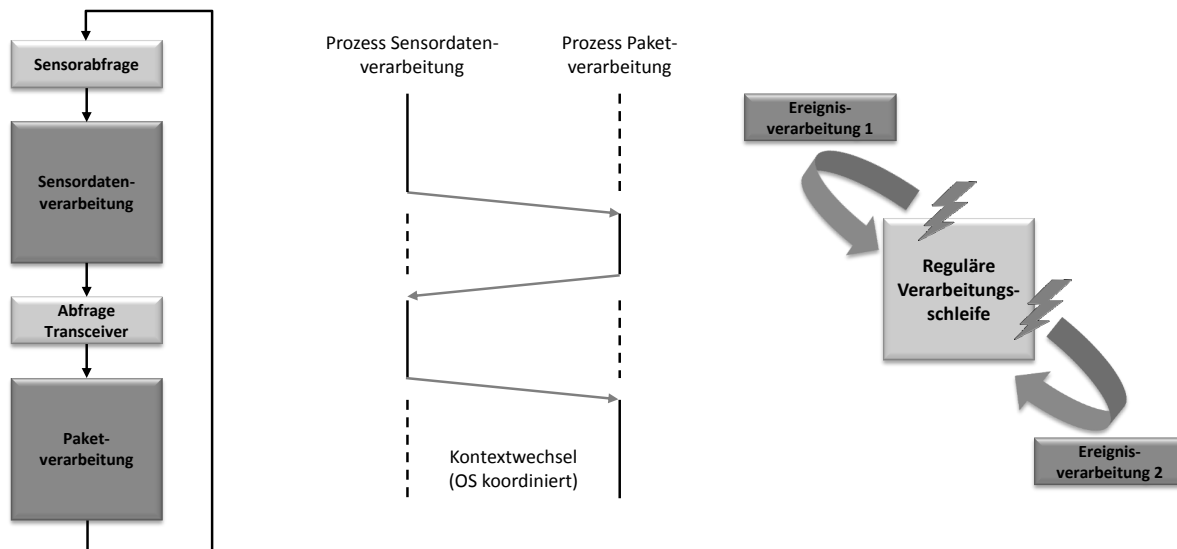


Abbildung 5.3: Veranschaulichung verschiedener Verarbeitungsparadigmen in verteilten Sensor-Aktor-Systemen. *Links* rein sequenzielle Verarbeitungsschleife, prozess-basierte Verarbeitung *mittig* und ereignis-getriebene Verarbeitung *rechts*.

In Hinblick auf die Energieeffizienz kann mittels geeigneter Aufgabenplanung die Knotenlaufzeit gesteigert werden. Durch die zeitliche und räumliche Koordinierung einzelner Sensorknoten ist demnach auch eine Steigerung der Energieeffizienz möglich. Dies betrifft vor allem verteilte Systeme mit mehreren unterschiedlichen Sensorik- oder Aktuatorikkomponenten, bei denen einzelne Sensoren selektiv ausgelesen werden. Je nach Energiestatus und Redundanzgrad in der Topologie können gewünschte Informationen von verschiedenen Netzwerkknoten bezogen werden. Ist das Energieniveau in einem Knoten kritisch, kann unter Umständen ein anderer Knoten den entsprechenden Messdatensatz liefern. Werden viele Datensätze benötigt, die ein Knoten allein nicht verarbeiten kann, so ist dies im Verbund mehrerer Knoten realisierbar.

Forschungen konzentrieren sich aktuell auf dezentrale Ansätze zur global optimierten Ressourcenplanung. So werden z.B. im Bereich der Mobilfunkkommunikation Möglichkeiten erforscht, neue Kommunikationstechnologien automatisiert zu testen und unter Last zu setzen [4, 5]. Verteiltes Scheduling auf Applikationsebene kommt auch beim *Hierarchical Sensing* [239] zum Einsatz. Hier erfolgt eine dynamische Anpassung der Sensorik an die jeweilige Situation zur Laufzeit. Die Aufgabenplanung koordiniert im Normalmodus zyklisch die Messwertaufnahme eines gewählten Primärsensors, der in der Lage ist, spezifische Merkmale vordefinierter Ereignisse zu detektieren. Löst dieser Sensor ein entsprechendes Signal aus, koordiniert die Aufgabenplanung zeitnah weiterführende Sensormessungen, um so das Ereignis genauer klassifizieren und analysieren zu können. Dies kann sowohl durch einen heterogenen Datenabgleich unterschiedlicher Sensoren erfolgen oder auch durch eine erhöhte Abtastrate einer bestimmten Sensorkomponente. Aus Sicht der Energieeffizienz hat diese dynamische Anpassung entscheidende Vorteile, da ein Großteil der Sensorik nur im Bedarfsfall genutzt wird.

Ein gutes Beispiel hierfür ist die Bewegungserkennung von Objekten. So werden Bewegungsereignisse zunächst über einen Ultraschall oder Infrarot-Sensor detektiert. Nur im Falle eines relevanten Ereignisses werden zusätzliche Magnetsensoren angesprochen, die dann eine genauere Klassifizierung des bewegten Objektes erlauben. So kann in dieser nachfolgenden Hierarchieebene zwischen Mensch/Tier und Maschine unterschieden werden. Aus den korrelierten Einzelinformationen können in Folge dessen komplexe Entscheidungen getroffen werden. In direkter Konsequenz leiten sich daraus spezifische Aktionen für die ausführenden Systemkomponenten ab.

5.3 Datenaggregation

Strategien zur Datenaggregation und Datenvorverarbeitung finden verstärkt im Bereich drahtloser Sensor- und Sensor-Aktor-Netzwerke Anwendung. In den mobilen, hochgradig verteilten Systemen sind die Kapazitäten der Kommunikationsinfrastruktur aufgrund begrenzter Energieressourcen stark eingeschränkt. Folglich repräsentiert das zu übertragende Datenvolumen einen kritischen Parameter. Um dieses Volumen zu reduzieren, werden Verfahren zur Datenvorverarbeitung und Aggregation eingesetzt. Sie bieten die so wichtigen Ansatzpunkte für weitere Optimierungen der Energieeffizienz auf Applikationsebene [139]. Die Menge der gemessenen Rohdaten soll dabei durch *lokale Vorverarbeitungsprozesse* in einer reduzierten Form bereitgestellt werden, um so die Netzlast zu senken. Die Zielstellungen der Datenaggregation sind folglich neben wenigen applikationsspezifischen Anforderungen klar definiert [63]:

- Minimierung der Netzlast
- Ereignisverifikation
- Eliminierung redundanter Informationen
- Ressourcenschonung
- Realisierung von priorisierten Datenübertragungen

Basierend auf diesen Zielstellungen wird nach [140] Datenaggregation wie folgt definiert:

”Datenaggregation ist der Prozess des Kombinierens mehrerer Informationseinheiten gleichen Typs (beispielsweise Messwerte / Datensätze) in eine einzelne Nachricht, welche anschließend die gesamte Menge der ursprünglichen Informationen repräsentiert. Aggregationsmethoden umfassen dabei meist statistische (oder mathematische) Operationen.”

Aus dieser Definition geht deutlich hervor, wie sich Datenaggregationsverfahren zu den später vorgestellten Datenfusionsverfahren abgrenzen. Demnach wird definiert, dass sich *Aggregation* auf die Verschmelzung *gleichartiger/homogener Informationen* bezieht. Einfache Ansätze basieren auf *lokalen Filterverfahren* zur frühzeitigen Datenselektion in den jeweiligen Sensorentitäten. In Folge dessen werden nur Messdaten innerhalb zuvor definierter

Werteintervalle weiterverarbeitet. In einer erweiterten Form werden meist *mathematische Operationen* unterschiedlicher Komplexität im Zuge der Vorverarbeitung angewendet. Jeder Knoten berechnet z.B. den *Mittelwert* über mehrere Messdatensätze oder bildet je nach Anwendung *Minimal- oder Maximalwerte*. Auch das *Zählen* bestimmter Ereignisse ist häufig sinnvoll.

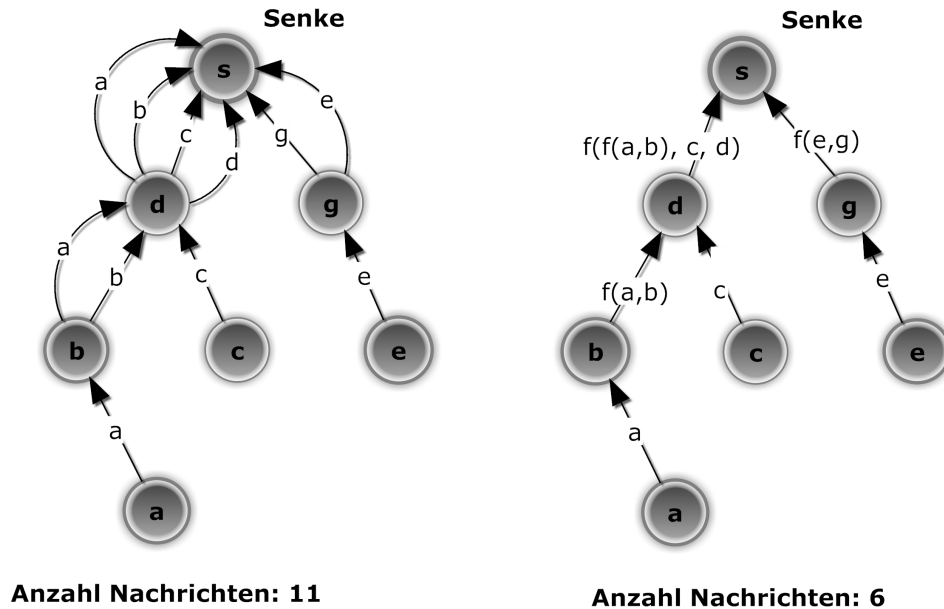


Abbildung 5.4: In-Network-Aggregation: Kombination der Daten in allen Zwischenstationen auf dem Weg zur Senke. Die Netzlast sinkt schon bei kleinen Topologien erheblich von 11 auf 6 Datenpakete.

Meist ist diese Wissensrepräsentation in aggregierter Form verlustbehaftet, d.h. aus den errechneten Werten ist die Menge der originalen Rohdatensätze nicht vollständig nachvollziehbar. Im Gegensatz zu dieser Form der *Datenreduktion* repräsentiert die verlustfreie Minimierung der Daten eine *Datenkompression*. Zur Kompression können dabei bekannte Algorithmen für Text- und Binärdaten zum Einsatz kommen. Bei allen Aggregationsstrategien bleibt zu beachten, dass die Realisierung stets einen Kompromiss zwischen mehreren Qualitätsparametern darstellt, dessen Gewichtung individuell gefunden werden muss:

Genauigkeit:

Repräsentiert den zentralen Qualitätsindikator für jedes Aggregationsverfahren. Dabei ist entscheidend, wie stark die Realdaten durch die Aggregation verfälscht werden.

Vollständigkeit:

Die Unterscheidung, ob ein Verfahren verlustbehaftet oder verlustfrei arbeitet.

Latenz / Verzögerungszeit:

Wie stark erhöht sich die Verarbeitungszeit von Datenpaketen durch den jeweiligen Aggregationsansatz.

Komprimierungsgrad:

Beschreibt das Optimierungspotential hinsichtlich der Anzahl übertragener Datenpakete durch das Aggregationsverfahren.

Unter dem Oberbegriff Datenaggregation werden meist *In-Network-Aggregationsverfahren* zusammengefasst, bei denen die Übertragung der Sensordaten mit der Ausführung bestimmter Datenverarbeitungsprozesse in den einzelnen weiterleitenden Knoten gekoppelt wird. Abbildung 5.4 verdeutlicht einen einfachen aber zugleich effizienten Aggregationsansatz. Unter der Voraussetzung, dass die algorithmische Verarbeitungskomplexität als gering einzustufen ist, bleibt der Mehraufwand im Zuge der Datenbehandlung überschaubar. Dennoch steigt durch derartige Verfahren die Latenz für die Vermittlung von Ereignissen an, da gemessene Rohdaten während einer Multi-Hop-Übertragung unter Umständen mehrfach verarbeitet werden. In vielen Fällen ist dabei auch der Einsatz von *Token-Mechanismen* innerhalb eines Zeitschlitzverfahrens sinnvoll. Auf diese Weise lassen sich Lastspitzen bei der Datenübertragung vermeiden. Die Einführung eines Aktivitätstokens und somit die Bereitstellung exklusiver Übertragungsphasen hat noch weitere positive Nebeneffekte. So können interferenz-bedingte Störungen, wie sie häufig bei dichten Netzwerktopologien auftreten, deutlich reduziert werden [109].

Ein weiterer Ansatz ist das *selektive* oder *ereignisgesteuerte* Senden von relevanten Sensordaten. Die Knoten übermitteln nicht kontinuierlich Messdaten an die Senke, sondern wählen den Übertragungszeitpunkt und die Messhäufigkeit individuell und situationsabhängig. Werden vordefinierte Rahmenbedingungen oder kritische Wertebereiche erkannt, startet die Datenübertragung spontan und ohne Synchronisationsmechanismen.

Auf die einzelnen Verarbeitungsstrategien, die im Rahmen einer Datenaggregation zur Anwendung kommen können, wird im Folgenden genauer eingegangen.

5.3.1 Klassische Aggregationsansätze

Klassische Aggregationsformen umfassen die *Stern-*, *Ketten-* und *Baumaggregation* [229, 240]. Dabei kann die Kettenaggregation als Spezialfall einer Baumaggregation mit nur einem Kind pro Knoten abstrahiert werden. Die verschiedenen Aggregationsformen sind in Abbildung 5.5 dargestellt.

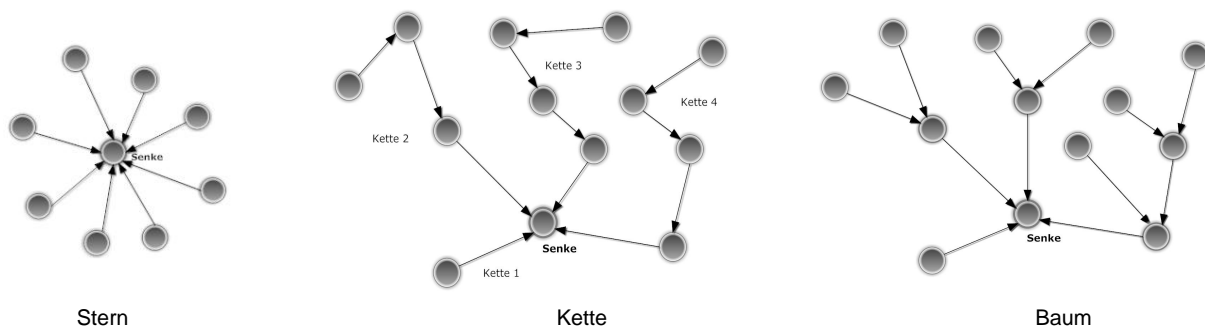


Abbildung 5.5: Grundlegende Strategien im Bereich der Datenaggregation.

Den einzelnen Aggregationsformen geht jeweils eine Initialphase im Rahmen der Netzwerkkexploration voraus. Beginnend von einer Datensenke wird hierbei die verfügbare Netzwerkinfrastruktur erstmalig durchsucht. Erst wenn die Menge verfügbarer Netzwerkknoten sowie

Relationen zwischen den Knoten bekannt sind, kann eine angepasste Aggregationsstruktur berechnet werden. Mit Abschluss der Netzwerkexplorationsphase beginnt dann die operative Phase im Zuge der Datenaggregation. Abbildung 5.6 veranschaulicht die Exploration an einem Beispiel.

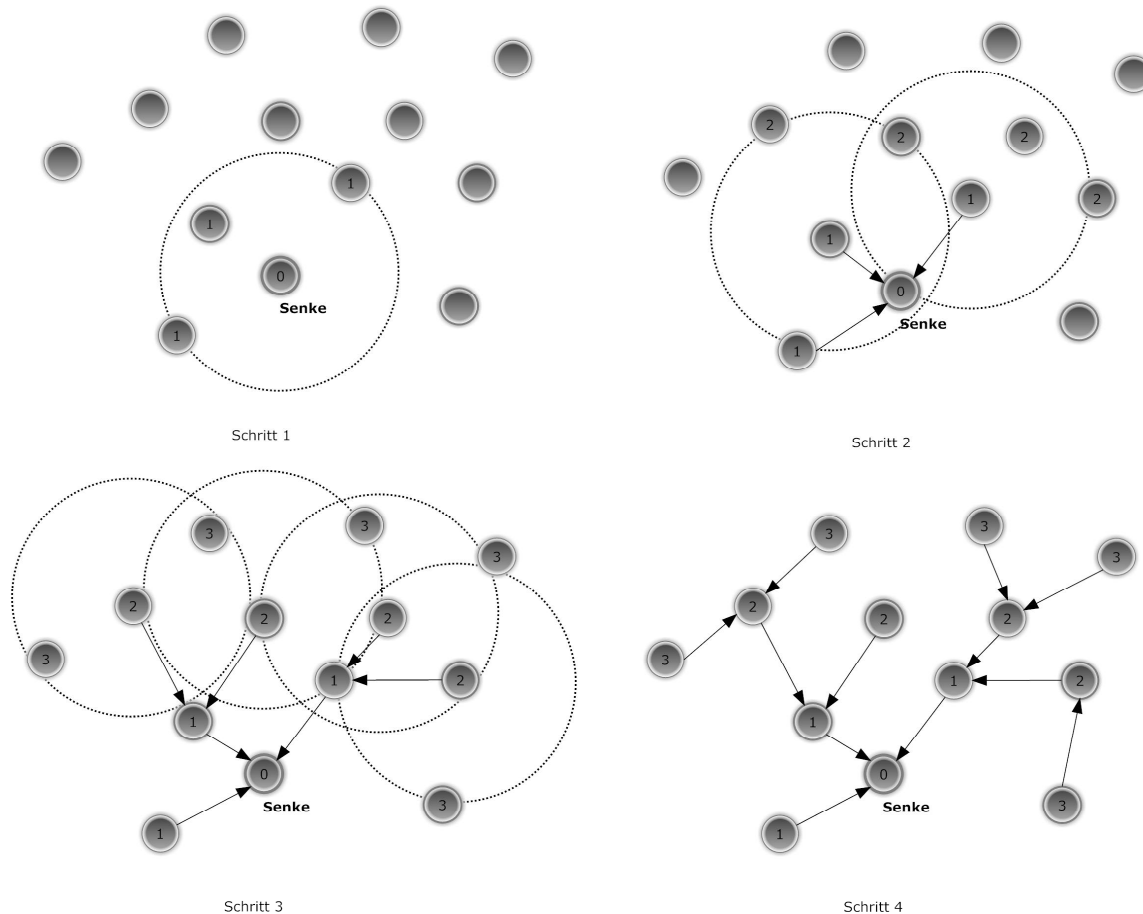


Abbildung 5.6: Baumaggregation: Topologieexploration in einer unbekanntem Umgebung.

Als bekannte Umsetzung eines Kettenaggregationsverfahrens sei an dieser Stelle *PEGASIS*² [53] erwähnt. Es wurde speziell für die energieeffiziente Bündelung von verteilten Datenquellen in drahtlosen Sensornetzwerken konzipiert und bietet vielfältige Möglichkeiten zur Parametrisierung im jeweiligen Anwendungskontext.

Auch die Einführung von logischen Hierarchiestufen ist möglich. Hierdurch ergeben sich wiederum vielfältige Möglichkeiten bezüglich eines lokal optimierten Kommunikationsverhaltens. Abbildung 5.7 verdeutlicht diesen Sachverhalt anhand eines Beispiels. Durch die Hierarchie wird zum einen ein *Clustering* realisiert, was sich besonders ab einem höheren Skalierungsgrad positiv auf die Verwaltung der Topologie auswirkt. Zum anderen können durch die Hierarchien je nach Bedarf auch unterschiedliche Datenaggregationsformen für einzelne Topologiebereiche gewählt werden.

²Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems

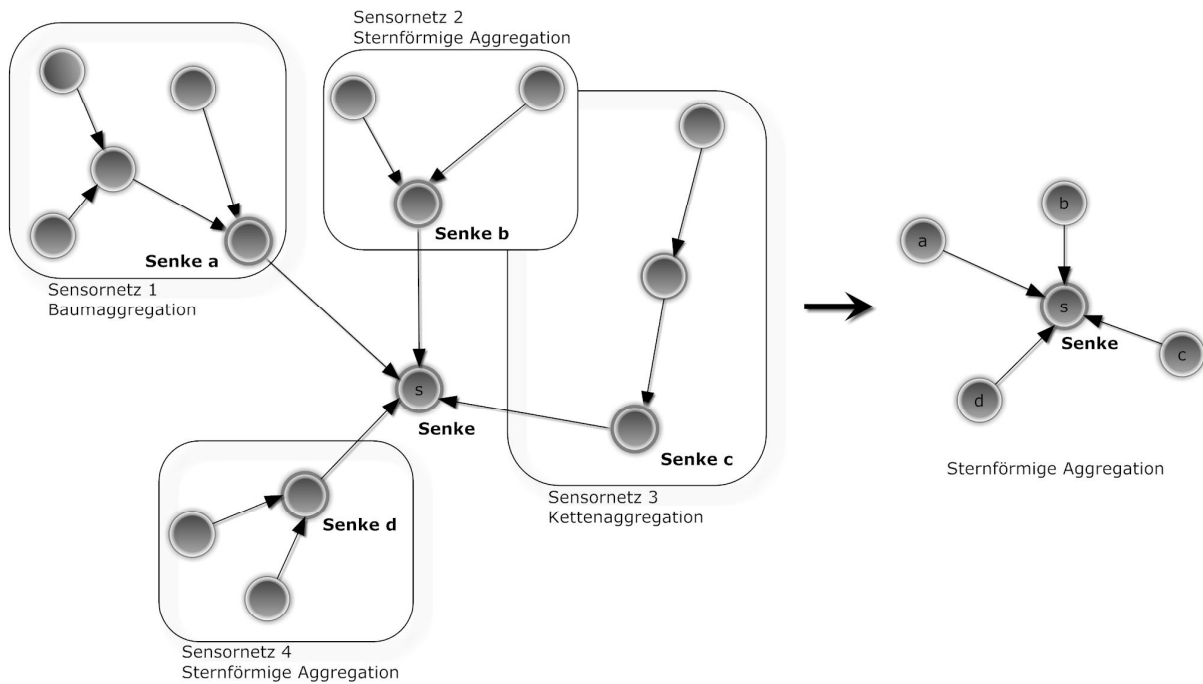


Abbildung 5.7: Hierarchische Datenaggregation.

Der Einsatz unterschiedlicher Aggregationsverfahren in Abhängigkeit von Applikation und Topologie bietet vielfältige Möglichkeiten zur Optimierung. Speziell dynamische Aggregationsstrategien, die Daten situationsabhängig aggregieren und weiterleiten, stehen im Fokus aktueller wissenschaftlicher Betrachtungen [118]. Sie sind somit deutlich flexibler und effizienter einsetzbar als statisch arbeitende Ansätze, binden jedoch auch mehr Ressourcen und benötigen aufgrund der erhöhten Komplexität mehr administrativen Aufwand.

5.3.2 Datenbankorientierte Verfahren

Datenbankorientierte Aggregationsverfahren arbeiten mit spezifischen Abfragemechanismen. Das gesamte Netzwerk fungiert hierbei als eine verteilte Datenbank mit zusätzlichen Funktionalitäten zur lokalen beziehungsweise autarken Datenvorverarbeitung. Es ist nun möglich, bereits in die Datenanfrage Zusatzinformationen über den späteren Verwendungszweck der Daten zu integrieren. Somit ermöglichen datenbankorientierte Verfahren eine individuelle und kontextabhängige Datenvorverarbeitung in den einzelnen Knoten.

Der Abfragesyntax und die Kommunikationsverfahren sind auf die spezifischen Anforderungen ressourcenbeschränkter, eingebetteter Systeme optimiert. Anfragen werden demnach mit Hilfe einer datenbankähnlichen Syntax gesendet und in den jeweiligen Knoten bzw. Knotenmengen verarbeitet. Zeitliche Aspekte für die Planung zukünftiger Aktionen sowie koordinierte Reaktionen auf spezifische Ereignisse in der Topologie sind dabei wichtig. Durch die Syntax der Anfragen sind komplexe Prozesse innerhalb der Knoten realisierbar.

Die bekanntesten Vertreter sind hierbei *COUGAR* [123, 407] der Universität Cornell, die *Fjords Architecture* [239] sowie *TinyDB* [80, 252] der University of California Berkeley sowie das auf *TinyDB* basierende *TAG*³ [251, 253]. *TAG* und *TinyDB* sind Bestandteil des *TinyOS* Betriebssystems und verfügen über eine SQL⁴-ähnliche Abfragesprache. *TAG* ist dabei für kontinuierliche Sensornetzkonfigurationen konzipiert, *TinyDB* unterstützt zusätzlich auch eventbasierte Szenarien. *COUGAR* ist ein experimentelles Sensornetzwerk-Datenmanagement-System, welches mit einer Proxy-Instanz (*QueryProxy*) zur Optimierung von Anfragen arbeitet. Die Kommunikation innerhalb der Sensortopologie erfolgt über Directed Diffusion Routing.

In Bezug auf die Behandlung von Messdaten sowie der entsprechenden Konfiguration lassen sich die Anfragen in drei Kategorien untergliedern:

Historical Query:

Anfrage aller Werte seit einem bestimmten Zeitstempel

(\rightarrow *Knotenmenge* $\langle x \rangle$ *kombiniere vorhandene Messwerte der Sensoren* $\langle y \rangle \dots \langle z \rangle$ *auf Basis der Regelsätze* $\langle r \rangle$ *für das Zeitintervall* $\langle t \rangle$ *und sende die Ergebnisse zu Senke* $\langle i \rangle$)

Snapshot Query:

Abfrage aller aktuellen Sensorwerte von einer definierten Knotenmenge

(\rightarrow *Knotenmenge* $\langle x \rangle$ *sende aktuelle Sensordaten* $\langle y \rangle$ *zu Senke* $\langle i \rangle$)

Continuous Query:

Initialisierung einer kontinuierlichen Messwertübertragung in einem vordefinierten Zyklus

(\rightarrow *Knotenmenge* $\langle x \rangle$ *sende Messwerte vom Typ* $\langle y \rangle$ *zyklisch im Zeitintervall* $\langle t \rangle$ *zu Senke* $\langle i \rangle$ *bis zum Zeitstempel* $\langle s \rangle / \infty$)

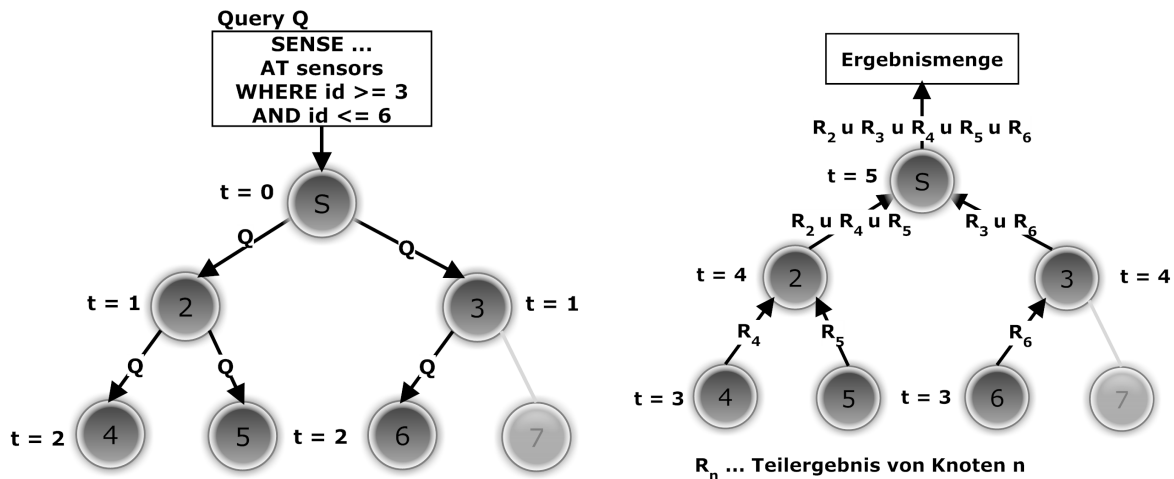
Für eine Erweiterung der Funktionalität über die reine Messdatenkonfiguration hinaus müssen geeignete Funktionsklassen zur Verfügung gestellt werden.

5.3.3 PLANetary

Im Rahmen von [43] wurde ein solches erweitertes Datenbankaggregationsverfahren umgesetzt und adaptiert. Der funktionale Kern von *PLANetary* arbeitet ähnlich wie *TinyDB* oder *COUGAR*, ist jedoch quelloffen und nicht an einen bestimmten Betriebssystemkern gebunden. Der Syntax der entwickelten Abfragesprache *PLANetaryQL* wurde entsprechend für SANET Applikationen erweitert und ermöglicht die Konfiguration ausgewählter Systemfunktionalitäten.

³Tiny Aggregation

⁴Structured Query Language



(a) Phase 1: Selektive Propagierung der Abfrage im Sensornetz.

(b) Phase 2: Kontextspezifische Aggregation der Ergebnismenge.

Abbildung 5.8: Die zwei Phasen für die Bearbeitung einer Datenanfrage. Da Knoten 7 nicht für die Anfrage benötigt wird, kann hier die Aktivierung verzichtet werden.

PLANetary nutzt die beiden typischen Betriebsphasen datenbankorientierter Verfahren. Die Funktionsweise wird hierzu in Abbildung 5.8 verdeutlicht. In der *Propagierungsphase* wird die Anfrage in die Topologie gesendet und von den Knoten selektiv bearbeitet. Diese Verteilung bindet relativ viele Energieressourcen. Das Einsparungspotential wird dann in der *kontextabhängigen Aggregationsphase* erreicht, bei der im Gegensatz zu klassischen Aggregationsverfahren nur die Knoten aktiv sind, die für die Anfrage tatsächlich benötigt werden. Diese selektive Nutzung von Netzwerkknoten und Daten ermöglicht dann auch eine zielgerichtete Vorverarbeitung der Ergebnisse auf lokaler Knotenebene. Folglich liegt so beim Eintreffen der Datenpakete im anfragenden Netzwerkknoten häufig bereits das Endergebnis vor, wodurch weitere Datenverarbeitungsschritte entfallen. Die Einsparungen in Zeit, Netzwerkdatenvolumen und Knotenaktivität wirken sich signifikant auf den Gesamtenergiebedarf der Kommunikation aus. die Energieeffizienz kann erheblich gesteigert werden [1]. Abbildung 5.9 zeigt die Umsetzung periodischer Abfragen mit PLANetary.

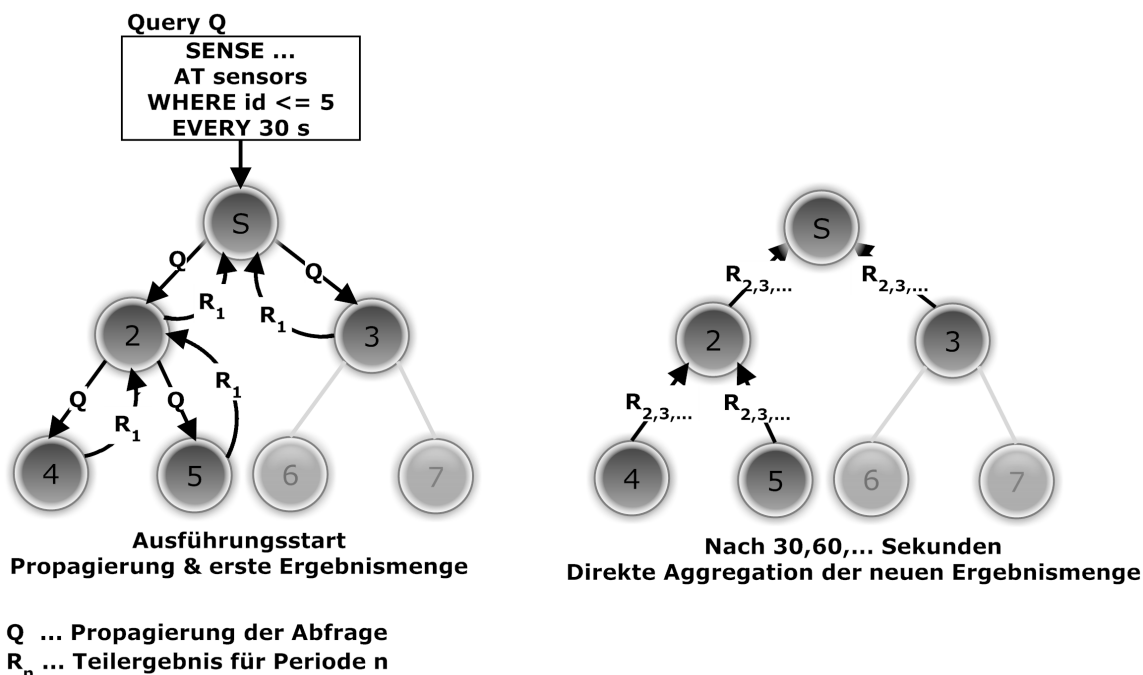


Abbildung 5.9: Ausführen einer periodischen Abfrage mit einmaliger Propagierung der Abfrage. Auch hier werden nicht benötigte Knoten, in diesem Fall Knoten 6 und 7, nicht aktiviert.

PLANetary wurde simulativ untersucht und anschließend in einer verteilten Demonstratorplattform getestet. Für die Hardwareevaluierungen kamen die *PLANET* Architektur [8, 20, 21] mit einem *FreeRTOS* Kern sowie die *nanett* Evaluationsboards zum Einsatz [22, 23]. Zusätzlich wurde für die Tests im Kontext eingebetteter Systeme ein dediziertes Konfigurationstool geschaffen, welches gleichzeitig zur Visualisierung aller übertragenen Messwerte genutzt werden konnte (siehe Abbildung 5.10).

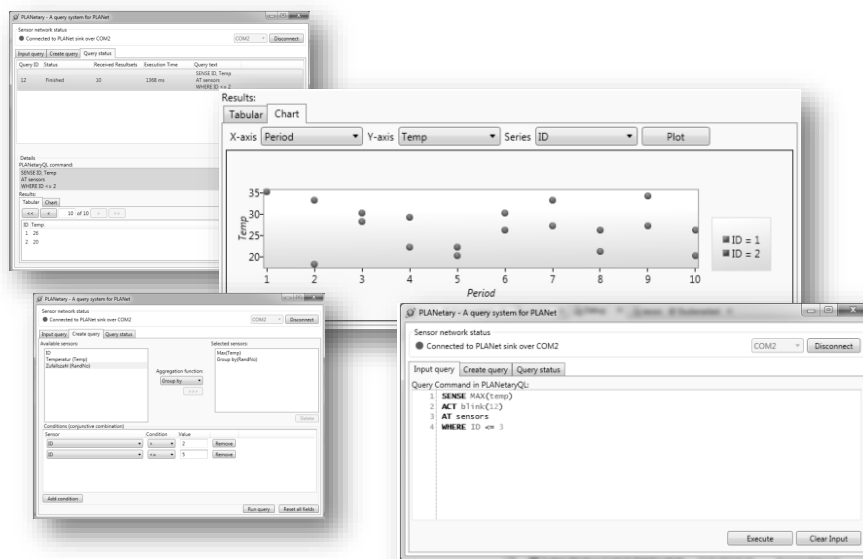


Abbildung 5.10: PLANetary Konfigurations- und Monitoringtool: Benutzeroberfläche zur Aufgabenverwaltung, grafischen Ergebnisdarstellung sowie zur Generierung von Abfragen.

Die erzielten Ergebnisse mit PLANetary zeigen dabei ein erhebliche Optimierungspotential für die Energieeffizienz der Kommunikationsprozesse in verteilt agierenden, ressourcenbeschränkten Systemen [1][43].

5.3.4 Betrachtung aus Energieeffizienzaspekten

Hinsichtlich eines energieeffizienten Datenmanagements in verteilten, eingebetteten Systemen müssen mehrere Aspekte kritisch betrachtet und applikationsspezifisch gewählt werden. Es wurden vier Punkte identifiziert, welche auf den vorherigen Betrachtungen in diesem Kapitel aufbauen:

Abwägung Snapshot Queries ↔ Continuous Queries:

Snapshots bieten Vorteile bei Detektionsaufgaben des Netzwerkes hinsichtlich weniger spezifischer Ereignisse. Das jeweilige Ereignis kann somit einfach in Relation zu den aktuellen Rahmenbedingungen gestellt werden. Kontinuierliche Messungen eignen sich vorrangig für komplexe Monitoring-Szenarien vordefinierter Eigenschaften. Je nach gewählter Methode kommen angepasste Datenaggregations- und Datenverteilungsansätze zum Einsatz.

Abfragende Datenübermittlung ↔ Kontinuierliche Informationsstreuung:

Diese Unterscheidung steht wiederum in direktem Zusammenhang mit dem zuvor genannten Aspekt. Bei der Datenverteilung kann eine *Push*- oder *Pull*-Strategie gewählt werden. Folglich ruft die Datensenke Information dediziert von den relevanten Knoten ab oder anderenfalls werden die Sensordaten ohne separate Aufforderung an die entsprechende Senke übermittelt.

Lokale ↔ Zentrale Datenspeicherung:

Aus Sicht der Speicherorganisation bedingt eine abfragende Datenübermittlung die lokale Speicherung beziehungsweise Pufferung von Daten. Bei kontinuierlicher Informationsstreuung folgt demnach direkt eine zentrale Datenspeicherung in der Senke. Es sind jedoch auch hybride Lösungsstrategien realisierbar [255], die sich unter anderem für asynchrone, WuRx-basierte Kommunikationsstrukturen anbieten.

Datenaktualisierungsrate ↔ Datenverlustrate:

Hier muss entschieden werden, inwiefern der Verlust von Einzelinformation während der Datenübertragung für die Erfüllung aller funktionalen und nichtfunktionalen Anforderungen relevant ist. Dies hat einen entscheidenden Einfluss auf die Auswahl der Kommunikations- und Datenmanagementkonzepte. Eine hohe Datenaktualisierungsrate erfordert mehr Datensätze und erhöht die Datenlast im Netzwerk, wodurch die Wahrscheinlichkeit für Datenverluste steigt. Lokale Datenspeicherung und Vorverarbeitung ist hier sinnvoll. Soll im Gegenzug die Datenverlustrate aufgrund einer zentralen Datenspeicherung möglichst gering gehalten werden, so muss die Last im Netzwerk minimiert werden, was wiederum negative Einflüsse auf die Aktualisierungsrate mit sich bringt.

Die konzeptionellen Vorteile von Datenaggregationsverfahren können aber nicht in jedem Anwendungsszenario genutzt werden. Zwischen Theorie und Praxis existieren teils erhebliche Unterschiede in Bezug auf Energieeffizienz und Ressourcenbelastung, welche beispielsweise in [30] und [29] kritisch diskutiert werden. Besonders die qualitativen Auswirkungen von Datenaggregation auf das Gesamtsystem sind an dieser Stelle nicht außer Acht zu lassen [154, 238]. Die Integration von Aggregationskonzepten in das Kommunikationskonzept muss daher je nach nutzerseitigen Anforderungen und verfügbaren Ressourcen individuell entschieden werden [43].

5.4 Datenfusion

Datenfusion erweitert die Ansätze von Datenaggregationsverfahren hinsichtlich *Heterogenität* und *Komplexität*. Dabei wird der Begriff für den Themenbereich dieser Arbeit wie folgt eingegrenzt und definiert [140]:

”Datenfusion ist der Prozess der Anreicherung von Rohdaten mit zusätzlichen Metainformationen. Diese stammen von unterschiedlichen Quellen und werden zu abstrakteren Informationseinheiten mit höherer Qualität kombiniert. So werden z.B. fusionierte Sensordatensätze mit Zeitstempeln oder Lokalisierungsdaten generiert.”

Diese Definition stellt die wesentlichen Kriterien und Merkmale eines Datenfusionsverfahrens deutlich heraus. Es handelt sich um die Anreicherung von Information mit zusätzlichen (Meta-)daten zur Generierung abstrakterer Informationseinheiten oder Ereignisse. Dabei werden Daten *unterschiedlicher/heterogener Quellen* zusammengefasst und anschließend interpretiert. Aus den korrelierten Einzelinformationen können anschließend komplexe Entscheidungen auf höheren Abstraktionsebenen getroffen werden. Im SANET Kontext ist auf Basis der erweiterten Wissensbasis eine effiziente und sicherere Koordination von Aktionen möglich.

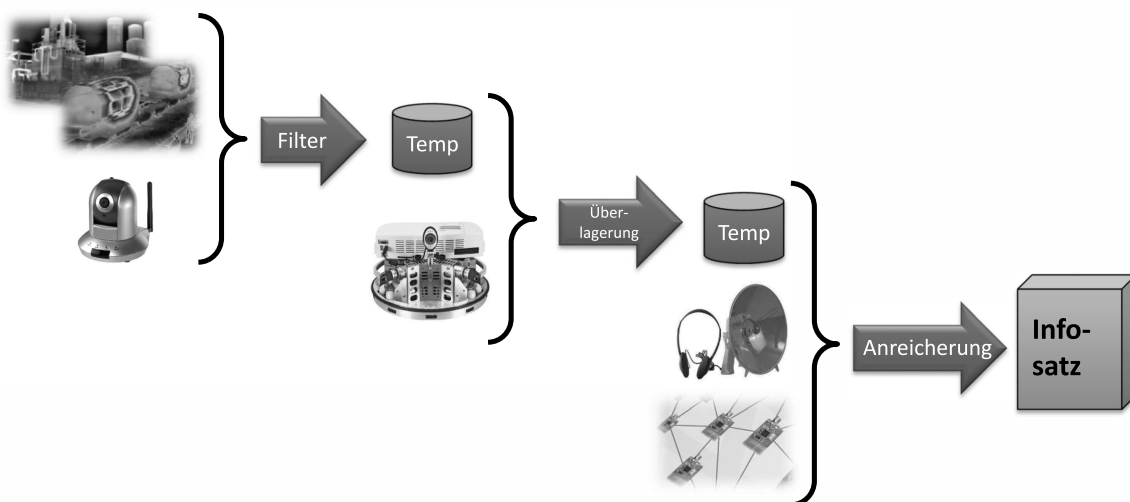


Abbildung 5.11: Beispielhaftes Datenfusionsszenario.

Die im Rahmen von Datenfusion durchgeführten Operationen sind deutlich komplexer und anwendungsspezifischer als bei Datenaggregationsansätzen [176]. Da die Vorbedingungen für die Erkennung von definierten Ereignissen stark kontextabhängig ist, existiert häufig eine umfassende Menge von Berechnungs- und Entscheidungsregeln, die das gewünschte Systemverhalten abbilden [125, 305]. Abbildung 5.11 zeigt beispielhaft ein solches Fusionsszenario.

Hier werden zunächst unterschiedliche optische Sensoren in der ersten Ebene über Filter zusammengefasst und anschließend mit Informationen eines mobilen Sensorsystems überlagert. Die Komposition erhält daraufhin in einer weiteren Stufe Zusatzinformationen aus verteilten Sensorikkomponenten. Daraus können dann Rückschlüsse auf die aktuelle Situation gezogen werden. Die erweiterte Wissensbasis ist dann Ausgangspunkt für weitere Verarbeitungsschritte und Entscheidungssysteme.

5.4.1 Mehrheitsvotum

In Bezug auf die Detektion definierter Ereignisse kommen häufig einfache Fusionsstrategien auf Basis von Mehrheitsentscheidungen zum Einsatz [180] (siehe Abbildung 5.12.) Das Grundprinzip stützt sich dabei auf die Vermeidung von *Single-Points-of-Failure*. Indem Einzelinformation zunächst durch umliegende Sensordaten gegengeprüft werden, sinkt die Wahrscheinlichkeit für Fehlentscheidungen deutlich. Im Gegenzug ist für eine entsprechende Realisierung ein Mindestmaß an Redundanz hinsichtlich der Sensorabdeckung erforderlich, was jedoch stark abhängig vom jeweiligen Anwendungsszenario ist. Die Mehrheitsentscheidungen können dabei entweder über mehrere gleichartige Sensorentitäten realisiert werden oder auch über den Abgleich von Messergebnissen unterschiedlicher Sensortypen.

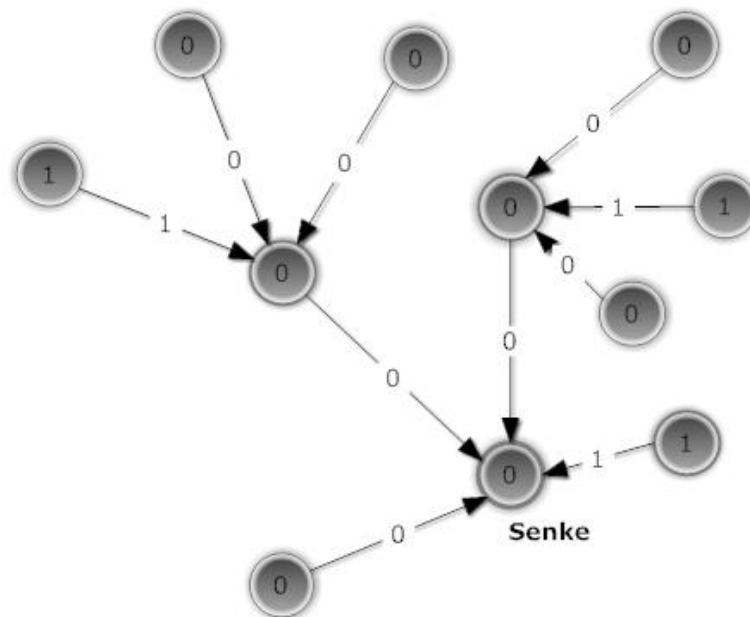


Abbildung 5.12: Datenfusionsszenario auf Basis von Mehrheitsentscheidungen liefern meist zuverlässigere Ergebnisse für die Erkennung spezifizierter *Trigger*-Ereignisse.

5.4.2 Dynamische Datenfusion mit Hilfe mobiler Agenten

Im Bereich drahtloser Ad Hoc Topologien sind Agenten häufig ein effizientes Mittel, um dynamisch und adaptiv das Kommunikationsverhalten zu beeinflussen bzw. hinsichtlich unterschiedlicher Parameter zu optimieren. Agenten werden in diesem Kontext nach [158] wie folgt definiert:

„Ein autonomer Agent ist ein System, das sich in einer Umgebung befindet und Teil von dieser ist und Messungen an dieser vornimmt. Darüber hinaus wirkt es - langfristig - auf Basis einer eigenen Agenda auf diese Umgebung ein, mit dem unmittelbaren Ziel, zu beeinflussen, was es in Zukunft misst.“

Die Datenfusion und damit die applikationsspezifische Verschmelzung von heterogenen Einzeldaten zu komplexeren Informationseinheiten bietet ideale Voraussetzungen für agentenbasierte Verfahren. In [306] wird ein auf mobilen Agenten basierendes Fusionsverfahren vorgestellt, welches hinsichtlich der Flexibilität deutliche Vorteile gegenüber klassischen Ansätzen bietet [233]. Die Agenten bewegen sich dabei selbstständig zwischen den einzelnen Sensorknoten um dort lokal vordefinierte Datenverarbeitungsoperationen auszuführen. Dies eröffnet wiederum vielfältige Möglichkeiten für die situationsabhängige Anpassung der Verarbeitungsprozesse zur Laufzeit [112].

Folglich sind derartige Ansätze auch im Kontext der Energieeffizienz sinnvoll anwendbar [375]. Sie ermöglichen die dynamische Reorganisation von Kommunikationsprozessen und Kommunikationspfaden in Abhängigkeit von Energieniveau und Energieverteilung [92, 312]. Die Agenten können dabei auf unterschiedlichen Protokollebenen umgesetzt werden. Sie arbeiten mit jeweils angepassten Strategien und Regelsätzen. So steht beispielsweise bei der Implementierung auf der Applikationsebene eine deutlich breitere Wissensbasis zur Verfügung als dies auf Netzwerkebene möglich ist.

Die Thematik der dynamischen Datenfusion wird in der Literatur häufig auch im Kontext von *CSIP*⁵ diskutiert [133]. Die genutzten Metriken zu Anpassung stützen sich häufig auf die benötigte Ausführungszeit sowie die für eine Aktion gebundenen Energieressourcen. Werden bestimmte Schwellwerte über- oder unterschritten, so erfolgt eine Änderung der Verarbeitungsstrategie. Unter Berücksichtigung gegebener qualitativer Anforderungen sind diese Anpassungen nur in begrenztem Umfang realisierbar. Der Einsatz mobiler Agenten wurde in [307] auf Basis der beiden genannten Metriken evaluiert und mit klassischen Server-Client-Ansätzen verglichen. Es konnte gezeigt werden, dass sich dynamische Anpassungsstrategien besonders in großen, mobilen Netzwerktopologien sowie bei Nutzung schmalbandiger Funktechnologien eignen. Hier konnte die Qualität der Kommunikation signifikant gesteigert werden.

⁵Collaborative Signal and Information Processing

5.5 Datenverwaltung & Datenverteilung

Die Kombination von Datenfusions-, Datenaggregations- und Datenkompressionsverfahren, welche dezentral auf den einzelnen Netzwerkknoten ausgeführt werden, wird als *In-Network-Processing* bezeichnet. Die Menge aller vorverarbeiteten Informationen muss anschließend im Zuge eines weiterführenden Verarbeitungsprozesses in eine Wissensbasis überführt werden. Diese ist je nach Systemarchitektur zentral organisiert oder arbeitet als dezentrale Entscheidungsinstanz. Durch die verteilte Struktur des Gesamtsystems sind hierbei systematische Verfahren zur Rekonstruktion globaler Ereignisse auf Basis lokaler Informationen erforderlich. Diese Verfahren werden unter *Datenverwaltung & Datenverteilung* zusammengefasst. Bei der Verteilung kommen meist standardisierte Basisfunktionalitäten des Netzwerkmanagements zum Einsatz, mit denen die gewonnenen Informationen an alle relevanten Netzwerkknoten übertragen werden. Die Verfahren umfassen dabei die bereits vorgestellten Broadcast-, Multicast-, Punkt-zu-Punkt- oder Publish-Subscribe-Mechanismen. Während die Datenverteilung sich somit auf einige wenige Kommunikationsstrategien beschränkt, repräsentiert die Datenverwaltung einen stark applikationsspezifischen Vorgang, der von vielen Parametern beeinflusst wird. Betrachtet man hierzu den ganzheitlichen Datenverarbeitungsprozess, wie er in Abbildung 5.13 dargestellt ist, so lassen sich vier Phasen unterscheiden, die in direktem Zusammenhang mit der Datenverwaltung stehen.



Abbildung 5.13: WSN / SANET Applikationsszenarien: Prozesskette im Rahmen einer ganzheitlichen Datenverarbeitung.

Zunächst werden Daten von den jeweiligen Sensorinstanzen aufgenommen und koordiniert zusammengeführt. Zwischen den einzelnen Messsystemen müssen dabei geeignete Synchronisationsmechanismen zur Verfügung gestellt werden, um so zeitliche Zusammenhänge interpretieren zu können. Es folgt die Verarbeitung der Daten und damit einhergehend die Ableitung von Informationen und Ereignissen im Anwendungskontext. Anschließend folgt die Phase der Datenspeicherung, wodurch die spätere Rekonstruktion von Ereignissen mit allen Rahmenparametern der Laufzeit sichergestellt wird. In einer letzten Phase erfolgt die Aufbereitung der Daten für den Nutzer oder auch die Verteilung der Information an andere Systeme für Folgeprozesse. Bei allen Phasen müssen dabei etwaige Echtzeitanforderungen beachtet werden. Im Bereich eingebetteter, energieautarker Systeme ist die Verwaltung und Verteilung großer Datenmengen mit zusätzlichen Schwierigkeiten verbunden [2]. Aufgrund fehlender Peripherieschnittstellen, der räumlichen Ausbreitung eines verteilt agierenden Systems sowie der Heterogenität und beschränkter Energieressourcen ist die direkte Interaktion des Nutzers mit den vielen Einzelsystemen nur stark eingeschränkt möglich.

5.6 GREASE Framework

In den praktischen Umsetzungen aller vier Phasen entstehen durch die komplexen Abhängigkeiten meist wenig flexible *Insellösungen*, die sehr stark auf die vorhandenen Systemarchitekturen oder Anwendungsszenarien angepasst sind und nur in einem Anwendungskontext verwendet werden können. Grund hierfür sind häufig auch fehlende, applikationsübergreifende Standards und Richtlinien. Aus diesem Grund wurde im Rahmen dieser Arbeit ein umfassendes Datenverwaltungsframework konzipiert und implementiert [9, 10, 13]. *GREASE*⁶ (siehe Abbildung 5.14) repräsentiert dabei ein generisches und flexibles Werkzeug zur ganzheitlichen Erfassung, Verarbeitung, Aufbereitung und Visualisierung von Sensordaten sowie Systemkonfigurationen im WSN / SANET Umfeld.

