

Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

Effiziente Algorithmen der
Positionsbestimmung und
positionsbasierte Kontextgewinnung zur
Selbstorganisation in drahtlosen
Sensornetzwerken

eingereicht an der: Fakultät für
Informatik und Elektrotechnik,
Universität Rostock
vorgelegt von: Ralf Behnke,
geb. am 29.11.1980 in Berlin,
aus Rostock

Rostock, 01.07.2013

Gutachter:

- Prof. Dr. Ing. Dirk Timmermann (Universität Rostock, Institut für Angewandte Mikroelektronik und Datentechnik)
- Prof. Dr. Ing. Christian Müller-Schloer (Leibniz Universität Hannover, Institut für System- und Rechnerarchitektur)
- Prof. Dr. Ing. Ralf Bill (Universität Rostock, Professur für Geodäsie und Geoinformatik)

Tag der Einreichung: 13.11.2012

Tag der Verteidigung: 19.06.2013

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	ix
Tabellenverzeichnis	xv
Abkürzungsverzeichnis	xvii
Kurzreferat	xxiii
Abstract	xxv
Danksagung	xxvii
1 Einleitung	1
1.1 Zielsetzung dieser Arbeit	1
1.2 Aufbau dieser Arbeit	1
2 Grundlagen	5
2.1 Drahtlose Sensornetzwerke	5
2.1.1 Historie	5
2.1.2 Begriffsklärung	7
2.1.3 Anwendungsgebiete drahtloser Sensornetzwerke	10
2.1.3.1 Militärische Anwendung	11
2.1.3.2 Natur und Umwelt	12
2.1.3.3 Medizin und Pflege	12
2.1.3.4 Industrie und Forschung	13
2.1.3.5 Resümee	14
2.1.4 Herausforderung drahtloser Sensornetzwerke	14
2.1.4.1 Abgrenzungsmerkmale zu anderen drahtlosen Netzen	14
2.1.4.2 Allgemeine Designkriterien	16
2.1.4.3 Einordnung in das OSI-Referenzmodell	16
2.1.4.4 Medienzugriff	18

2.1.4.5	Routing	23
2.1.4.6	Transport	27
2.1.4.7	Aggregation	28
2.1.4.8	Synchronisation	30
2.1.4.9	Topologie-Management und Clusterbildung	32
2.1.4.10	Sicherheit und Fehlererkennung	33
2.1.4.11	Lokalisierung	34
2.1.5	Standardisierungsbestrebungen	34
2.1.5.1	IEEE 802.15.4	36
2.1.5.2	ZigBee	37
2.1.5.3	WirelessHART	37
2.1.5.4	6LoWPAN	38
2.2	Lokalisierung in drahtlosen Sensornetzwerken	38
2.2.1	Motivation	38
2.2.2	Querbeziehungen	39
2.2.3	Begriffe	39
2.2.4	Klassifizierung	40
2.2.5	Beobachtungsgrößen und Distanzschätzung in drahtlosen Sensornetzwerken	43
2.2.5.1	Signallaufzeit	43
2.2.5.2	Signalempfangsstärke	46
2.2.5.3	Signalempfangswinkel	47
2.2.5.4	Weitere Beobachtungsgrößen	48
2.2.6	Grundlegende Prinzipien der Positionsbestimmung	49
2.2.6.1	Triangulation	49
2.2.6.2	Trilateration	50
2.2.6.3	Multilateration	51
2.2.6.4	Weitere Verfahren	52
2.2.7	Mathematische Grundlagen	52
2.2.7.1	Methode der kleinsten Quadrate	52
2.2.7.2	Gewichtete Methode der kleinsten Quadrate	54
2.2.8	Bestehende Verfahren	55
2.2.8.1	Distanzfreie approximative Verfahren	55
2.2.8.2	Distanzbasierte approximative Verfahren	55
2.2.8.3	Exakte Verfahren	56
2.3	Clustering in drahtlosen Sensornetzwerken	56

2.3.1	Motivation	56
2.3.2	Querbeziehungen	57
2.3.3	Begriffe	58
2.3.4	Klassifizierung	59
2.3.5	Bestehende Verfahren	59
2.3.5.1	Covering	59
2.3.5.2	Clustering	60
2.4	Fehlerdetektion in drahtlosen Sensornetzwerken	61
2.4.1	Motivation	61
2.4.2	Querbeziehungen	61
2.4.3	Klassifizierung	62
2.4.4	Bestehende Verfahren	63
2.4.4.1	Detektion von Netzwerkfehlern	63
2.4.4.2	Detektion von Messwertfehlern	63
2.5	Evaluation drahtloser Sensornetzwerke	64
2.5.1	Simulation drahtloser Sensornetzwerke	66
2.5.1.1	Statische Simulation	66
2.5.1.2	Dynamische Simulation	67
2.6	Zusammenfassung	69
3	Lokalisierung in drahtlosen Sensornetzen	71
3.1	Motivation	71
3.2	Einordnung der untersuchten Verfahren	71
3.3	Approximative Lokalisierung	72
3.3.1	Ausgangsverfahren	72
3.3.2	Das AWCL Verfahren	74
3.3.2.1	Motivation	74
3.3.2.2	Algorithmenbeschreibung	75
3.3.2.3	Evaluation	76
3.3.2.4	Nachbetrachtung	85
3.3.3	Das SBCL Verfahren	86
3.3.3.1	Motivation	86
3.3.3.2	Analyse	87
3.3.3.3	Algorithmenbeschreibung	89
3.3.3.4	Evaluation	94
3.3.3.5	Nachbetrachtung	98

3.3.4	Weiterentwicklungen und Ausblicke	99
3.4	Exakte Lokalisierung	104
3.4.1	Ausgangsverfahren	104
3.4.2	Das sDLS Verfahren	107
3.4.2.1	Motivation	107
3.4.2.2	Algorithmenbeschreibung	109
3.4.2.3	Evaluation	116
3.4.2.4	Potenzial und Vorteile	128
3.4.2.5	Nachbetrachtung	128
3.4.3	Das HDLS Verfahren	129
3.4.3.1	Motivation	129
3.4.3.2	Algorithmenbeschreibung	130
3.4.3.3	Evaluation	133
3.4.3.4	Nachbetrachtung	143
3.4.4	Das sRAL Verfahren	144
3.4.4.1	Motivation	144
3.4.4.2	Algorithmenbeschreibung	146
3.4.4.3	Evaluation	147
3.4.4.4	Nachbetrachtung	158
3.4.5	Weiterentwicklungen und Ausblicke	158
3.5	Zusammenfassung	163
4	Clustering in drahtlosen Sensornetzwerken	167
4.1	Motivation	167
4.2	Einordnung der untersuchten Verfahren	168
4.3	Geografisches Clustering mit MASCLE	168
4.3.1	Ausgangsverfahren	168
4.3.1.1	XGAF	169
4.3.1.2	K-Covering	171
4.3.2	Das 2-MASCLE Verfahren	171
4.3.2.1	Motivation	171
4.3.2.2	Algorithmenbeschreibung	173
4.3.2.3	Evaluation	176
4.3.2.4	Nachbetrachtung	182
4.3.3	Weiterentwicklungen und Ausblicke	183
4.4	Lokalisierungsfreies Clustering mit BBC	187

4.4.1	Ausgangsverfahren	187
4.4.1.1	Geografisches Clustering	188
4.4.1.2	Schwerpunkt-basierte Lokalisierung	188
4.4.2	Das BBC Verfahren	190
4.4.2.1	Motivation	190
4.4.2.2	Algorithmenbeschreibung	190
4.4.2.3	Evaluation	194
4.4.2.4	Nachbetrachtung	195
4.4.3	Weiterentwicklungen und Ausblicke	196
4.5	Zusammenfassung	198
5	Fehlerhafte Knoten in Sensornetzwerken	201
5.1	Motivation	201
5.2	Einordnung des untersuchten Verfahrens	201
5.3	Identifizierung fehlerbehafteter Sensorknoten	202
5.3.1	Ausgangsverfahren	202
5.3.2	Das ELDEN Verfahren	204
5.3.2.1	Motivation	204
5.3.2.2	Algorithmenbeschreibung	205
5.3.2.3	Evaluation	206
5.3.2.4	Nachbetrachtung	214
5.3.3	Weiterentwicklungen und Ausblicke	214
5.4	Zusammenfassung	217
6	Zusammenfassung	219
6.1	Ergebnisse	219
6.1.1	Verfahren der Lokalisierung	219
6.1.2	Verfahren des Clusterings	224
6.1.3	Verfahren zur Fehlerdetektion	226
6.2	Ausblick	227
6.2.1	Verfahren der Lokalisierung	227
6.2.2	Verfahren des Clusterings	228
6.2.3	Verfahren zur Fehlerdetektion	229
A	Vergleich existenter drahtloser Sensornetzwerke	I
B	Konvention mathematischer Symbole und Notationen	V

B.1	Symbolik	V
B.2	Notation	VI
C	Pfadverlust und Standardabweichung in unterschiedlicher Umgebung	VII
D	Linearumformung des Gleichungssystems der Multilateration	IX
D.1	Umformung durch Subtraktion einer Gleichung	IX
D.2	Umformung mittels Linearisierer	XI
D.3	Umformung mittels Substitution	XII
	Literaturverzeichnis	XIII
	Fremdzitate	XIII
	Eigene Arbeiten	XXXVII
	Zitierte Veröffentlichungen	XXXVII
	Weitere Veröffentlichungen	XL

Abbildungsverzeichnis

1.1	Übersicht zum Aufbau der Arbeit	2
2.1	DSN-Testbed um 1985	6
2.2	Basis-Architektur eines Sensorknotens	8
2.3	Grundlegender Aufbau eines Sensornetzwerks	10
2.4	OSI-Referenzmodell	17
2.5	Klassifizierung von Medienzugriffsverfahren	19
2.6	Aufbau von TDMA Superframes	19
2.7	TRAMA Kommunikationszyklus	20
2.8	S-MAC Kommunikationszyklus	21
2.9	Virtuelle Cluster in S-MAC.	22
2.10	Routing-Algorithmen in Sensornetzwerken	24
2.11	Hierarchisches Routing mit Clustern	25
2.12	Datenzentriertes Routing – Directed Diffusion	26
2.13	Klassifizierung von Protokollen der Transportschicht	27
2.14	Klassifizierung aggregierender Protokolle	29
2.15	Protokolle zur Synchronisation in Sensornetzwerken	30
2.16	Sender-Empfänger Synchronisation mittels Two-Way Handshake	31
2.17	Topologie Management in Sensornetzwerken	33
2.18	IEEE 802.15.4 Netzwerktopologien	36
2.19	Wechselwirkungen der Lokalisierung	39
2.20	Klassifizierung von Verfahren zur Positionsbestimmung	41
2.21	Kriterien zur Klassifizierung von Verfahren zur Positionsbestimmung	41
2.22	Signallaufzeitmessung mittels TOA	44
2.23	Signallaufzeitmessung mittels TDOA	45
2.24	Darstellung des Multi-Node TDOA	45
2.25	Triangulation im Sensornetzwerk	49
2.26	Trilateration im Sensornetzwerk	50
2.27	Wechselwirkungen des Clusterings	57

2.28	Klassifizierung von Verfahren zur Clusterbildung	60
2.29	Wechselwirkungen der Fehlerdetektion	62
2.30	Klassifizierung von Verfahren zur Fehlerdetektion	62
2.31	Architektur der Prowler/Rmase Simulationsumgebung	70
3.1	Einordnung der untersuchten Verfahren der Lokalisierung	72
3.2	Vergleich der Positionsbestimmung mit CL und WCL	73
3.3	Einfluss der Gewichtung auf die Positionsbestimmung mittels WCL	74
3.4	Reduktionsprinzip der AWCL Lokalisierung	75
3.5	WCL – Fehler der Positionsschätzung in Abhängigkeit von der Kommunikationsreichweite	78
3.6	AWCL – Einfluss des Reduktionsanteils auf den Fehler der Positionsschätzung	78
3.7	AWCL mit linearer Wichtung über die Kommunikationsreichweite und den Reduktionsanteil	79
3.8	Gegenüberstellung von WCL und AWCL	80
3.9	Vergleich von WCL und AWCL mit jeweils optimaler Parameterwahl	81
3.10	Positionsschätzungsfehler von WCL und AWCL gegenüber der Kommunikationsreichweite	82
3.11	Positionsschätzungsfehler unterschiedlicher AWCL Ansätze gegenüber der Kommunikationsreichweite	83
3.12	AWCL mit quadratischer Wichtung über die Kommunikationsreichweite und den Reduktionsanteil	84
3.13	Vergleich linearer und quadratischer Gewichtung im Kontext des AWCL	85
3.14	Auftretende Zellen bei Lokalisierung mittels CL	88
3.15	Einfluss der Kommunikationsreichweite auf den Flächenschwerpunkt einer CL-Zelle	89
3.16	Approximation auftretender Zellen und Flächenschwerpunkte durch virtuelle Referenzknoten	90
3.17	Vergleich linearer Ansätze zur Schwerpunktermittlung	92
3.18	Vergleich der medianen Positionsschätzungsfehler (1)	95
3.19	Statistischer Vergleich der Positionsschätzungsfehler (SBCL)	96
3.20	Vergleich der medianen Positionsschätzungsfehler (2)	98
3.21	Minimalbeispiel – Topologie bedingter Wichtungsfehler	100
3.22	Beispiel – Adaptives SBCL	103
3.23	Algorithmische Darstellung des DLS	107

3.24	Algorithmische Darstellung der sDLS	111
3.25	Distanzapproximation entfernter Referenzknoten bei sDLS	115
3.26	Erfolgsquote von sDLS	118
3.27	Verwendete Referenzknoten je Nachberechnung	120
3.28	Durchgeführte Einfügeoperationen je Positionsbestimmung	120
3.29	Komplexität der Nachberechnung von sDLS: Additionen	123
3.30	Komplexität der Nachberechnung von sDLS: Multiplikationen	123
3.31	Komplexität der Nachberechnung von sDLS: Potenzoperationen	124
3.32	Rollenverteilung der Sensorknoten in der Simulation	125
3.33	Kommunikationsaufwand von sDLS: Injektion	126
3.34	Kommunikationsaufwand von sDLS: Durchschnitt	126
3.35	Durchschnittlicher Positionsschätzungsfehler bei sDLS	127
3.36	Zusammenspiel von sDLS und Netzwerkdesign	128
3.37	Darstellung unterschiedlicher Varianten von HDLS	134
3.38	Positionsschätzungsfehler bei HDLS mit CL-Approximation	136
3.39	Positionsschätzungsfehler bei HDLS mit WCL-Approximation	136
3.40	Positionsschätzungsfehler bei HDLS mit SWCL-Approximation	137
3.41	Positionsschätzungsfehler bei HDLS mit AWCL-Approximation	138
3.42	Positionsschätzungsfehler bei HDLS mit distanzbasierter Begrenzung	139
3.43	Komplexität von HDLS bei unterschiedlicher Beschränkung der Einzelschätzungen	139
3.44	Positionsschätzungsfehler bei HDLS mit abhängiger Distanzschätzung	140
3.45	Positionsschätzungsfehler ausgesuchter HDLS-Varianten	141
3.46	Positionsschätzungsfehler der genauesten HDLS-Varianten	142
3.47	Berücksichtigte Referenzknoten bei den genauesten HDLS-Varianten	143
3.48	Komplexität der genauesten HDLS-Varianten	144
3.49	Komplexität der Nachberechnung von sRAL: Additionen	148
3.50	Komplexität der Nachberechnung von sRAL: Multiplikationen	149
3.51	Komplexität der Nachberechnung von sRAL: Potenzoperationen	149
3.52	Kommunikationsaufwand von sRAL: Injektion	150
3.53	Kommunikationsaufwand von sRAL: Durchschnitt	151
3.54	Durchschnittlicher Positionsschätzungsfehler bei sDLS	152
3.55	Idealistische Simulation von RAL und DLS	153
3.56	Verteilung der Positionsschätzungsfehler bei RAL/sRAL, DLS und sDLS	155
3.57	Vergleich von RAL/sRAL und sDLS mittels Fehlerdifferenz	156

3.58	Querschnitt der Fehlerdifferenz über der Anzahl der Referenzknoten	157
3.59	Querschnitt der Fehlerdifferenz über der Abweichung der Distanzschätzung	157
4.1	Einordnung der untersuchten Verfahren zur Clusterbildung	168
4.2	Netzwerkstrukturierung mittels XGAF	169
4.3	Bestimmung der Clustergröße durch XGAF	170
4.4	Netzwerkstrukturierung mittels Covering	171
4.5	Abdeckungsbereich eines XGAF-Clusters	173
4.6	Abdeckungsbereich eines 2-MASCLE-Clusters	174
4.7	Überführung von Covering und Clustering zu 2-MASCLE	174
4.8	Algorithmus zum Phasenwechsel in 2-MASCLE (ohne Heilung) . . .	175
4.9	Algorithmus zum Phasenwechsel in 2-MASCLE (mit Heilung)	176
4.10	Mittlere Abdeckung eines Sensornetzwerks	179
4.11	Wahrscheinlichkeit vollständiger Abdeckung eines Sensornetzwerks .	180
4.12	Anzahl aktiver Knoten bei Verwendung von 2-MASCLE	180
4.13	Wahrscheinlichkeit vollständiger Abdeckung über die Zeit	181
4.14	Knoteneffizienz in Abhängigkeit von der Anzahl der Knoten	182
4.15	MASCLE-Ansätze mit variierter Clustergröße	184
4.16	Alternative Clusterformen	185
4.17	Clusterhierarchien mit Subclustern	185
4.18	Clustermobilität mit Subclustern	186
4.19	Algorithmus zur Eigensynchronisation mittels 2-MASCLE	187
4.20	Geografische Netzwerkstrukturierung	188
4.21	Schwerpunkt-basierte Lokalisierung mit CL	189
4.22	Auftretende Clusterformen bei BBC	190
4.23	Vergleich entstehender Clusterflächen bei BBC	191
4.24	Vergleich entstehender Interclusterdistanzen bei BBC	192
4.25	Vergleich entstehender Clusterdurchmesser bei BBC	193
4.26	Identifikation der Cluster im BBC-Verfahren	193
4.27	Vergleich der Anzahl besetzter Cluster	195
4.28	Vergleich der durch BBC und XGAF erreichten Abdeckung	195
4.29	Clustering mit Voronoi-Diagrammen	197
4.30	Clustering mit Voronoi höherer Ordnung	198
4.31	BBC-Clustering zur Zweiteilung des Netzwerks	198

5.1	Einordnung des untersuchten Verfahrens zur Fehlerdetektion	202
5.2	Fehlerdetektionsverfahren von Ding et al.	204
5.3	Fehlerdetektionsverfahren ELDEN	206
5.4	Sensitivität gegenüber Schwellenwert und Anteil fehlerhafter Knoten	208
5.5	Ausfallrate gegenüber Schwellenwert und Anteil fehlerhafter Knoten	209
5.6	Ding et al.: Sensitivität gegenüber Fehlerdifferenz und Anteil fehlerhafter Knoten	210
5.7	ELDEN: Sensitivität gegenüber Fehlerdifferenz und Anteil fehlerhafter Knoten	210
5.8	Ding et al.: Ausfallrate gegenüber Fehlerdifferenz und Anteil fehlerhafter Knoten	211
5.9	ELDEN: Ausfallrate gegenüber Fehlerdifferenz und Anteil fehlerhafter Knoten	212
5.10	Sensitivität in Abhängigkeit von der Nachbarschaft	213
5.11	Ausfallrate in Abhängigkeit von der Nachbarschaft	213

Tabellenverzeichnis

2.1	Darstellung unterschiedlicher Sensorknoten der Lokalisierung	40
2.2	Vergleich: Reales Deployment versus Simulation	65
2.3	Parameter des Prowler Kanalmodells	68
3.1	Simulationsparameter – AWCL	77
3.2	Vergleich CL, WCL und AWCL	85
3.3	Simulationsparameter – SBCL	94
3.4	Beispielhafte Parameter – adaptives SBCL	104
3.5	Vergleich vorgestellter sDLS-Varianten	117
3.6	Simulationsparameter – sDLS	118
3.7	Simulationsparameter – HDLS	133
3.8	Simulationsparameter – sRAL	148
3.9	Simulationsparameter – sRAL	154
4.1	Simulationsparameter – 2-MASCLE	178
4.2	Rechnerisch erreichbare Knoteneffizienz	182
4.3	Simulationsparameter – BBC	194
5.1	Simulationsparameter – ELDEN	207
A.1	Vergleich bestehender Sensornetzwerkanwendungen	II
C.1	Pfadverlustexponent in unterschiedlicher Umgebung	VII
C.2	Pfadverlustexponent in Indoor-Umgebungen	VIII
C.3	Pfadverlustexponent in Indoor- und Outdoor-Umgebungen	VIII

Abkürzungsverzeichnis

0-9

2-MASCLE	Dual Phase Mutual Assistance in a Cluster Environment
4-MASCLE	Quadruple Phase Mutual Assistance in a Cluster Environment
6LoWPAN	IPv6 over Low-power Wireless Personal Area Network

A

ACE	Algorithm for Cluster Establishment
ACS	Adaptive Clock Synchronisation
ADC	Analog-to-Digital Converter (dt. Analog-Digital-Wandler)
ALU	Arithmetic Logic Unit (dt. arithmetisch-logische Einheit)
AO	Application Object (ZigBee)
AOA	Angle of Arrival
AODV	Ad-hoc On-demand Distance Vector Routing
APIT	Approximate Point-In-Triangulation
APS	Ad Hoc Positioning System
APS	Application Support Layer (ZigBee)
ASCENT	Adaptive Self-Configuring Sensor Network Topologies
AWCL	Adaptive Weighted Centroid Localization

B

BBC	Beacon Based Clustering
BFSK	Binary Frequency Shift Keying
BiSNET	Biologically-inspired architecture for Sensor NETWORKS
B-MAC	Berkeley MAC
BMA-MAC	Bit-Map-assisted MAC
BPSK	Binary Phase Shift Keying

C

CC	Chessboard Clustering
CC-MAC	Correlation-based Collaborative MAC
CDMA	Code Division Multiple Access
CIV	Cluster Identification Vector
CL	Centroid Localization
CLOQ	Cooperative Localization with Optimum Quality of Estimate
CODA	Congestion Detection and Avoidance
CORIE	Columbia River Ecosystem
CPE	Convex Position Estimation
CSMA	Carrier Sense Multiple Access
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
CTS	Clear to Send

D

DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency
DLS	Distributed Least Squares
DSN	Distributed Sensor Network

E

EKG	Elektrokardiographie
ELDEN	Efficient Localized Detection of Erroneous Nodes
EMG	Elektromyographie

F

FDMA	Frequency Division Multiple Access
FFD	Full Function Device
Free-CLASH	Localization-Free Clustering with Approximation to Symmetric Hexagons

G

GAF	Geographical Adaptive Fidelity
GEAR	Geographic and Energy Aware Routing
GID	Group Identification Number
GLONASS	Globalnaja Nawigazionnaja Sputnikowaja Sistema (dt. Globales Satellitennavigationssystem)
GLS	General Least Squares

GNSS	Global Navigation Satellite System (dt. Globales Satellitennavigationssystem)
GPS	Global Positioning System
GPSR	Greedy Perimeter Stateless Routing

H

HART	Highway Addressable Remote Transducer
HDLS	Hybrid Distributed Least Squares
Hex-MASCLE	Hexagon Mutual Assistance in a Cluster Environment
HyPEARLoc	Hybrid Plausible Approach for Error Reduced Localization

I

iDLS	Iterative Distributed Least Squares
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IETF	Internet Engineering Task Force
IQR	Inter-Quartil-Range
ISO	Internationale Organisation für Normung (gr. „isos“: gleich)

L

LEACH	Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy
LLC	Logical Link Control
LMST	Local Minimum Spanning Tree
LOS	Line of Sight
LQI	Link Quality Indicator
LS	Least Squares

M

MASCLE	Mutual Assistance in a Cluster Environment
MCFA	Minimum Cost Forwarding Algorithm
mDLS	Mobile Distributed Least Squares
MDS	Multi Dimensional Scaling
MEMS	Micro-Electro-Mechanical Systems
MSN	Mobile Sensor Network
MTP	Minimal Transmission Power

N

NAMA	Node-Activation Multiple Access
NCW	Network-Centric Warfare (dt. Netzzentrierte Kriegsführung)
NEMS	Nano-Electro-Mechanical Systems
NLOS	Non Line of Sight

O

OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OLS	Ordinary Least Squares
O-QPSK	Offset Quadrature Phase Shift Keying
OSI	Open Systems Interconnection

P

PEGASIS	Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems
PIT	Point-In-Triangulation
PMAC	Pattern MAC
PSFQ	Pump Slowly, Fetch Quickly

R

RAL	Resource Aware Localization
RBS	Reference Broadcast Synchronisation
RFD	Reduced Function Device
RIV	Reference Identification Vector
RMST	Reliable Multi-Segment Transport
RSSI	Received Signal Strength Indicator
RTOA	Roundtrip Time of Arrival
RTS	Request to Send
RWL	Relative Span Weighted Centroid Localization

S

SBCL	Shape Based Centroid Localization
sDLS	Scalable Distributed Least Squares
sDLSⁱ	Scalable Distributed Least Squares (initial approach)
sDLSnd	Scalable Distributed Least Squares (no delete)
sDLS^{ne}	Scalable Distributed Least Squares (normal equation)
sDLSⁿⁱ	Scalable Distributed Least Squares (no insert)
sDLS^{nu}	Scalable Distributed Least Squares (no update)

SensIT	Sensor Information Technology
SHM	Structural Health Monitoring
S-MAC	Sensor-MAC
SoC	System on Chip
SPIN	Sensor Protocols for Information via Negotiation
sRAL	Scalable Resource Aware Localization
SWCL	Similarity based Weighted Centroid Localization

T

TAG	Tiny Aggregation
TCP	Transmission Control Protocol
TCP/IP	Transmission Control Protocol / Internet Protocol
TDMA	Time Division Multiple Access
TDOA	Time Difference of Arrival
TEEN	Threshold-Sensitive Energy-Efficient Sensor Network
T-MAC	Timeout-MAC
TOA	Time of Arrival
TPSN	Timing-Sync Protocol for Sensor Networks
TRAMA	Traffic-Adaptive Medium Access

U

uC	Mikrocontroller (μ C)
-----------	----------------------------

V

VFA	Virtual Force Algorithm
------------	-------------------------

W

WCL	Weighted Centroid Localization
WFD	WirelessHART Field Device
WLS	Weighted Least Squares
WNSN	Wireless Nanosensor Network
WPAN	Wireless Personal Area Network
WSAN	Wireless Sensor and Actuator Network
WSN	Wireless Sensor Network

XYZ

XGAF	Extended Geographical Adaptive Fidelity
ZDO	ZigBee Device Object (ZigBee)
Z-MAC	Zebra-MAC

Kurzreferat

Etwa seit Beginn des 21. Jahrhunderts erfährt die Elektroindustrie eine anhaltende Entwicklung der Miniaturisierung, welche zu immer kleineren und stromsparenden Geräten führte. Seit dieser Zeit ist mit der Etablierung des Begriffs des Smart Dust die Erforschung sogenannter drahtloser Sensornetzwerke zu einem zentralen und interdisziplinären Forschungsgebiet der Informatik und Elektrotechnik erwachsen. Die Vision von untereinander vernetzten, intelligenten mit Sensorik aber auch Aktorik ausgestatteten Kleinstgeräten, welche sich durch autonomes, selbstorganisiertes Verhalten auszeichnen, stieß bei Industrie und Militär gleichermaßen auf Interesse. Einige Visionäre sagten den drahtlosen Sensornetzwerken sogar schwarmartiges Verhalten und eine daraus erwachsende kollektive Intelligenz voraus.

Doch bevor drahtlose Sensornetzwerke zur Überwachung von Biotopen, Bauwerken oder militärischen Arealen genutzt werden können, gilt es einige grundlegende Herausforderungen, angefangen von der einfachen Kommunikation zwischen zwei Knoten, bis hin zur selbstorganisierten Bewertung, Verarbeitung und Verbreitung aus Messwerten gewonnener Informationen innerhalb eines komplexen Netzwerks zu bewerkstelligen. Vor allem die besondere Anforderung des niedrigen Energieverbrauchs und der knappen Ressourcen bietet dabei immer wieder Möglichkeiten für neue Ansätze und Ideen.

Die vorliegende Arbeit bietet zunächst einen Überblick über die existierenden Herausforderungen und Ansätze im Kontext der drahtlosen Sensornetzwerke. Nach dieser allgemeinen Einführung werden drei der vorgestellten Themen detaillierter betrachtet. Bei der Behandlung dieser meist separat betrachteten Themen wird in besonderem Maße auf das Zusammenspiel bzw. die Abhängigkeiten der Themen untereinander eingegangen.

Als zentrales Thema der Arbeit wird die Positionsbestimmung einzelner Knoten innerhalb eines Sensornetzwerks betrachtet. Hier werden sowohl Algorithmen der approximativen Lokalisierung als auch der exakten Lokalisierung betrachtet, welche im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurden. Benötigt wird die so gewonnene Information beispielsweise bei der Unterteilung eines Netzwerks in sogenannte Cluster. In diesem zweiten Themenkomplex der vorliegenden Arbeit wird zum einen ein auf Lokalisierung aufbauendes Verfahren

betrachtet. Zum anderen wird ein Algorithmus vorgestellt, welcher sich die Mechanismen der Lokalisierung zunutze macht, ohne jedoch auf die Ermittlung einer konkreten Position angewiesen zu sein. Aufgrund der zur Lokalisierung verwendeten, fehlerbehafteten Messgrößen ist die Positionsbestimmung innerhalb drahtloser Sensornetzwerke, unabhängig von der Verwendung exakter oder approximativer Verfahren, ebenfalls fehlerbehaftet. Das im dritten Themenkomplex betrachtete Verfahren zur Erkennung von Fehlern innerhalb drahtloser Sensornetzwerke bietet eine Möglichkeit, um Fehler innerhalb ermittelter Informationen in drahtlosen Sensornetzwerken zu erkennen. Der vorgestellte Algorithmus, welcher eine Problematik thematisiert, die in dieser Form bislang nur wenig Beachtung fand, bietet auch die Möglichkeit, Fehler in der Lokalisierung zu erkennen und auf diese zu reagieren.

Die in den jeweiligen Themenkomplexen präsentierten Algorithmen stellen eine Verbesserung der bis dato existierenden Algorithmen dar. Darüber hinaus findet in jedem Themenkomplex eine Betrachtung möglicher Weiterentwicklungen und Potentiale statt, welche über den Stand der jeweiligen Publikationen hinaus geht. In gegebenen Fällen wird weiterhin auf den Einfluss der dargestellten Algorithmen auf weiterführende Arbeiten anderer Autoren hingewiesen, welche unter dem Einfluss der dargestellten Ansätze entstanden.

Abstract

Since about the beginning of the 21st century the electrical industry has experienced a continuing trend of miniaturization, resulting in smaller and more energy efficient devices. Since this time, when the idea of smart dust has been established, wireless sensor networks have become a central and interdisciplinary field of research within computer sciences and electrical engineering. The vision of wireless connected smart devices, equipped with sensors and actuators, acting autonomously and selforganized, gained high interest from industry and military as well. Some inventors even predicted flocking behavior and collective intelligence within wireless sensor networks.

Before wireless sensor networks can be used for monitoring habitats, buildings or military areas, there is a couple of challenges to be solved. Those range from a simple communication between two sensor nodes up to a self organized validation, processing and distribution of measured data within a complex network of thousands of nodes. Most notably the very special demand for a low energy consumption and the limitation of resources in general, consistently give possibilities for new approaches and new ideas.

The present thesis firstly provides an overview of existing challenges and approaches concerning wireless sensor networks. After this general introduction it continues with a more detailed consideration of three topics introducing the main topics of this work. Although, all of these topics are discussed separately, especially interaction and dependencies between these challenges are taken into account.

As its main topic this thesis deals with positioning of single nodes within wireless sensor networks. Various approaches covering fine grained localization as well as coarse grained localization, developed within this work will be discussed. The location information, provided by such algorithms can be used for instance to divide the network into clusters. Clustering in wireless sensor networks forms the second part of this work. Two newly developed algorithms will be presented. One of them is based on location information. The other uses coarse grained localization technique but without the need for location information. Due to the imprecise input parameters used for localization, a calculated position estimate will be also inexact even if a fine grained approach is used for estimation.

The third topic of this thesis is about an algorithm newly developed to detect erroneous data at a sensor node. The presented algorithm covers a kind of error detection to which only weak attention has been paid until now. It can be used to detect erroneous sensor readings as well as other erroneous values like location estimates.

In each of these topics, the presented algorithms represent a significant improvement of known algorithms existing at the time of its development. Furthermore, within each topic possible enhancements or future work possibilities are discussed. In some cases the impact of the presented work on publications of other authors is mentioned.

Danksagung

Ich danke meinem Doktorvater, der mir durch das entgegengebrachte Vertrauen die Möglichkeit der freien und selbstverantwortlichen Arbeit ermöglichte, die zu der vorliegenden Promotionsschrift führte.

Weiterhin möchte ich mich bei dem tollen Kollegium für den regen Gedankenaustausch und die inspirierenden Diskussionen bedanken.

Ein besonderer Dank geht an meine Familie, welche mir gerade in der Schlussphase der Arbeit tatkräftig und verständnisvoll zur Seite stand.