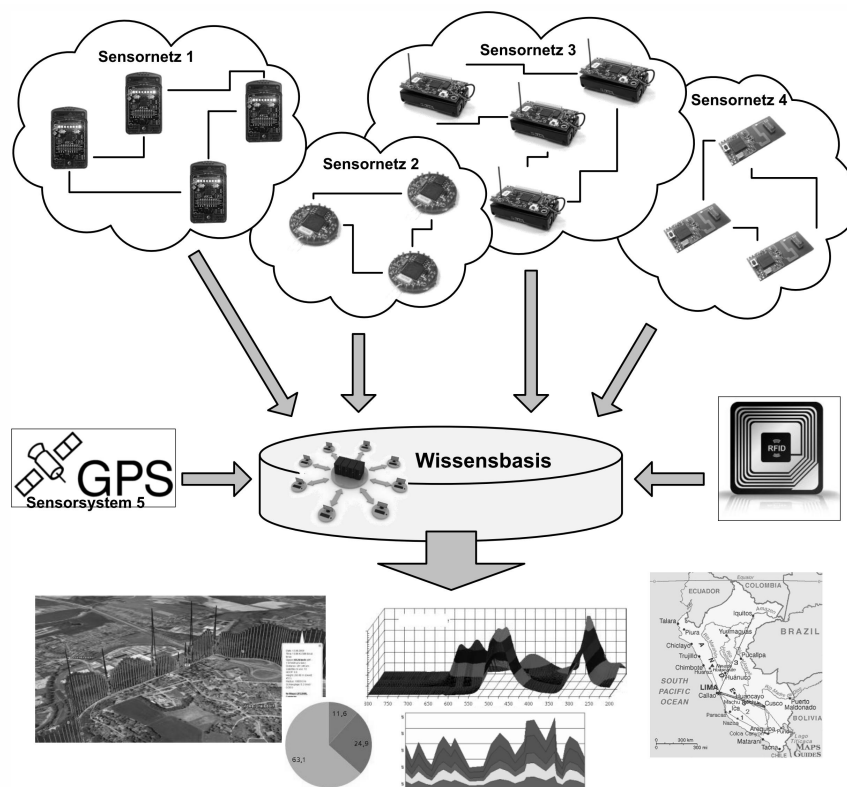


Abbildung 5.14: GREASE Framework - Generic Reconfigurable Evaluation and Aggregation of Sensor Data.

GREASE unterstützt den vollständigen Datenverarbeitungsprozess beginnend bei der synchronisierten Messwertaufzeichnung bis hin zur abschließenden Datenanalyse [11, 12]. Die implementierte Struktur des Frameworks bedient sich dabei einer *Stundenglasarchitektur*, die eine sehr gute Interoperabilität zwischen den verschiedenen Funktionskomponenten ermöglicht [325]. Dies bedeutet, dass sowohl auf Eingangsseite (Datenaufnahme) als auch auf Ausgangsseite (Datenauswertung) eine große Diversität vorliegt, währenddessen der Mittelteil als Verbindungsstück uniform und schlank realisiert ist. Abbildung 5.15 zeigt die interne Struktur von GREASE in einer vereinfachten Darstellung.

⁶Generic Reconfigurable Evaluation and Aggregation of Sensor Data

5 Datenmanagement

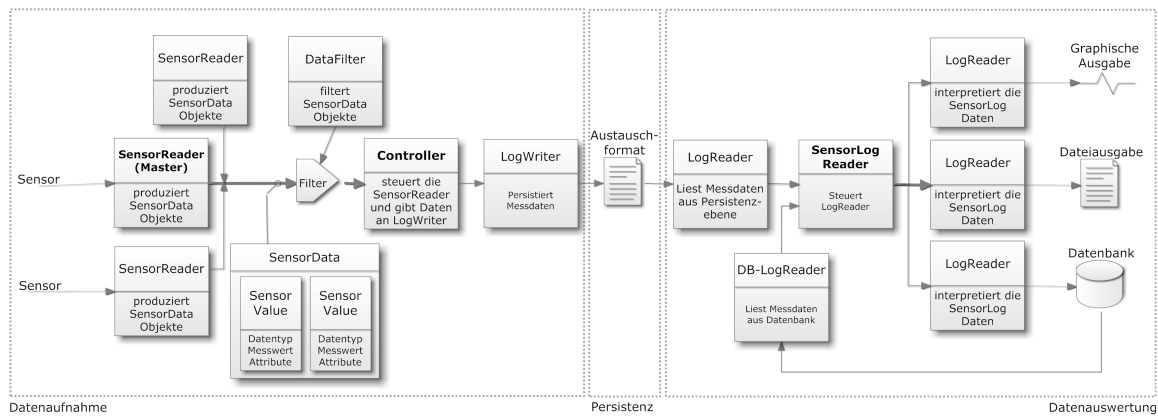


Abbildung 5.15: Interne Struktur für das GREASE Framework.

GREASE besteht im Kern aus Objekttypen-Definitionen, einer Menge generischer Schnittstellen und einer entsprechenden Plug-In-Architektur. Durch das Plug-In-Konzept sind spätere Anpassungen der Konfiguration, wie beispielsweise die Integration neuer Sensorik oder Aktuatorik, sowie Modifikationen der Ablaufplanung problemlos möglich. Die genannten Vorteile treten besonders bei Anwendungsszenarien mit stark heterogenen Systemarchitekturen und unterschiedlichen Hardwareplattformen hervor [10, 13]. Durch die strikte Trennung der Datenaufnahme und Datenauswertung sowie durch ein datenunabhängiges Austauschformat (XML^7) und die Unterteilung der Funktionseinheiten in einzelne Module ist eine reibungslose Datenverwaltung möglich.

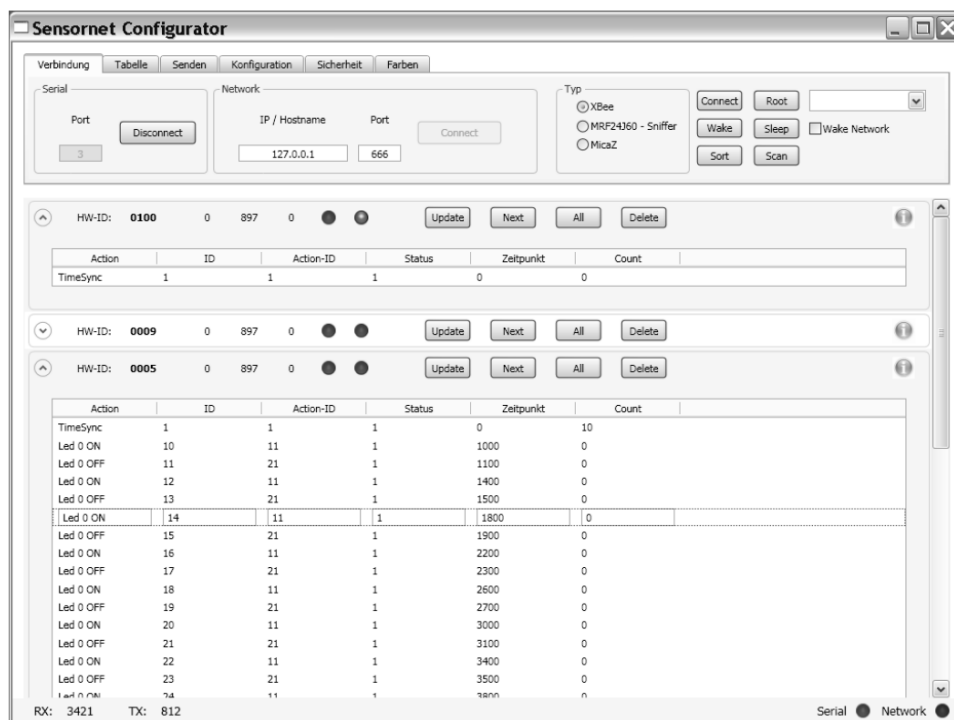


Abbildung 5.16: Grafische Benutzeroberfläche von GREASE.

⁷eXtensible Markup Language

Abbildung 5.16 zeigt die grafische Benutzeroberfläche von GREASE zur drahtlosen Konfiguration von verteilten Sensor-Aktor-Systemen. GREASE nutzt hierfür die vorhandene, drahtlose Kommunikationsinfrastruktur des SANETs und ermöglicht die dynamische Anpassung aller Einzelsysteme zur Laufzeit, um so alle Sensor- und Aktor-Tasks zeitlich zu koordinieren. GREASE setzt hierbei den ASAM-Standard⁸ [56] um, welcher von führenden Unternehmen im Automotive Sektor zur Messwertaufzeichnung und -verarbeitung konzipiert wurde. Somit sind die von GREASE bereitgestellten Daten auch mit einer Vielzahl professioneller Datenauswertungs- und Datenvisualisierungswerkzeuge kompatibel, so beispielsweise *LabView* von Texas Instruments, *jBeam* von AMS oder *FlexPro*.

GREASE dient im Rahmen dieser Arbeit als essentielles Werkzeug zur Konfiguration der implementierten Testszenarien und ermöglicht eine zentrale Erfassung aller Daten innerhalb der heterogenen, verteilten Systemarchitektur.

5.7 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde die Thematik Datenmanagement im Kontext eingebetteter, verteilt agierender Systeme behandelt. Es baut logisch direkt auf den Funktionalitäten des Netzwerkmanagements auf. Verfahren des Datenmanagements umfassen dabei die gesamte Datenverarbeitungskette innerhalb einer verteilten Systemarchitektur. Hierbei müssen alle Anforderungen der Applikation bezüglich Antwortzeiten, Prioritäten, Datenumfang, Güte oder auch Redundanzgrad berücksichtigt werden.

Zunächst wurden in diesem Zusammenhang Funktionen der Aufgabenplanung erörtert, welche globale Zielstellungen auf lokale Tasks für die Einzelsysteme verteilt und koordiniert. Durch lokale (knoteninterne) und globale (netzwerkweite) Synchronisationsmechanismen können hierbei unnötige Datenübertragungen verhindert und die Qualität der Informationen erhöht werden.

Im weiteren Verlauf des Kapitels wurde auf Verfahren zur Datenaggregation sowie zur Datenfusion eingegangen, welche die Datenlast im Netzwerk senken sollen. Die lokalen Datenvorverarbeitungsmechanismen wirken sich dabei auf globaler Ebene positiv auf die Detektionssicherheit aus. Gleichzeitig erfolgte aber auch eine kritische Diskussion bezüglich negativer Aspekte von Datenaggregations- und Datenfusionsansätzen, speziell in Hinblick auf die Messwertqualität sowie die Verarbeitungskomplexität.

Des Weiteren wurde im Kapitel das datenbankorientierte Aggregationskonzept PLANetary vorgestellt und analysiert. Abschließend befassten sich die Ausführungen mit der Datenverwaltung und Datenverteilung. Zur Evaluierung ganzheitlicher Verarbeitungsprozesse im Kontext von Datenmanagementverfahren wurde außerdem das entwickelte GREASE-Framework vorgestellt, welches in den späteren Fallstudien zum Einsatz kommt.

Das nachfolgende Kapitel stellt nun das Energiemanagement als weitere Abstraktionsschicht verteilter, eingebetteter Kommunikationsarchitekturen vor.

⁸Association for Standardisation of Automation and Measuring Systems

6 Energiemanagement

Im Bereich eingebetteter, energieautarker Systeme ergeben sich aufgrund stark begrenzter Ressourcen vielfältige Einschränkungen und Herausforderungen. Betrachtet man die technologischen Weiterentwicklungen der vergangenen Jahrzehnte, so driftet besonders der Energiebedarf immer leistungsfähigerer Geräte und die zur Verfügung stehende Ladungsdichte entsprechender Energiespeicher stark auseinander [170]. Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass vermehrt Kompromisse zwischen Systemleistungsfähigkeit und Dimensionierung der Energieversorgung notwendig sind. Das entstandene *Battery Gap* wird in Abbildung 6.1 beispielhaft anhand mobiler Prozessorplattformen verdeutlicht (basierend auf [231]).

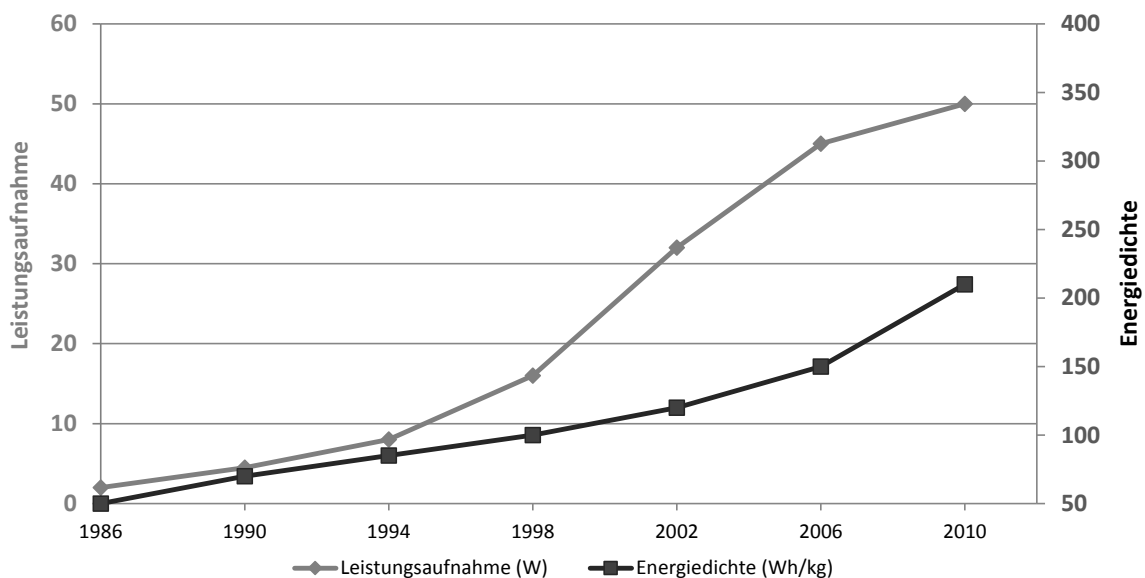


Abbildung 6.1: *Battery Gap* - Das Auseinanderdriften der Leistungsaufnahme und der verfügbaren Ladungsdichte relevanter Akkumulortechnologien am Beispiel mobiler Prozessorplattformen.

Auch wenn diese Werte nicht mit denen eingebetteter Systemplattformen vergleichbar sind, so behalten die Relationen zwischen beiden Kurven ihre Aussagekraft und zeigen die Problemstellung deutlich. In Langzeitapplikationen auf WSN und SANET Architekturen sollen die konzipierten Systeme über einen sehr langen Zeitraum hinweg ohne externe Energiezufuhr autark agieren und kommunizieren. Drahtlose Netzwerkschnittstellen und die Menge aller Übertragungsprozesse sind hierbei über die Gesamtbetriebsdauer wesentliche Energieverbraucher [141, 231]. Folglich muss es Ziel sein, Kommunikationsaspekte aus energetischer Sicht gezielt zu koordinieren. Hierfür kapselt das Energiemanagement Funktionalitäten zur Überwachung und Verteilung der Energieressourcen auf unterschiedlichen Ebenen. Abbildung 6.2 zeigt in diesem Zusammenhang einen Überblick über den Themenkomplex Energiemanagement mit Bezug auf die Kommunikationsaspekte innerhalb eines mobilen, verteilt agierenden Systems.

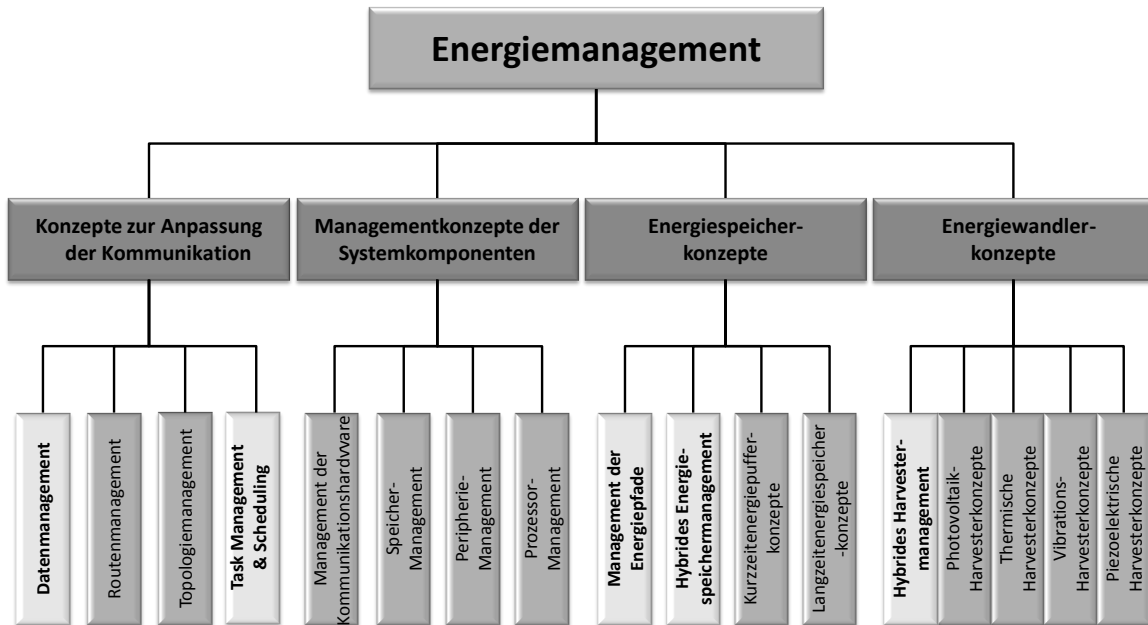


Abbildung 6.2: Klassifizierung der verschiedenen Energiemanagementbereiche und -konzepte.

Es werden primär vier Hauptkategorien unterschieden, die sich in der Gesamtsystemstruktur ergänzen. Einerseits ist es erforderlich, die *Kommunikationsprozesse* selbst sowie die jeweiligen *Systemkomponenten* anzupassen. Andererseits umfasst das Management vor allem die *Energiespeicherkonzepte* des Systems, die je nach Anwendung und konzipierter Betriebsdauer durch *Energiewandlerkonzepte* ergänzt werden. In der Darstellung sind viele der aufgeführten Themenstellungen vorangegangener Kapitel einbezogen, die hier aus Sicht des Energiemanagements zusammengefasst werden.

Betrachtet man das Energiemanagement aus Sicht der zu überwachenden Prozesse, so untergliedert sich die Thematik in eine überschaubare Menge:

Datenaquise:

Sensorabastung, A/D Umwandlung, Vorverarbeitung/Filter sowie Zwischenspeicherung

Übertragung:

Adressbestimmung, Paketbildung, Encoding, Framing sowie Queuing

Empfang:

Filterung, Detektion, Decodierung, Fehlererkennung, Adressprüfung

Empfangsbereitschaft:

bei Detektion analog zum Empfangsprozess

Aktion:

Ansteuerung von Aktuatoren

Standby / Sleep

Koordinierung, Timeouts, Latenzen

Jeder der Prozesse umfasst wiederum mehrere Teilaufgaben, die auf Hardware- beziehungsweise Prokollebene energieeffizient umzusetzen sind.

6.1 Energiewandlerkonzepte

Aus Forschungssicht besteht die Vision dauerhaft *energieautarker* Systemarchitekturen. Dies ist mit konventionellen Möglichkeiten nur begrenzt möglich, da im Zuge des stetigen Miniaturisierungsprozesses auf technologischer Seite auch die Energiespeicher entsprechend kleiner dimensioniert werden müssen. Energiewandlerkonzepte bieten hier Möglichkeiten, einen wartungsfreien und energieautarken Betrieb zu realisieren. Ihre Aufgabe, kontinuierlich Energie über verschiedene physikalische Prinzipien aus der Umgebung zu *ernten*, ist dabei namensgebend für den Fachbegriff *Energy Harvester*. Während herkömmliche, mobile Systemarchitekturen also über hart begrenzte Energiespeicher verfügen, stellen Architekturen mit Energy Harvesting Komponenten zusätzliche, regenerative Energieressourcen zur Verfügung. Somit sind diese Systeme in ihrer Betriebszeit grundsätzlich nicht beschränkt. Einige grundlegende, physikalische Prinzipien zur Energiegewinnung werden nach [74, 75] in Abbildung 6.3 dargestellt.

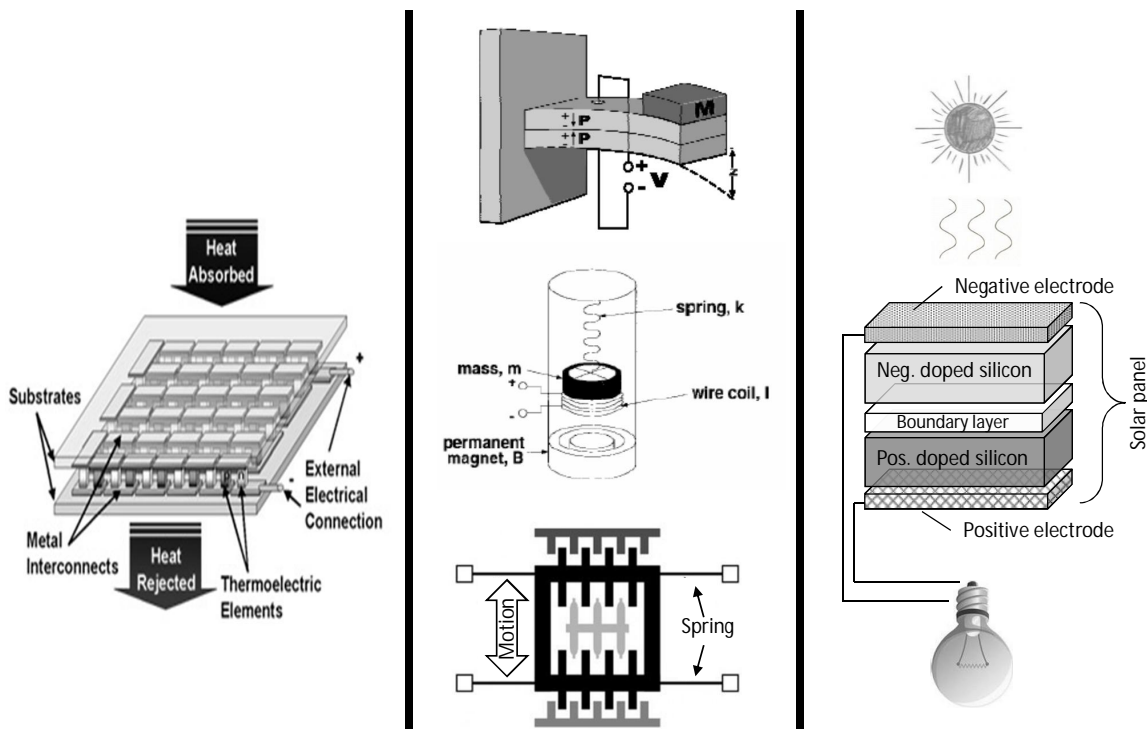


Abbildung 6.3: Typische physikalische Energiewandlungsprozesse - thermoelektrische Wandler (*links*), photoelektrische Wandler (*rechts*) sowie Vibrationswandler (*Mitte*). Besonders Vibrationswandler prägen sich in verschiedenen Energy Harvesting Konzepten aus, so z.B. piezoelektrisch (*Mitte-Oben*), elektromagnetisch (*Zentrum*) oder auch elektrostatisch (*Mitte-unten*)

Jeder Harvester-Typ nutzt spezifische Effekte in seiner Umgebung, um ausgangsseitig elektrische Energie zur Verfügung zu stellen. Im Bereich von Body-Area-Networks existieren

zusätzliche Möglichkeiten durch Nutzung der natürlichen Elektrizität im menschlichen Körper. So forscht das *MIT* aktuell an einem Harvesting-System, welches das menschliche Ohr als Energiequelle nutzt [302]. Aber auch klassische thermoelektrische oder piezoelektrische Energiewandlerkonzepte lassen sich hier hervorragend nutzen, so z.B. der Temperaturunterschied an der Hautoberfläche, der Auflagedruck von Füßen sowie jegliche Körperbewegungen.

Durch die Verwendung *hybrider Harvester-Konzepte* sind unterschiedliche Umwelteffekte ergänzend nutzbar, wodurch der Energiebedarf des Systems unter verschiedenen Rahmenbedingungen gleichbleibend gedeckt werden kann. Die Architektur eines Sensorknotens mit mehreren integrierten Harvester-Komponenten und einem erweiterten Energiemanagement wird in Abbildung 6.4 schematisch dargestellt.

Es bleibt dennoch zu beachten, dass die Lösungen im Bereich des Energy Harvestings sehr stark applikationsspezifisch optimiert werden müssen [134, 214]. Dabei sind sowohl Rahmenbedingungen der Umwelt sowie die Eigenschaften aller Systemkomponenten bei der Dimensionierung und Konfiguration zu beachten. Welche Auswirkung Energy Harvesting Konzepte auf die Energieeffizienz haben und in wie weit eine Umsetzbarkeit in eingebetteten, ressourcenbeschränkten Systemen sinnvoll ist, wurde in [310] sowie in [22, 23] analysiert. Die Ergebnisse zeigen dabei das Optimierungspotential im Kontext drahtloser Low-Power Kommunikationsplattformen. Auf weitere Details wird in den nachfolgenden Fallstudien in Kapitel 8 noch eingegangen.

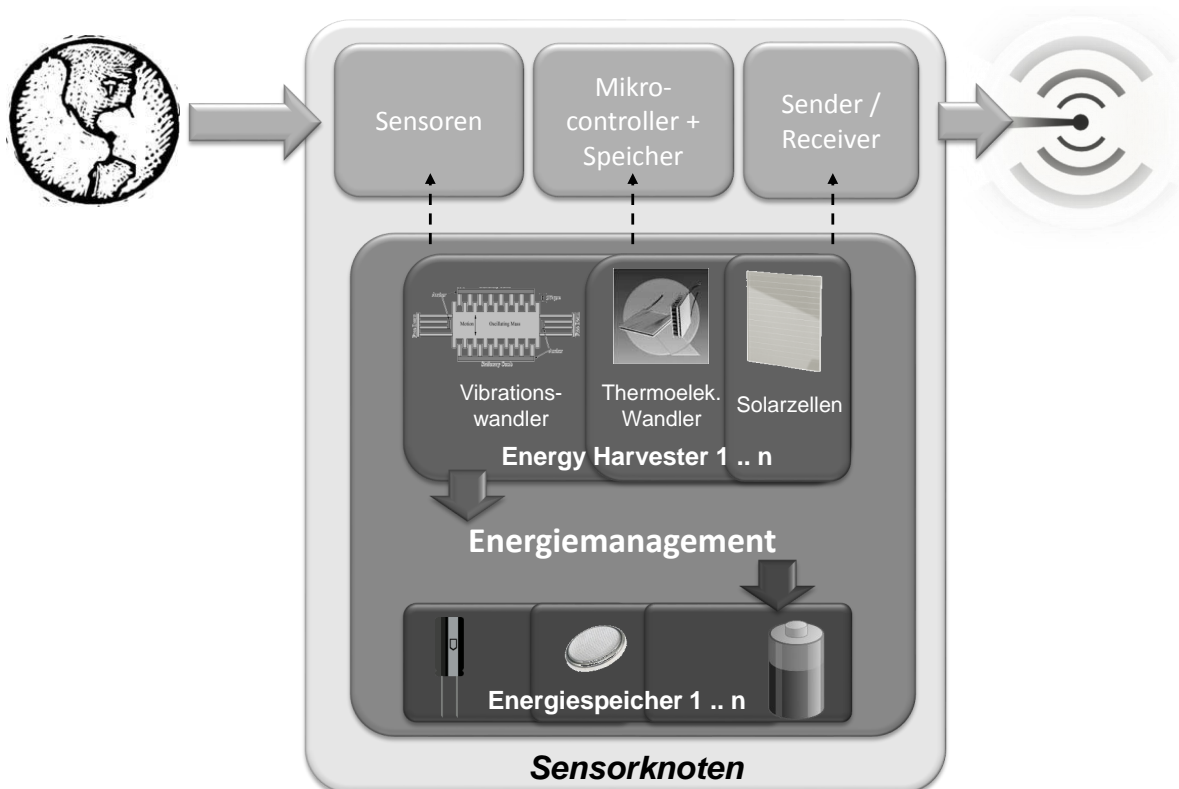


Abbildung 6.4: Typischer Sensornetzwerkknott mit integrierten Energy Harvestern, welche die Knotenlaufzeit deutlich verlängern.

6.2 Energiespeicherung & -verteilung

Um auch unter schlechten Bedingungen ein Mindestmaß für die Systembetriebsdauer zu gewährleisten und gleichzeitig Gewicht, Abmaße und Kosten der Plattform zu minimieren, ist eine exakte Dimensionierung der Energiespeicher notwendig. Zum Einsatz kommen dabei unterschiedliche Speicherarten und Speichertechnologien, auf deren Details an dieser Stelle verzichtet wird. Wichtig sind an dieser Stelle jedoch die spezifischen Unterscheidungskriterien und Speichercharakteristiken, die bei der Konzeption und Realisierung konkreter Anwendungen betrachtet werden. Wesentliche Schlüsselparameter lassen sich wie folgt untergliedern:

Kapazität & Ladungsdichte:

Energiespeicherkapazität und mit der Dimensionierung einhergehend auch die Energiedichte pro Volumeneinheit.

Verhalten unter Last:

Beschreibt die kurzfristig verfügbare Energiekapazität unter Last und bei unterschiedlichen Ladezuständen.

Selbstentladung:

Beschreibt die kontinuierliche Abnahme der Energieressourcen ohne anliegende Last. Speziell bei Langzeitanwendungen ist dieses Entladeverhalten von Relevanz und stellt einen wichtigen Indikator für die Lebensdauer der Energiespeicher dar.

Ladedauer:

Mit welchem Energieniveau kann der Speicher geladen werden, welche Ladezeit ergibt sich daraus und wie stark prägt sich ein *Memory-Effekt* aus. Beim Einsatz von Energy Harvesting Konzepten ist dabei auch die maximale Anzahl von Ladezyklen der Speichertechnologie von besonderer Relevanz.

Der technologische Weiterentwicklungsprozess befasst sich mit all diesen Eigenschaften, muss dabei aber auch wirtschaftliche Gesichtspunkte beachten. Kostengünstige Technologien und effiziente Fertigungsverfahren zur Massenproduktion müssen gefunden werden. Auf Forschungsseite stellen neben *Macro-scale* Batterien (Alkaline, Lithium, Zink-Luft) und *Micro-scale* Batterien¹ vor allem *Kondensatoren*, *Microfuel Cells* oder auch *Microturbinen* wichtige Technologien im Bereich der eingebetteten Systeme dar. In Hinblick auf das bereits vorgestellte Battery Gap und die Bestrebungen zur Miniaturisierung der Hardwarekomponenten steht eine Erhöhung der Ladungsdichte im Vordergrund. In Kombination mit verbesserten Energy Harvesting Konzepten sind dann mittelfristig vollständig energieautarke Systemplattformen für vielfältige Sensor- und Sensor-Aktor-Netzwerke realisierbar.

Neben den reinen Speichermöglichkeiten für Energieressourcen müssen jedoch auch geeignete Strategien zur Energieverteilung umgesetzt werden. Für die reine physische Verteilung existieren mehrere konzeptionelle Möglichkeiten, unter anderem *elektromagnetisch (RF)*, *drahtgebunden*, *akustisch* oder auch auf Basis von hochenergetischem *Licht* (z.B. per Laser).

¹dünne flexible externe Energiespeicher sowie dünne on-chip Speicher

6 Energiemanagement

Auf der Ebene des Energiemanagements sind zur effizienten Verteilung der Ressourcen alle Systemfunktionen abstrakt zu gewichten und mit Prioritäten zu behaften. Je nach Systemzustand und Situation können die Energieressourcen entsprechend zugeteilt werden.

In Abhängigkeit vom gewählten Energiespeicherkonzept und den integrierten Komponenten arbeitet dann ein umfassendes Energiemanagement auf Basis einer mehrdimensionalen Entscheidungslogik, welches die effiziente Koordinierung aller Energieressourcen sicherstellt. Die kritischen Dimensionen der Logik umfassen dabei Ladezustand, Systemlast, Energieprognosen sowie Umweltparameter oder die spezifische Speichercharakteristik. Wie in Abbildung 6.5 dargestellt, verwaltet das Energiemanagement die aktuellen und prognostizierten Budgets aller Energiewandler sowie Verbraucher im System.

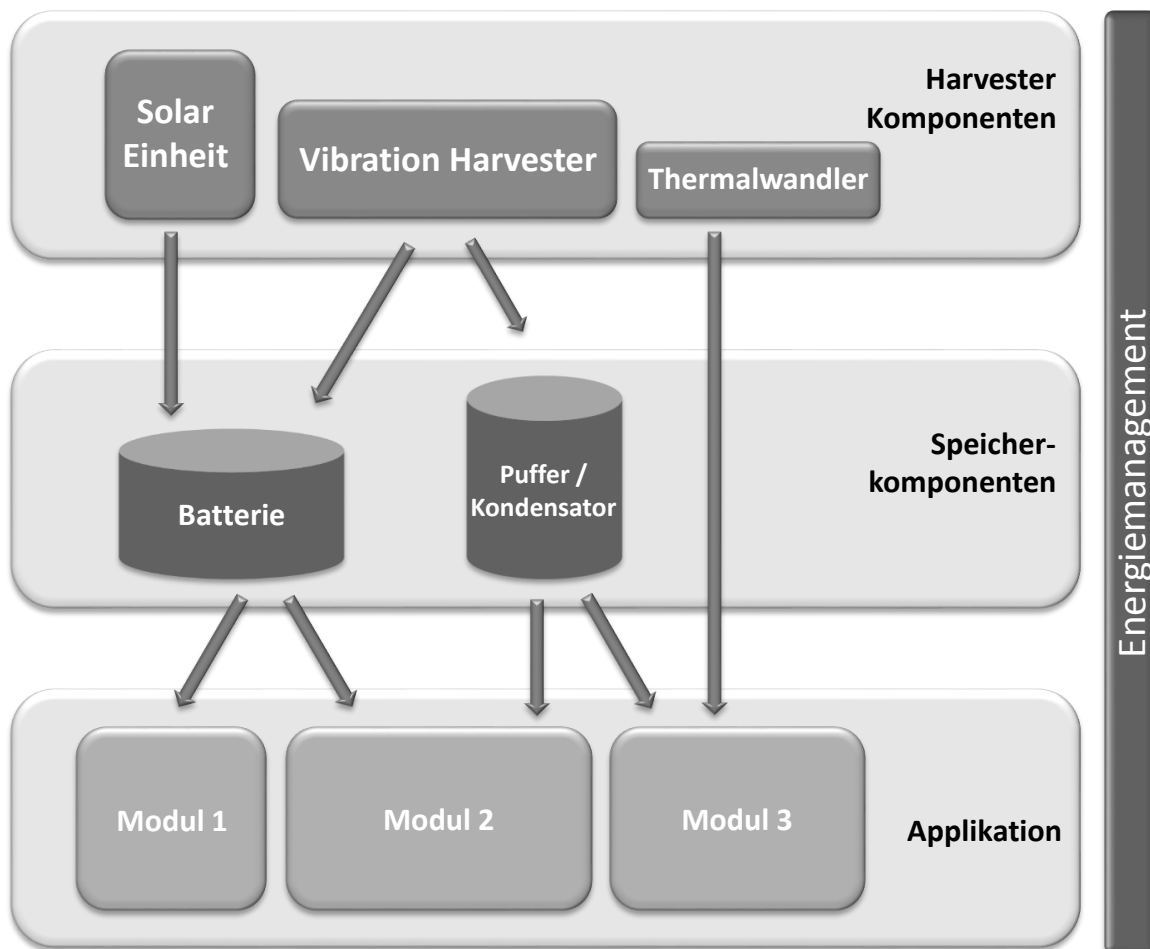


Abbildung 6.5: Das Energiemanagement ist für die Analyse und die effiziente Verteilung der verfügbaren Energieressourcen verantwortlich.

Im Falle eines heterogenen Speicherkonzeptes mit mehreren Harvester-Komponenten muss je nach Situation entschieden werden, ob und in welchen Speicher Energie gepuffert wird. Einerseits müssen dabei alle Systemfunktionen aufrechterhalten werden, d.h. bei direkter Speisung muss ein ausreichendes Energieniveau anliegen. Auf der anderen Seite sollen die Energiespeicher geschont und folglich möglichst effizient genutzt werden.

6.3 Energiegetriebene Kommunikationsparadigmen

In Hinblick auf energieeffiziente Architekturen für verteilte, eingebettete Systeme kann aus den Fähigkeiten eines erweiterten Energiemanagements ein *Energy-Driven System Design* (oder auch *Battery-Driven System Design*) abgeleitet werden [328]. Energiespeichercharakteristiken, Dimensionierung aller Energiespeicher sowie der Einsatz von Low-Power Technologien für zentrale Komponenten stehen dabei im Fokus der Betrachtungen. Ein solches Design beeinflusst dabei die gesamte Systemarchitektur, beginnend bei der automatischen Taktanpassung auf Prozessorebene, über ein *Battery-Aware Task Scheduling* bis hin zu energieoptimierten *Traffic Shaping* und Routing-Ansätzen.

Je nach aktuellem Ladezustand der Energiespeicher sowie den situationsabhängigen Möglichkeiten zur Energiegewinnung entscheidet das System eigenständig über den zeitlichen Ablauf von Aktionen. Der erforderliche Entscheidungsprozess im Energiemanagement erfolgt dabei entweder über einen festen Regelsatz oder mittels dynamisch adaptiver Lernstrategien [343]. Zur Umsetzung eines solchen Paradigmas ist es erforderlich, alle möglichen Aktionen auf Applikationsseite in einen prognostizierten Energiebedarf abzubilden. So kann das Energiemanagement bei Bedarf niedrig priorisierte Prozesse unterbrechen, zeitlich verschieben oder in kritischen Situationen komplette Teilsysteme deaktivieren. Datenübertragungen werden dann auf ein essentielles Minimum reduziert. Ändert sich die Situation aus energetischer Sicht positiv, beispielsweise bei Einsatz von Energiewandlerkonzepten durch wechselnde Umweltbedingungen (Tag-Nacht-Zyklus, Temperaturwechsel, Positionsänderung, etc.), werden die zusätzlich zur Verfügung stehenden Ressourcen dazu genutzt, ausstehende Tasks durchzuführen. Betrachtet man typische WSN und SANET Applikationen mit Mess- und Steuerungsaufgaben, so kann dann alternativ auch die Messqualität erhöht werden, so z.B. durch eine temporär gesteigerte Abtastrate der Sensorik oder durch komplexere Vorverarbeitungsprozesse.

Ein solches energiegetriebenes Design ermöglicht aber nicht nur die Anpassungen von Softwarefunktionen und Tasks. Auch Hardwarekomponenten können in einem solchen Konzept gezielt deaktiviert und aktiviert werden. Dies betrifft vor allem Peripherie zur Messdatenaufnahme, aber auch die Funktransceiver.

Für eine Umsetzung eines solchen Designs sind wiederum Cross-Layer Strategien erforderlich (siehe Kapitel 4.5), welche eine breite Wissensbasis von Hardware-, Netzwerk- und Systeminformationen bereitstellt. Die Integration dieser Informationen ist speziell für energiegetriebene Kommunikationskonzepte essentiell. Während Cross-Layer Konzepte in anderen Anwendungsbereichen meist nur die Routenwahl beeinflussen oder für die Topologieoptimierung genutzt werden, sollen hier auf Basis der verfügbaren Informationen komplette Softwarefunktionen und Tasks angestoßen beziehungsweise unterbrochen werden. Die Auswirkungen von Fehlentscheidungen sind somit deutlich folgenschwerer als dies in konventionellen Kommunikationsparadigmen der Fall ist.

In diesem Zusammenhang werden auch die negativen Aspekte eines energiegetriebenen Kommunikationskonzeptes deutlich. Tritt eine aus energetischer Sicht kritische Situation ein,

z.B. durch nicht vorhandene Harvesting-Ressourcen oder durch partielle Ausfälle einzelner Energiespeicherkomponenten, können unter Umständen nicht alle Aufgaben und Funktionen fortgeführt werden. Aus diesem Grund ist wiederum die Einführung von Prioritäten für alle Softwarefunktionen so entscheidend. Erst diese Priorisierung gibt dem System in seiner Handlungsfähigkeit die Freiheitsgrade, eigenständig Prozesse zeitlich neu zu koordinieren, um so kritische Engpässe in der Energieversorgung zu vermeiden.

Energiegetriebene Kommunikationsparadigmen bieten speziell für Systeme mit integrierten Energy Harvesting Komponenten und für energieautarke Langzeitapplikationen interessante Möglichkeiten.

6.4 Zusammenfassung

Das Kapitel befasste sich mit dem Energiemanagement als umfassende Koordinierungsinstanz für die Energieressourcen. Innerhalb des Themenkomplexes wurde zunächst eine logische Struktur definiert, die unterschiedliche Managementbereiche klassifiziert und einzelne Konzepte zur Optimierung der Energieeffizienz entsprechend einordnet.

Im weiteren Verlauf des Kapitels wurden Energy Harvester und deren Wirkungsprinzipien kompakt vorgestellt. Hierbei standen besonders hybride Strategien auf Basis unterschiedlicher Harvester im Vordergrund der Betrachtungen. Durch eine sinnvolle Kombination kann der Energiebedarf einer Systemplattform unter vielen verschiedenen Rahmenbedingungen kontinuierlich abgedeckt werden, ohne lokal verfügbare, begrenzte Energiespeicher zu belasten. Die Energiespeicher selbst wurden anschließend separat betrachtet. Auf Basis spezifischer Charakteristika ist auch hier eine sinnvolle Auswahl und Dimensionierung des Energiespeicherkonzeptes möglich.

Die einzelnen Themen wurden anschließend im Kontext energiegetriebener Kommunikationsparadigmen zusammengeführt. Hierbei koordinieren die einzelnen Subsysteme alle Kommunikationsprozesse eigenständig in Abhängigkeit der verfügbaren Energieressourcen.

Das nachfolgende Kapitel widmet sich nun der ganzheitlichen Integration der unterschiedlichen Abstraktionsebenen in eine energieeffiziente Systemarchitektur. Hier müssen je nach Anwendungskontext gezielt Verfahren auf Netzwerk-, Daten sowie Energiemanagementebene mit entsprechenden Basistechnologien kombiniert und anschließend konfiguriert werden.

7 Systemintegration

Die Systemintegration stellt einen kritischen und häufig unterschätzten Abschnitt im Entwicklungsprozess dar. Er umfasst vielfältige Problemstellungen und Wechselwirkungen, welche erst beim komplexen Zusammenspiel der verschiedenartigen Entitäten einer heterogenen, verteilten Systemlandschaft auftreten.

Diese Problemstellungen, speziell im Anwendungsfokus drahtloser Kommunikationsprozesse, sind bereits beim Systementwurf zu berücksichtigen, jedoch nur schwer in ihren Auswirkungen abschätzbar. Mit Hilfe geeigneter Werkzeuge für den Systemintegrations- und Konfigurationsprozess können viele dieser Störeinflüsse auf den unterschiedlichen Abstraktionsebenen frühzeitig erkannt und analysiert werden.

7.1 Designprozess

Frühe Planungen bezüglich der Systemintegration beginnen bereits bei ersten theoretischen Betrachtungen im Designprozess. In diesem ersten Schritt einer konkreten Umsetzung des technischen Systems wird zunächst eine geordnete Struktur von Entwicklungsschritten definiert [231, 287]. Die dabei zu treffenden Entscheidungen beinhalten u.a. die Programmierparadigmen und -modelle, Entwicklungsmodelle, verwendete Werkzeuge und Toolketten, Optimierungsmethoden sowie Test- und Analysehilfsmittel. Nach [287] untergliedert sich der Designprozess im Rahmen der Systemmodellierung in drei unterschiedliche Methodiken:

Modellgetriebenes Design:

Nutzt anwendungsspezifische Modelle und Metamodelle sowie geeignete Abstraktionen zur Umsetzung eines definierten Aufgabenszenarios. Datenfluss und Prozessabläufe stehen hierbei im Fokus. Technologische Rahmenbedingungen der Implementierung stehen weitestgehend außen vor.

Komponentenbasiertes Design:

Basiert auf der Strukturierung und Separierung von Teilaufgaben, welche getrennt umgesetzt, getestet und optimiert werden können. Über wohldefinierte Schnittstellen entsteht aus einer Komposition dieser Teilkomponenten das Gesamtsystem.

Plattformbasiertes Design:

Befasst sich mit den Anpassung vorhandener Implementierungen und Plattformen zur Generierung eines funktionalen Systems. Zentrale Problemstellungen dieser Methodik umfassen die Analyse geeigneter Realisierung, die Aufwandsabschätzung aller Anpassungen sowie die Komposition und Konfiguration aller Teilsysteme. Die Abbildung einer Funktionalität auf existierende Plattformen ist dabei unter Umständen nicht eindeutig und gestaltet die Auswahl einer optimalen Realisierung schwierig.

Grundlage eines jeden Designprozesses ist die Spezifikation aller funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen. Diese Spezifikation wird dann unabhängig von der gewählten Methodik in mehreren Stufen auf eine praktische Realisierung abgebildet. Abbildung 7.1 verdeutlicht nach [384] diesen allgemeinen Designprozess.

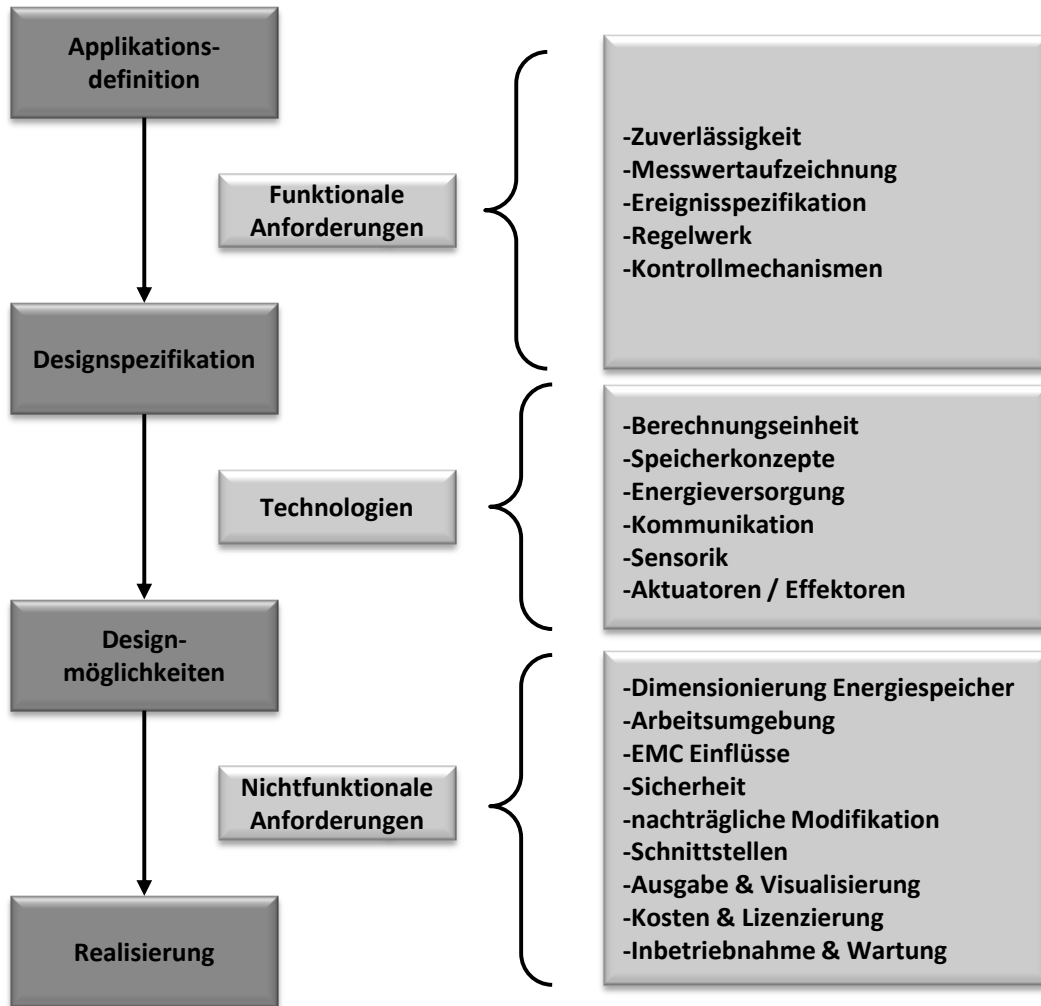


Abbildung 7.1: Applikationsgetriebener Designprozess.

Nachdem in der ersten Applikationsdefinitionsphase alle funktionalen Anforderungen beziehungsweise Parameter einfließen und folglich der Lösungsraum nach anwendbaren Konzepten gefiltert wird, erfolgt in einer zweiten Phase die Technologieauswahl für zentrale Systemkomponenten. Die Menge sinnvoller Technologien spannt den Raum für Designmöglichkeiten auf, welcher dann in einer weiteren, dritten Phase auf Basis nicht funktionaler Anforderungen weiter eingeschränkt wird und mit einer konkreten Realisierung abschließt.

Im gesamten Entwicklungsprozess fügt sich dieser Designprozess in den Ablauf ein. Im Rahmen der Umsetzung von eingebetteten, ressourcenbeschränkten Systemen sind die beiden Phasen nach der Systemspezifikation als kritisch einzustufen (siehe hierzu Abbildung 7.2). Dies umfasst die Dimensionierung der Komponenten sowie die Modelle zur Einschätzung des späteren Laufzeitverhaltens.

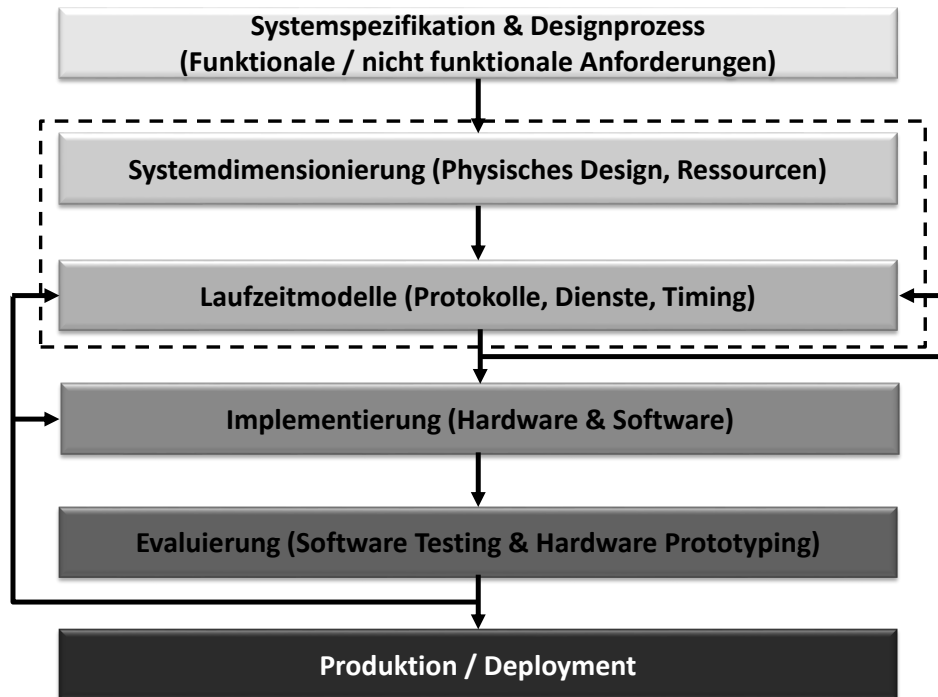


Abbildung 7.2: Allgemeiner Entwicklungsprozess mit den einzelnen Phasen. Die beiden kritischen Schritte im Kontext eingebetteter, ressourcenbeschränkter Systeme sind eingerahmt.

Sowohl der Design- als auch der Entwicklungsprozess von verteilten, eingebetteten Systemen unterscheiden sich dabei nur in spezifischen Details von den Entwicklungsphasen anderer technischer Systeme. Im Kontext energieeffizienter Systemplattformen liegt der Schwerpunkt jedoch deutlich verschoben im Bereich der Ressourcenplanung und Bauteildimensionierung auf Hardwareseite sowie bei der Steuerungs- und Organisationslogik auf Softwareseite.

Aus Entwicklersicht müssen außerdem Kompromisse zwischen Kosten, Systemlaufzeit, Datenqualität sowie Kommunikationskapazitäten besonders kritisch gegeneinander abgewogen werden. Auch die Umsetzung von Funktionen in Hardware oder Software ist an dieser Stelle von Relevanz. Im Bereich Hardware-Software-Codesign wird diese Aufteilung in Abhängigkeit von der Kritikalität und Geschwindigkeitsanforderungen getroffen. Im betrachteten Wissenschaftskontext verteilter, eingebetteter Systeme sind zusätzlich räumliche Aufteilungen und folglich die Zuordnung von Fähigkeiten beziehungsweise Ressourcen an bestimmte Subsysteme erforderlich.