Kapitel 1

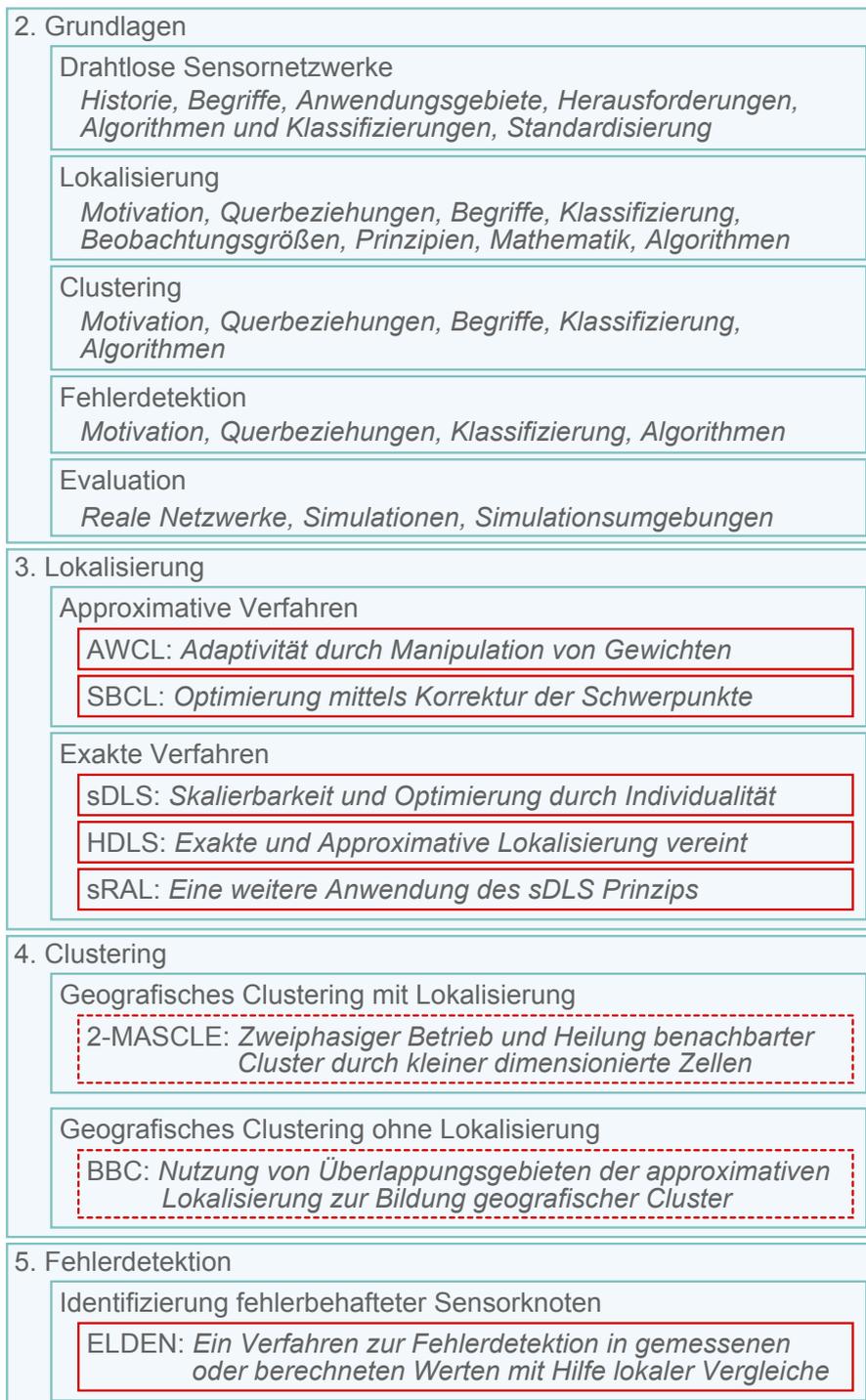
Einleitung

1.1 Zielsetzung dieser Arbeit

Durch den Einsatz drahtloser Sensornetzwerke eröffnen sich eine Vielzahl möglicher Anwendungsszenarien. Ebenso vielfältig sind jedoch auch die Herausforderungen, die sich für einen effektiven Einsatz drahtloser Sensornetzwerke stellen. Zu diesen Herausforderungen zählen neben einer zuverlässigen und performanten Kommunikation auch die Bestimmung der Position eines Sensorknotens, die Zuordnung zu einer lokal begrenzten Gruppe sowie der Umgang mit auftretenden Fehlern. Auch wenn derartige Herausforderungen oft getrennt voneinander betrachtet werden, so existieren dennoch vielfältige Abhängigkeiten zwischen diesen. Das Ziel dieser Arbeit besteht zum einen in der Untersuchung und Weiterentwicklung von Verfahren zur Positionsbestimmung innerhalb drahtloser Sensornetzwerke. Zum anderen erhebt diese Arbeit den Anspruch, Querbeziehungen zu weiteren Herausforderungen innerhalb drahtloser Sensornetzwerke herauszustellen. Im Einzelnen wird dabei einerseits auf die Bildung und Verwendung von Netzwerklustern auf Basis gegebener Ortsinformationen eingegangen und andererseits die Erkennung von Fehlern in drahtlosen Sensornetzwerken thematisiert. Die treibende Kraft hinter den vorgestellten Entwicklungen innerhalb dieser drei Themengebiete stellt dabei vielfach das Streben nach einem energieeffizienten Verhalten dar.

1.2 Aufbau dieser Arbeit

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in sechs Kapitel. Die vier wesentlichen Kapitel sind in Abbildung 1.1 als Übersichtsgrafik dargestellt. Sie werden durch die Einleitung und die abschließende Zusammenfassung ergänzt.



Dieser Beitrag entstand in alleiniger Autorenschaft.

Dieser Beitrag entstand zu gleichen Teilen in Zusammenarbeit mit einem Koautor.

Abbildung 1.1: Aufbau der Arbeit in einer grafischen Übersicht.

Nach der Einleitung in Kapitel 1 folgt in Kapitel 2 eine Darstellung der Grundlagen drahtloser Sensornetzwerke (engl. Wireless Sensor Network (WSN)) sowie eine Skizzierung der vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten. In separaten Unterkapiteln findet an dieser Stelle ebenfalls eine Einführung in das Schwerpunktthema dieser Arbeit, der Lokalisierung, sowie den beiden nachgeordneten Themen, der Clusterbildung und der Fehlerdetektion, statt. Anschließend werden die durchgeführten Arbeiten in den Kapiteln 3, 4 und 5 vorgestellt und bewertet. In jedem dieser drei Kapitel wird dabei auf die Wechselwirkungen mit den jeweils anderen Themen sowie weiteren Fragestellungen innerhalb drahtloser Sensornetzwerke eingegangen. Der Vorstellung der entwickelten Verfahren folgt jeweils eine Betrachtung bereits erfolgter oder möglicher Weiterentwicklungen. Den Abschluss eines jeden Themenkomplexes bildet eine kurze Zusammenfassung. Die Arbeit schließt in Kapitel 6 mit einer Zusammenfassung der präsentierten Arbeiten und Ergebnisse ab.

Kapitel 2

Grundlagen

2.1 Drahtlose Sensornetzwerke

Sensornetzwerke müssen nicht immer drahtlos miteinander verbunden sein. Betrachtet man zum Beispiel die enorme Zahl an Sensoren, welche in modernen Autos miteinander verbunden sind, so kann man ohne Zweifel von einem hochmodernen Sensornetzwerk sprechen. Die Bedeutung des Wortes Sensornetzwerk suggeriert darüber hinaus, dass Sensornetzwerke bereits existierten, bevor sich dieser Begriff etablierte. So kann allein von der Wortbedeutung bereits dann von einem Sensornetzwerk gesprochen werden, wenn mindestens zwei Sensoren über eine elektrische oder gar mechanische Verbindung miteinander oder mit einer zentralen Instanz in Verbindung stehen. Und so verwundert es nicht, dass zur geschichtlichen Entwicklung drahtloser Sensornetzwerke häufig auch erste drahtgebundene Netzwerke gezählt werden. In den nachfolgenden Abschnitten werden beginnend mit der geschichtlichen Entwicklung wichtige Begriffe erklärt und in den Kontext drahtloser Sensornetzwerke eingeordnet. Weiterhin werden technische Grundlagen drahtloser Sensornetzwerke vermittelt und bestehende Besonderheiten und Herausforderungen erörtert.

2.1.1 Historie

Die Entwicklungsgeschichte drahtloser Sensornetzwerke beginnt in den späten 70er Jahren und umfasst damit bereits mehr als 30 Jahre. Das Arpanet, der militärische Vorläufer des heutigen Internets, war gerade einige Jahre mit etwa 200 Computern in Betrieb, da keimte bereits die Idee, Sensoren auf ähnliche Weise miteinander zu vernetzen. Robert Elliot Kahn, einer der Entwickler von TCP/IP und Mitbegründer des Internets, hatte die Idee, verteilte, autonome und kostengünstige Sensorknoten miteinander zu vernetzen,

sodass diese untereinander Informationen austauschen können. Bald darauf etablierte sich der Begriff der Distributed Sensor Networks (DSNs) für derartige Netzwerke und bereits 1978 wurden im *Distributed Sensor Nets Workshop* [Uni78] die zur Realisierung solcher Netzwerke notwendigen Komponenten von der Sensorik über die Kommunikation und Datenverarbeitung bis hin zu Algorithmen und verteilter Software identifiziert. Einige Zeit später, zu Beginn der 80er Jahre, begann die Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA), die bereits für die Entwicklung des Arpanet verantwortlich war, im Rahmen des DSN-Programms mit der Entwicklung von Hard- und Software für verteilte Sensornetzwerke. Bereits zu dieser Zeit wurde akustisches Tracking als Anwendungsszenario verwendet. Im Ergebnis dieser frühen Bemühungen wurde etwa 1985 das in Abbildung 2.1 dargestellte Testbed zum Tracking niedrig fliegender Flugzeuge erfolgreich getestet [Lac87].

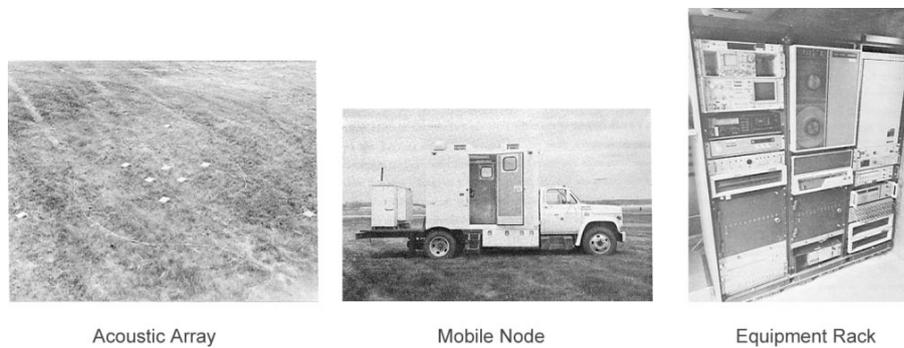


Abbildung 2.1: DSN-Testbed um 1985, bestehend aus 9 Mikrofonen in einem Acoustic Array, einem mobilen Knoten sowie einem Equipment Rack mit Gateway-Knoten. Quelle: [Lac87]

Obwohl die Grundidee der Sensornetzwerke bereits früh eine möglichst große Zahl sehr kleiner Sensorknoten beinhaltete, konnte diese Vision in den ersten Jahrzehnten aufgrund des fehlenden technischen Fortschritts nicht verwirklicht werden. Bis zum Ende der 90er Jahre änderte sich nur wenig an dieser Situation. So wurde die Forschung im Bereich Sensornetzwerke in dieser Zeit durch die Netzzentrierte Kriegsführung (engl. Network-Centric Warfare (NCW)) mit ihren großen, meist drahtgebunden Projekten bestimmt [AGS99].

Erst mit Beginn des 21. Jahrhunderts und dem Durchbruch der Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS)-Technologie war die technologische Entwicklung weit genug, um die Vision kleiner, preiswerter Sensoren, gepaart mit stromsparenden Mikrocontrollern und Funkvernetzung zu verwirklichen [GV01]. Erneut stellte die DARPA mit dem Forschungsprogramm Sensor Information Technology (SensIT) eine treibende Kraft dar [KS01, CK03]. Es waren vermutlich die Arbeiten und Veröffentlichungen des 1998 gestarteten Smart Dust Projektes, welche 2001 die Visionen drahtloser Sensornetzwerke einer breiten Öffentlichkeit

näher und den Forschern in aller Welt zum Greifen nah brachten [WLLP01]. Aus dem ehrgeizigen Projekt folgte 2002 die Ausgründung von *Dust Networks Inc.*. Neben *Crossbow*, *Meshnetics*, *Texas Instruments*, *Ember*, *Moteiv* und *ScatterWeb* gehört das Unternehmen heute zu einer Vielzahl von Anbietern, welche drahtlose Sensornetzwerke für Forscher und Entwickler, aber auch für Endanwender vertreiben.

Seit Beginn des 21. Jahrhunderts ist die Miniaturisierung unaufhaltsam fortgeschritten und hat dazu geführt, dass immer mehr Funktionalität auf kleinerer Fläche und mit geringerem Energieverbrauch möglich geworden ist. So finden sich heute bereits Mikrocontroller, Speicher, Funkkommunikation, Analog-Digital-Wandler (engl. Analog-to-Digital Converter (ADC)), Sensorik und weitere Komponenten in einem einzigen System on Chip (SoC) vereint [CLP06]. Bislang konnte die Vision des intelligenten Staubkorns noch nicht verwirklicht werden. Dennoch scheint die Forschung, angesichts neuer, noch kleinerer Strukturen wie den Nano-Electro-Mechanical Systems (NEMS) [Req03], fest entschlossen, das Ziel der anhaltenden Miniaturisierung zu verfolgen. So haben bereits heute die Forschungen an sogenannten Wireless Nanosensor Networks (WNSNs) begonnen, welche in Zukunft auch innerhalb lebender Organismen Anwendung finden sollen [AJ10].

2.1.2 Begriffsklärung

Bereits an der Entwicklungsgeschichte drahtloser Sensornetzwerke ist zu erkennen, dass es scheinbar keine klare Definition drahtloser Sensornetzwerke gibt. Ebenso zeigt sich bei den Anwendungsgebieten in Kapitel 2.1.3, dass diese je nach Anwendung in Netzgröße, Knotengröße oder auch Energieversorgung und den damit verbundenen Anforderungen variieren können. In diesem Kapitel sollen daher einige Grundbegriffe drahtloser Sensornetzwerke geklärt und charakteristische Merkmale aufgezeigt werden. Die dargelegten Beschreibungen sollen dabei nicht den Anspruch erheben, auf alle denkbaren Szenarien anwendbar zu sein. Vielmehr soll ein Idealbild aufgezeigt werden, welches als Ausgangsbasis für die in der Arbeit beschriebenen Algorithmen dient. Die nachfolgenden Ausführungen orientieren sich dabei an den grundlegenden Visionen und weithin akzeptierten Charakteristika drahtloser Sensornetzwerke.

Sensorknoten In den Visionen der Wissenschaftler werden Sensorknoten, die Grundelemente drahtloser Sensornetzwerke, als kleine, preiswerte, smarte Geräte bezeichnet, welche über Sensorik und drahtlose Kommunikation verfügen [CK03]. Die angestrebte Größe dieser Geräte wird durch den Begriff „mote“ (engl. Stäubchen) verdeutlicht, der

häufig zur Bezeichnung von Sensorknoten verwendet wird. Die angestrebte Preisklasse der Sensorknoten, welche ebenso wie die Größe bislang nicht erreicht wurde, erschließt sich aus dem häufig verwendeten Attribut „disposable“, welches drahtlose Sensorknoten als Wegwerfgeräte bezeichnet. Die Charakterisierung von Sensorknoten als smarte Geräte impliziert das Vorhandensein einer gewissen Intelligenz in Form eines Mikrocontrollers (uC) und der darauf laufenden Algorithmen. Zur dauerhaften sowie flüchtigen Speicherung von Algorithmen und Daten verfügt ein Sensorknoten über verschiedene Speicherelemente. Weiterhin werden Sensorknoten als autarke Einheiten beschrieben, was die Notwendigkeit einer Energiequelle impliziert. Diese wird in der Regel durch einen begrenzten Energiespeicher dargestellt und kann optional durch energiegewinnende Elemente wie Solarzellen ergänzt werden [RWR03]. Optional kann ein Sensorknoten mit einer Lokalisierungshardware, wie dem Global Positioning System (GPS) ausgestattet sein, welche an dieser Stelle als eine weitere Sensorik-Komponente betrachtet werden soll. Abbildung 2.2 stellt die nachfolgenden aufgelisteten grundlegenden Komponenten eines Sensorknotens schematisch dar.

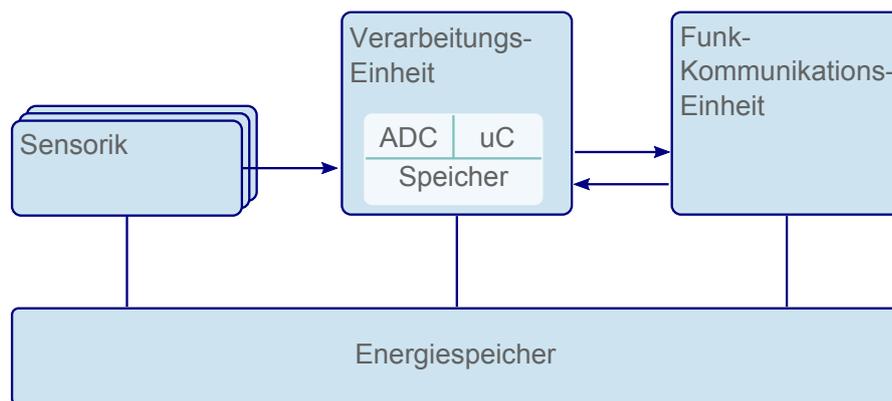


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung der Basis-Architektur eines Sensorknotens.

Sensorik: Die charakteristischste Komponente eines Sensorknotens stellt die Sensorik dar. Sie stellt mit einem oder mehreren Sensoren eine physikalische Schnittstelle zur Umwelt dar. Charakteristische Messgrößen sind Licht und Temperatur, aber auch Beschleunigung.

Verarbeitungseinheit / Recheneinheit: Sie dient zur Verarbeitung erfasster Messwerte, sowie zur Steuerung der übrigen Komponenten. Sie ermöglicht ein intelligentes Energiemanagement und veranlasst die Kommunikation mit anderen Sensorknoten. Sie enthält neben dem Mikrocontroller meist einen internen Speicher sowie einen ADC.

Funkmodul: Das Funkmodul dient zum Senden und Empfangen von Nachrichten und damit der Kommunikation mit anderen Sensorknoten. Es enthält alle notwendigen Komponenten, um eingehende Datenbits in ein ausgehenden Funksignal zu wandeln sowie Datenbits aus empfangenen Funksignalen zu extrahieren. In modernen Sensorknoten enthält es zusätzlich häufig einen eigenen Mikrocontroller und Speicher, welcher ausschließlich für die Einhaltung der Funkprotokolle vorgesehen ist.

Energiespeicher: Der Energiespeicher dient als Energieversorgung für alle Komponenten des Sensorknotens. Der darin gespeicherte Energievorrat ist der limitierende Faktor jedes Sensorknotens und bedingt eine energieeffiziente Arbeitsweise von Hardware und Software.

Sensornetzwerk Durch das Zusammenwirken einer Vielzahl drahtloser Sensorknoten ergibt sich nun ein drahtloses Sensornetzwerk. Mittels drahtloser Kommunikation tauschen Sensorknoten innerhalb eines Sensornetzwerks untereinander Informationen aus. Die Kommunikation innerhalb drahtloser Sensornetzwerke zeichnet sich in der Regel dadurch aus, dass ein Großteil der Sensorknoten aufgrund der räumlichen Ausbreitung nicht direkt miteinander kommunizieren kann, sondern im Multi-Hop-Verfahren unter Zuhilfenahme anderer Sensorknoten miteinander kommuniziert. Durch die bestehende Funkkommunikation können die Sensorknoten so aus allen bestehenden Einzelmessungen ein Gesamtbild zusammentragen. Abbildung 2.3 zeigt ein einfaches drahtloses Sensornetzwerk mit den vorgestellten Komponenten.

Senke Um die gemessenen Daten aus dem Netzwerk zu extrahieren, bedarf es einer weiteren obligatorischen Komponente, welche als Senke bezeichnet wird. Die Senke dient als Schnittstelle zwischen Sensornetzwerk und Nutzer. Sie stellt in der Topologie des Sensornetzwerks einen zentralen Knoten dar. In der Regel handelt es sich dabei um einen Sensorknoten, welcher über eine weitere, meist drahtgebundene, Schnittstelle mit einem PC verbunden ist und daher über eine permanente Stromquelle verfügt. Einige Algorithmen drahtloser Sensornetzwerke nutzen die besonderen Eigenschaften der Senke, um aufwendige Berechnungen aus dem Netz auszulagern, an dieser zentralen Stelle durchzuführen und die Ergebnisse anschließend an die Sensorknoten zu verteilen. Der Begriff der Senke impliziert daher zumeist den damit verbundenen PC. In den meisten Szenarien wird von einer einzigen stationären Senke ausgegangen. Aber auch der Einsatz mehrerer und/oder mobiler Senken ist denkbar. Dies ist vor allem in militärischen Szenarien üblich.

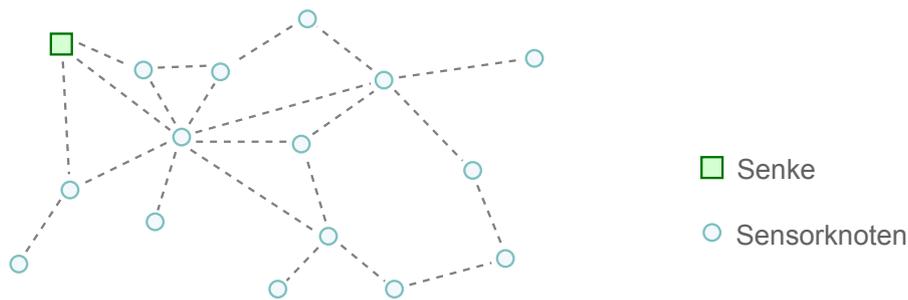


Abbildung 2.3: Komponenten und Aufbau eines einfachen Sensornetzwerks.

Zusätzlich zu den genannten Basiskomponenten können Sensorknoten aufgrund der ihnen zugewiesenen Funktionalität weitere Rollen wie Router, Aggregator, Clusterhead oder Referenzknoten einnehmen. Siehe hierzu die Kapitel 2.1.4.5, 2.1.4.7, 2.3 und 2.2.

2.1.3 Anwendungsgebiete drahtloser Sensornetzwerke

Wie in Kapitel 2.1.1 dargestellt, wurde die Entwicklung drahtloser Sensornetzwerke neben dem akademischen Ansporn vornehmlich durch den militärischen Sektor und erst später durch kommerzielle, industrielle Anwendungsszenarien getrieben [CK03]. Daher ist es nicht verwunderlich, dass eine Reihe der Anwendungsgebiete für drahtlose Sensornetzwerke im militärischen Bereich angesiedelt sind. Neben diesem Anwendungsgebiet haben sich jedoch schnell viele weitere Anwendungsszenarien in einer Vielzahl von Bereichen entwickelt. So gehören zu den typischen Anwendungen auch Umweltüberwachung, medizinische Überwachung, Laborüberwachung, Artenmonitoring und Logistik. Allgemein ist die Anwendbarkeit drahtloser Sensornetzwerke immer dann gegeben, wenn große, unzugängliche Gebiete überwacht werden sollen, oder aber eine Verkabelung mittels herkömmlicher Sensorik aus monetären oder baulichen Gründen nicht gewünscht ist. Eine Reihe zusammenfassender Arbeiten eröffnet einen umfassenden Überblick über Anwendungsmöglichkeiten drahtloser Sensornetzwerke, von denen einige nachfolgend vorgestellt werden [ASSC02, ALM05, CF06, AV10].

Durch die Entwicklung immer kleinerer und effektiverer Sensoren haben sich eine Reihe typischer Messgrößen für Sensornetzwerke herausgebildet. Zu den häufig mit Sensornetzwerken ermittelten Phänomenen gehören neben Temperatur und Lichtstärke auch Feuchtigkeit, Druck, Geschwindigkeit und Beschleunigung, Vibration, Salinität, mechanischer Stress sowie akustische Ereignisse. Die Palette an verwendbarer Sensorik wird dabei lediglich durch den angestrebten Formfaktor und die verfügbaren Energiereserven limitiert. Vervollständigt wird die Palette der Phänomene durch interne Messgrößen wie Batteriespannung

und Signalempfangsstärke. Auf der Grundlage der detektierbaren Phänomene hat sich eine Vielzahl von Anwendungsszenarien entwickelt, von denen einige den Weg zur realen Anwendung geschafft haben. Nachfolgend werden einige Anwendungen aus den Bereichen Militär, Natur und Umwelt, Medizin und Pflege sowie Industrie präsentiert.

2.1.3.1 Militärische Anwendung

Die besondere Eignung von Sensornetzwerken für den militärischen Einsatz besteht vornehmlich in der einfachen Installation, beispielsweise dem Abwurf mittels Flugzeug, und einer angestrebten Fehlertoleranz aufgrund redundant ausgebrachter Geräte. Auch die angestrebte Vision von Sensorknoten als kostengünstige Einweggeräte stärkt ihre Attraktivität für den Einsatz in einer von Zerstörung geprägten Umgebung. Eine Besonderheit, die bei militärisch motivierten Einsatzszenarien häufig genannt wird, ist die Datenabfrage mittels mobiler Datensensoren. Durch die Abfrage gesammelter Daten mit Hilfe kleiner Fluggeräte, mobiler Roboter oder durch Fahrzeuge, kann häufig die Annahme getroffen werden, dass jeder Sensorknoten zur Senke kommunizieren kann und somit ein Routing von Nachrichten nicht erforderlich ist. Eines der ersten und in der Community gleichermaßen eines der bekanntesten WSN - Projekte ist *Smart Dust* [PKB, KKP99, WLLP01, WAP01]. Das von der DARPA finanzierte Projekt zielte auf die Nutzung der Kleinstgeräte in feindlichem Gebiet ab, um zum Beispiel Feindbewegungen zu erfassen, oder den Einsatz atomarer, biologischer oder chemischer Kampfstoffe zu detektieren. Die Entwicklung befasste sich vornehmlich mit der Miniaturisierung von Kommunikations- und Recheneinheit. Tatsächlich konnte das Projekt einen Prototypen in der Größe von 100 mm^3 hervorbringen, welcher jedoch aufgrund der optischen *Corner Cube* Kommunikation lediglich von geringer praktischer Relevanz ist. Weitere Beispiele aus dem militärischen Sektor sind das *Boomerang Shooter Detection System* [Ray, LNV⁺05, MBB⁺05] zur Ortung von Scharfschützen sowie *VigilNet* [HKL⁺06] zur Verfolgung von Zielobjekten, welches Fahrzeuge und Objekte mit Hilfe von Magnetfeldsensoren anhand der von ihnen erzeugten Magnetfelder detektiert. Die Möglichkeiten von Sensornetzwerken, verbunden mit moderner Wissenschaft und Algorithmik enden jedoch nicht bei der bloßen Detektion und Verfolgung von Objekten, sondern ermöglichen auch eine Klassifizierung der Objekte [LWHS02, ADB⁺04]. Auch der Einsatz als intelligenter Nachfolger für Landminen ist möglich [HKS⁺04].

2.1.3.2 Natur und Umwelt

Eine weitere große Gruppe an Anwendungsgebieten stellt die Umweltüberwachung dar. Die Anwendungen reichen in ihrer Vielfalt von der Überwachung von Tieren und deren Wanderverhalten bis hin zur Überwachung von Flutgebieten. Weitere Einsatzszenarien sind die Überwachung allgemeiner Umwelteinflüsse und -bedingungen, technologisch gestützte Landwirtschaft [LBV06, WCS⁺07, WZW06, BBB04], marine Umweltüberwachung, Detektion von Waldbränden [YWM05, ZLHK08] sowie Meteorologie und Geophysik [FSAB⁺].

Eines der bekanntesten und ersten Projekte auf diesem Gebiet ist unter dem Namen *Great Duck Island* bekannt und wie auch schon das Smart Dust Projekt an der Berkeley University of California beheimatet. Bei dem Projekt wurden insgesamt 32 Sensorknoten zur Überwachung der Nester und Gelege von Seevögeln auf Great Duck Island im Golf von Maine eingesetzt. Die zur Überwachung verwendeten Mica Sensorknoten verfügten über Sensoren zur Erfassung von Temperatur, Licht, Luftdruck und Luftfeuchtigkeit. Während mit Sensoren in den Bruthöhlen die Anwesenheit der Vögel selbst detektiert wurde, dienten Sensoren außerhalb der Gelege zur Erfassung von Wetterdaten [MCP⁺02]. Ein weiteres Beispiel für den zoologischen Einsatz ist das ZebraNet - Projekt in Kenia [MLP⁺, JOW⁺02, Mar06]. Zur Verfolgung des Wanderverhaltens von Zebras tragen diese mit GPS ausgestattete Sensorknoten, welche die Position der Tiere bestimmen und die gesammelten Daten immer dann zur Senke übertragen, wenn diese in Übertragungreichweite ist. Im Bereich der marinen Anwendung ist das Columbia River Ecosystem (CORIE) - Projekt zu Bekanntheit gelangt. An verschiedenen Stellen des Columbia River werden Wassertiefe, Fließgeschwindigkeit, Wassertemperatur und Salinität erfasst und mit Wetterdaten weiterer Sensoren zusammengeführt. Ziel ist die Analyse und Vorhersage von Strömungen und der damit einhergehenden Mischungsprozesse. Das Projekt mit seinen vergleichsweise wenigen aber kostenintensiven und umfangreich ausgestatteten Sensorknoten demonstriert leider auch, wie weit heutige Sensornetzwerke von der ursprünglichen Vision entfernt sind [BCF⁺, DFB⁺07]. Nennenswert sind ebenfalls die Überwachung vulkanischer Aktivitäten mittels seismischer Sensoren [WLW⁺06], der Einsatz in Flutwarnungssystemen [BRR08], sowie die Kartographierung von Klimazonen im vertikalen Verlauf urzeitlicher Mammutbäume [TPS⁺05].

2.1.3.3 Medizin und Pflege

Als weitere Anwendungsgruppe hat sich der medizinisch-pflegerische Sektor herausgebildet. Sensornetzwerke im klassischen Sinne finden hier Anwendung zur Ortung von

Patienten sowie zur Überwachung von Vitalfunktionen. So ermöglicht das Projekt *CodeBlue* die Erfassung und Überwachung von Pulsrate, Sauerstoffsättigung, Muskelaktivität und Bewegung von Patienten mittels Pulsoximeter, Elektrokardiographie (EKG), Elektromyographie (EMG) sowie Accelerometer und Gyrometer [WCDWG, FJMWM04]. In ähnlicher Weise adressiert *AlarmNET* die Überwachung alter und pflegebedürftiger Menschen in Pflegeeinrichtungen [SSW, WSV⁺08]. Ein Sensornetzwerk etwas anderer Art, welches nur aus wenigen heterogenen Sensorknoten besteht, stellt das *Artificial Retina* - Projekt dar, welches bei Patienten mit bestimmten Krankheitsbildern das Sehvermögen in Teilen wiedererlangen lässt [U.S, CDM⁺09]. Zu diesem Zweck nimmt eine in einem Brillengestell befindliche Kamera das im Gesichtsfeld befindliche Bild auf, welches drahtlos zu einem Implantat im Auge übertragen wird. Dort wandelt ein Mikrocontroller die Informationen in elektrische Signale um, die mittels winziger Elektroden an die Retina weitergeleitet werden, von wo aus die Sehnerven dem Bild entsprechend stimuliert werden.

2.1.3.4 Industrie und Forschung

Abschließend sei an dieser Stelle auf die Gruppe der industriellen, kommerziell orientierten Sensornetzwerkanwendungen eingegangen. Der Vorteil von drahtlosen Sensoren ist hier meist bereits dadurch gegeben, dass eine Erweiterung und Veränderung der Sensorik bei herkömmlichen drahtgebundenen Lösungen um ein Vielfaches teurer ist als es bei drahtlosen Sensoren der Fall ist. Eine weitere Alternative zu drahtgebundenen Sensorsystemen stellt die manuelle sensorische Überwachung dar. Zwar ist eine Systemerweiterung in diesem Fall relativ unkompliziert möglich und eine aufwendige Verkabelung meist nicht notwendig, jedoch entstehen bei der manuellen Überwachung dauerhaft hohe Personalkosten. Darüber hinaus impliziert die menschliche Komponente immer auch eine potentielle Fehlerquelle. Industriell finden drahtlose Sensornetzwerke unter anderem Anwendung in der Materialüberwachung, der Gebäudeautomation [KMB02] sowie der Automation und Assistenz in Büros, Museen, Schulen und Kindergärten [SMP01]. Weitere Anwendungen sind Inventar- und Lagermanagement [Kno04], Fabrik- und Laborautomation [KAB⁺05, ZBH⁺09], Qualitätsmanagement sowie Transportwesen und Flottenmanagement [Kno04, JBWL06].

Ein immer wieder proklamiertes Anwendungsszenario drahtloser Sensornetzwerke ist das Structural Health Monitoring (SHM). Gemeint ist die Überwachung des strukturellen Zustandes von Bauwerken und Bauteilen. Durch die Detektion von Rissen oder Verformungen oder besonderem mechanischen Stress sollen ernsthafte Schäden vermieden und frühzeitige Gegenmaßnahmen ermöglicht werden. Im *NetSHM* - Projekt dienen Sensorknoten, welche zur Vibrationsdetektion eingesetzt werden, dazu, mögliche Schäden zu erkennen. Zu

diesem Zweck können sowohl ambiente Vibrationen im normalen Betrieb als auch gezielt indizierte Anregungen analysiert werden [CPF⁺, PCG⁺⁰⁵, CPG⁺⁰⁶, CFP⁺⁰⁶, LSL⁺⁰³]. Eine weitere Anwendung, der zur Zeit wachsende Aufmerksamkeit zuteil wird, ist das *Smart Metering* oder auch *Automatic Meter Reading*. Hierbei werden drahtlose Sensoren verwendet, um Verbrauchsdaten für Wasser, Gas und Elektrizität zeitnah und hoch aufgelöst zu erfassen [RAF⁺⁰¹].