7.2 Konfigurationsprozess

Eine zentrale Fragestellung im Bereich der Systemintegration lautet: Wie kann eine energieeffiziente Systemplattform generiert und anwendungsspezifisch integriert werden? Mit dem Fokus dieser Arbeit auf die Kommunikationsaspekte ergeben sich hier drei wesentliche Problembereiche. Die Zusammenführung dieser Bereiche und deren gegenseitige Abhängigkeit als tragende Säulen in einer Gesamtlösung sind in Abbildung 7.3 abstrahiert dargestellt.

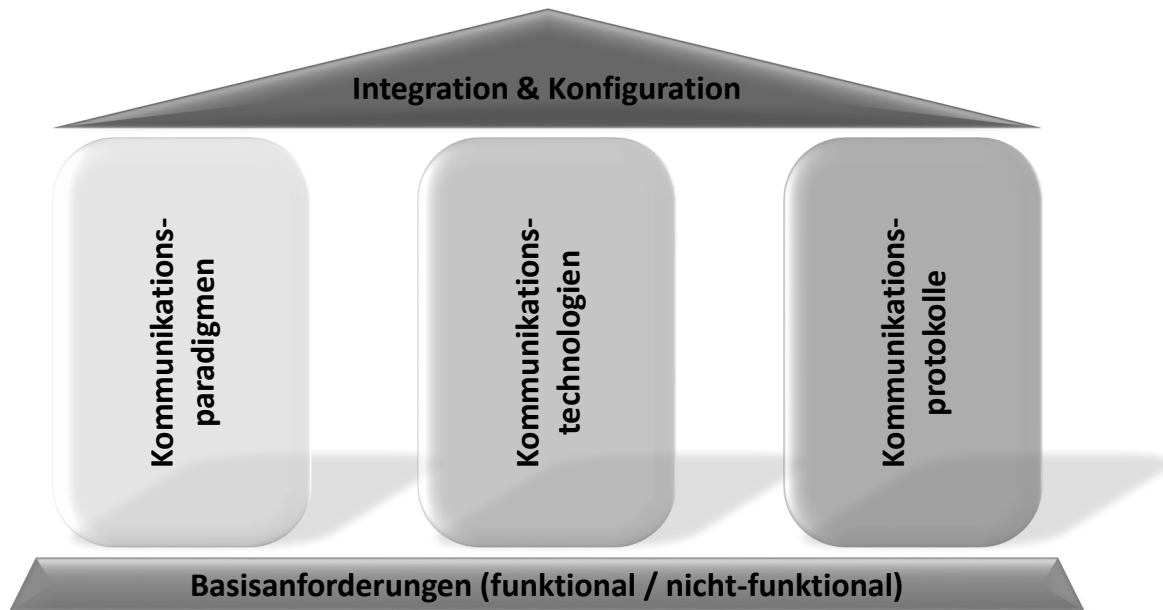


Abbildung 7.3: Tragende Säulen einer energieeffizienten Kommunikationsarchitektur.

Unter Beachtung aller Basisanforderungen müssen geeignete Kommunikationstechnologien und Protokolle mit einem anwendungsspezifisch optimierten Kommunikationsparadigma kombiniert werden. Alle Aspekte auf Applikationsebene können ebenfalls den Kommunikationsprotokollen zugeordnet werden, da auch sie für den Informationsaustausch Protokolle nutzen und somit eine entsprechende Koordinierung erfolgt.

Für die Auswahl geeigneter Lösungsansätze innerhalb jeder Säule sind unterschiedliche Strategien anwendbar. Eine Möglichkeit besteht in der systematischen Einschränkung der Lösungsmenge aus der Vielfalt möglicher Realisierungen. Unter Beachtung technologischer, verfahrenstechnischer sowie qualitativer Restriktionen ergibt sich in der verbleibenden Schnittmenge ein hinreichender Lösungsraum, welcher bezüglich der Energieeffizienz weiter optimiert werden kann. Ergibt sich im Lösungsraum keine Schnittmenge der drei Bereiche, so ist keine hinreichende Realisierung für das System gegeben. Das Problem bei dieser Strategie besteht in der Basislösungsmenge. So müssen hier zunächst alle möglichen Implementierungen bekannt und erfasst sein. Erst dann kann eine entsprechende Einschränkung der Lösungsmenge erfolgen. In der Praxis ist dies für den Entwurf komplexer Systeme und mit der Vielfalt technischer Möglichkeiten selten gegeben.

Eine weitere Strategie zur Umsetzung einer optimierten Kommunikationsarchitektur basiert daher auf einem aufbauenden Ansatz. Zunächst erfolgt hier je nach Priorisierung die gezielte Auswahl einer wesentlichen Rubrik, d.h. entweder Aspekte bezüglich des Kommunikationsparadigmas, den zu nutzenden Technologien oder essentielle Protokolle. Resultierend aus dieser initialen Abhängigkeit sind anschließend in den beiden verbleibenden Kategorien schrittweise sinnvolle Lösungsansätze zu selektieren. Auch hier wird davon ausgegangen, dass sich eine entsprechende Schnittmenge ergibt und somit alle funktionalen Anforderungen an das System umsetzbar sind. Abbildung 7.4 verdeutlicht schematisch beide Lösungsstrategien mit dem Ziel einer applikationsspezifisch optimierten Kommunikationsplattform.

7 Systemintegration

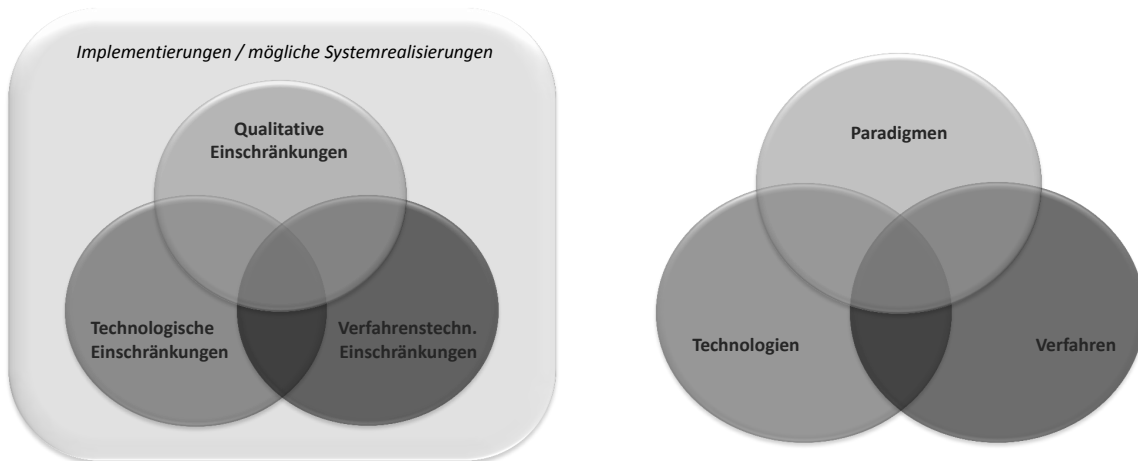


Abbildung 7.4: Lösungsstrategien für die Realisierung energieeffizienter Systemarchitekturen. *Links* wird eine optimierte Lösung durch Einschränkung der Lösungsmenge herausgearbeitet. *Rechts* die aufbauende Strategie durch gezielte Kombination geeigneter Paradigmen, Technologien und Verfahren.

Fasst man die vorangegangenen Schritte zu einem Prozess für die Umsetzung und Konfiguration einer energieeffizienten, eingebetteten Systemarchitektur zusammen, so ergibt sich eine logische Abfolge von Aktionen, dargestellt in Abbildung 7.5. Die Systemkonfiguration stellt die letzte Stufe innerhalb des Entwicklungsprozesses dar. Gleichzeitig ist sie auch am stärksten von der jeweiligen Applikation geprägt und nur schwer zu abstrahieren. Allgemein gültige Aktionen und Prozesse lassen sich für die Konfiguration kaum ableiten.

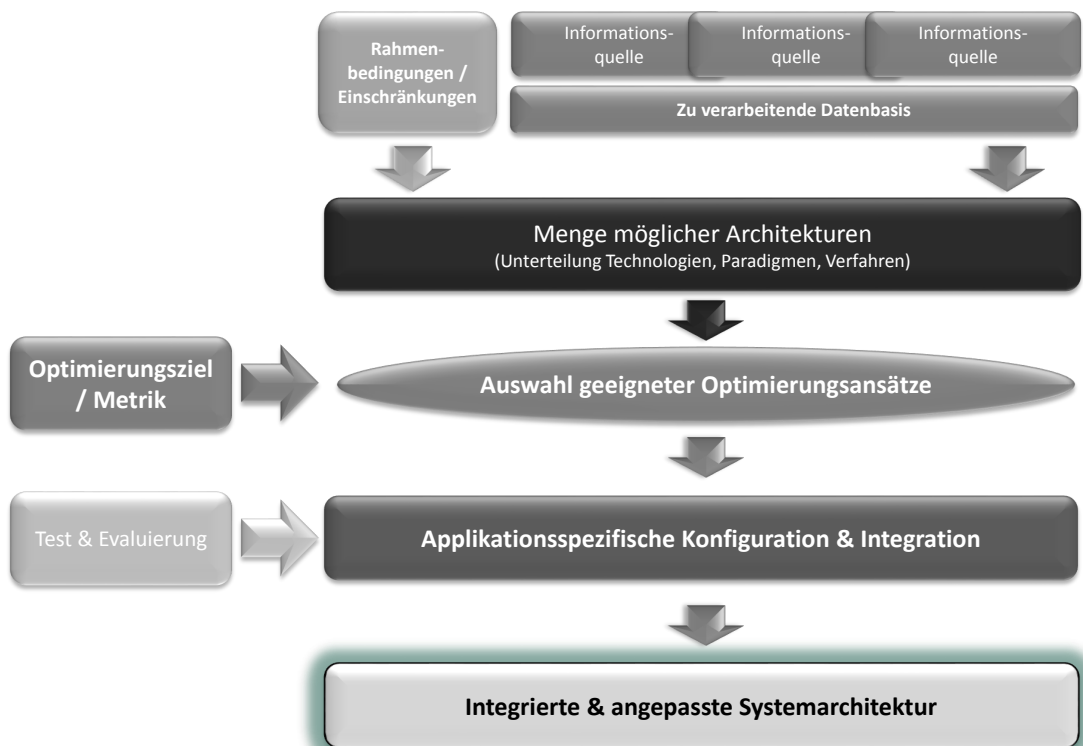


Abbildung 7.5: Verarbeitungsschritte zur Konfiguration einer angepassten Systemarchitektur.

Nach Abschluss der Konfigurationsphase ist auch erstmalig die Menge aller umgesetzten Optimierungsstrategien in Hinblick auf die Energieeffizienz in vollem Umfang und auf Systemebene bewertbar. Erst jetzt können Seiteneffekte oder auch gegenseitige Einflussgrößen ganzheitlich betrachtet und gegebenenfalls quantifiziert werden. Die Analyse des Kommunikationsverhaltens auf Systemebene im Kontext konkreter Anwendungsszenarien ist ebenfalls Gegenstand dieser Arbeit und stellt den Inhalt des nächsten Kapitels dar.

7.3 Optimierung

Soll ein gegebenes System hinsichtlich bestimmter Merkmale angepasst oder optimiert werden, sind unterschiedliche Dimensionen zu betrachten. Aufbauend auf den Definitionen in Kapitel 2.3 wird bei jeder Optimierung ein primäres Leistungsmerkmal selektiert, dessen Eigenschaften systemweit verbessert werden sollen. Die Möglichkeiten zur Optimierung können sowohl hardwareseitige Anpassungen innerhalb der Systemarchitektur umfassen als auch Algorithmik und Verarbeitungslogik auf Softwareebene. Im Gegenzug müssen dann unter Umständen Kompromisse hinsichtlich anderer Dimensionen eingegangen werden.

Im Rahmen dieser Arbeit lag der Fokus auf verteilten, eingebetteten Systemen und hierbei speziell auf energieeffizienten Kommunikationsprozessen. Zur Optimierung der Energieeffizienz müssen folglich Kommunikationsparameter gefunden werden, deren Anpassung Einfluss auf den Energieverbrauch (und somit auf die *Kosten*, siehe Kapitel 2.4) haben. Ziel ist es, den Energieverbrauch für Kommunikationsprozesse zu senken und gleichzeitig alle funktionalen Anforderungen sicherzustellen. Nach [141, 282, 408] werden Kommunikationsprozesse durch vier zentrale Qualitätsparameter geprägt:

- Energiebedarf
- Latenz
- Datenrate
- Zuverlässigkeit/Robustheit

Jede Anpassung der Parameter beeinflusst die Energieeffizienz, aber auch das Verhalten der Systemarchitektur. Die Quantifizierung und Gewichtung aller Parameter erlaubt dann Rückschlüsse auf die Güte des Gesamtsystems bezüglich der gewählten Optimierungsmerkmale. Darstellung 7.6 veranschaulicht die Abbildung von der Kommunikationsarchitektur auf die jeweiligen Dimensionen des Systems.

Dabei ist die mehrdimensionale Verzahnung des gesamten Netzwerkprotokollstacks in die Organisationsblöcke von Daten-, Mobilitäts- sowie Energiemanagement hervorgehoben. So muss der gesamte Netzwerkprotokollstack einerseits den Anforderungen an Mobilität und Energiebedarf entsprechen, andererseits dient der Stack jedoch der Abwicklung unterschiedlicher Datenübertragungsprozesse für spezifische Aufgaben. Aus den applikationsseitigen Anforderungen für das Datenmanagement und den physischen Rahmenbedingungen ergeben sich dabei unter Umständen Konflikte, die gelöst werden müssen.

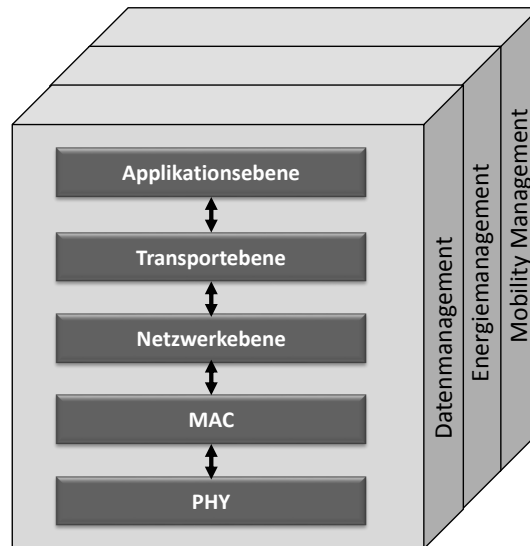


Abbildung 7.6: Dreidimensionale Darstellung der verschiedenen Konfigurationsebenen im Kontext mobiler, verteilter, eingebetteter Systeme.

Bei der konkreten technischen Umsetzung des Systems muss ein weiterer kritischer Parameter für Optimierungen beachtet werden - reale Kosten für Entwicklung, Herstellung, Vertrieb und Wartung. Dieser Aspekt kann auf Forschungsebene häufig ignoriert oder vernachlässigt werden. Im Umfeld einer wirtschaftlichen Nutzung sind jedoch reale Kosten einer Technologie oder eines Optimierungsansatzes oft ausschlaggebend für die Umsetzung in einem Produkt.

Je nach Optimierungsziel und -aufwand erfolgt die kombinierte Umsetzung unterschiedlicher Verfahren auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen, deren Gesamtgüte hinsichtlich des Anwendungsszenarios zu quantifizieren ist. Die im weiteren Verlauf des Kapitels vorgestellten Optimierungsansätze bilden dabei nur eine Teilmenge möglicher Konzepte und Verfahren im Bereich verteilt agierender, eingebetteter Systeme.

7.3.1 Auswahl Kommunikationsparadigmen

Eine grundlegende Entscheidung zur Koordinierung von Kommunikationsprozessen erfolgt bei der Auswahl des entsprechenden Paradigmas. Dieses hat Einfluss auf alle Ebenen der Kommunikationssysteme und stellt die Basis eines jeden Optimierungsprozesses dar. Zu unterscheiden sind dabei zwei Ansätze:

Asynchrone Kommunikation:

Ereignisgetrieben, Energiegetrieben

Synchronisierte Kommunikation:

rein zeitsynchronisiert, kooperativ zeitsynchronisiert

Synchrone Kommunikationsparadigmen basieren auf periodischen Phasen zur gegenseitigen (meist paarweisen) Abstimmung nachfolgender Übertragungsprozesse. Durch klassische

zeitsynchronisierte Verfahren können jedem Knoten für die Kommunikation exklusive Zeitbereiche (Time Slots) zugeordnet werden. Überlagerungen während der Datenübertragung reduzieren sich auf ein Minimum. Die dezentrale Koordinierung in drahtlosen und gegebenenfalls mobilen Netzwerktopologien ist in diesem Zusammenhang nicht trivial und bindet zusätzliche Ressourcen, die als Overhead in die Kommunikation einfließen. *Kooperative Verfahren* nutzen die gleichen Konzepte zur Ablaufplanung von Kommunikationsprozessen, jedoch wird die zeitliche Aufteilung für die einzelnen Subsysteme in Abhängigkeit von Prioritäten oder anderen Rahmenbedingungen dynamisch angepasst.

Im Falle einer asynchronen Kommunikation erfolgt die Datenübertragung ausschließlich spontan beim Eintreten definierter externer oder auch interner Ereignisse. Weiterführende Koordinierungsprozesse entfallen hier gänzlich. Auch vordefinierte Zeitbereiche für die Übertragung sowie periodische Synchronisationszeitpunkte, wie sie bei zuvor genannten Ansätzen angewendet werden, existieren nicht. Die Ereignisse, welche eine Kommunikation auslösen, sind dabei vielfältig. Sie umfassen beispielsweise die Detektion relevanter Signale über Sensorikkomponenten oder das Unterschreiten festgesetzter Ressourcenschranken (Energie, Speicher, Signalqualität, etc.). Da die jeweiligen Ereignisse im Entwicklungsprozess definiert werden, sind auch situationspezifische, angepasste Reaktionen und Aktionen auf Systemebene anwendbar.

Eine weitere Möglichkeit einer asynchronen Kommunikation basiert auf einer *energiebudget-abhängigen Koordination* aller Übertragungsprozesse. Dies bringt besonders bei Systemarchitekturen mit integrierten Harvester-Komponenten Vorteile mit sich. Bei der energiegetriebenen Kommunikation wird eine Datenübertragung folglich erst dann initialisiert, wenn ausreichend Energieressourcen zur Verfügung stehen. Dies kann jedoch unter schlechten Rahmenbedingungen zu Datenverlusten führen, wenn beispielsweise über einen langen Zeitraum nicht hinreichend Energie gewandelt werden kann. Ein Verlust von Informationen tritt dann ein, wenn die in diesem Zeitraum gemessenen Sensordaten aufgrund begrenzter Speicherkapazität nicht weiter gepuffert werden können. Eine ähnliche Situation tritt dann ein, wenn zwar der Sender übertragungsbereit ist, jedoch der gewünschte Kommunikationspartner oder eine Zwischenstation (bei Multi-Hop-Szenarien) aufgrund eines niedrigen Energieniveaus nicht verfügbar ist.

Eine weitere Variante energiegetriebener Kommunikationskonzepte lässt sich sowohl asynchron als auf synchronisiert umsetzen. Anstehende Tasks werden dabei in Abhängigkeit des aktuellen Energieniveaus (Speicher sowie Harvester) prioritätenbasiert verwaltet. In Folge dessen ist eine effiziente Ressourcenteilung auf unterschiedlichen Ebenen sichergestellt. Stehen nicht hinreichend Ressourcen (z.B. Energie) für mehrere simultane Übertragungsaufgaben zur Verfügung, kann mit Hilfe eines systemintern definierten Regelwerkes eine reduzierte Grundfunktionalität aufrechterhalten werden. Kritische Übertragungsprozesse werden fokussiert, alle zusätzlichen Aufgaben werden zurückgehalten oder beendet. Ändert sich durch entsprechende Rahmen- oder Umweltbedingungen das verfügbare Ressourcenniveau positiv, so erfolgt eine dynamische Anpassung des Kommunikationsverhaltens beziehungsweise die Abarbeitung ausstehender Übertragungsprozesse. Dieser adaptive Ansatz zur Ressourcenplanung bietet demnach einen guten Kompromiss zwischen asynchronen und statisch zeitsynchronisierten Kommunikationsparadigmen.

Durch das Fehlen kontinuierlicher und aufwendiger Synchronisationsprozesse können bei asynchronen Kommunikationsparadigmen erhebliche Energieressourcen eingespart werden. Jedoch sind hier im Gegenzug zusätzliche Mechanismen notwendig, die im Bedarfsfall hardwareseitig eine Empfangsbereitschaft der Kommunikationspartner sicherstellen. Befinden sich die Netzwerkschnittstellen in einem energiesparenden Standby-Modus, sind in dieser Zeit keine externen Kommunikationsanfragen detektierbar.

Zur Lösung dieses Problems wird sowohl bei synchronen als auch bei asynchronen Szenarien *Duty Cycling* auf den hardwarenahen Ebenen der Netzwerkschnittstellen genutzt. Hierbei wechselt die Funkhardware zyklisch in den Empfangsmodus und kann folglich auf eingehende Kommunikationsanfragen reagieren. Die zeitliche Abstimmung dieser Abtastphasen wird dabei so kurz wie möglich und so lang wie nötig gewählt. Einerseits müssen je nach Übertragungstechnologie spezifizierte Verbindungsinitialisierungen sicher detektiert werden, andererseits bindet jede Aktivitätsphase der Funkhardware eine nicht unerhebliche Energiemenge, was sich speziell im Kontext eingebetteter, energieautarker Systeme auf die Betriebszeit auswirkt.

7.3.2 Auswahl Kommunikationstechnologien

Technologieseitig steht eine vielfältige Auswahl optimierter Hardwarekomponenten zur Verfügung, welche in ihrer Charakteristik zum jeweiligen Applikationsszenario passen müssen. In Hinblick auf die Netzwerkkonnektivität sind dabei Basistechnologien für die *Transceiver* als auch für das *Antennendesign* von besonderem Interesse. In Abhängigkeit vom geschätzten Datenaufkommen, der Übertragungsdistanz sowie der Dimensionierung der Energieressourcen müssen entsprechende Hardwarekombinationen gegeneinander abgewogen werden, um die gewünschte Mindestbetriebszeit zu gewährleisten (siehe auch Kapitel 3.1.3). Für energieeffiziente WSN / SANET Applikationen mit langen Betriebszeiten und stark begrenzten Ressourcen sind dabei vorrangig Low-Power beziehungsweise Ultra-Low-Power Kommunikationsstandards von Interesse. Jedoch bieten auch innovative Kommunikationstechnologien, wie z.B. UWB oder auch Li-Fi, Möglichkeiten zur Entwicklung effizienter Kommunikationsplattformen. Die konzeptionellen Vorteile derartiger Ansätze treten besonders bei störungsanfälligen beziehungsweise störungsbehafteten Umgebungen in den Vordergrund.

Das Antennendesign stellt speziell auf miniaturisierten Systemplattformen eine Herausforderung dar. Dämpfungswerte und Übertragungseigenschaften in unterschiedlichen Lagepositionen sind dabei zu optimieren. Alternative Antennenkonzepte wurden in Kapitel 3.3.1 unter dem Begriff Smart Antennas bereits vorgestellt und diskutiert.

Als zusätzlich integrierbare Technologien für energieeffiziente Übertragungskonzepte sind primär Wake-Up-Receiver Komponenten vielversprechend. Sie beeinflussen die Kommunikationscharakteristik der gesamten Systemarchitektur. Es ist nunmehr möglich, die primären Kommunikationssysteme nur bei Bedarf zu aktivieren. Somit kann eine kontinuierliche Empfangsbereitschaft auf Systemebene auch ohne aktivierte Haupttransceiver erreicht werden. In Hinblick auf die bereits diskutierten, asynchronen Kommunikationskonzepte bieten WuRx

7 Systemintegration

Komponenten ein erhebliches Energiesparpotential. Stromsparmechanismen der einzelnen Komponenten können effizienter genutzt werden und die Betriebszeit energieautarker Systeme lässt sich entsprechend verlängern.

Die Nutzung von WuRx Technologien bedingen grundlegende Anpassungen im Design der Kommunikationsprozesse auf Anwendungsebene. Um bei asynchronen Szenarien aus energetischer Sicht Optimierungen zu erzielen, ist es sinnvoll, applikationsseitig eine Separierung in unterschiedliche, dedizierte Operationsmodi vorzunehmen. Abbildung 7.7 verdeutlicht diese Aufteilung am Beispiel eines Sensornetzwerkszenarios.

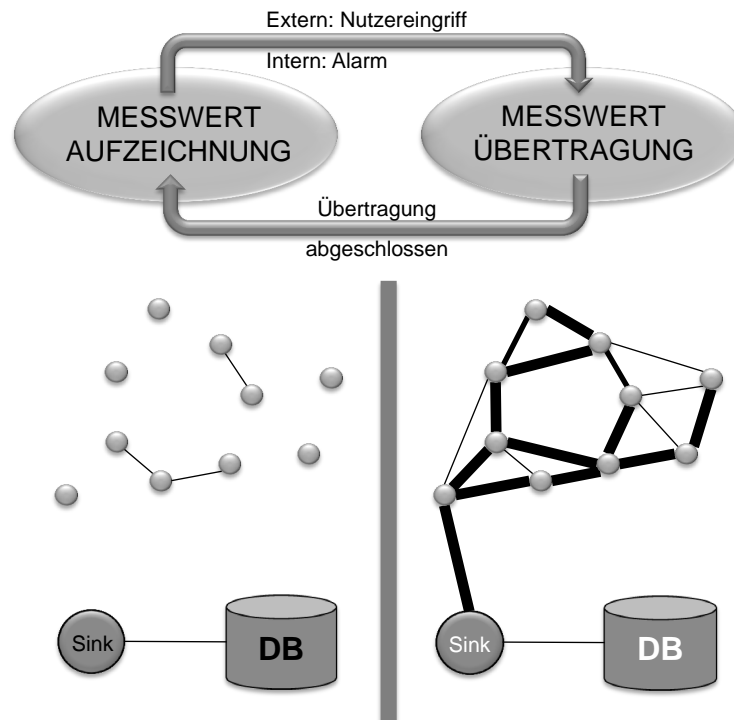


Abbildung 7.7: Anwendungsszenarien auf Basis von WuRx Technologien benötigen unterschiedliche Betriebsmodi, um die konzeptionellen Vorteile effizient nutzen zu können. Ohne das Auftreten spezifischer Ereignisse oder manueller Anfragen arbeiten die Knoten autark und ohne aktive Netzwerkschnittstellen.

In *Modus 1* erfolgt eine *lokale Messwertaufzeichnung* und dabei ist standardmäßig keine Kommunikation zwischen den einzelnen Knoten vorgesehen. Jedes System arbeitet netzwerkautark und führt die vordefinierten Mess- und Regelungsaufgaben durch. Somit existieren keine aktiv gepflegten Netzwerkinfrastrukturen und auch keine Synchronisierung. Eine Kommunikation ist nur in der direkten Nachbarschaft und nur in Ausnahmefällen möglich, beispielsweise bei Systemstörungen oder erschöpften Energieressourcen.

Im *Modus 2* erfolgt die *globale Messwertübertragung*. Hierzu wird eine topologieweit umfassende Netzwerkinfrastruktur initialisiert. Im Beispiel laufen hier die Datenströme der jeweiligen Knoten in definierten Datensinken zusammen und können anschließend verarbeitet werden. Der gesamte Übertragungsprozess innerhalb des 2. Modus umfasst mehrere Phasen. Zunächst wird durch eine Netzexploration die Gesamttopologie erfasst. Die Vernetzungsstrategien nutzen

anschließend energieeffiziente Verfahren für das Routing und die Topologiekontrolle. In der Netzoptimierung kann die Kommunikationsstruktur hinsichtlich vordefinierter Parameter, speziell der Energieverteilung anpasst werden. Dabei sind auch die genutzten Basistechnologien und Kommunikationsparadigmen zu berücksichtigen.

Im Rahmen des Verbundforschungsprojektes *nanett* [274] wurden die Abhängigkeiten von WuRx Technologien und applikationsseitigen Rahmenbedingungen sowohl konzeptionell als auch experimentell untersucht [22, 23]. Die Ergebnisse zeigen dabei je nach Anwendungsszenario deutliche Unterschiede im Optimierungspotential. Weiterhin zeigt sich, dass das aufkommende Datenvolumen als kritischer Schlüsselparameter einzustufen ist. Speziell in schmalbandigen Netzwerkinfrastrukturen, wie sie typischerweise im Bereich WSN und SANET zum Einsatz kommen, treten durch die gepufferte Kommunikation unter Umständen Lastspitzen auf, welche zu Pufferüberläufen und folglich zu Paketverlusten in den einzelnen Knoten führen. Dementsprechend sind hier zusätzliche Mechanismen auf den höheren Protokollebenen notwendig, welche die Datenlast einerseits reduzieren und gegebenenfalls koordinieren.

7.3.3 Auswahl Kommunikationsprotokolle

Aufbauend auf dem gewählten Kommunikationsparadigma und den nutzbaren Basistechnologien erfolgt die Optimierung der Kommunikationsprozesse durch Kommunikationsprotokolle. Bei der Auswahl der Protokolle sind wiederum Abhängigkeiten zu den genutzten Paradigmen und Technologien zu beachten. Die protokollseitig zu lösenden Problemstellungen können dabei wie folgt aufgeschlüsselt werden:

Physikalische Ebene:

Interferenzen, Bandbreite, Codierung/Datenrate, Energie/Sendeleistung

Sicherungsebene:

Overhearing, Verbindungsmanagement

Vermittlungsebene:

Routing, Lastverteilung, Mobilität

Transportebene:

Flusskontrolle, Kanalverwaltung, Priorisierung

Applikationsebene:

Datenkompression, Aufgabenplanung, Ergebnisgüte, Ereignisbehandlung

Die einzelnen Punkte sind in Abstraktionsebenen des Protokollstacks gekapselt und teils in Hardware oder Software umgesetzt. Im Folgenden sollen nun protokollseitige Optimierungsansätze im Kontext eingebetteter, verteilter Systeme strukturiert zusammengefasst werden. Layer 1 (Physical Layer) wurde dabei bereits in Form von Basistechnologien diskutiert. Obwohl auch hier unterschiedliche Protokolle für die Signalcodierung und Modulation zum Einsatz kommen, soll diesbezüglich auf weitere Details verzichtet werden.

• Data Link Layer

- Vermeidung unnötiger Wiederholungen bei der Übertragung durch (energie-) effiziente MAC Protokolle [100, 397]
- Dynamische Anpassung der Paketgröße innerhalb der *MAC* und *LLC*¹ [100]
- Punkt-zu-Punkt Verbindungsmanagement (*Topologiekontrolle*) [327, 389]
- Vermeidung von Kollisionen auf dem Medium durch *Channel Prediction* [147]
- Nutzung von Zeitsynchronisationsansätzen oder alternativ asynchroner Kommunikationskonzepte zu Maximierung der Sleep-Phasen (je nach Ausprägung des Anwendungsszenarios: kontinuierlich ↔ sporadisch) [24, 32][363]
- Koordinierte und dynamische Zuteilung von Zeitslots zur Datenübertragung (gegebenenfalls unter Beachtung aktueller Energieniveaus wie bei *LASA* [195]) und damit verbunden das synchronisierte Abschalten von nicht benötigten Kommunikationsschnittstellen [33, 34]

• Network Layer

- Berechnung situationsabhängiger, dynamischer Routen und Verwendung kooperativer Metriken anstelle von latenz- oder datendurchsatzoptimierten Strategien [107, 390]
- Vermeidung von einfachen Broadcast- / Flooding-Mechanismen [194, 377]
- Minimierung von Protokolloverhead durch Status- und Kontrollpakete [35]
- Nutzung von Geoinformationen [387]
- Nutzung von Clusteringkonzepten (je nach Skalierungsgrad und Heterogenität) [118, 207, 246, 281, 322]
- Nutzung von Multipath-Verfahren (speziell bei hohem Datenvolumen sowie erhöhter Anforderungen bezüglich Datenpriorisierung) [162, 163, 404]

• Transport Layer

- Erweiterte QoS Verfahren (speziell bei zeitkritischen Applikationen)
- Energieeffiziente Fehlerbehandlungsstrategien (*Adaptive Acknowledgements*, *Selective Negative Acknowledgments* [111])

• Application Layer

- Verlagerung rechenintensiver Vorverarbeitungsschritte zur Schonung von Energieressourcen (je nach Vorhandensein globaler Datensinken) [4, 5, 35]

¹Link-Layer Control

- Lokaler Pufferung und Vorverarbeitung von Daten sowie Datenkomprimierung [42, 43][1, 29, 30]
- Einsatz angepasster Proxy- und Caching-Techniken; Energiesparschemen und datendurchsatzoptimierte Schemen sind integrierbar.
- Adaptive Scheduling zur Koordination aller Prozesse im verteilten System auf lokaler und globaler Ebene [24, 34]

Die aufgeführten Punkte umfassen sowohl lokale Verfahren auf Knotenebene, als auch dezentrale Prozesse mit oder ohne Koordinierungsinstanz. Die ganzheitliche Integration erlaubt schließlich eine energieeffiziente Gesamtkonfiguration der Kommunikationsarchitektur [168, 170, 209].

7.4 Simulation & Evaluierung

Parallel zu den jeweiligen Entwicklungs- und Optimierungsphasen erfolgen kontinuierliche Prozesse zur Evaluierungen beziehungsweise Verifikation. Die eingesetzten Testwerkzeuge decken hierbei unterschiedliche Abstraktionsebenen ab. Die Betrachtungen beginnen auf Modellebene sowie bei den Einzelkomponenten und führen bis hin zur Erprobung des ganzheitlichen, verteilten Gesamtsystems.

Die Zielstellungen der einzelnen Simulationen unterscheiden sich ebenfalls je nach gewählten Abstraktionsgrad. Auf Modellebene stehen vor allem Evaluierungen der Kommunikationskonzepte im Vordergrund. Auch die Umsetzbarkeit funktionaler Anforderungen auf Basis ausgewählter Systemkomponenten wird hier geprüft. Die Simulationen konzentrieren meist auf die Applikationsebene und Netzwerkebene. Zum Einsatz kommt häufig *MATLAB* und *Simulink*.

In einer weiteren Abstraktionsebene werden dann einzelne Systemkomponenten im Anwendungskontext simuliert. Für WSN / SANET Szenarien sind hier verstärkt Kommunikationsschnittstellen oder Peripheriekomponenten (Sensorik & Aktuatorik) von Relevanz. Hier sind nun auch nichtfunktionale Merkmale quantifizierbar. In Hinblick auf die Kommunikationsaspekte umfasst dies z.B. die Kanalqualität, die Störempfindlichkeit oder auch das Verhalten bei starker System-/Netzwerklast. Bekannte Simulatoren sind beispielsweise *GloMoSim* [65], *Shawn* [153] oder auch *SENS* [364].

In einer weiteren Stufe wird das verteilte System als komplexer Verbund spezifischer Subsysteme getestet. Hier erfolgen detailliertere Analysen des Laufzeitverhaltens. Besonders Wechselwirkungen zwischen einzelnen Komponenten sowie Kommunikationsprotokollen stehen im Fokus der Betrachtungen. Zum Einsatz kommen dabei Simulatoren mit präzisen Modellierungen auf MAC und PHY Ebene, welche die spezifische Charakteristik der Kommunikationsschnittstellen (Kommunikationsstandards, Antennendesigns, etc.) berücksichtigen. Hier sind *OMNeT++* [382], *ns2 / ns3* [186, 318] oder auch *QualNet* [332] als bekannte Vertreter zu nennen. Viele Simulationsumgebungen auf dieser Ebene sind fest an bestimmte Plattformen für die Zielhardware gebunden, um die Eigenschaften der verwendeten

Architektur detailliert umzusetzen. So beschränkt sich beispielsweise *ATEMU* auf Atmel Plattformen, währenddessen *TOSSIM*, *SWAN* und *SENS* nur *TinyOS*-kompatible Umgebungen unterstützen [287].

Für die exakte Analyse komplexer Systeme kommen im weiteren Verlauf der Entwicklungen häufig angepasste Simulatoren oder zusätzliche *HIL*² / *SIL*³ Umgebungen zum Einsatz, die das Laufzeitverhalten aller Systemkomponenten exakt analysieren können.

Obwohl Simulation und Evaluierung ein umfassendes und vielfältiges Themengebiet darstellen, bilden sie keinen Kernpunkt dieser Arbeit. Daher soll an dieser Stelle auf weitere, tiefgehende Betrachtungen verzichtet werden. Die Ausführungen sollen jedoch die Wichtigkeit dieses Themenkomplexes in Bezug auf die Entwicklung und Integration verteilter, eingebetteter Systeme verdeutlichen.

7.5 Zusammenfassung

Dieses Kapitel befasste sich mit der Thematik Systemintegration. Ziel dabei ist die sinnvolle Kombination einzelner Kommunikationskomponenten und Verfahren in eine ganzheitlich optimierte Gesamtarchitektur.

Hierzu wurde zunächst der Designprozess im Kontext verteilter, eingebetteter Systeme betrachtet, der von der Applikationsdefinition über die Spezifikation bis hin zur Betrachtung nichtfunktionaler Eigenschaften reicht. Der Konfigurationsprozess widmet sich im weiteren Verlauf der konkreten Anpassung von Technologien, Protokollen und Konzepten an die jeweiligen Rahmenbedingungen des Applikationsszenarios.

Anschließend wurden Optimierungsstrategien zur Steigerung der Energieeffizienz drahtloser Kommunikationssysteme in drei wesentliche Teilgebiete abstrahiert und den Inhalten der vorangegangenen Kapitel zugeordnet.

Im weiteren Verlauf des Kapitels wurden Simulationswerkzeuge und Methoden zur Evaluierung vorgestellt, die von Analysen auf abstrakter Ebene bis hin zu kompletten *SIL*/*HIL*-Umgebungen reichen.

Die Ausführungen leiten direkt auf die Inhalte des folgenden Kapitels über, welches sich mit konkreten Energieeffizienzbetrachtungen für gegebene Testszenarien auseinandersetzt.

²Hardware in the Loop

³Software in the Loop

8 Fallstudien & Analyse

In Bezug auf die vorangegangenen Kapitel und den darin diskutierten Themenkomplexen soll nun der Einfluss unterschiedlicher Optimierungsstrategien auf die Energieeffizienz untersucht werden. Dies beinhaltet lokale Betrachtungen innerhalb eines einzelnen Subsystems, aber auch globale Betrachtungen auf Netzwerkebene, in der mehrere Subsysteme in einem drahtlosen Netzwerkverbund zusammen agieren. Die jeweils betrachteten Anwendungsszenarien beschreiben verteilt agierende, heterogene Systemarchitekturen mit stark ressourcenbeschränktem Charakter. Es erfolgt eine qualitative und quantitative Analyse unterschiedlicher Konzepte und Verfahren:

1. Übergang zu einem *asynchronen, ereignisgetriebenen Kommunikationsparadigma*
2. Integration von *Wake-Up-Receiver-Technologien*
3. Einbindung von *Datenaggregations- / Datenfusionsverfahren*

Jede dieser Optimierungsstrategien soll zunächst getrennt voneinander betrachtet werden. Im späteren Verlauf erfolgt die stufenweise Kombination mehrerer ausgewählter Verfahren und eine entsprechende Analyse aus Sicht der Energieeffizienz.

In Hinblick auf den Titel dieser Arbeit stehen dabei die Kommunikationsaspekte im Fokus der Betrachtungen. Diesbezüglich sind mehrere Parameter von Interesse, welche in die Analysen einfließen:

- Energiebedarfswerte auf Knotenebene / Systemlaufzeit
- Gebundene Energiere Ressourcen für Kommunikationsprozesse
- Latenzen
- Paketverlustraten
- durchschnittliche Datenraten
- Protokolloverhead

Zur Quantifizierung der Energieeffizienz dienen die in Kapitel 2.4 vorgestellten Modelle sowie entsprechende Kostenfunktionen, welche die Energieverbräuche der Hardwarekomponenten sowie andere Kostenparameter auf abstrakte Werte abbilden.

8.1 Evaluierungsplattformen

Die Evaluierung möglicher Energieeffizienzsteigerungen durch einzelne Optimierungsstrategien erfolgt auf zwei Ebenen. Einerseits dienen Simulatoren zur Prüfung konzeptioneller Eigenschaften auf abstrakter Ebene. Zur Evaluierung unter Realbedingungen kommen andererseits Demonstratoren und komplexe Hardwareimplementierungen zum Einsatz. Dabei liegt ein besonderes Augenmerk auf dem Kommunikationsverhalten und möglichen Auswirkungen durch den Einsatz bestimmter Optimierungsverfahren.

8.1.1 Simulation

Für die Simulationen kam SimANet [37–39] zum Einsatz, ein umfassendes Simulations-Framework für drahtlose Netzwerkinfrastrukturen. Es wurde am Lehrstuhl für Technische Informatik der TU Chemnitz konzipiert und implementiert [8]. SimANet kommt in der aktuellen Version 2 sowohl national als auch international an mehreren Hochschulen zum Einsatz und wird kontinuierlich weiterentwickelt. Abbildung 8.1 zeigt die Benutzeroberfläche des Simulators.

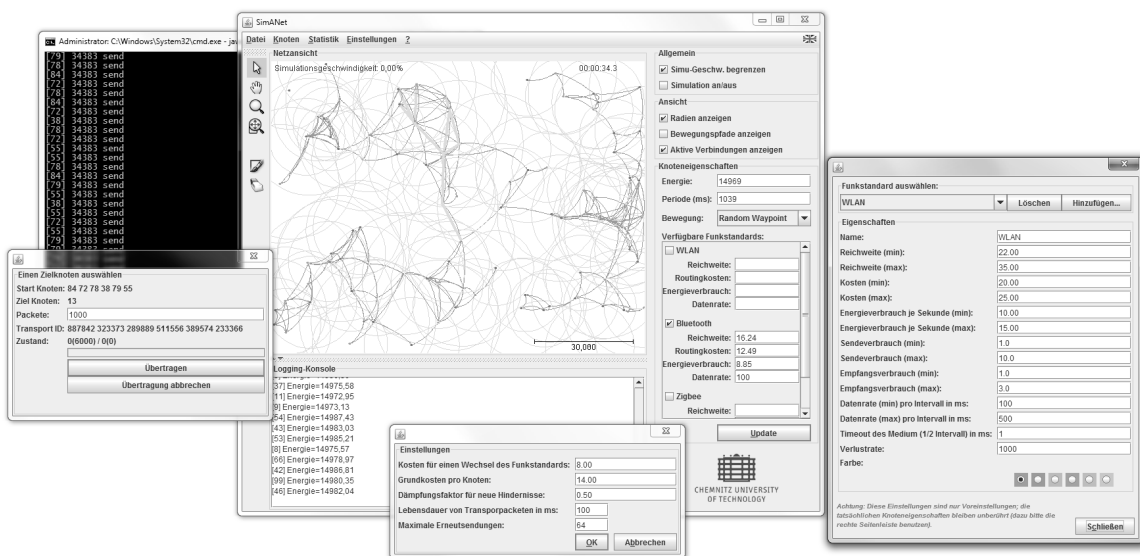


Abbildung 8.1: SimANet repräsentiert ein modulares Simulationsframework für mobile Kommunikationsszenarien im Bereich drahtloser Sensor- sowie Sensor-Aktor-Netzwerke.

Die Simulation sämtlicher Kommunikationsvorgänge erfolgt bei SimANet mittels mathematisch-statistischer Modelle, nicht auf Basis physikalischer Effekte. Dies ermöglicht es SimANet, auch komplexe Netzwerke effizient zu verwalten und zu simulieren. Alle Datenstrukturen zur internen Verwaltung sowie zur Berechnung des Knotenverhaltens sind hierfür optimiert. Für große Anwendungsszenarien ist der Simulationskern vollständig parallelisierbar [40]. Somit verfügt SimANet über großzügig dimensionierte Leistungsreserven und eine gute Skalierbarkeit. Im Rahmen der hier durchgeführten Messreihen wird eine parallelisierte Laufzeitumgebung jedoch nicht benötigt.

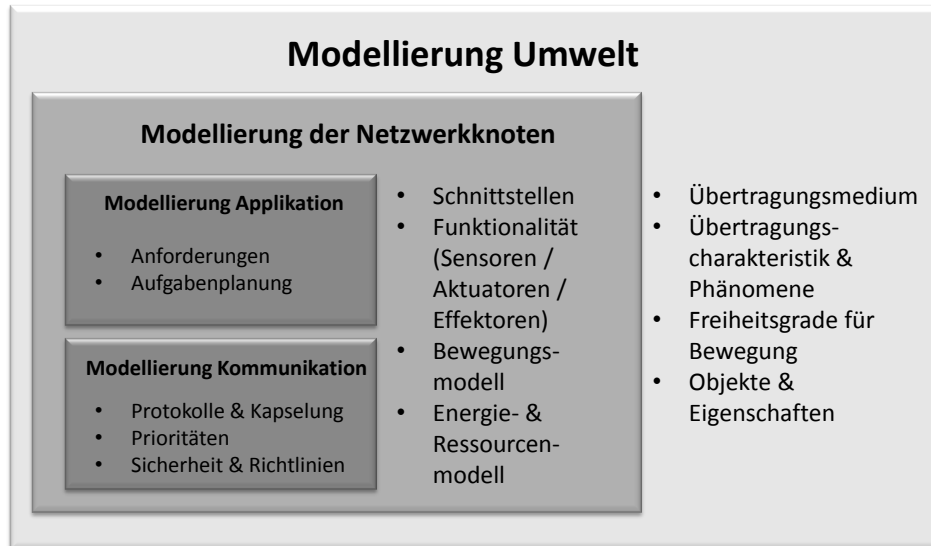


Abbildung 8.2: Die Modellierung in SimANet ist in mehrere Bereiche unterteilt. Neben den Modellierungen auf Knotenebene sind auch Modellierungen der Umwelt integriert.

Das Simulationsframework bietet im Rahmen der Fallstudien dedizierte Module für die Energiemodellierung, die Schnittstellenmodellierung, Bewegungsmodelle sowie für Sensorik und Energy Harvesting Komponenten. Die Kapselung der unterschiedlichen Simulationsbereiche wird in Grafik 8.2 dargestellt.

8.1.2 Hardwareplattformen

Aufgrund abstrahierter Kommunikationsmodelle bieten Simulationen meist nur Ergebnisse für grobe Aussagen über das Kommunikationsverhalten. Um die analysierten Tendenzen unter Realbedingungen in einer zweiten Stufe weiter zu evaluieren, stellen Demonstratoren in Form konkreter Hardwareumsetzungen eine zielführende Möglichkeit dar.

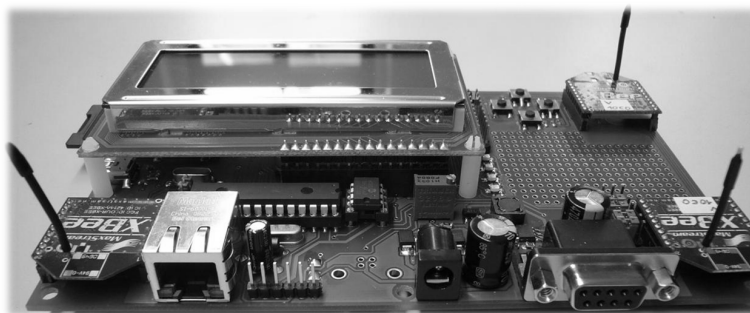


Abbildung 8.3: Darstellung des verwendeten Evaluierungsboards *PLANet*, welches für vielfältige Anwendungsszenarien im Bereich MANET und WSN konzipiert wurde.

Die prototypisch implementierten Szenarien nutzen dabei zwei unterschiedliche Hardwareplattformen. *PLANet* [20, 21] (Abbildung 8.3) ist eine vielseitig nutzbare Evaluierungsplattform,

welche durch ein modulares Schnittstellenkonzept für die Kommunikationsslots sehr gut an verschiedene Rahmenbedingungen im Bereich verteilter, eingebetteter Systeme (speziell MANET / WSN / SANET Szenarien) angepasst werden kann [8].

Die Plattform bietet mit seinem ARM7 Mikrocontroller sehr viele Ressourcen und Schnittstellen für externe Peripherie. Die relativ großen Abmaße der Plattform dienen der flexiblen Anpassung und Erweiterung im Rahmen wissenschaftlicher Projekte. Kommunikationsseitig kommt ein IEEE 802.15.4 Funkmodul der Firma XBee zum Einsatz. Die gesamte Systemarchitektur von PLANet wird in Abbildung 8.4 schematisch veranschaulicht.

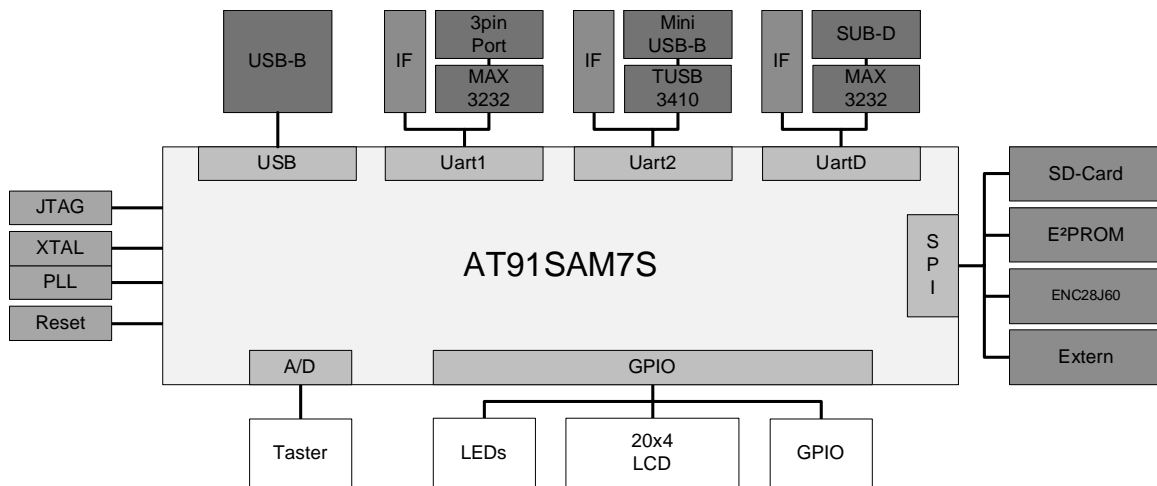


Abbildung 8.4: Schema der Systemarchitektur PLANet.

Eine zweite genutzte Evaluierungsplattform wurde im Rahmen des nanett Projektes [274][35] entworfen und realisiert. Abbildung 8.5 zeigt die nanett-Plattform sowie die schematische Struktur der Systemarchitektur. Der Verarbeitungskern basiert auf einem MSP430 Mikrocontroller von Texas Instruments und das Board verfügt über eine IEEE 802.15.4 konforme Netzwerkschnittstelle (Texas Instruments CC2420 mit Verstärker CC2591). Die gesamte Plattform wurde als Low-Power-Architektur konzipiert. Die Dimensionierung von Rechenkapazität und Speicher ist kleiner als dies bei PLANet der Fall ist. Das Funkmodul ist im Vergleich zur PLANet Hardware leistungsfähiger und wird auch zum Senden der Wake-Up-Pulse-Signale verwendet. Auch beim nanett Board ist der Formfaktor fast ausschließlich dem Verwendungszweck als Evaluierungssystem mit vielfältig nutzbaren Schnittstellen geschuldet.

Beide Evaluationsboards wurden mit Hilfe einer entsprechenden Schnittstelle für die Integration eines Wake-Up-Receiver vorbereitet [22, 23, 35]. Die jeweils verwendete WuRx Hardware und deren Spezifikation wird in den einzelnen Testreihen separat vorgestellt. Eine Zusammenstellung gemessener Leistungsaufnahmen P beider Boards und deren Funkschnittstellen in verschiedenen Betriebsmodi wird Tabelle 8.1 dargestellt.