2.1.3.5 Resümee

Abschließend kann festgestellt werden, dass eine Reihe von Anwendungen von drahtlosen Sensornetzwerken profitieren können. Es ist aber auch festzustellen, dass häufig die ursprünglichen Charakteristika drahtloser Sensornetzwerke aufgeweicht werden. So bestehen viele reale Anwendungen eher aus wenigen Dutzend als aus mehreren hundert Sensoren. Ebenso bietet sich häufig eine statische Stromversorgung anstatt eines limitierenden Energiespeichers an.

Im April 2004 trafen sich 24 Wissenschaftler und Vertreter der Industrie aus 11 europäischen Staaten, um Anforderungen und Charakteristika anhand bestehender Anwendungen von Sensornetzwerken neu zu bewerten und zukünftige Forschungsrichtungen zu erschließen. Durch den in diesem Workshop zusammengetragenen, in Anhang A dargestellten Vergleich realer Anwendungen wird klar, wie unterschiedlich Sensornetzwerke in der Realität sind und wie weit diese teilweise von der ursprünglichen Vision abweichen [RM04].

Am ehesten entsprechen militärische Anwendungen der Idee von tausenden batteriebetriebenen Sensorknoten. Gerade bei Sensornetzen mit nur wenigen Knoten weicht eine zufällige Platzierung der Knoten einer gezielten Platzierung von Sensorknoten.

2.1.4 Herausforderung drahtloser Sensornetzwerke

2.1.4.1 Abgrenzungsmerkmale zu anderen drahtlosen Netzen

Ogleich drahtlose Sensornetzwerke in ihrer Funkkommunikation Ähnlichkeiten mit anderen drahtlosen Ad-Hoc-Netzwerken aufweisen, so bestehen doch einige signifikante Unterschiede. Diese Unterschiede ergeben sich größtenteils aus dem beschränkten Energievorrat, welcher mit der gleichzeitigen Forderung nach einer langen Lebenszeit einen besonders energieeffizienten Betrieb erfordert. Im Vergleich dazu verfügen die in herkömmlichen Ad-Hoc Netzwerken wie WLAN (IEEE 802.11) oder Bluetooth (IEEE 802.15.1) verwendeten Geräte über einen größeren Energiespeicher, welcher jederzeit neu geladen werden

kann. Darüber hinaus sind solche Netzwerke auf eine Lebenszeit von wenigen Stunden ausgelegt [CF06].

Ein weiterer Unterschied zeigt sich in der angestrebten Netzwerktopologie. Bei herkömmlichen Netzen wie den oben genannten wird von einer 1- bis 2-Hop Topologie ausgegangen. Jeder Teilnehmer eines solchen Netzes ist mit einer zentralen Instanz, einem Router oder Master, verbunden, welche mit allen Teilnehmern kommuniziert und zwischen diesen vermitteln kann. Bei Sensornetzwerken hingegen wird die Annahme vieler gleichartiger, auf einer großen Fläche verteilter, Geräte mit beschränkter Sendereichweite getroffen. Es bedarf daher einer Multi-Hop Topologie, um Nachrichten zwischen weit entfernten Teilnehmern auszutauschen. Die nachfolgende Auflistung stellt die wichtigsten Abgrenzungsmerkmale drahtloser Sensornetzwerke zu anderen Drahtlosnetzwerken dar [CF06].

Netzwerkgröße: Die Anzahl beteiligter Sensorknoten innerhalb eines Netzwerks ist mit hunderten bis tausenden Knoten wesentlich höher als in traditionellen Ad-Hoc-Netzwerken.

Netzwerkdichte: Die Anzahl der Sensorknoten je Flächeneinheit ist potentiell höher als die Anzahl der Netzwerkteilnehmer je Flächeninhalt in einem vergleichbaren Ad-Hoc Netzwerk.

Energieversorgung: Sensorknoten verfügen lediglich über einen sehr begrenzten Energievorrat.

Rechenkapazität: Die Rechenkapazität und ausführbare Berechnungskomplexität wird durch den verwendeten Mikrocontroller beschränkt.

Speicherkapazität: Die beschränkten Speicherkapazitäten eines Sensorknotens wirken sich nicht nur auf die eigentliche Applikation sondern auch auf untere Netzwerkschichten aus. So kann ein Sensorknoten allenfalls eine in ihrer Größe stark beschränkte Routingtabelle führen.

Fehleranfälligkeit: Aufgrund harscher Umweltbedingungen, der miniaturisierten Bauweise und der beschränkten Energieversorgung neigen Sensorknoten verstärkt zu Ausfällen.

Topologie: Im Fall mobiler Sensorknoten, aber auch aufgrund von Knotenausfällen und äußeren Einflüssen auf die Funkkommunikation, kann die Topologie in drahtlosen Sensornetzwerken häufig wechseln. Diese ist zudem weniger auf die Kommunikation als auf ein gewähltes Szenario ausgerichtet.

Broadcast: Im Unterschied zu anderen Ad-Hoc-Netzwerken, welche häufig auf Punkt-zu-Punkt Kommunikation aufbauen, stellt die Broadcast Kommunikation ein grundlegendes Paradigma von Sensornetzwerken dar.

Adressierung: Aufgrund der Vielzahl verwendeter Knoten ist eine Adressierung mittels eindeutiger Adressen in Sensornetzwerken nicht notwendigerweise gegeben. Eine Adressierung kann in diesen Fällen auch aufgrund der geografischen Lage oder aufgrund des zu messenden Phänomens erfolgen.

Aufgrund der dargelegten Eigenschaften drahtloser Sensornetzwerke, insbesondere der knappen Ressourcen (Energievorrat, Datenübertragungsrate, Rechenleistung und Speicherkapazität), ergeben sich nachfolgend beschriebene Herausforderungen und deren auf Sensornetzwerke angepasste Lösungen.

2.1.4.2 Allgemeine Designkriterien

Bei einer Vielzahl der nachfolgend genannten Herausforderungen wie zum Beispiel dem Routing, dem Clustering oder der Lokalisierung, können durch die Verwendung globalen Wissens und den Einsatz leistungsfähiger Rechentechnik leicht optimale Ergebnisse erzielt werden. Obgleich zentrale Algorithmen, ausgeführt auf einer dedizierten Recheneinheit, zu optimalen Lösungen führen können, ist die Verwendung lokaler, dezentraler Algorithmen innerhalb drahtloser Sensornetzwerke vorzuziehen. Solche Verfahren können zwar in der Regel nur lokal optimale Lösungen erzielen, ihr Vorteil liegt jedoch in ihrer Skalierbarkeit, Robustheit, einem geringeren Kommunikationsaufwand und einer kürzeren Antwortzeit auf Veränderungen im Netzwerk.

2.1.4.3 Einordnung in das OSI-Referenzmodell

Als Designgrundlage für Kommunikationsprotokolle in Rechnernetzen wurde die Kommunikation, welche aus einer Reihe unterschiedlicher Aufgaben besteht, von der Internationalen Organisation für Normung (ISO) in sieben aufeinander aufbauende Schichten, sogenannte Layer unterteilt. Diese Schichten bilden zusammen das Open Systems Interconnection (OSI)-Referenzmodell. Die Darstellung dieses Modells in Abbildung 2.4 beinhaltet zusätzlich die durch das Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) vorgenommene Verfeinerung. Den dargestellten Schichten werden dabei folgende Aufgaben zugeteilt:

Bitübertragungsschicht: Beschreibt die Codierung digitaler Werte auf analoge Kenngrößen des physikalischen Mediums.



Abbildung 2.4: Das erweiterte OSI-Referenzmodell für Kommunikationsprotokolle in Rechnernetzen.

Sicherungsschicht: Regelt den Zugriff auf das Übertragungsmedium und stellt eine fehlerfreie Übertragung mittels Prüfsummen sicher.

Medienzugriffsteuerung: Stellt den eigentlichen Teil der DLL dar und regelt den gemeinsamen Zugriff konkurrierender Teilnehmer auf das Übertragungsmedium.

Logical Link Control: Bietet als Abstraktionsschicht einen vereinheitlichten Zugriff auf unterschiedliche MAC-Protokolle.

Vermittlungsschicht: Regelt die Weiterleitung von Datenpaketen, die Adressvergabe und die Wegesuche im Netz, auch als Routing bezeichnet.

Transportschicht: Dient der Segmentierung und Fehlerkontrolle.

Sitzungsschicht: Dient der Synchronisierung beim Datenaustausch.

Darstellungsschicht: Dient als Umsetzer zwischen einer einheitlichen Darstellung der Daten im Netzwerk und der systemabhängigen Datencodierung.

Anwendungsschicht: Beinhaltet die eigentliche Anwendung.

Ein Teil der nachfolgend genannten Herausforderungen befasst sich mit der Kommunikation in drahtlosen Sensornetzwerken. Dieser kann in die Schichten MAC (Medienzugriff), NWK (Routing) und TPL (Transport) eingeordnet werden. Der physikalische Teil der Kommunikation (PHY) soll an dieser Stelle nicht gesondert betrachtet werden. Die eingesetzte Codierung richtet sich nach der verwendeten Funkhardware und variiert von Binary Frequency Shift Keying (BFSK), im Fall des häufig eingesetzten CC1000 [Chi04] bis hin zu Offset Quadrature Phase Shift Keying (O-QPSK) in IEEE 802.15.4 kompatiblen Geräten.

2.1.4.4 Medienzugriff

Der Medienzugriff in drahtlosen Sensornetzwerken ist durch zwei gegensätzliche Ziele geprägt. Auf der einen Seite ein möglichst geringer Energieverbrauch, welcher erzielt werden kann, indem Sensorknoten möglichst selten das Medium nach neuen Nachrichten abhören. Auf der anderen Seite eine möglichst schnelle Weiterleitung von Informationen, welche erreicht werden kann, indem Sensoren häufig empfangsbereit sind, um neue Nachrichten empfangen und weiterleiten zu können. Ziel von MAC-Protokollen ist daher einerseits ein geschickter Wechsel zwischen Empfangsbereitschaft und energiesparendem Schlafzustand, wobei zu beachten ist, dass auch das Aktivieren und Deaktivieren der Empfangseinheit Energie verbraucht. Ein weiteres Ziel besteht darin, einen möglichst großen Teil des Aktivzustands tatsächlich zum Senden und Empfangen von Daten zu verwenden. Gleichzeitig sollte jedoch darauf geachtet werden, dass Kollisionen von Nachrichten auf dem Übertragungsmedium vermieden werden.

MAC-Protokolle können wie in Abbildung 2.5 dargestellt in wettbewerbsfreie, wettbewerbsbasierte und hybride Protokolle unterteilt werden, wobei wettbewerbsbasierte Verfahren weiterhin in kollisionsvermeidende und kollisionserkennende Protokolle unterschieden werden. Innerhalb dieser Klassifikation lassen sich fünf grundlegende Zugriffsverfahren einordnen: Carrier Sense Multiple Access (CSMA), Time Division Multiple Access (TDMA), Frequency Division Multiple Access (FDMA), Code Division Multiple Access (CDMA) und Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA). Herkömmliche in drahtlosen Netzen eingesetzte Verfahren sind auf Latenz und Durchsatz optimiert, nicht jedoch auf geringen Energieverbrauch, weshalb sie für Sensornetzwerke nicht verwendet werden können. In Sensornetzwerken werden aufgrund der begrenzten Ressourcen lediglich CSMA- und TDMA-Verfahren eingesetzt. In den letzten Jahren wurden eine Reihe spezialisierter MAC-Protokolle entworfen. Um die grundlegenden Unterschiede kurz zu skizzieren, werden hier nur ein paar wenige ausgesuchte Verfahren vorgestellt. [WP08, AV10]

TDMA-Verfahren TDMA-Verfahren bieten den Vorteil, dass Knoten nur zu festgelegten Zeiten senden und empfangen und Kollisionen so vollständig vermieden werden können. Voraussetzung dafür ist eine Aufteilung in eine genügend hohe Anzahl Zeitschlitze sowie eine ausreichend genaue Synchronisation der Sensorknoten. Die naheliegendste Möglichkeit wäre daher eine Aufteilung in ebenso viele Zeitschlitze, wie Knoten existieren. Dies hätte jedoch zwei signifikante Nachteile. Zum einen müssten alle Sensorknoten im Netzwerk synchronisiert sein und zum anderen müssten alle Knoten in allen Kommunikationsschlitzen hören, um zu erfahren, ob es sich um eine an ihn adressierte Nachricht handelt. In der

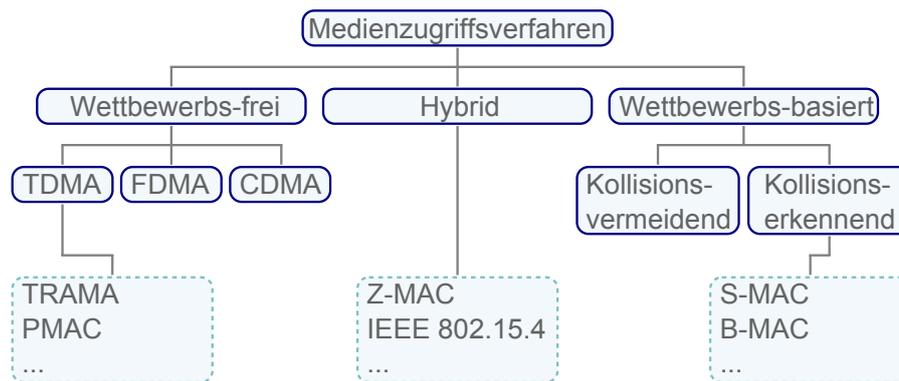


Abbildung 2.5: Klassifizierung von Medienzugriffsverfahren.

Praxis werden daher sogenannte, in Abbildung 2.6 dargestellte, Superframes für die Kommunikation verwendet, welche aus einem Reservierungs-Abschnitt und einem Daten-Abschnitt bestehen. Der Daten-Abschnitt unterteilt sich in mehrere Zeit-Slots, innerhalb derer jeweils ein Sensorknoten senden darf. Die Aufteilung dieser Zeit-Slots findet in dem vorhergehenden Reservierungs-Abschnitt statt. Der Vorteil von TDMA-basierten Verfahren besteht in der Kollisionsfreiheit und einer hohen Energieeffizienz, da Sensorknoten nur dann aktiv sein müssen, wenn sie Nachrichten senden oder empfangen. Nachteilig ist jedoch die Voraussetzung synchronisierter Sensorknoten sowie die in vielen Verfahren vorausgesetzte Partitionierung des Netzwerks in Cluster, innerhalb derer sogenannte *Cluster Heads* die Zuteilung der Zeitschlitzze organisieren.

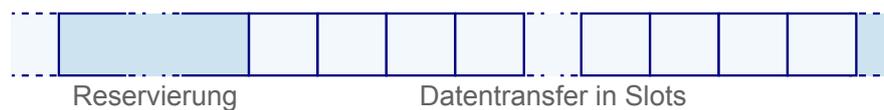


Abbildung 2.6: Allgemeiner Aufbau von Superframes in TDMA-basierten Verfahren.

Ein für Sensornetzwerke konzipiertes TDMA-Verfahren ist Traffic-Adaptive Medium Access (TRAMA), welches eine ressourcensparende Weiterentwicklung des Node-Activation Multiple Access (NAMA)-Protokolls [BGLA01] darstellt. Das Verfahren garantiert eine kollisionsfreie Datenübertragung und arbeitet ohne eine zentrale Einheit zur Vergabe der Zeitschlitzze. Die Organisation der Zeitschlitzze basiert allein auf der Kommunikation zwischen benachbarten Knoten. Das TRAMA-Protokoll setzt bereits eine zuvor durchgeführte Synchronisation aller Sensorknoten voraus. Die Kommunikation ist vollständig in Zeitschlitzzen organisiert. Die vorhandenen Zeitschlitzze unterteilen sich, wie in Abbildung 2.7

dargestellt, in sogenannte *Signaling Slots* und *Transmission Slots* mit jeweils fester Länge, wobei die Transmission Slots ein Vielfaches der Länge der Signaling Slots messen.

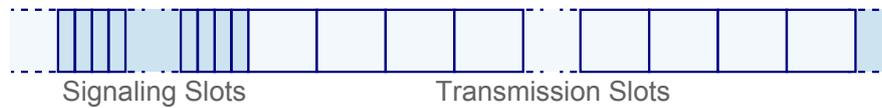


Abbildung 2.7: Kommunikationszyklus des TRAMA Protokolls.

Innerhalb der Signaling Slots erfolgt ein wettbewerbs-basierter Zugriff. Hier tauschen sich Sensorknoten über ihre jeweiligen Nachbarknoten in 1-Hop Distanz aus. Die Signaling Slots können ebenfalls zur Synchronisation verwendet werden. Die Verwendung der Transmission Slots folgt hingegen einem Zeitplan. Hier werden sowohl Nutzdaten als auch Steuerdaten ausgetauscht, welche der Erstellung zukünftiger Zeitpläne dienen. Aus der ID eines Sensorknotens und der fortlaufenden Nummer eines Zeitschlitzes lässt sich mittels einer Hashfunktion für jeden Sensorknoten in 2-Hop Reichweite eine Priorität für jeden Transmission Slot berechnen. Der Sensorknoten mit der höchsten Priorität kann diesen Slot zur Versendung von Nachrichten verwenden. Dies ermöglicht es jedem Sensorknoten im Vorhinein anhand der zu versendenden Daten die für ihn gültigen Zeitschlitz zu ermitteln. Damit mögliche Empfänger nur in den Zeitschlitz aktiv sind, in denen sie Daten empfangen, sendet jeder Knoten den so ermittelten Zeitplan, welcher die je Zeitschlitz gültigen Adressaten enthält, innerhalb eines Transmission Slots an seine Nachbarknoten. Hierfür sieht er jeweils den letzten Zeitschlitz seines ermittelten Zeitplans vor. Durch die so gegebenen Informationen ist es ebenfalls möglich, Zeitschlitz, die nicht durch den Sensorknoten mit der höchsten Priorität beansprucht werden, an andere Sensorknoten zu vergeben. [Rajendran2006,Akyildiz2010]

Weitere TDMA-basierte Protokolle sind zum Beispiel das Pattern MAC (PMAC)-Protokoll [ZRS05] und das Bit-Map-assisted MAC (BMA-MAC)-Protokoll [LL04].

CSMA-Verfahren CSMA-basierte Verfahren stellen den Großteil der Medienzugriffsverfahren in drahtlosen Sensornetzwerken dar. Nicht zuletzt verwenden auch TDMA-Verfahren CSMA, um die initiale Vergabe der Zeitfenster zu organisieren. Das Wesen von CSMA besteht darin, vor dem eigentlichen Senden eine Zeit lang auf dem Kanal zu hören, um festzustellen, ob dieser frei ist. Ist dies der Fall, so wird gesendet, andernfalls wird der Versuch zu einem späteren Zeitpunkt wiederholt. Ein klassisches Problem von CSMA ist das Hidden Terminal Problem, welches auftritt, wenn zwei oder mehr Sender sich gegenseitig nicht empfangen können, deren Adressaten sich jedoch in einem Bereich

befinden, in dem die versendeten Nachrichten miteinander kollidieren. Diesem Problem kann durch das RTS/CTS-Verfahren von Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA/CA) entgegen getreten werden, bei dem ein Sender dem Adressaten zunächst durch ein Request to Send (RTS)-Signal seine Sendebereitschaft bekundet, welcher darauf mit einem Clear to Send (CTS)-Signal antwortet, wodurch mögliche Konkurrenten in der Umgebung über die bevorstehende Übertragung informiert werden. Der besondere Vorteil von CSMA-Verfahren liegt darin, dass jeder Teilnehmer einen Verbindungsaufbau initiieren kann und alle Teilnehmer gleichberechtigt über den Medienzugriff verhandeln, ohne die Notwendigkeit einer zentralen Kontrollinstanz. Da das aus IEEE 802.11 bekannte CSMA/CA jedoch nicht auf Energieverbrauch optimiert ist, da alle Teilnehmer permanent empfangen, haben sich eine Reihe spezieller MAC-Verfahren etabliert. Verglichen mit TDMA-Verfahren bieten diese Verfahren in der Regel den Vorteil, dass sie besser mit der Anzahl der Teilnehmer skalieren und geringere Latenzen verursachen. Nachteilig ist jedoch ein höherer Energieverbrauch.

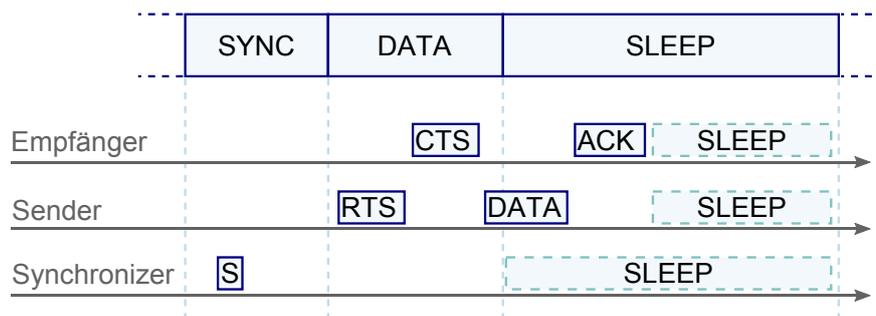


Abbildung 2.8: Kommunikationszyklus im S-MAC Protokoll.

Ein speziell für den Einsatz in Sensornetzwerken konzipiertes Protokoll ist das Sensor-MAC (S-MAC)-Protokoll. Es basiert auf CSMA/CA, unterbricht jedoch das permanente Empfangen durch Schlaf-Intervalle, innerhalb derer die Empfangseinheit deaktiviert ist. Der Zyklus, der von jedem Sensorknoten durchlaufen wird, besteht wie in Abbildung 2.8 dargestellt aus zwei Kommunikationsabschnitten und einem kommunikationsfreien *Sleep*-Abschnitt. Der Sync-Abschnitt dient der Synchronisation der Sensorknoten untereinander. In diesem Zeitraum sendet ein sogenannter *Synchronizer*-Knoten seine ID, sowie die Zeit bis zur nächsten Schlafperiode, welche eine vorgegebene Dauer umfasst. In dem darauf folgenden *Data*-Abschnitt können zwei Sensorknoten mittels CSMA/CA miteinander kommunizieren und anschließend in den *Sleep*-Abschnitt eintreten. Die Dauer des *Sleep*-Abschnitts verkürzt sich in diesem Fall entsprechend der vorhergehenden Kommunikation. Nicht kommunizierende Knoten treten hingegen in den *Sleep*-Abschnitt ein, sobald feststeht,

dass sie nicht an der Kommunikation teilnehmen. Tritt ein Sensorknoten zum ersten Mal in diesen Zyklus ein, so hört er das Übertragungsmedium lange genug ab, um eine existierende *Sync*-Nachricht zu empfangen. Wird innerhalb dieser Zeit keine *Sync*-Nachricht empfangen, so bestimmt der Knoten selbst den Synchronisationszyklus und wird zum *Synchronizer*. Empfängt er hingegen eine *Sync*-Nachricht, so schließt er sich als sogenannter *Follower* dem Synchronisationszyklus an und teilt dies seinen Nachbarn innerhalb des *Sync*-Abschnitts durch das Versenden einer *Sync*-Nachricht mit. Wie in Abbildung 2.9 dargestellt, ergeben sich so verschiedene Cluster, innerhalb derer der Synchronisationszyklus eines *Synchronizers* gilt. *Follower*, welche sich in Reichweite verschiedener *Synchronizer* befinden, können ihren Schlaf-Wach-Rhythmus auf mehrere *Synchronizer* einstellen, um in verschiedenen Clustern zu kommunizieren. Sie werden als *Border Nodes* bezeichnet. [YHE02, AV10]

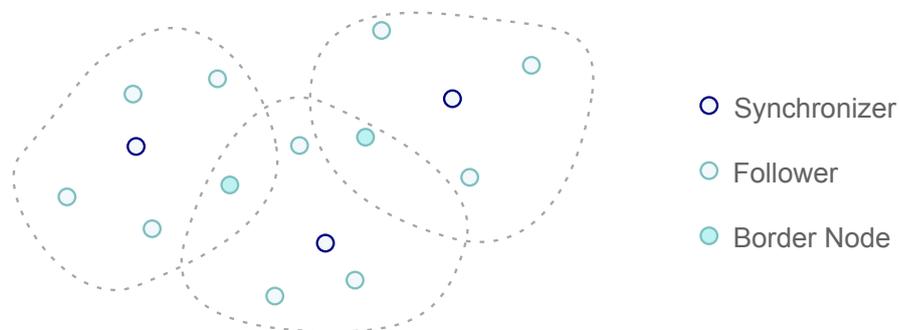


Abbildung 2.9: Entstehung virtueller Cluster bei Verwendung des S-MAC Protokolls.

Eine Übersicht über weitere CSMA-basierte MAC-Protokolle für Sensornetzwerke wie das Berkeley MAC (B-MAC)-Protokoll [PHC04], das Correlation-based Collaborative MAC (CC-MAC)-Protokoll [VA06] oder das Timeout-MAC (T-MAC)-Protokoll [DL03] findet sich in [DEA06, AV10].

Hybride Verfahren Während TDMA-basierte Verfahren besonders in Fällen mit vielen Zugriffen auf das Medium einen hohen Durchsatz erreichen, haben sie bei wenigen Zugriffen den Nachteil fester Latenzen. CSMA-basierte Verfahren erreichen hingegen bei wenigen Zugriffen eine gute Performance, funktionieren jedoch umso schlechter, je mehr Zugriffe auf das Medium erfolgen, da in diesem Fall die Anzahl der Kollisionen steigt. Hybride Verfahren verfolgen den Ansatz, die Vorteile beider Verfahren zu kombinieren. Zebra-MAC (Z-MAC) basiert grundlegend auf TDMA und weist jedem Sensorknoten ein Zeitfenster zu, innerhalb dessen dieser Daten versenden kann. Diesem Grundgedanken wird eine CSMA-Charakteristik hinzugefügt, indem jedes Zeitfenster von anderen Sensorknoten gestohlen werden kann, sofern der dafür vorgesehene Knoten nicht innerhalb einer vorgegebenen

Zeit sendet. Nicht genutzte Zeitfenster werden also nach dem CSMA Wettbewerbsprinzip vergeben. Dies führt dazu, dass sich Z-MAC wie CSMA verhält, wenn wenige Teilnehmer auf das Übertragungsmedium zugreifen wollen. Wollen jedoch viele Teilnehmer auf das Medium zugreifen, verhält sich Z-MAC wie TDMA [RWA⁺08, AV10].

Ein ähnliches Verfahren ist auch für den Medienzugriff bei IEEE 802.15.4 vorgesehen. Hier wechseln sich wettbewerbsfreie und wettbewerbsgesteuerte Perioden ab, innerhalb derer nach einem CSMA/CA-Prinzip verfahren wird.

2.1.4.5 Routing

Aufgabe des Routings ist es, Nachrichten von einem Knoten zu einem anderen Knoten im Netzwerk zu vermitteln. Aufgrund der räumlichen Ausbreitung des Netzwerks und der im Verhältnis dazu geringen Kommunikationsreichweite der Knoten erfordert dies in der Regel ein Multi-Hop Routing. Dabei dienen Knoten, welche sich zwischen Sender und Empfänger befinden, als Relays, welche Nachrichten aus der Richtung des Senders empfangen und in Richtung des Empfängers erneut versenden. Da der Nachrichtenversand in drahtlosen Sensornetzwerken im allgemeinen omnidirektional erfolgt, ist es Aufgabe des Routings dennoch zu bewerkstelligen, dass die Nachricht möglichst gezielt den angegebenen Adressaten erreicht.

Das Grundprinzip des Routings besteht darin, dass jeder Knoten für jedes zu adressierende Ziel einen oder mehrere bevorzugte Nachbarknoten kennt, an welche er eine zu übertragende Nachricht senden kann, damit diese ihr adressiertes Ziel erreicht. Die verwendeten Routing-Protokolle unterscheiden sich in der Auswahl dieser bevorzugten Nachbarknoten, welche auch Next-Hops genannt werden. Herkömmliche Routingverfahren speichern in Routingtabellen für jedes Ziel einen solchen bevorzugten Nachbarknoten. In drahtlosen Sensornetzwerken steht umfangreichen Routingtabellen der begrenzte Speicherplatz entgegen. Viele Szenarien bieten jedoch den Vorteil, dass Sensorknoten ihre Messwerte lediglich zur Senke übertragen müssen und daher nur für diese einen Next-Hop Knoten kennen müssen. Gleichzeitig ist es häufig der Fall, dass Anfragen von der Senke an das Netzwerk an alle Knoten gestellt werden und daher auch in dieser Richtung keine gezielte Adressierung stattfinden muss. Um ein einfaches Routing zu gewährleisten würde es also ausreichen, wenn die Senke eine initiale Nachricht an alle Knoten versendet, welche als Datenfeld den mit null initialisierten Abstand zur Senke enthält. Jeder Knoten, der eine solche Nachricht empfängt, kann diesen Abstand um eins erhöhen und an seine Nachbarknoten weitersenden. Wählt nun jeder Knoten den Nachbarknoten als Next-Hop, welcher den geringsten Abstand

zur Senke aufweist, so ergibt sich ein spannender Baum (Spanning Tree), auf dessen Pfaden jeder Knoten die Senke erreichen kann. Dieser einfache Mechanismus wird zum Beispiel im Minimum Cost Forwarding Algorithm (MCFA) [YCLZ01] verwendet.

Weitere Besonderheiten des Routings in drahtlosen Sensornetzwerken stellen die angestrebte Energieeffizienz und die Art der Adressierung dar. So wird aufgrund der Vielzahl der Knoten aber auch aufgrund der Anwendungsszenarien meist eine Adressierung angenommen, welche nicht auf Adressen sondern auf Messdaten oder aber auf geografischen Informationen beruht. Weitere Möglichkeiten der Klassifizierung von Routing-Algorithmen in Sensornetzwerken werden in Abbildung 2.10 dargestellt.

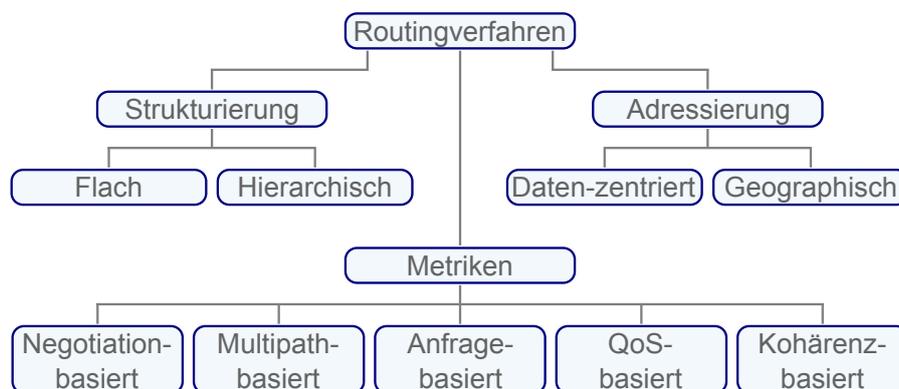


Abbildung 2.10: Klassifizierung von Routing-Algorithmen in drahtlosen Sensornetzwerken.

Nachfolgend werden die wesentlichen Routingprinzipien anhand von Beispielen kurz beschrieben. Für einen umfassenden Überblick über Routingalgorithmen in Sensornetzwerken sei auf die Literatur [AKK04, AY05] verwiesen.

Flaches Routing Neben dem bereits genannten MCFA-Verfahren zählen auch das bekannte *Flooding* sowie das *Gossiping* zu den Routing-Verfahren mit flacher Hierarchie. Beim Flooding sendet der Absender eine zu übertragende Nachricht in einem Broadcast an seine Nachbarknoten. Jeder Knoten, der die Nachricht empfängt, sendet sie auf gleiche Weise weiter. So wird erreicht, dass die Nachricht jeden Knoten im Netzwerk einschließlich des Adressaten erreicht[11]. Der Vorteil des Verfahrens besteht darin, dass keinerlei Vorkenntnisse über Nachbarschaftsbeziehungen oder Positionsdaten erforderlich sind. Der Nachteil dieses einfachen Mechanismus liegt in dem massenhaften Versand nicht zielführender Nachrichten sowie in der resultierenden Vervielfachung einer Nachricht, was dazu führt, dass ein Knoten eine Nachricht mehrmals empfängt. Dieser als *Implosion* bekannte Effekt

kann durch das sogenannte Gossiping vermieden werden, wobei ein Knoten jede Nachricht nur an einen seiner Nachbarknoten sendet, welchen er zufällig auswählt. [HHL88]

Hierarchisches Routing Um die Kommunikation effizienter zu gestalten, teilen hierarchische Routing-Verfahren das Netzwerk in sogenannte Cluster ein. Die Knoten innerhalb eines Clusters werden, wie in Abbildung 2.11 dargestellt, in einen sogenannten *Cluster Head* und eine Vielzahl von *Cluster Members* unterteilt. Die Kommunikation jedes Knotens innerhalb einer solchen Clusterstruktur ist auf die Knoten innerhalb eines Clusters beschränkt. Einzige Ausnahme bildet der Cluster Head, welcher mit anderen Cluster Heads sowie der Senke kommunizieren kann.

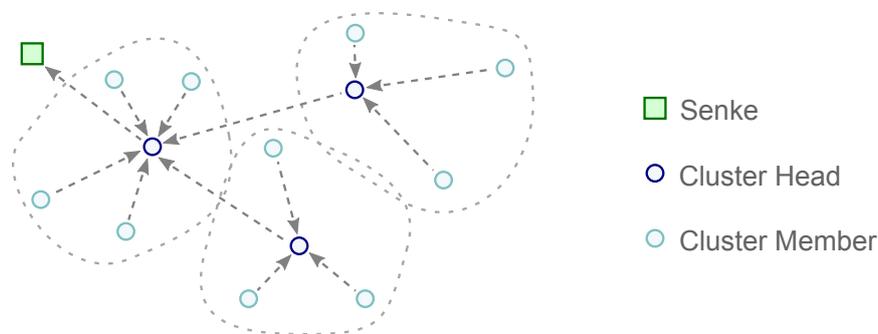


Abbildung 2.11: Hierarchisches Routing durch Verwendung von Clustern.

Einen bekannten Vertreter der Cluster-basierten Protokolle stellt Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH) dar [HCB00]. Es handelt sich dabei um ein Runden-basiertes Verfahren. Innerhalb einer Runde entscheidet jeder Knoten aufgrund einer Zufallsfunktion, ob er die Rolle eines Cluster Heads übernimmt. Anschließend teilt dies jeder Cluster Head seinen Nachbarknoten mit, welche sich dem ihnen am nächsten gelegenen Cluster Head zuordnen und dies mit einer Nachricht bekunden. Der Clusterhead erstellt dann einen Zeitplan für eine TDMA-basierte Kommunikation innerhalb des Clusters und verbreitet diesen innerhalb des Clusters. Nach einer darauf folgenden Kommunikationsphase beginnt eine weitere Runde, in der die Clusterheads wechseln.

Weitere Beispiele für hierarchische Verfahren sind Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems (PEGASIS) [LR02] und Threshold-Sensitive Energy-Efficient Sensor Network (TEEN) [MA01].

Datenzentriertes Routing Ein bekanntes datenzentriertes Routing-Verfahren ist *Directed Diffusion* [IGE00]. Dieses läuft in vier Schritten ab, welche in Abbildung 2.12 dargestellt

sind. Während der Interest Propagation bekundet die Senke zunächst Interesse an einer bestimmten Art von Daten. Dies erfolgt in der Regel nach dem Flooding Prinzip. Während dieser Phase merkt sich jeder Knoten, von welchen anderen Knoten er die Interessensbekundung erhalten hat. Kann ein Knoten passende Daten zu der erfolgten Anfrage liefern, so sendet dieser Knoten, welcher als Datenquelle bezeichnet wird, ein erstes exploratives Datenpaket an jene Knoten, von denen er die entsprechende Anfrage erhalten hat. Die betreffenden Knoten leiten die Nachricht nun jeweils an jene Knoten weiter, von denen sie die Anfrage erhalten haben und merken sich von welchen Knoten sie die Antwort erhalten haben. Nach Erhalt der explorativen Nachricht wählt die Senke einen bevorzugten Nachbarknoten, von dem sie zukünftig die Nachrichten der Datenquelle erhalten möchte, und sendet diesem eine Reinforcement-Nachricht. Dieser wählt wiederum einen bevorzugten Nachbarn aus und sendet diesem eine Reinforcement-Nachricht. Hat die Datenquelle diese Nachricht erhalten, können die darauf folgenden Datenpakete auf dem Pfad der Reinforcement-Nachricht übertragen werden. Ein weiteres bekanntes datenzentriertes Verfahren ist das Sensor Protocols for Information via Negotiation (SPIN)-Verfahren [KHB02].

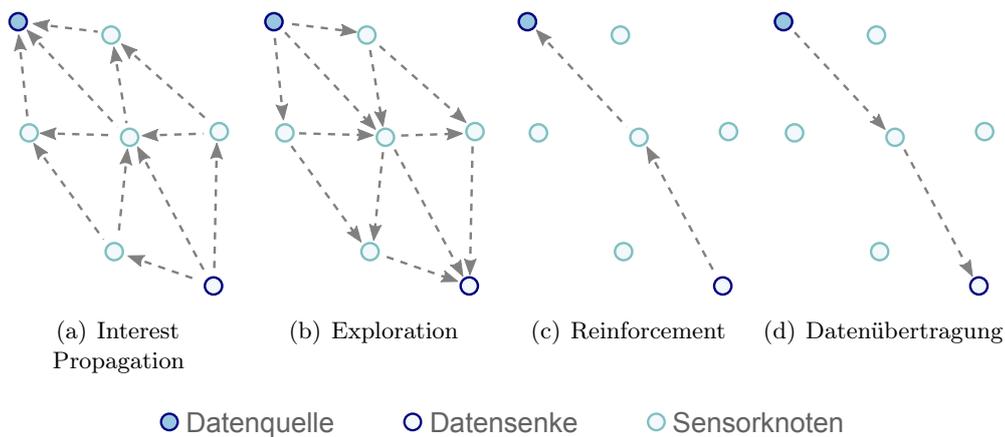


Abbildung 2.12: Phasen des datenzentrierten Routings mittels Directed Diffusion: (a) Interessensbekundung, (b) explorative Antwort, (c) Reinforcement, (d) Datentransfer

Geografisches Routing Geografische Routing-Algorithmen verwenden die geografische Position von Sensorknoten, um eine Nachricht vom Absender zum Adressaten zu vermitteln. Es wird davon ausgegangen, dass die Positionen der Knoten mittels GPS oder mit Hilfe eines Lokalisierungsverfahrens ermittelt wurden. Zu übermittelnde Nachrichten werden nun durch die Angabe einer Position oder Region innerhalb des Sensornetzwerks adressiert.

Empfängt ein Knoten eine Nachricht, so vergleicht er seine eigene Position mit denen seiner Nachbarknoten und der angegebenen Zielregion und leitet die Nachricht an jenen Knoten weiter, welcher den geringsten Abstand zum Ziel aufweist. Ein solches Routing ist zum Beispiel in Geographic and Energy Aware Routing (GEAR) [YGE01], aber auch in Greedy Perimeter Stateless Routing (GPSR) [KK00] gegeben.

2.1.4.6 Transport

Zu den Aufgaben der Transportschicht gehört zum einen der zuverlässige Transport von Daten vom Absender zum Adressaten sowie eine damit verbundene Behandlung von Datenverlust. Während die Sicherstellung des Transports in konventionellen Netzen einer Ende-zu-Ende Strategie folgt, würde dies in Sensornetzwerken unverhältnismäßig viele Ressourcen verbrauchen. In Sensornetzwerken gilt es daher, zum einen eine lokale Sicherstellung des Transports und zum anderen eine gruppenweise Sicherstellung zu gewährleisten, da der Verlust einzelner Nachrichten häufig nicht so ausschlaggebend ist, die Übertragung zu einer Gruppe von Sensorknoten in einer Region jedoch gewährleistet werden soll. Letztlich ist dies jedoch stark von der gewählten Anwendung abhängig. Einen entscheidenden Unterschied zu herkömmlichen Netzen stellt zudem das in Abschnitt 2.1.4.5 beschriebene Routing mit der verwendeten datenzentrierten oder aber geografischen Adressierung dar, welche eine Ende-zu-Ende Funktionalität der Transportschicht oft nicht erlaubt. Weitere Aufgaben der Transportschicht bestehen im Multiplexen und Demultiplexen von Daten aus verschiedenen Schichten oder Anwendungen zu bzw. aus einem Datenpaket sowie der Lastkontrolle, um die Überlastung einzelner Bereiche des Netzes zu vermeiden. Für Sensornetzwerke entwickelte Protokolle dieser Schicht lassen sich wie in Abbildung 2.13 klassifizieren. Ein Überblick über Arbeiten auf diesem Bereich bietet die weiterführende Literatur [WSL⁺06, AV10].

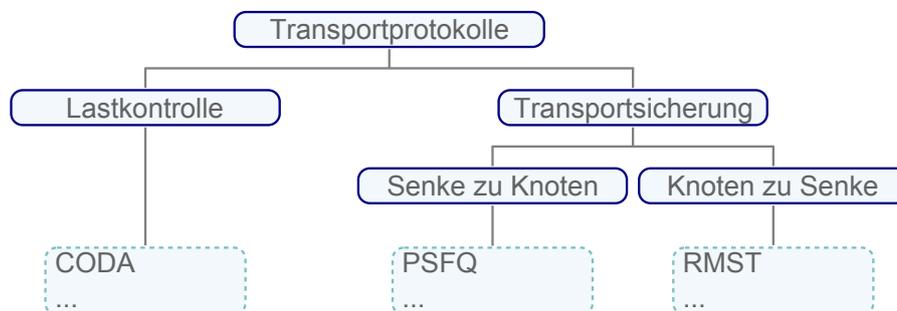


Abbildung 2.13: Klassifizierung von Protokollen der Transportschicht.

Ein speziell für Sensornetzwerke entwickeltes Transport-Protokoll ist Reliable Multi-Segment Transport (RMST) [SH03]. Das Protokoll dient der Bereitstellung von Ende-zu-Ende Zuverlässigkeit speziell unter Verwendung des Directed Diffusion Routing Protokolls. Vor dem Versenden eines jeden Datenpaketes wird dies mit einer fortlaufenden Sequenznummer markiert. Auf der Seite des Adressaten wird der Verlust einzelner Pakete somit durch eine Lücke in der Nummerierung erkennbar. Der Adressat kann dann durch den Versand einer NACK-Nachricht das fehlende Paket anfordern. Neben einem cache-freien Ende-zu-Ende Modus sieht RMST einen Caching Modus vor, bei dem ausgewählte Sensorknoten entlang des Routingpfades Nachrichten zwischenspeichern. In diesem Modus können bereits die gewählten Caching Knoten einen Paketverlust detektieren und das verlorene Paket durch den Versand einer NACK-Nachricht bei dem vorhergehenden Caching Knoten anfordern. Neben der Sicherstellung des Ende-zu-Ende Transports bietet RMST auch die Funktionalität des Multiplexens und Demultiplexens.

Ein weiteres speziell für drahtlose Sensornetzwerke entwickeltes Transportprotokoll ist Pump Slowly, Fetch Quickly (PSFQ) [WCK05]. Auch dieses Protokoll dient der Transportsicherung, adressiert jedoch speziell den Datentransfer von der Senke zum Sensorknoten. Bei Congestion Detection and Avoidance (CODA) [WEC03] handelt sich es hingegen um ein Protokoll, welches die Problematik der Lastkontrolle fokussiert. Hierfür ermittelt CODA aus dem Füllstand der verwendeten Zwischenspeicher und der Nachrichtendichte auf dem Übertragungsmedium ein Maß für die Last. Wird auf einem Sensorknoten eine Überlast erkannt, so wird dies dem vorhergehenden Knoten auf dem Routingpfad mitgeteilt. Diese Nachricht kann so weitergeleitet werden, bis sie das überlastete Gebiet verlässt. Für das nachfolgende Routing kann dieses Gebiet dann umgangen werden.

2.1.4.7 Aggregation

Ein häufig proklamiertes Mittel bei der Datenübertragung und Datenverarbeitung in drahtlosen Sensornetzwerken ist die Aggregation, welche mitunter als integraler Bestandteil des Routings betrachtet wird. In einem Großteil der Anwendungsszenarien drahtloser Sensornetzwerke dominiert der Datentransfer von den Sensorknoten zur Senke. Häufig übertragen Sensorknoten in bestimmten Intervallen gemessene Daten an die Senke. Bei diesem Prozess müssen Knoten nahe der Senke deutlich mehr Informationen übermitteln, als Knoten, welche sich weit entfernt von der Senke befinden. Das Mittel der Aggregation erlaubt es nun, gleichartige Nachrichten unterschiedlicher Sensorknoten bei der Übertragung zu einer Nachricht zusammenzufassen. Da die gemessenen Werte in der Regel eine räumliche Korrelation miteinander aufweisen, besteht eine Möglichkeit darin, Sensorknoten mit

gleichen Messwerten zusammenzufassen oder Mittelwerte aus zusammenhängenden Gebieten zu übertragen. Aggrationsverfahren in drahtlosen Sensornetzwerken lassen sich gemäß Abbildung 2.14 wie nachfolgend dargestellt kategorisieren. Eine ausführliche Betrachtung zu Datenaggregation in drahtlosen Sensornetzwerken sowie eine Auflistung bestehender Arbeiten auf diesem Gebiet findet sich in der weiterführenden Literatur [FRWZ07].

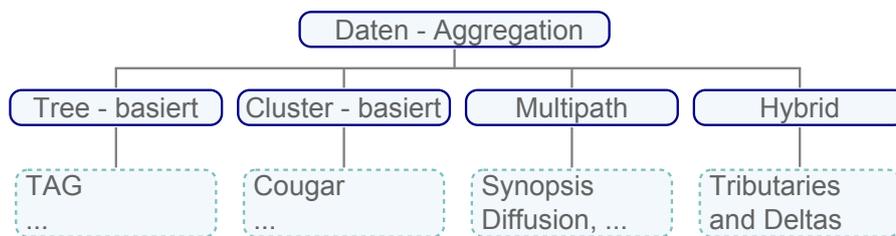


Abbildung 2.14: Klassifizierung von Protokollen zur Aggregation in drahtlosen Sensornetzwerken.

Tree-based Aggregation Das Routing folgt einem spannenden Baum, dessen Wurzel die Senke darstellt. An jeder Gabelung des Baumes findet eine Aggregation statt. Ein Beispielalgorithmus, welcher diesem Prinzip folgt, ist Tiny Aggregation (TAG) [MFHH02].

Cluster-based Aggregation Bei diesen Verfahren erfolgt die Organisation des Netzwerks in Clustern. Innerhalb eines Clusters erfolgt die Aggregation örtlich korrelierter Sensorknoten. Cougar [YG02] stellt ein Beispiel für eine clusterbasierte Aggregation dar.

Multipath Aggregation Ein Nachteil der Aggregation in einer Baumstruktur besteht darin, dass jeder Aggregationspunkt einen Single Point of Failure darstellt. Tritt in einem Aggregationspunkt ein Fehler auf, wirkt sich dieser auf alle Messwerte von Knoten aus, die von diesem Aggregationspunkt abzweigen. Je näher sich ein solch fehlerhafter Aggregationspunkt an der Senke befindet, desto mehr Einzelmessungen sind davon betroffen. Wird Multipath Aggregation verwendet, so werden die Daten von jedem Knoten über mehrere Pfade redundant an die Senke vermittelt. Eine Möglichkeit der Aggregation stellt in diesem Fall die Verwendung einer Ringstruktur dar. Hierbei bilden konzentrische Ringe um die Senke herum die bei einer Baumstruktur entstehende Baumtiefe ab. Jeder Knoten mit der gleichen Anzahl minimaler Hops zur Senke gehört dem gleichen Ring an. Wechselt eine Nachricht von einem äußeren Ring zu einem inneren Ring, so erfolgt eine Aggregation. Diese Art der Aggregation ist zum Beispiel bei *Synopsis Diffusion* implementiert [NGSA08].

Hybride Aggregation Eine weitere Möglichkeit der Aggregation stellt die hybride Aggregation, bestehend aus baumbasierter Aggregation und Multipath Aggregation, dar. Dieser Ansatz wird in *Tributaries and Deltas* [MNG05] verfolgt. Das Protokoll verwendet die Aggregation in Baumstruktur in Netzwerkbereichen mit geringer Datenverlustrate und einen Multipath-Ansatz in Gebieten mit erhöhter Datenverlustrate.

2.1.4.8 Synchronisation

Einige Funktionalitäten in drahtlosen Sensornetzwerken sind auf die Synchronisation der Sensorknoten untereinander angewiesen. Beispielhaft hierfür ist die Verwendung des im Abschnitt 2.1.4.4 beschriebenen TDMA. Aber auch für die in Kapitel 2.2.5 thematisierte Distanzschätzung zwischen zwei Sensorknoten mittels Laufzeitmessung wie auch zur Steuerung von Schlaf- und Wachzyklen ist eine Synchronisation notwendig. Nicht zuletzt ist es für die Verwertbarkeit der gemessenen Daten wichtig, wann diese erhoben wurden und in welcher Reihenfolge aufgetretene Ereignisse stattgefunden haben.

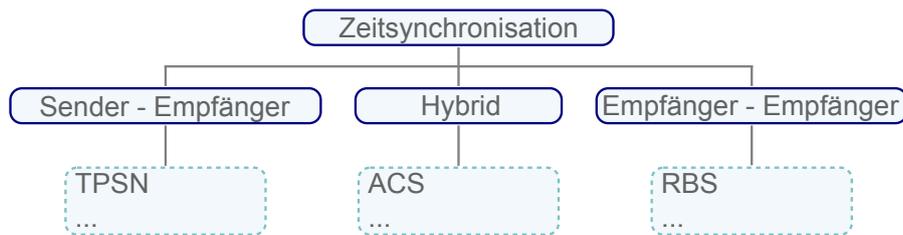


Abbildung 2.15: Klassifizierung von Protokollen zur Synchronisation in drahtlosen Sensornetzwerken.

Es ist davon auszugehen, dass die Knoten eines Sensornetzwerks zu unterschiedlichen Zeitpunkten aktiviert wurden und daher ein initialer Versatz, ein sogenannter Offset, zwischen den Systemzeiten der Knoten besteht. Darüber hinaus muss davon ausgegangen werden, dass die Dauer einer Zeiteinheit auf verschiedenen Knoten nicht exakt gleich ist. Zu dem initialen Offset kommt daher eine Drift hinzu, welche eine fortlaufende Korrektur der Zeit notwendig macht. In der Korrektur von Offset und Drift besteht die Aufgabe von Protokollen zur Synchronisation in drahtlosen Sensornetzwerken.

Zur Synchronisation tauschen Sensorknoten Nachrichten miteinander aus. Eine besondere Problematik in drahtlosen Sensornetzwerken stellt dabei die Zeit dar, die von der Initialisierung einer solchen Nachricht durch das Synchronisationsprotokoll auf einem Knoten bis zur Auswertung der Nachricht durch das Synchronisationsprotokoll auf einem anderen Knoten vergeht. Diese Zeitspanne enthält zum Beispiel ein mögliches Warten beim Medienzugriff

und ist daher nicht vorhersagbar. Die existierenden Ansätze zur Synchronisation können, wie in Abbildung 2.15 illustriert, klassifiziert werden. Einen vertieften Einblick in diese Thematik bietet die weiterführende Literatur [SY04, SBK05, AV10].

Eine gängige Methode der Synchronisation ist die in Abbildung 2.16 dargestellte Sender-Empfänger Synchronisation nach dem Prinzip des *Two-Way Message Handshakes*.

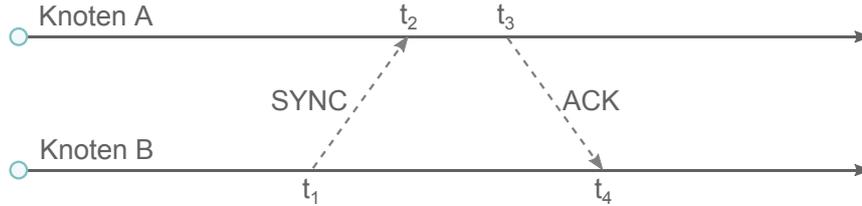


Abbildung 2.16: Zeitlicher Ablauf der Sender-Empfänger Synchronisation nach dem Two-Way Handshake Prinzip.

Ein Knoten B, welcher seine Systemzeit an die eines Knotens A anpassen will, erstellt einen Zeitstempel t_1 und sendet eine SYNC-Nachricht an Knoten A. Bei Empfang dieser Nachricht erstellt dieser ebenfalls einen Zeitstempel t_2 . Nach einer Bearbeitungszeit sendet Knoten A eine ACK-Nachricht als Antwort und erstellt unmittelbar zuvor einen weiteren Zeitstempel t_3 . Bei Empfang der Antwort erstellt Knoten B den Zeitstempel t_4 . Der Offset θ zwischen den Uhren der beiden Knoten kann nun mittels Gleichung (2.1) ermittelt und zur Synchronisation verwendet werden.

$$\theta_{AB} = \frac{(t_2 - t_1) + (t_3 - t_4)}{2} \quad (2.1)$$

Ein für Sensornetzwerke konzipiertes Protokoll zur Zeitsynchronisation ist Timing-Sync Protocol for Sensor Networks (TPSN) [GKS03]. TPSN nutzt zur Synchronisation eine hierarchische Baumstruktur. Durch ein erstes Discovery werden die Sensorknoten gemäß ihrem Hop-Abstand zur Senke in Gruppen, sogenannten Levels, eingeteilt. Anschließend erfolgt die Synchronisation, ausgehend von der auf Level 0 befindlichen Senke. Die Knoten eines Levels werden dazu genutzt um jeweils die Knoten des nächst höheren Levels zu synchronisieren. Zu diesem Zweck versendet die Senke eine initiale Start-Nachricht. Anschließend führen die Knoten aus Level 1 eine Synchronisation nach dem oben beschriebenen Prinzip des Two-Way Message Handshakes durch. Die Knoten des nächst höheren Levels registrieren diesen Vorgang und fahren nach einer ausreichenden Wartezeit mit ihrer eigenen Synchronisation fort.

Eine weiteres Protokoll zur Synchronisation stellt Reference Broadcast Synchronisation (RBS) dar [EGE02]. Anders als bei TPSN wird hier jedoch nicht der Sender gegen einen Empfänger synchronisiert. Stattdessen werden alle Empfänger einer Synchronisationsnachricht auf eine einheitliche Zeitbasis gebracht. Auf diese Weise umgeht RBS die nicht-deterministischen Wartezeiten des Two-Way Message Handshakes. Unabhängig von eventuellen Wartezeiten erreicht eine Synchronisationsnachricht alle Empfänger zur gleichen Zeit. Die tatsächliche Übertragungszeit wird an dieser Stelle vernachlässigt. Die Empfänger übernehmen den versandten Zeitstempel und sind so synchronisiert. Ein hybrider Ansatz aus Sender-Empfänger Synchronisation und Empfänger-Empfänger Synchronisation wird zum Beispiel durch das Verfahren der Adaptive Clock Synchronisation (ACS) verfolgt [PSJ04].

2.1.4.9 Topologie-Management und Clusterbildung

Topologie-Management in drahtlosen Sensornetzen bezeichnet die Organisation der Sensorknoten mit dem Ziel einer nach Möglichkeit vollständigen Abdeckung des zu überwachenden Gebietes durch den Einsatz geringstmöglicher Ressourcen. Durch den sparsamen Einsatz der knappen Ressourcen soll so eine möglichst lange Netzlebenszeit erreicht werden. Der Grad der Abdeckungen wird dabei an zwei unterschiedlichen Metriken gemessen. Die Kommunikationsabdeckung bezieht sich auf den Anteil an Knoten innerhalb des Netzwerks, welche über das Netzwerk eine Verbindung zur Senke aufbauen können. Sie kann entweder als Prozentsatz der mit der Senke verbundenen Knoten oder aber, basierend auf der theoretischen Kommunikationsreichweite eines Knotens, als der Prozentsatz der mittels Kommunikation von der Senke aus erreichbaren Fläche bemessen werden. Die Sensorabdeckung bezeichnet hingegen den Flächenanteil, in dem auftretende Phänomene durch die Sensoren der Sensorknoten erfasst und an die Senke übermittelt werden können.

Das Gebiet des Topologie-Managements kann, wie in Abbildung 2.17 dargestellt, in mehrere Teilgebiete unterteilt werden, von denen das Clustering ein wichtiges Gebiet einnimmt.

Das *Deployment* bezeichnet die Verteilung der Sensorknoten. Die initiale Verteilung der Knoten kann wie im Fall des Virtual Force Algorithm (VFA) durch mobile Knoten optimiert werden [ZC03]. Das sogenannte *Power Control* adressiert die Kommunikationsabdeckung, indem es eine Anpassung der Übertragungsleistung einzelner Sensorknoten vornimmt, um mit möglichst geringer Übertragungsleistung größtmögliche Kommunikationsabdeckung zu erzielen. Dies wird unter anderem durch den Local Minimum Spanning Tree (LMST)-Algorithmus erreicht [LHS05]. Einen radikaleren Ansatz, welcher zudem die Berücksich-

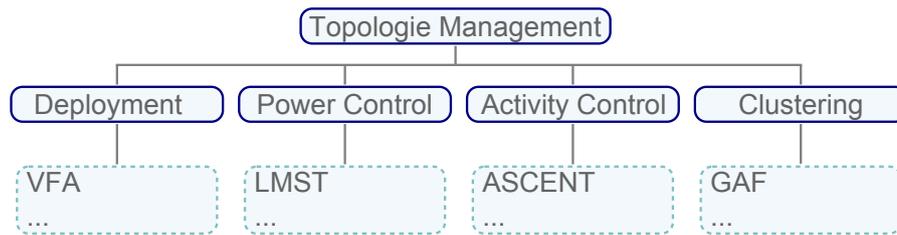


Abbildung 2.17: Ausprägungen des Topologie-Managements in drahtlosen Sensornetzwerken.

tigung der Sensorabdeckung ermöglicht, stellt die *Activity Control* dar. Sie verfolgt die zeitweise Deaktivierung von Sensorknoten, welche zum Erhalt der Abdeckung nicht gebraucht werden. Beispielhaft hierfür ist der Ansatz von Adaptive Self-Configuring Sensor Network Topologies (ASCENT) [CE04]. Ein häufig verwendetes Hilfsmittel zum Erreichen von Power Control und Activity Control stellt das sogenannte *Clustering* dar.

Diese Partitionierung von Sensorknoten eines drahtlosen Sensornetzwerks in kleinere Gruppen stellt ein zentrales Instrument zur verteilten Organisation drahtloser Sensornetzwerke dar. Wie in den Abschnitten 2.1.4.4, 2.1.4.5 und 2.1.4.7 gezeigt, spielt das Clustering eine wichtige Rolle bei Medienzugriff, Routing und Aggregation. Darüber hinaus ist die Partitionierung des Netzwerks von enormer Bedeutung für den energiebewussten Betrieb eines Sensornetzwerks. So bietet es die Möglichkeit, Redundanzen innerhalb des Netzwerks zu erkennen und nicht benötigte Sensorknoten temporär zu deaktivieren. Dieses Mittel der Unterteilung des Netzwerks bietet immer dann Vorteile, wenn eine ganzheitliche Betrachtung des Netzwerks zu aufwendig ist. Eine weitere Anwendung des Clusterings findet sich daher auch in der Lokalisierung. Als Beispiel für die Anwendung von Clustering sei an dieser Stelle Geographical Adaptive Fidelity (GAF) genannt, welches anhand der Kommunikationsreichweite der Sensorknoten eine Aufteilung des Sensornetzwerks in quadratische Cluster vornimmt [XHE01].

Eine gesonderte Betrachtung des Clusterings findet als Teil der Arbeit im Abschnitt 2.3 sowie in Kapitel 4 statt.

2.1.4.10 Sicherheit und Fehlererkennung

Wurden Sicherheitsaspekte in drahtlosen Sensornetzwerken aufgrund der dafür notwendigen Ressourcen lange Zeit kaum beachtet, gewinnen sie aktuell zunehmend an Bedeutung. Mit dem Einsatz drahtloser Sensorknoten als Massenprodukt in industriellen, aber vor allem militärischen Szenarien ergibt sich zunehmend die Notwendigkeit für Algorithmen,

welche der Sicherheit in drahtlosen Sensornetzwerken dienen. Hierbei geht es nicht nur um die Abhörsicherheit der übertragenen Informationen, sondern beispielsweise auch um die Abwehr möglicher Angriffe auf die Kommunikation. Beispielhaft sei an dieser Stelle der Wormhole-Angriff genannt, bei dem ein Angreifer Datenpakete an einer Stelle des Netzwerks empfängt, durch einen zusätzlichen Kanal an eine andere Stelle des Netzwerks überträgt und dort wieder in das Netzwerk einspeist [HPJ03]. Auf diese Weise kann sich ein Angreifer zum Zeitpunkt des Routenaufbaus in eine vorteilhafte Position bringen, da er immer die kürzeste Route anbietet. Beim anschließenden Datentransfer hat er dann die Möglichkeit, Pakete zu verwerfen oder gar zu lesen. Aber auch andere Algorithmen, welche auf Informationen der ihnen benachbarten Knoten angewiesen sind, wie beispielsweise die Lokalisierung, können dadurch gestört werden. Die weiterführende Literatur bietet einige Arbeiten, welche einen Überblick existenter Verfahren auf dem Gebiet der Sicherheit in drahtlosen Sensornetzwerken vermitteln [PSW04, DKB05].

In engem Zusammenhang mit der Sicherheit steht auch die Fehlererkennung in drahtlosen Sensornetzwerken, da auftretende Fehler ebenso einen Hinweis auf einen Angriff oder eine Manipulation bieten können. Davon losgelöst bietet die Fehlerdetektion aber auch die Möglichkeit, die Performanz des Netzwerks zu steigern und die Art und Weise der Datenverarbeitung zu verbessern. Als ein Bestandteil der Arbeit wird das Thema der Fehlerdetektion in den Kapiteln 2.4 und 5 gesondert betrachtet.

2.1.4.11 Lokalisierung

Lokalisierung in drahtlosen Sensornetzwerken bezeichnet die Bestimmung der Position einzelner Sensorknoten innerhalb des Sensornetzwerks. Die Notwendigkeit der Lokalisierung ergibt sich zum einen aus Sicht der Datenanalyse. So ergeben die durch das Netzwerk aufgezeichneten Messwerte häufig erst dann einen Sinn, wenn zusätzlich bekannt ist, wo diese aufgenommen wurden. Zum anderen stellt die Lokalisierung eine wichtige Voraussetzung für weitere Funktionalitäten in Sensornetzwerken dar. Zu diesen zählen das geografische Routing, die Aggregation, aber auch das Clustering.

Als ein Kernthema der Arbeit findet eine eingehende Betrachtung der Lokalisierung im Abschnitt 2.2 sowie in Kapitel 3 statt.

2.1.5 Standardisierungsbestrebungen

Die Vielzahl existierender Algorithmen und Protokolle zeigt, dass der Bereich drahtloser Sensornetzwerke über einen langen Zeitraum hinweg durch ein fehlende Standardisierung

geprägt war. Dies liegt zum einen daran, dass der recht junge Bereich der drahtlosen Sensornetzwerke noch immer in Entwicklung begriffen ist. Ein weiterer Grund liegt in der Vielzahl spezialisierter Anwendungen, welche häufig unterschiedliche Anforderungen stellen. Aufgrund des wachsenden Interesses von Industrie und Militär, aber auch aufgrund des Bestrebens seitens der Forschung und der Industriepartner hinter der drahtlosen Sensortechnik, diese auf dem Markt zu etablieren, haben in den letzten Jahren einige Standardisierungsbemühungen stattgefunden. Der Einsatz von Standards dient folgenden Zielen:

Vertrauen: Die Verwendung standardisierter Protokolle und Technologien stärkt das Vertrauen in die Technik seitens der Kunden und Anwender.

Kommunikation: Bei Fragen und Problemen, sowie bei der Kommunikation mit Herstellern und Entwicklern können die verwendete Technologie sowie Anforderungen und Funktionalitäten aufgrund vorhandener Spezifikationen klar benannt werden.

Interoperabilität: Durch die Verwendung von Standards können Geräte unterschiedlicher Hersteller und Baureihen miteinander interoperieren, sofern diese den gleichen Standards entsprechen.

Entwicklungskosten: Durch die Verwendung von Standards erübrigt sich eine fortwährende Neuentwicklung proprietärer Protokolle. So können Kosten für die Entwicklung und Implementierung reduziert werden.

Wiederverwendbarkeit: Die Wiederverwendung einmal implementierter Standards minimiert mögliche Implementierungsfehler.

Zuverlässigkeit: Die strikte Umsetzung von Standards gewährleistet eine geringe Fehlerhaftigkeit, da so mehrfach erprobte Verfahren Anwendung finden.

Betriebssicherheit: Der Einsatz neuer Geräte und Technologien erfordert im industriellen und besonders im medizinischen Sektor eine Reihe vorhergehender Prüfungen und Genehmigungsverfahren. Durch den Einsatz von Standards können diese Prüfungen minimiert und somit weitere Kosten eingespart werden.

Nachfolgend werden einige existierende Standardisierungsbemühungen vorgestellt. Es ist jedoch anzumerken, dass diese häufig nur für bestimmte Anwendungsgebiete nutzbar sind und für andere Anwendungen hingegen zu restriktiv ausgelegt sein können.

2.1.5.1 IEEE 802.15.4

Mit diesem Standard hat das IEEE eine Spezifikation für eine drahtlose Funkübertragungstechnologie mit geringer Datenübertragungsrate, langer Batterielebenszeit und sehr geringer Komplexität geschaffen. Der Standard adressiert damit die Klasse der Wireless Personal Area Networks (WPANs). Die Standardisierung umfasst die unteren beiden Schichten des OSI-Referenzmodells (PHY und MAC). Für die Kommunikation wurden drei Frequenzbänder gewählt: 2,4 GHz (global), 915 MHz (USA) und 868 MHz (Europa). Die Datenübertragungsrate beträgt 20 bis 250 kbps bei einer Kommunikationsreichweite von 10 bis 100 m.

In der PHY-Schicht werden zwei verschiedene Modulationsverfahren eingesetzt. Im 2,4 GHz Band kommt das O-QPSK-Verfahren zum Einsatz. In den übrigen Frequenzbändern wird Binary Phase Shift Keying (BPSK) verwendet.

Die verwendete MAC-Schicht basiert auf CSMA/CA und ermöglicht die Kommunikation in den Topologien Stern, Mesh und Cluster-Tree, wie in Abbildung 2.18 dargestellt. Zur Realisierung der Topologien werden zwei Geräteklassen eingeführt. Die Full Function Devices (FFDs), welche alle Funktionen des Standards implementieren, und die Reduced Function Devices (RFDs), welche nur einen kleinen Teil des Standards implementieren. Während FFDs ihrer Funktion entsprechend in Router und Coordinator aufgeteilt werden und beliebig miteinander in Kommunikation treten können, können RFDs ausschließlich mit FFDs kommunizieren.