8 Fallstudien & Analyse

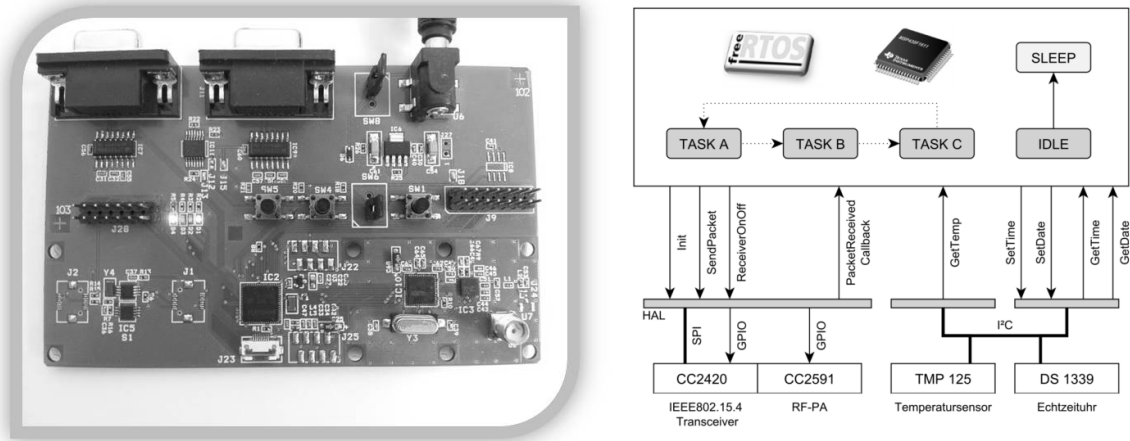


Abbildung 8.5: nanett Evaluierungsplattform mit der schematischen Darstellung der integrierten Komponenten (rechts).

Leistungsaufnahme P in mW (bei 3.3 V)	PLANet Board (ARM7 μ Controller)	Funkmodul XBee (IEEE 802.15.4 / ZigBee)	nanett Board (MSP430 μ Controller)	Funkmodul TI (CC2420 + CC2591) (IEEE 802.15.4 / ZigBee)
Leerlauf	≤ 162	≤ 115	≤ 93	≤ 74
Sleep	≤ 0.16	$\leq 0,03$	≤ 3	≤ 3
Empfangen (RX)	—	≤ 165	—	≤ 74
Senden (TX)	—	≤ 115	—	≤ 413

Tabelle 8.1: Leistungsaufnahmen P des PLANet und nanett Boards in den unterschiedlichen Betriebsmodi, jeweils getrennt für die Basisplattform und die verwendeten Netzwerkschnittstellen.

Für die spätere Berechnungen konkreter Energiewerte von Kommunikationsprozessen muss daraus der (Basis-)Energieverbrauch E_b für die Übertragung einer atomaren Informationseinheit (Paketlänge $p = 1 \text{ Bit}$) abgeleitet werden. Hierfür wird zunächst die Datenrate r des verwendeten Funkstandards benötigt. Mit den gegebenen Leistungsaufnahmewerten für den Datenempfang (Rx) und die Datenübertragung (Tx) nach Tabelle 8.1 gilt folglich:

$$E_{Rx}^{PLANet} = 165mW * \frac{p}{r}$$

$$E_{Tx}^{PLANet} = 115mW * \frac{p}{r}$$

$$E_{Rx}^{nanett} = 413mW * \frac{p}{r}$$

$$E_{Tx}^{nanett} = 74mW * \frac{p}{r}$$

Für die Basisenergiemenge (bei $p = 1 \text{ Bit}$) und der definierten Datenrate nach 802.15.4 / XBee von $r = 250 \text{ kbps}$ folgt somit:

$$E_{b_{Rx}}^{PLANet} = 165mW * \frac{1bit}{250\frac{kbit}{s}} = 6,6 * 10^{-7}Ws = 0,66\mu J$$

$$E_{b_{Tx}}^{PLANet} = 115mW * \frac{1bit}{250\frac{kbit}{s}} = 4,6 * 10^{-7}Ws = 0,46\mu J$$

$$E_{b_{Rx}}^{nanett} = 74mW * \frac{1bit}{250\frac{kbit}{s}} = 3,0 * 10^{-7}Ws = 0,30\mu J$$

$$E_{b_{Tx}}^{nanett} = 413mW * \frac{1bit}{250\frac{kbit}{s}} = 16,5 * 10^{-7}Ws = 1,65\mu J$$

Jede Kommunikation wird jedoch als Kombination von Sende- (Tx) und Empfangsprozess (Rx) definiert. Multicast- und Broadcast-Mechanismen werden an dieser Stelle aus Gründen der Vereinfachung vernachlässigt. Daraus ergeben sich nun nachfolgende Basisenergiwerte für die Übertragung eines Bits:

$$E_b^{nanett \rightarrow nanett} = E_{b_{Rx}}^{nanett} + E_{b_{Tx}}^{nanett} = 1,95\mu J$$

$$E_b^{PLANet \rightarrow PLANet} = E_{b_{Rx}}^{PLANet} + E_{b_{Tx}}^{PLANet} = 1,12\mu J$$

$$E_b^{nanett \rightarrow PLANet} = E_{b_{Rx}}^{PLANet} + E_{b_{Tx}}^{nanett} = 2,31\mu J$$

$$E_b^{PLANet \rightarrow nanett} = E_{b_{Rx}}^{nanett} + E_{b_{Tx}}^{PLANet} = 0,76\mu J$$

Während also die Leistungsaufnahme des PLANet Boards deutlich über der des nanett Boards liegt, benötigen Kommunikationsprozesse mittels nanett Transceiver mehr Energie als die PLANet Funkhardware für die Übertragung einer Informationseinheit. In Abhängigkeit von den jeweiligen Kommunikationspartnern unterscheiden sich dabei die berechneten Energieverbrauchs- und Energieeffizienzwerte deutlich. Kommen folglich in komplexeren Szenarien noch andere Architekturen oder Funkmodule zum Einsatz, so werden Betrachtungen bezüglich der Energieeffizienz sowie vergleichende Analysen deutlich schwieriger.

Die präsentierten Basisenergiwerte bilden die Grundlage für alle nachfolgenden Berechnungen hinsichtlich Gesamtenergieverbrauch und Energieeffizienz. Es ist nun möglich, ein gegebenes Datenvolumen nach einem vereinfachten Modell auf konkrete Energieverbrauchs- und Energieeffizienzwerte für die Kommunikation abzubilden. Gleichwohl die aufgeführten Werte unter Realbedingungen je nach Übertragungssituation variieren können, sind sie für vergleichende Analysen unterschiedlicher Optimierungsstrategien hinreichend aussagekräftig.

In den umgesetzten Testszenarien kommen beide Plattformen entweder in einer heterogenen Netzwerktopologie zum Einsatz oder es erfolgt eine funktionale Trennung nach Aufgabenbereichen. Abbildung 8.6 zeigt hierzu beispielhaft ein WSN Szenario mit einer Separierung in dedizierte Funktionseinheiten für Sensorknoten und Datensinke [29, 30].

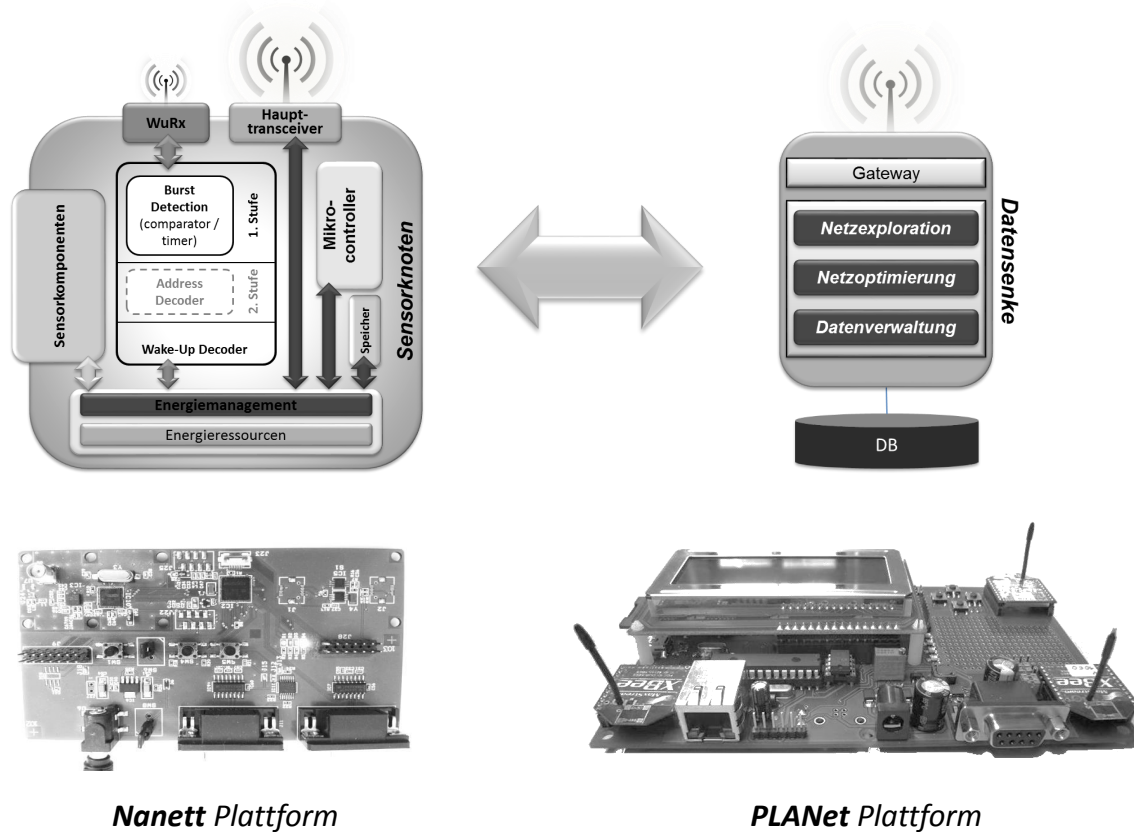


Abbildung 8.6: Heterogenes Beispielszenario im Kontext verteilter, eingebetteter Systeme. Funktionale Aufteilung für die PLANet und nanett Hardware.

Als gemeinsames Konfigurations- und Monitoring-Werkzeug für beide Hardwareplattformen kommt das GREASE Framework (siehe Kapitel 5.5) sowie die PLANetary Software (siehe Kapitel 5.3.3) zum Einsatz.

8.2 Fallstudie 1 - Einflüsse durch asynchrone Kommunikation & WuRx Konzepte

In einer ersten Fallstudie soll das Energiesparpotential WuRx-getriebener, asynchroner Kommunikationsnetzwerke diskutiert werden. Im Fokus der Betrachtungen stehen dabei einerseits die konzeptionellen Vorteile der WuRx Technologie, andererseits aber auch die Einflüsse einer gepufferten Übertragung im asynchronen Anwendungskontext. Sowohl mit Hilfe von Simulationen als auch auf Basis von Hardwareimplementierungen sollen kritische Rahmenparameter identifiziert und ihr Einfluss auf die Energieeffizienz quantifiziert werden. Als wichtige Kenngröße dient dabei auch die Systemlaufzeit bei vordefinierten, begrenzten Energieressourcen.

8.2.1 Hardwarerealisierung Single-Hop-Szenarien

Eine erste Demonstratorplattform wird in diesem Zusammenhang zunächst Referenzwerte bei einer Single-Hop-Kommunikation liefern. Auf Basis zweier nanett Evaluationsboards wurde die Integration der Wake-Up Receiver Technologie praktisch evaluiert und das Optimierungspotential bezüglich der Energieeffizienz bewertet. Es sollen dabei speziell mögliche Laufzeitverlängerungen durch die Datenpufferung sowie durch die Abschaltung der Haupttransceiver bei Nichtbenutzung quantifiziert werden. Abbildung 8.7 zeigt den realisierten Testaufbau. Zwei nanett Knoten verfügen über einen 802.15.4 kompatiblen Low-Power Transceiver und über eine WuRx Komponente, die das System bei Bedarf über einen einfachen Interrupt in Betriebsbereitschaft versetzen kann.

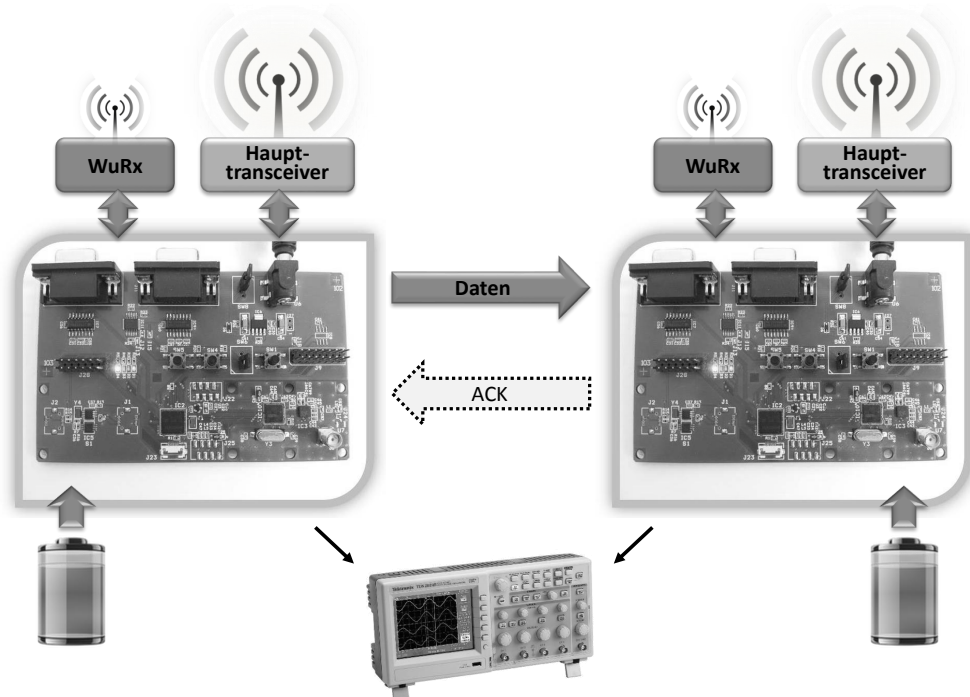


Abbildung 8.7: Testaufbau für die WuRx Integration mit zwei nanett Evaluationsboards. Das Oszilloskop ermöglicht exakte Messungen für die einzelnen Betriebsmodi. Aus den Werten kann die maximale Systemlaufzeit für einen gegebenen Energiespeicher berechnet werden.

Der verwendete WuRx wurde im Rahmen des nanett Projektes [274] entwickelt und erreicht eine Sensitivität von -50 dBm bei einer Leistungsaufnahme von weniger als $60 \mu\text{W}$ ($20 \mu\text{A}$ bei 3 V) im Empfangsmodus. Das Wake-Up-Delay ist abhängig von der Distanz zum Sender des Wake-Up-Pulse-Signals und beträgt nach Spezifikation maximal 50 ms . Für die Aktivierung eines Knoten mittels Wake-Up-Signal werden ca. $500 \mu\text{J}$ gebunden.

Die Messungen bezüglich Energiebedarf in den verschiedenen Betriebsmodi und Zuständen erfolgten mit Hilfe eines Oszilloskops. Dazu wurde ein niederohmiger Nebenschlusswiderstand (Präzisionsmesswiderstand) in Reihe zur Spannungsversorgung des Testaufbaus geschaltet. Der elektrische Strom, der durch diesen Widerstand fließt, verursacht einen zu ihm proportionalen Spannungsabfall, der direkt mit dem Oszilloskop gemessen werden kann. Über das

Verhältnis zwischen Spannung und Widerstand sind also Rückschlüsse auf die Stromverbrauch möglich. Durch das Aufintegrieren dieser Stromwerte über die Zeit und in Verbindung mit der Betriebsspannung der nanett Plattform konnten dann verbrauchte Energiemengen ermittelt werden. Auf den Testaufbau selbst hat der Spannungsabfall über den Nebenschlusswiderstand wiederum einen vernachlässigbaren Einfluss, da hier zur Spannungsstabilisierung ein Längsregler verwendet wurde.

Zur anschließenden Kalkulation der maximalen Systemlaufzeit wurde ein idealer 600 mAh Energiespeicher angenommen, der seine Ressourcen vollständig und ohne Verluste zur Verfügung stellen kann. Verglichen wurden nun mehrere Übertragungsschemata mittels Low-Power Transceiver sowie unter Verwendung der WuRx Komponente. Als Referenzmessung diente die kontinuierliche Übertragung eines Datensatzes (repräsentiert 1 Datenpaket) jede Sekunde mittels Haupttransceiver ohne integrierten WuRx. Um ein asynchrones Kommunikationsverhalten mit kontinuierlicher Empfangsbereitschaft gewährleisten zu können, wird vorausgesetzt, dass keine Zeitsynchronisationsverfahren zum Einsatz kommen und folglich der Transceiver in keine Energiesparmodi wechseln kann. Auf Basis der gemessenen Energieverbrauchswerte konnte hier eine maximale Laufzeit von knapp über 21 Stunden errechnet werden [23].

Weitere Messungen ohne WuRx verwendeten eine gebündelte beziehungsweise gepufferte Datenübertragung in einer festgelegten Zeitperiode von 10, 20, 60, 300, 1800 und 3600 Sekunden. Durch die Zusammenfassung mehrerer Datensätze in einem Datenpaket kann der Overhead aus Kommunikationssicht reduziert und folglich die Energieeffizienz gesteigert werden. Protokollbedingt können hier maximal 7 Datensätze pro Paket als Nutzlast zusammengefasst werden. Daraus ergibt sich bei den genannten Zeitperioden ein Gesamtdatenvolumen von 2 (10/7), 3 (20/7), 9 (60/7), 43 (300/7), 258 (1800/7) und 515 (3600/7) Datenpaketen pro Übertragungsprozess. Im Vergleich zum Referenzszenario (1 Datensatz pro Sekunde) kann somit die absolute Anzahl übertragener Datenpakete bei gleicher Informationsqualität bereits signifikant reduziert werden (3600 Pakete pro Stunde \longleftrightarrow 515 Pakete pro Stunde). Negative Aspekte durch die stark verzögerte Informationsübermittlung werden an dieser Stelle zunächst vernachlässigt und an späterer Stelle in einer weiteren Fallstudie nochmals aufgegriffen.

Dass es sich in den Messreihen bei korrekter Betrachtung nicht um eine ereignisgetriebene, asynchrone Kommunikation handelt, ist bekannt und in diesem Fall bewusst gewählt. Zufällig generierte Übertragungen würden hier die Messergebnisse nicht mehr vergleichbar machen. Aus Gründen der Vergleichbarkeit hinsichtlich des Energieverbrauchs sind folglich gleiche Ereignisse für alle Testreihen zu definieren. Trotz der periodischen Übertragungen bleibt der asynchrone Kommunikationscharakter im Messszenarios erhalten. Eine kontinuierliche Empfangsbereitschaft aller Knoten ist durch die aktiven Transceiver sichergestellt. Es kommen keine Zeitsynchronisationsmechanismen zum Einsatz.

Im Anschluss wurde die WuRx Komponente hardware- und softwareseitig in das System integriert und alle Kommunikationsprozesse entsprechend angepasst. Dies beinhaltet primär die Separierung in zwei getrennte Betriebsmodi zur Laufzeit, wie in Kapitel 7.3.2 vorgestellt.

Der WuRx bindet als weitere Hardwarekomponente zunächst zusätzliche Energie für die Betriebsbereitschaft. Neben diesen Basiskosten ergeben sich aus Kommunikationsicht zusätzliche Aufwände für den Prozess des Aufweckens. Dieser bindet aus energetischer Sicht vergleichsweise viel Ressourcen und muss bei der Gesamtbilanz mit einfließen. Bei Betrachtung des Systemverhaltens müssen gegebenenfalls auch indirekte Einflüsse durch die auftretenden Wake-Up-Latenzen berücksichtigt werden. Im Gegenzug ermöglicht der WuRx die vollständige Deaktivierung der Funkhardware auf Systemebene im lokalen Betriebsmodus der Messwertpufferung. Gleichzeitig bleibt die volle Empfangsbereitschaft in einem nicht synchronisierten Kommunikationsszenario erhalten. Abbildung 8.8 zeigt den Vergleich im Laufzeitverhalten bei Systemarchitekturen mit und ohne WuRx Komponente.

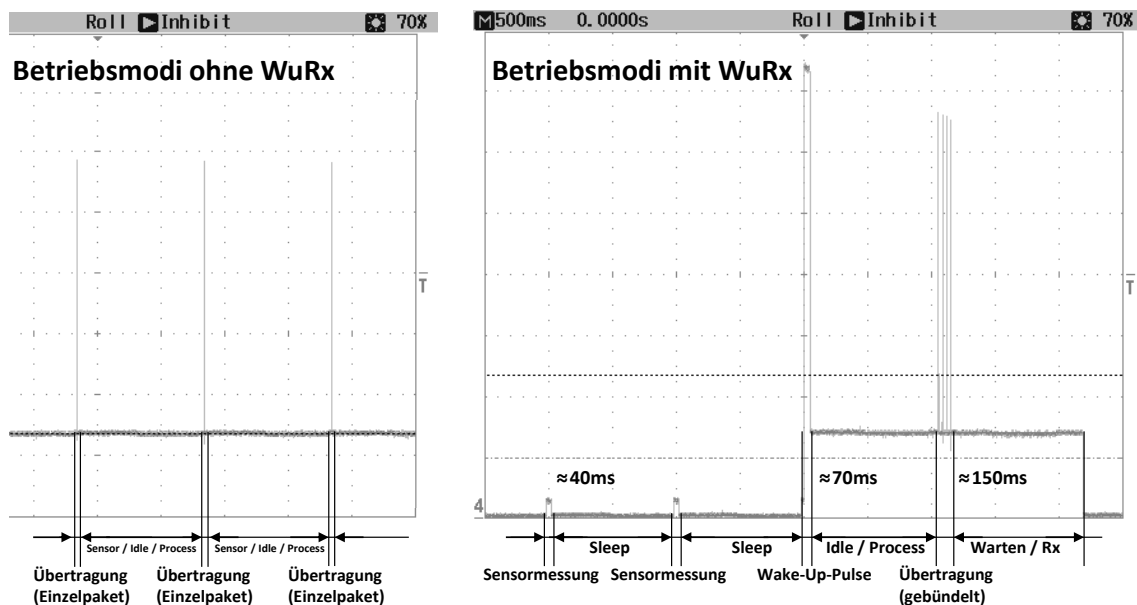


Abbildung 8.8: Oszilloskopmessungen: Detailvergleich der einzelnen Laufzeitmodi in einem konventionellen Kommunikationsszenario (*links*) sowie in einem Konzept mit integriertem WuRx (*rechts*).

Die Screenshots des Oszilloskops zeigen die jeweilige Stromaufnahme und verdeutlichen die konzeptionellen Vorteile der WuRx Technologie, die jedoch applikationsseitig nutzbar sein müssen. Um die Einflüsse und Relationen der angesprochenen WuRx Eigenschaften zu konkretisieren, wurden die gleichen Messreihen wie mit dem Referenzdesign ohne WuRx durchgeführt. Abbildung 8.9 zeigt dazu die erreichten, maximalen Systemlaufzeiten bei Verwendung des gleichen, vordefinierten Energiespeichers.

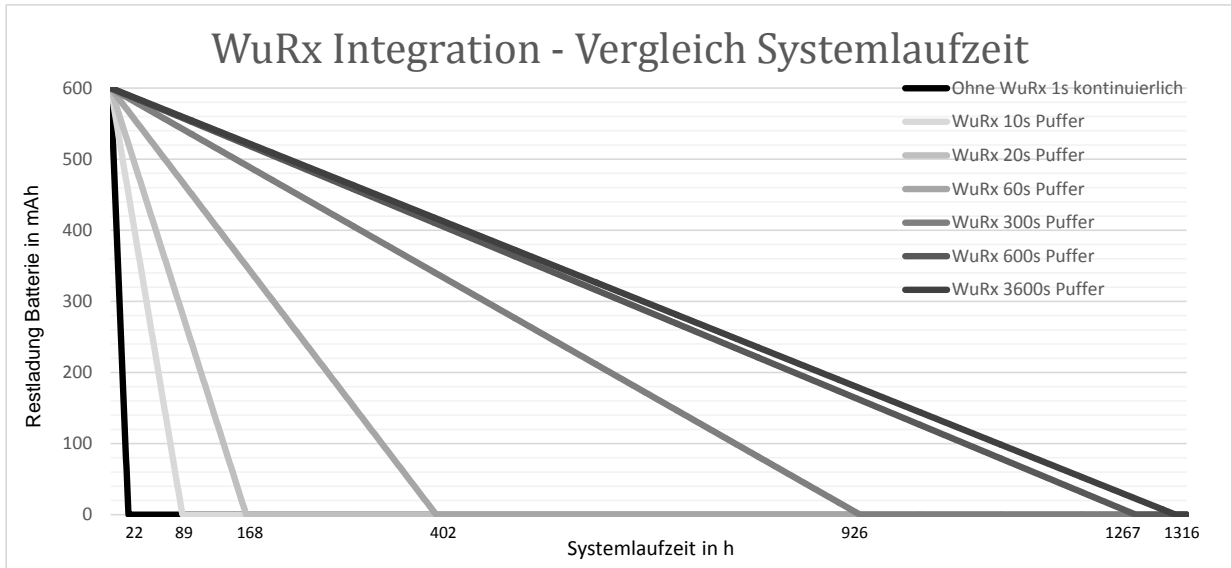


Abbildung 8.9: WuRx Integration - Ergebnisse für die maximal erreichbare Systemlaufzeit der nanett Evaluationsboards. Die Referenzmessung ohne WuRx Komponente ist schwarz (ganz links) hervorgehoben.

Bei der Analyse der Ergebnisse wird klar, wie signifikant sich die Möglichkeiten der WuRx Technologie unter Idealbedingungen auf die maximal mögliche Systemlaufzeit auswirken können. Das dedizierte Abschalten der Kommunikationshardware führt bei Low-Power Systemarchitekturen nochmals zu erheblichen Einsparungen im Energieverbrauch. Trotz des energetisch aufwendigen Aufweckens kann die Laufzeit von ca. 21,5 Stunden um Faktor >60 auf bis zu 1316,5 Stunden erhöht werden. Dabei entsteht bei diesem Optimierungsansatz kein Informationsverlust. Lediglich die auftretenden Latenzen müssen applikationsseitig vertretbar sein. Diese betragen je nach Spezifikation der WuRx Hardware ca. 100 bis 1000 ms.

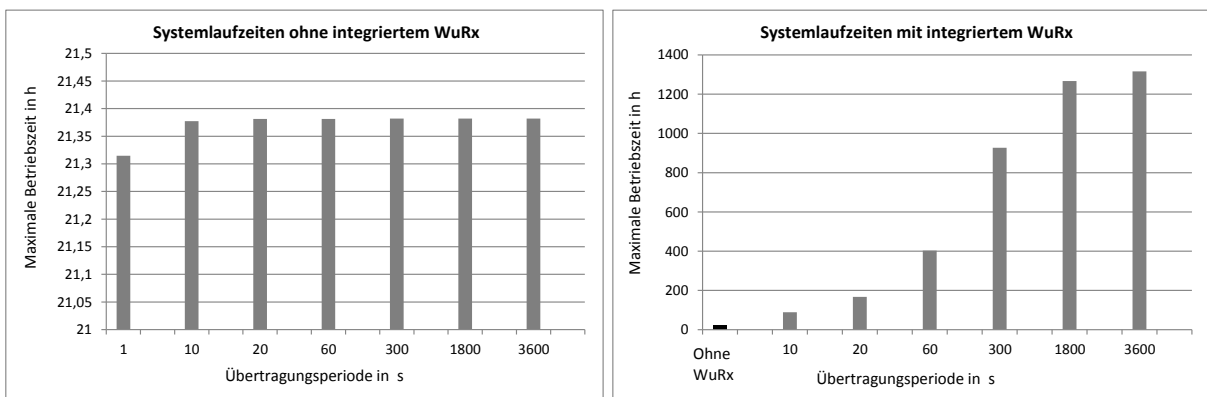


Abbildung 8.10: WuRx Integration - Vergleich Messergebnisse ohne und mit WuRx Komponente. Im rechten Diagramm ist die Referenzmessung ohne WuRx Komponente schwarz hervorgehoben.

Bei einem direkten Vergleich der Ergebnisse mit denen klassischer Übertragungskonzepte wird deutlich, dass die gepufferte Datenübertragung ohne hardwareseitige Zusatztechnologien kaum nennenswerte Vorteile mit sich bringt. Wie in Abbildung 8.10 ersichtlich, sind beim

verwendeten Low-Power 802.15.4 Transceiver nur geringe Laufzeitunterschiede aufgetreten. Es ist folglich nur ein kleines Optimierungspotential zu erwarten. Die kontinuierliche Empfangsbereitschaft der Funkhardware bindet hier bereits einen Großteil der Ressourcen. Zusätzlich müssen die Daten in jedem Fall zwischengespeichert werden, wodurch abermals Ressourcen aufgewendet werden müssen.

Bei Betrachtung der Ergebnisse wird ein weiterer wichtiger Aspekt klar. Auf Systemebene ist der Basisenergieverbrauch der WuRx Hardware im Vergleich zur restlichen Plattform vernachlässigbar klein. Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass die gemessene Systemlaufzeit mit integriertem, jedoch nicht genutztem WuRx nahezu identisch ist mit der Systemlaufzeit ohne WuRx ist. Für Entwickler ist diese Erkenntnis in Hinblick auf die Konzeption energieautarker Systeme von großer Wichtigkeit.

8.2.2 Simulation Multi-Hop-Szenarien

Die vorgestellten Ergebnisse und die damit einhergehenden quantitativen sowie qualitativen Aussagen für WuRx Technologien sind jedoch zunächst nur auf die betrachteten Single-Hop-Szenarien anwendbar. Um besser verwertbare Ergebnisse zu erhalten, sind im Kontext dieser Arbeit besonders weiterführende Betrachtungen im Multi-Hop-Bereich notwendig. In Multi-Hop-Szenarien sind dabei weitere Seiteneffekte bei der Kommunikation zu beachten. Große Datenmengen und simultane Übertragungsprozesse führen aufgrund von Pufferüberläufen oder Kollisionen auf dem Medium häufig zu Flaschenhälsen bei der Übertragung. Um grundlegende Aussagen bezüglich der Energieeffizienz in derartigen Netzwerktopologien treffen zu können, wurden in einer zweiten Phase größere Testszenarien simulativ umgesetzt und analysiert. Die nachfolgenden Betrachtungen beziehen sich dabei auf statische Topologien.

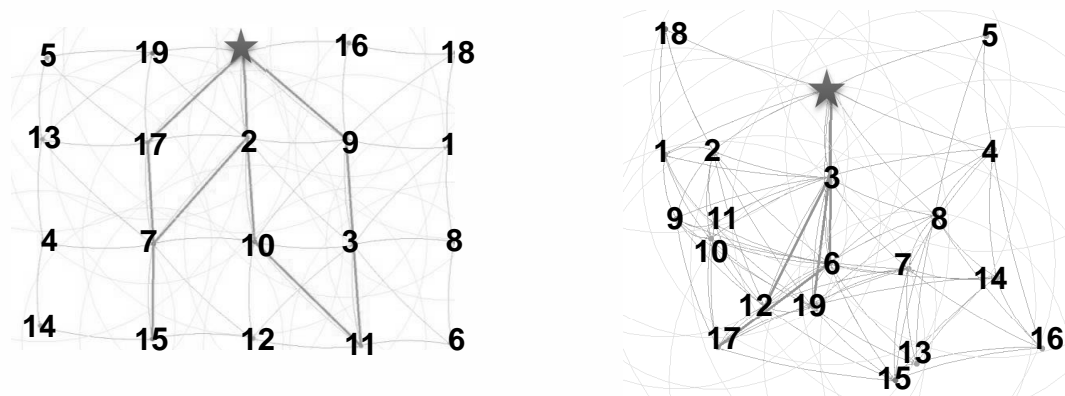


Abbildung 8.11: Die im Rahmen der Simulation analysierten Topologien umfassen gleichförmig (*links*) sowie zufällig verteilte Knotenmengen (*rechts*). Die vordefinierte Datensenkende ist jeweils mit einem Stern markiert.

Für die verwendeten Hardwarekomponenten des Demonstrators wurde jeweils eine entsprechende Modellierung in SimANet integriert. Gleiches gilt für den WuRx, dessen Funktions-

und Energiemodell der Spezifikation nachempfunden wurde. Wie in Abbildung 8.11 ersichtlich, umfassen die Testreihen sowohl gleichförmig verteilte (*uniforme*) Netzwerkstrukturen als auch zufällig verteilte (*randomisierte*) Topologien.

Beide Testszenarien beinhalten 20 energieautarke Netzwerkknoten ohne zusätzliche Harvesting-Komponenten. Wie bei der Hardwarerealisierung werden auch in den nachfolgenden Simulationsreihen jeweils zyklische Datenübertragungen nach einem festgelegten Zeitplan angestoßen. Auch hier wird aus Gründen der Vergleichbarkeit auf eine zufallsbasierte Ereignisgenerierung verzichtet. Der asynchrone Kommunikationscharakter des Netzwerkverbundes bleibt dennoch erhalten. Alle Knoten sind kontinuierlich Empfangsbereitschaft und nutzen keinerlei Zeitsynchronisationsmechanismus.

In den umgesetzten Multi-Hop-Szenarien erfolgt die Übertragung an eine vordefinierte Senke. Initial wurden je Knoten 2500 Energieeinheiten vordefiniert. Aufgrund des verfügbaren Energiemodells, welches auf abstrakten Energieeinheiten basiert, ist dabei ein direkter Vergleich mit den Realweltmessungen nur eingeschränkt möglich. Dennoch sind die qualitativen Aussagen für Anwendungen unter Realbedingungen verwertbar [22].

Als variable Eingabegröße wird das *Übertragungsintervall* und damit einhergehend die *Datenpuffergröße* definiert. Als Kenngröße wird die maximal erreichbare Systemlaufzeit definiert. Diese endet, sobald die Senke aufgrund erschöpfter Energieressourcen umliegender Knoten nicht mehr erreichbar ist. Zusätzliche Einflussfaktoren durch Routingverfahren oder Topologieoptimierungen wurden bereits in Kapitel 4.4.9 diskutiert und seien hier vernachlässigt. Es kommt eine einfache hop-optimierte Routenmetrik zum Einsatz und auf eine dedizierte Topologiekontrolle wird verzichtet. Zum besseren Verständnis beziehungsweise zur Interpretation der nachfolgenden Messergebnisse visualisiert Abbildung 8.12 beispielhaft alle relevanten Kenngrößen.

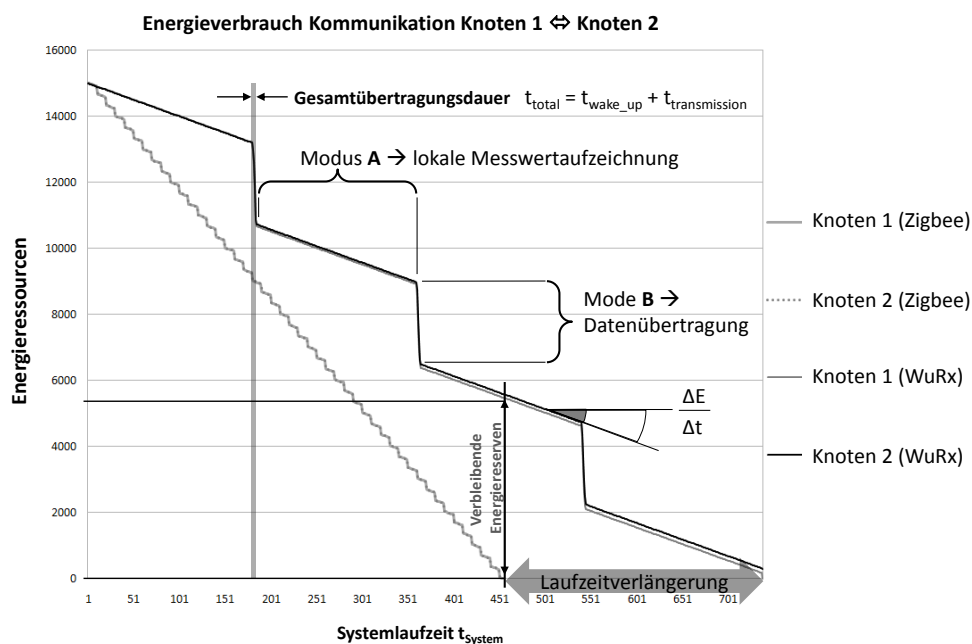


Abbildung 8.12: Beispieldiagramm für WuRx Messreihen auf Basis der SimANet Umgebung.

8 Fallstudien & Analyse

Das Diagramm zeigt den Vergleich zwischen einer konventionellen, ungepufferten Kommunikation mittels 802.15.4 Transceiver und einer gepufferten Kommunikation mit applizierter WuRx Technologie. Die unterschiedlichen Operationsmodi für Messwertaufzeichnung und gebündelter Messwertübertragung sind klar erkennbar. Ziel ist die Verringerung des Energiebedarfs auf Systemebene, was zu einer Verlängerung der Systemlaufzeit führt.

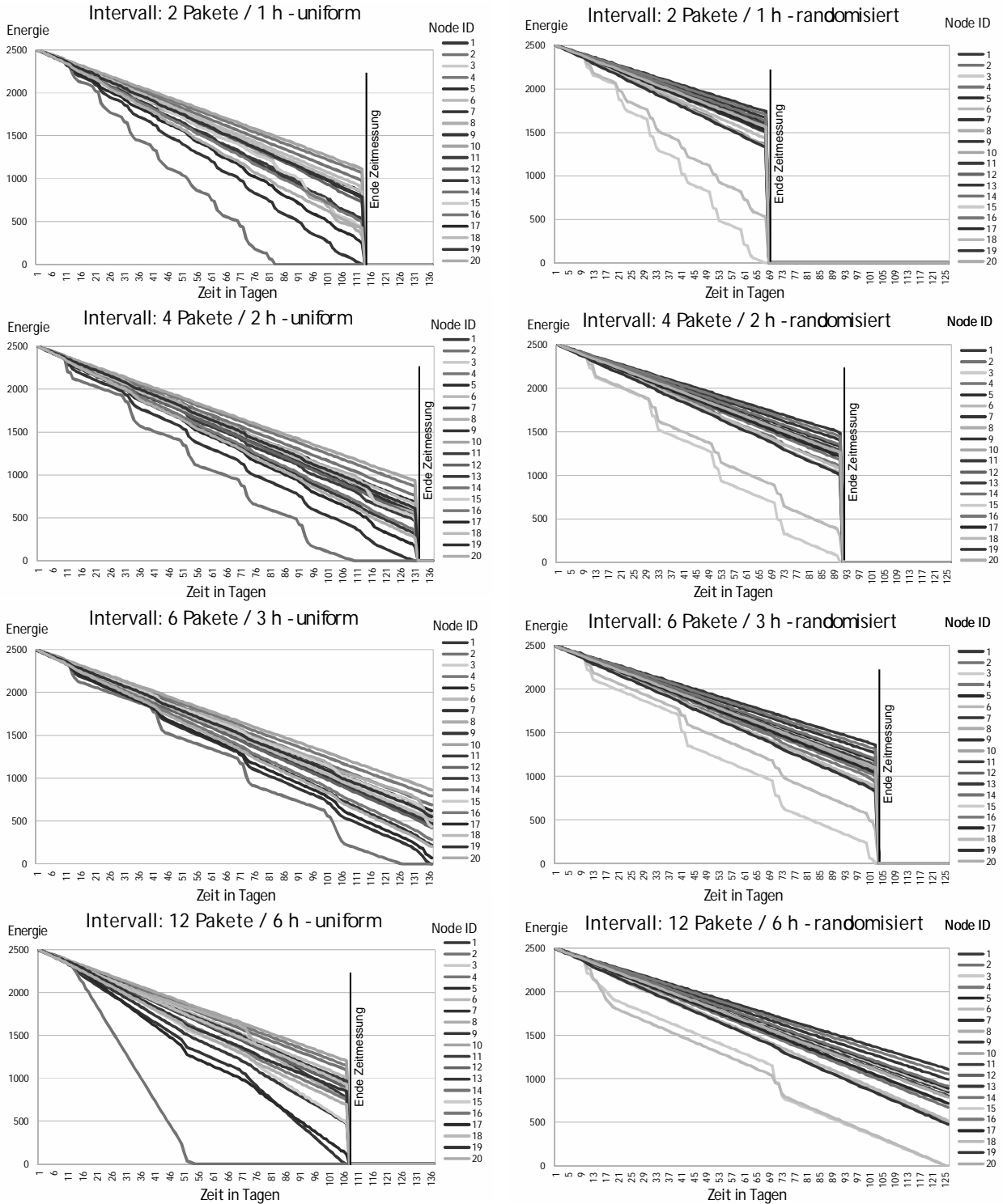


Abbildung 8.13: Übersicht Simulationsergebnisse. *Links* ein WuRx Szenario in der uniformen Knotentopologie. *Rechts* die zuvor beschriebene, zufällige Knotenverteilung.

Die Ergebnisse der durchgeführten Messreihen sind in Abbildung 8.13 dargestellt [23]. Das Referenzsystem überträgt dabei 2 Datenpakete kontinuierlich jede Stunde an die Senke ohne zusätzliche Datenpufferungen (dargestellt in den oberen Diagrammen). Die Ergebnisse der anschließenden Messszenarien erlauben interessante Schlussfolgerungen. Bei den vorangegangenen Single-Hop-Übertragungen auf dem Demonstrator greift die klare Aussage, dass die Systemlaufzeit linear gesteigert werden kann, indem unter Zuhilfenahme der WuRx Technologie möglichst lange Zeit Daten lokal gepuffert werden. Diese Aussage gilt bei komplexeren Multi-Hop-Kommunikationen nur eingeschränkt. Hier spielen mehrere Faktoren und Rahmenbedingungen eine wesentliche Rolle. Besonders hervorzuheben ist dabei das Verhältnis von Datenmenge, Puffergröße und Übertragungstechnologie. Bei schmalbandigen Low-Power-Kommunikationsstandards ist demnach eine kleine Puffergröße sinnvoll. Ist der Puffer zu groß und die Netzwerkkapazität zu gering, können die gebündelten Datenmengen nicht mehr reibungslos weitergeleitet werden. In Knoten, die Daten von mehreren Nachbarn empfangen, kommt es zu Pufferüberläufen und Kommunikationsproblemen. Aus den erhöhten Übertragungszeiten und Übertragungswiederholungen resultiert ein deutlich erhöhter Energieverbrauch.

Dies führt zu einer weiteren Schlussfolgerung, welche die starke Abhängigkeit des Optimierungspotentials von der Topologiegröße, der Knotendichte sowie der Knotenverteilung betrifft. Betrachtet man klassische WSN / SANET Szenarien, so ist die energetische Belastung in der Topologie nicht homogen verteilt und stark abhängig vom Datenmanagement. In Folge regelmäßiger, datenzentrierter Kommunikationsprozesse mit vordefinierten Daten senken sind die Knoten in direkter Nachbarschaft der Senke(n) stets besonders belastet (siehe Abbildung 8.14).

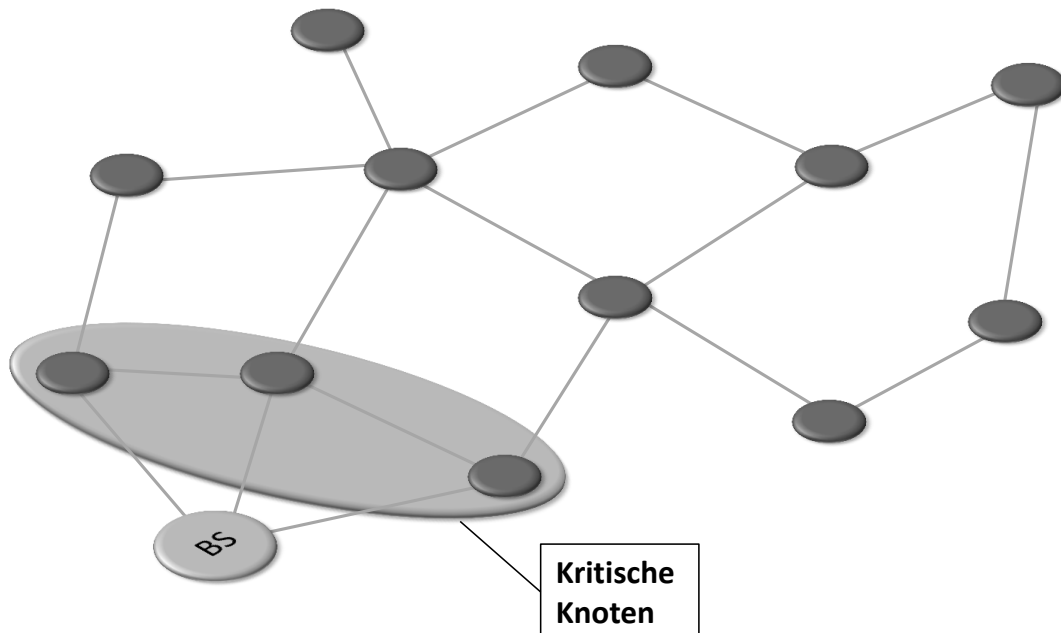


Abbildung 8.14: WSN Applikationen: Inhomogene energetische Belastung der einzelnen Knoten. Besonders Knoten nahe der Senke (*BS / Base Station*) werden überdurchschnittlich stark belastet.

Bei allen Übertragungsprozessen hin zur Senke dienen diese Knoten als Zwischenstation zur Weiterleitung der Nutzdaten. Hier bündelt sich folglich auch das Datenvolumen der gesamten Topologie. Fallen die *Tier-I* Knoten aus, ist keine Kommunikation mit der Senke mehr möglich. In direkter Konsequenz verlagern sich an dieser Stelle Optimierungsstrategien zur Steigerung der Energieeffizienz direkt auf Verfahren des Datenmanagements.

Auch in den simulierten Netzwerkstrukturen treten aus den genannten Gründen deutliche Unterschiede bei den Laufzeiten auf. Während in der uniformen Knotenverteilung die maximale Systemlaufzeit bereits bei 12 Paketen pro 6 Stunden wieder einbricht, kann in der randomisierten Verteilung eine kontinuierliche Laufzeitverbesserung über die einzelnen Pufferungsstufen festgestellt werden. In den durchgeführten Szenarien wurden außerdem statische Topologien gewählt. Kommt eine Knotenmobilität hinzu, ist damit zu rechnen, dass Einflussfaktoren wie Datenvolumen, Topologiegröße oder Knotenverteilung an Bedeutung gewinnen.

Bei genauer Analyse der Diagramme in 8.13 treten jedoch auch einige Fragen auf. Zum einen weichen die Datenmengen und die Zeitintervalle von denen der Demonstratorplattform ab. Dies begründet sich in der Tatsache, dass es bereits bei durchgeführten Simulationen aufgrund zu vieler simultaner Übertragungen teils zu Pufferüberläufen kam. Die Multi-Hop-Kommunikation wurde je nach Topologie schon bei relativ geringen Datenlasten massiv gestört. Dies verdeutlicht sich besonders im Zuge der Betrachtung der uniformen Knotenverteilung bei einer gebündelten Übertragung von 12 Paketen im 6 Stunden Zyklus. Hier brechen die zentralen Knoten um die Senke herum deutlich schneller zusammen. Unter Realbedingungen ist mit einem gleichen Verhalten zu rechnen.

Auch die erreichte Systemlaufzeit weicht von Messergebnissen der Hardwareplattform ab. Dies ist die logische Folge der veränderten Datenraten in der Simulation sowie dem verwendeten, abstrakten Energiemodell. Zusätzlich sind auch Seiteneffekte durch die Multi-Hop-Kommunikation von Relevanz, welche die Gesamtlaufzeit beeinflussen. Da SimANet über kein umfassendes Simulationsmodell für das physische Medium verfügt, sind auch die damit verbundenen Phänomene und Nebeneffekte nur beschränkt beobachtbar. Paketverluste werden beispielsweise über ein einfaches, wahrscheinlichkeitsbasiertes Modell simuliert. Unter realen Einsatzbedingungen treten folglich deutlich mehr Nebeneffekte durch Mehrwegeausbreitung, Signalüberlagerungen und Dopplereffekte auf. In Summe wirken sich diese unter Umständen auch stärker auf das Kommunikationsverhalten aus. Ein entsprechender Demonstrator, welcher eine heterogene Multi-Hop-Netzwerktopologie unter realen Einsatzbedingungen abbildet, ist an dieser Stelle sinnvoll und bildet den Inhalt der nachfolgenden Testreihe. Dabei wird eine verteilte Systemarchitektur mit mehreren WuRx Netzwerkknoten, unterschiedlichen Hardwareplattformen und angepassten Protokollen für das Netzwerk- und Datenmanagement untersucht.

8.2.3 Energieeffizienzbetrachtungen in verteilten, heterogenen Systemen

In diesem Abschnitt sollen die Energieeffizienzbetrachtung für die WuRx Integration in verteilten, eingebetteten Systemen konkretisiert werden. Dabei wird ein asynchrones Kommu-

nikationsszenario nach Abbildung 8.15 herangezogen. In der Topologie sendet Knoten 6 jeweils mit und ohne WuRx Unterstützung einen Datensatz (4 Byte) an die Senke, wobei dieses Übertragungsereignis asynchron und zufällig ausgelöst wird. Dementsprechend muss die Empfangsbereitschaft zu jedem Zeitpunkt gegeben sein.

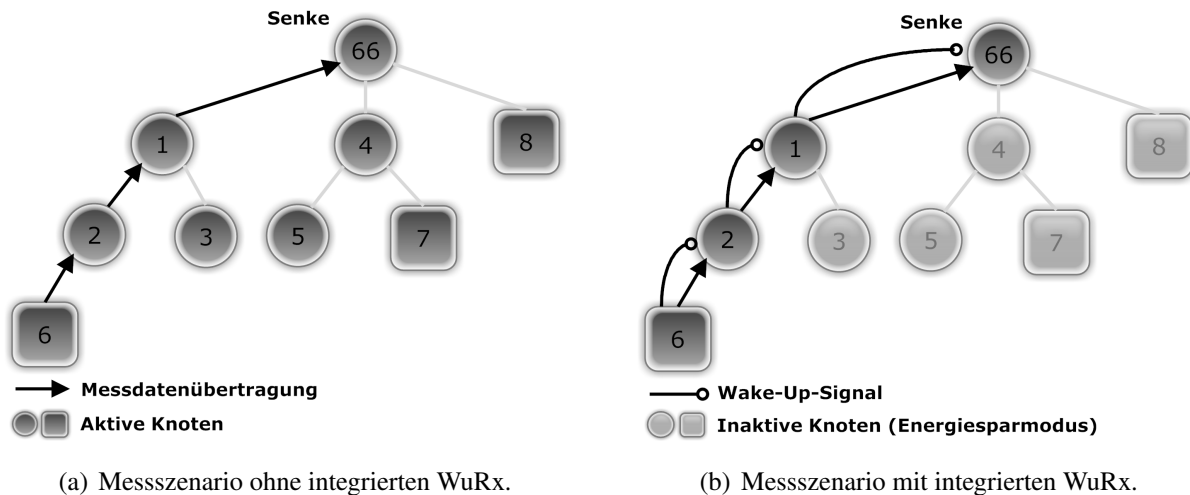


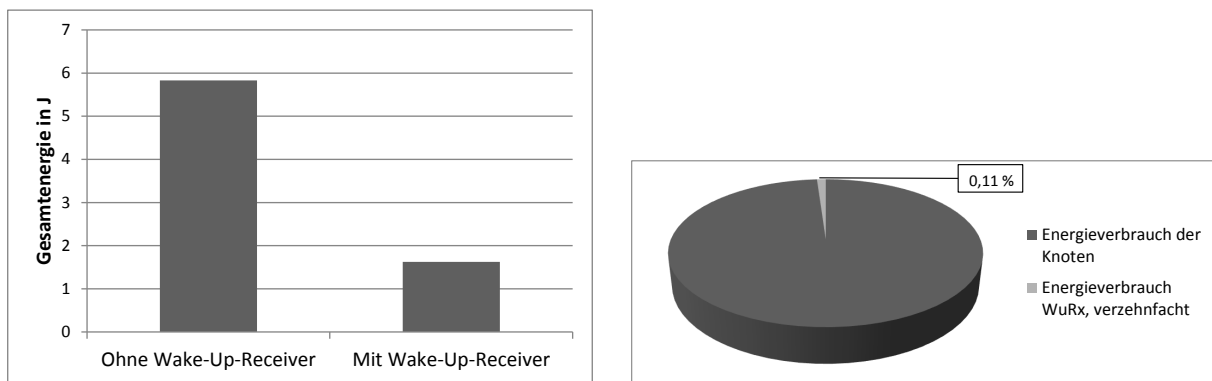
Abbildung 8.15: WuRx Integration in eine heterogene Netzwerktopologie. Die nanett Hardware wird durch *Quadrate* dargestellt, PLANet Boards durch *Kreise*.

Ohne WuRx verweilt folglich jeder Knoten im Leerlauf. Die Funkmodule bleiben ohne Synchronisierungsmechanismen topologieweit aktiviert. Mit WuRx befinden sich die Knoten standardmäßig in einem Energiesparmodus, bei dem die Haupttransceiver deaktiviert sind. Eine Übertragung wird wie in den vorangegangenen Messungen per Wake-Up-Signal initialisiert. Der gesamte Übertragungsprozess inklusive Wake-Up dauert in jedem Knoten maximal 1000 ms. Die Übertragung der Nutzdaten erfolgt in jedem Fall über den Haupttransceiver auf einer vordefinierten Route. Für eine vergleichende Analyse kann demnach der Energiebedarf für den Datenübertragungsprozess herausgerechnet und vernachlässigt werden. Der energetische Vergleich erfolgt ausschließlich auf Basis der Aktivitätszeiten aller Knoten im Netzwerk. Von Relevanz ist hierbei die Zeitspanne vom Beginn der Übertragung bis zum Eintreffen der Nutzdaten in der Datensenke.

Für die Berechnungen in dieser Messreihe kommt der Wake-Up-Receiver μ RX1080 des Fraunhofer-Instituts für Integrierte Schaltungen zum Einsatz [274]. Die spezifizierte Leistungsaufnahme liegt im empfangsbereiten Modus bei 30 μ W. Die Empfindlichkeit liegt bei -60 dBm bei einer Wake-Up-Latenz von 32 ms. Die Reichweite liegt mit 30 Metern im Bereich anderer Low-Power-Funkstandards. Zur Aktivierung eines Knotens mittels Wake-Up-Signal werden ca. 320 μ J gebunden. Weiterhin unterstützt der μ RX1080 das selektive Aktivieren einzelner Knoten, sodass ein versehentliches Aufwecken falscher Netzwerkknoten ausgeschlossen werden kann.

Zur Ermittlung von Energieeffizienzwerten wurde ein Beobachtungszeitraum von 4 Sekunden gewählt. Alle Knoten ohne WuRx befinden sich im Leerlaufmodus mit aktivem Netzwerk und besitzen dabei eine Leistungsaufnahme von 162 mW (PLANet) oder 93 mW (nanett).

Mit integriertem WuRx befinden sich zunächst alle Knoten im Energiesparmodus bei einer Leistungsaufnahme von nur 0,16 mW (PLANet) respektive 3 mW (nanett), bis Knoten 6 mit dem Übertragungsprozess startet. Der Basisenergieverbrauch der WuRx-Komponente konnte hier vernachlässigt werden, da dieser, wie bereits in der ersten Testreihe dieser Fallstudie analysiert, im Vergleich zur gesamten Systemplattform verschwindend gering ist. Nur der Wake-Up-Prozess fließt mit $320 \mu\text{J}$ mit in die Berechnungen ein. Während der Übertragung erwachen dann sukzessiv Knoten 2, Knoten 1 sowie die Datensenke per Wake-Up-Signal. Diese verbleiben dann bis zum Ende des Messszenarios im aktiven Zustand. Alle anderen Knoten verweilen durchgehend im Energiesparmodus, da sie für die Kommunikation nicht benötigt werden. Die sich daraus abgeleiteten Energieverbrauchswerte für das Gesamtszenario wurden in Abbildung 8.16 visualisiert.



(a) Vergleich des Energieverbrauchs für das Szenario mit und ohne WuRx.

(b) Energieverbrauchsanteile für die WuRx-Kommunikation im Vergleich zur restlichen Systemplattform.

Abbildung 8.16: Darstellung des gesamten Energieverbrauchs des Szenarios.

Die Berechnung sei an dieser Stelle noch einmal zum besseren Verständnis beispielhaft erklärt. Der Energieverbrauch für die gesamte Topologie E_{ges} ergibt sich aus dem Produkt von *Aktivitätsdauer* t , *Anzahl beteiligter Netzwerkknoten* n sowie der *Leistungsaufnahme* P der Hardwareplattform im jeweiligen *Betriebsmodus* m über die gesamte Laufzeit:

$$E_{ges} = \sum_{\forall i \in m} t_i * n_i * P_i$$

Durch Aufsummieren aller Einzelwerte ergibt sich daraus im Szenario ohne WuRx-Integration, bestehend aus 9 Knoten (3 nanett Knoten, 6 PLANet Knoten), ein Energiebedarf E_{ges} von 5,83 J. Im Szenario mit WuRx erfolgt die Berechnung dann analog, jedoch ist hier die Aufteilung in den einzelnen Betriebsmodi deutlich komplexer.

Die Ergebnisse zeigen, dass durch die Verwendung von Wake-Up-Receiver Technologie der Energieverbrauch für die Kommunikation bei geeigneten Rahmenbedingungen auf weniger als $\frac{1}{3}$ des Energieverbrauchs ohne WuRx reduziert werden kann. Dies liegt klar an der Tatsache, dass die Knoten ohne WuRx keine Energiesparmodi nutzen können. Auch das Verhältnis des Energiebedarfs von WuRx und der restlichen Systemplattform ist beeindruckend gering.

Zur besseren Lesbarkeit wurde hier der WuRx-Anteil in der rechten Abbildung verzehnfacht dargestellt und kann nahezu vernachlässigt werden.

Aus den absolut errechneten Energieverbrauchswerten soll nun eine wertende Abschätzung in Hinblick auf die Energieeffizienz erfolgen. Zur Bestimmung der Energieeffizienz ϕ kommt nun das Modell aus Kapitel 2.4 zum Einsatz. Für die Aufwandsabschätzung ist hierzu eine Kostenfunktion zu definieren. Eine einfache, jedoch zweckmäßige Kostenfunktion ist die folgende:

$$k(E_{\text{ges}}) = 1 + \frac{E_{\text{ges}}}{e_{\text{min}}}$$

Diese ist nur vom Energieverbrauch der einzelnen Subsysteme (hier Netzwerkknoten) abhängig. Zur Normierung der Werte dient an dieser Stelle e_{min} als Basisenergiemenge. Alle Prozesse auf Knoten- und Netzwerkebene lassen sich dabei als ein Vielfaches von e_{min} beschreiben. In der Simulation entspricht $e_{\text{min}} = 1\text{EU}$ (*Energy Unit, abstrakte Energieeinheit*). Auf Hardwareebene repräsentiert $e_{\text{min}} = 1\text{J}$. Daraus ergibt sich folgender Term:

$$k(E_{\text{ges}}) = 1 + \frac{E_{\text{ges}}}{1}$$

Auf Basis dieser Kostenfunktion zeigt Tabelle 8.2 die errechneten Energieeffizienzwerte.

	Energieverbrauch E_{ges} in J	Energieeffizienz ϕ
Messscenario ohne WuRx	5,83	60,68 %
Messscenario mit WuRx	1,63	84,70 %

Tabelle 8.2: Energieeffizienz der vorgestellten Verfahren anhand des Gesamtenergieverbrauchs.

Der zugrundeliegende Gesamtnutzen N_{Global} für das gegebene, verteilte System mit neun Knoten entspricht dabei 9. Jeder Knoten erfüllt dazu im Verbund eine bestimmte Aufgabe, beispielsweise die Messung spezifischer Sensorwerte. Damit ist der lokale Nutzen N_{Lokal} aller Knoten zunächst 1. Im Zuge einer gemeinsamen Aufgabenerfüllung als verteiltes System nutzen die Knoten einen oder mehrere Kommunikationspfade zum Informationsaustausch. Folglich ist der globale Nutzen N_{Global} des Knotens nach dem in Kapitel 2.4 vorgestellten Modell abhängig von der Verfügbarkeit aller benötigten Kommunikationspfade. Dies ist im betrachteten, statischen Beispielszenario gegeben. Durch ein Aufsummieren der globalen Nutzenwerte ergibt sich der globale Gesamtnutzen von 9. Die berechneten Effizienzwerte ϕ ergeben sich dann über die oben genannte Kostenfunktion k wie folgt:

$$\begin{aligned}\phi &= \frac{N_{Global}}{k(x)} \\ \phi &= \frac{N_{Global}}{1 + \frac{E_{ges}}{e_{min}}} \\ \phi &= \frac{9 * 1}{(9 * 1) + \frac{5,83J}{1J}} \\ \phi &\approx 0,6068\end{aligned}$$

Die Ergebnisse belegen damit die Aussagen vorangegangener Testszenarien und stützen die Schlussfolgerungen bezüglich der Anwendbarkeit von WuRx Konzepten für verteilt agierende, ressourcenbeschränkte Systeme. Es ist außerdem zu erwarten, dass das Einsparpotential durch WuRx Konzepte mit zunehmender Größe des Sensornetzes erheblich ansteigt.

8.2.4 Schlussfolgerungen

Bei der Zusammenfassung der Erkenntnisse aus dieser Fallstudie sind mehrere Aussagen bezüglich einer energieeffizienten Kommunikation mit WuRx Technologie und asynchronen Kommunikationskonzepten abzuleiten. Handelt es sich bei dem zu realisierenden, verteilten System um eine Single-Hop-Netzwerkstruktur, bei denen die applikationsseitigen Rahmenbedingungen einen sinnvollen Einsatz von WuRx Komponenten zulassen, so bietet die Technologie nahezu uneingeschränkt Vorteile für die Energiebilanz auf Systemebene. Unter Berücksichtigung erhöhter Latenzen können WuRx Konzepte asynchrone Kommunikationsszenarien erheblich energieeffizienter umsetzen. Je länger dabei die Zeitspanne einer lokalen Datenpufferung gewählt wird, desto stärker verlängert sich die Systemlaufzeit im Kontext energieautarker Applikationsszenarien. Zusätzliche Optimierungen sind durch eine Verbesserung des Verhältnisses von Daten pro Zeit erreichbar, was sich primär auf Verfahren zur Datenaggregation, Datenfusion und Datenkomprimierung abbilden lässt.

Erfordert das Anwendungsszenario jedoch eine verzögerungsminimierte Datenweiterleitung oder stark frequentierte Übertragungsprozesse, repräsentiert die WuRx-Technologie eine unnötige Hardware-Komponente, welche die Komplexität der Systemarchitektur unnötig erhöht. Mit einer signifikanten Verlängerung der Systemlaufzeit ist dann nicht zu rechnen. Gleiches gilt für den Fall fest definierbarer Zeitintervalle aus Kommunikationssicht. Hier bieten Zeitsynchronisationsverfahren und entsprechend zeitlich koordinierte Aktivitätsphasen für die Netzwerkschnittstellen bessere Möglichkeiten zur Optimierung der Energieeffizienz.

Im Bereich der Multi-Hop-Kommunikation beeinflussen Topologiegröße, Knotenverteilung sowie Kontendichte wesentlich die realisierbaren Effizienzsteigerungen von WuRx Konzepten. Des Weiteren muss die Größe der lokalen Datenpuffer und der Pufferungszeitraum stark an die eingesetzte Funktechnologie angepasst werden. Der Kompromiss zwischen Energieeinsparung und Übertragungslatenz durch lokale Pufferung ist hier erheblich differenzierter als im Single-Hop-Kontext zu betrachten. Datenaggregations-, Datenfusions- und Komprimierungsverfahren

ermöglichen in gleicher Weise eine Verbesserung des Daten-Zeit-Verhältnisses. Die Vorteile einer asynchronen Kommunikation lassen sich auch bei Multi-Hop-Szenarien mit Hilfe der WuRx Technologie energieeffizienter nutzen. Jedoch tritt hier die zusätzliche Integration angepasster Protokolle, beispielsweise im Bereich Routing oder Topologiekontrolle, deutlich stärker in den Vordergrund. Wie in den vorangegangenen Kapiteln im Kontext von Cross-Layer Strategien ausführlich beschrieben, müssen hier verschiedene Abstraktionsebenen und Perspektiven sinnvoll zusammenwirken, und eine energieeffiziente Kommunikation sicherzustellen.

8.3 Fallstudie 2 - Einflüsse durch Datenmanagementverfahren

Die zweite Fallstudie befasst sich mit der Analyse von Optimierungsstrategien im Bereich des Datenmanagements. Hierbei sollen einfache Ansätze zur Datenbündelung im Zuge einer gepufferten Datenübertragung sowie klassische Datenaggregationsverfahren aus energetischer Sicht verglichen werden. Zusätzlich werden die Auswirkungen von Datenaggregationsverfahren auf das Kommunikationsverhalten kritisch betrachtet.

8.3.1 Energieeffizienzbetrachtungen von Datenaggregationsverfahren

In dieser ersten Testreihe wurde eine heterogene, verteilte Netzwerkstruktur in Hardware umgesetzt und analysiert. Wie schematisch in Abbildung 8.17 abgebildet, kommen hier beide Demonstratorplattformen (nanett und PLANet) zum Einsatz. Zur Ermittlung der Energiekosten auf Kommunikationsseite werden die in Tabelle 8.1 ermittelten Leistungsaufnahmen der PLANet und nanett Boards verwendet. Außerdem gelten die in der ersten Fallstudie berechneten Basisenergieverbrauchswerte für die Übertragung eines Nutzdatenbits.

Bei der Anwendung von In-Netzwerk-Aggregationsverfahren soll die Datenmenge im Rahmen der Kommunikation minimiert werden. Dies ist folglich gleichzusetzen mit einer Reduktion des Kommunikationsaufwands auf Systemebene. Die Ausführungen beziehen sich auf ein allgemeines Szenario, in welchem die einzelnen Knoten zyklisch Nutzdaten an einen Datensenke übermitteln. Im Demonstratornetzwerk ist dabei jeder Datensatz 4 Bytes groß.

Nun sollen unterschiedliche Übertragungsverfahren aus energetischer Sicht verglichen werden. *Verfahren 1* arbeitet mit einer nicht gebündelten Multi-Hop-Übertragung zur Senke. In *Verfahren 2* aggregiert jeder Knoten alle Datensätze seiner Kinder zu einem gemittelten Datensatz und leitet diesen anschließend weiter. Daraus resultiert eine zusätzliche Wartezeit bis alle untergeordneten Pakete empfangen und verarbeitet wurden. *Verfahren 3* erweitert die Aggregation um eine zusätzliche, lokale Datenpufferung, wie sie aus der ersten Fallstudie bekannt ist. Allerdings wird hier nicht auf Basis der Pufferungszeit gearbeitet, sondern mit relativen Füllstandangaben des Datenpuffers. Jeder Knoten entscheidet folglich anhand

des Füllgrades (η in %), wann er eine Datenübertragung initiiert. Im Zuge der Multi-Hop-Übertragung speichern wiederum alle Zwischenstationen die empfangenen Daten temporär, sofern dies der eigene Pufferfüllstand erlaubt.

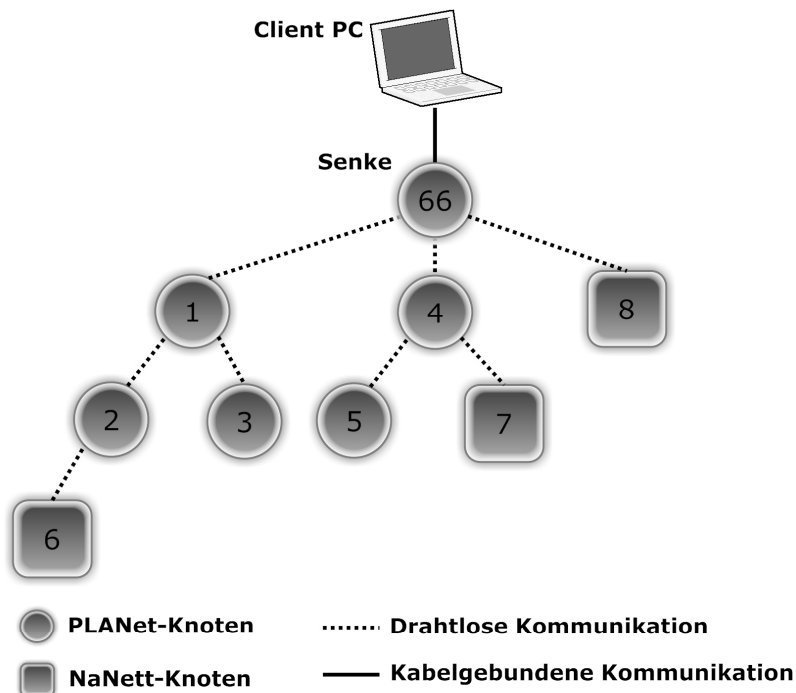


Abbildung 8.17: Testaufbau als verteilte, heterogene Systemarchitektur.

Als Routingprotokoll wurden die Konzepte von WRTA verwendet (siehe Kapitel 4.4.8). Dementsprechend steht ein optimierter, baumartiger Kommunikationsgraph zur Verfügung, in dem jeder Netzwerkknoten einen wohldefinierten Routenpfad zur Senke besitzt.

Diagramm 8.18 zeigt in diesem Zusammenhang die Anzahl übertragener Pakete im Netzwerk pro Übertragungszyklus¹. Die maximale Nutzdatengröße pro Paket wurde auf 100 Byte definiert. Dies entspricht der Spezifikation des verwendeten Xbee 802.15.4 Funkmoduls [201]. Der lokale Puffer jedes Knotens fasst ebenfalls 100 Bytes und somit maximal ein volles Datenpaket. Für Verfahren 3 wurden außerdem unterschiedliche Füllstandgrade ($\eta \in \{0.25, 0.5, 0.75, 1\}$) als Schwellwerte für die Datenübertragung gewählt. Dies entspricht folglich 25, 50, 75 sowie 100 gepufferten Bytes.

Die Ergebnisse zeigen deutlich, wie die ursprüngliche Datenmenge im Referenzverfahren 1 reduziert werden kann. Interessante Schlussfolgerungen lassen die Werte in Verfahren 3 zu. Hier nimmt die benötigte Paketanzahl mit steigendem Füllstandsgrad η wieder zu. Dies resultiert aus den Aggregationsprozessen in den jeweiligen Knoten. So wird bei der Übertragung voller Datenpakete beziehungsweise großer Datenmengen die Pufferkapazität der weiterleitenden Knoten unmittelbar überschritten. Folglich müssen die Nutzdaten aufgeteilt und in mehreren

¹Ein Übertragungszyklus bezeichnet den Zeitraum, in welchem jeder Knoten genau ein Datenpaket an die Senke versendet. Pufferkapazitäten und Wartezeiten durch gegenseitige Abhängigkeiten müssen mit eingerechnet werden.

Paketen übertragen werden. Für $\eta = 1$ verhält sich Verfahren 3 im Testszenario ähnlich wie Verfahren 1. Jedes Paket besitzt dabei schon die Maximalkapazität und kann bei der Weiterleitung nicht zusammengefasst werden.

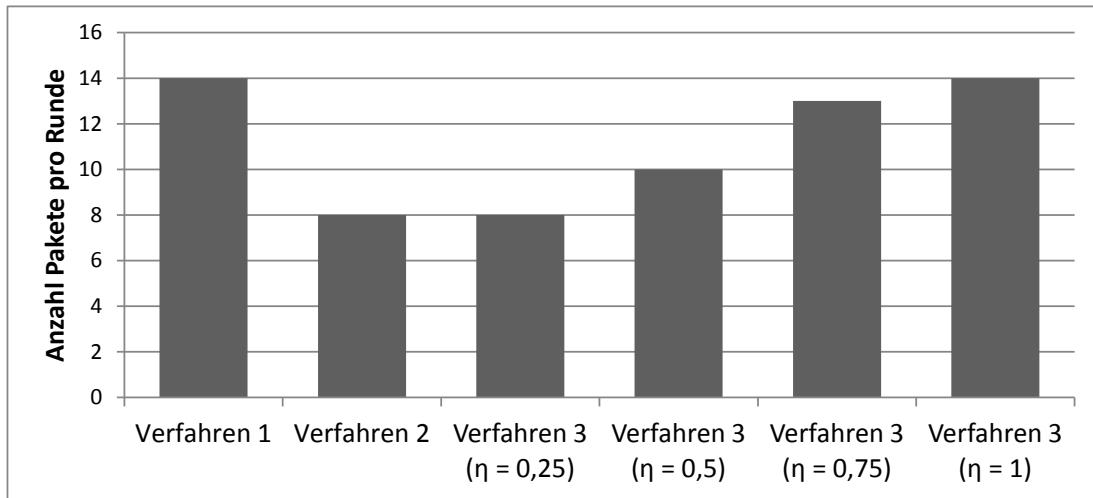


Abbildung 8.18: Anzahl zu übertragender Pakete, maximale Paketkapazität 100 Byte.

Die aufgeführten Analysen beziehen sich dabei zunächst ausschließlich auf die Paketmengen pro Runde und dabei auf die Netzwerkaktivität. Zeitliche Aspekte sind aber ebenfalls von großem Interesse. Die zusätzlich auftretenden Verzögerungszeiten durch die Pufferung sind konzeptbedingt nur schwer zu umgehen. Wichtig aus Sicht der Energieeffizienz ist aber auch der Zeitrahmen, der für die Übertragung einer bestimmten Datenmenge benötigt wird. So besitzt speziell Verfahren 3 mit zunehmenden Füllstandsschwellwert η durch längere Pufferungsphasen eine höhere Anzahl Nutzdaten, die zusammengefasst an die Senke übertragen werden.

Deshalb ist eine energetische Betrachtung der Verfahren basierend auf den Nutzdaten und zeitlichen Aspekten von großer Relevanz. Unter den oben genannten Rahmenbedingungen kann 1 Datenpaket 25 Datensätze je 4 Byte übertragen. Dies entspricht gleichzeitig dem Füllstandswert $\eta = 1$ für Verfahren 3. Aus energetischer Sicht muss daher verglichen werden, wie viele Übertragungszyklen benötigt werden, um mit dem jeweiligen Verfahren gleiche Nutzdatenmengen an die Senke zu übermitteln. Die benötigten Zyklen sind in Tabelle 8.3 zusammengefasst.

	Pakete pro Zyklus	Benötigte Runden	Pakete gesamt
Verfahren 1	14	25	350
Verfahren 2	8	25	200
Verfahren 3, $\eta = 0,25$	8	4	32
Verfahren 3, $\eta = 0,5$	10	2	20
Verfahren 3, $\eta = 0,75$	13	2	26
Verfahren 3, $\eta = 1$	14	1	14

Tabelle 8.3: Anzahl benötigter Runden zur Übertragung von 100 Bytes Nutzdaten (entspricht 25 Datensätzen).

Das Senden jedes Datenpakets beinhaltet außerdem zusätzlichen Mehraufwand, der als Protokoll- oder Kommunikationsoverhead bezeichnet wird. Er umfasst unter anderem Steuerungsmechanismen (Handshaking, Acknowledgement, etc.), Prüfsummenberechnungen und Protokolldaten. Dieser Kommunikationsoverhead muss mit in die Betrachtungen einbezogen werden. Dies soll am Beispiel der Prüfsummenberechnung veranschaulicht werden. Hier umfasst der Overhead mindestens 10 Bytes, die zusätzlich übertragen werden [201]. Unter Annahme eines konstanten Energiebedarfs für die Berechnung und für die Paketübertragung ergibt sich folgender energetischer Mehraufwand:

$$E_{\text{overhead}} = E_b * 8\text{bit} * 10\text{Byte}$$

E_b ist dabei wieder anhängig von der jeweiligen Hardwareplattform (nanett oder PLANet). In Kombination mit der reinen Nutzdatenmenge und der Gesamtanzahl aller Pakete kann nun die benötigte Energie für die Übertragungsprozesse im gesamten Szenario berechnet werden. Diagramm 8.19 zeigt hierzu die ermittelten Werte.

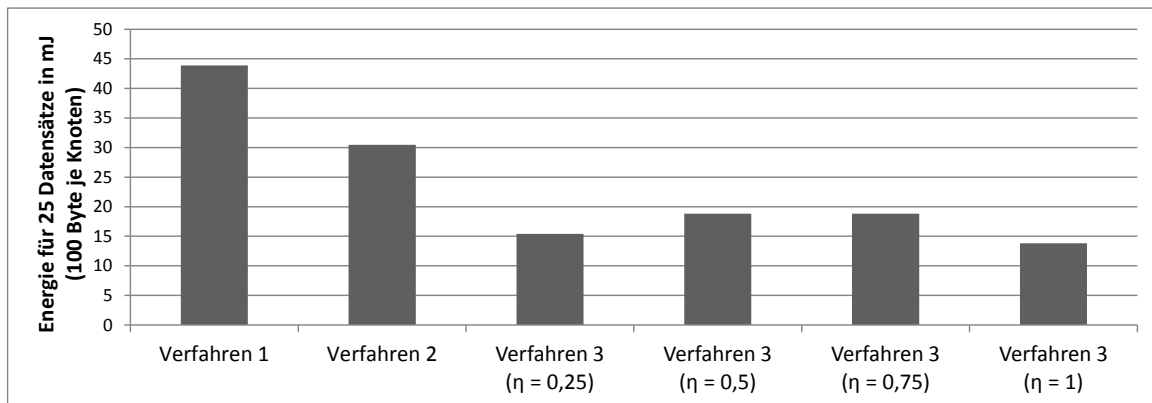


Abbildung 8.19: Benötigte Energie für die Übertragung von 100 Byte (25 Messdatensätze) pro Knoten zur Datensenke.

Beim Vergleich der Ergebnisse wird deutlich, dass Verfahren 1 erheblich mehr Energie bindet als Verfahren 2 und 3. Dies resultiert klar aus der hohen Anzahl benötigter Datenpakete sowie dem geringen Anteil Nutzdaten im Verhältnis zum Protokolloverhead. Bei Anwendung von Verfahren 2 sind die Datenpakete besser gefüllt, jedoch ist die hohe Anzahl Übertragungszyklen gleich mit denen aus Verfahren 1. Für Verfahren 3 empfehlen sich niedrige Füllstandsschwellwerte, da hier die energetischen Vorteile mit einer guten Übertragungscharakteristik kombiniert werden können. Für $\eta = 0,5$ und $0,75$ ergeben sich dagegen ungünstige Verhältnisse zwischen Nutzdatenlast und maximaler Paketgröße. Hier müssen die zusammengefassten Daten relativ häufig auf mehrere Pakete neu aufgeteilt werden. Das nachfolgende Diagramm 8.20 zeigt das Verhältnis von Kommunikationsoverhead und Nutzdaten.

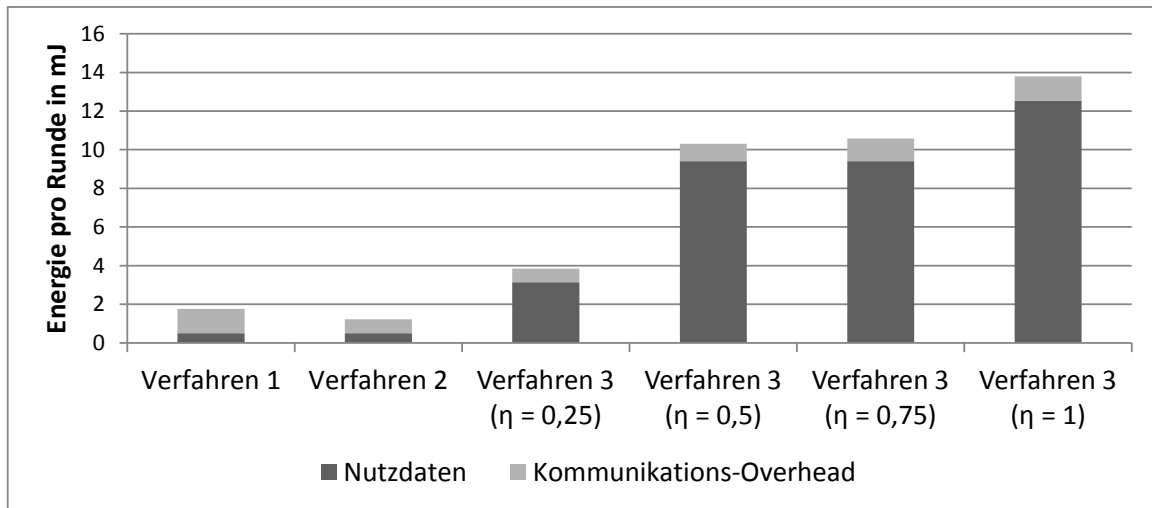


Abbildung 8.20: Anteil des Kommunikationsoverheads.

Bei der Betrachtung der Werte wird ersichtlich, wie erheblich der Overhead in Verfahren 1 und 2 ist. Die gebundene Energie für die Kommunikationsabwicklung ist größer als die für die eigentliche Nutzdatenübertragung. Ein gutes Verhältnis zwischen Overhead und Nutzdaten weist Verfahren 3 auf, speziell für $\eta = 0,5$ und $\eta = 1$. Im praktischen Einsatz ist Verfahren 3 mit $\eta \geq 0,75$ jedoch kaum einsetzbar. Gründe hierfür sind zum einen die sehr große Paketlänge, wodurch die Kollisionswahrscheinlichkeit mit zunehmender Skalierung der Topologie unverhältnismäßig stark ansteigt. Des Weiteren greifen aufgrund des hohen Füllstandsschwellwertes die Aggregations- und Pufferungsmechanismen nicht mehr. Empfangene Pakete müssen so häufig unmittelbar aufgeteilt, neu zusammengesetzt und direkt weiter übertragen werden. Hieraus folgen recht schnell Überlastsituationen auf Knoten nahe der Datensenke. Daraus ergeben sich wiederum Übertragungsfehler und Übertragungswiederholungen, was zu einem massiv erhöhten Kommunikationsaufwand führt [1]. Zusätzlich steigt mit einem hoch gewähltem Wert für η die Verzögerungszeit bis zur Übertragung von Information an der Senke, was die Anwendbarkeit in zeitkritischen Bereichen erschwert.

Basierend auf der in Kapitel 2.2 gefassten Definition für Energieeffizienz ist nun wiederum eine Quantifizierung der Verfahren möglich. Im Zuge einer Diskussion der Ergebnisse in Abhängigkeit vom Anwendungskontext sollen im Folgenden zwei unterschiedliche Kostenfunktionen genutzt und verglichen werden. Hierbei greift zum einen die bereits verwendete Kostenfunktion k_1 , welche den Gesamtenergieverbrauch E_{ges} des Vorgangs und somit die insgesamt übertragene Datenmenge in Bytes betrachtet (siehe Abschnitt 8.2.3), als auch die Kostenfunktion k_2 , die mit Hilfe der Metrik *Energie * Verzögerungszeit* Energieverbrauch sowie die Verzögerungszeit der Daten mit einbezieht.

$$\begin{aligned}
 k_1 &= k_1(E_{\text{ges}}) &&= 1 + \frac{E_{\text{ges}}}{e_{\text{min}}} = 1 + \frac{E_{\text{ges}}}{1} \\
 k_2 &= k_2(E_{\text{ges}}, \text{Verzögerung}) &&= 1 + E_{\text{ges}} * \text{Verzögerung}
 \end{aligned}$$

Für die Berechnungen wird die reine Übertragungszeit über ein drahtloses Kommunikationsmedium vernachlässigt. Der Messwertaufnahmekyklus in der Topologie wird auf 250 ms definiert. Mit diesen Werten muss nun beispielsweise ein Knoten mit Verfahren 3 bei $\eta = 0,50$ 13 Messungen durchführen und zwischenspeichern, bis es zum Übertragungsprozess kommt ($13 * 4 \text{ Byte} = 52 \text{ Byte} > 50 \text{ Byte}$). Die Verzögerungszeit der Datensätze in der Senke beträgt nach diesem vereinfachten Modell für das Beispiel $13 * 250\text{ms} = 3,25\text{s}$. Tabelle 8.4 fasst die daraus ermittelten Energieeffizienzwerte entsprechend der beiden Kostenfunktionen zusammen.

	Energieeffizienz $\phi(k_1)$	Verzögerung	Energieeffizienz $\phi(k_2)$
Verfahren 1	62,02 %	0,25 s	42,16 %
Verfahren 2	70,18 %	0,25 s	51,23 %
Verfahren 3, $\eta = 0,25$	82,30 %	1,75 s	22,88 %
Verfahren 3, $\eta = 0,5$	79,21 %	3,25 s	11,57 %
Verfahren 3, $\eta = 0,75$	79,21 %	4,75 s	8,22 %
Verfahren 3, $\eta = 1$	83,86 %	6,25 s	8,49 %

Tabelle 8.4: Energieeffizienzwerte ϕ anhand der beiden Kostenfunktionen k_1 und k_2 .

Bei der Analyse der Ergebnisse ist festzustellen, dass bei Vernachlässigung von Verzögerungszeiten Verfahren 3 mit $\eta = 0,25$ die besten Energieeffizienzwerte liefert. Im Gegensatz dazu empfiehlt sich Verfahren 2 bei zeitkritischen Anwendungen und bietet einen guten Kompromiss zwischen Verzögerungszeiten und Energiebedarf.

In den Messungen wurden teils vereinfachte Rahmenbedingungen angenommen. So wird die Größe jedes Messwertdatensatzes relativ klein vordefiniert. Zudem ist jeder Datensatz für die Funkübertragung bei Bedarf teilbar. Nur so konnten die einzelnen Datenpakete je nach Verfahren energetisch optimal gefüllt werden. In der Realität ist dies unter Umständen nicht gegeben, wodurch sich dann Verschlechterungen der Ergebnisse für die Verfahren 2 und 3 ergeben. Weitere vereinfachte Annahmen betreffen die konstant vordefinierten Zeitwerte für die Datenverarbeitungs- und Kommunikationsprozesse. Auch hier können die Ergebnisse verfälscht werden. Jedoch sind die resultierenden Ergebnisse und Aussagen übertragbar auf komplexere Systeme und stellen zumindest Bewertungsrichtlinien für weitere Entwicklungen im Bereich verteilt agierender, ressourcenbeschränkter Systeme dar.

8.3.2 Qualitative Einflüsse durch Datenaggregationsverfahren

In einer weiteren Testreihe sollen nun auf Basis einfacher Beispielszenarien qualitative Auswirkungen von Datenaggregationsverfahren auf das Kommunikationsverhalten diskutiert werden. Dazu wurden bewusst kleine Topologien gewählt, da die auftretenden Reaktionen, speziell in schmalbandigen Kommunikationsnetzen, hier bereits beobachtet sind. Das in der Simulation beobachtete Verhalten wird dabei mit einer Hardwarerealisierung verglichen.

Basierend auf den beiden Netzwerkstrukturen in Abbildung 8.21 wurde das Kommunikationsverhalten bezüglich durchschnittlicher Paketverlustrate und Übertragungsdauer untersucht [29, 30].

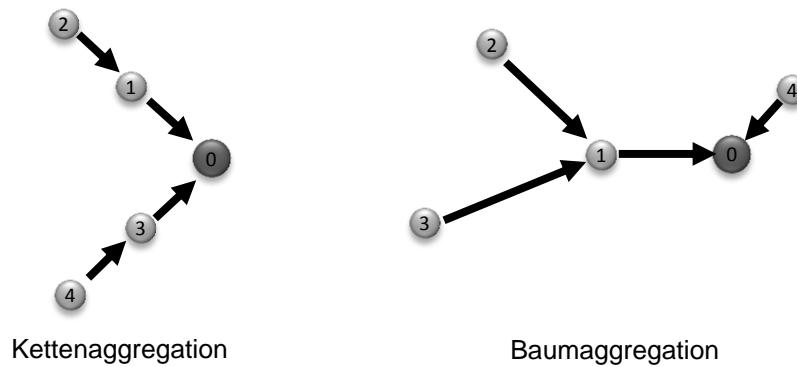


Abbildung 8.21: Darstellung der analysierten Messszenarien. Beide wurden sowohl in SimANet als auch auf PLANet umgesetzt.

Die Messreihen umfassen dabei ein Übertragungsszenario mit 10 Datensätzen pro Sekunde zu jeweils 20 Byte, die unkomprimiert in 10 einzelnen Paketen übertragen wurden. Bei der Aggregationsmessreihe wurden die Datensätze auf Knotenebene zusammengefasst und in 2 vollen Datenpaketen zu je 100 Byte versendet. In den inneren Knoten erfolgt zusätzlich eine Verschmelzung aller empfangenen Nutzdatensätze zu einem Mittelwert, wodurch die Datenlast im Netzwerk konstant bleibt. In der ersten Messung wächst im Gegensatz dazu die Datenlast mit steigender Knotenanzahl rapide an. Die gesamte Messdauer beträgt 50 Sekunden und jede Messreihe wurde 10 mal wiederholt, um so Messabweichungen auszugleichen.

Als Simulationsumgebung für die Messreihen kam SimANet zum Einsatz. Aufgrund der dort verwendeten, vereinfachten Kommunikations- und Energiemodelle stellen die gewonnenen Erkenntnisse nur grobe Anhaltspunkte für das Kommunikationsverhalten unter Realbedingungen dar. Daher erfolgte parallel eine Hardwareumsetzung mit Hilfe der PLANet Hardware. Hier konnte das beobachtete Verhalten aus der Simulation evaluiert werden. In der PLANet Topologie kam das IEEE 802.15.4 kompatible XBee Funkmodul zum Einsatz. Hier ist eine maximale theoretische Datenrate von 250 kbps bei einem Nutzdatenvolumen von 100 Byte pro Datenpaket gegeben. Alle Kommunikationsrouten wurden vorkonfiguriert. Demnach beschränkten sich die Beobachtungen auf die Kommunikationsprozesse zur Nutzdatenübertragung an die Datensenke. Abbildung 8.22 zeigt eine Auswahl gemessener Ergebnisse in Simulation und Hardwarerealisierung [30].

In den Messungen treten bei der Baumstruktur deutlich höhere Paketverlustraten auf als bei der Kettenaggregation. Dies deutet auf Lastspitzen in Knoten 1, der ohne Aggregation die Datenlast von 3 Knoten übertragen muss (sich selbst sowie Knoten 2 und 3). Bei der durchschnittlich gemessenen Paketverlustrate zeigen Simulation und Hardwareumsetzung ähnlich Werte. Etwas anders ist das Ergebnis beim Vergleich der Übertragungszeiten. In der Simulation zeigen sich hier gleiche Werte für beide Topologien. Auf der Demonstratorplattform ist die Übertragungszeit in der Baumtopologie deutlich höher als bei der Kettentopologie. Die erhöhten Zeiten sind unter anderem auf mangelnde Kommunikationskapazitäten in den Knoten und den damit einhergehenden Pufferüberläufen zurückzuführen. Ist die Netzwerkschnittstelle nicht in der Lage alle Daten zu verarbeiten, werden ankommende Pakete verworfen und müssen erneut übertragen werden, was zu erhöhten Übertragungszeiten führt [30].

8 Fallstudien & Analyse

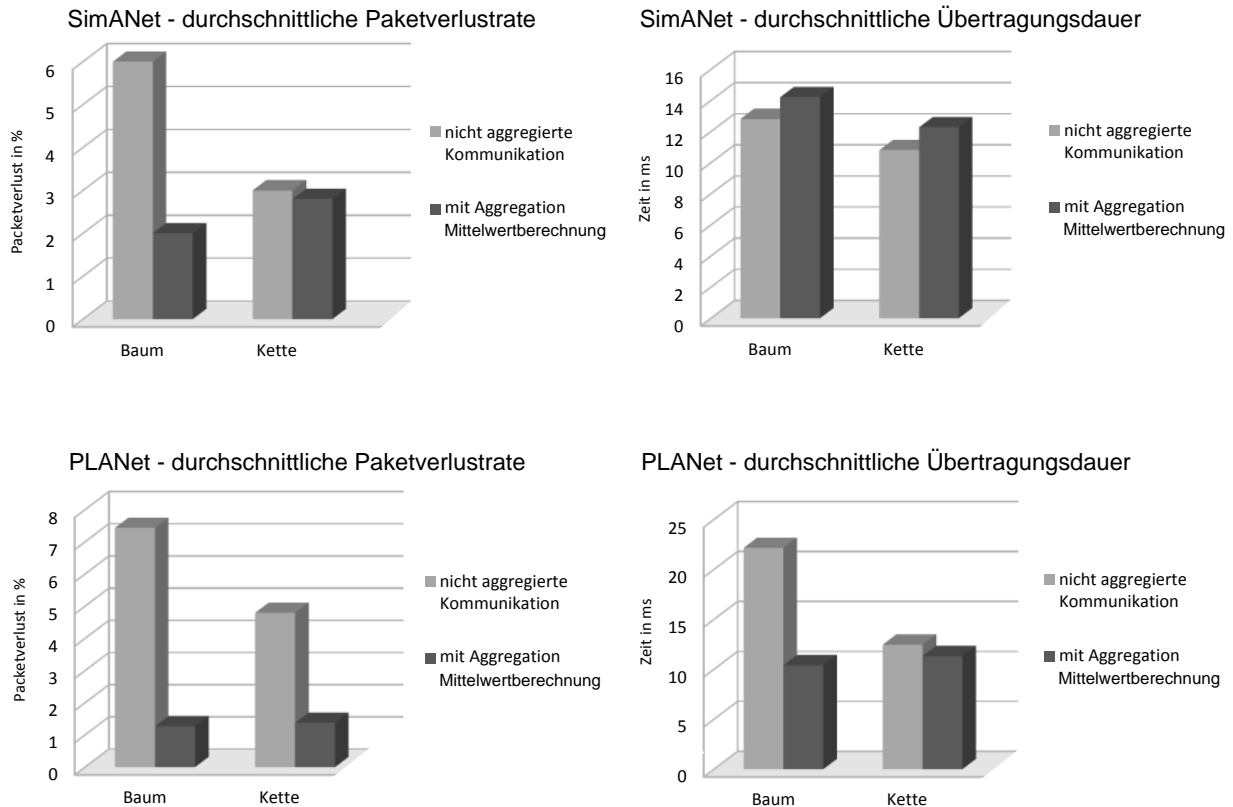


Abbildung 8.22: Messergebnisse mit und ohne Datenaggregation in SimANet (*oben*) sowie in der PLANet Umsetzung (*unten*).

Auf beiden Plattformen konnten die Vorteile und Einschränkungen klassischer Aggregationsverfahren verdeutlicht werden. So sinkt durch die starke Reduzierung der Datenmenge die Paketverlustrate jeweils deutlich. Je schmalbandiger die Kommunikationsinfrastruktur dabei ist, desto wichtiger wird dieser konzeptionelle Vorteil von Aggregations- und Fusionsverfahren. Gleichzeitig kann sich aber auch die Übertragungsdauer im Netz durch die entsprechenden Datenvorverarbeitungsprozesse erhöhen. Bei der einfachen Mittelwertberechnung und der geringen Knotendichte im Beispiel ergeben sich nur minimale Auswirkungen, die nur in der Simulation erkennbar sind. Auf der Hardwareplattform überwiegen die Vorteile durch das geringe Datenvolumen. Werden jedoch komplexere Verarbeitungsschritte zur Datenvorverarbeitung implementiert oder steigt die Anzahl der Knoten an (und damit die zu verarbeitende Datenmenge), so können die Auswirkungen auf die Übertragungszeit deutlich stärker in den Vordergrund treten. Dies hat gleichzeitig Einfluss auf den Energiebedarf auf Knotenebene, auch wenn dieser eher selten mit dem zur Kommunikation nötigen Energieaufwand vergleichbar sein wird.

Zusätzlich muss aus Sicht des Entwicklers der Informationsverlust durch die Aggregationsverfahren berücksichtigt werden. So sind die ursprünglichen Datensätze und deren räumliche Zuordnung nur noch stark eingeschränkt nachvollziehbar. Wird ausschließlich eine Datenbündelung betrachtet, die als Ziel nur die effiziente Ausnutzung der maximalen Paketgröße eines gegebenen Funkstandards verfolgt, so bleibt die volle

Informationsqualität weiterhin erhalten. Allerdings ist dann mit deutlich kleineren Verbesserungen im Kommunikationsverhalten zu rechnen (siehe Testreihe 1 Abschnitt 8.3.1).

Alternativ wurde in dieser Messreihe eine weitere Strategie zur Verbesserung des Kommunikationsverhaltens in ressourcenbeschränkten, schmalbandigen Netzwerkstrukturen evaluiert. Mit Hilfe eines klassischen Tokenverfahrens soll dabei die Fairness bei der Kommunikation ohne Datenaggregation erhöht werden [29]. Jeder Knoten erhält dabei ein zugesichertes Zeitfenster, in dem er exklusiv seine Daten übertragen kann. Die entsprechende Implementierung der Tokenstrategie ist in Abbildung 8.23 schematisch abgebildet.

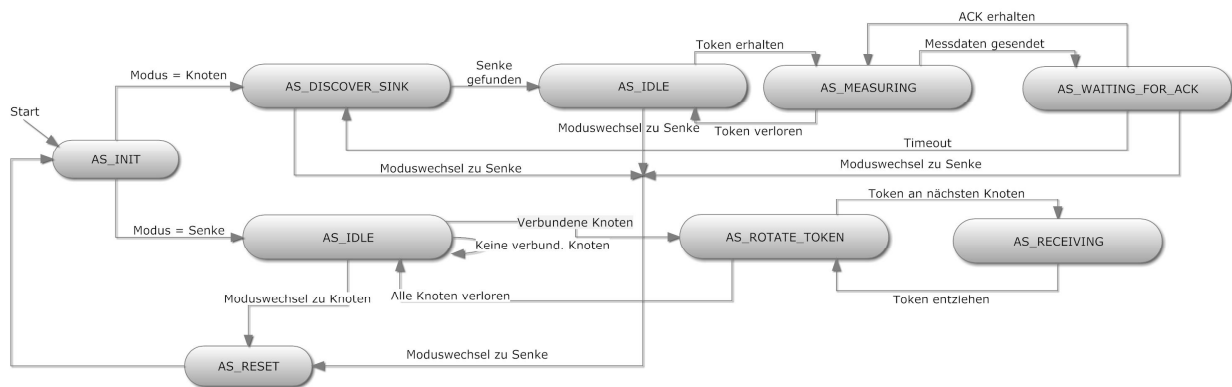


Abbildung 8.23: Umsetzung der Tokenstrategie für die PLANet Plattform.

Eine konkrete Quantifizierung wurde durch einfaches, applikationsseitiges Zählen gesendeter und empfangener Datenpakete während der Messdauer von 50 Sekunden (bei 10 Datensätzen pro Sekunde) realisiert. Da die verwendeten XBee Funkmodule erfolgreich und fehlerfrei übertragene Paketes auf Hardwareebene bestätigen, ist diese Methode hinreichend für konkrete Aussagen zur Effektivität. Die nachfolgende Abbildung 8.24 zeigt beispielhaft einige Vergleichsmessungen in der Baumtopologie ohne sowie mit integriertem Tokenverfahren auf SimANet und PLANet [42].

Bei beiden Messreihen zeigen sich ohne Token klare Vorteile für Knoten 4, der ohne Zwischenstation direkt mit der Senke kommunizieren kann. Alle anderen Knoten weisen deutlich weniger erfolgreich übertragene Pakete auf. Mit Token ergibt sich eine deutlich bessere Situation. Alle Knoten können einen Großteil ihrer Pakete erfolgreich an die Senke übertragen. Jedoch muss dabei die Tokendauer beachtet werden. Die hier definierten 1000 ms sind nicht in jedem Szenario sinnvoll. Bei zu langer Zeitspanne können Datenpuffer anderer Knoten überlaufen. Zudem treten stark erhöhte Latenzen auf. Bei zu kurz gewählter Tokenverweildauer ergeben sich unter Umständen Probleme für den Datenrückstrom zur Bestätigung der Pakete. In Folge dessen müssen dann Teile der Nutzdaten erneut übertragen werden. Aus energetischer Sicht ist die Weiterleitung des Tokens mit zusätzlichem Kommunikationsaufwand verbunden.

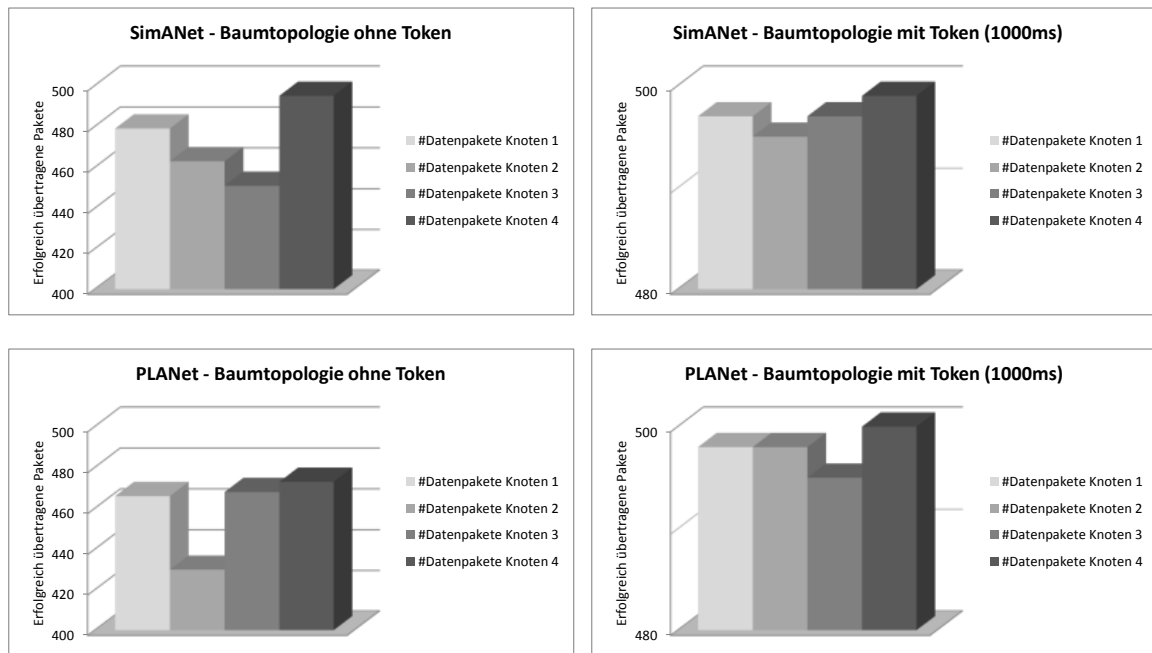


Abbildung 8.24: Messergebnisse ohne und mit Tokenverfahren. Simulation auf Basis von SimANet *oben* und PLANet-basierte Demonstratorumsetzung *unten*

In [30] und [29] wurde die Datenaggregation in ressourcenbeschränkten, drahtlosen Kommunikationsumgebungen umfassend diskutiert. Dabei konnten besonders die Unterschiede zwischen theoretischen Betrachtungen auf Konzeptseite und praktischen Erfahrungen aus real implementierten Testumgebungen deutlich gemacht werden.

8.3.3 Schlussfolgerungen

Ausgehend von den Ergebnissen in dieser Fallstudie ist der Einsatz von Optimierungsverfahren auf Datenmanagementebene sinnvoll und notwendig. Dies trifft besonders für die Kommunikation in schmalbandigen und ressourcenbeschränkten Systemen zu. Die Auswahl geeigneter Strategien kann jedoch stark variieren. Datenaggregationsverfahren bieten gute Möglichkeiten im Zuge einer Lastreduzierung. Aber auch klassische Tokenverfahren können eine Alternative darstellen, um das Kommunikationsverhalten zu verbessern. Das Kommunikationsverhalten in den einfachen Messszenarien zeigt aber auch, welche Einschränkungen sich durch Low-Power-Funktechnologien und deren begrenzte Übertragungskapazitäten ergeben. Zur Umsetzung großer Topologien energieautarker, eingebetteter Systeme sind hier effiziente Kommunikationsprozesse essentiell.

Bei den Betrachtungen hinsichtlich der Energieeffizienz zeigen sich starke Abhängigkeiten der ermittelten Werte von der verwendeten Kostenfunktion. Entwickler müssen demnach sehr genau entscheiden, wie sich Verzögerungszeiten auf das Systemverhalten auswirken und wie stark erhöhte Latenzen die Informationsqualität beeinflussen.

8.4 Fallstudie 3 - Energieeffizienzbetrachtung bei stufenweiser Integration

Um die stufenweise Integration mehrerer Optimierungsstufen an einem praktischen Anwendungsbeispiel zu analysieren, wurde im Kontext effizienter Gebäudeautomatisierungssysteme die nachfolgende Kommunikationsinfrastruktur in Abbildung 8.25 genutzt. Als heterogenes Sensor-Aktor-Netzwerk lassen sich hier die Vor- und Nachteile der einzelnen Ansätze bewerten. Gleichzeitig soll auf dieser Basis eine energetische Bewertung des gesamten Verbundes erfolgen.

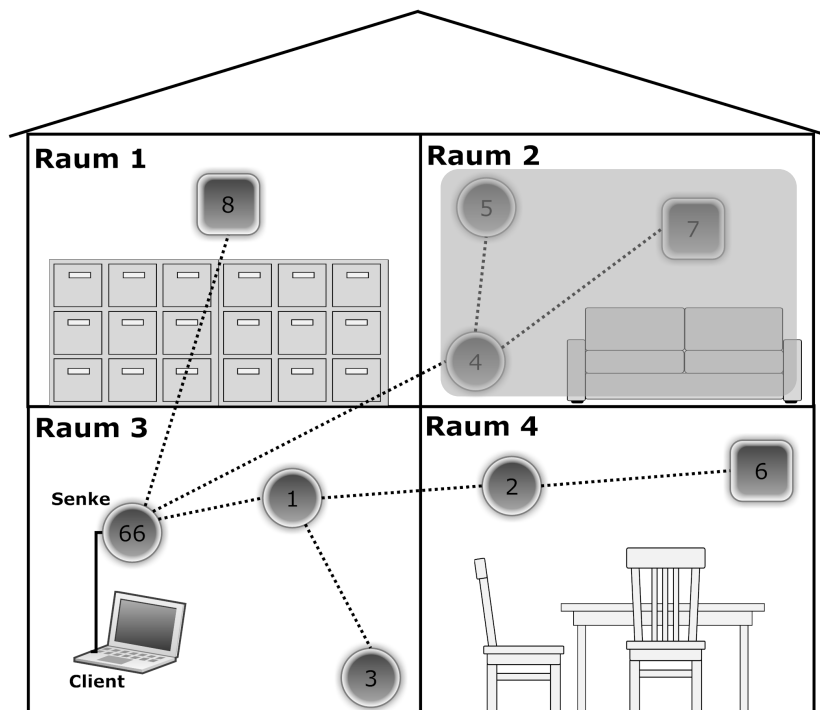


Abbildung 8.25: Anwendungsszenario im Bereich der Gebäudeautomatisierung. Die verschiedenen Sensorplattformen erfüllen jeweils spezifische Mess- und Steuerungsaufgaben an Schlüsselpositionen im Gebäude. Die nanett Hardware wird durch *Quadrate* dargestellt, PLANet Boards durch *Kreise*.