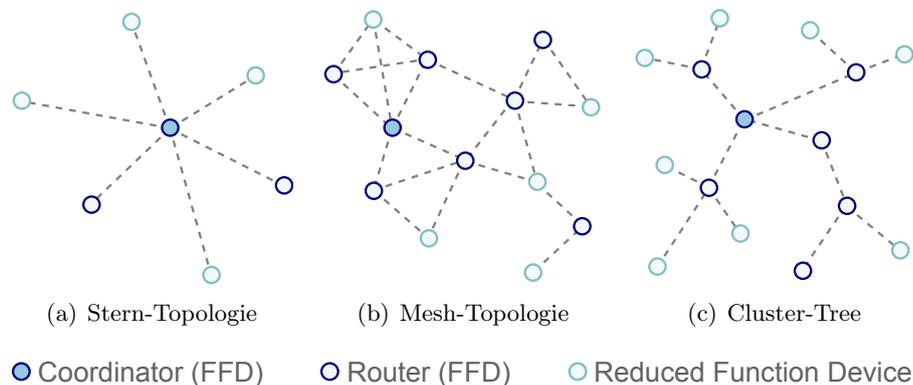


Abbildung 2.18: Netzwerktopologien im IEEE 802.15.4 Standard: (a) Stern, (b) Mesh, (c) Cluster-Tree

Die in diesem Standard spezifizierten Netzwerkschichten dienen als Unterbau für weitere Standards. [Far08, AV10]

2.1.5.2 ZigBee

Der ZigBee Standard wurde von der ZigBee-Alliance, einem internationalen Industriekonsortium aus mehr als 230 Unternehmen, entwickelt, um die technologische Entwicklung auf diesem Gebiet voranzutreiben. Der Standard setzt auf IEEE 802.15.4 auf und definiert oberhalb der durch IEEE 802.15.4 bereitgestellten Schichten (PHY und MAC) die Schichten NWK und APL.

Die NWK-Schicht beinhaltet eine Netzwerkverwaltung, um Geräte einem Netzwerk hinzuzufügen oder diese nach Verlassen der Reichweite zu entfernen. Für das Routing, welches auf Ad-hoc On-demand Distance Vector Routing (AODV) basiert, werden besonders kurze Adressen vergeben, welche von der gerätespezifischen MAC-Adresse abweichen. Zusätzlich definiert ZigBee 255 sogenannte Endpunkte, welche den Ports in TCP-Netzwerken ähneln und mit Diensten assoziiert werden. Auf diese Weise können verschiedene Dienste auf einem Gerät direkt adressiert werden.

Im APL-Layer definiert ZigBee sogenannte ZigBee Device Objects (ZDOs), die den Zugriff auf Netzwerkfunktionalitäten ermöglichen, und Application Objects (AOs), welche zur Implementierung der eigentlichen Anwendung dienen. Ein zusätzlicher APS-Layer bietet Discovery-Funktionalitäten und ermöglicht die Kommunikation zwischen AOs. [Far08, AV10]

2.1.5.3 WirelessHART

WirelessHART stellt die drahtlose Erweiterung des Standard Industrieprotokolls Highway Addressable Remote Transducer (HART) dar, welches das am meisten genutzte Protokoll in Industrie und Automatisierung ist. WirelessHART nutzt die PHY-Schicht von IEEE 802.15.4, verwendet darauf aufsetzend jedoch ein TDMA-basiertes MAC-Protokoll. Die Netzwerkarchitektur setzt sich aus fünf verschiedenen Komponenten zusammen. WirelessHART Field Devices (WFDs) stellen die drahtlosen Sensoren dar. Gateways dienen als Übergangspunkt zwischen dem drahtlosen und drahtgebundenen Teil der Infrastruktur. Die Gateways sind drahtgebunden mit dem Netzwerkmanager verbunden. WirelessHart Adapter dienen dazu, herkömmliche HART Sensoren um die drahtlose Schnittstelle zu erweitern und in das Drahtlosnetzwerk einzubinden. Zum Auslesen der Daten aus dem Netzwerk existieren weiterhin Handhelds, welche drahtlos mit dem Netzwerk kommunizieren können. Die Topologie des Funknetzwerks ist durch ein Mesh gegeben. Die Besonderheit von WirelessHART ist dessen Echtzeitverhalten. [Far08, AV10, CNM10]

2.1.5.4 6LoWPAN

Während die zuvor beschriebenen Ansätze eine Standardisierung der Protokolle innerhalb eines drahtlosen Sensornetzwerks adressieren, fokussiert der von der Internet Engineering Task Force (IETF) entwickelte IPv6 over Low-power Wireless Personal Area Network (6LoWPAN) Standard die Interoperabilität drahtloser Sensornetzwerke mit IP-basierten Netzwerken. Durch die Implementierung des IPv6 Stacks auf den durch IEEE 802.15.4 gegebenen Schichten soll es ermöglicht werden, jeden einzelnen Sensorknoten über das Internet zu erreichen. Eine wesentliche Aufgabe von 6LoWPAN liegt darin, die Adressstruktur von IPv6, welche im Paketheader 40 Bytes einnimmt, zu verkleinern, da die Paketlänge bei IEEE 802.15.4 auf insgesamt 127 Bytes begrenzt ist. Um dies zu erreichen, wird eine Adaptionsschicht eingeführt, welche den Übergang zwischen IPv6 und IEEE 802.15.4 darstellt. Anstelle eines monolithischen Headers werden vier unterschiedliche Headertypen verwendet, die sich je nach Art des zu übertragenden Paketes unterscheiden. Zusätzlich wird eine zustandslose Komprimierung eingesetzt, welche den IPv6 Header auf 4 Bytes komprimiert. [Far08, AV10, SB10]

2.2 Lokalisierung in drahtlosen Sensornetzwerken

2.2.1 Motivation

Drahtlose Sensornetzwerke dienen dazu, verschiedenste Umweltparameter in einem verteilten Gebiet zu erfassen und diese mittels drahtloser Kommunikation dem Nutzer bzw. einer zentralen Einheit zugänglich zu machen. In den meisten Fällen wird für eine qualitative Auswertung der gemessenen Werte zusätzlich Information darüber benötigt, wann und an welcher Position ein Phänomen detektiert wurde. Sowohl Ortsinformationen als auch die aktuelle Uhrzeit können theoretisch durch die Verwendung von GPS [Xu07], welches ebenso wie die europäischen und russischen Konkurrenzsysteme Galileo und GLONASS als Globales Satellitennavigationssystem (engl. Global Navigation Satellite System (GNSS)) bezeichnet wird, bezogen werden [HWLW08]. Dem gegenüber stehen jedoch die Kosten, der Energieverbrauch und die Erreichbarkeit der Satelliten. So wird die Möglichkeit, alle Sensorknoten mit GPS auszustatten, im allgemeinen aufgrund der Kosten und des Energieverbrauchs ausgeschlossen. Hinzu kommt, dass in einigen Anwendungsszenarien, wie dem Einsatz in Innenräumen, Häuserschluchten oder in dichtem Wald GPS aufgrund der ungenügenden Erreichbarkeit der Satelliten nicht verwendet werden kann.

Alternativ wird zur Lokalisierung in drahtlosen Sensornetzwerken die örtliche Nähe von Sensorknoten zueinander verwendet. In fast allen Verfahren werden dazu Referenzknoten verwendet, welche über Informationen bezüglich der eigenen Position verfügen. Durch die Kombination dieser Informationen und der Beziehungen der Sensorknoten zu diesen Referenzknoten wird eine lokale Positionsbestimmung realisiert.

2.2.2 Querbeziehungen

Die Lokalisierung in drahtlosen Sensornetzwerken dient nicht ausschließlich dem Zweck, erfasste Messwerte mit Ortsinformationen zu verknüpfen, sondern kann darüber hinaus weiteren Funktionalitäten als Basis dienen. Typische Konsumenten der durch die Lokalisierung angebotenen Information stellen das geografische Routing, die Aggregation und das geografische Clustering dar. Zur Realisierung der Positionsbestimmung spielt der Nachrichtenaustausch zwischen benachbarten Sensorknoten häufig eine tragende Rolle. Auch die Verbreitung von Informationen über mehrere Hops kann im Kontext der Lokalisierung erforderlich sein. Die Lokalisierung tritt daher ihrerseits als Konsument des Medienzugriffs und Routings auf. Aber auch die Funktionalität des Clustering kann als Eingangsgröße der Lokalisierung dienen [CLP05]. Mögliche Anbieter und Konsumenten im Zusammenspiel mit der Lokalisierung sind in Abbildung 2.19 zusammenfassend dargestellt.

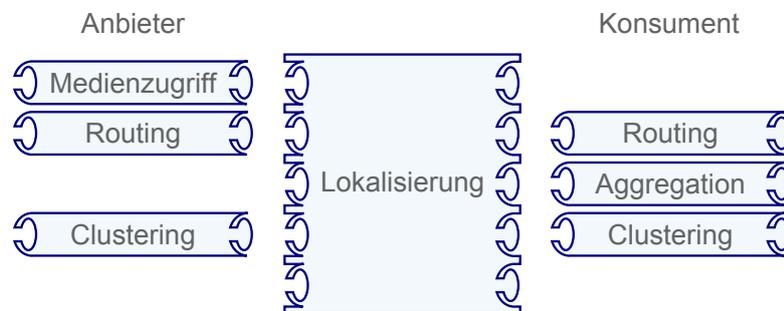


Abbildung 2.19: Wechselwirkungen von Verfahren zur Positionsbestimmung mit weiteren Funktionalitäten drahtloser Sensornetze.

2.2.3 Begriffe

Im Kontext der Lokalisierung ergeben sich aufgrund der Rollen, die einzelnen Sensorknoten zuteilwerden, weitere Begrifflichkeiten, welche an dieser Stelle übersichtsartig eingeführt werden sollen. Tabelle 2.1 zeigt die grafische Darstellung und die mathematische Notation dieser Rollen in einer Übersicht.

Referenzknoten: Als Referenzknoten wird ein Sensorknoten bezeichnet, der sich durch die Kenntnis seiner Position auszeichnet und diese anderen Sensorknoten als Basis für ihre Positionsberechnung zur Verfügung stellt. Referenzknoten werden auch als Beacon-Knoten (kurz Beacon) oder Anker-Knoten (kurz Anker) bezeichnet.

Blindknoten: Sensorknoten, die ihre eigene Position nicht kennen und diese durch Anwendung eines Lokalisierungsverfahrens ermitteln müssen, werden als Blindknoten bezeichnet. Auch die Bezeichnung als Unbekannter ist weit verbreitet.

Bezeichnung	Graphische Darstellung	Mathematische Notation
Referenzknoten	Δ	b
Blindknoten	\circ	u

Tabelle 2.1: Graphische und mathematische Darstellung unterschiedlicher Sensorknoten im Kontext der Lokalisierung.

2.2.4 Klassifizierung

Lokalisierungsalgorithmen für drahtlose Sensornetzwerke können, wie in Abbildung 2.20 dargestellt, anhand verschiedener Kriterien unterschieden werden. Anhand der maximal erreichbaren Lokalisierungsgenauigkeit kann zunächst zwischen exakten und approximativen Verfahren unterschieden werden. Diese werden zuweilen auch als feinkörnige bzw. grobkörnige Verfahren bezeichnet. Während die exakten Verfahren unter der Voraussetzung fehlerfreier Eingangswerte in jedem Fall die genaue Position eines Blindknotens liefern, stellen die approximativen Verfahren lediglich eine Näherungslösung bereit, welche der tatsächlichen Position entsprechen kann, dieser jedoch trotz fehlerfreier Eingangswerte nicht entsprechen muss. Der Vorteil der approximativen Verfahren besteht in der geringeren Komplexität und niedrigeren Anforderungen an die Eingangsgrößen. Häufig können sie zudem eine höhere Robustheit gegenüber fehlerbehafteten Eingangsgrößen aufweisen.

Ein Großteil der Lokalisierungsverfahren in drahtlosen Sensornetzwerken basiert auf Distanzmessungen oder Distanzschätzungen zwischen Sensorknoten. Während die exakten Verfahren nahezu ausschließlich auf der Ermittlung von Distanzen zwischen Sensorknoten basieren, findet bei den approximativen Verfahren eine weitere Unterteilung in distanzfreie und distanzbehaftete Verfahren statt. Während distanzfreie Verfahren vollständig ohne die Kenntnis von Abständen zwischen Sensorknoten arbeiten, verwenden distanzbehaftete Verfahren diese als Metrik oder Gewichtung zur Positionsbestimmung. In approximativen

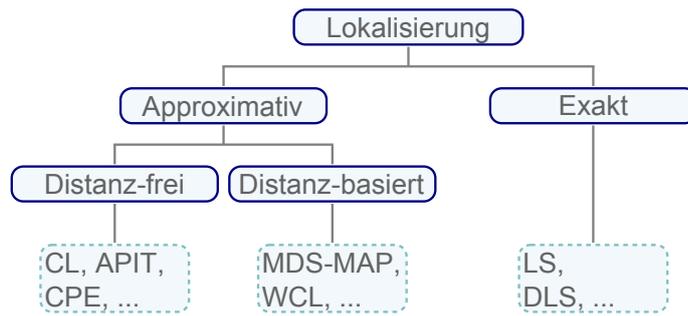


Abbildung 2.20: Klassifizierung von Verfahren zur Positionsbestimmung anhand der genutzten Eingangsgröße und der erreichbaren Genauigkeit.

Verfahren kann die Distanz jedoch häufig durch eine andere Größe ersetzt werden, welche eine Relation mit der Distanz aufweist.

Ergänzend zu dieser Aufteilung kann weiterhin nach den in Abbildung 2.21 dargestellten Kriterien klassifiziert werden.

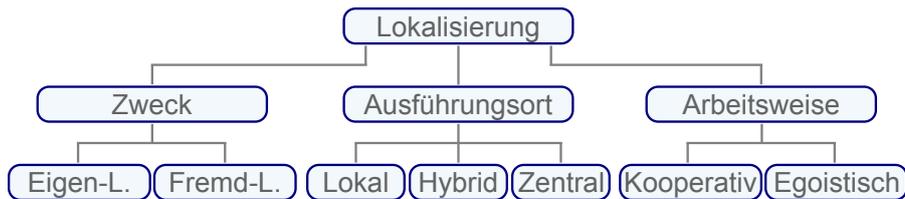


Abbildung 2.21: Weitere Kriterien zur Klassifizierung von Verfahren zur Positionsbestimmung.

Dies erlaubt zunächst eine Unterscheidung in Bezug auf den Zweck der Lokalisierung. Dient die Lokalisierung lediglich der Verknüpfung mit den erhobenen Messdaten, so ist eine Fremdllokalisierung ausreichend, welche in der Regel zentral auf der Senke realisiert wird. Der Blindknoten muss sich in diesem Fall nur in sofern an der Lokalisierung beteiligen, als dass er es Referenzknoten durch Aussenden von Nachrichten ermöglicht, eine Abstandsschätzung durchzuführen. Soll die Positionsinformation hingegen weiteren Verfahren wie dem Routing oder Clustering dienen, so muss der Sensorknoten als Ergebnis der Lokalisierung selbst über Positionsinformationen verfügen. Zu diesem Zweck ermittelt der Blindknoten im Falle einer Eigenlokalisierung aktiv Distanzen zu Referenzknoten und führt häufig auch die Positionsberechnung durch. Die Begriffe der Eigen- und Fremdllokalisierung stehen in engem Zusammenhang mit dem Ort der Ausführung. Fremdllokalisierung wird häufig zentral realisiert, während die Berechnung bei der Eigenlokalisierung tendenziell lokal auf dem Blindknoten statt findet. Es ist jedoch auch bei der Eigenlokalisierung möglich, dass

die Berechnung zentral auf einer Senke durchgeführt wird. Es ist ebenfalls möglich, die Berechnung durch einen hybriden Ansatz teils zentral und teils lokal durchzuführen.

Ein dritter Zweig der Charakterisierung wird durch die Arbeitsweise der Blindknoten gebildet. Hier kann zwischen einer egoistischen Arbeitsweise und einer kooperativen Arbeitsweise unterschieden werden. Während die egoistische Arbeitsweise den konventionellen Ansatz beschreibt, wobei Blindknoten ausschließlich direkt mit Referenzknoten agieren, findet bei der kooperativen Lokalisierung eine Zusammenarbeit zwischen Blindknoten statt. Der Bereich der kooperativen Lokalisierung hat in jüngster Zeit vor allem durch die Arbeiten von Wymeersch et al. [WSW08, WFW08, WLW09] erhöhte Aufmerksamkeit erlangt. Die Art der Zusammenarbeit in kooperativen Algorithmen kann überaus vielschichtig sein und zeigt, dass mit der kooperativen Lokalisierung an vielen Stellen lediglich ein neuer, übergeordneter Begriff für altbekannte Ideen geschaffen wurde. Ist beispielsweise die Dichte der Referenzknoten so gering, dass ein Blindknoten nicht genügend Referenzknoten empfangen kann, so können Blindknoten eine *Relais-Funktion* erfüllen und die Daten der Referenzknoten an weiter entfernte Blindknoten weiterleiten. Diese Art der Zusammenarbeit ist aus Verfahren bekannt, welche DV-Hop, DV-Distance oder Hop-TERRAIN zur Distanzschätzung verwenden [NN01, SRL02, NN03]. Eine andere Ausprägung der Kooperation stellen die *Iterativen Verfahren* dar, deren Ansatz darin besteht, dass Blindknoten, welche ihre Position erfolgreich ermittelt haben, als Referenzknoten für weitere Blindknoten dienen. Beispielfhaft seien an dieser Stelle die iterative Multilateration [SHS01], der Cooperative Localization with Optimum Quality of Estimate (CLOQ)-Algorithmus [APAE06], sowie Iterative Distributed Least Squares (iDLS) [RT07] genannt. Eine besondere Stellung im Kontext der kooperativen Verfahren nimmt darüber hinaus MDS-MAP [SRZF03, SR04] ein, welches durch Auswertung der Distanzen zwischen Blindknoten eine Karte erstellt, welche mit Hilfe von nur drei Referenzknoten in das gegebene Koordinatensystem gedreht werden kann.

Abgrenzung Zur Vervollständigung der Klassifizierung sowie zur Darstellung der in dieser Arbeit behandelten Themen soll an dieser Stelle auf die Abgrenzung der Lokalisierung von der Positionsverfolgung, dem sogenannten Tracking, hingewiesen werden. Während die Lokalisierung lediglich die zum Zeitpunkt der Positionsbestimmung vorherrschenden Daten berücksichtigt, um die Position vornehmlich immobiler Objekte zu bestimmen, besteht das Wesen des Tracking darin, vorhergehende Positionsdaten bei der Ermittlung der augenblicklichen Position eines vornehmlich bewegten Objektes mit einzubeziehen. Zusätzlich zu den nachfolgend genannten Beobachtungsgrößen können beim Tracking

weitere Eingangsdaten mit einfließen, wie zum Beispiel Bewegungsprofile. Durch die Verwendung historischer Daten sowie zusätzlicher Eingangsgrößen wird beim Tracking häufig eine höhere Genauigkeit erreicht als bei der reinen Lokalisierung.

2.2.5 Beobachtungsgrößen und Distanzschätzung in drahtlosen Sensornetzwerken

Ein Großteil der existierenden Lokalisierungsverfahren nutzt neben den durch die Referenzknoten bereitgestellten Positionsdaten ermittelte Distanzinformationen für die Berechnung der Position eines Blindknotens. Zur Ermittlung des Abstands zwischen Blind- und Referenzknoten aber auch zwischen Blind-Knoten untereinander stehen verschiedene Beobachtungsgrößen zur Verfügung.

2.2.5.1 Signallaufzeit

Eine Möglichkeit der Distanzschätzung stellt die Auswertung der Signallaufzeit dar. Ausgehend von einer Signalausbreitungsgeschwindigkeit, welche der Lichtgeschwindigkeit entspricht, erfüllen die Distanz R , die Übertragungszeit t und die Lichtgeschwindigkeit c die in Gleichung (2.2) dargestellte Beziehung, welche eine Distanzschätzung ermöglicht.

$$c = \frac{R}{t} \quad (2.2)$$

Die Problematik bei der Signallaufzeitmessung besteht zum einen in der genauen Zeitmessung und der Notwendigkeit der Synchronität von Sender und Empfänger, sofern von einer einfachen Messung ausgegangen wird. Zum anderen existiert das Problem, dass zu der Übertragungszeit eines Datenpakets weitere Zeit für die Verarbeitung sowie für den Medienzugriff hinzugerechnet werden muss. Aus dieser Problematik heraus ergeben sich verschiedene Verfahren der Signallaufzeitmessung, welche nachfolgend genannt werden.

Time-of-Arrival Das Time of Arrival (TOA)-Verfahren bezeichnet allgemein die Zeitmessung zwischen Senden und Empfangen einer Nachricht. Es existiert eine Unterscheidung zwischen *one-way propagation time*, auch TOA genannt, und *round-trip propagation time*, auch Roundtrip Time of Arrival (RTOA) genannt. Während bei dem erstgenannten Verfahren, entsprechend Abbildung 2.22, tatsächlich die Zeit zwischen Sender und Empfänger gemessen wird und beide Partner daher mit hoher Genauigkeit synchronisiert sein müssen, antwortet bei dem zweitgenannten Verfahren der Empfänger mit einer weiteren Nachricht,

dessen Empfangszeit beim Sender erfasst wird. Die einfache Übertragungszeit ergibt sich dann durch Subtraktion der Verarbeitungszeit und anschließender Multiplikation mit $1/2$. Gleichung (2.3) stellt die Erfassung der Signallaufzeit für den Fall der one-way propagation time (2.3a) und der round-trip propagation time (2.3b) dar.

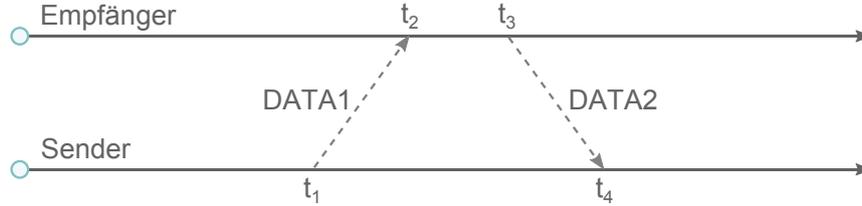


Abbildung 2.22: Darstellung der Signallaufzeitmessung mittels TOA.

$$\Delta t = t_2 - t_1 = t_4 - t_3 \quad (2.3a)$$

$$\Delta t = \frac{(t_4 - t_1) - (t_3 - t_2)}{2} \quad (2.3b)$$

Allgemein besteht die Schwierigkeit der TOA-Verfahren in der Synchronität und der hoch genauen Zeitmessung, welche höhere Anforderungen an die verwendete Hardware stellt.

Time-Difference-of-Arrival Das Time Difference of Arrival (TDOA)-Verfahren arbeitet mit zwei unterschiedlichen Zeitmessungen, um das Problem der Synchronität zu umgehen. Auch hier kann zwischen zwei Verfahren, dem Multi-Node TDOA und dem Multi-Signal TDOA unterschieden werden.

Bei Verwendung des in Abbildung 2.23 dargestellten Multi-Signal TDOA wird die unterschiedliche Ausbreitungsgeschwindigkeit von zwei verschiedenen Signalen ausgenutzt. Ein bekanntes Beispiel stellt die Verwendung von Funk und Ultraschall mit den Ausbreitungsgeschwindigkeiten v_{RF} und v_{US} dar [PCB00, SHS01]. Wie in Abbildung 2.23 illustriert, emittiert ein Sender je eine Nachricht als Funksignal und als Ultraschallsignal. Aufgrund der unterschiedlichen Ankunftszeiten beider Signale kann mittels Gleichung (2.4) die Entfernung zum Sender durch den Empfänger bestimmt werden. [AV10]

$$R = (v_{RF} - v_{US}) ((t_{US2} - t_{RF2}) - (t_{US1} - t_{RF1})) \quad (2.4)$$

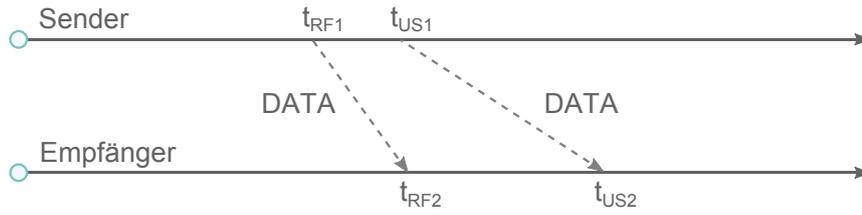


Abbildung 2.23: Darstellung der Signallaufzeitmessung mittels Multi-Signal TDOA unter Verwendung verschiedener Trägersignale.

Das in Abbildung 2.24 dargestellte Multi-Node TDOA basiert hingegen auf der Messung der Empfangszeiten eines vom Sender s ausgesendeten Signals an verschiedenen Empfängern r_i , welche untereinander synchronisiert sind. Für die sich so ergebenden Zeitdifferenzen Δt_{ij} gilt der in Gleichung (2.5) beschriebene Zusammenhang. Durch die Verwendung mehrerer Empfänger lässt sich somit ein Gleichungssystem aufbauen, dessen Lösung direkt die Position des Unbekannten angibt.

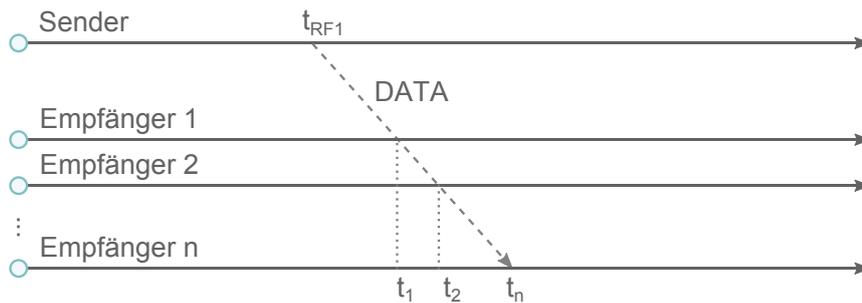


Abbildung 2.24: Darstellung der Signallaufzeitmessung mittels Multi-Node TDOA unter Verwendung synchronisierter Empfänger.

$$\Delta t_{i,j} = t_i - t_j = \frac{1}{c} (\|\mathbf{r}_i - \mathbf{s}\| - \|\mathbf{r}_j - \mathbf{s}\|) \quad (2.5)$$

Theoretisch ist das beschriebene Verfahren auch analog unter Verwendung synchron ausgesandter Nachrichten von mehreren Sendern zu einem Empfänger möglich.

Auch bei TDOA besteht die Problematik der Synchronität und im Fall des Multi-Signal TDOA zudem die erhöhte Anforderung an die Hardware zum Senden und Empfangen von Ultraschallsignalen.

2.2.5.2 Signalempfangsstärke

Die bislang am häufigsten verwendete Methode der Distanzschätzung in drahtlosen Sensornetzwerken stellt die Auswertung der Signalempfangsstärke dar, da sie im Gegensatz zur Signallaufzeitmessung geringe Anforderungen an die verwendete Hardware stellt. Die Funkhardware der meisten Sensorknoten bietet die Möglichkeit, die Signalstärke eines empfangenen Datenpaketes auszulesen. Die Signalstärke einer Nachrichtensendung nimmt mit der Entfernung zum Sender der Nachricht ab. Ist die vom Sender emittierte Signalstärke bekannt, so kann mit Hilfe eines geeigneten Ausbreitungsmodells die zurückgelegte Strecke ermittelt werden. Gemäß der Friis'schen Freiraumdämpfung gehen, wie in Gleichung (2.6) dargestellt, neben der Distanz R und der Sendeleistung P_t , die Antennengewinne G_t und G_r sowie die Wellenlänge λ in die Berechnung der Empfangsstärke ein [Rap02, MFA07].

$$P_r(R) = P_t * G_t G_r * \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \quad (2.6)$$

Üblicher als die Verwendung der tatsächlichen Leistung ist die Angabe als Leistungspegel L mit der Bezugsgröße $1mW$, dessen Umrechnung in Gleichung (2.7) dargestellt ist.

$$L = 10 \log \left(\frac{P}{1mW} \right) \quad (2.7)$$

Durch Anwendung der Umformung ergibt sich aus Gleichung (2.6) die in Gleichung (2.8) dargestellte Form.

$$L_r(R) = L_t + 10 \log(G_t G_r) + 20 \log \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right) \quad (2.8)$$

Um eine Darstellung zu erhalten, welche unabhängig von Wellenlänge und Antennengewinn ist, ist es üblich mit einer Referenzleistung P_0 bzw. einem Referenzpegel L_0 zu arbeiten, welcher der Empfangsleistung im Referenzabstand R_0 entspricht. Durch Umformung ergibt sich so die in Gleichung (2.9) dargestellte Form.

$$L_r(R) = L_0 - 20 \log \left(\frac{R}{R_0} \right) \quad (2.9)$$

Die aus der Friis'schen Freiraumdämpfung abgeleitete Form in Gleichung (2.9) gilt nunmehr für den stark idealisierten Fall des störungsfreien Raums im Vakuum. Um sowohl den systematischen Einfluss der Umgebung, bestehend aus Reflektion, Beugung und Streuung,

als auch zufällige Einflüsse durch Abschattung und Mehrwegeausbreitung in die Modellierung einfließen zu lassen, wurde dieses Modell zum *Log-Normal-Fading* Modell erweitert. In dem in Gleichung (2.10) dargestellten Modell dient der Pfadverlustexponent η zur Charakterisierung der Umgebung, während die normalverteilte und mittelwertfreie Größe X_σ die zufälligen Einflüsse repräsentiert.

$$L_r(R) = L_0 - 10\eta \log\left(\frac{R}{R_0}\right) + X_\sigma \quad (2.10)$$

Unter der Voraussetzung der gegebenen Größen L_0 und R_0 oder alternativ dazu den Größen λ , G_r und G_t , lässt sich so durch Umstellung die Entfernung zwischen Sender und Empfänger, gemäß Gleichung (2.11), abschätzen. Aufgrund der zufälligen Einflüsse ist diese Abschätzung jedoch weniger exakt als es durch Laufzeitmessung theoretisch möglich wäre. Eine Auflistung bekannter, experimentell ermittelter Werte für den Pfadverlustexponenten η sowie die Standardabweichung σ in unterschiedlicher Umgebung befindet sich in Anhang C.

$$\hat{R} = R_0 * 10^{\frac{L_0 - L_r}{10\eta}}$$

$$\hat{R} = R_0 \left(\frac{P_r}{P_0}\right)^{-1/\eta} \quad (2.11)$$

Neben dem genannten Signalausbreitungsmodell des Log-Normal-Fadings existieren weitere Modelle. So stellt das sogenannte *Reighlay-Fading* ein Modell für den innerstädtischen Raum dar, welcher hauptsächlich durch Non Line of Sight (NLOS) geprägt ist.

2.2.5.3 Signalempfangswinkel

Eine weitere Eingangsgröße, die der Positionsbestimmung dienen kann, ist der Signalempfangswinkel, auch Angle of Arrival (AOA) genannt. Dieser kann zum Beispiel durch Verwendung einer rotierenden Antenne mit Richtcharakteristik bestimmt werden. Der Winkel, bei dem die höchste Signalstärke empfangen wird, gibt in diesem Fall die Richtung an, aus der das Signal stammt. Da die Signalstärke aber auch aufgrund anderer Einflüsse oder unter Verwendung von Amplitudenmodulation schwanken kann, besteht eine gängige Methode darin, eine zweite Antenne mit omnidirektionaler Charakteristik zu verwenden, um den Einfluss des Winkels von anderen Einflüssen zu trennen. Alternativ kann der Signalempfangswinkel auch durch die Bestimmung des Phasenunterschieds an den einzelnen Antennen eines Antennenarrays ermittelt werden. In beiden Fällen ist für die Bestimmung des Empfangswinkels eine direkte Kommunikation, auch als Line of Sight (LOS)

bezeichnet, erforderlich. Eine so erfolgte Ermittlung des Signalempfangswinkels kann zur Positionsbestimmung mittels Triangulation genutzt werden.

2.2.5.4 Weitere Beobachtungsgrößen

Knotendichte Eine weitere Möglichkeit zur Schätzung der Distanz zwischen zwei Sensorknoten besteht in der Auswertung der Knoten, welche sich in der Kommunikationsreichweite der Sensorknoten befinden, und insbesondere jener Nachbarknoten, welche den Überschneidungsbereich der Reichweiten beider Sensorknoten darstellen. Ist zusätzlich die Kommunikationsreichweite der Sensorknoten bekannt, so kann diese Nachbarschaftsinformation für eine Distanzschätzung genutzt werden. Eine Distanzschätzung aufgrund derartiger Nachbarschaftsbeziehungen wurde in [ASV09] verwendet.

Konnektivität Einige Lokalisierungsverfahren nutzen weder Winkel- noch Distanzinformationen, da diese nicht in jedem Fall als gegeben vorausgesetzt werden können. In diesen Fällen kann die einfache Information genutzt werden, welche Referenzknoten sich in der Kommunikationsreichweite eines Blindknotens befinden. Diese Information wird beispielsweise beim Centroid Localization (CL)-Verfahren verwendet [BHE00].

Kommunikationsgrenze Eine besondere Form der Verwendung der Konnektivitätsinformation besteht darin, den Wechsel von bestehender zu nicht bestehender Konnektivität zwischen Blindknoten und Referenzknoten zu verwenden.

Ein Beispiel stellt das Minimal Transmission Power (MTP)-Verfahren dar, welches die Sendeleistung eines sendenden Sensorknotens solange reduziert, bis dieser vom Empfänger gerade nicht mehr empfangen werden kann. Aus der Information der genutzten Sendeleistung lässt sich so eine Distanzschätzung realisieren [BRT06].

Eine andere Nutzung der Kommunikationsgrenze stellt die Verwendung mobiler Referenzknoten dar. Betritt oder verlässt ein solcher mobiler Referenzknoten den kreisförmig modellierten Empfangsbereich eines Blindknotens, so markiert die in diesem Moment versandte Positionsinformation einen Punkt auf diesem Kreis. Hat ein Blindknoten wenigstens drei dieser Punkte erfasst, so kann er über die Mittelsenkrechten der entstehenden Sekanten, welche sich im Kreismittelpunkt schneiden, seine Position ermitteln [SOJ05].

Multihop-Distanz Befinden sich nicht genügend Referenzknoten in der Kommunikationsreichweite des Blindknotens, so kann der Abstand zu einem weit entfernten Referenzknoten

über mehrere Hops angenähert werden. Möglich ist unter anderem, die ermittelten Distanzen zwischen Hops zu verwenden, oder auch die Verwendung einer mittleren Hop-Distanz. Beispielfür hierfür sind die als *DV-Hop* und *DV-Distance* bekannten Metriken des als Ad Hoc Positioning System (APS) bezeichneten Lokalisierungsverfahrens [NN01, NN03].

2.2.6 Grundlegende Prinzipien der Positionsbestimmung

2.2.6.1 Triangulation

Die Triangulation bezeichnet die Positionsbestimmung auf der Grundlage von Winkelberechnungen im allgemeinen Dreieck. Zur Positionsbestimmung werden neben den Positionen der Referenzknoten ermittelte Winkel zwischen eintreffenden Signalen verwendet. Zu diesem Zweck finden bei der Triangulation die trigonometrischen Formeln Verwendung, nach denen sich sämtliche Winkel und Seitenlängen eines Dreiecks bestimmen lassen, sofern drei dieser Größen gegeben sind, von denen mindestens eine eine Kantenlänge darstellt.



Abbildung 2.25: Beispielhafte Darstellung der Triangulation in einem drahtlosen Sensornetzwerk: (a) Ermittlung der Winkel durch Referenzknoten, (b) Ermittlung der Winkel durch den Blindknoten.

Die konkrete Anwendung und Verarbeitung dieser Informationen ist durch den Begriff der Triangulation nicht festgelegt. Ein besonders häufig in der Literatur der drahtlosen Sensornetzwerke zitierter Fall ist in Abbildung 2.25(a) dargestellt. Hier sind innerhalb von Dreiecken, gebildet aus zwei Referenzknoten und dem Blindknoten die Innenwinkel bei den Referenzknoten, im Beispiel α und β , bekannt. Durch Anwendung des Innenwinkelsatzes (2.12a) und des Sinussatzes (2.12b) lassen sich so die Abstände zwischen Blindknoten und Referenzknoten ermitteln. Die Positionsbestimmung kann dann über die Trilateration erfolgen.

$$\alpha + \beta + \gamma = 180^\circ \quad (2.12a)$$

$$\frac{a}{\sin\alpha} = \frac{b}{\sin\beta} = \frac{c}{\sin\gamma} \quad (2.12b)$$

Eine weitere Möglichkeit, bei der aus Sicht des Blindknotens die Winkel zwischen jeweils zwei Referenzknoten bekannt sind, ist in Abbildung 2.25(b) dargestellt. In dem dargestellten Fall kann die Position des Blindknotens beispielsweise durch die Methode der *Geometric Triangulation* oder die Methode der *Geometric Circle Intersection* ermittelt werden [CK93].

2.2.6.2 Trilateration

Die Trilateration bezeichnet die Positionsbestimmung auf der Grundlage von Streckenberechnungen im rechtwinkligen Dreieck. Die Positionsbestimmung erfolgt mit Hilfe gemessener Entfernungen zwischen Blindknoten und Referenzpunkten. Soll die Positionsbestimmung im zweidimensionalen Raum erfolgen, so werden die Entfernungen zu drei unterschiedlichen Referenzpunkten benötigt. Die grafische Herleitung des Verfahrens ist in Abbildung 2.26 veranschaulicht. Die Entfernung d_{ui} zu einem Referenzknoten b_i beschränkt die mögliche Position des Blindknotens u auf eine Kreisbahn um diesen Referenzknoten. Dies gilt für jeden der Referenzknoten, sodass der gemeinsame Schnittpunkt der drei Kreisbahnen die Position des Blindknotens beschreibt.

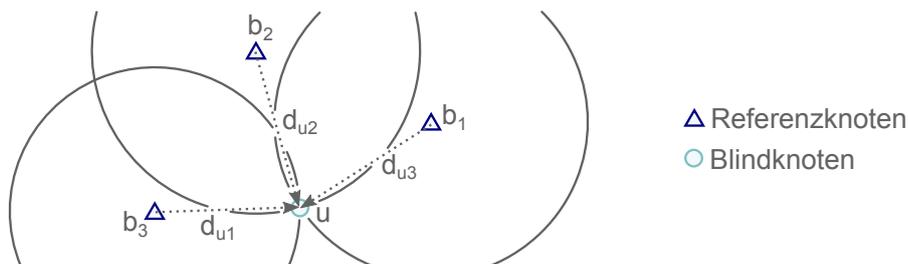


Abbildung 2.26: Beispielhafte Darstellung der Trilateration in einem drahtlosen Sensornetzwerk.

Die mathematische Lösung beruht auf dem Euklidischen Abstand $d_{\overline{ab}}$ zwischen zwei Punkten \mathbf{a} und \mathbf{b} , welcher in Gleichung (2.13) für den allgemeinen Fall des mehrdimensionalen Raums \mathbb{R}^{dim} gegeben ist.

$$d_{ab} = \|\mathbf{a} - \mathbf{b}\|_2 = \sqrt{\sum_{i=1}^{dim} (a_{(i)} - b_{(i)})^2} \quad (2.13)$$

Die Lösung eines aus $m + 1$ Gleichungen der in Gleichung (2.14) angegebenen Form bestehenden quadratischen Gleichungssystems mit der Bedingung $m \geq dim$ stellt die gesuchte Position dar.

$$d_{ui}^2 = \sum_{d=1}^{dim} (u_{(d)} - b_{i(d)})^2 \quad (2.14)$$

Die Lösung des Gleichungssystems umfasst die Beseitigung der quadratischen Terme. Dies kann zum Beispiel realisiert werden, indem eine der Gleichungen von den übrigen Gleichungen subtrahiert wird. Der Referenzknoten dieser Gleichung sei als Linearisierer mit dem Index L bezeichnet. Die so erfolgte Umformung ergibt ein aus m Gleichungen der in Gleichung (2.15) angegebenen Form bestehendes lineares Gleichungssystem, wobei die Distanz d_{iL} aus den gegebenen Positionen der Referenzknoten folgt. Die Herleitung dieser Form ist in Anhang D dargestellt.

$$\frac{1}{2} [d_{uL}^2 + d_{iL}^2 - d_{ui}^2] = \sum_{d=1}^{dim} (u_{(d)} - b_{L(d)}) (b_{i(d)} - b_{L(d)}) \quad (2.15)$$

Eine ebenfalls in Anhang D dargestellte alternative Möglichkeit der Umformung besteht darin, die Summe der auftretenden Quadratterme in einer einzigen Variablen zu substituieren. Das resultierende Gleichungssystem besteht weiterhin aus $m + 1$ Gleichungen in der in Gleichung (2.16) angegebenen Form mit $dim + 1$ Unbekannten, wobei die Distanz d_{0i} dem Betrag des Ortsvektors des Referenzknotens b_i entspricht.

$$d_{ui}^2 - d_{0i}^2 = w - 2 \sum_{d=1}^{dim} u_{(d)} b_{i(d)} \quad (2.16)$$

2.2.6.3 Multilateration

Die dargestellten Prinzipien der Triangulation und Trilateration bieten eine exakte Positionsbestimmung unter der Annahme, dass alle notwendigen Eingangsgrößen fehlerfrei vorhanden sind. Da diese Annahme in der Realität häufig nicht erfüllt werden kann, besteht eine gängige Methode darin, mehr Informationen zu nutzen, als im idealen Fall notwendig

wäre. Dies spiegelt sich in der Verwendung überbestimmter Gleichungssysteme wider. Basiert das Grundprinzip auf der Lateration, spricht man von Multilateration. Für die Lösung solch überbestimmter Gleichungssysteme wird häufig die Maximum Likelihood Methode oder die Methode der kleinsten Quadrate verwendet.

2.2.6.4 Weitere Verfahren

Neben den genannten Verfahren, welche auf exakten Berechnungen bzw. deren Annäherung durch Ausgleichsrechnungen basieren, existieren weitere Verfahren.

Schwerpunkt-Verfahren Eine Möglichkeit der Lokalisierung stellen Schwerpunktverfahren dar, welche durch Mittelwertberechnung eine Positionsschätzung erzeugen. Die in dieser Arbeit behandelten Verfahren beschränken sich dabei auf das einfache und gewichtete arithmetische Mittel. Denkbar sind jedoch auch Alternativen wie das geometrische oder harmonische Mittel, aber auch Verfahren der robusten Statistik [MMY06, HR09], wie das gestutzte Mittel oder der Median.

RSS-Profiling Eine weitere Möglichkeit besteht in der Verwendung von Empfangsstärkeprofilen. Bei diesen Verfahren wird für das entsprechende Gebiet eine Karte erstellt, welche nach einem bestimmten Raster die jeweils in Reichweite befindlichen Referenzknoten und deren Signalstärke verzeichnet. Die Positionsschätzung eines Blindknotens erfolgt anschließend durch einen Abgleich der von diesem gemessenen Werte mit den in der Karte befindlichen Werten [MFA07].

2.2.7 Mathematische Grundlagen

2.2.7.1 Methode der kleinsten Quadrate

Die Methode der kleinsten Quadrate, auch als Least Squares (LS) bezeichnet, stellt eines der bekanntesten mathematischen Verfahren der Ausgleichsrechnung dar. Als solches ermöglicht es näherungsweise die Lösung überbestimmter Gleichungssysteme. Da das Verfahren im Laufe dieser Arbeit lediglich auf einen linearen Kurvenverlauf Anwendung findet, soll es an dieser Stelle auch nur für diesen Spezialfall erörtert werden.

Ziel des Verfahrens ist die Bestimmung der Kurvenparameter $\alpha_0, \dots, \alpha_N$ einer Funktion $f(x_1, \dots, x_N; \alpha_0, \dots, \alpha_N) = \alpha_0 + \alpha_1 x_1 + \dots + \alpha_N x_N$, sodass diese dem durch eine Menge gegebener Datenpunkte $(x_{1m}, \dots, x_{Nm}, y_m)_{m=1}^M$, ($M > N$) beschriebenen Zusammenhang

möglichst gut entspricht. Als Optimierungskriterium dient dabei die in Gleichung (2.17) dargestellte Summe der quadrierten Residuen r_m , also der Differenzen zwischen Funktionswert und Messwert an einer durch einen Messpunkt gegebenen Stelle \mathbf{x} .

$$\min_{\alpha} \sum_{m=1}^M r_m^2 = \min_{\alpha} \sum_{m=1}^M (f(x_{1m}, \dots, x_{Nm}; \alpha_0, \dots, \alpha_N) - y_m)^2 \quad (2.17)$$

Die naheliegende Lösung dieses Minimierungsproblems besteht in der Extremwertberechnung durch Nullsetzen der nach den Kurvenparametern gebildeten partiellen Ableitungen dieser Gleichung. Das sich daraus ergebende Gleichungssystem besteht aus N Gleichungen und bietet somit eine eindeutige Lösung.

Die in dieser Arbeit verwendeten Lösungsansätze beruhen auf der in Gleichung (2.18) dargestellten Matrixnotation des gegebenen Minimierungsproblems.

$$\min_{\alpha} \|\mathbf{r}\| = \min_{\alpha} \|\mathbf{A}\alpha - \mathbf{b}\| \quad (2.18a)$$

$$\mathbf{r} = \begin{pmatrix} r_1 \\ \vdots \\ r_M \end{pmatrix}, \mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & x_{11} & \cdots & x_{N1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{1M} & \cdots & x_{NM} \end{pmatrix}, \alpha = \begin{pmatrix} \alpha_0 \\ \vdots \\ \alpha_N \end{pmatrix}, \mathbf{b} = \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_M \end{pmatrix} \quad (2.18b)$$

Die Verwendung der Normalgleichungen, welche der zuvor beschriebenen Herangehensweise entspricht, stellt dann eine mögliche Lösungsmethode dar. Das aus den partiellen Ableitungen bestehende Gleichungssystem entspricht dann Gleichung (2.19a). Die Lösung des Gleichungssystems ist durch Gleichung (2.19b) gegeben.

$$\mathbf{A}^T \mathbf{A} \alpha = \mathbf{A}^T \mathbf{b} \quad (2.19a)$$

$$\alpha = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{b} \quad (2.19b)$$

Eine weitere Lösungsmöglichkeit besteht in der Verwendung der QR-Dekomposition. Dabei wird die Matrix \mathbf{A} in ein Produkt der Matrizen \mathbf{Q} und \mathbf{R} aufgeteilt, sodass die Matrix \mathbf{R} eine obere Dreiecksmatrix darstellt. Das in Gleichung (2.18a) gegebene Minimierungsproblem lässt sich durch diese, in Gleichung (2.20) skizzierte, Umstellung mit der in Gleichung (2.21)

dargestellten Lösung notieren, wobei α_N direkt aus Zeile N folgt und zur Ermittlung von α_{N-1} aus Zeile $N - 1$ verwendet wird.

$$\mathbf{A} = \mathbf{QR} = \mathbf{Q} \begin{pmatrix} \mathbf{R}_1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.20)$$

$$\min_{\alpha} \|\mathbf{r}\| = \min_{\alpha} \|\mathbf{QR}\alpha - \mathbf{b}\| \quad (2.21a)$$

$$\mathbf{R}\alpha = \mathbf{Q}^T \mathbf{b} \quad (2.21b)$$

Eine Möglichkeit zum Herbeiführen einer derartigen Zerlegung besteht in der Verwendung von Givensrotationen. Diese können genutzt werden, um die Ausgangsmatrix \mathbf{A} in die Dreiecksmatrix \mathbf{R} zu überführen. Mit Hilfe der verwendeten Rotationsmatrizen lässt sich anschließend ebenso die Matrix \mathbf{Q} ermitteln.

Der in dieser Arbeit genutzte Vorteil bei der Lösung mittels QR-Dekomposition besteht darin, dass diese im Fall des Hinzufügens oder Entfernens von Zeilen der Ausgangsmatrix \mathbf{A} eine Anpassung der Matrizen \mathbf{Q} und \mathbf{R} mittels Updating und Downdating ermöglicht, ohne die Notwendigkeit einer vollständigen Neuberechnung. Für eine detaillierte Beschreibung sei an dieser Stelle auf die entsprechende Fachliteratur [GVL96, Wat02] verwiesen. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass die Lösung mittels QR-Dekomposition eine geringere Anfälligkeit gegenüber Rundungsfehlern aufweist als die Lösung mittels Normalengleichung. Einen bekannten Spezialfall der Methode der kleinsten Quadrate stellt die lineare Regression dar.

2.2.7.2 Gewichtete Methode der kleinsten Quadrate

Die dargestellte Methode der kleinsten Quadrate bietet eine gute Lösung, wenn die Varianz der Residuen unabhängig von den vorliegenden Datenpunkten konstant ist. Es wird in diesem Fall von Homoskedastizität gesprochen. Im Falle einer Heteroskedastizität, bei der die Varianz der Residuen je nach Datenpunkt unterschiedlich ausfällt, kann der so entstehenden Störung mit der Verwendung der gewichteten Methode der kleinsten Quadrate, auch Weighted Least Squares (WLS) genannt, entgegengetreten werden. Zum Ausgleich der Heteroskedastizität wird den Termen der Ausgangsgleichung (2.22a) eine Gewichtsmatrix \mathbf{W} vorangestellt, welche mittels Gewichten auf der Hauptdiagonalen eine unterschiedliche Gewichtung der Datenpunkte in Gleichung (2.22b) bewirkt.

$$\mathbf{A}\alpha = \mathbf{b} \quad (2.22a)$$

$$\mathbf{W}\mathbf{A}\alpha = \mathbf{W}\mathbf{b} \quad (2.22b)$$

Mit Ordinary Least Squares (OLS) und General Least Squares (GLS) existieren weitere Verallgemeinerungen der Methode der kleinsten Quadrate.

2.2.8 Bestehende Verfahren

An dieser Stelle sollen einige existente Verfahren der Positionsschätzung kurz vorgestellt werden. Die Auswahl dieser Verfahren ist durch die zuvor präsentierte Klassifizierung bestimmt.

2.2.8.1 Distanzfreie approximative Verfahren

Ein einfaches und effektives Verfahren der Positionsschätzung stellt das CL-Verfahren dar [BHE00]. Bei diesem Verfahren empfängt ein Blindknoten die Positionsdaten der in Kommunikationsreichweite befindlichen Referenzknoten und ermittelt seine eigene Positionsschätzung als Mittelwert der empfangenen Positionen. Das Verfahren zeichnet sich durch den geringen Informationsbedarf und die einfache Berechnung aus. Einen weiteren distanzfreien Ansatz stellt das Convex Position Estimation (CPE)-Verfahren dar [DpEG01]. Dieses Verfahren kann als ein erweitertes CL betrachtet werden, welches neben der Kommunikationsreichweite weitere Faktoren wie die Einfallswinkel betrachtet.

2.2.8.2 Distanzbasierte approximative Verfahren

Ein Verfahren, welches von dessen Autoren zwar als distanzfrei bezeichnet wird, jedoch aufgrund der Verwendung von Distanzinformationen in die Gruppe der distanzbasierten Verfahren einzuordnen ist, ist das sogenannte Approximate Point-In-Triangulation (APIT)-Verfahren [HHB⁺03]. Bei diesem Verfahren bildet ein Blindknoten aus den in Kommunikationsreichweite befindlichen Referenzknoten Dreiecke, indem er alle möglichen Kombinationen aus jeweils drei dieser Referenzknoten verwendet. Mit Hilfe einer Annäherung des Point-In-Triangulation (PIT)-Tests isoliert er anschließend jene Dreiecke, von denen er umschlossen ist und ermittelt seine Position im Zentrum der Schnittfläche dieser Dreiecke. Der verwendete APIT-Test besteht darin, zu prüfen, ob es einen benachbarten

Sensorknoten gibt, welcher zu allen Referenzknoten des gewählten Dreiecks eine höhere bzw. niedrigere Distanz aufweist als der betrachtete Blindknoten. Ist dies der Fall, so befindet sich der Blindknoten außerhalb des gebildeten Dreiecks. Ein weiteres distanzbasiertes Verfahren stellt der Weighted Centroid Localization (WCL)-Ansatz dar [BGGT07]. Bei dieser Erweiterung des CL-Verfahrens werden die Positionen der vom Blindknoten empfangenen Referenzknoten bei der Mittelwertbildung derart gewichtet, dass deren Einfluss umso stärker ist, je geringer ihre Distanz zum Blindknoten ist. Als ein Maß für die Gewichtung bietet sich daher die Signalempfangsstärke an. Ein weiteres, auf Distanzen basierendes Verfahren, ist durch MDS-MAP gegeben [SRZF03]. Das Verfahren verwendet die Distanzen zwischen allen Sensorknoten im Netz, um mithilfe des klassischen Multi Dimensional Scaling (MDS) in einer zentralen Berechnung eine Anordnung der Knoten zu finden, welche mit den gegebenen Distanzen am besten korreliert. Anschließend ist es möglich, die so ermittelten relativen Positionen der Knoten mithilfe weniger bekannter Punkte innerhalb des Netzwerks in absolute Positionen zu überführen.

2.2.8.3 Exakte Verfahren

Existierende Verfahren, welche in die Gruppe der exakten Verfahren einzuordnen sind, basieren auf der in Kapitel 2.2.6 beschriebenen Multilateration. Das Prinzip ist vor allem durch dessen Verwendung in GPS bekannt. Die Anwendung dieses Prinzips in drahtlosen Sensornetzwerken ist unter anderem durch eine häufig zitierte Arbeit von Savvides et al. belegt [SHS01]. Als Lösungsmethode kommt in diesem Fall die Methode der kleinsten Quadrate (engl. Least Squares) zum Einsatz, weshalb dieser Ansatz an dieser Stelle als LS-Ansatz bezeichnet werden soll. Eine Weiterentwicklung dieser Methode stellt das Distributed Least Squares (DLS)-Verfahren dar [RBTB06]. Bei diesem Ansatz findet die mathematisch aufwendige Berechnung nicht an einer Stelle statt, sondern wird in eine Vor- und eine Nachberechnung unterteilt, wobei die aufwendigere Vorberechnung zentral auf der Senke stattfindet, während die weniger aufwendige Nachberechnung individuell auf den Blindknoten erfolgt.

2.3 Clustering in drahtlosen Sensornetzwerken

2.3.1 Motivation

Eine der grundlegenden Eigenschaften drahtloser Sensornetzwerke ist eine hohe Dichte an zufällig ausgebrachten Sensorknoten und damit verbunden ein hohes Maß an Redundanz.

Diese Redundanz dient in der Regel dazu, die Zuverlässigkeit des Netzwerks trotz einer gegebenen Fehleranfälligkeit der einzelnen Knoten zu erreichen. Um das Verhalten der Sensorknoten diesbezüglich zu koordinieren, bietet sich eine Unterteilung des gesamten Netzes in kleinere Einheiten, sogenannte Cluster, an. Innerhalb dieser Cluster lässt sich zum Beispiel einfacher bestimmen, welche Sensorknoten für die Erhaltung der angestrebten Funktionalität nicht relevant sind und im Wechsel mit anderen Sensorknoten zeitweise deaktiviert werden können. Die im Zuge dieser Arbeit entwickelten Algorithmen zur Clusterbildung sind vornehmlich durch diese Redundanzerkennung und der darauf aufbauenden Möglichkeiten zum Energiesparen motiviert. Unabhängig davon bieten sie sich darüber hinaus aber auch zur Verwendung in den in Abschnitt 2.3.2 dargestellten Gebieten an.

2.3.2 Querbeziehungen

Wie bereits in Kapitel 2.1.4.9 gezeigt, stellt die Unterteilung drahtloser Sensornetzwerke in sogenannte Cluster eines der grundlegenden Prinzipien drahtloser Sensornetzwerke dar. Wie in Abbildung 2.27 dargestellt, wird das Mittel des Clusterings häufig in Verfahren des Medienzugriffs, des Routings und der Aggregation verwendet. Verfahren aus diesen Gruppen stellen Konsumenten der durch das Clustering bereitgestellten Funktionalität bereit. Im Fokus der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Verfahren zur Clusterbildung steht die sogenannte Activity Control, also die gezielte Deaktivierung von Sensorknoten mit dem Ziel der Energieersparnis und der Verlängerung der Lebenszeit des Netzwerks. Auch die Lokalisierung stellt einen möglichen Konsumenten des Clusterings dar.

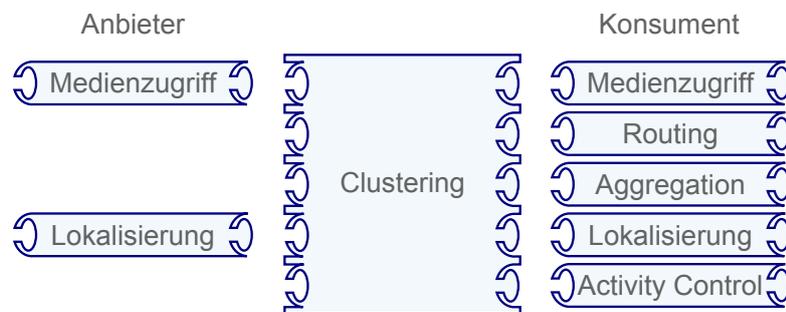


Abbildung 2.27: Wechselwirkungen Cluster bildender Verfahren mit weiteren Funktionalitäten drahtloser Sensornetzwerke.

Auf der anderen Seite tritt das Clustering ebenso als Konsument anderer Funktionalitäten auf, welche an dieser Stelle als Anbieter bezeichnet werden. Zu den häufig auftretenden Anbietern, auf deren Funktionalität seitens des Clusterings zurückgegriffen wird, zählen der Medienzugriff und die Lokalisierung.

2.3.3 Begriffe

Im Kontext des Clustering ergeben sich eine Reihe weiterer Begriffe, welche sich sowohl aus der Gruppierung der Knoten, aber auch aus der Unterteilung von Sensorknoten gemäß ihnen zugeteilter Aufgaben ergeben. Darüber hinaus ergeben sich weitere Metriken, welche häufig zur Bewertung Cluster bildender Verfahren herangezogen werden. Die wichtigsten dieser Begriffe sollen nachfolgend kurz dargestellt werden.

Cluster: Ein Cluster bezeichnet den Zusammenschluss einzelner Sensorknoten. Der Begriff wird häufig auch mit der räumlichen Ausdehnung dieser Gruppierung verbunden.

Cluster Head: Der Cluster Head stellt einen herausragenden Sensorknoten dar, welcher der Koordinierung des Clusters dient. Je Cluster existiert genau ein Cluster Head.

Cluster Member: Die übrigen Sensorknoten eines Clusters, welche nicht Cluster Head sind, werden als Cluster Member bezeichnet.

Häufig wird davon ausgegangen, dass der Cluster Head gleichzeitig Aufgaben des Routings und der Aggregation übernimmt. Es ist jedoch auch eine weitere Aufteilung der Rollen innerhalb eines Clusters möglich, wonach einem Sensorknoten auch mehrere Rollen zugeteilt werden können.

Cluster Head: Bei feinerer Rollenunterteilung dient der Cluster Head der Koordination des Clusters und der Rollenzuweisung.

Erfasser: Sensorknoten, die der Erfassung von Messwerten dienen, können als Erfasser bezeichnet werden.

Aggregator: Der Aggregator führt die Messwerte der Erfasser zusammen.

Router: Dies bezeichnet einen Sensorknoten, welcher für das Routing eingehender und ausgehender Datenpakete zuständig ist.

Gateway: Als Gateways können Sensorknoten bezeichnet werden, welche einen Übergangspunkt zwischen zwei Clustern darstellen.

Eine zur Bewertung häufig verwendete Metrik ist die Netzlebenszeit. Diese ist jedoch nicht eindeutig definiert und kann, wie in [CZ05] dargestellt, verschiedentlich unterteilt werden. Im Wesentlichen können die nachfolgend aufgeführten Interpretationen der Netzlebenszeit benannt werden.

First Node Dies: Zeit von der Ausbringung der Sensorknoten bis zum Versagen des ersten Sensorknotens.

Last Node Dies: Zeit von der Ausbringung der Sensorknoten bis zum Versagen des letzten Sensorknotens.

First Coverage Hole: Zeit von der Ausbringung der Sensorknoten bis zum Auftreten einer Lücke in der Abdeckung der Netzwerkfläche. Hier ist zwischen sensorischer und kommunikativer Abdeckung zu unterscheiden.

Last Contact: Zeit von der Ausbringung der Sensorknoten bis zu dem Zeitpunkt an dem die Kommunikation zwischen Senke und eventuell noch aktiven Sensorknoten unwiderruflich abreißt.

2.3.4 Klassifizierung

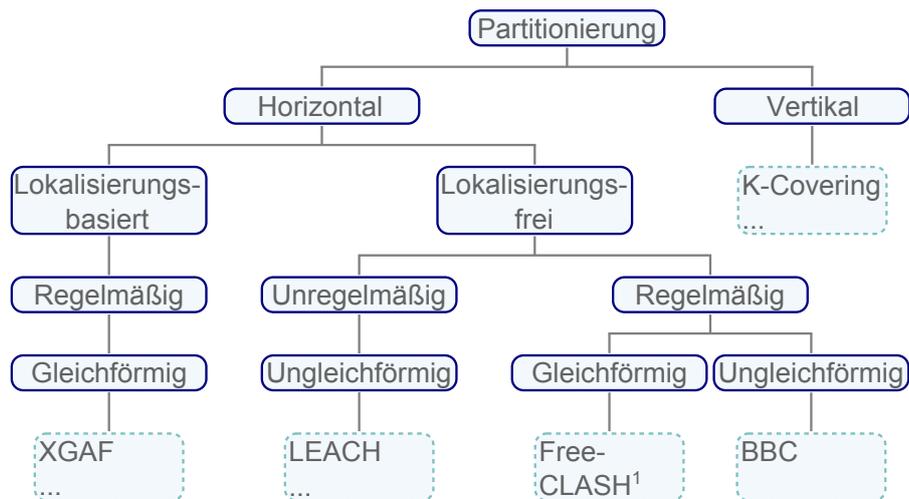
Partitionierungsverfahren in drahtlosen Sensornetzwerken lassen sich anhand einiger Merkmale, wie in Abbildung 2.28 dargestellt, klassifizieren. So kann zunächst zwischen einer horizontalen Aufteilung der Knoten, dem sogenannten Clustering, und einer vertikalen Aufteilung, dem *Covering* unterschieden werden. Innerhalb des Clusterings kann ferner zwischen einer Partitionierung mit lokalisierten Knoten und einer Partitionierung mit nicht lokalisierten Knoten unterschieden werden. Erfolgt die Partitionierung mit lokalisierten Knoten, impliziert dies in der Regel eine regelmäßige Anordnung gleichförmiger Cluster. Es ist jedoch auch eine regelmäßige Anordnung aus zwei oder mehr verschiedenförmigen Clustern denkbar. Erfolgt die Clusterbildung ohne eine vorhergehende Lokalisierung der Sensorknoten, so bedeutet dies meist eine unregelmäßige Anordnung ungleichförmiger Cluster. Es gibt jedoch auch Verfahren, welche ohne Lokalisierung eine regelmäßige Anordnung sowohl aus gleichförmigen als auch aus ungleichförmigen Clustern erreichen.

2.3.5 Bestehende Verfahren

An dieser Stelle soll anhand kurzer Beispiele auf die Grundgedanken der in Abbildung 2.28 dargestellten Möglichkeiten der Netzwerkpartitionierung eingegangen werden. Einen Überblick über weitere Verfahren im Bereich des Clusterings bietet die weiterführende Literatur [YKR06, AY07].

2.3.5.1 Covering

Bei den als *K-Covering* [AGP04] bezeichneten Verfahren werden die im Netzwerk befindlichen Sensorknoten in k Gruppen, sogenannte Cover, unterteilt, wobei jede dieser Gruppe möglichst gleichmäßig über das gesamte Netzwerk verteilt ist und somit eine vollständige



¹ strebt eine regelmäßige Struktur aus Sechsecken an.

Abbildung 2.28: Klassifizierung von Verfahren zur Clusterbildung.

Abdeckung des Netzwerks erzielt. Ein Ansatz für die Zuordnung von Sensorknoten zu einem Cover besteht in der zufälligen Gruppierung.

2.3.5.2 Clustering

Lokalisierungsbasiertes Clustering Ein bekannter Vertreter des auf Lokalisierung basierenden Clusterings ist Extended Geographical Adaptive Fidelity (XGAF) [SKRT07]. Bei dieser Art von Clustering wird das Netzwerk anhand eines virtuellen Gitters in quadratische Cluster aufgeteilt. Die Zuordnung der Sensorknoten zu einem Cluster erfolgt mithilfe der Position der Sensorknoten. Die Sensorknoten verfügen zu diesem Zweck über eine ausreichende Repräsentation des virtuellen Gitters.

Lokalisierungsfreies Clustering Bei der Verwendung des lokalisierungsfreien Clusterings erfolgt die Clusterbildung über die Bestimmung von Clusterheads. Bei dem als LEACH bekannten Verfahren [HCB00] wird die Bestimmung der Clusterheads über eine zufallsbasierte Funktion realisiert. Anschließend gruppieren sich die übrigen Sensorknoten zum jeweils nächsten Clusterhead. Bei Localization-Free Clustering with Approximation to Symmetric Hexagons (Free-CLASH) [SBYT09] hingegen erfolgt die Auswahl der Clusterheads derart, ausgehend von einem Startknoten, dass zwischen je zwei Clusterheads ein angestrebter Abstand erreicht wird und die Clusterheads besonders gleichmäßig im Netz verteilt sind. Anschließend werden auch hier die Clustermember den jeweils nächsten Clusterheads

zugeordnet. Als ein weiteres lokalisierungsfreies Verfahren stellt Algorithm for Cluster Establishment (ACE) [CP04] in gewisser Weise eine Mischform aus den zuvor genannten Verfahren dar. Hier erfolgt zunächst eine zufällige Auswahl der Clusterheads, welche jedoch einigen Randbedingungen folgt. Anschließend wird die Rolle der Clusterheads, wenn nötig, an benachbarte Knoten weitergegeben, um eine gleichmäßige Verteilung mit geringer Überlappung zu erreichen, bevor eine verbindliche Zuordnung der Clustermember erfolgt.

2.4 Fehlerdetektion in drahtlosen Sensornetzwerken

2.4.1 Motivation

Sensorknoten als Einzelkomponenten sowie drahtlose Sensornetzwerke als Gesamtsysteme werden oft als fehleranfällig bezeichnet. Die Gründe dafür liegen unter anderem in der Verwendung kostengünstiger Komponenten, der Einwirkung von Witterung und physischer Gewalt sowohl während der Ausbringung der Knoten als auch während des Betriebs, sowie der unzulässigen Energieversorgung mittels Batterie. Zu diesen Eigenheiten drahtloser Sensornetzwerke ist darüber hinaus die naturgemäß unzuverlässige Kommunikation mittels Funk hinzuzurechnen. Um trotz auftretender Fehler eine bestimmungsgemäße Funktionalität des Netzwerks zu gewährleisten ist es sinnvoll, auftretende Fehler zu erkennen, um diesen möglichst frühzeitig entgegen zu wirken.