Als konkretes Fallbeispiel soll die Ermittlung der Durchschnittstemperatur in Raum 2 dienen. Ähnlich der WuRx Fallstudien wird die Datenverarbeitungs- und Kommunikationszeit zwischen zwei Knoten auf 1 Sekunde festgesetzt. Ein Messdatensatz enthält vier Werte für die *Knoten-ID*, die *Temperatur*, die *Etage* und den *Raum*. Pro Datenwert sind 4 Bytes reserviert, was eine Gesamtgröße des Datensatzes von 16 Bytes ergibt.

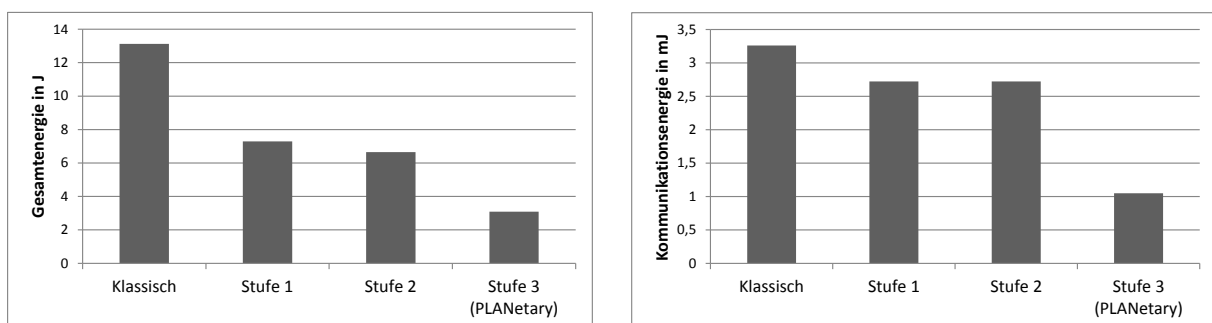
Als Referenzmessung dient die einfache Übertragung eines kompletten Datensatzes von einem Knoten zur Senke ohne zusätzliche Datenaggregationsformen. Zwischenknoten leiten die Datenpakete direkt in Richtung Senke weiter. Der Kommunikationsgraph wurde mittels WRTA optimiert und alle Knoten besitzen eine entsprechend vollständige Routingkonfiguration.

Nun erfolgt die sukzessive Anwendung mehrerer Optimierungsstrategien. Jede Stufe schließt die vorangegangenen Verfahren mit ein. In einer 1. Optimierungsstufe verwenden die Knoten nun das *Aggregationsverfahren 2* aus Abschnitt 8.3.1. Dabei fassen alle Knoten die Messwerte ihrer Nachbarschaft zusammen, bevor diese gebündelt in Richtung Senke weitergeleitet werden. Alle Sensorknoten sind dabei kontinuierlich in einem aktiven Modus.

Bei Anwendung der 2. Optimierungsstufe kommt die Integration der WuRx Technologie hinzu. Alle Sensorknoten befinden sich somit zu Beginn des Messszenarios im Energiesparmodus mit inaktivem Haupttransceiver. Die netzwerkseitige Empfangsbereitschaft wird durch den WuRx (μ RX1080) sichergestellt. Ausgehend vom jeweiligen Knoten werden die Messdaten nach einem Wake-Up-Signal in Richtung Senke übertragen. Jeder Zwischenknoten fasst die Datensätze entsprechend Optimierungsstufe 1 zusammen und leitet die Daten anschließend weiter. Sobald die Messwerte bei der Datensenke eintreffen, kann davon ausgegangen werden, dass alle Knoten in der Topologie aktiv sind.

In der Referenzmessung sowie in den beiden bereits beschriebenen Verfahren erfolgt die Mittelwertbildung für die Temperatur erst in der Datensenke. Das Sensornetz verfügt über keinerlei Informationen über den Verwendungszweck der Datensätze. In einer weiteren Optimierungsstufe 3 wird nun zusätzlich das datenbankorientierte Aggregations- und Fusionsverfahren *PLANetary* [43] eingesetzt (siehe Kapitel 5.3.3). Hier wird zunächst eine Anfrage von der Datensenke in die Topologie propagiert. Die entsprechenden Knoten werden per Wake-Up-Signal aktiviert. Anschließend erfolgt die Aggregation der Ergebnismenge, bei der die Werte entsprechend der Anfrage bereits individuell vorverarbeitet werden können. So wird hier immer nur ein lokal vorberechneter Datensatz mit Durchschnittswerten übertragen. Beim Empfang der Nachricht in der Senke liegt bereits das Endergebnis vor. In der 3. Optimierungsstufe sind demnach nur maximal 4 Knoten gleichzeitig aktiviert (Datensenke, Knoten 4, Knoten 5 sowie Knoten 7). Die restliche Topologie verweilt den gesamten Zeitraum in einem Energiesparmodus.

Auf Basis der spezifizierten Leistungsaufnahmen für das PLANet und nanett Board sowie den Energieverbrauchswerten für die Kommunikation (siehe Abschnitt 8.1) wurden analog zu den vorherigen Fallstudien die Gesamtenergieverbrauchswerte ermittelt. Diagramm 8.26 zeigt die Ergebniswerte in einer Übersicht [43][1].



(a) Insgesamt benötigte Energie.

(b) Zur Kommunikation benötigte Energie.

Abbildung 8.26: Testergebnisse Energiebedarf.

Aus den Werten wird deutlich, dass sich jede Optimierungsstufe positiv auf den Energieverbrauch auswirkt. Beim Vergleich mit der Referenzmessung zeigt Optimierungsstufe 3 eine Reduzierung des Energiebedarfs auf weniger als ein Sechstel des Ursprungswertes. Auf den PLANet Boards ergibt sich ein Großteil des Einsparungspotentials durch die geschickte Nutzung der WuRx Komponente. In Hinblick auf den Gesamtenergieverbrauch für die Kommunikation bietet das datenbankorientierte Aggregationsverfahren PLANetary enormes Optimierungspotential. Dies gilt jedoch nur unter der Annahme, dass selektive Abfragen von Datensätzen applikationsseitig umsetzbar sind.

Das Diagramm zeigt auch die benötigte Energie der Funkmodule zur Übertragung der Nutzdaten. Hier spielen kontextabhängige Aggregationsstrategien wie PLANetary ihre konzeptionellen Vorteile in vollem Umfang aus. Da nur benötigte Messdaten übertragen werden, bleibt die Gesamtanzahl der Datenpakete im Netzwerk niedrig und es ergibt sich ein geringer Wert für die mittlere Energie pro Paket.

Zur Bestimmung der Energieeffizienz ϕ dient die bereits vorgestellte Kostenfunktion k , welche sich auf die Gesamtenergieverbrauchswerte des verteilten Systems stützt:

$$k(E_{\text{ges}}) = 1 + E_{\text{ges}}$$

Tabelle 8.5 zeigt die aus dem Energieeffizienzmodell (Kapitel 2.4) resultierenden Werte.

	Energieverbrauch E in J	Energieeffizienz ϕ
Referenzmessung	20,42	30,60 %
1. Optimierungsstufe	11,67	43,55 %
2. Optimierungsstufe	8,43	51,62 %
3. Optimierungsstufe	3,09	74,47 %

Tabelle 8.5: Energieeffizienzwerte für die jeweiligen Optimierungsstufen.

In der Auswertung der Ergebnisse wird zum einen deutlich, wie stark der Gesamtenergieverbrauch in den betrachteten Anwendungsbereichen von den Kommunikationsprozessen abhängig ist. Zum anderen zeigt sich aber auch, wie signifikant dieser Energiebedarf durch den sinnvoll kombinierten Einsatz effizienter Konzepte, Technologien und Protokolle reduziert werden kann.

Die für die Energieeffizienz zugrundeliegenden Energieverbrauchswerte gehen dabei von konstanten Datenraten und konstanten Energiemengen pro übertragenem Paket aus. Unter Realweltbedingungen ergeben sich hier natürlich Schwankungen durch äußere Faktoren und gegenseitige Störeinflüsse. Auch die Werte für den Kommunikationsoverhead bei der Funkübertragung wurden konstant definiert. Diese Parameter unterliegen in der Realität ebenfalls gewissen Schwankungen, welche im Rahmen der durchgeführten Testszenarien vernachlässigt wurden. Keiner dieser variablen Einflussgrößen hätte mit den zur Verfügung stehenden Werkzeugen hinreichend genau untersucht werden können. Auch die verwendeten

Simulationsumgebungen beinhalteten keine präzisen Modelle, um entsprechende Testreihen durchzuführen. Die genannten Störparameter haben jedoch nur geringen Einfluss auf die Gültigkeit der in der Analyse getroffenen, relativen Aussagen. Da in den einzelnen Messreihen von gleichen Rahmenbedingungen ausgegangen wurde, behalten die Verhältnisse der Ergebnisse zueinander weiterhin ihre Aussagekraft.

8.4.1 Schlussfolgerungen

In dieser Fallstudie wurde der kombinierte Einsatz unterschiedlicher Optimierungsstrategien strukturiert untersucht und analysiert. Auf Basis der Ergebnisse konnte gezeigt werden, dass ein kombinierter Einsatz asynchroner Kommunikationskonzepte, zusätzlicher WuRx Komponenten und innovativer Datenaggregationsverfahren in einer energieeffizienten Gesamtarchitektur realisiert werden kann. Die Testszenarien verdeutlichen auch, dass sich mehrere Optimierungsverfahren bei entsprechender Parametrisierung nicht zwingend gegenseitig behindern und sehr gut im Kontext verteilt agierender, eingebetteter Systeme integrierbar sind. Eine anwendungsspezifische Anpassung der Kommunikationsprozesse ermöglicht dabei eine Reduzierung der Datenmenge im Netzwerk, zeitliche Vorteile durch die lokale, kontextabhängige Datenvorverarbeitung sowie die direkte Schonung von Energieressourcen durch Abschaltung nicht benötigter Hardwarekomponenten.

Diese Aussagen treffen jedoch nicht für jedes Anwendungsszenario im gleichen Umfang zu. Die durchgeführten Testreihen besitzen eine sehr spezifische und keinesfalls allgemeingültige Charakteristik bezüglich ihres Kommunikations- und Laufzeitverhaltens. Auch die Auswahl der Verfahren und Optimierungsansätze beschränkte sich auf einige wenige, ausgewählte Vertreter aus der großen Menge der vorgestellten Themenkomplexe. Dementsprechend sind auch die daraus gewonnenen Aussagen keinesfalls allgemein anwendbar. Die umgesetzten Szenarien sollen vielmehr die Wichtigkeit eines anwendungsspezifischen Integrationsprozesses deutlich machen, aus dem eine energieeffiziente Gesamtarchitektur entsteht.

8.5 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden unterschiedliche Fallstudien präsentiert, in denen die Themenkomplexe der vorangegangenen Kapitel anhand konkreter Anwendungsszenarien umgesetzt und analysiert werden können. Dabei gingen sowohl qualitative als auch quantitative Aussagen über die Umsetzbarkeit und Effizienz mehrerer, ausgewählter Optimierungsstrategien im Kontext verteilt agierender, eingebetteter Systemarchitekturen hervor.

In der ersten Fallstudie wurden hierzu asynchrone Kommunikationskonzepte und Wake-Up-Receiver Technologien betrachtet. Es erfolgte eine Analyse der maximal erreichbaren Systemlaufzeit für Single-Hop- und Multi-Hop-WuRx-Umgebungen. Zum Einsatz kamen dabei sowohl Simulationsumgebungen als auch Demonstratoren auf Basis unterschiedlicher Hardwareplattformen. Wesentliche Rahmenparameter für einen effizienten Einsatz von Wake-

Up-Reveivern und Mechanismen zu Datenpufferung wurden herausgearbeitet. Im weiteren Verlauf folgten konkrete Energieeffizienzbetrachtungen in einer heterogenen Netzwerktopologie mit beziehungsweise ohne WuRx-Komponenten unter geeigneten Randbedingungen und auf Grundlage gemessener Leistungswerte der Hardwareplattformen.

In einer zweiten Fallstudie wurden Optimierungsstrategien innerhalb des Datenmanagements untersucht. Hier standen zum einen qualitative Aussagen für klassische Aggregationsverfahren im Fokus der Betrachtungen. Des Weiteren erfolgte auch hier eine Energieeffizienzbetrachtung anhand eines komplexen Beispielszenarios. Mehrere Aggregationsstrategien konnten dabei hinsichtlich der Anzahl übertragener Datenpakete, der Gesamtübertragungszeit und des Kommunikationsoverheads verglichen werden. Zur Berechnung konkreter Effizienzwerte kamen zwei unterschiedliche Kostenfunktionen zum Einsatz, die einerseits Energieverbrauchswerte und andererseits auch Zeitaspekte einfließen lassen.

Abschließend erfolgte in der dritten Fallstudie die stufenweise Integration verschiedener Optimierungsstrategien auf Technologieebene sowie innerhalb des Netzwerk- und Datenmanagements. Es konnte gezeigt werden, dass ein kombinierter Einsatz der Verfahren zu erheblichen Verbesserungen in Bezug auf die Energieeffizienz führen kann, sofern eine sinnvoll gewählte, anwendungsspezifische Parametrisierung erfolgt.

9 Résumé & Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurden Kommunikationsprozesse in verteilten, eingebetteten Systemen unter dem Aspekt der Energieeffizienz betrachtet. Dabei standen besonders ressourcenbeschränkte Systemarchitekturen im Vordergrund, die energieautark über einen längeren Zeitraum agieren müssen. Sollen globale Zielstellungen in einem Netzwerkverbund gemeinsam und kooperativ erfüllt werden, so erfordert dies einen komplexen Informationsaustausch. Dabei binden die hierfür erforderlichen Kommunikationsprozesse einen erheblichen Anteil der zumeist stark begrenzten Energieressourcen.

Im Zuge einer energetischen Optimierung der Kommunikation bei gleichzeitiger Erfüllung aller funktionalen Anforderungen müssen dabei unterschiedliche Abstraktionsebenen und Perspektiven betrachtet werden. Hier bietet die Arbeit einen breiten Überblick über mögliche Konzepte, Technologien und Verfahren zur Steigerung der Energieeffizienz. Abbildung 9.1 zeigt dazu eine strukturierte Übersicht für die behandelten Themenkomplexe.

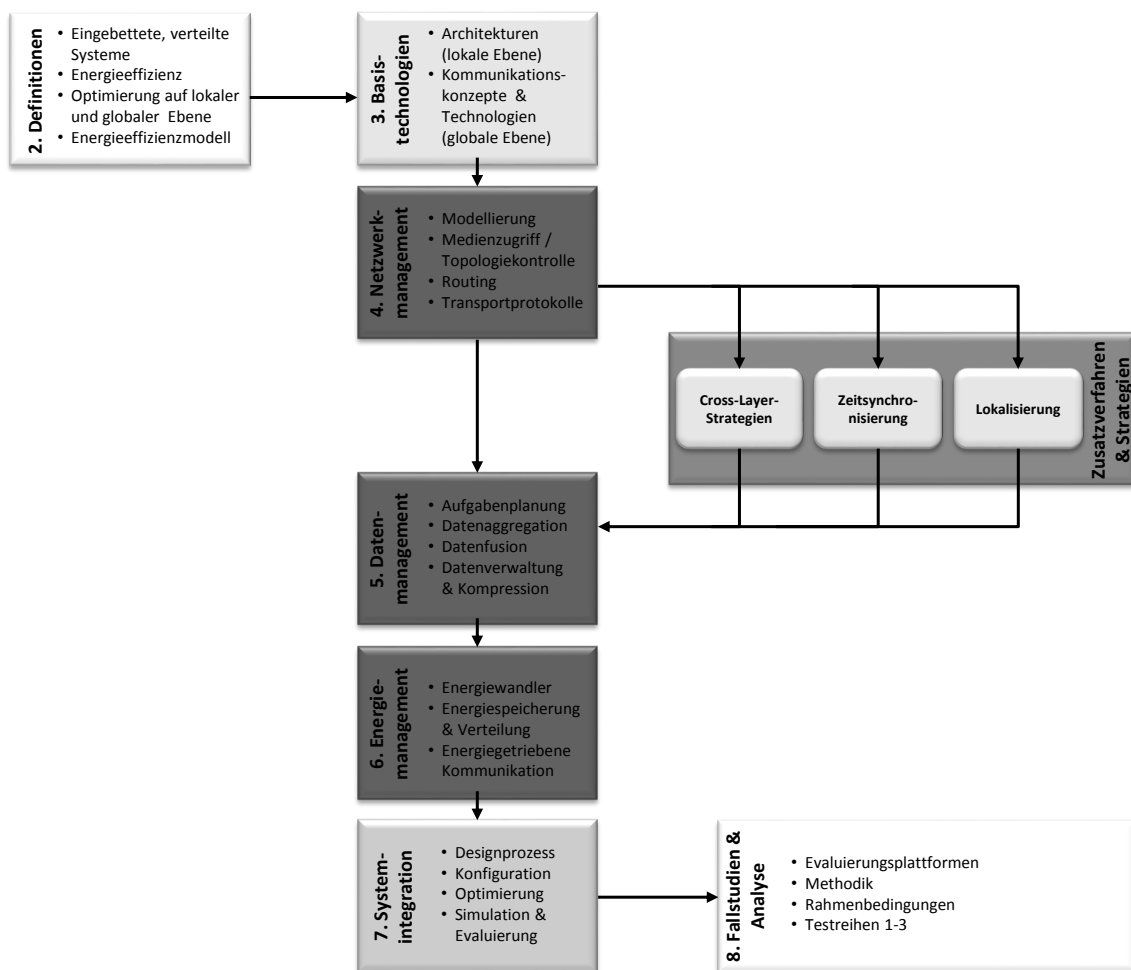


Abbildung 9.1: Thematische Strukturierung der Arbeit.

Zunächst wurden grundlegende Begriffe definiert und thematisch abgegrenzt. Dies umfasste speziell eingebettete, verteilte Systeme sowie Energieeffizienz und deren Optimierung. Ein Modell zur Quantifizierung der Energieeffizienz auf lokaler und globaler Ebene wurde vorgestellt.

Im weiteren Verlauf wurden unter dem Themenbereich *Basistechnologien & Konzepte* aktuelle Entwicklungen auf dem Gebiet drahtloser Ad Hoc Netzwerkstrukturen vorgestellt. Dies umfasst auch die entsprechenden Kommunikationsstandards sowie relevante Hardwareplattformen. Außerdem thematisierte das Kapitel Betriebssysteme und Middlewarearchitekturen für verteilt agierende, eingebettete Systeme. Anschließend wurden mögliche Anwendungsszenarien auf wissenschaftlicher und kommerzieller Ebene diskutiert. Im Fokus standen dabei auch die Problemstellungen und Herausforderung, die beim Technologietransfer mittelfristig behandelt werden müssen. Anschließend widmete sich das Kapitel der Selbstorganisation, selbstorganisierenden Konzepten sowie schwarmintelligenten Verhaltensweisen im Umfeld digitaltechnischer Systeme. Aus der Vielzahl vorhandener Definitionen konnte eine geeignete Definition herausgearbeitet werden, die eine konkrete Umsetzung in verteilt agierenden, eingebetteten Systemen erlaubt. Wake-Up-Receiver und die zugrundeliegenden Energiesparkkonzepte bildeten einen weiteren Themenschwerpunkt. Auch hier standen aktuelle Entwicklungen, Funktionsweise sowie Vor- und Nachteile im Fokus der Betrachtungen.

Energieeffiziente Systemarchitekturen wurden in den weiteren Teilen dieser Arbeit aus unterschiedlichen Perspektiven betrachtet und strukturiert vermittelt. Auf der Ebene des *Netzwerkmanagements* wurden zunächst alle hardware- und softwareseitigen Mechanismen zur Generierung sowie zur Aufrechterhaltung einer Netzwerkinfrastruktur zusammengefasst. Es erfolgte die Einordnung der Verfahren in die jeweiligen ISO/OSI Protokollstackebenen und eine Klassifizierung nach spezifischen Merkmalen. Neben Topologieoptimierungsverfahren und Routingprotokollen bildeten Zeitsynchronisationsverfahren sowie Lokalisierungsverfahren und Cross-Layer Konzepte weitere Schwerpunkte.

Aus Sicht des *Datenmanagements* erfolgte anschließend die Aufarbeitung der Themengebiete Datenaggregation und Datenfusion. Hier wurden klassische Verfahren, aber auch aktuelle Entwicklungen im Bereich datenbankorientierter Ansätze betrachtet. In Hinblick auf energieeffiziente Kommunikationsprozesse repräsentieren auch Datenverwaltung und Datenverteilung sowie die dynamische Aufgabenplanung wichtige Themen.

Das *Energiemanagement* stellt eine weitere Abstraktionsebene der Systemarchitektur dar. Hierbei richtete sich der Fokus auf entsprechende Managementkonzepte für eine effiziente Speicherung und Verteilung der verfügbaren Energieressourcen. In Verbindung mit den Energiespeichertechnologien wurden auch Energy-Harvester-Komponenten betrachtet, die zur Systemlaufzeit zusätzliche Energie aus der Umgebung wandeln können. Damit einhergehend erhöht sich die Komplexität entsprechender Energiemanagementkonzepte erheblich. Weiterführend wurden in diesem Zusammenhang energiegetriebene Kommunikationsparadigmen vorgestellt und diskutiert. Im Gegensatz zu konventionellen Ansätzen erfolgen hier Kommunikationsprozesse in Abhängigkeit von den aktuell verfügbaren Energieressourcen.

Die *Systemintegration* befasst sich im weiteren Verlauf der Arbeit mit der Generierung einer ganzheitlich optimierten Systemarchitektur. Dazu müssen die unterschiedlichen Abstraktionsebenen applikationsspezifisch kombiniert und konfiguriert werden. Es erfolgt eine gezielte Auswahl von Optimierungsstrategien, welche angepasste Kommunikationsparadigmen, Kommunikationstechnologien sowie Kommunikationsprotokolle umfassen.

In den folgenden *Fallstudien* wurden konkrete Optimierungsstrategien sowohl simulativ als auch auf Basis von Hardwareimplementierungen analysiert und diskutiert. Die umgesetzten Beispielszenarien beinhalteten dabei die Integration von WuRx Komponenten, die Anwendung von Datenaggregationsverfahren sowie den Übergang zu einer asynchronen, gebündelten Datenübertragung. Es konnten wesentliche Schlüsselparameter für den Einsatz einzelner Optimierungsansätze herausgearbeitet und bewertet werden. Die qualitativen und quantitativen Ergebnisse zeigen dabei das erhebliche Optimierungspotential bezüglich der Energieeffizienz sowie des Kommunikationsverhaltens.

9.1 Im Rahmen der Arbeit entwickelte Verfahren und Werkzeuge

Neben der strukturierten Vermittlung wichtiger Themenkomplexe im Bereich verteilter, eingebetteter Systeme wurden im Rahmen dieser Arbeit mehrere Konzepte, Verfahren und Werkzeuge entwickelt, welche nun noch einmal zusammenfassend präsentiert werden.

9.1.1 WRTA

WRTA stellt ein kombiniertes Routing- und Topologieoptimierungsverfahren für stark ressourcenbeschränkte, verteilt agierende Systeme dar. Es wurde im Kontext des nanett Projektes speziell für den Einsatz in WSN / SANET Langzeitapplikation angepasst und ermöglicht die Berechnung eines global optimierten Kommunikationsgraphen [35][274]. Die wesentliche Zielstellung des Verfahrens ist die Ressourcenschonung der energieautarken Netzwerkknoten. Durch die Minimierung aufwendiger Kommunikationsprozesse zur Routensuche und Routenoptimierung kann die Systemlaufzeit entsprechend verlängert werden.

9.1.2 RMU

Die RMU stellt ein erweitertes Ressourcenmanagementkonzept dar, welches als Cross-Layer Ansatz System- und Netzwerkinformationen von unterschiedlichen Abstraktionsebenen zusammenfasst [33, 34, 36]. Mit Hilfe dieser erweiterten Wissensbasis können Kommunikationsressourcen effizient verteilt und reorganisiert werden.

9.1.3 GREASE

GREASE ist ein umfassendes Datenverwaltungsframework im Bereich verteilter, eingebetteter Systeme [9–13]. Es repräsentiert dabei ein flexibles Werkzeug zur ganzheitlichen Erfassung, Verarbeitung, Aufbereitung und Visualisierung von Sensordaten. Gleichzeitig wird GREASE im Rahmen dieser Arbeit als Konfigurations- und Monitoring-Tool für unterschiedliche WSN /SANET Messszenarien auf Basis der PLANet und nanett Evaluationshardware genutzt.

9.1.4 PLANetary

PLANetary ist ein datenbankorientiertes In-Netzwerk-Verfahren im Kontext der Datenaggregation und Datenfusion [1][42, 43], welches plattformübergreifend auf unterschiedlichen eingebetteten Hardwarearchitekturen eingesetzt werden kann. Aufgrund der flexiblen Mechanismen zur Datenabfrage und Datenvorverarbeitung kann das zu übertragende Datenvolumen reduziert werden. PLANetary bietet im Vergleich zu klassischen Aggregationsverfahren ein deutlich höheres Optimierungspotential für die Energieeffizienz von Kommunikationsprozessen.

9.1.5 CE-TimeSync

Neben der Betrachtung von asynchronen Kommunikationsparadigmen wurde mit CE-TimeSync ein hardwareplattformunabhängiges Zeitsynchronisationsverfahren entwickelt, welches ausschließlich auf Applikationsebene arbeitet [24, 32]. Es bietet mit einer Zeitabweichung von wenigen Millisekunden eine hinreichende Genauigkeit für den Großteil relevanter WSN / SANET Applikationen und bindet minimale Ressourcen auf den einzelnen Knoten.

9.1.6 Weiterentwicklungen & Optimierungen

Neben neu entwickelten Konzepten und Werkzeugen wurden bereits bestehende Projekte im Rahmen dieser Arbeit weiterentwickelt. Dies betrifft vor allem die Simulationsumgebung SimANet, welche für die durchgeführten Fallstudien erheblich erweitert werden musste. Dies umfasst den Kommunikationsstack, die Modellierung der Netzwerkschnittstellen und Hardwarekomponenten sowie Optimierungen im Verarbeitungskern [37–39].

Die genutzten Evaluationsplattformen PLANet und nanett wurden um die WuRx Funktionalitäten erweitert. Dies hatte wiederum umfangreiche Anpassungen der Laufzeitumgebung zur Folge. Für die einzelnen Messszenarien erfolgte die Umsetzung entsprechender Softwareanwendungen sowie die spezifische Anpassung der Monitoring-Tools.

9.2 **Ausblick**

Die vorliegende Arbeit vermittelt ein breites Wissensspektrum aktueller Forschungsbereiche im Kontext verteilter, eingebetteter Systeme. Jeder einzelne Bereich bietet unzählige Ansatzpunkte für weitere Betrachtungen.

In Hinblick auf die Basistechnologien betrifft dies z.B. VANETs. Mittelfristig ergeben sich mit C2C und C2X Kommunikation vielfältige Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, die in Kooperation mit den Automobilherstellern anzustreben sind. Auch die vorgestellten Wake-Up-Receiver-Konzepte bieten ein erhebliches Potential für innovative Produkte. Hier bieten sich ebenfalls Entwicklungsprojekte mit Industriepartnern an, um die Technologien in naher Zukunft für den Endverbraucher zugänglich zu machen. Aus rein akademischer Sicht ist z.B. die technische Umsetzung einfacher selbstorganisierender Konzepte nach der herausgearbeiteten Definition vielversprechend.

Auf der Ebene des Netzwerkmanagements eröffnen Cross-Layer Konzepte und entsprechende Middleware-Architekturen interessante Möglichkeiten. In der Literatur existieren hierzu sehr viele Ideen, jedoch gestaltet sich eine ganzheitliche Umsetzung weiterhin schwierig, da das klassische Schichtenmodell hierzu verworfen oder stark eingeschränkt werden muss.

Datenaggregations- und Fusionsverfahren bieten ebenfalls viele Möglichkeiten für weiterführende Arbeiten. Wesentliche Einflussgrößen für die Strategiewahl, wie z.B. die Topologiegröße, die räumliche Verteilung, verfügbare Speicher- und Kommunikationsressourcen sowie Anforderungen bezüglich der Verzögerungszeiten können hier näher untersucht werden. In weiterführenden Projekten ist außerdem die Analyse datenbankorientierter In-Netzwerk-Verfahren, speziell PLANetary, in groß skalierten Netzwerktopologien vielversprechend. Auch die Integration in C2X Konzepte ist vorstellbar.

Für energieautarke Systemarchitekturen und Langzeitapplikationen stellen energiegetriebene Kommunikationsparadigmen und hybride Energy-Harvesting Konzepte einen innovativen Forschungsbereich dar. In Hinblick auf mobile Systeme können dadurch die fest integrierten Energiespeicher kleiner dimensioniert werden, was sowohl aus ökologischer als auch aus ökonomischer Sicht sinnvoll erscheint.

Betrachtet man auf Systemebene den komplexen, stark applikationsspezifischen Konfigurationsprozess im Kontext energieeffizienter Kommunikationsprozesse, bieten sich auch hier vielfältige Ansatzpunkte für weitere Arbeiten. So können Konzepte zur automatisierten Auswahl geeigneter Kommunikationstechnologien und Protokolle entwickelt werden. Hierzu ist jedoch eine ganzheitliche Beschreibung des Systems mit allen funktionalen und nicht funktionalen Anforderungen zwingend nötig. Geeignete Methoden zur Systembeschreibung auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen und aus verschiedenen Perspektiven stellen folglich einen weiteren Themenkomplex dar.

Aber auch die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Hardware- und Softwareumgebungen bieten viele Möglichkeiten für weiterführende Forschungsprojekte. Dies umfasst die in SimANet verwendeten Modellierungen, die einzelnen Module im GREASE Framework, den Funktionsumfang von PLANetary, aber auch die Laufzeitumgebungen der PLANet und nanett Plattform.

Eigene Veröffentlichungen

- [1] BERGELT, René ; HARDT, Wolfram ; VODEL, Matthias: Verfahren zur Optimierung der Energieeffizienz in drahtlosen, energieautarken Sensornetzen. In: *Informatiksymposium Chemnitz - Chemnitzer Informatik-Berichte CSR-12-01*, TU Chemnitz, Fachbereich Informatik, July 2012. – ISSN 0947–5125, S. 3–14
- [2] BLOKZYL, Stephan ; VODEL, Matthias ; HARDT, Wolfram: A Hardware Accelerated Real-Time Image Processing Concept for High-Resolution EO Sensors. In: *Proceedings of the 61. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress*, Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt, September 2012. – URN: urn:nbn:de:101:1-201211239114
- [3] BORSCHBACH, Markus ; VODEL, Matthias ; LIPPE, Wolfram-M.: Evolutionary Optimized Ad Hoc Connectivity. In: *Proceedings of the IASTED International Conference on Communication and Computer Networks (CCN2006)*, ACTA Press, Oktober 2006. – ISBN 0–88986–630–9, S. 1–7
- [4] CASPAR, Mirko ; VODEL, Matthias ; HARDT, Wolfram: Automated Test Distribution Framework for Service Providing Systems. In: *Proceedings of the 4th Conference on Computing and Information Technology*, KMUTNB, May 2008. – ISBN 978–974–19–3296–2, S. 58–62
- [5] CASPAR, Mirko ; VODEL, Matthias ; HARDT, Wolfram: System Level Test of Service-based Systems by Automated and Dynamic Load Partitioning and Distribution. In: *Proceedings of the 10th International Conference on Innovative Internet Community Systems (I2CS)*, ACM Press, June 2010. – ISBN 978–3–88579–259–8, S. 30–40
- [6] VODEL, Matthias: *Topologieoptimierung in Mobilen Ad Hoc und Sensornetzwerken: Systematische Evaluierung und Vergleich dezentraler Algorithmen zur optimierten Vernetzung selbstorganisierender Systeme*. Vdm Verlag, 2008. – ISBN 978–3–639085–10–5
- [7] VODEL, Matthias: Interaktives Gebäudeleit- und Infotainmentsystem - RFID geht neue Wege / TU Chemnitz, Fachbereich Informatik. 2009 (MONARCH-2009-0). – Forschungsbericht. – ISSN 1868–3800. – GI - Regionalgruppe Chemnitz
- [8] VODEL, Matthias: *Funkstandardübergreifende Kommunikation in mobilen Ad Hoc Netzwerken*. Chemnitz, Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Informatik, Professur Technische Informatik, Diss., February 2010. – ISBN 978-3-941003-18-7
- [9] VODEL, Matthias ; BERGELT, René ; GLOCKNER, Matthias ; HARDT, Wolfram: Modulares Framework für die synchronisierte Erfassung, Verarbeitung und Aufbereitung heterogener Sensornetzdaten. In: *Proceedings of the Dresdner Arbeitstagung Schaltungs- und Systementwurf (DASS2010)*, Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen, May 2010. – ISBN 978–3–8396–0126–6, S. 67–72

- [10] VODEL, Matthias ; BERGELT, René ; GLOCKNER, Matthias ; HARDT, Wolfram: Synchronised Data Logging, Processing and Visualisation in Heterogeneous Sensor Networks. In: *Proceedings of the International Conference on Data Engineering and Internet Technology*, Springer, January 2012. – ISBN 978-3-642-28806-7, S. 1070-1074
- [11] VODEL, Matthias ; BERGELT, René ; HARDT, Wolfram: A Generic Data Processing Framework for Heterogeneous Sensor-Actor-Networks. In: *International Journal On Advances in Intelligent Systems* , Vol. 4 (2012), December. – ISSN 1942-2679
- [12] VODEL, Matthias ; BERGELT, René ; HARDT, Wolfram: Generische Datenerfassung und Aufbereitung im Kontext verteilter, heterogener Sensor-Aktor-Systeme. TU Chemnitz, August 2012 (CSR-12-03). – Forschungsbericht. – ISSN 0947-5125. – Fachbereich Informatik
- [13] VODEL, Matthias ; BERGELT, René ; HARDT, Wolfram: GREASE Framework - Generic Reconfigurable Evaluation and Aggregation of Sensor Data. In: *Proceedings of the 2nd International Conference on Smart Grids, Green Communications and IT Energy-aware Technologies (ENERGY2012 / InfoSys2012)*, IARIA, March 2012. – ISBN 978-1-61208-189-2
- [14] VODEL, Matthias ; BORSCHBACH, Markus: An Evolutionary Solution for Cross Layer Ad Hoc Connectivity Selection. In: *Proceedings of the ACM & IEEE Fifth Annual Communications Networks and Services Research Conference (CNSR2007)*, IEEE Computer Society, May 2007. – ISBN 0-7695-2835-X, S. 381-386
- [15] VODEL, Matthias ; CASPAR, Mirko ; HARDT, Wolfram: A Concept for Radio Standard Spanning Communication in Mobile Ad Hoc Networks / TU Chemnitz. 2007 (CSR-07-04). – Forschungsbericht. – ISSN 0947-5125. – In Chemnitzer Informatik Berichte
- [16] VODEL, Matthias ; CASPAR, Mirko ; HARDT, Wolfram: Energy-Balanced Cooperative Routing Approach for Radio Standard Spanning Mobile Ad Hoc Networks. In: *Proceedings of the 6th International Information and Telecommunication Technologies Symposium*, IEEE Region 9, December 2007. – ISBN 978-85-89264-08-X, S. 42-47
- [17] VODEL, Matthias ; CASPAR, Mirko ; HARDT, Wolfram: Performance Analysis of Radio Standard Spanning Communication in Mobile Ad Hoc Networks. In: *Proceedings of the 7th International Symposium on Communications and Information Technologies*, IEEE Computer Society, October 2007. – ISBN 978-1-4244-09, S. 848-853
- [18] VODEL, Matthias ; CASPAR, Mirko ; HARDT, Wolfram: EBCR - A Routing Approach for Radio Standard Spanning Mobile Ad Hoc Networks. In: *Proceedings of the 4th National Conference on Computing and Information Technology (NCCIT2008)*, KMUTNB, May 2008. – ISBN 978-974-19-3296-2, S. 57-58
- [19] VODEL, Matthias ; CASPAR, Mirko ; HARDT, Wolfram: Funkstandardintegration in Mobilien Ad-Hoc-Netzwerken. In: *GI/ITG - Workshop über Selbstorganisierende, Adaptive, Kontextsensitive verteilte Systeme (SAKS 2008)*, GI Gesellschaft für Informatik e.V., March 2008
- [20] VODEL, Matthias ; CASPAR, Mirko ; HARDT, Wolfram: A Capable, Lightweight Communication Concept by Combining Ambient Network Approaches with Cognitive Radio

- Aspects. In: *Proceedings of the 17th International Conference on Telecommunications (ICT2010)*, IEEE Computer Society, April 2010. – ISBN 978-1-4244-5247-7, S. 869–873
- [21] VODEL, Matthias ; CASPAR, Mirko ; HARDT, Wolfram: Embedded Ambient Networking - A New, Lightweight Communication Concept. In: *Proceedings of the 9th International Conference on Communications (ICC2010)*, IEEE Computer Society, May 2010. – ISBN 978-1-4244-6826-3
- [22] VODEL, Matthias ; CASPAR, Mirko ; HARDT, Wolfram: Critical Parameters for the Efficient Usage of Wake-Up-Receiver Technologies. In: *Proceedings of the International Conference on Computer Applications and Network Security (ICCANS2011)*, IEEE Computer Society, May 2011. – ISBN 978-1-4244-9764-5, S. 100–105
- [23] VODEL, Matthias ; CASPAR, Mirko ; HARDT, Wolfram: Wake-Up-Receiver Concepts - Capabilities and Limitations. In: *Journal of Networks* , Vol. 1 (2012), January, Nr. 1. – ISSN 1796–2056
- [24] VODEL, Matthias ; CASPAR, Mirko ; LIPPMANN, Mirko ; HARDT, Wolfram: Distributed High-Level Scheduling Concept for Synchronised, Wireless Sensor and Actuator Networks. In: *Journal of Communication and Computer* , Vol. 11 (2010), November, Nr. 7, S. 27–35. – ISSN 1548–7709
- [25] VODEL, Matthias ; HARDT, Wolfram: Interaktives Gebäudeleit- und Infotainment-System: Ein weg(e)weisendes Beispiel. In: *ISIS AutoID / RFID Spezial Edition* , Vol. 3 (2009), October, S. 160–161. ISBN 978-3-939336-45-7
- [26] VODEL, Matthias ; HARDT, Wolfram: Interaktives Gebäudeleit- und Infotainment-System: Anwendungsgebiete und Erweiterungsmöglichkeiten. In: *ISIS AutoID / RFID Spezial Edition* , Vol. 2 (2010), July, S. 147–149. ISBN 978-3-939336-51-8
- [27] VODEL, Matthias ; HARDT, Wolfram: Interaktives Gebäudeleit- und Infotainment-System: RFID geht neue Wege. In: *ISIS AutoID / RFID Spezial Edition* , Vol. 1 (2010), March, S. 158–159. ISBN 978-3-939336-48-8
- [28] VODEL, Matthias ; HARDT, Wolfram: Collaborate to Innovate - European Know-How for a More Sustainable Environment. In: *Science & Technology Journal* , Vol. 4 (2012), S. 90–91. – ISSN 2049–3177
- [29] VODEL, Matthias ; HARDT, Wolfram: Data Aggregation and Data Fusion Techniques in WSN/SANET Topologies - A Critical Discussion. In: *Proceedings of the TENCON'2012*, IEEE Computer Society, November 2012. – ISBN 978-1-4673-4822-5, S. 1–6
- [30] VODEL, Matthias ; HARDT, Wolfram: Data Aggregation in Resource-Limited Wireless Communication Environments - Differences Between Theory and Praxis. In: *Proceedings of the International Conference on Control, Automation and Information Sciences (ICCAIS2012)*, IEEE Computer Society, November 2012. – ISBN 978-1-4673-0810-6, S. 282–287
- [31] VODEL, Matthias ; HARDT, Wolfram: Thinking Smart, Thinking Green. In: *European Science and Technology Journal* , Vol. 15 (2012), July, S. 74–75. – ISSN 2045–3876

- [32] VODEL, Matthias ; LIPPMANN, Mirko ; CASPAR, Mirko ; HARDT, Wolfram: A Capable, High-Level Scheduling Concept for Application-Specific Wireless Sensor Networks. In: *Proceedings of the International Symposium on Information Technology (ITSIM2010)*, IEEE Computer Society, June 2010. – ISBN 978–1–4244–6717–4, S. 914–919
- [33] VODEL, Matthias ; LIPPMANN, Mirko ; HARDT, Wolfram: Dynamic Channel Management for Advanced, Energy-Efficient Sensor-Actor-Networks. In: *Proceedings of the World Congress on information and Communication Technologies (WICT2011)*, IEEE Computer Society, December 2011. – ISBN 978–1–4673–0125–1, S. 419–424
- [34] VODEL, Matthias ; LIPPMANN, Mirko ; HARDT, Wolfram: Resource Management for Advanced, Heterogeneous Sensor-Actor-Networks. In: *Proceedings of the 11th International Conference on Networks (ICN2012)*, IARIA, February 2012. – ISBN 978–1–61208–183–0
- [35] VODEL, Matthias ; LIPPMANN, Mirko ; HARDT, Wolfram: WRTA - Wake-Up-Receiver Optimised Routing and Topology Optimisation Approach. In: *Proceedings of the 12th International Conference on ITS Telecommunications (ITST2012)*, IEEE Computer Society, December 2012. – ISBN 978–1–4673–3069–5, S. 348–353
- [36] VODEL, Matthias ; LIPPMANN, Mirko ; HARDT, Wolfram: Resource Allocation and Resource Levelling in Heterogeneous SANET Environments. In: *International Journal of Computer Information Systems and Industrial Management Applications* , Vol. 3 (2013), January. – ISSN 2150–7988
- [37] VODEL, Matthias ; SAUPPE, Matthias ; CASPAR, Mirko ; HARDT, Wolfram: A Large Scalable, Distributed Simulation Framework for Radio Standard Spanning Mobile Ad Hoc Networks. In: *Proceedings of the 2008 International Symposium on Computer Science and Computational Technology (ISCST2008)*, IEEE Computer Society, December 2008. – ISBN 978–0–7695–3498–5
- [38] VODEL, Matthias ; SAUPPE, Matthias ; CASPAR, Mirko ; HARDT, Wolfram: A Large Scalable, Distributed Simulation Framework for Ambient Networks. In: *Recent Advances in Information Technology and Security - Journal of Communications (JCM - EI Compendex)* , Vol. 3 (2008), January, Nr. 7, S. 11–19. – ISSN 1796–2021
- [39] VODEL, Matthias ; SAUPPE, Matthias ; CASPAR, Mirko ; HARDT, Wolfram: The SimANet Framework. In: *Proceedings of the 1st International Conference on M4D: Mobile Communication Technology For Development (M4D)*, Karlstad University, December 2008. – ISBN 978–91–7063–222–8, S. 88–97
- [40] VODEL, Matthias ; SAUPPE, Matthias ; HARDT, Wolfram: Parallel High-Performance Applications with MPI2Java - A Capable Java Interface for MPI 2.0 Libraries. In: *Proceedings of the Asia-Pacific Conference on Communications (APCC2010)*, IEEE Computer Society, October 2010. – ISBN 978–1–4244–8127–9
- [41] VODEL, Matthias ; SCHNEIDER, Sven: Richtungsweisender Einsatz von RFID. In: *ISIS AutoID / RFID Spezial Edition* , Vol. 1 (2011), March, S. 181–183. ISBN 978–3–939336–58–7

Studentische Arbeiten

- [42] BERGELT, Rene: *Effiziente Datenaggregations- und Datenfusionsansätze auf Basis der PLANet Prototyp-Plattform*. Straße der Nationen 62, 09111 Chemnitz, Deutschland, Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Informatik, Professur Technische Informatik : November 2011
- [43] BERGELT, Rene: *Optimierungsverfahren zur Steigerung der Energieeffizienz in drahtlosen Kommunikationsszenarien*. Straße der Nationen 62, 09111 Chemnitz, Deutschland, Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Informatik, Professur Technische Informatik, Diplomarbeit, September 2012
- [44] KELLER, Matthias: *Untersuchungen drahtloser Ortungsverfahren in der Logistik*. Straße der Nationen 62, 09111 Chemnitz, Deutschland, Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Informatik, Professur Technische Informatik : Dezember 2012

Literaturverzeichnis

- [45] AGENCY, DARPA Defense Advanced Research P.: *WNaN - Wireless Network after Next*. <http://www.darpa.mil/sto/programs/wnan/index.html>, 2012. – [Online; abgerufen 01-März-2012]
- [46] AHN, H. ; PICARD, R.: Affective-Cognitive Learning and Decision Making: A Motivational Reward Framework for Affective Agents. In: *Affective Computing and Intelligent Interaction* , Vol. 3784 (2005), S. 866–873
- [47] AKKAYA, K. ; YOUNIS, M.: Energy-Aware Routing of Time-Constrained Traffic in Wireless Sensor Networks. In: *Journal of Communication Systems, Special Issue on Service Differentiation and QoS in Ad Hoc Networks* , Vol. 17 (2004), Nr. 6, S. 663–687. – ISSN 1074–5351
- [48] AKKAYA, K. ; YOUNIS, M.: A Survey on Routing Protocols for Wireless Sensor Networks. In: *Ad Hoc Networks* , Vol. 3 (2005), Nr. 3, S. 325–349. – ISSN 1570–8705
- [49] AKYILDIZ, I.F. ; SU, W. ; SANKARASUBRAMANIAM, Y. ; CAYIRCI, E.: Wireless Sensor Networks: A Survey. In: *Computer Networks* , Vol. 38 (2002), Nr. 4, S. 393–422. – ISSN 1389–1286
- [50] AKYILDIZ, I.F. ; SU, W. ; SANKARASUBRAMANIAM, Y. ; CAYIRCI, E.: Overview of Sensor Networks. In: *Computer Journal* , Vol. 4 (2004), S. 41–49. – ISSN 0018–9162
- [51] AKYILDIZ, I.F. ; VURAN, M.C.: *Wireless Sensor Networks*. John Wiley and Sons, 2010
- [52] AL., B. P.: Global Positioning System: Theory and Application. In: *Astronautics and Aeronautics* , Vol. 1 (1996), Nr. 163
- [53] AL-KARAKI, J.N. ; KAMAL, A.E.: Routing Techniques in Wireless Sensor Networks: A Survey. In: *IEEE Wireless Communications* , Vol. 11 (2004), Nr. 6, S. 6–28. – ISSN 1536–1284
- [54] ARORA, A. ; RAMNATH, R. ; ERTIN, E. ; SINHA, P. ; BAPAT, S. ; NAIK, V. ; KULATHUMANI, V. ; HONGWEI, Z. ; CAO, H. ; SRIDHARAN, M. ; KUMAR, S. ; SEDDON, N. ; ANDERSON, C. ; HERMAN, T. ; TRIVEDI, N. ; NESTERENKO, M. ; SHAH, R. ; KULKAMI, S. ; ARAMUGAM, M. ; WANG, L. ; GOUDA, M. ; CHOI, Y. ; CULLER, D. ; DUTTA, P. ; SHARP, C. ; TOLLE, G. ; GRIMMER, M. ; FERRIERA, B. ; PARKER, K.: ExScal: Elements of an Extreme Scale Wireless Sensor Network. In: *Proceedings of the 11th International Conference on Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications*, 2005. – ISSN 1533–2306, S. 102–108
- [55] ARSLAN, H. ; CHEN, Z.N. ; BENEDETTO, M.-G. D.: *Ultra Wideband Wireless Communication*. John Wiley & Sons - Wiley-Interscience, 2006. – ISBN 0471715212
- [56] ASAM KONSORTIUM: *Association for Standardisation of Automation and Measuring Systems*. <http://www.asam.net>, 2012. – [Online; abgerufen 04-Juli-2012]

- [57] AU-YONG, J.-H.: Comparison of On-Demand Mobile Ad Hoc Network Routing Protocols under On/Off Source Traffic Effect. In: *Proceedings of the IASTED International Conference Networks and Communication Systems*, IASTED, March 2006, S. 527–531
- [58] AUSTRALIA'S ICT RESEARCH CENTRE OF EXCELLENCE: *Castalia - A Simulator for WSNs*. <http://castalia.npc.nicta.com.au/>, 2008. – [Online; abgerufen 01-Dezember-2011]
- [59] AUSTRIA MICROSYSTEMS: *3D Low Power Wakeup Receiver-AS3931*. <http://www.austriamicrosystems.com/eng/content/view/full/544>, 2009. – [Online; abgerufen 01-Juli-2011]
- [60] BABICH, F. ; COMISSO, M. ; ORLANDO, M. ; MANI'A, L.: Simultaneous Communications in Ad-Hoc Networks Using Smart Antennas in Multipath Environment. In: *Proceedings of the Global Telecommunications Conference (GLOBECOM)*, IEEE Computer Society, November 2006. – ISBN 1-4244-0356-1, S. 1-6
- [61] BACCELLI, F. ; BASZCZYSZYN, B. ; MÜHLETHALER, P.: An Aloha Protocol for Multihop Mobile Wireless Networks. In: *IEEE Transactions on Information Theory* , Vol. 52 (2006), February, Nr. 2, S. 421-436
- [62] BAEK, J. ; AN, S.K. ; FISHER, P.S. ; JONES, E.J.: Dynamic Cluster Header Selection with Self-Incentive for Wireless Sensor Networks. In: *Proceedings of the SARNOFF Symposium*, IEEE Computer Society, April 2009, S. 1-5
- [63] BAEK, S.J. ; VECIANA, G. de ; SU, X.: Minimizing Energy Consumption in Large-Scale Sensor Networks Through Distributed Data Compression and Hierarchical Aggregation. In: *Selected Areas in Communications* , Vol. 22 (2004), August, Nr. 6, S. 1130-1140. – ISSN 0733-8716
- [64] BAHL, P. ; PADMANABHAN, V.: RADAR: An In-Building RFbased User Location and Tracking System. In: *Proceedings of the INFOCOM Bd. 2*, IEEE Computer Society, March 2000, S. 775-784
- [65] BAJAJ, L. ; TAKAI, M. ; AHUJA, R. ; TANG, K. ; BAGRODIA, R. ; GERLA, M.: *GloMoSim: A Scalable Network Simulation Environment / University of California*. 1999 (1). – Forschungsbericht. –
- [66] BALASUBRAMANIAN, A. ; LEVINE, B.N. ; VENKATARAMANI, A.: Replication Routing in DTNs: A Resource Allocation Approach. In: *IEEE/ACM Transactions on Networking* Vol., 18 (2010), April, Nr. 2, S. 596-609
- [67] BALDO, N. ; MAGUOLO, F. ; MIOZZO, M. ; ROSSI, M. ; ZORZI, M.: ns2-MIRACLE: a Modular Framework for Multi-Technology and Cross-Layer Support in Network Simulator 2. In: *Proceedings of the 2nd International Conference on Performance Evaluation Methodologies and Tools (ValueTools)*, ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering), 2007. – ISBN 978-963-9799-00-4, S. 1-8