2.4.2 Querbeziehungen

Die Eigenschaft der Fehleranfälligkeit zieht sich nahezu durch alle Schichten und Funktionseinheiten drahtloser Sensornetzwerke. Daher können fast alle Funktionalitäten auf die eine oder andere Weise von einer Fehlererkennung profitieren. Im besonderen sei an dieser Stelle jedoch auf die Kommunikation hingewiesen, da eine Vielzahl der existierenden Algorithmen der Fehlererkennung innerhalb des Routings und des Medienzugriffs dienen. Die Motivation dieser Arbeit zur Untersuchung fehlerdetektierender Algorithmen bestand in der Verwendung mit Blick auf die Unterstützung einer Aktivitätskontrolle. Weiterhin kann die Fehlererkennung auch bei der Bewertung geschätzter Positionen hilfreich sein. Beide Anwendungsfälle sollen daher in Abbildung 2.29 auf der Seite der Konsumenten genannt sein. Ebenso kann eine fehlerhafte Clusterzuordnung mit geeigneten Verfahren erkannt und berücksichtigt werden.

Auf der Seite der Anbieter findet sich zunächst der Medienzugriff, da auch für die Fehlererkennung ein Informationsaustausch zwischen Sensorknoten erforderlich ist. Um eine lokale

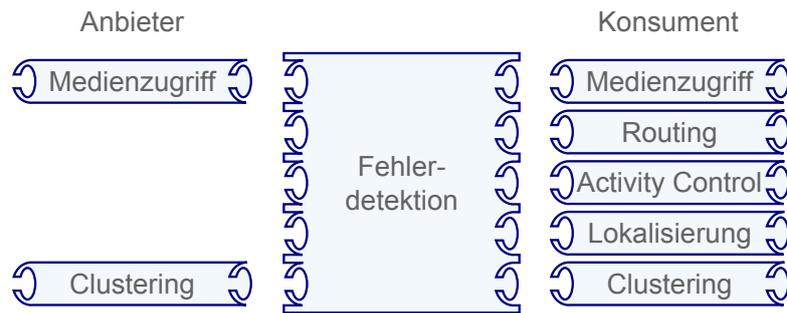


Abbildung 2.29: Wechselwirkungen von Verfahren der Fehlerdetektion mit weiteren Funktionalitäten drahtloser Sensornetze.

Beschränkung der Fehlerdetektionsmechanismen zu erreichen, kann darüber hinaus auf das Prinzip des Clustering zurückgegriffen werden.

2.4.3 Klassifizierung

Die Klassifizierung fehlererkennender Verfahren in drahtlosen Sensornetzen ist anhand unterschiedlicher Kriterien möglich. Die in Abbildung 2.30 dargestellte Unterteilung präsentiert eine mögliche Klassifizierung.

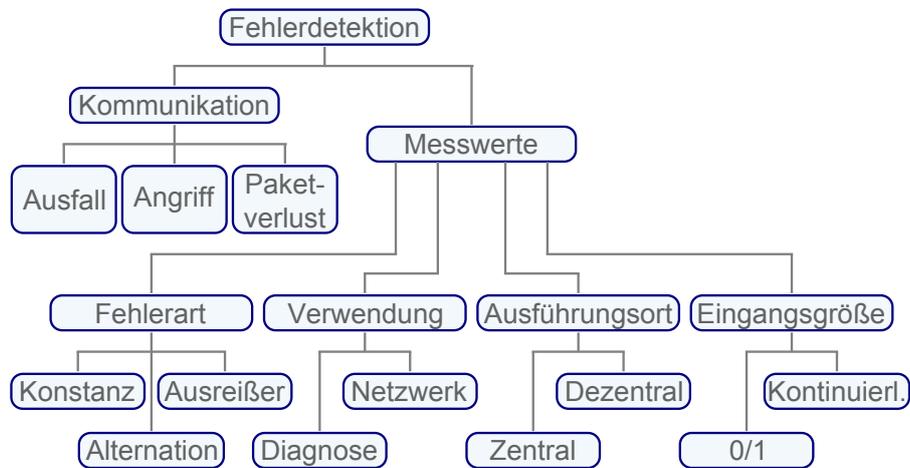


Abbildung 2.30: Klassifizierung von Verfahren zur Fehlerdetektion.

Hierbei wird zunächst nach dem Fehlerbegriff unterschieden. So existieren einerseits Verfahren zur Detektion von Fehlern in der Netzkommunikation und andererseits Verfahren zur Erkennung von Fehlern innerhalb ermittelter (Mess-)werte. Bei der Gruppe der kommunikationsseitigen Fehler kann weiterhin in den vollständigen Ausfall von Routingknoten, den Verlust einzelner Datenpakete sowie Fehlern durch gezielte Angriffe unterschieden

werden. Auf weitere Unterscheidungskriterien dieser Verfahren, wie zum Beispiel den Ort der Ausführung, soll an dieser Stelle nicht eingegangen werden, da diese Art der Fehlererkennung nicht der in dieser Arbeit thematisierten Fehlerdetektion entspricht.

Die in der Arbeit fokussierten Verfahren dienen hingegen der Erkennung von Fehlern innerhalb erhobener Werte. Diese Verfahren lassen sich nach ihrem Zweck, dem Ort ihrer Ausführung, den akzeptierten Eingangsgrößen sowie der Art der detektierten Fehler unterscheiden. Jedes Verfahren zur Fehlerdetektion innerhalb von Messwerten lässt sich nach jedem dieser Kriterien kategorisieren, weshalb auf eine Zuordnung von Beispielf Verfahren innerhalb der Grafik verzichtet wird. Eine weitere mögliche Unterteilung, welche in der Grafik nicht dargestellt ist, kann danach erfolgen, ob die Fehlerträchtigkeit eines Knotens vom Knoten selbst oder aber von anderen umliegenden Knoten festgestellt werden soll.

2.4.4 Bestehende Verfahren

An dieser Stelle sollen in Anlehnung an die dargestellte Klassifikation einige Vertreter der jeweiligen Kategorie kurz genannt werden.

2.4.4.1 Detektion von Netzwerkfehlern

Eine Reihe bestehender Verfahren widmen sich der Detektion von Fehlern innerhalb der Netzwerkkommunikation. Störungen der Kommunikation durch den Ausfall von Routing-Knoten werden beispielsweise in [DZN⁺06] thematisiert. Aber auch wenn das aufgebaute Kommunikationsnetz intakt ist, kann es zum Verlust einzelner Datenpakete kommen. Ein Verfahren, welches der Detektion von Paketverlust dient, ist das nach dem Götterboten der asiatischen Mythologie benannte GARUDA-Verfahren [PVSA04]. Neben diesen natürlich auftretenden Störungen kann die Kommunikation durch diverse Angriffstechniken gestört werden. Zur Erkennung bestimmter Angriffe dient beispielsweise das in [JPFWL04] beschriebene Detektionsverfahren. Weitere Verfahren, welche sich mit der Detektion von Fehlern innerhalb der Kommunikation beschäftigen, sind in einer Überblicksarbeit in [PLHQ07] dargestellt.

2.4.4.2 Detektion von Messwertfehlern

Bei der Detektion von Fehlern innerhalb erhobener Messwerte unterscheidet die Klassifikation zunächst nach der Art des auftretenden Fehlers. Eine einfache Fehlerart, welche

beispielsweise durch eine defekte Anbindung des Sensors an den Mikrocontroller hervorgerufen werden kann, ist das Auftreten von konstanten Werten am oberen oder unteren Wertebereich. Die Detektion eines solchen Fehlers ist denkbar einfach, sodass in diesem Bereich keine besonderen Verfahren genannt werden können. Gleiches gilt für die Ermittlung von Messwerten, welche aufgrund gegebener Randbedingungen unmöglich erscheinen. Anspruchsvoller ist hingegen das Erkennen einer Alternation der auftretenden Messwerte. Eine Möglichkeit zur Erkennung dieser Fehler wird beispielsweise durch die BiSNET-Architektur bereitgestellt [BCS06].

Eine weitere Fehlerart stellen sogenannte Ausreißer dar, wobei zwischen globalen und lokalen, auf eine Region beschränkten, Ausreißern unterschieden werden kann. Die Erkennung globaler Ausreißer bedingt in der Regel eine zentrale Berechnung. Das unter dem Namen SASHA veröffentlichte Verfahren ist im wesentlichen dieser Gruppe zuzuordnen [BBJ05]. Dieses Verfahren verwendet zudem ressourcenintensive Methoden wie Neuronale Netze. Wird die Fehlerdetektion, wie in [JSS01] dargestellt, lediglich zur Netzwerkdiagnose verwendet, so ist eine zentrale Berechnung auch durch den Ort, an dem diese Informationen benötigt werden, motiviert.

Die in dieser Arbeit untersuchten Verfahren sollen ihre Information hingegen dem Netzwerk selbst zur Verfügung stellen und daher dezentral agieren. Ein solches Verfahren mit dezentraler Informationsverarbeitung wird beispielsweise in [KI03] vorgestellt. Das Verfahren repräsentiert einen Vertreter jener Verfahren, welche lediglich eine binäre Eingangsgröße verarbeiten. Dies stellt eine besondere Charakteristik der Ereignisdetektion dar, bei der lediglich unterschieden wird, ob ein Ereignis detektiert wird oder nicht. Ein Verfahren, welches wie das in dieser Arbeit entwickelte Verfahren auch mit kontinuierlichen Eingangsgrößen arbeitet, wird in [DCXC05] vorgestellt.

2.5 Evaluation drahtloser Sensornetzwerke

Um Lösungen und Algorithmen im Bereich drahtloser Sensornetzwerke bewerten zu können, bieten sich grundsätzlich zwei Möglichkeiten an. Einerseits die Verwendung eines realen Deployments und andererseits die simulative Nachbildung eines Sensornetzwerks. Beide Möglichkeiten sind in Tabelle 2.2 vergleichend dargestellt.

Zunächst einmal besteht das Kriterium der Realitätsnähe, welches durch eine reale Implementierung eindeutig gegeben ist. Nachteilig bei einer solchen Implementierung ist jedoch, dass aufgrund der Vielzahl an Parametern und Umwelteinflüssen eine Reproduzierbarkeit nur selten gegeben ist. Dadurch leidet vor allem die Vergleichbarkeit. Es ist

	Deployment	Simulation
Realitätsnähe	sehr hoch	hoch ¹
Funk	real	realitätsnah ¹
Berechenbarkeit	real	realitätsfern
Rundung und Auflösung	real	realitätsfern ²
Energieverbrauch	real	realitätsfern ³
Zufällige Verteilung	beschränkt möglich	möglich
Kosten / Realisierbarkeit	sehr hoch / gering	gering / hoch
Knotenzahl	gering	hoch
Platzbedarf	sehr hoch	sehr gering
Reproduzierbarkeit	eingeschränkt	mittel
Vergleichbarkeit	gering	hoch ⁴
Variabilität	eingeschränkt	hoch
Implementierung		
Unterer Schichten	notwendig	nicht notwendig
Abstaktion	nicht möglich	möglich
Zeitraffer	nicht möglich	möglich
Auswertung / Debugging	eingeschränkt ⁵	Vollzugriff

¹ Abhängig von der gewählten Simulationsumgebung sowie den verwendeten Parametern

² In dieser Arbeit teilweise berücksichtigt ³ In der Regel wird lediglich die Gesamtkapazität nachgebildet, nicht aber das zeitliche Verhalten oder Selbstentladungseffekte

⁴ Unter Verwendung gleicher Parameter ⁵ Zusätzliche Routinen zur Protokollierung gehen zu Lasten des Gesamtverhaltens sowie der Kommunikation

Tabelle 2.2: Möglichkeiten zur Evaluation von Sensornetzwerkalgorithmen. Gegenüberstellung von realem Aufbau und Simulation.

davon auszugehen, dass selbst bei Verwendung gleicher Geräte und des gleichen Aufbaus unterschiedliche Ergebnisse an unterschiedlichen Messorten erzielt werden. Dennoch bietet die reale Verteilung eindeutige Vorteile in der Bewertung von Funk, Berechenbarkeit und Energieverbrauch. Lediglich bei der Anforderung der zufälligen Verteilung schlägt die Simulation den realen Aufbau. Ein Nachteil der realen Anwendung ist jedoch durch die anfallenden Kosten und die Realisierbarkeit gegeben. So fehlen in der Regel der Platz und die Geräte, um Szenarien mit mehreren Hundert Sensorknoten zu realisieren. Weitere Vorteile bietet die Simulation bei der Implementierung. So kann in der Simulation anders als im realen Netzwerk häufig auf die Implementierung unterer Schichten verzichtet werden oder von bekannten Größen abstrahiert werden. Ebenso lassen sich viele verschiedene Szenarien in kurzer Zeit simulieren. Ein entscheidender Vorteil ist zudem die Möglichkeit der Auswertung. So lassen sich in der Simulation alle beliebigen Werte je Knoten global erfassen. In einem realen Aufbau hingegen belastet die Aufzeichnung, Verarbeitung und Kommunikation von Auswertungsdaten das Verhalten der Sensorknoten, was zu einer Verfälschung der Messdaten führen kann.

Aus Gründen der Verfügbarkeit wurde in dieser Arbeit ausschließlich die Simulation als Mittel zur Evaluation gewählt. Hier wurden je nach Anforderung zwei unterschiedliche Formen der Simulation verwendet, welche nachfolgend beschrieben sind.

2.5.1 Simulation drahtloser Sensornetzwerke

Die Simulation drahtloser Sensornetzwerke kann grob in zwei Ansätze unterteilt werden. Zum einen die statische Simulation, bei der das zeitliche Verhalten oder Zusammenspiel der simulierten Sensorknoten keine Rolle spielt, und zum anderen die dynamische, meist rundenbasierte Simulation, in der das Zeitverhalten berücksichtigt wird. Beide Ansätze wurden in dieser Arbeit verwendet.

2.5.1.1 Statische Simulation

Für die statische Simulation wurden in der vorliegenden Arbeit eigens entwickelte Testszenarien zur Ausführung in der numerischen Softwareumgebung Matlab verwendet. Hierbei werden aus einer globalen Sicht Sensorknoten gezielt oder zufällig in einem gegebenen Koordinatensystem verteilt. Anschließend werden nach einem vorgegebenen Schema alle Sensorknoten einmalig betrachtet und zum Beispiel deren Abstand zu anderen Sensorknoten, ggf. unter Einbeziehung eines Modells zur Messungenauigkeit, ermittelt. In der vorliegenden Arbeit wurde so ebenfalls anhand der global verfügbaren Position die Zuordnung zu einem Cluster vorgenommen. Im Fall der auf diese Weise untersuchten Positionsbestimmungsverfahren endet eine Simulation nach diesem ersten Durchlauf mit der Bestimmung der Positionen der Blindknoten. Im Fall der untersuchten Clusterverfahren kann nun die Anzahl der Sensorknoten je Cluster bestimmt werden. Um beispielsweise die Lebenszeit eines Sensornetzwerks zu bestimmen, wurde in weiteren Runden, welche die Lebenszeit eines einzelnen Sensorknotens simulierten, jeweils ein Knoten je Cluster deaktiviert. Charakteristisch für die statische Simulation ist trotz dieser zeitlichen Betrachtung die globale Sicht auf das Netzwerk und die hohe Abstraktion. So wurde an dieser Stelle nicht das Verhalten einzelner Knoten betrachtet. Eine notwendige Kommunikation zwischen den Knoten und daraus folgende Unterschiede in der Lebenszeit wurden abstrahiert als nahezu identisch für jeden Knoten angenommen.

2.5.1.2 Dynamische Simulation

Die dynamische Simulation verwendet eine lokale Sicht auf das Netzwerk, wobei das Verhalten jedes Sensorknotens einzeln nachgebildet wird. Um dies zu erreichen, wird eine globale Zeitbasis verwendet. Das Verhalten der Sensorknoten wird durch Ereignisse wie *Aufwachen*, *Senden* oder *Empfangen* modelliert, welche jeweils einen Startzeitpunkt und eine vorgegebene Dauer besitzen. Diese Events werden in einem globalen Scheduling-Plan eingetragen und der Reihe nach abgearbeitet. Die Simulation startet meist mit einem initialen *Aufwachen* der Knoten, wodurch je nach implementiertem Verhalten weitere Ereignisse ausgelöst werden. Durch die Simulation des Zeitverhaltens lassen sich vor allem Kollisionen in der Kommunikation nachbilden.

Speziell für die Simulation drahtloser Sensornetzwerke haben sich ein Reihe von Simulatoren etabliert [KSKT09]. Zu den bekanntesten Vertretern gehören der Netzwerksimulator NS-2 [DD04, XLY⁺07], J-Sim [SHK⁺06], Omnet++ [VH08], OPNET [Cha99] sowie der in Matlab implementierte Simulator Prowler [Sim03]. Für die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen wurde auf den Simulator Prowler sowie den darauf aufsetzenden Rmase-Simulator [ZFK09] zurückgegriffen. Zu diesem Zweck wurde die Simulationsumgebung modifiziert und erweitert.

Der Simulator Prowler dient als Basis der durchgeführten Simulationen. Als Softwareunterbau bietet er das Scheduling der Events, ein realitätsnahes Kanalmodell sowie eine grafische Bedienoberfläche mit einer grafischen Darstellung der simulierten Netzwerke. Funkübertragung, Signalstärke und Kollisionen werden durch Prowler simuliert. Ein CSMA MAC-Protokoll sowie wahlweise eine zufällige oder gezielte Verteilung von Sensorknoten wird, wie in Abbildung 2.31(a) dargestellt, ebenfalls von Prowler bereitgestellt. Darauf aufbauend bietet Prowler eine auf Events basierende Plugin-Schnittstelle zur freien Programmierung des auf einem Sensorknoten auszuführenden Codes. Events werden von Prowler an den simulierten Knoten übergeben, welcher durch vorgegebene Funktionsaufrufe neue Events erzeugen kann. Das durch Prowler bereitgestellte und in den Simulationen genutzte Kanalmodell folgt der Darstellung in Gleichung (2.23).

$$\begin{aligned}
 P_r(i, j, t) &= P_{r,ideal}(d_{ij})(1 + \alpha(i, j))(1 + \beta(t)) \\
 P_r(i, j, t) &= \frac{P_t(i)}{1 + d_{ij}^\gamma}(1 + \alpha(i, j))(1 + \beta(t))
 \end{aligned}
 \tag{2.23}$$

Die Empfangsstärke P_r einer zum Zeitpunkt t stattfindenden Übertragung von der Position \mathbf{i} zur Position \mathbf{j} wird idealisiert durch die Distanz d_{ij} zwischen den Positionen, die

Sendeleistung $P_t(i)$ und einem Exponenten γ angeben, welcher an dieser Stelle den Pfadverlustexponenten darstellen soll. Die ideale Empfangsstärke wird durch die normalverteilten Zufallsgrößen $\alpha = N(0, \sigma_\alpha)$ und $\beta = N(0, \sigma_\beta)$ einerseits örtlich bedingten Störungen und andererseits zeitlich bedingten Störungen unterzogen. Eine Datenübertragung wird als empfangbar gewertet, wenn die Empfangsstärke P_r am Ort des Empfängers den Grenzwert P_ϑ übersteigt. Die vom Simulator vorgegebenen Belegungen der genannten Parameter sowie die in späteren Simulationen verwandten Parameter sind in Tabelle 2.3 dargestellt. Da temporäre Störungen vornehmlich für die Untersuchung von Routing Verfahren von Belang sind, wurde in dieser Arbeit auf den zeitlichen Einfluss verzichtet. Mit den angegebenen Parametern wird durch das einheitslos beschriebene Kanalmodell eine ungefähre Kommunikationsreichweite von drei simuliert. Um diesen Wert in ein realitätsnahes Szenario zu versetzen, wurde er in den durchgeführten Simulationen mit einer Distanz von 10 m gleichgesetzt.

	Vorgegebene Werte	Verwendete Werte
P_t	1	1
P_ϑ	0,1	0,1
γ	2	2
σ_α	0,45	0,45
σ_β	0,02	0,0

Tabelle 2.3: Voreinstellungen und verwendete Parameter des durch Prowler bereitgestellten Signalausbreitungsmodells.

Der Rmase-Simulator ist als ein Programm-Plugin von Prowler konzipiert und erweitert diesen um diverse Protokollschichten. Hierzu gehören verschiedene Routing-Protokolle, Aggregations-Schichten sowie Warteschlangen und eine automatische Nachrichtenbestätigung. Diese und andere Schichten können in Rmase als Plugins hinzugefügt werden und lassen sich anschließend durch eine grafische Oberfläche auswählen und steuern. Ereignisse, welche vom Simulator generiert werden, durchlaufen die einzelnen Schichten in der zuvor festgelegten Reihenfolge und können von jeder Schicht zur nächsten weitergeleitet oder gestoppt werden. Analog dazu werden durch eine Schicht neu erzeugte Ereignisse zur nächst niederen Schicht und schlussendlich zum Simulator weitergeleitet. Ursprünglicher Zweck des Simulators war die Untersuchung verschiedener Routing-Protokolle. Der Simulator bietet daher nicht die Möglichkeit, die auf dem Sensorknoten auszuführende Applikation selbst zu modellieren. Stattdessen können über eine Reihe von Parametern Nachrichten zufällig oder nach einem bestimmten Muster erzeugt werden, welche jeweils von einem Sensorknoten an einen anderen Sensorknoten versandt werden. Die Verteilung

der Sensoren und die Definition des zu simulierenden Gebietes wird durch Rmase stark vereinfacht. Auch eine Bewegung der Sensorknoten während der Simulationszeit wird ermöglicht. Abbildung 2.31(b) stellt dieses Zusammenspiel von Prowler und Rmase grafisch dar.

Für die Simulation von einigen, in dieser Arbeit entwickelten Ansätzen, wurde der Rmase Simulator um eine frei wählbare Applikationsschicht erweitert und die vorgegebene Applikation als Plugin vom Kern des Simulators gelöst. Darüber hinaus wurden einige Änderungen und Erweiterungen sowie verschiedene Schichten implementiert. Hierzu gehört eine Änderung der Erfassung und Behandlung von Kollisionen. Durch einen Fehler im Simulator wurde bei einer auftretenden Simulation lediglich das zuerst existierende Paket als kollidiert markiert und nach Ende der Übertragungszeit an die nächst höheren Schichten gemeldet. Das zweite Paket, welches die Kollision verursacht hat, wurde vom Simulator vollständig verworfen. Durch die vorgenommenen Änderungen wird auch dieses Paket als Kollision an den Empfänger weitergeleitet und verbleibt für die Dauer der Übertragung im Netz, wo es wiederum weitere Kollisionen hervorrufen kann. Die Adressierung, welche nach der bisherigen Implementierung lediglich als Broadcast oder als Unicast möglich war, wurde um die Möglichkeit einer Multicast-Adressierung erweitert, wodurch eine Nachricht gezielt an unterschiedliche Empfänger adressiert werden kann. Ebenso wurden die Möglichkeiten der zufälligen Knotenanordnung weiter vereinfacht. Zur Auswertung des Kommunikationsaufwands wurden zusätzliche Logging-Schichten zur Protokollierung der versandten Nachrichten sowie ein statisches Routing mittels Spanning Tree implementiert. Da auftretende Kollisionen und daraus folgende erneute Übermittlungen von Nachrichten lediglich ein Charakteristikum der verwendeten Routing und MAC Schichten darstellen, wurde zusätzlich ein Layer verwendet, welcher kollidierte Nachrichten als gültig markiert, um so eine von Routing und MAC unabhängige Bewertung zu ermöglichen. Unabhängig von den dargestellten funktionalen Änderungen wurde die verwendete Plugin-Struktur dahingehend geändert, dass neu implementierte Schichten nicht wie bisher im Quellcode eingetragen werden müssen, sondern anhand der Verzeichnisstruktur automatisch erkannt werden. Abbildung 2.31(c) zeigt eine grafische Darstellung der angepassten Simulationsumgebung.

2.6 Zusammenfassung

In dem zurückliegenden Kapitel wurden die grundlegenden Begrifflichkeiten im Kontext drahtloser Sensornetzwerke vermittelt. Ebenso wurde auf die historische Entwicklung und mögliche Anwendungsgebiete eingegangen. Anschließend wurden die Unterschiede zu

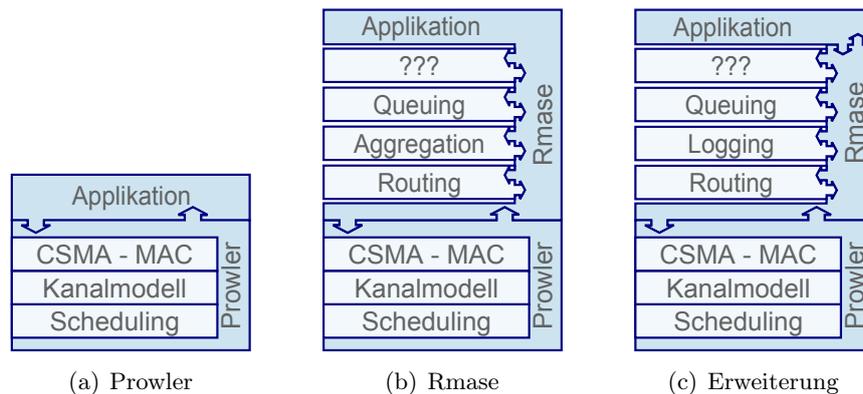


Abbildung 2.31: Architekturvergleich der verwendeten Simulationsumgebungen. Als Grundlage dient der Prowler Simulator (a), worauf der Rmase Simulator (b) aufsetzt, welcher in veränderter Form (c) in dieser Arbeit verwendet wurde.

anderen drahtlosen Netzwerken herausgestellt und die existierenden Herausforderungen in diesem Bereich betrachtet. Ein zentrales Thema, welches Einfluss auf nahezu alle Verfahren in diesem Bereich ausübt, stellt der schonende Umgang mit der begrenzt verfügbaren Ressource Energie dar.

Als die zentralen Themen dieser Arbeit wurden die Lokalisierung, das Clustering und die Fehlerdetektion gesondert betrachtet. Zu jedem dieser Themen wurden die Wechselwirkungen miteinander aber auch mit den übrigen Verfahren und Algorithmen in drahtlosen Sensornetzwerken aufgezeigt. Darüber hinaus wurden bestehende Verfahren kurz vorgestellt und im jeweiligen Kontext klassifiziert.

Abschließend wurde die Möglichkeit der Evaluation entwickelter Verfahren thematisiert. Dabei wurde auf verschiedenen Ausprägungen der Simulation eingegangen. Ebenso wurde aufgezeigt, dass die Simulation nicht nur geringeren Aufwand und geringe Kosten bewirkt, sondern aufgrund der existierenden Szenarien mit Tausenden von Sensorknoten oft die einzige Möglichkeit der Evaluation darstellt.

Kapitel 3

Lokalisierung in drahtlosen Sensornetzen

3.1 Motivation

Das Wissen um die Position einzelner Sensorknoten ist in mehrfacher Hinsicht von enormer Bedeutung innerhalb drahtloser Sensornetzwerke. So ist es zum Einen häufig so, dass die von einem Sensorknoten erhobenen Messwerte erst dann sinnvoll ausgewertet werden können, wenn der Ort der Messwerterhebung und somit die Position des Sensorknotens bekannt ist. Darüber hinaus stellt das Wissen über die Position einzelner Sensorknoten jedoch auch eine Grundvoraussetzung für unterschiedliche Verfahren wie das geografische Routing oder das positionsbasierte Clustering in drahtlosen Sensornetzwerken dar. Da die Verwendung von GPS in der Regel aufgrund der monetären und energetischen Kosten ausgeschlossen wird, besteht eine gängige Methode darin, wenige Knoten im Netzwerk mit geografischen Informationen zu versehen, welche durch das Mittel der Kommunikation an andere Knoten weitergegeben werden. Durch die Verwendung von Positionsschätzungsverfahren wird es den übrigen Sensorknoten ermöglicht, mit Hilfe dieser und weiterer Informationen ihre Position zu bestimmen.

3.2 Einordnung der untersuchten Verfahren

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden verschiedene Verfahren zur Lokalisierung in drahtlosen Sensornetzwerken untersucht. Bei den untersuchten Verfahren handelt es sich gemäß der Darstellung in Abbildung 3.1 um Verfahren der approximativen distanz-basierten Lokalisierung einerseits, sowie um exakte Verfahren andererseits. Alle untersuchten Verfahren stehen im Kontext der Eigenlokalisierung. Während die approximativen Verfahren dem Ansatz einer lokalen Ausführung folgen, stellen die untersuchten exakten Verfahren einen

hybriden Ansatz dar. Alle dargestellten Verfahren sind als egoistische Verfahren konzipiert, lassen sich jedoch durch einfache Änderungen in kooperative Verfahren überführen.

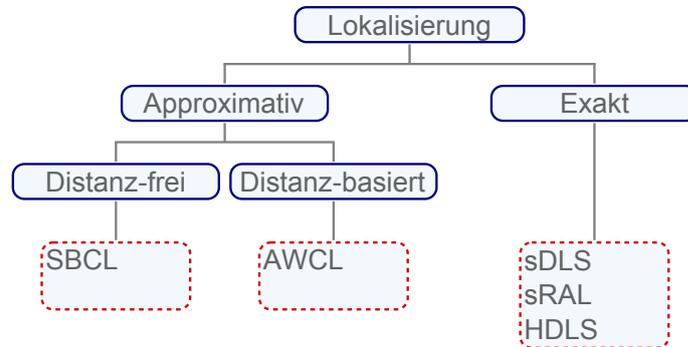


Abbildung 3.1: Einordnung der untersuchten Verfahren der Lokalisierung gemäß der gegebenen Klassifizierung.

3.3 Approximative Lokalisierung

3.3.1 Ausgangsverfahren

Die Entwicklung der nachfolgend aufgeführten approximativen Lokalisierungsverfahren basiert auf dem als CL [BHE00] bekannten Verfahren bzw. auf der als WCL [BGGT07] bezeichneten Weiterentwicklung dieses Ansatzes.

Ebenso wie beim CL wird bei den Untersuchungen zum WCL, wie in [BGGT07] beschrieben, von einer Anordnung der Referenzknoten in einer quadratischen Gitterstruktur ausgegangen. Zur Positionsbestimmung verwendet ein Blindknoten die Positionsdaten aller in Kommunikationsreichweite befindlichen Referenzknoten. Die beim CL verwendete gleichgewichtete Mittelwertbildung führt zu dem Umstand, dass alle Blindknoten, welche die gleichen Referenzknoten empfangen, sich unabhängig von ihrer Position auf ein und denselben Punkt lokalisieren. Ziel des WCL ist es, diesem Verhalten entgegenzuwirken. Um dies zu erreichen, wird beim WCL der Ansatz verfolgt, Referenzknoten umso stärker zu gewichten, je geringer deren Abstand zum Blindknoten ist. Die vom CL bekannte Positionsberechnung wird daher, wie in Gleichung (3.1) dargestellt, um einen Gewichtungsfaktor w_{ij} erweitert, welcher die Gewichtung des Referenzknoten b_j für die Positionsbestimmung des Blindknotens u_i angibt. Die Menge $I(B_i)$ stellt dabei die Indizes der in der Menge B_i zusammengefassten Referenzknoten dar, welche durch den Blindknoten u_i empfangen werden. Mit Hilfe des positiven Exponenten g lässt sich der Einfluss der Gewichtung regulieren.

$$\begin{pmatrix} u_{i(x)} \\ u_{i(y)} \end{pmatrix} = \left(\sum_{j \in I(B_i)} w_{ij}^g \right)^{-1} \sum_{j \in I(B_i)} w_{ij}^g \begin{pmatrix} b_{j(x)} \\ b_{j(y)} \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

Die in [BGGT07] erfolgten Untersuchungen nutzen, wie in Gleichung (3.2) angegeben, die Distanz d_{ij} zwischen Blindknoten u_i und Referenzknoten b_j zur Realisierung der Gewichtung. Zur Ermittlung der Distanz können die in Kapitel 2.2.5 dargestellten Verfahren herangezogen werden. An dieser Stelle soll jedoch bereits darauf hingewiesen werden, dass die von der Distanz abhängigen Größen des Received Signal Strength Indicator (RSSI) und des Link Quality Indicator (LQI) auch direkt zur Gewichtung gemäß Gleichung (3.3a) verwendet werden können.

$$w_{ij} = d_{ij}^{-1} \quad (3.2)$$

$$w_{ij} = \text{RSSI}_{ij} \quad (3.3a)$$

$$w_{ij} = \text{LQI}_{ij} \quad (3.3b)$$

Eine derart angewandte Gewichtung führt dazu, dass die Positionsschätzung von Blindknoten, ausgehend von der durch CL geschätzten Position, in Richtung nahe liegender Referenzknoten und somit in die Richtung der tatsächlichen Position verlagert wird. Abbildung 3.2 stellt den Unterschied beider Verfahren dar.



Abbildung 3.2: Positionsbestimmung mittels CL und WCL im Vergleich: (a) CL, (b) WCL.

3.3.2 Das AWCL Verfahren

3.3.2.1 Motivation

Das vorgestellte WCL-Verfahren wurde in [BGGT07] sowie weiteren Arbeiten umfassend untersucht und mit dem zugrunde liegenden CL-Verfahren verglichen. Bei beiden Verfahren ist die erreichbare Lokalisierungsgenauigkeit abhängig von der verwendeten Kommunikationsreichweite der Referenzknoten R_K und der verwendeten Gitterweite L_B . Wird der Lokalisierungsfehler auf die Gitterweite normalisiert, so zeigt sich eine Abhängigkeit der Lokalisierungsgenauigkeit vom Verhältnis zwischen Kommunikationsreichweite und Gitterweite. So wurde bereits in [BGGT07] eine optimale Kommunikationsreichweite von $0,95L_B$ identifiziert, bei welcher der mittlere Lokalisierungsfehler minimal ist.