- [68] BALISTER, P. ; BOLLOBAS, B. ; ANANDKUMAR, A. ; WILLSKY, A.: Energy-Latency Tradeoff for in-network function computation in random networks. In: *Proceedings of the INFOCOM*, IEEE Computer Society, April 2011. – ISSN 0743–166X, S. 1575–1583
- [69] BANBURY, S. ; TREMBLAY, S.: *A Cognitive Approach to Situation Awareness: Theory and Application*. Aldershot: Ashgate, 2004. – ISBN 0–7546–4198–8
- [70] BANERJEE, N. ; CORNER, M.D. ; LEVINE, B.N.: Design and Field Experimentation of an Energy-Efficient Architecture for DTN Throwboxes. In: *IEEE/ACM Transactions on Networking* Vol., 18 (2010), April, Nr. 2, S. 554–567
- [71] BARRY, Richard: *The FreeRTOS.org Project*. <http://www.freertos.org/>, 2009. – [Online; abgerufen 10-June-2012]
- [72] BAUMANN, R. ; HEIMLICHER, S. ; STRASSER, M. ; WEIBEL, A.: *A Survey on Routing Metrics*. TIK Report 262, 2007. – ETH-Zentrum, Schweiz, Computer Engineering and Networks Laboratory
- [73] BAYINDIR, L. ; SAHIN, E.: A Review of Studies in Swarm Robotics. In: *Turk J Elec Engin* , Vol. 15 (2007), Nr. 2, S. 115–147
- [74] BEEBY, S. ; TUDOR, M. ; WHITE, N.: Energy Harvesting Vibration Sources for Microsystems Applications. In: *Proceedings of the 2nd International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA)*. San Diego, USA : ACM, September 2003. – ISBN 1–58113–764–8, S. 11–19
- [75] BEEBY, S. ; TUDOR, M. ; WHITE, N.: Energy Harvesting Vibration Sources for Microsystems Applications. In: *Measurement Science and Technology* , Vol. 17 (2006), Nr. 12, S. 175–195. – ISSN 0957–0233
- [76] BELLMAN, R.E.: On a Routing Problem. In: *Quarterly of Applied Mathematics* , Vol. 16 (1958), April, Nr. 1, S. 87–90. – ISSN 0033–569X
- [77] BELLOFIORE, S. ; BALANIS, C.A. ; FOUFZ, J. ; SPANIAS, A.S.: Smart-Antenna Systems for Mobile Communication Networks Part I: Overview and Antenna Design. In: *IEEE Antenna's and Propagation Magazine* , Vol. 44 (2002), June, Nr. 3, S. 145–154. – ISSN 1045–9243
- [78] BENGEL, G.: *Grundkurs Verteilte Systeme*. Vieweg+Teubner Verlag, 2004. – ISBN 978–3528257385
- [79] BENI, G.: *From Swarm Intelligence to Swarm Robotics*. Bd. , Vol. 3342. Springer Verlag, 2005. – 1–9 S. – ISBN 978–3–540–24296–3
- [80] BERKLEY, University: *TinyDB Projekt der Universität Berkeley*. <http://telegraph.cs.berkeley.edu/tinydb/>, 2011. – [Online; abgerufen 15-Mai-2011]
- [81] BHARATHIDASAN, A. ; ANAND, V. ; PONDURU, S.: Sensor Networks: An Overview. In: *IEEE Potentials* , Vol. 22 (2003), April, Nr. 2, S. 20–23
- [82] BHATTI, S. ; CARLSON, J. ; DAI, H. ; DENG, J. ; ROSE, J. ; SHETH, A. ; SHUCKER, B. ; GRUENWALD, C. ; TORGERSON, A. ; HAN, R.: MANTIS OS: An Embedded

- Multithreaded Operating System for Wireless Micro Sensor Platforms. In: *Mobile Network and Applications*, Vol. 10 (2005), August, Nr. 4, S. 563–579. – ISSN 1383–469X
- [83] BHUTTA, N. ; ANSA, G. ; JOHNSON, E. ; AHMAD, N. ; ALSIYABI, M. ; CRUICKSHANK, H.: Security Analysis for Delay/Disruption Tolerant Satellite and Sensor Networks. In: *International Workshop on Satellite and Space Communications*, 2009. – ISBN 978–1–4244–3559–3, S. 385–389
- [84] BLAZEVIC, L. ; BUTTYAN, L. ; CAPKUN, S. ; GIORDANO, S. ; HUBAUX, J. ; BOUDEC, J. L.: Self-Organization in Mobile Ad-Hoc Networks: The Approach of Terminodes. In: *IEEE Communications Magazine* (2001), June, S. 166–174
- [85] BLESS, R.: Using Realistic Internet Topology Data for Large Scale Network Simulations in OMNeT++. In: *Proceedings of the 2nd International OMNeT++ Workshop*, TU Berlin, January 2002
- [86] BLUETOOTH SPECIAL INTEREST GROUP: *Specification of the Bluetooth System, Covered Core Package version: 1.2*. <http://www.bluetooth.org>, November 2003. – [Online; abgerufen 15-Mai-2011]
- [87] BONABEAU, E. ; DORIGO, M. ; THERAULAZ, G.: *Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems (Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity Proceedings)*. Oxford University Press, 1999. – ISBN 978–0195131–59–8
- [88] BORBASH, S.A. ; JENNINGS, E.: Distributed Topology Control Algorithm for Multihop Wireless Networks. In: *Proceedings of the World Congress on Computational Intelligence*, IEEE Computer Society, 2002
- [89] BORSCHBACH, M.: A New Approach for Modelling Local Selective Connectivity and Maintaining Isolated Regions in Ad Hoc Networks. In: *International Journal of Wireless and Optical Communication (IJWOC)* (2006), S. 3(1):23–48
- [90] BORSCHBACH, M. ; STOLZE, A. ; LIPPE, W.-M.: Optimized Connectivity for Ad Hoc Networks. In: *Proceedings of the 2nd IASTED International Conference on Wireless and Optical Communications (WOC)*, 2002, S. 681–688
- [91] BOUKERCHE, A.: *Algorithms and Protocols for Wireless Sensor Networks*. Wiley and Sons, 2008. – ISBN 978–0–471–79813–2
- [92] BOULIS, A. ; HAN, C. ; SRIVASTAVA, M.B.: Design and Implementation of a Framework for Efficient and Programmable Sensor Networks. In: *Proceedings of the international Conference on Mobile Systems, Applications and Services*, ACM Press, 2003, S. 187–200
- [93] BULUSU, N. ; JHA, S.: *Wireless Sensor Networks - A Systems Perspective*. Artech House, 2005. – ISBN 1–58053–867–3
- [94] BURKHART, M. ; RICKENBACH, P. von ; WATTENHOFER, R. ; ZOLLINGER, A.: Does Topology Control Reduce Interference? In: *Proceedings of the 5th International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc)*, ACM, 2004. – ISBN 1–58113–849–0, S. 9–19

- [95] CAI, K. ; XIONG, S. ; SHI, J. ; WEI, G.: An Energy-Efficient Multiple Paths Routing Algorithm for Wireless Sensor Networks. In: *Proceedings of the 11th International Conference on Communication Systems*, IEEE Computer Society, November 2008, S. 1690–1694
- [96] CALLAWAY, E.H.: *Wireless Sensor Networks: Architectures and Protocols*. CRC Press, 2004. – ISBN 0849318238
- [97] CAMAZINE, S. ; DENEUBOURG, J.L. ; FRANKS, N.R. ; SNEYD, J. ; THERAULA, G. ; BONABEAU, E.: *Self-organization in biological systems*. Princeton University, 2003. – ISBN 0691116245
- [98] CAMP, T. ; BOLENG, J. ; DAVIES, V.: A Survey of Mobility Models for Ad Hoc Network Research. In: *Wiley Wireless Communications and Mobile Computing* , Vol. 2 (2002), S. 483–502
- [99] CAPKUN, S. ; HAMDY, M. ; HUBAUX, J.: GPS-Free Positioning in Mobile Ad-hoc Networks. In: *Proceedings of the 34th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)* Bd. 9, IEEE Computer Society, 2001. – ISBN 0-7695-0981-9, S. 9008
- [100] CARDEI, M. ; D.-Z. DU, I. C.: *Resource Management in Wireless Networking*. Springer, 2005. – ISBN 978-0387238074
- [101] CASEY, K. ; LIM, A. ; DOZIER, G.: A Sensor Network Architecture for Tsunami Detection and Response. In: *International Journal of Distributed Sensor Networks* , Vol. 4 (2008), S. 27–42
- [102] CC, Car2Car Communication Consortium C.: *Car2Car & Car2X Communication*. <http://www.car-to-car.org>, 2010. – [Online; abgerufen 11-April-2012]
- [103] CERF, V. ; BURLEIGH, S. ; HOOKE, A. ; TORGERSON, L. ; DURST, R. ; SCOTT, K. ; FALL, K. ; WEISS, H.: *Request for Comments (RFC) 4838 - Delay-Tolerant Networking Architecture*. <http://www.ietf.org/rfc/rfc4838.txt>, April 2007. – [Online; abgerufen 15-Mai-2012]
- [104] CHAKERES, I.D. ; BELDING-ROYER, E.M.: AODV Routing Protocol Implementation Design. In: *International Workshop on Wireless Ad Hoc Networking (WWAN)*, IEEE Computer Society, March 2004. – ISBN 0-7695-2087-1, S. 698–703
- [105] CHAKRABARTY, K. ; IYENGAR, S. S.: *Scalable Infrastructure for Distributed Sensor Networks*. Springer, 2005. – ISBN 978-1-85233-951-7
- [106] CHANG, J.-H. ; TASSIULAS, L.: Energy Conserving Routing in Wireless Ad-Hoc Networks. In: *Proceedings of the 19th Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies* Bd. 1, 2000, S. 22–31
- [107] CHANG, J.-H. ; TASSIULAS, L.: Maximum Lifetime Routing in Wireless Sensor Networks. In: *IEEE/ACM Transactions on Networking* , Vol. 12 (2004), August, Nr. 4, S. 609–619. – ISSN 1063-6692
- [108] CHEE, Y.H.: *Ultra-Low Power Transmitters for Sensor Networks*, University of California, Berkeley, Diss., 2006

- [109] CHEN, L. ; ZHAO, B.H.: An Interference Free Data Aggregation Protocol for Clustered Wireless Sensor Networks. In: *Proceedings of the 2nd International Conference on Future Generation Communication and Networking* Bd. 1, IEEE Computer Society, December 2008, S. 35–39
- [110] CHENG, M.X. ; LI, D.: *Advances in Wireless Ad Hoc and Sensor Networks*. Springer, 2008. – ISBN 978–0–387–68565–6
- [111] CHENG, R.-S. ; LIN, H.-T.: TCP Selective Negative Acknowledgment over IEEE 802.11 Wireless Networks. In: *Proceedings of the International Conference on Networking and Services*, IEEE Computer Society, 2006. – ISBN 0–7695–2622–5
- [112] CHESS, D.M. ; HARRISON, C.G. ; KERSHENBAUM, A.: Mobile Agents: Are They a Good Idea? In: *Proceedings of the Mobile Object Systems'96*, IEEE Computer Society, 1996, S. 25–45
- [113] CHRYSSOMALLIS, M.: Smart Antennas. In: *IEEE Antennas and Propagation Magazine* , Vol. 42 (2000), June, Nr. 3, S. 129–136. – ISSN 1045–9243
- [114] CLAUS, V. ; SCHWILL, A.: *Duden - Informatik A-Z - Fachlexikon für Studium, Ausbildung und Beruf*. Dudenverlag, 2006. – ISBN 978–3411052349
- [115] CLAUSEN, T. ; JACQUET, P. ; LAOUITI, A. ; MUHLETHALER, P. ; QAYYUM, A. ; VIENNOT, L.: Optimized Link State Routing Protocol. In: *Proceedings of the International Multitopic Conference (INMIC)*, IEEE Computer Society, 2001
- [116] COMER, D.: *Internetworking with TCP/IP. Principles, Protocols and Architectures*. Prentice Hall, 2000. – ISBN 0–13–018380–6
- [117] COMMUNICATIONS CHALLENGED COMMUNITIES, Networking for: *Architecture, Test Beds and Innovative Alliances*. <http://www.n4c.eu>, 2012. – [Online; abgerufen 01-August-2012]
- [118] COMMURI, S. ; TADIGOTLA, V.: Dynamic Data Aggregation in Wireless Sensor Networks. In: *Proceedings of the 22nd International Symposium on Intelligent Control*, IEEE Computer Society, October 2007. – ISSN 1085–1992, S. 1–6
- [119] CONSORTIUM, Li-Fi: *Li-Fi Consortium - Next Generation Optical Wireless Communication Solution*. <http://www.lificonsortium.org>, 2012. – [Online; abgerufen 01-August-2012]
- [120] CONTI, M. ; MASELLI, G. ; TURI, G. ; GIORDANO, S.: Cross-Layering in Mobile Ad Hoc Network Design. In: *Computer* , Vol. 37 (2004), Nr. 2, S. 48–51. – ISSN 0018–9162
- [121] COOKLEV, T.: *Wireless Communication Standards - A Study of IEEE 802.11, 802.15 and 802.16*. IEEE Computer Society, 2004. – ISBN 0–7381–4066–X
- [122] COOPER, M. ; GOLDBERG, M.: Intelligent Antennas: Spatial Division Multiple Access. In: *Proceedings of the IEC Annual Review of Communications*, IEC, 1996, S. 999–1002
- [123] CORNELL, University: *COUGAR Projekt der Universität Cornell*. <http://www.cs.cornell.edu/database/cougar/>, 2011. – [Online; abgerufen 08-Januar-2012]

- [124] COWIE, J. ; OGIELSKI, A. ; NICOL, D.: *The SSFNet network simulator*. <http://www.ssfnet.org/homePage.html>, 2002. – [Online; abgerufen 1-Dezember-2010]
- [125] CROWLEY, J.L. ; DEMAZEAU, Y.: *Principles and Techniques for Sensor Data Fusion*. LIFIA (IMAG), Frankreich, 1993. – [Online; abgerufen 20-Juli-2011]
- [126] CULLER, D. ; ESTRIN, D. ; SRIVASTAVA, M.: Overview of Sensor Networks. In: *Computer Journal* , Vol. 4 (2004), S. 41–49. – ISSN 0018–9162
- [127] CURINO, C. ; GIANI, M. ; GIORGETTA, M. ; GIUSTI, A. ; MURPHY, A.L. ; PICCO, G.P.: TinyLIME: Bridging Mobile and Sensor Networks Through Middleware. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Pervasive Computing and Communications*, IEEE Computer Society, 2005. – ISBN 0–7695–2299–8, S. 61–72
- [128] DAI, H. ; HAN, R.: TSync: A Lightweight Bidirectional Time Synchronization Service for Wireless Sensor Networks. In: *SIGMOBILE Mobile Computing and Communications* , Vol. 8 (2004), S. 125–139
- [129] DAM, T. van ; LANGENDOEN, K.: An Adaptive Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks. In: *Proceedings of the international Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, 2003. – ISBN 1–58113–707–9, S. 171–180
- [130] DARPA: *Defense Advanced Research Projects Agency*. <http://www.darpa.mil/>, 2009. – [Online; abgerufen 01-Juni-2011]
- [131] DAS, B. ; SIVAKUMAR, R. ; BHARGHAVAN, V.: Routing in Ad Hoc Networks Using a Spine. In: *Proceedings of the 6th International Conference on Computer Communications and Networks*, IEEE Computer Society, September 1997, S. 34–39
- [132] DAS, S.M. ; PUCHA, H. ; HU, Y.C.: Performance Comparison of Scalable Location Services for Geographic Ad Hoc Routing. In: *Proceedings of the 24th Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies Bd. 2*, 2005. – ISSN 0743–166X, S. 1228–1239
- [133] D’COSTA, A. ; SAYEED, A.: Collaborative Signal Processing for Distributed Classification in Sensor Networks. In: *Information Processing in Sensor Networks Bd. 2634*. Springer, 2003. – ISBN 978–3–540–02111–7, S. 558–559
- [134] DEMBOWSKI, K.: *Energy Harvesting für die Mikroelektronik: Energieeffiziente und -autarke Lösungen für drahtlose Sensorsysteme*. Vde Verlag, 2011. – ISBN 978–3800732340
- [135] DEMIRIKOL, I. ; ERSOY, C. ; ONUR, E.: Wake-Up Receivers for Wireless Sensor Networks: Benefits and Challenges. In: *IEEE Wireless Communications* (2009), S. 88–96. – ISSN 1536–1284
- [136] DHANARAJ, M. ; MANOJ, B.S. ; MURTHY, C.S.R.: A New Energy Efficient Protocol for Minimizing Multi-Hop Latency in Wireless Sensor Networks. In: *Proceedings of the 3rd PERCOM*, IEEE Computer Society, 2005, S. 117–126
- [137] DOORN, B. van d. ; KAVELAARS, W. ; LANGENDOEN, K.: A Prototype Low-Cost Wakeup Radio for the 868 MHz Band. In: *International Journal of Sensor Networks* , Vol. 5 (2009), Nr. 1

- [138] DRESSLER, F.: Self-Organization in Ad Hoc Networks: Overview and Classification / University of Erlangen, Dept. of Computer Science 7. 2006 (1). – Forschungsbericht. –
- [139] DRESSLER, F.: *Self-Organization in Sensor and Actor Networks*. Wiley, 2007. – ISBN 978-0-470-02820-9
- [140] DRESSLER, F.: *Self-Organization in Sensor and Actor Networks*. John Wiley and Sons, 2007. – ISBN 978-0470028209
- [141] DUARTE-MELO, E. ; LIU, M.: Analysis of Energy Consumption and Lifetime of Heterogeneous Wireless Sensor Networks. In: *Proceedings of the Global Telecommunications Conference (GLOBECOM)*, IEEE Computer Society, 2002
- [142] DUBE, R. ; RAIS, C.D. ; WANG, K.-Y. ; TRIPATHI, S.K.: Signal stability-based adaptive routing (SSA) for ad hoc mobile networks. In: *Personal Communications* , Vol. 4 (1997), February, Nr. 1, S. 36–45. – ISSN 1070–9916
- [143] DUNKEL, Adam: *Contiki - The Operating System for Embedded Smart Objects - the Internet of Things*. <http://www.sics.se/contiki/>, 2009. – [Online; abgerufen 10-June-2012]
- [144] DURANTE, M.S. ; MAHLKNECHT, S.: An Ultra Low Power Wakeup Receiver for Wireless Sensor Nodes. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Sensor Technologies and Applications*, IEEE Computer Society, 2009. – ISBN 978-0-7695-3669-9, S. 167–170
- [145] EGNITE GMBH: *Ethernut Firmware*. <http://www.ethernut.de/en/firmware/index.html>, 2009. – [Online; abgerufen 10-June-2012]
- [146] ELSON, J. ; GIROD, L. ; ESTRIN, D.: Fine-Grained Network Time Synchronization using Reference Broadcasts. In: *Proceedings of the Fifth Symposium on Operating Systems Design and Implementation (OSDI)*, ACM, December 2002. – ISSN 0163–5980, S. 147–163
- [147] ERTEL, R.B. ; CARDIERI, P. ; SOWERBY, K.W. ; RAPPAPORT, T.S. ; REED, J.H.: Overview of Spatial Channel Models for Antenna Array Communication Systems. In: *IEEE Personal Communications* (1998), February, S. 10–22. – ISSN 1070–9916
- [148] FAHMY, N.S. ; TODD, T.D. ; KEZYS, V.: Ad Hoc Networks with Smart Antennas Using IEEE 802.11-Based Protocols. In: *Proceedings of the International Conference on Communications (ICC) Bd. , Vol. 5*, IEEE Computer Society, 2002. – ISBN 0-7803-7400-2, S. 3144–3148
- [149] FALL, K.: A Delay-Tolerant Network Architecture for Challenged Internets. In: *Proceedings of the International Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications (SIGCOMM)*, ACM, 2003. – ISBN 1-58113-735-4, S. 27–34
- [150] FARRELL, S. ; CAHILL, V. ; GERAGHTY, D. ; HUMPHREYS, I. ; McDONALD, P.: When TCP Breaks: Delay- and Disruption- Tolerant Networking. In: *IEEE Internet Computing* Vol, 10 (2006), August, Nr. 4, S. 72–78. – ISSN 1089–7801

- [151] FARRELL, S. ; WEBER, S. ; MCMAHON, A. ; MEEHAN, E. ; HARTNETT, K.: N4C DTN Router Node: 2009 Results, 2010 Plans. In: *Proceedings of the ExtremeCom*, ACM, 2010
- [152] FEDER, T.: Argo Begins Systematic Global Probing of the Upper Oceans. In: *Physics Today* , Vol. 53 (2000), July, Nr. 7, S. 50–51. – ISSN 0031–9228
- [153] FEKETE, S.P. ; KRÖLLER, A. ; FISCHER, S. ; PFISTERER, D.: Shawn: The Fast, Highly Customizable Sensor Network Simulator. In: *Proceedings of the 4th International Conference on Networked Sensing Systems (INSS 2007)*, 2007
- [154] FERRARI, G.: *Sensor Networks - Where Theory Meets Practice*. Springer, 2010. – ISBN 978–3–642–01340–9
- [155] FINKENZELLER, K.: *RFID Handbook - Radio-Frequency Identification Fundamentals and Applications*. John Wiley & Sons, 1999. – ISBN 0–471–98851–0
- [156] FLOWERS, D. ; YANG, Y.: *AN1066-MiWi Wireless Networking Protocol Stack*. <http://www.microchip.com/downloads/en/AppNotes/01066a.pdf>, 2007. – [Online; abgerufen 15-Mai-2011]
- [157] FOERSTER, H.V. ; M.C.YOVITTS ; S.CAMERON: On Self-Organizing Systems and Their Environments. In: *Self-Organizing Systems* (1960), S. 31–50
- [158] FRANKLIN, S. ; GRAESSER, A.: Is it an Agent, or Just a Program?: A Taxonomy for Autonomous Agents. In: *Proceedings of the Workshop on Intelligent Agents III, Agent Theories, Architectures, and Languages*, Springer-Verlag, 1997. – ISBN 3–540–62507–0, S. 21–35
- [159] FRAUNHOFER INSTITUT FÜR INTEGRIERTE SCHALTUNGEN IIS: Ultra Low-Current Wakeup Receiver μ RX1080 / Fraunhofer (2010). – Forschungsbericht. –
- [160] GAMA, J. ; GABER, M.M.: *Learning from Data Streams - Processing Techniques in Sensor Networks*. Springer, 2007. – ISBN 978–3–540–73678–3
- [161] GANERIWAL, S. ; KUMAR, R. ; SRIVASTAVA, M.B.: Timing-sync Protocol for Sensor Networks. In: *Proceedings of the International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, IEEE Computer Society, 2003, S. 138–149
- [162] GANESAN, D. ; GOVINDAN, R. ; SHENKER, S. ; ESTRIN, D.: Highly-Resilient, Energy-Efficient Multipath Routing in Wireless Sensor Networks. In: *SIGMOBILE Mobile Computing and Communications* , Vol. 5 (2001), Nr. 4, S. 11–25. – ISSN 1559–1662
- [163] GANESAN, D. ; GOVINDAN, R. ; SHENKER, S. ; ESTRIN, D.: Highly-Resilient, Energy-Efficient Multipath Routing in Wireless Sensor Networks. In: *SIGMOBILE Mob. Comput. Commun. Rev.* , Vol. 5 (2001), October, S. 11–25. – ISSN 1559–1662
- [164] GARCIA-LUNA-ACEVES, J.J. ; SPOHN, M.: Source-Tree Routing in Wireless Networks. In: *Proceedings of the 7th International Conference on Network Protocols*, IEEE Computer Society, October 1999, S. 273–282
- [165] GERHARZ, M. ; WAAL, C. de ; MARTINI, P. ; JAMES, P.: Strategies for Finding Stable Paths in Mobile Wireless Ad Hoc Networks. In: *Proceedings of the 28th Annual International Conference on Local Computer Networks (LCN)*, IEEE Computer Society, October 2003

- [166] GHAVAMI, M. ; MICHAEL, L. ; KOHNO, R.: *Ultra Wideband Signals and Systems in Communication Engineering*. John Wiley & Sons, 2004. – ISBN 978–0–470–86751–8
- [167] GIORDANO, S. ; STOJMENOVIC, I. ; BLAZEVIĆ, L.: *Position Based Routing Algorithms for Ad Hoc Networks: A Taxonomy*. <http://www.site.uottawa.ca/~ivan/routing-survey.pdf>, October 2001. – [Online; abgerufen 2-Februar-2012]
- [168] GIRLING, G. ; WA, J. ; OSBORN, P. ; STEFANOVA, R.: The Design and Implementation of a Low Power Ad Hoc Protocol Stack. In: *Personal Communications* , Vol. 4 (1997), Nr. 5, S. 8–15
- [169] GIROD, L. ; ESTRIN, D.: Robust Range Estimation Using Acoustic and Multimodal Sensing. In: *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, IEEE Computer Society, October 2001
- [170] GOLDSMITH, A.J. ; WICKER, S.B.: Design Challenges for Energy Constrained Ad Hoc Wireless Networks. In: *Wireless Communications* , Vol. 9 (2002), Nr. 4, S. 8–27
- [171] GREUNEN, J. V. ; RABAËY, J.: Lightweight Time Synchronization for Sensor Networks. In: *Proceedings of the 2nd International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA)*, ACM, September 2003. – ISBN 1–58113–764–8, S. 11–19
- [172] GU, L. ; STANKOVIC, J. A.: Radio-Triggered Wake-up for Wireless Sensor Networks. In: *Real-Time Systems* , Vol. 29 (2005), Nr. 2-3, S. 157–182
- [173] GU, L. ; STANKOVIC, J.A.: Radio-triggered Wake-up Capability for Sensor Networks. In: *Proceedings of the 10th Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium*, IEEE Computer Society, May 2004. – ISBN 0–7695–2148–7, S. 27–36
- [174] GÜNES, M.: *Routing und Adressierung in mobilen multi-hop Ad-hoc-Netzen*, Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Diss., 2004
- [175] GUO, C. ; ZHONG, L.C. ; RABAËY, J.M.: Low Power Distributed MAC for Ad Hoc Sensor Radio Networks. In: *Proceedings of the Global Communications Conference (GLOBECOM)*, IEEE Computer Society, November 2001. – ISBN 0–7803–7206–9, S. 2944–2948
- [176] GUPTA, V. ; PANDEY, R.: Data Fusion and Topology Control in Wireless Sensor Networks. In: *WSEAS Trans. Sig. Proc.* , Vol. 4 (2008), Nr. 4, S. 150–172. – ISSN 1790–5022
- [177] HAAS, Z.J. ; DENG, J.: Dual Busy Tone Multiple Access (DBTMA) - Performance Results. In: *Proceedings of the Wireless Communications and Networking Conference* Bd. 3, IEEE Computer Society, 1999, S. 1328–1332
- [178] HAAS, Z.J. ; PEARLMAN, M.R.: The Zone Routing Protocol (ZRP) for Ad Hoc Networks. In: *INTERNET-DRAFT, IETF MANET Working Group*, 1997
- [179] HACKWOOD, S. ; BENI, G.: Self-organization of sensors for swarm intelligence. In: *Proceedings of the Robotics and Automation*, IEEE Computer Society, 1992. – ISBN 0818627204, S. 819–829

- [180] HARDEKOPF, B. ; KWIAT, K. ; UPADHYAYA, S.: A Decentralized Voting Algorithm for Increasing Dependability in Distributed Systems. In: *Proceedings of the 5th World Multiconference on Systemic, Cybernetics and Informatics: Distributed Systems*, 2001
- [181] HARDT, W.: *HW/SW-Codesign auf Basis von C-Programmen unter Performanz-Gesichtspunkten*, Universität Paderborn, Diss., 1996
- [182] HARDT, W.: *Integration von Verzögerungszeit-Invarianz in den Entwurf eingebetteter Systeme - Habilitationsschrift*. Shaker Verlag, 2002. – ISBN 3–8265–8251–9
- [183] HART COMMUNICATIONS FOUNDATION: *WirelessHART Technology*. <http://www.hartcomm.org>, 2010. – [Online; abgerufen 01-Juli-2011]
- [184] HEDRICK, C.: *Request for Comments (RFC) 1058 - Routing Information Protocol*. <http://tools.ietf.org/rfc/rfc1058.txt>, June 1988. – [Online; abgerufen 18-Mai-2011]
- [185] HEINZELMAN, W.R. ; CHANDRAKASAN, A. ; BALAKRISHNAN, H.: Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks. In: *Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences* Bd. 2, IEEE Computer Society, January 2000. – ISBN 0–7695–0493–0, S. 10
- [186] HENDERSON, T.R. ; ROY, S. ; FLOYD, S. ; RILEY, G.F.: ns-3 Project Goals. In: *Proceeding from the 2006 Workshop on NS-2: the IP Network Simulator (WNS2)*, ACM, 2006. – ISBN 1–59593–508–8, S. 13
- [187] HEYLIGHEN, F. ; GERSHENSON, C. ; STAAB, S. ; FLAKE, G.W. ; PENNOCK, D.M. ; FAIN, D.C. ; ROURE, D. D. ; ABERER, K. ; SHEN, W.M. ; DOUSSE, O.: Neurons, viscose fluids, freshwater polyp hydra-and self-organizing information systems. In: *Intelligent Systems* , Vol. 18 (2005), Nr. 4, S. 72–86. – ISSN 1541–1672
- [188] HIGHTOWER, J. ; BORRIELLO, G.: Location Sensing Techniques (part of Location Systems for Ubiquitous Computing). In: *IEEE Computer Magazine* UW-CSE-01-07-01 (2001), August, S. 57–66
- [189] HIGHTOWER, J. ; WANT, R. ; BORRIELLO, G.: SpotON: An Indoor 3D Location Sensing Technology Based on RF Signal Strength. In: *University of Washington, Department of Computer Science and Engineering, Seattle, WA* UW-CSE 00-02-02 (2000), February
- [190] HO, M.-J. ; STÜBER, G.L. ; AUSTIN, M.D.: Performance of Switched-Beam Smart Antennas for Cellular Radio Systems. In: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* , Vol. 47 (1998), February, Nr. 1, S. 10–19. – ISSN 0018–9545
- [191] HOSSAIN, E. ; LEUNG, K.: *Wireless Mesh Networks - Architectures and Protocols*. Springer, 2008. – ISBN 978–0–387–68838–1
- [192] HOU, J.C. ; LI, N.: Topology Construction and Maintenance in Wireless Sensor Networks. In: STOJMENOVIC, I. (Hrsg.): *Handbook of Sensor Networks*. John Wiley and Sons, 2005, Kapitel 10, S. 311–341
- [193] HOU, X. ; TIPPER, D. ; KABARA, J.: Label-based Multipath Routing (LMR) in Wireless Sensor Networks. In: *The International Symposium on Advanced Radio Technologies (ISART)*, 2004, S.

- [194] HSU, C.-S. ; TSENG, Y.-C. ; SHEU, J.-P.: An Efficient Reliable Broadcasting Protocol for Wireless Mobile Ad Hoc Networks. In: *Ad Hoc Networks* , Vol. 5 (2007), Nr. 3, S. 299–312. – ISSN 1570–8705
- [195] HUSSAIN, S. ; ZAHMATI, A.S. ; FERNANDO, X.: LASA: Low-Energy Adaptive Slot Allocation Scheduling Algorithm for Wireless Sensor Networks. In: *Proceedings of the SARNOFF Symposium*, 2009, S. 1–6
- [196] IANNONE, L. ; KHALILI, R. ; SALAMATIAN, K. ; FDIDA, S.: Cross-Layer Routing in Wireless Mesh Networks. In: *Proceedings of the International Symposium on Wireless Communication Systems*, IEEE Computer Society, September 2004. – ISBN 0–7803–8472–5, S. 319–323
- [197] IEEE COMPUTER SOCIETY: *Part 16: Standard for Local and Metropolitan Area Networks*. <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.16-2004.pdf>, 2004. – [Online; abgerufen 15-Mai-2011]
- [198] IEEE COMPUTER SOCIETY: *802.11 LAN/MAN Wireless LANS*. <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.11-2007.pdf>, 2007. – [Online; abgerufen 15-Mai-2011]
- [199] IEEE COMPUTER SOCIETY: *802.15 Wireless Personal Area Networks*. <http://standards.ieee.org/getieee802/802.15.html>, 2007. – [Online; abgerufen 15-Mai-2011]
- [200] IEEE COMPUTER SOCIETY: *Part 15.1: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Wireless Personal Area Networks (WPANs)*. <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.15.1-2005.pdf>, 2007. – [Online; abgerufen 15-Mai-2011]
- [201] IEEE COMPUTER SOCIETY: *Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)*. <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.15.4-2006.pdf>, 2007. – [Online; abgerufen 15-Mai-2011]
- [202] ILYAS, M. ; MAHGOUB, I.: *Handbook of Sensor Networks - Compact Wireless and Wired Sensing Systems*. CRC Press, 2005. – ISBN 0–8493–1968–4
- [203] IMIELINSKI, T. ; NAVAS, J.C.: GPS-based Geographic Addressing, Routing, and Resource Discovery. In: *Journal on Communication* , Vol. 42 (1999), April, S. 86–92. – ISSN 0001–0782
- [204] INTANAGONWIWAT, C. ; GOVINDAN, R. ; ESTRIN, D.: Directed Diffusion: A Scalable and Robust Communication Paradigm for Sensor Networks. In: *Proceedings of the 6th International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom)*, ACM, 2000. – ISBN 1–58113–197–6, S. 56–67
- [205] JAIN, S. ; FALL, K. ; PATRA, R.: Routing in a delay tolerant network. In: *Proceedings of the International Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications (SIGCOMM)*, ACM, 2004. – ISBN 1–58113–862–8, S. 145–158

- [206] JARRE, F.: *Optimierung*. Springer, 2003. – ISBN 978–3540435754
- [207] JIANG, C. ; YUAN, D. ; ZHAO, Y.: Towards Clustering Algorithms in Wireless Sensor Networks-A Survey. In: *Proceedings of the Wireless Communications and Networking Conference*, IEEE Computer Society, april 2009. – ISSN 1525–3511, S. 1–6
- [208] JIANG, M. ; LI, J. ; TAY, Y.-C.: *Cluster Based Routing Protocol (CBRP) Functional Specification*. 1998
- [209] JONES, C.E. ; SIVALINGAM, K.M. ; AGRAWAL, P. ; CHEN, J.C.: A Survey of Energy Efficient Network Protocols for Wireless Networks. In: *Wireless Networks* , Vol. 7 (2001), Nr. 4, S. 343–358
- [210] JONES, E.P.C. ; LI, L. ; SCHMIDTKE, J.K. ; WARD, P.A.S.: Practical Routing in Delay-Tolerant Networks. In: *IEEE/ACM Transactions on Mobile Computing* Vol., 6 (2007), August, Nr. 8, S. 943–959
- [211] JUANG, P. ; OKI, H. ; WANG, Y. ; MARTONOSI, M. ; PEH, L.S. ; RUBENSTEIN, D.: Energy-Efficient Computing for Wildlife Tracking: Design Tradeoffs and Early Experiences with ZebraNet. In: *SIGPLAN Not.* , Vol. 37 (2002), October, S. 96–107. – ISSN 0362–1340
- [212] JURDAK, R.: *Wireless Ad Hoc and Sensor Networks - A Cross-Layer Design Perspective*. Springer, 2007. – ISBN 978–0–387–39022–2
- [213] KAHN, J.M. ; KATZ, R.H. ; PISTER, K.S.J.: Emerging Challenges: Mobile Networking for Smart Dust. In: *Journal of Communications and Networks* , Vol. 2 (2000), September, Nr. 3, S. 188–196. – ISSN 1229–2370
- [214] KANOUN, O. ; WALLASCHEK, J.: *Energy Harvesting: Grundlagen und Praxis energieautarker Systeme*. Expert-Verlag, 2007. – ISBN 978–3816927891
- [215] KARKVANDI, H.R. ; PECHT, E. ; YADID-PECHT, O.: Effective Lifetime-Aware Routing in Wireless Sensor Networks. In: *Sensors Journal* , Vol. 11 (2011), December, Nr. 12, S. 3359–3367. – ISSN 1530–437X
- [216] KARL, H. ; WILLIG, A.: *Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks*. Wiley and Sons, 2005. – ISBN 978–0–470–09510–2
- [217] KARP, B. ; KUNG, H.T.: GPSR: Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Networks. In: *Proceedings of the Mobile Computing and Networking (Mobicom)*, IEEE Computer Society, August 2000, S. 243–254
- [218] KENNEDY, J. ; SULLIVAN, M.C.: Direction Finding and "Smart Antennas" Using Software Radio Architectures. In: *IEEE Communications Magazine* (1995), May, S. 62–68. – ISSN 0163–6804
- [219] KHALIL, I. ; BAGCHI, S. ; SHROFF, N.B.: SLAM: Sleep-Wake Aware Local Monitoring in Sensor Networks. In: *Proceedings of the 37th International Conference on Dependable Systems and Netorks*, IEEE Computer Society, 2007, S. 565–574
- [220] KIM, D. ; LEE, W. ; PARK, B.-N. ; KIM, J. ; SHIN, C.: A Power Balanced Multipath Routing Protocol in Wireless Ad-Hoc Sensor Networks. In: *Proceedings of the 6th*

- International Conference on Computer and Information Technology*, IEEE Computer Society, September 2006, S. 222 ff.
- [221] KIM, S.-J. ; WANG, X. ; MADIHAN, M.: Joint Routing and Medium Access Control for Lifetime Maximization of Distributed Wireless Sensor Networks. In: *Proceedings of the International Conference on Communications* Bd. 8, IEEE Computer Society, June 2006. – ISSN 8164–9547, S. 3467–3472
- [222] KIM, Y.-A. ; NAKAGAWA, Ma.: R-ALOHA Protocol for Spread Spectrum Inter-Vehicle Communication Network using Head Spacing Information. In: *Proceedings of the Intelligent Vehicles Symposium*, IEEE Computer Society, September 1996. – ISBN 0–7803–3652–6
- [223] KIT - KARLSRUHER INSTITUT FÜR TECHNOLOGIE: *Graduiertenkolleg 1194 - Selbstorganisierende Sensor-Aktor-Netzwerke*. <http://www.grk1194.kit.edu/>, June 2010. – [Online; abgerufen 15-June-20011]
- [224] KLEINROCK, L. ; TOBAGI, F.A.: Packet switching in radio channels, part I - carrier sense multiple access modes and their throughput-delay characteristics. In: *IEEE Transactions on Communications COM* , Vol. 23 (1975), S. 1400–1416
- [225] KO, Y.-B. ; VAIDYA, N.H.: Using Location Information to Improve Routing in Ad Hoc Networks / Texas A&M University. 1997 (013). – Forschungsbericht. –
- [226] KO, Y.-B. ; VAIDYA, N.H.: Location-Aided Routing (LAR) in mobile ad hoc networks. In: *Wireless Networks* , Vol. 6 (2000), April, Nr. 4, S. 307–321. – ISSN 1022–0038
- [227] KOCHHAL, M. ; SCHWIEBERT, L. ; GUPTA, S.: Role-based Hierarchical Self Organization for Wireless Ad Hoc Sensor Networks. In: *Proceedings of the 2nd ACM International Conference on Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA)*, ACM, 2003. – ISBN 1–58113–764–8, S. 98–107
- [228] KONG, In-Yeup ; HWANG, Won-Joo: Lifetime Maximization by Cross-Layer Interaction in Wireless Sensor Networks. In: *Proceedings of the International Conference on Advanced Communication Technology* Bd. 3, IEEE Computer Society, February 2006, S. 2055–2060
- [229] KORTEWEG, P. ; MARCHETTI-SPACCAMELA, A. ; STOUGIE, L. ; VITALETTI, A.: Data Aggregation in Sensor Networks: Balancing communication and Delay Costs. In: *Theoretical Computer Science* , Vol. 410 (2009), March, Nr. 14, S. 1346–1354. – ISSN 0304–3975
- [230] KULIK, J. ; HEINZELMAN, W.R. ; BALAKRISHNAN, H.: Negotiation-based Protocols for Disseminating Information in Wireless Sensor Networks. In: *Wireless Networks*, Vol. 8 (2002), S. 169–185
- [231] KUORILEHTO, M. ; KOHVAKKA, M. ; SUHONEN, J. ; HÄMÄLÄINEN, P. ; HÄNNIKÄINEN, M. ; HÄMÄLÄINEN, T.D.: *Ultra-Low Energy Wireless Sensor Networks in Practice - Theory, Realization and Deployment*. Wiley and Sons, 2007. – ISBN 978–0–470–05786–5

- [232] KUSH, A. ; TANEJA, S. ; SHARMA, D.: Energy Efficient Routing for MANET. In: *Proceedings of the International Conference on Methods and Models in Computer Science*, IEEE Computer Society, December 2010, S. 112–116
- [233] LANGE, D.B. ; OSHIMA, M.: Seven good reasons for mobile agents. In: *Communications of the ACM* , Vol. 42 (1999), March, Nr. 3, S. 88–89. – ISSN 0001–0782
- [234] LE, T. ; HU, W. ; CORKE, P. ; JHA, S.: E RTP: Energy-efficient and Reliable Transport Protocol for Data Streaming in Wireless Sensor Networks. In: *Journal of Computer Communication* , Vol. 32 (2009). – ISSN 1154–1171
- [235] LE-HUY, P. ; ROY, S.: Low-Power 2.4GHz Wake-Up Radio for Wireless Sensor Networks. In: *Proceedings of the International Conference on Wireless & Mobile Computing, Networking & Communication*, IEEE Computer Society, 2008. – ISBN 978–0–7695–3393–3, S. 13–18
- [236] LI, N. ; HOU, J. ; SHA, L.: Design and Analysis of an MST-based Topology Control Algorithm. In: *Proceedings of the 22nd Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies Bd. 3*, IEEE Computer Society, 2003, S. 1702–1712
- [237] LI, N. ; JENNIFER, C.H.: Topology Control in Heterogeneous Wireless Networks: Problems and Solutions. In: *Proceedings of the 21th International Conference of the Computer and Communications Societies (INFOCOM)*, IEEE Computer Society, March 2004. – ISBN 0–7803–8355–9, S. 243
- [238] LI, X.: *Wireless Ad Hoc and Sensor Networks - Theory and Applications*. Cambridge University Press, 2008. – ISBN 978–0–521–86523–4
- [239] LI, Y. ; THAI, M.T. ; WU, W.: *Wireless Sensor Networks and Applications*. Springer, 2008. – ISBN 978–0–387–49591–0
- [240] LIANG, W. ; XU, J. ; LIU, Y.: Towards Energy Saving and Load Balancing Data Aggregation for Wireless Sensor Networks. In: *Information Technology Journal* , Vol. 10 (2011), Nr. 2, S. 409–415
- [241] LIM, J. ; JEONG, E. ; KIM, K. ; LEE, J. ; MUN, Y. ; KIM, B.: Energy Efficient Cluster Management Scheme for Ubiquitous Sensor Networks. In: *Proceedings of the International Conference on Computational Sciences and Its Applications*, IEEE Computer Society, July 2008, S. 73 –83
- [242] LIN, E. Y. A. ; RABAEY, J. M. ; WOLISZ, A.: Power-Efficient Rendezvous Schemes for Dense Wireless Sensor Networks. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Communications (ICC)*, ACM, 2004, S. 3769–3776
- [243] LINDSEY, S. ; RAGHAVENDRA, C. ; SIVALINGAM, K.: Data Gathering in Sensor Networks using the Energy*Delay Metric. In: *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems* Vol., 13 (2002), S. 924–935
- [244] LIU, C. ; WU, J.: Scalable Routing in Delay Tolerant Networks. In: *Proceedings of the 8th ACM international Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing*, ACM, 2007. – ISBN 978–1–59593–684–4, S. 51–60

- [245] LIU, J. ; LI, B.: Distributed Topology Control in Wireless Sensor Networks with Asymmetric Links. In: *Proceedings of the Global Telecommunications Conference (GLOBECOM), Wireless Communications Symposium*, IEEE Computer Society, 2003, S. 1257–1262
- [246] LIU, X. ; ZHAO, H. ; LI, X.: EPC: Energy-Aware Probability-Based Clustering Algorithm for Correlated Data Gathering in Wireless Sensor Networks. In: *Proceedings of the International Conference on Advanced Information Networking and Applications*, IEEE Computer Society, march 2011. – ISSN 1550–445X, S. 419–426
- [247] LOGSDON, T.: The Navstar Global Positioning System. In: *Van Nostrand Reinhold* (1999)
- [248] LOPEZ, A.R.: Performance Predictions for Cellular Switched-Beam Intelligent Antenna Systems. In: *IEEE Communications Magazine* , Vol. 34 (1996), October, Nr. 10, S. 152–154. – ISSN 0163–6804
- [249] LUNZE, J.: *Regelungstechnik 1: Systemtheoretische Grundlagen, Analyse und Entwurf einschleifiger Regelungen*. Springer, 2010. – ISBN 978–3642138072
- [250] MADAN, R. ; CUI, S. ; LALL, S. ; GOLDSMITH, A.: Cross-Layer Design for Lifetime Maximization in Interference-Limited Wireless Sensor Networks. In: *Proceedings of the 24th Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies Bd. 3*, IEEE Computer Society, March 2005. – ISSN 0743–166X, S. 1964–1975
- [251] MADDEN, S. ; FRANKLIN, M.J. ; HELLERSTEIN, J.M. ; HONG, W.: TAG: a Tiny Aggregation Service for Ad-Hoc Sensor Networks. In: *SIGOPS Oper. Syst. Rev.* , Vol. 36 (2002), December, S. 131–146. – ISSN 0163–5980
- [252] MADDEN, S. ; HELLERSTEIN, J.M. ; HONG, W.: *TinyDB: In-Network Query Processing in TinyOS*. <http://telegraph.cs.berkeley.edu/tinydb>, September 2003. – [Online; abgerufen 03-Mai-2012]
- [253] MADDEN, S. ; SZEWCZYK, R. ; FRANKLIN, M.J. ; CULLER, D.: Supporting Aggregate Queries Over Ad-Hoc Wireless Sensor Networks. In: *Proceedings Fourth IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications* (2002), S. 49–58
- [254] MAHAJAN, A. ; POTNIS, N. ; GOPALAN, K. ; WANG, A.A.: Urban mobility models for VANETs. In: *Proceedings of the 2nd Workshop on Next Generation Wireless Networks*, 2006
- [255] MAHALIK, N.P.: *Sensor Networks and Configuration - Fundamentals, Standards, Platforms and Applications*. Springer, 2007. – ISBN 978–3–540–37364–3
- [256] MAHGOUB, I. ; ILYAS, M.: *Sensor Network Protocols*. CRC Press / informa Taylor and Francis Group, 2006. – ISBN 978–0–8493–7036–6
- [257] MAHLMANN, P. ; SCHINDELHAUER, C.: *Peer-to-Peer Netzwerke: Algorithmen Und Methoden*. Springer, 2007. – ISBN 978–3540339915
- [258] MALKIN, G.: *Request for Comments (RFC) 1983 - Internet Users' Glossary*. <http://www.ietf.org/rfc/rfc1983.txt>, August 1996. – [Online; abgerufen 15-Mai-2011]

- [259] MAMEI, M. ; VASIRANI, M. ; ZAMBONELLI, F.: Experiments Of Morphogenesis In Swarms Of Simple Mobile Robots. In: *Applied Artificial Intelligence* , Vol. 18 (2004), Nr. 9-10, S. 903–919
- [260] MANJESHWAR, A. ; AGRAWAL, D. P.: TEEN: A Routing Protocol for Enhanced Efficiency in Wireless Sensor Networks. In: *Proceedings of the 15th International Parallel Distributed Processing Symposium*, IEEE Computer Society, April 2001. – ISSN 1530–2075, S. 2009–2015
- [261] MANJESHWAR, A. ; AGRAWAL, D. P.: APTEEN: A Hybrid Protocol for Efficient Routing and Comprehensive Information Retrieval in Wireless Sensor Networks. In: *Proceedings International Parallel and Distributed Processing Symposium*, IEEE Computer Society, 2002, S. 195–202
- [262] MANTIS GROUP: *Multimodal System for NeTworks of In-Situ Wireless Sensors*. <http://mantis.cs.colorado.edu/>, 2009. – [Online; abgerufen 24-August-2012]
- [263] MAO, G. ; FIDAN, B.: *Localization Algorithms and Strategies for Wireless Sensor Networks*. Information Science Reference, 2009. – ISBN 978–1–60566–396–8
- [264] MARK, S. von d. ; KAMP, R. ; HUBER, M. ; BOECK, G.: Three Stage Wakeup Scheme for Sensor Networks. In: *Proceedings of the International Conference on Microwave and Optoelectronics, SBMO/IEEE MTT-S*, IEEE Computer Society, July 2005. – ISBN 0–7803–9341–4, S. 205–208
- [265] MARTINEZ, K. ; ONG, R. ; HART, J.: Glacsweb: A Sensor Network for Hostile Environments. In: *Proceedings of the International Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks*, IEEE Computer Society, October 2004, S. 81–87
- [266] McDONALD, P. ; GERAGHTY, D. ; HUMPHREYS, I. ; FARRELL, S. ; CAHILL, V.: Sensor Network with Delay Tolerance (SeNDT). In: *Proceedings of 16th International Conference on Computer Communications and Networks*, 2007. – ISSN 1095–2055, S. 1333–1338
- [267] MEINIG, C. ; STALIN, S.E. ; NAKAMURA, A.I. ; GONZALEZ, F. ; MILBURN, H.B.: Technology Developments in Real-Time Tsunami Measuring, Monitoring and Forecasting. In: *Proceedings of the MTS (Band 29)*, IEEE Computer Society, 2005, S. 1673–1679
- [268] MELODIA, T. ; POMPILI, D. ; AKYILDIZ, I.F.: On the Interdependence of Distributed Topology Control and Geographical Routing in Ad Hoc and Sensor Networks. In: *Selected Areas in Communications* , Vol. 23 (2005), March, Nr. 3, S. 520–532. – ISSN 0733–8716
- [269] MELODIA, T. ; POMPILI, D. ; AKYILDIZ, I.F.: Handling Mobility in Wireless Sensor and Actor Networks. In: *Mobile Computing* , Vol. 9 (2010), February, Nr. 2, S. 160–173. – ISSN 1536–1233
- [270] MILLER, M.J. ; VAIDYA, N.H.: A MAC Protocol to Reduce Sensor Network Energy Consumption Using a Wakeup Radio. In: *Mobile Computing* , Vol. 4 (2005), June, S. 228–242

- [271] MILLS, D.L.: *Request for Comments (RFC) 958 - Network Time Protocol*. <http://tools.ietf.org/rfc/rfc958.txt>, September 1985. – [Online; abgerufen 15-Mai-2011]
- [272] MUELLER, S. ; TSANG, R.P. ; GHOSAL, Dipak: *Multipath Routing in Mobile Ad Hoc Networks: Issues and Challenges*. Springer Verlag, 2004. – ISBN 978-3-540-21945-3
- [273] MURTHY, C. Siva R. ; MANOJ, B.S.: *Ad Hoc Wireless Networks*. Prentice Hall International, 2004. – ISBN ISBN 0-13-147023-X
- [274] NANETT GERMANY: *Nano System Integration Network of Excellence*. <http://nanett.org>. Version: 2011. – [Online; abgerufen 24-August-2012]
- [275] NANOTRON TECHNOLOGIES GMBH: *nanoPAN & nanaLOC*. <http://www.nanotron.com>, 2012. – [Online; abgerufen 01-Juli-2011]
- [276] NAOUMOV, V. ; GROSS, T.: Simulation of Large Ad Hoc Networks. In: *Proceedings of the 6th ACM International Workshop on Modeling Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWIM)*, ACM, 2003. – ISBN 1-58113-766-4, S. 50-57
- [277] NASIPURI, A. ; DAS, S.: Demand Multipath Routing for Mobile Ad Hoc Networks. In: *Proceedings of the 8th International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN)*, IEEE Computer Society, October 1999, S. 64-70
- [278] NASIPURI, A. ; LI, K. ; SAPPIDI, U. R.: Power Consumption and Throughput in Mobile Ad Hoc Networks using Directional Antennas. In: *Proceedings of the International Conference on Computer Communication and Networks (ICCCN)*, IEEE Computer Society, October 2002. – ISBN 0-7803-7553-X, S. 620-626
- [279] NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION: *NASA*. <http://www.nasa.gov/>, 2012. – [Online; abgerufen 3-September-2012]
- [280] NAVAS, J.C. ; T. IMIELINSKI, Tomasz: GeoCast - Geographic Addressing and Routing. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Mobile Computing and Networking*, ACM, 1997. – ISBN 0-89791-988-2, S. 66-76
- [281] NAZIR, B. ; HASBULLAH, H.: Energy Balanced Clustering in Wireless Sensor Network. In: *Proceedings of the International Symposium on Information Technology (ITSim) Bd. 2*, IEEE Computer Society, June 2010. – ISSN 2155-897, S. 569-574
- [282] NEUGEBAUER, M.: *Energieeffiziente Anpassung des Arbeitszyklus in drahtlosen Sensornetzen*, Technische Universität Dresden, Diss., 2006
- [283] NI, S.-Y. ; TSENG, Y.-C. ; CHEN, Y.-S. ; SHEU, J.-P.: The Broadcast Storm Problem in a Mobile Ad Hoc Network. In: *Proceedings of the 5th international conference on Mobile computing and networking*, ACM, 1999. – ISBN 1-58113-142-9, S. 151-162
- [284] NICULESCU, D. ; NATH, B.: Ad Hoc Positioning System (APS). In: *Proceedings of the Global Telecommunications Conference (GLOBECOM)*, IEEE Computer Society, November 2001. – ISBN 0-7803-7206-9, S. 2926-2931
- [285] NICULESCU, D. ; NATH, B.: Ad Hoc Positioning System (APS) using AOA. In: *Proceedings of the Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and*

- Communications Societies (INFOCOM)* Bd. 3, IEEE Computer Society, April 2003. – ISBN 0-7803-7752-4, S. 1734-1743
- [286] OPPERMAN, I. ; HAMALAINEN, M. ; IINATTI, J.: *UWB - Theory and Applications*. John Wiley & Sons, 2004. – ISBN 978-0-470-86917-8
- [287] OTIS, B. ; RABAEY, J.: *Ultra-Low Power Wireless Technologies for Sensor Networks*. Springer, 2007. – ISBN 978-0-387-30930-9
- [288] OTIS, B.P.: *Ultra-Low Power Wireless Technologies for Sensor Networks*, University of California, Berkeley, Diss., 2005
- [289] PAQUEREAU, L. ; HELVIK, B.E.: A Module-Based Wireless Node for NS-2. In: *Proceeding from the 2006 Workshop on NS-2: the IP Network Simulator (WNS2)*, ACM, 2006. – ISBN 1-59593-508-8, S. 4
- [290] PARK, V.D. ; CORSON, M.S.: A Highly Adaptive Distributed Routing Algorithm for Mobile Wireless Networks. In: *Proceedings of the Conference on Computer Communications (INFOCOM)* Bd. 3, IEEE Computer Society, April 1997, S. 1405-1413
- [291] PELISSIER, M. ; MORCHE, D. ; VINCENT, P.: Super-Regenerative Architecture for UWB Pulse Detection: From Theory to RF Front-End Design. In: *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, Vol. 56 (2009), July, Nr. 7
- [292] PERKINS, C.E. ; BHAGWAT, P.: Highly Dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector Routing (DSDV) for Mobile Computers. In: *Proceedings of the SIGCOMM 94*, ACM, 1994. – ISBN 0-89791-682-4, S. 234-244
- [293] PHAM, H. ; JHA, S.: An Adaptive Mobility-Aware MAC Protocol for Sensor Networks (MS-MAC). In: *Proceedings of the International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems*, IEEE Computer Society, October 2004, S. 558-560
- [294] PLETCHER, N. ; GAMBINI, S. ; RABAEY, J.: A 65 μ W, 1.9 GHz RF to Digital Baseband Wakeup Receiver for Wireless Sensor Nodes. In: *Proceedings of the Custom Intergrated Circuits Conference (CICC)*, IEEE Computer Society, 2007
- [295] PLETCHER, N.M.: *Ultra-Low Power Wake-Up Receivers for Wireless Sensor Networks*, University of California, Berkeley, Diss., 2008
- [296] PLETCHER, N.M. ; GAMBINI, S. ; RABAEY, J.M.: A 2GHz 52 μ W Wake-Up Receiver with -72dBm Sensitivity Using Uncertain-IF Architecture. In: *Proceedings of the International Solid-State Circuits Conference*. San Diego, USA : IEEE Computer Society, 2008. – ISBN 978-1-4244-2011-7, S. 524-525
- [297] POLASTRE, J. ; SZEWCZYK, R. ; CULLER, D.: Telos: Enabling Ultra-Low Power Wireless Research. In: *Proceedings of the 4th International Symposium in Information Processing in Sensor Networks*, IEEE Computer Society, April 2005, S. 364-369
- [298] PON, R. ; KANSAL, A. ; LIU, D. ; RAHIMI, M. ; SHIRACHI, L. ; KAISER, W.J. ; POTTIE, G.J. ; SRIVASTAVA, M. ; SUKHATME, G. ; ESTRIN, D.: Networked Infomechanical Systems (NIMS): Next Generation Sensor Networks for Environmental Monitoring. In: *Proceedings of the MTT-S International Microwave Symposium Digest*, IEEE Computer Society, June 2005. – ISSN 01490-645X, S. 373-376

- [299] POSTEL, J.: *Request for Comments (RFC) 768 - User Datagram Protocol*. <http://www.ietf.org/rfc/rfc768.txt>, August 1980. – [Online; abgerufen 5-Juni-2011]
- [300] POSTEL, J.: *Request for Comments (RFC) 793 - Transmission Control Protocol*. <http://www.ietf.org/rfc/rfc793.txt>, September 1981. – [Online; abgerufen 1-April-2012]
- [301] PREHOFER, C. ; BETTSTETTER, C.: Self-organization in communication networks: principles and design paradigms. In: *Communications Magazine* , Vol. 43 (2005), Nr. 7, S. 78–85. – ISSN 0163–6804
- [302] PRIYA, S. ; INMAN, D.J.: *Energy Harvesting Technologies*. Springer Verlag, 2009. – ISBN 978–0387764634
- [303] PRIYANTHA, N.B. ; CHAKRABORTY, A. ; BALAKRISHNAN, H.: The Cricket Location-Support System. In: *Proceedings of the 6th International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM)*, ACM, August 2000, S. 32–43
- [304] PROJECT, Huggle: *An innovative Paradigm for Autonomic Opportunistic Communication*. <http://huggleproject.org/>, 2010. – [Online; abgerufen 01-März-2012]
- [305] QI, H. ; IYENGAR, S. S. ; CHAKRABARTY, K.: Distributed Sensor Fusion - A Review Of Recent Research. In: *Journal of the Franklin Institute* , Vol. 338 (2001), Nr. 1, S. 655–668
- [306] QI, H. ; WANG, X. ; IYENGAR, S.S.: Multisensor Data Fusion in Distributed Sensor Networks Using Mobile Agents. In: *Proceedings of 5th International Conference on Information Fusion*, IEEE Computer Society, 2001, S. 11–16
- [307] QI, H. ; XU, YY. ; WANG, X.: Mobile-Agent-Based Collaborative Signal and Information Processing in Sensor Networks. In: *Proceedings of the IEEE* , Vol. 91 (2003), August, Nr. 8, S. 1172–1183. – ISSN 0018–9219
- [308] QINETIQ: An Evaluation of Software Defined Radio - An Overview / QinetiQ. 2006 (PUB0603673). – Forschungsbericht. –
- [309] RABAEY, J. ; AMMER, J. ; SILVA, J.L. da ; PATEL, D.: PicoRadio: Ad-Hoc Wireless Networking of Ubiquitous Low-Energy Sensor/Monitor Nodes. In: *Proceedings of the IEEE Computer Society Workshop on VLSI*, IEEE Computer Society, 2000, S. 9–12
- [310] RAHIMI, M. ; SHAH, H. ; SUKHATME, G.S. ; HEIDEMAN, J. ; ESTRIN, D.: Studying the Feasibility of Energy Harvesting in a Mobile Sensor Network. In: *Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation* Bd. 1, 2003. – ISSN 1050–4729, S. 19–24
- [311] RAJENDRAN, V. ; OBRACZKA, K. ; GARCIA-LUNA-ACEVES, J.J.: Energy-Efficient, Collision-Free Medium Access Control for Wireless Sensor Networks. In: *Proceedings of the International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, ACM, November 2003, S. 181–192
- [312] RAMACHANDRAN, U. ; KUMAR, R. ; WOLENETZ, M. ; COOPER, B. ; AGARWALLA, B. ; SHIN, J. ; HUTTO, P. ; PAUL, A.: *Dynamic Data Fusion for Future Sensor Networks*. College of Computing, Georgia Institute of Technology, 2006

- [313] RAMANATHAN, R. ; ROSALES-HAIN, R.: Topology Control of Multihop Wireless Networks Using Transmit Power Adjustment. In: *Proceedings of the International Conference on Computer Communications*, IEEE Computer Society, 2000, S. 404–413
- [314] RAMANATHAN, R. ; ROSALES-HAIN, R.: Topology Control of Multihop Wireless Networks Using Transmit Power Adjustment. In: *Proceedings of the 19th International Conference of the Computer and Communications Societies (INFOCOM)*, IEEE Computer Society, 2002, S. 404–413
- [315] RAZAVILAR, J. ; RASHID-FARROKHI, F. ; LIU, K.J.R.: Software Radio Architecture with Smart Antennas: A Tutorial on Algorithms and Complexity. In: *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* , Vol. 17 (1999), April, Nr. 4, S. 662–676. – ISSN 0733–8716
- [316] REINISCH, C. ; KASTNER, W. ; NEUGSCHWANDTNER, G. ; GRANZER, W.: Wireless Technologies in Home and Building Automation. In: *Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Informatics*, IEEE Computer Society, 2007, S. 93–98
- [317] REKHTER, Y. ; WATSON, T.J. ; LI, T.: *Request for Comments (RFC) 1771 - A Border Gateway Protocol 4 (BGP-4)*. <http://tools.ietf.org/rfc/rfc1771.txt>, March 1995. – [Online; abgerufen 15-Mai-2011]
- [318] RILEY, G. ; PARK, A.: *PDNS - Parallel/Distributed NS*. <http://www.cc.gatech.edu/computing/compass/pdns/index.html>, 2004. – [Online; abgerufen 28-September-2011]
- [319] RILEY, G.F. ; FUJIMOTO, R.M. ; AMMAR, M.H.: A Generic Framework for Parallelization of Network Simulations. In: *Proceedings of the 7th International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunication Systems* (1999), S. 128–135
- [320] ROYER, E.M. ; TOH, C.-K.: A Review of Current Routing Protocols for Ad Hoc Mobile Wireless Networks. In: *IEEE Personal Communications* , Vol. 6 (1999), April, Nr. 2, S. 46–55
- [321] RUDLOFF, A. ; LAUTERJUNG, J. ; MÜNCH, U. ; TINTI, S.: The GITEWS Project (German-Indonesian Tsunami Early Warning System). In: *Natural Hazards and Earth System Sciences (NHES)* , Vol. 9 (2009), Nr. 4. – ISSN 1381–1382
- [322] RYU, J.-H. ; SONG, S. ; CHO, D.-H.: New Clustering Schemes for Energy Conservation in Two-tiered Mobile Ad Hoc Networks. In: *Vehicular Technology* , Vol. 51 (2002), November, Nr. 6, S. 1661–1668. – ISSN 0018–9545
- [323] SAHA, A.K. ; JOHNSON, D.B.: Routing Improvement using Directional Antennas in Mobile Ad Hoc Networks. In: *Proceedings of the Global Telecommunications Conference (GLOBECOM) Bd.* , Vol. 5, IEEE Computer Society, November 2004. – ISBN 0–7803–8794–5, S. 2902–2908
- [324] SAHA, S.: *TeNS - The Enhanced Network Simulator*. <http://www.cse.iitk.ac.in/users/braman/tens/>, 2008. – [Online; abgerufen 05-Dezember-2011]
- [325] SALTER, J. ; REED, D. ; CLARK, D.: End to End Arguments in System Design. In: *ACM Transactions on Computer Systems* , Vol. 2 (1984), Nr. 4, S. 277–288

- [326] SANTI, P.: Topology Control in Wireless Ad Hoc and Sensor Networks. In: *ACM Computing Surveys, Vol 37, Number 2* (2005)
- [327] SANTI, P.: *Topology Control in Wireless Ad Hoc and Sensor Networks*. Wiley and Sons, 2005. – ISBN 978-0-470-09453-2
- [328] SARKAR, S.K. ; BASAVARAJU, T.G. ; PUTTAMADAPPA, C.: *Ad Hoc Mobile Wireless Networks: Principles, Protocols and Applications*. Auerbach Publications, 2007. – ISBN 978-1420062212
- [329] SAVARESE, C. ; RABAEY, J. ; BEUTEL, J.: Locationing in Distributed Ad-hoc Wireless Sensor Networks. In: *Proceedings of the International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP)*, IEEE Computer Society, May 2001, S. 2037–2040
- [330] SAVARESE, C. ; RABAEY, J. ; LANGENDOEN, K.: Robust Positioning Algorithms for Distributed Ad-Hoc Wireless Sensor Networks. In: *Proceedings of the USENIX Technical Conference*, USENIX Association, 2002. – ISBN 1-880446-00-6, S. 317–327
- [331] SAVVIDES, A. ; SRIVASTAVA, M.B.: A Distributed Computation Platform for Wireless Embedded Sensing. In: *Proceedings of the International Conference on Computer Design: VLSI in Computers and Processors*, IEEE Computer Society, 2002. – ISSN 1063-6404, S. 220–225
- [332] SCALABLE NETWORK TECHNOLOGIES (SNT): *QualNet*. <http://www.qualnet.com>, 2008. – [Online; abgerufen 01-Dezember-2011]
- [333] SCHILLER, J. ; LIERS, A. ; RITTER, H. ; WINTER, R. ; VOIGT, T.: ScatterWeb - Low Power Sensor Nodes and Energy Aware Routing. In: *Proceedings of the 38th Hawaii International Conference on System Sciences*, IEEE Computer Society, January 2005. – ISSN 1530-1605, S. 286c
- [334] SCHMECK, H.: Organic Computing - A New Vision for Distributed Embedded Systems. In: *Proceedings of the 8th International Symposium on Object-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC)*, IEEE Computer Society, May 2005. – ISBN 0-7695-2356-0, S. 201–203
- [335] SCHURGERS, C. ; TSIATSI, V. ; GANERIWAL, S. ; SRIVASTAVA, M.: Optimizing Sensor Networks in the Energy-Latency-Density Design Space. In: *IEEE Trans. Mobile Computing* , Vol. 1 (2002), Nr. 1, S. 70–80
- [336] SCOTT, K. ; BURLEIGH, S.: *Request for Comments (RFC) 5050 - Bundle Protocol Specification*. <http://www.ietf.org/rfc/rfc5050.txt>, November 2007. – [Online; abgerufen 15-Mai-2012]
- [337] SEADA, K. ; ZUNIGA, M. ; HELMY, A. ; KRISHNAMACHARI, B.: Energy-Efficient Forwarding Strategies for Geographic Routing in Lossy Wireless Sensor Networks. In: *Proceedings of the ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SENSYS)*, ACM, November 2004. – ISBN 1-58113-879-2, S. 108–121
- [338] SEKERCIOGLU, Y.A. ; VARGA, A. ; EGAN, G.K.: Parallel Simulation made easy with OMNeT++. In: *Proceedings of the 15th European Simulation Symposium (ESS2003)*, The Society for Computer Simulation International, October 2003

- [339] SERUGENDO, G.D.M. ; GLEIZES, M.P. ; KARAGEORGOS, A.: Self-organisation and emergence in MAS: An overview. In: *Informatica* , Vol. 30 (2006), Nr. 1, S. 45–54
- [340] SETH, A. ; KESHAV, S.: Practical Security for Disconnected Nodes. In: *Proceedings of the International Workshop on Secure Network Protocols (NPSec)*, IEEE Computer Society, 2005
- [341] SHEIKH, K. ; GESBERT, D. ; GORE, D. ; PAULRAJ, A.: Smart Antennas for Broadband Wireless Access Networks. In: *IEEE Communications Magazine* (1999), November, S. 100–105. – ISSN 0163–6804
- [342] SHEN, C.-C. ; JAIKAE0, C.: Ad Hoc Multicast Routing Algorithm with Swarm Intelligence. In: *Mobile Networks and Applications* , Vol. 10 (2005), S. 47–59
- [343] SHIH, E. ; BAHL, P. ; SINCLAIR, M.: Wake on Wireless: An Event Driven Energy Saving Strategy for Battery Operated Devices. In: *Proceedings of the 8th International Conference on Mobile Computing and Networking*, ACM, 2002. – ISBN 1–58113–486–X, S. 160–171
- [344] SHOREY, R. ; ANANDA, A. ; CHAN, M.C. ; OOI, W.T.: *Mobile, Wireless, and Sensor Networks - Technology, Applications, and Future Directions*. IEEE Press / Wiley and Sons, 2006. – ISBN 978–0–471–71816–1
- [345] SHU, F. ; HALGAMUGE, M.N. ; CHEN, W.: Building Automation Systems Using Wireless Sensor Networks: Radio Characteristics and Energy Efficient Communication Protocols. In: *EJSE Special Issue: Sensor Network on Building Monitoring: From Theory to Real Application* (2009)
- [346] SINGH, S. ; RAGHAVENDRA, C.S.: PAMAS - Power Aware Multi-Access Protocol with Signalling for Ad Hoc Networks. In: *SIGCOMM Computer Communication* , Vol. 28 (1998), July, Nr. 3, S. 5–26. – ISSN 0146–4833
- [347] SINGH, S. ; WOO, M. ; RAGHAVENDRA, C.S.: Power-Aware Routing in Mobile Ad Hoc Networks. In: *Proceedings of the 4th International Conference on Mobile Computing and Networking*, IEEE Computer Society, 1998. – ISBN 1–58113–035–X, S. 181–190
- [348] SIVRIKAYA, F. ; YENER, B.: Time Synchronization in Sensor Networks: A Survey. In: *IEEE Network Vol. 18(4)* (2004), S. 45–50
- [349] SIWIAK, K. ; MCKEOWN, D.: *Ultra-Wideband Radio Technology*. John Wiley & Sons, 2004. – ISBN 978–0–470–85931–5
- [350] SLIJEPCEVIC, S. ; POTKONJAK, M.: Power Efficient Organization of Wireless Sensor Networks. In: *Proceedings of the International Conference on Communications (ICC)*, IEEE Computer Society, June 2001, S. 472–476
- [351] SMALL, T. ; HAAS, Z.J.: Resource and Performance Tradeoffs in Delay-Tolerant Wireless Networks. In: *Proceedings of the ACM SIGCOMM workshop on Delay-Tolerant Networking*, ACM, 2005. – ISBN 1–59593–026–4, S. 260–267
- [352] SOHRABI, K. ; AILAWADHI, V. ; GAO, J. ; POTTIE, G.: Protocols for Self Organization of a Wireless Sensor Network. In: *IEEE Personal Communication Magazine* , Vol. 7 (2000), October, S. 16–27

- [353] SOHRABY, K. ; MINOLI, D. ; ZNATI, T.: *Wireless Sensor Networks - Technology, Protocols, and Applications*. Wiley and Sons, 2007. – ISBN 978–0–471–74300–2
- [354] SONG, L. ; HATZINAKOS, D.: A Cross-Layer Architecture of Wireless Sensor Networks for Target Tracking. In: *IEEE/ACM Trans. Netw.* , Vol. 15 (2007), February, S. 145–158. – ISSN 1063–6692
- [355] SRIVASTAVA, G. ; BOUSTEAD, P. ; CHICHARO, J.F.: A Comparison of Topology Control Algorithms for Ad-Hoc Networks. In: *Proceedings of the Australian Telecommunications, Networks and Applications Conference (ATNAC)*, Springer Verlag, 2003
- [356] STEVENS, R.: *TCP/IP Illustrated. Volume 1. The Protocols*. Addison-Wesley, 1994. – ISBN 0–2016–3346–9
- [357] STEVENS, R.: *TCP/IP Illustrated. Volume 2. The Implementation*. Addison-Wesley, 1994. – ISBN 0–2016–3354–X
- [358] STOJMENOVIC, I.: *Handbook of Sensor Networks - Algorithms and Architectures*. Wiley and Sons, 2005. – ISBN 978–0–471–68472–5
- [359] STOJMENOVIC, I. ; LIN, X.: Power-Aware Localized Routing in Wireless Networks. In: *Parallel and Distributed Systems* , Vol. 12 (2001), November, Nr. 11, S. 1122–1133. – ISSN 1045–9219
- [360] SU, P.: Delay Measurement Time Synchronization for Wireless Sensor Networks / Intel Research Berkeley. 2003 (IRB-TR-03-013). – Forschungsbericht. –
- [361] SU, W. ; AKYILDIZ, I.F.: Time-Diffusion Synchronization Protocol for Wireless Sensor Networks. In: *IEEE/ACM Transactions on Networking* , Vol. 13 (2005), April, Nr. 2, S. 384–397
- [362] SUBRAMANIAN, R. ; FEKRI, F.: Sleep Scheduling and Lifetime Maximization in Sensor Networks: Fundamental Limits and Optimal Solutions. In: *Proceedings of the 5th International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN)*, ACM, 2006, S. 218–225
- [363] SUNDARARAMAN, B. ; BUY, U. ; KSHEMKALYANI, A.D.: Clock Synchronization for Wireless Sensor Networks: A Survey. In: *Ad Hoc Networks* 3(3) (2005), S. 281–323
- [364] SUNDRESH, S. ; KIM, W. ; AGHA, G.: SENS: A Sensor, Environment and Network Simulator. In: *Proceedings of the 37th annual symposium on Simulation (ANSS)*, IEEE Computer Society, 2004. – ISBN 0–7695–2110–X, S. 221
- [365] SWAMI, A. ; ZHAO, Q. ; HONG, Y.-W. ; TONG, L.: *Wireless Sensor Networks - Signal Processing and Communications Perspectives*. Wiley and Sons, 2007. – ISBN 978–0–470–03557–3
- [366] TARIQUE, M. ; TEPE, K.E. ; NASERIAN, M.: Energy Saving Dynamic Source Routing for Ad Hoc Wireless Networks. In: *Proceedings of the 3rd International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks*, 2005, S. 305–310

- [367] TERWILLIGER, M. ; GUPTA, A. ; BHUSE, V. ; KAMAL, Z.H. ; SALAHUDDIN, M.A.: A Localization System using Wireless Network Sensors: A Comparison of Two Techniques. In: *Proceedings of the First Workshop on Positioning, Navigation and Communication (WPNC2004)*, Shaker Verlag, March 2004. – ISBN 3–8322–2553–6
- [368] TERWILLIGER, M. ; GUPTA, A. ; KHOKHAR, A. ; GREENWOOD, G.: Localization using Evolution Strategies in Sensornets. In: *Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation* Bd. 1, IEEE Computer Society, September 2005. – ISBN 0–7803–9363–5, S. 322–327
- [369] TESTBED, UMass D.: *UMass DieselNet*. <http://prisms.cs.umass.edu/dome/>, 2012. – [Online; abgerufen 01-August-2012]
- [370] TIOMKIN, Yuri: *TNKernel real-time system*. <http://www.tnkernel.com>, 2009. – [Online; abgerufen 10-June-2012]
- [371] TOH, C.: *Topology Control in Wireless Sensor Networks*. J. Wiley & Sons, 2005
- [372] TOH, C.-K. ; VASSILIOU, V. ; GUICHAL, G. ; SHIH, C.-H.: MARCH: A Medium Access Control Protocol for Multihop Wireless Ad Hoc Networks. In: *Proceedings of the 21st Century Military Communications Conference* Bd. 1, IEEE Computer Society, 2000, S. 512–516
- [373] TOH, C.K.: A Novel Distributed Routing Protocol To Support Ad hoc Mobile Computing. In: *Proceedings of the 15th International Phoenix Conference on Computers and Communications*, IEEE Computer Society, March 1996, S. 480–486
- [374] TOH, C.K.: *Ad Hoc Wireless Networks: Protocols and Systems*. Prentice Hall PTR, 2001. – ISBN 0130078174
- [375] TOKGOZ, Y. ; ACAMPORA, A.: Improving Connectivity and Power Efficiency in Wireless Ad Hoc Networks Through Agent Nodes. In: *Mobile Adhoc and Sensor Systems Conference, 2005. IEEE International Conference on*, 2005, S. 756–761
- [376] TSENG, Y.-C. ; LI, Y.-F. ; CHANG, Y.-C.: On Route Lifetime in Multihop Mobile Ad Hoc Networks. In: *IEEE Transactions on Mobile Computing* , Vol. 2 (2003), October, Nr. 4
- [377] TSENG, Y.-C. ; NI, S.-Y. ; SHIH, E.-Y.: Adaptive Approaches to Relieving Broadcast Storms in a Wireless Multihop Mobile Ad Hoc Network. In: *Transactions on Computers* , Vol. 52 (2003), Nr. 5, S. 545–557. – ISSN 0018–9340
- [378] TSOULOS, G.V.: Smart Antennas For Mobile Communications Systems. In: *IEEE Electronics & Communications Engineering Journal* , Vol. 11 (1999), April, Nr. 2, S. 84–94. – ISSN 0954–0695
- [379] UNIVERSITÄT, Berkeley: *Technology and Infrastructure for Emerging Regions*. <http://tier.cs.berkeley.edu/drupal/>, 2012. – [Online; abgerufen 01-März-2012]
- [380] UNIVERSITY OF CALIFORNIA BERKELEY: *TinyOS - The Open-Source Operating System Designed for Wireless, Embedded Sensor Networks*. <http://www.tinyos.net>, 2009. – [Online; abgerufen 10-June-2012]

- [381] VAIDYA, K. ; CHATTERJEE, M. ; PRADHAN, D.K.: A Cluster-based Approach for Routing in Dynamic Networks. In: *ACM SIGCOMM Computer Communication Review* , Vol. 27 (1997), S. 49–65
- [382] VARGA, A.: *The OMNeT++ Discrete Event Simulation System*. <http://www.omnetpp.org>, 1999. – [Online; abgerufen 09-Dezember-2011]
- [383] VENUTURUMILLI, A. ; MINAI, A.: Obtaining Robust Wireless Sensor Networks through Self-Organization of Heterogenous Connectivity. In: *InterJournal Complex Systems* (2006), S. 1823 ff.
- [384] VERDONE, R. ; DARDARI, D. ; MAZZINI, G. ; CONTI, A.: *Wireless Sensor and Actuator Networks - Technologies, Analysis and Design*. Academic Press, 2007. – ISBN 978–0–123–72539–4
- [385] WANG, L. ; SHU, Y. ; DONG, M. ; YANG, O.W.: Adaptive Multipath Source Routing in Ad Hoc Networks. In: *Proceedings of the International Conference on Communications* Bd. 3, IEEE Computer Society, June 2001. – ISBN 0–7803–7097–1, S. 867–871
- [386] WANG, S.Y. ; LIN, Y.B.: NCTUns Network Simulation and Emulation for Wireless Resource Management. In: *Wiley Wireless Communications and Mobile Computing* , Vol. 5 (2005), December, Nr. 8, S. 899–916
- [387] WANG, Y. ; LI, X.-Y. ; SONG, W.-Z. ; HUANG, M. ; DAHLBERG, T.A.: Energy-Efficient Localized Routing in Random Multihop Wireless Networks. In: *Parallel and Distributed Systems* , Vol. 22 (2011), August, Nr. 8, S. 1249–1257. – ISSN 1045–9219
- [388] WANT, R. ; HOPPER, A. ; FALCAO, V. ; GIBBONS, J.: The Active Badge Location System. In: *ACM Trans. Inf. Syst.* , Vol. 10 (1992), Nr. 1, S. 91–102. – ISSN 1046–8188
- [389] WATTENHOFER, R. ; LI, L. ; BAHL, P. ; WANG, Y.-M.: Distributed Topology Control for Power Efficient Operation in Multihop Wireless Ad Hoc Networks. In: *Proceedings of the 20th Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies* Bd. 3, 2001, S. 1388–1397
- [390] WEI, D. ; CHAN, H.A.: Route Optimization for Energy Conservation in Ad Hoc Networks. In: *Proceedings of the International Conference on Communication Technology*, 2006, S. 1–4
- [391] WELTER, H.: *Heterogene Netze - Einführung in Standardarchitekturen, Protokolle, Verwaltung und Sicherheit*. Addison-Wesley, 1993. – ISBN 3–89319–499–1
- [392] WHITEHOUSE, C.D.: The Design of Calamari: an Ad-hoc Localization System for Sensor Networks. In: *University of California at Berkeley, USA* (2002)
- [393] WHITMAN, E.C.: SOSUS The Secret Weapon of Undersea Surveillance. In: *Undersea Warfare* , Vol. 7 (2005), December, Nr. 2. – ISSN 1554–0146
- [394] WIBREE: *Ultra-Low Power Radio Technology for Small Devices*. http://www.wibree.com/technology/Wibree_2Pager.pdf, 2007. – [Online; abgerufen 15-Mai-2011]

- [395] WIESELTHIER, J.E. ; NGUYEN, G.D. ; EPHREMIDES, A.: Energy-Aware Wireless Networking with Directional Antennas: The Case of Session-based Broadcasting and Multicasting. In: *Mobile Computing* , Vol. 1 (2002), Nr. 3, S. 176–191. – ISSN 1536–1233
- [396] WINTER, R. ; SCHILLER, J. ; NIKAEIN, N. ; BONNET, C.: CrossTalk: A Data Dissemination-based Crosslayer Architecture for Mobile Ad-hoc Networks. In: *Proceedings of the Applications and Services in Wireless Networks Workshop*, IEEE Computer Society, 2005
- [397] WOESNER, H. ; EBERT, J.-P. ; SCHLAGER, M. ; WOLISZ, A.: Power-Saving Mechanisms in Emerging Standards for Wireless LANs: the MAC Level Perspective. In: *IEEE Personal Communications* , Vol. 5 (1998), June, Nr. 3, S. 40–48. – ISSN 1070–9916
- [398] WOLF, T. D. ; HOLVOET, T.: Emergence Versus Self-Organisation: Different Concepts but Promising When Combined. In: *S. Brueckner et al. (Eds.): ESOA 2004* (2005), S. 1–15
- [399] WOLF, W.: *High-Performance Embedded Computing: Architectures, Applications, and Methodologies*. Morgan Kaufmann, 2007. – ISBN 978–0–12–369485–0
- [400] WOO, K. ; YU, C. ; LEE, D. ; YOUN, H.Y. ; LEE, B.: Non-blocking, Localized Routing Algorithm for Balanced Energy Consumption in Mobile Ad Hoc Networks. In: *Proceedings of the 9th International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunication Systems*, 2001, S. 117–124
- [401] xBOW: *Mica2 Series Motes*. <http://www.xbow.com>, 2004. – [Online; abgerufen 01-Juli-2011]
- [402] XU, M. ; ZHAO, M. ; LI, S.: Lightweight and Energy Efficient Time Synchronization for Sensor Network. In: *Proceedings of the International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing* Bd. 2, IEEE Computer Society, September 2005, S. 947–950
- [403] XU, N. ; RANGWALA, S. ; CHINTALAPUDI, K.K. ; GANESAN, D. ; BROAD, A. ; GOVINDAN, R. ; ESTRIN, D.: A Wireless Sensor Network for Structural Monitoring. In: *Proceedings of the 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys)*, IEEE Computer Society, 2004, S. 13–24
- [404] YAHYA, B. ; BEN-OTHTMAN, J.: REER: Robust and Energy Efficient Multipath Routing Protocol for Wireless Sensor Networks. In: *Proceedings of the Global Telecommunications Conference*, IEEE Computer Society, December 2009. – ISSN 1930–529X, S. 1–7
- [405] YANG, G. ; XIAO, M. ; CHEN, H. ; YAO, Y.: A Novel Cross-Layer Routing Scheme of Ad Hoc Networks with Multi-Rate Mechanism. In: *Proceedings of the International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing* Bd. 2, IEEE Computer Society, September 2005, S. 701–704
- [406] YANG, X. ; VAIDYA, N.H.: A Wakeup Scheme for Sensor Networks: Achieving Balance between Energy Saving and End-to-End Delay. In: *Proceedings of the 10th Real-*

- Time and Embedded Technology and Applications Symposium (RTAS)*, IEEE Computer Society, May 2004, S. 19–26
- [407] YAO, Y. ; GEHRKE, J.: The Cougar Approach to In-Network Query Processing in Sensor Networks. In: *SIGMOD Record* , Vol. 31 (2002), September, Nr. 3
- [408] YE, F. ; CHEN, A. ; LU, S.W. ; ZHANG, L.: A Scalable Solution to Minimum Cost Forwarding in Large Sensor Networks. In: *Proceedings of the 10th International Conference on Computer Communications and Networks*, IEEE Computer Society, 2001, S. 304–309
- [409] YONGSHENG, S. ; GULLIVER, T.A.: An Energy-Efficient MAC Protocol for Mobile Ad Hoc Networks. In: *Proceedings of the 4th International Conference on Communication Networks and Services Research Conference*, 2006, S. 88–97
- [410] YOUNIS, O. ; FAHMY, S.: HEED: A Hybrid, Energy-Efficient, Distributed Clustering Approach for Ad Hoc Sensor Networks. In: *Mobile Computing* , Vol. 3 (2004), Nr. 4, S. 366–379. – ISSN 1536–1233
- [411] YU, X. ; LEE, J.-S. ; SHU, C. ; LEE, S.-G.: A 53 μ W Super-Regenerative Receiver for 2.4GHz Wake-Up Application. In: *Proceedings of the Microwave Conference (APMC)*, IEEE Computer Society, 2008. – ISBN 978–1–4244–2642–3, S. 1–4
- [412] Z-WAVE: *Z-Wave, the Standard in Wireless Home Control*. <http://www.zen-sys.com/>, 2006. – [Online; abgerufen 15-Mai-2011]
- [413] ZHANG, H. ; ARORA, A. ; CHOI, Y. ; GOUDA, M.G.: Reliable Bursty Convergecast in Wireless Sensor Networks. In: *Proceedings of the MOBIHOC 05*, ACM, 2005, S. 80–85
- [414] ZHANG, Y. ; LUO, J.n ; HU, H.: *Wireless Mesh Networking: Architectures, Protocols and Standards*. Auerbach Pubn, 2006. – ISBN 978–0849373992
- [415] ZHAO, Q. ; TONG, L.: Energy Efficiency of Large-Scale Wireless Networks: Proactive Versus Reactive Networking. In: *Selected Areas in Communications* , Vol. 23 (2005), May, Nr. 5, S. 1100–1112. – ISSN 0733–8716
- [416] ZHAO, Q. ; TONG, L. ; COUNCIL, D.: Energy-Aware Adaptive Routing for Large-Scale Ad Hoc Networks: Protocol and Performance Analysis. In: *Mobile Computing* , Vol. 6 (2007), September, Nr. 9, S. 1048–1059. – ISSN 1536–1233
- [417] ZIGBEE ALLIANCE: *Zigbee Specification*. http://www.zigbee.org/en/spec_download/zigbee_downloads.asp, 2007. – [Online; abgerufen 15-Mai-2011]
- [418] ZÜRICH, ETH: *Smart-ITS*. <http://www.smart-ITS.org>. Version: 2007. – [Online; abgerufen 24-August-2012]

Symbolverzeichnis

(D)BTMA	.....	(<u>D</u> ual) (<u>B</u> usy) (<u>T</u> one) (<u>M</u> ultiple) (<u>A</u> ccess)
ABR	.....	<u>A</u> ssociativity- <u>B</u> ased <u>R</u> outing
ACTP	.....	<u>A</u> pplication- <u>C</u> ontrolled <u>T</u> ransport <u>P</u> rotocol
ADAS	.....	<u>A</u> dvanced <u>D</u> river <u>A</u> ssistance <u>S</u> ystems
ADC	.....	<u>A</u> nalog- <u>D</u> igital- <u>C</u> onverter
AOA	.....	<u>A</u> ngle of <u>A</u> rrival
AODV	.....	<u>A</u> d-hoc <u>O</u> n- <u>D</u> emand <u>D</u> istance <u>V</u> ector
API	.....	<u>A</u> pplication <u>P</u> rogramming <u>I</u> nterface
APTEEN	.....	<u>A</u> daptive <u>P</u> eriodic <u>T</u> hreshold-Sensitive <u>E</u> nergy <u>E</u> fficient <u>S</u> ensor <u>N</u> etwork Protocol
ARPANET	.....	<u>A</u> dvanced <u>R</u> esearch <u>P</u> rojects <u>A</u> gency <u>N</u> etwork
ASAM	.....	<u>A</u> ssociation for <u>S</u> tandardisation of <u>A</u> utomation and <u>M</u> easuring <u>S</u> ystems
ASIC	.....	<u>A</u> pplication- <u>S</u> pecific <u>I</u> ntegrated <u>C</u> ircuit
ATP	.....	<u>A</u> d Hoc <u>T</u> ransport <u>P</u> rotocol
BAN	.....	<u>B</u> ody <u>A</u> rea <u>N</u> etwork
BGP	.....	<u>B</u> order <u>G</u> ateway <u>P</u> rotocol
C2C-CC	.....	<u>C</u> ar <u>2</u> <u>C</u> ar <u>C</u> ommunication <u>C</u> onsortium
CAN	.....	<u>C</u> ontroller <u>A</u> rea <u>N</u> etwork
CAN	.....	<u>C</u> ontroller <u>A</u> rea <u>N</u> etwork
CBRP	.....	<u>C</u> luster <u>B</u> ased <u>R</u> outing <u>P</u> rotocol
CDMA	.....	<u>C</u> ode <u>D</u> ivision <u>M</u> ultiple <u>A</u> ccess
CLMF	.....	<u>C</u> luster-Based <u>L</u> ightweight <u>M</u> iddleware <u>F</u> ramework
CODA	.....	<u>C</u> ongestion <u>D</u> etection and <u>A</u> voidance
COO	.....	<u>C</u> ell of <u>O</u> origin
CORIE	.....	<u>C</u> olumbia <u>R</u> iv <u>E</u> r <u>O</u> bservation <u>N</u> etwork
COTS	.....	<u>C</u> ommercial <u>O</u> ff <u>T</u> he <u>S</u> helf
CSGR	.....	<u>C</u> luster <u>S</u> witch <u>G</u> ateway <u>R</u> outing
CSIP	.....	<u>C</u> ollaborative <u>S</u> ignal and <u>I</u> nformation <u>P</u> rocessing
CSMA	.....	<u>C</u> arrier <u>S</u> ense <u>M</u> ultiple <u>A</u> ccess
CSS	.....	<u>C</u> hrip <u>S</u> pread <u>S</u> pectrum

Literaturverzeichnis

DAB	.....	<u>D</u> igital <u>A</u> udio <u>B</u> roadcasting
DAC	.....	<u>D</u> igital- <u>A</u> nalog- <u>C</u> onverter
DARPA	.....	<u>D</u> efense <u>A</u> dvanced <u>R</u> esearch <u>P</u> rojects <u>A</u> gency
DART	.....	<u>D</u> eep-ocean <u>A</u> ssessment and <u>R</u> eporting of <u>T</u> sunamis
DCA	.....	<u>D</u> ynamic <u>C</u> hannel <u>A</u> ssignment
DCS	.....	<u>D</u> istriuted <u>C</u> ontrol <u>S</u> ystem
DHR	.....	<u>D</u> TN <u>H</u> ierarchical <u>R</u> outing
DMAC	.....	<u>D</u> istributed <u>M</u> edia <u>A</u> ccess <u>C</u> ontrol
DMTS	.....	<u>D</u> elay <u>M</u> easurement <u>T</u> ime <u>S</u> ynchronization
DPM	.....	<u>D</u> ynamic <u>P</u> ower <u>M</u> anagement
DREAM	.....	<u>D</u> istance <u>R</u> outing <u>E</u> ffect <u>A</u> lgorithm for <u>M</u> obility
DS-CDMA	.....	<u>D</u> irect <u>S</u> equence <u>C</u> ode <u>D</u> ivision <u>M</u> ultiple <u>A</u> ccess
DSDV	.....	<u>D</u> estination- <u>S</u> equenced <u>D</u> istance- <u>V</u> ector
DSP	.....	<u>D</u> igital <u>S</u> ignal <u>P</u> rocessor
DSR	.....	<u>D</u> ynamic <u>S</u> ource <u>R</u> outing
DSSS	.....	<u>D</u> irect <u>S</u> equence <u>S</u> pread <u>S</u> pectrum
DTN	.....	<u>D</u> elay <u>T</u> olerant <u>N</u> etwork
DVS	.....	<u>D</u> ynamic <u>V</u> oltage <u>S</u> caling
EAN	.....	<u>E</u> Embedded <u>A</u> mbient <u>N</u> etworking
EBCR	.....	<u>E</u> nergy- <u>B</u> alanced <u>C</u> ooperative <u>R</u> outing
ECU	.....	<u>E</u> lectronic <u>C</u> ontrol <u>U</u> nit
EE-MAC	.....	<u>E</u> nergy- <u>E</u> fficient <u>M</u> edia <u>A</u> ccess <u>C</u> ontrol
EOSC	.....	<u>E</u> volutionary <u>O</u> ptimization <u>S</u> elective <u>C</u> onnectivity
ERTP	.....	<u>E</u> nergy <u>E</u> fficient and <u>R</u> eliable <u>T</u> ransport <u>P</u> rotocol
ESDSR	.....	<u>E</u> nergy <u>S</u> aving <u>D</u> ynamic <u>S</u> ource <u>R</u> outing
ESRT	.....	<u>E</u> vent-to- <u>S</u> ink <u>R</u> eliable <u>T</u> ransport
ExScal	.....	<u>E</u> lements of an <u>E</u> xtrême <u>S</u> cale <u>W</u> ireless <u>S</u> ensor <u>N</u> etwork
FDMA	.....	<u>F</u> requency <u>D</u> evision <u>M</u> ultiple <u>A</u> ccess
FFD	.....	<u>F</u> ull <u>F</u> unction <u>D</u> evises
FGSS	.....	<u>F</u> ault-tolerant <u>G</u> lobal <u>S</u> panning <u>S</u> ubgraph
FHSS	.....	<u>F</u> requency <u>H</u> opping <u>S</u> pread <u>S</u> pectrum
FLSS	.....	<u>F</u> ault-tolerant <u>L</u> ocal <u>S</u> panning <u>S</u> ubgraph
FPGA	.....	<u>F</u> ield <u>P</u> rogrammable <u>G</u> ate <u>A</u> rray

Literaturverzeichnis

FTSP	<u>F</u> looding <u>T</u> ime <u>S</u> ynchronization <u>P</u> rotocol
GEAR	<u>G</u> eographical and <u>E</u> nergy <u>A</u> ware <u>R</u> outing
GITEWS	<u>G</u> erman <u>I</u> ndonesian <u>T</u> sunami <u>E</u> arly <u>W</u> arning <u>S</u> ystem
GPS	<u>G</u> lobal <u>P</u> ositioning <u>S</u> ystem
GPSR	<u>G</u> reedy <u>P</u> erimeter <u>S</u> tateless <u>R</u> outing for Wireless Networks
GREASE	<u>G</u> enerische, <u>r</u> ekonfigurierbare <u>E</u> rfassung und <u>A</u> uswertung von <u>S</u> ensordaten
HAL	<u>H</u> ardware <u>A</u> bstraction <u>L</u> ayer
HEED	<u>H</u> ybrid, <u>E</u> nergy- <u>E</u> fficient, <u>D</u> istributed Clustering Approach
HIL	<u>H</u> ardware in the <u>L</u> oop
HRMA	<u>H</u> op <u>R</u> eservation <u>M</u> ultiple <u>A</u> ccess
HRTS	<u>H</u> ierarchy <u>R</u> eferencing <u>T</u> ime <u>S</u> ynchronization
I2C	<u>I</u> nter- <u>I</u> ntegrated <u>C</u> ircuit
ICN	<u>I</u> ndustrial <u>C</u> ommunication <u>N</u> etworks
IEEE	<u>I</u> nstitute of <u>E</u> lectrical and <u>E</u> lectronics <u>E</u> ngineers
IRQ	<u>I</u> nterrupt <u>R</u> equ <u>e</u> st / Unterbrechungsanforderung
ISM	<u>I</u> ndustrial, <u>S</u> cientific and <u>M</u> edical Band
ITS	<u>I</u> ntelligent <u>T</u> ransport <u>S</u> ystems
IUSS	<u>I</u> ntegrated <u>U</u> ndersea <u>S</u> urveillance <u>S</u> ystem
LAR	<u>L</u> ocation- <u>A</u> ided <u>R</u> outing
LASA	<u>L</u> ow- <u>E</u> nergy <u>A</u> daptive <u>S</u> lot <u>A</u> llocation Scheduling Algorithm
LEACH	<u>L</u> ow- <u>E</u> nergy <u>A</u> daptive <u>C</u> lustering <u>H</u> ierarchy
LEAR-AODV ..	<u>L</u> ocal <u>E</u> nergy- <u>A</u> ware <u>R</u> outing auf Basis von AODV
LED	<u>L</u> ight <u>E</u> mitting <u>D</u> iode
LEEM	<u>L</u> atency <u>M</u> inimized <u>E</u> nergy <u>E</u> fficient <u>M</u> AC
Li-Fi	Drahtlose Datenübertragung auf Basis des sichtbaren Lichtspektrums (ohne akronymische Bedeutung)
LIME	<u>L</u> inda in a <u>M</u> obile <u>E</u> nvironment
LLC	<u>L</u> ink- <u>L</u> ayer <u>C</u> ontrol
LMR	<u>L</u> abel-based <u>M</u> ultipath <u>R</u> outing
LMST	<u>L</u> ocal <u>M</u> inimum <u>S</u> panning <u>T</u> ree
LORA	<u>L</u> east <u>O</u> verhead <u>R</u> outing <u>A</u> pproach
LPL	<u>L</u> ow <u>P</u> ower <u>L</u> istening
LPR-AODV	<u>L</u> ifetime <u>P</u> rediction <u>R</u> outing auf Basis von AODV
LRR	<u>L</u> ink <u>R</u> eversal <u>R</u> outing

Literaturverzeichnis

LTS	Lightweight tree-based Time Synchronization
MAC	Media Access Control
MACA	Multiple Access with Collision Avoidance
MACAW	Multiple Access with Collision Avoidance for Wireless
MANET	Mobile Ad Hoc Networks
MAODV	Multicast Ad Hoc On-Demand Distance Vector
MARCH	Media Access with Reduced Handshake
MARE	Mobile Agent Runtime Environment
MB-OFDM	Multiband Orthogonal Frequency Division Multiplexing
MCU	Micro Controller Unit
MEMS	Micro-Electro-Mechanical Systems
MiLAN	Middleware Linking Applications and Networks
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MMAC	Multichannel Media Access Control
MS-MAC	Mobile Sensor MAC
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NEMS	Nano-Electro-Mechanical Systems
NIMS	Networked Infomechanical Systems
NTP	Network Time Protocol
ODMRP	On-Demand Multicast Routing Protocol
OLSR	Optimized Link State Routing
ORA	Optimum Routing Approach
OSPF	Open Shortest Path First
OSWA	Open Sensor Web Architecture
PACT	Power Aware Clustered TDMA
PAMAS	Power-Aware Multi-Access Protocol with Signaling
PAN	Personal Area Network
PAR	Power-Aware Routing
PCCB	Power Cost Calculate Balance Routing
PCM	Power Control MAC
PCMA	Power-Controlled Multiple Access
PEGASIS	Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems
PSFQ	Pump Slowly, Fetch Quickly

Literaturverzeichnis

PTW	.....	<u>P</u> ipelined <u>T</u> one <u>W</u> ake- <u>U</u> p <u>S</u> cheme
QoS	.....	<u>Q</u> uality of <u>S</u> ervice
RBC	.....	<u>R</u> eliable <u>B</u> ursty <u>C</u> onvergecast
RBS	.....	<u>R</u> eference- <u>B</u> roadcast <u>S</u> ynchronization
RCP	.....	<u>R</u> oute <u>C</u> onfiguration <u>P</u> acket
REER	.....	<u>R</u> obust and <u>E</u> nergy <u>E</u> fficient <u>M</u> ultipath <u>R</u> outing
RFD	.....	<u>R</u> educed <u>F</u> unction <u>D</u> evelopments
RFID	.....	<u>R</u> adio <u>F</u> requency <u>I</u> dentification
RIP	.....	<u>R</u> outing <u>I</u> nformation <u>P</u> rotocol
RMAPI	.....	<u>R</u> esource <u>M</u> anagement <u>A</u> pplication <u>P</u> rogramming <u>I</u> nterface
RMST	.....	<u>R</u> eliable <u>M</u> ultisegment <u>T</u> ransport
RMU	.....	<u>R</u> essource <u>M</u> anagement <u>U</u> nit
RS485 / EIA485		<u>R</u> adio <u>S</u> ector / <u>E</u> lectronic <u>I</u> ndustries <u>A</u> lliance 485
RSSI	.....	<u>R</u> eceived <u>S</u> ignal <u>S</u> trength <u>I</u> ndicator
RTOS	.....	<u>R</u> ealtime <u>O</u> perating <u>S</u> ystem
RTS/CTS	.....	<u>R</u> eady <u>T</u> o <u>S</u> end / <u>C</u> lear <u>T</u> o <u>S</u> end
RTT	.....	<u>R</u> ound- <u>T</u> rip- <u>T</u> ime
Rx	.....	<u>R</u> eceive <u>D</u> ata / <u>E</u> mpfangen
S-MAC	.....	<u>S</u> ensor- <u>M</u> edia <u>A</u> ccess <u>C</u> ontrol
SANET	.....	<u>S</u> ensor <u>A</u> ctor <u>N</u> etworks
SDMA	.....	<u>F</u> requency <u>S</u> pace <u>M</u> ultiple <u>A</u> ccess
SIL	.....	<u>S</u> oftware <u>i</u> n the <u>L</u> oop
SINA	.....	<u>S</u> ensor <u>I</u> nformation and <u>N</u> etworking <u>A</u> rchitecture
SLAM	.....	<u>S</u> leep- <u>W</u> ake <u>A</u> ware <u>L</u> ocal <u>M</u> onitoring
SMACS	.....	<u>S</u> elf- <u>O</u> rganizing <u>M</u> edium <u>A</u> ccess <u>C</u> ontrol for <u>S</u> ensor <u>N</u> etworks
SNR	.....	<u>S</u> ignal to <u>N</u> oise <u>R</u> atio / <u>S</u> ignal- <u>R</u> ausch- <u>V</u> erhältnis
SoC	.....	<u>S</u> ystem <u>o</u> n <u>C</u> hip
SOSUS	.....	<u>S</u> ound <u>S</u> urveillance <u>S</u> ystem
SPI	.....	<u>S</u> erial <u>P</u> eripheral <u>I</u> nterface
SPIN	.....	<u>S</u> ensor <u>P</u> rotocols for <u>I</u> nformation via <u>N</u> egotiation
SQL	.....	<u>S</u> tructured <u>Q</u> uery <u>L</u> anguage
SQTL	.....	<u>S</u> ensor <u>Q</u> uerying and <u>T</u> asking <u>L</u> anguage
SRMP	.....	<u>S</u> ource <u>R</u> outing- <u>B</u> ased <u>M</u> ulticast <u>P</u> rotocol

Literaturverzeichnis

SRSA	Self-Organizing Slot Allocation
SSA	Signal Stability-Based Adaptive Routing
STAR	Source Tree Adaptive Routing
STEM	Sparse Topology and Energy Management
SURTASS	Surveillance Towed Array Sensor System
SWIM	Shared Wireless Infostation Model
T-MAC	Timeout-Media Access Control
TAG	Tiny Aggregation
TCP	Transmission Control Protocol
TDMA	Time Division Multiple Access
TDOA	Time Difference of Arrival
TDP	Time Diffusion Synchronization Protocol
TEEN	Threshold-Sensitive Energy Efficient Sensor Network Protocol
TIER	Technology and Infrastructure for Emerging Regions
TOA	Time of Arrival
TORA	Temporally Ordered Routing Algorithm
TPSN	Timing-sync Protocol for Sensor Networks
TRAMA	Traffic-Adaptive Medium Access Protocol
Tx	Transmit Data / Senden
UDP	User Datagram Protocol
USB	Universal Serial Bus
UWB	Ultra Wide Band
VANET	Vehicular Ad Hoc Networks
VLC	Visible Light Communication
WirelessHART	Wireless Highway Addressable Remote Transducer
WiseMAC	Wireless Sensor MAC
WLAN	Wireless Local Area Networks
WNaN	Wireless Network after Next
WPAN	Wireless Personal Area Networks
WRP	Wireless Routing Protocol
WRTA	WuRx-optimised Routing and Topology Optimisation Approach
WSN	Wireless Sensor Networks
WuRx	Wake Up Receiver

Literaturverzeichnis

WUSB Wireless Universal Serial Bus
WWAN Wireless Wide Area Networks
XML eXtensible Markup Language
XSM Extreme Scale Mote
ZRP Zone Routing Protocol

Curriculum Vitae

DR.-ING. MATTHIAS VODEL, geboren am 22.03.1982 in Rodewisch

Wissenschaftliche Arbeit

- 2010 Promotion, Dr.-Ing., Professur Technische Informatik, TU Chemnitz
Thema: *Funkstandardübergreifende Kommunikation in mobilen Ad Hoc Netzwerken*
- 2008 Forschungsaustausch Thailand,
King Mongkut University of Technology North Bangkok
- seit 2006 wissenschaftlicher Mitarbeiter,
Professur Technische Informatik, TU Chemnitz

Studium

- 2006 Diplom, Dipl.-Inf., Professur Rechnernetze und verteilte Systeme, TU Chemnitz
Thema: *Systematische Evaluierung und Vergleich dezentraler Algorithmen zur optimierten Vernetzung selbstorganisierender Systeme*
- 2005 Auslandssemester, England
University of Sussex, Brighton, Faculty of Computer Science
- 2001 - 2006 Diplomstudiengang Informatik, TU Chemnitz
- 2000 - 2001 Grundwehrdienst Mühlhausen, Thüringen

Schulzeit

- 2000 Abitur, Gymnasium Klingenthal
Leistungskurse: *Mathematik, Physik*
- 1992 - 2000 Eliteschule des Sports - Gymnasium Klingenthal

Forschungsinteressen

- Energieeffiziente, Drahtlose Kommunikation
- Eingebettete Systeme
- Datenaggregation & Datenfusion