Eine solche Vorgabe lässt sich unter realen Bedingungen nur selten erfüllen. Einerseits haben im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Messungen gezeigt, dass es nahezu unmöglich ist, die geforderte Kommunikationsreichweite exakt einzustellen, andererseits impliziert eine solche Einstellung, dass eine Kommunikation zwischen Referenzknoten nicht möglich ist, ohne diese mit einer veränderten Sendeleistung zu realisieren. Es ist daher zu erwarten, dass die verwendete Kommunikationsreichweite in der Regel den ermittelten Idealwert übersteigt. Aus diesem Grund ist es möglich, dass alle in Reichweite befindlichen Referenzknoten übermäßig stark gewichtet werden und somit das Lokalisierungsergebnis verfälscht wird. Abbildung 3.3 zeigt anhand eines vereinfachten Beispiels, wie sich eine vom Idealwert abweichende Gewichtung auswirken kann.

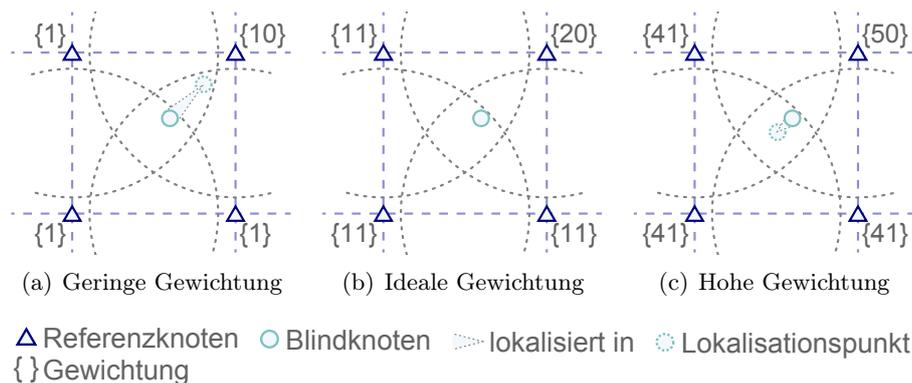


Abbildung 3.3: Die optimale Gewichtung bei der Positionsbestimmung mittels WCL hat Einfluss auf die Schätzposition. Bei gleicher Differenz der Gewichte wird nur bei optimaler Gewichtung (b) ein korrektes Ergebnis erzielt. Fällt die Gewichtung zu niedrig (a) oder zu hoch (c) aus, weicht das Ergebnis vom Idealwert ab.

Die Entwicklung des Adaptive Weighted Centroid Localization (AWCL) [BT08] wurde zunächst dadurch motiviert, die Auswirkungen einer zu starken Gewichtung zu reduzieren und somit den grundlegenden Ansatz des WCL realitätstauglicher zu gestalten. Wie nachfolgend gezeigt wird, konnte durch diesen Ansatz darüber hinaus eine allgemeingültige Verbesserung des WCL erreicht werden.

3.3.2.2 Algorithmenbeschreibung

Das Verfahren des AWCL kann als ein ergänzendes Verfahren zum WCL betrachtet werden, welches vor der Anwendung des WCL eine Anpassung der gewählten Gewichte vornimmt. Findet bei der Anwendung des WCL eine zu starke Gewichtung jedes einzelnen Referenzknotens statt, so tendiert das Verfahren zu einer Gleichgewichtung. Das AWCL-Verfahren verfolgt den Ansatz, anstelle der ermittelten absoluten Gewichte, den Differenzen zwischen den Gewichten der einzelnen Referenzknoten einen stärkeren Einfluss zu verleihen. Um dies zu erreichen, werden zunächst die vorliegenden Gewichte verglichen und das kleinste auftretende Gewicht identifiziert. Dieser als Grauteil bezeichnete Wert wird von allen Gewichten erreicht bzw. überschritten. Anschließend findet eine gleichmäßige Reduzierung aller Gewichte um einen bestimmten Anteil dieses Grauwertes statt. Dieser Vorgang ist in Abbildung 3.4 illustriert.

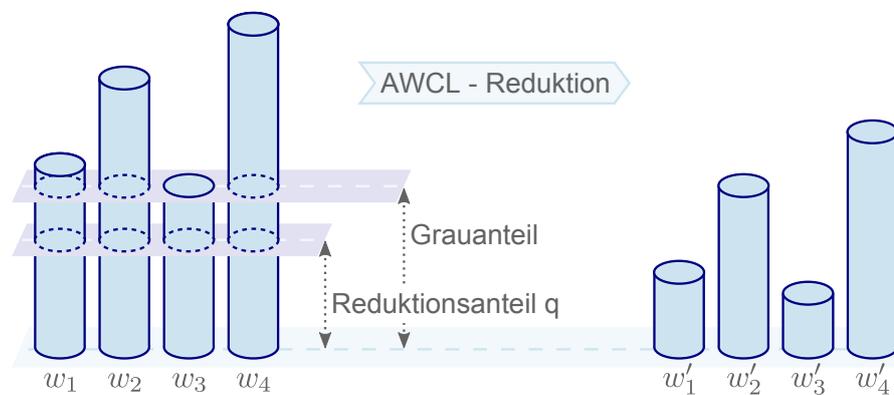


Abbildung 3.4: Darstellung des Grundprinzips der Reduktion bei AWCL: Überführung der initialen Gewichte (links) zu den angepassten Gewichten (rechts).

Im Anschluss an die so erfolgte Anpassung der ursprünglich ermittelten Gewichte kann die Positionsbestimmung mittels WCL unter Verwendung der reduzierten Gewichte erfolgen. Die so angepasste Berechnung der Positionsschätzung lässt sich zusammengefasst, wie in Gleichung (3.4) gezeigt, darstellen.

$$w'_{ij} = w_{ij} - q * \min_{k \in I(B_i)} (w_{ik}) \quad (3.4a)$$

$$\begin{pmatrix} u_{i(x)} \\ u_{i(y)} \end{pmatrix} = \left(\sum_{j \in I(B_i)} w'_{ij}{}^g \right)^{-1} \sum_{j \in I(B_i)} w'_{ij}{}^g \begin{pmatrix} b_{j(x)} \\ b_{j(y)} \end{pmatrix} \quad (3.4b)$$

Die Wahl des Reduktionsanteils q hat Einfluss auf die erreichte Lokalisierungsgenauigkeit. In [BT08] wurde dieser Einfluss für einen einfachen Aufbau aus vier Referenzknoten simulativ untersucht und ein optimaler Reduktionsanteil von 55 % ermittelt.

3.3.2.3 Evaluation

Die im Folgenden dargestellte Simulation entspricht der in der Veröffentlichung des Verfahrens genutzten Simulation [BT08]. Diese besitzt einen stark idealisierenden Charakter, da sie einerseits lediglich eine begrenzte Anzahl an Referenzknoten mit besonders gewählter Position verwendet und andererseits zwar einen aus Messdaten gewonnenen Verlauf der Signalempfangsstärke nutzt, diese jedoch keinem Fehlermodell unterwirft. In Übereinstimmung mit den nachfolgend gezeigten Ergebnissen konnte jedoch auch bei Verwendung realer Sensorknoten die Überlegenheit des Verfahrens gezeigt werden. An dieser Stelle sei bereits auf eine Arbeit der Autoren Fink und Beikirch verwiesen [FB09].

Die idealisierende Simulation orientiert sich an den Simulationsbedingungen, wie sie für den zugrunde liegenden WCL-Algorithmus verwendet wurden. Dies impliziert eine Anordnung der Referenzknoten in der beschriebenen quadratischen Gitterstruktur. Die in Abbildung 3.2 dargestellte Gitterweite L_B dient als Bezugsgröße für die Kommunikationsreichweite R_K und den Lokalisierungsfehler e , welcher als Distanz zwischen geschätzter und tatsächlicher Position angegeben ist. Die Gitterweite L_B blieb während der Simulation konstant. Es wurde ein Aufbau aus 2×2 Referenzknoten untersucht, welche die Eckpunkte des untersuchten Gebietes darstellen.

Im Unterschied zu den in [BGGT07] dargestellten Simulationen des WCL-Algorithmus wurden der Berechnung nicht die tatsächlichen Abstände zwischen Referenzknoten und Blindknoten zugrunde gelegt. Stattdessen wurde, abhängig vom Abstand, ein LQI-Wert ermittelt, welcher direkt zur Gewichtung verwendet wurde. Der so simulierte Wert erfüllt die unter realen Bedingungen häufig herrschende Charakteristik einer 8-Bit-Genauigkeit

und folgt in seinem Verlauf dem in realen Messungen ermittelten Bild. Gleichung (3.5) stellt die Berechnung des simulierten LQI dar.

$$LQI = \begin{cases} 255 & \text{für } d = 0 \\ \left[25 * \ln \left(\left(\frac{R_K}{100*d} \right)^2 \right) + 250 \right] & \text{für } 0 < d \leq R_K \\ 0 & \text{für } d > R_K \end{cases} \quad (3.5)$$

Im Verlauf der Simulation wurden zum einen die Kommunikationsreichweite R_K und zum anderen der Reduktionsanteil q gemäß Tabelle 3.1 variiert. Für jede der untersuchten Parameterkombinationen wurde ein Blindknoten mit dem Zweck der Positionsbestimmung an 100×100 Punkten des untersuchten Gebietes platziert. Befand sich der Blindknoten außerhalb der Kommunikationsreichweite aller Referenzknoten, so konnte keine Positionsbestimmung stattfinden. Als geschätzte Position wurde dann der Koordinatenursprung angenommen. Zur Bestimmung der Position wurde zunächst eine lineare Gewichtung mit dem Gewichtungsexponenten $g = 1$ untersucht. Da in den Arbeiten zum WCL eine höhere Lokalisierungsgenauigkeit angegeben wird, wenn der Gewichtungsexponent g mit 2 gewählt wird, wurde neben der linearen Gewichtung auch die quadratische Gewichtung untersucht.

Gesamtfläche	100 * 100 m^2
Gitterweite	100 m
Kommunikationsreichweite	0...200 m
Reduktionsanteil	0...100 %
Gewichtungsexponent	{1, 2}
Simulationspunkte	100 * 100

Tabelle 3.1: Verwendete Simulationsparameter

Mit Hilfe der Simulationen konnte zunächst, wie in Abbildung 3.5 dargestellt, gezeigt werden, dass unter Verwendung des simulierten LQI der mittlere Lokalisierungsfehler bei Verwendung des WCL ein Minimum aufweist, wenn die Kommunikationsreichweite 96 % der Gitterweite beträgt. Dieser Wert deckt sich annähernd mit den Angaben, welche von den Autoren des WCL gemacht wurden [BGGT07].

Auf dieser Grundlage wurde zunächst der Einfluss des Reduktionsanteils untersucht. Die in Abbildung 3.6 dargestellten Ergebnisse zeigen, dass die Reduktion bereits bei dieser Einstellung der Kommunikationsreichweite Einfluss auf den Lokalisierungsfehler nimmt. So lässt sich in diesem Fall mit einem Reduktionsanteil von 30 % eine Reduzierung des Lokalisierungsfehlers auf 4,9 % der Gitterweite erzielen.

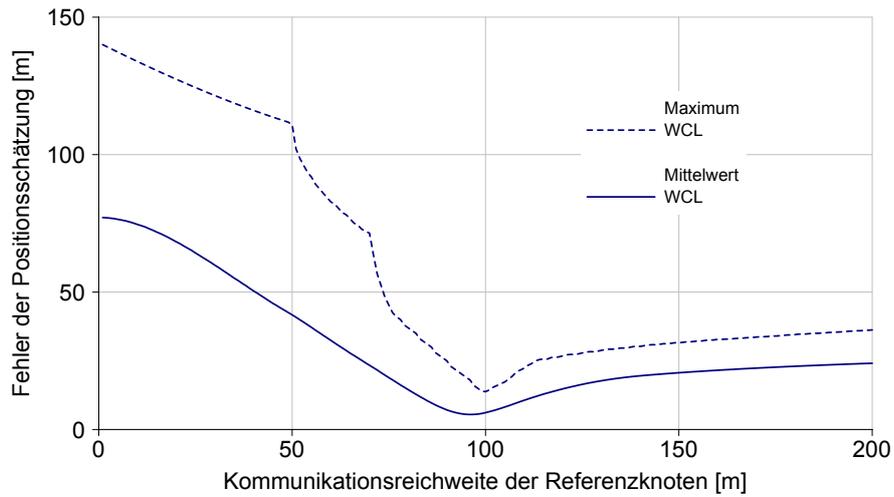


Abbildung 3.5: Darstellung des mittleren und maximalen Fehlers der Positionsschätzung das WCL Verfahrens, in Abhängigkeit von der gewählten Kommunikationsreichweite. Das Minimum des mittleren Fehlers tritt bei 96 % der Gitterweite auf.

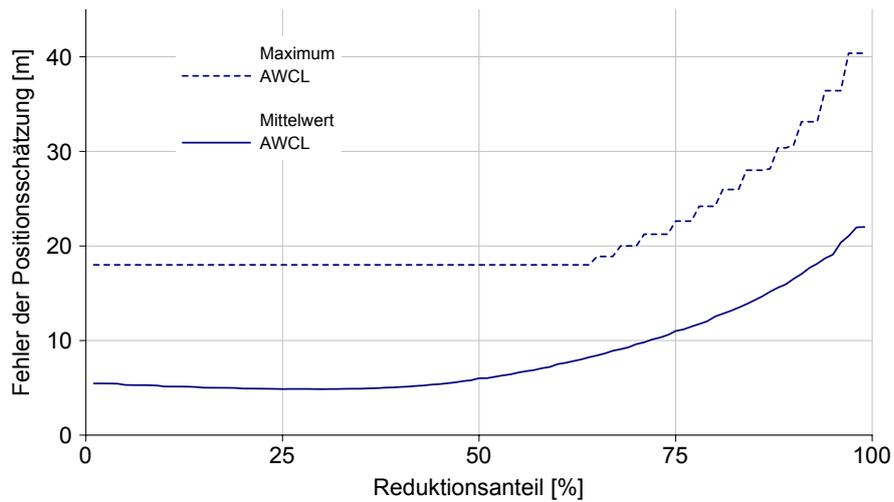
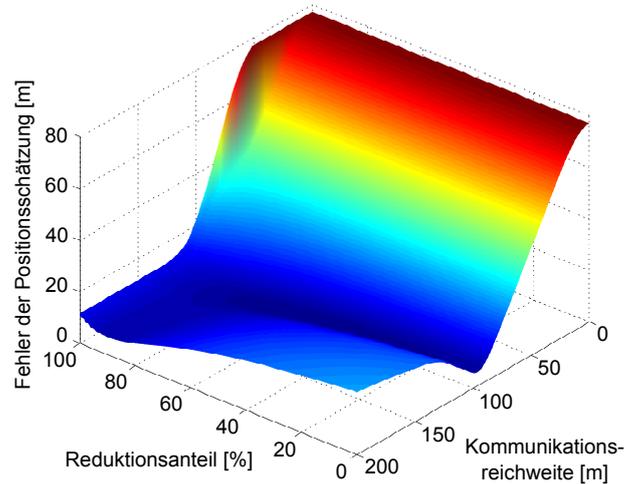


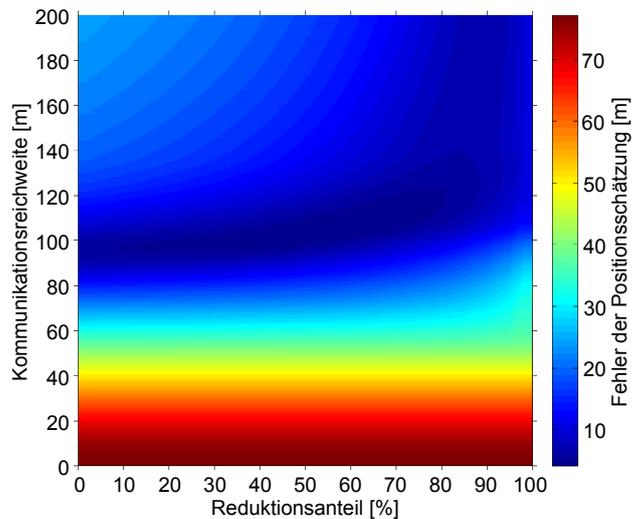
Abbildung 3.6: Darstellung des mittleren und maximalen Fehlers der Positionsschätzung in Abhängigkeit vom gewählten Reduktionsanteil, bei der für den WCL Ansatz idealen Kommunikationsreichweite von 96 % der Gitterweite.

Um die optimale Kombination aus Kommunikationsreichweite und Reduktionsanteil zu ermitteln, wurden beide Parameter gemäß Tabelle 3.1 variiert. Abbildung 3.7 stellt den gemittelten Lokalisierungsfehler für die untersuchten Kombinationen aus Kommunikationsreichweite und Reduktionsanteil dar. Ein Reduktionsanteil von 0 % entspricht dabei dem Einsatz des einfachen WCL-Verfahrens. Wird der Reduktionsanteil hingegen mit

100 % gewählt, so wird die Gewichtung aller beteiligten Referenzknoten und das Gewicht des am weitesten entfernten Referenzknotens reduziert, welcher seinerseits aus der Berechnung entfernt wird. Dies kann besonders gut in der dreidimensionalen Darstellung in Abbildung 3.7(a) beobachtet werden.



(a) 3D-Darstellung



(b) 2D-Darstellung

Abbildung 3.7: Fehler der Positionsschätzung bei Verwendung des AWCL Ansatzes mit linearer Gewichtung in Abhängigkeit von der gewählten Kommunikationsreichweite und des eingesetzten Reduktionsanteils.

Die Darstellung lässt den positiven Einfluss der durch AWCL propagierten Reduktion deutlich erkennen. Ist der Einfluss bei einer geringen Kommunikationsreichweite von

weniger als 90 % der Gitterweite noch relativ gering, so zeigt sich der positive Einfluss besonders bei hohen Kommunikationsreichweiten. Der in Abbildung 3.7 abgetragene mittlere Positionsfehler findet sein Minimum bei einer Kommunikationsreichweite von 105 % der Gitterweite und einem Reduktionsanteil von 55 % des minimalen Gewichts. Abbildung 3.8 stellt diese optimale Einstellung des AWCL der optimalen Einstellung des WCL gegenüber. Die Darstellung als kumulative Verteilungsfunktion stellt die Überlegenheit des AWCL-Verfahrens über das zugrunde liegende WCL-Verfahren dar.

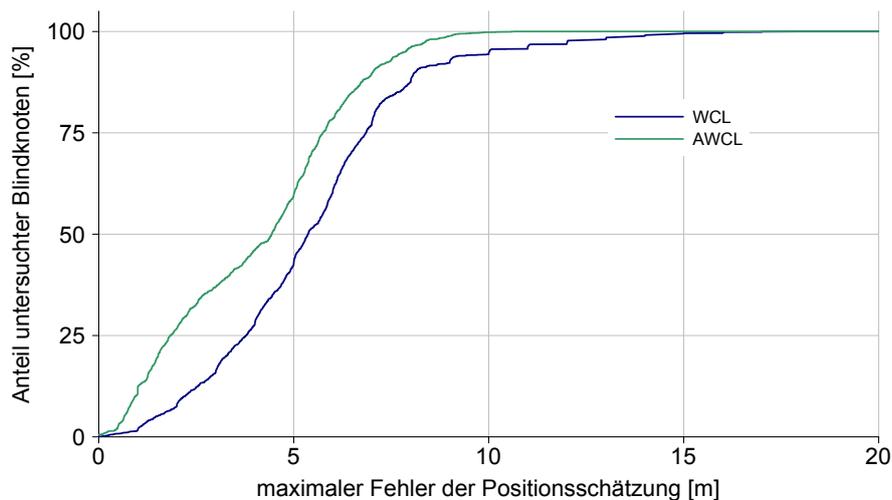


Abbildung 3.8: Gegenüberstellung der Lokalisierungsansätze WCL und AWCL anhand ihrer kumulativen Verteilungsfunktionen unter Verwendung der jeweils besten Parametereinstellungen von 96 % Kommunikationsreichweite für WCL und 105 % Kommunikationsreichweite und 55 % Reduktionsanteil für AWCL.

Um die Wirkweise des AWCL besser bewerten zu können, bietet sich ein Blick auf das simulierte Sensornetzwerk an. Abbildung 3.9 stellt WCL und AWCL in den eben genannten optimalen Einstellungen gegenüber. Während in den Abbildungen 3.9(c) und 3.9(d) der Betrag des Lokalisierungsfehlers an jedem Simulationspunkt farblich dargestellt wird, zeigen die Abbildungen 3.9(a) und 3.9(b) anhand von Fehlervektoren, in welche Richtung die Positionsschätzung jeweils abgelenkt wird. In den Abbildungen ist deutlich zu erkennen, dass der Kernbereich, welcher durch die Reichweite aller vier umliegenden Referenzknoten abgedeckt ist, im Fall von AWCL wesentlich geringere Fehler in der Positionsschätzung aufweist als im Fall von WCL. Während bei WCL lediglich im Zentrum des Sensorgebietes ein Spot mit minimalem Fehler auftritt, bilden sich bei Verwendung des AWCL-Ansatzes acht weitere solcher Spots heraus. Diese lassen sich besonders gut in Abbildung 3.9(d) erkennen. Auch in den weiteren Überlappungsgebieten ist der Einfluss des

Reduktionsanteils zu erkennen, so zum Beispiel in den Gebieten, welche nur von drei der Referenzknoten abgedeckt werden. In diesen Gebieten, welche an anderer Stelle dieser Arbeit auch als Kegelzellen bezeichnet werden, ist deutlich zu erkennen, dass die Verteilung der Positionsschätzungsfehler bei Verwendung von AWCL von dem radialen Verlauf des WCL abweichen. Da der Spot mit dem geringsten Fehler in diesen Fällen jedoch nicht an optimaler Position innerhalb der Zelle positioniert ist, ist davon auszugehen, dass die mit dem AWCL-Verfahren verbundene Steigerung der Genauigkeit hauptsächlich auf die veränderte Situation im Kernbereich zurückzuführen ist.

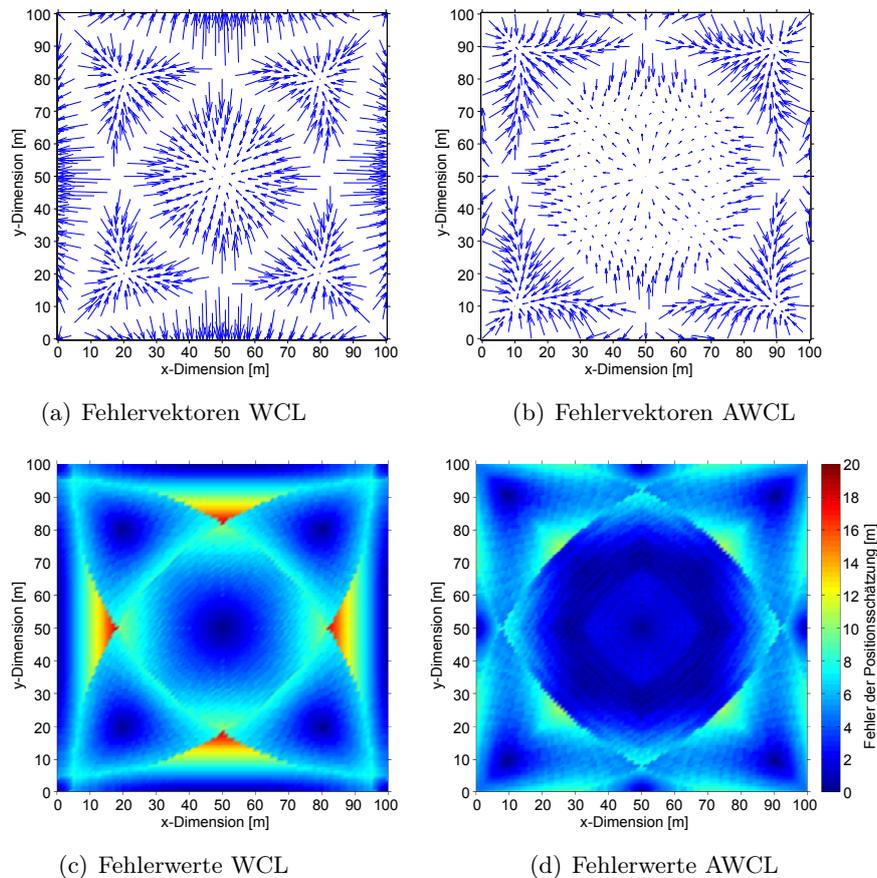


Abbildung 3.9: Vergleichende Darstellung von WCL und AWCL unter Verwendung der jeweils optimalen Parameter.

In Abbildung 3.10 wird der ermittelte optimale Reduktionsanteil von 55 % verwendet, um den Einfluss der Kommunikationsreichweite weiter zu untersuchen. Anhand des mittleren Lokalisierungsfehlers zeigt sich, dass der WCL-Algorithmus geringfügig besser geeignet ist, wenn die Kommunikationsreichweite weniger als 98 % der Gitterweite beträgt. Nimmt die

Kommunikationsreichweite jedoch einen höheren Wert an, bietet der AWCL-Algorithmus eine deutlich zuverlässigere Positionsbestimmung.

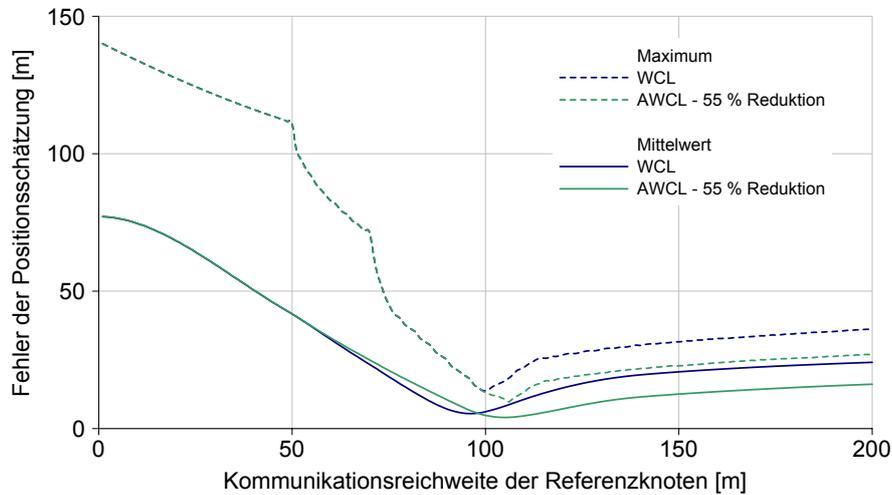


Abbildung 3.10: Gegenüberstellung der Lokalisierungsansätze WCL und AWCL mit einem Reduktionsanteil von 55 % in Abhängigkeit von der verwendeten Kommunikationsreichweite.

Wie zuvor gezeigt, konnte der geringste mittlere Fehler der Positionsschätzung mit einem Reduktionsanteil von 55 %, kombiniert mit einer Kommunikationsreichweite, welche 105 % der Gitterweite beträgt, erreicht werden. Da die Kommunikationsreichweite unter realen Bedingungen jedoch nur in Ausnahmefällen exakt eingestellt werden kann, ist es von besonderem Interesse, einen Reduktionsanteil zu bestimmen, welcher über einen gewissen Bereich der Kommunikationsreichweite gute Ergebnisse erzielt. In Abbildung 3.11 sind zu diesem Zweck AWCL Varianten mit unterschiedlichem Reduktionsanteil dargestellt. Hier zeigt sich, dass bei einer Kommunikationsreichweite zwischen 100 % und 125 %, welche als realistischer Wert angenommen wird, alle dargestellten Varianten dicht beieinander liegen. Der geringste mittlere Fehler kann dabei durch einen geringeren Reduktionsanteil erreicht werden. Ein höherer Reduktionsanteil bewirkt hingegen einen geringen Positionsschätzungsfehler für höhere Kommunikationsreichweiten.

Da für das WCL-Verfahren bekannt ist, dass eine höhere Genauigkeit erreicht werden kann, wenn statt der bislang gezeigten linearen Gewichtung eine quadratische Gewichtung verwendet wird, wurde auch diese im Kontext des AWCL-Verfahrens untersucht. Abbildung 3.12 zeigt einen Überblick der durchgeführten Untersuchungen. Während die Vergleichsgrafik der linearen Gewichtung in Abbildung 3.7 einen recht hohen Einfluss des Reduktionsanteils aufzeigte und sich dieser besonders bei einem hohen Reduktionswert zeigte, bietet die

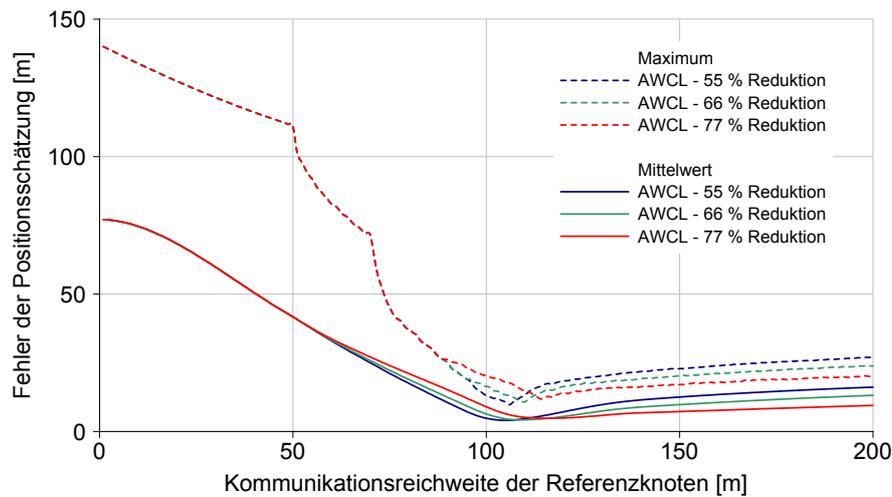
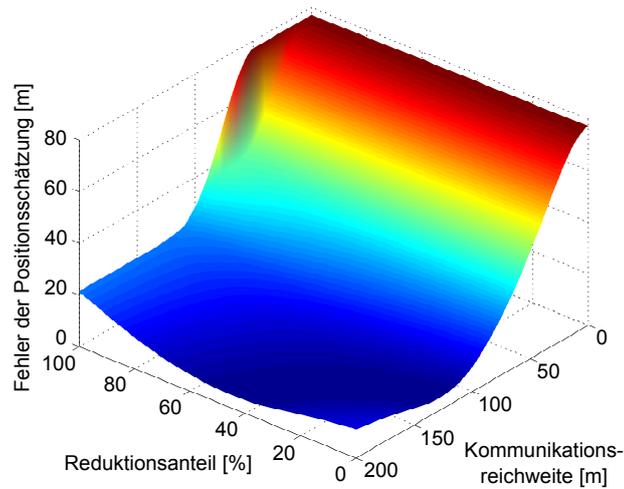


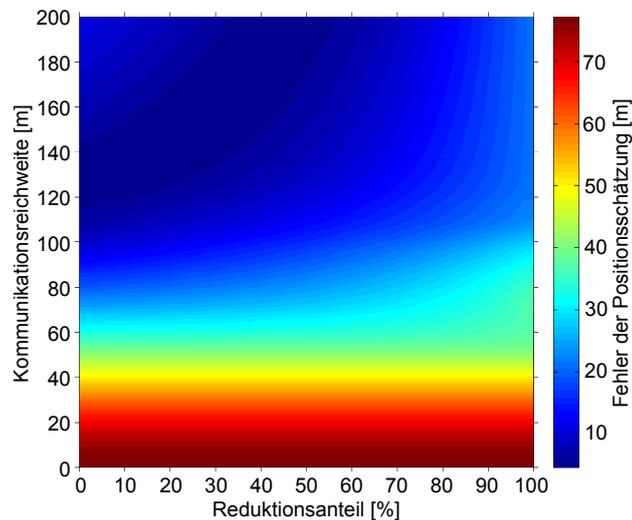
Abbildung 3.11: Gegenüberstellung des Positionsschätzungsfehlers von AWCL Varianten mit unterschiedlichem Reduktionsanteil in Abhängigkeit von der verwendeten Kommunikationsreichweite.

quadratische Gewichtung ein anderes Bild. Hier kann mit einem geringen Reduktionsanteil eine vergleichsweise geringe Reduktion des Positionsschätzungsfehlers erreicht werden. Hinzu kommt, dass ein hoher Reduktionsanteil bei einer hohen Kommunikationsreichweite sogar eine Verschlechterung der Positionsschätzung bewirkt. Bei der linearen Gewichtung war dies nur bei niedriger Kommunikationsreichweite und nur mit geringer Auswirkung der Fall. Bei hoher Kommunikationsreichweite und linearer Gewichtung kann durch die Verwendung des Reduktionsanteils hingegen nur eine Verbesserung der Genauigkeit gegenüber des WCL erzielt werden.

Obwohl die Anwendung eines Reduktionsanteils bei quadratischer Gewichtung eher gering ist, kann jedoch gezeigt werden, dass mit AWCL mit linearer Gewichtung eine nahezu ebenso hohe Genauigkeit erreicht werden kann wie mit dem WCL-Verfahren unter Verwendung der quadratischen Gewichtung. Dies ist in Abbildung 3.13 anhand des quadratisch gewichteten WCL und je einer linearen und einer quadratischen Variante des AWCL dargestellt. Hier zeigt sich noch einmal der geringe Einfluss des Reduktionsanteils bei quadratisch gewichtetem AWCL gegenüber der WCL Variante. Das linear gewichtete AWCL-Verfahren zeigt hingegen gerade im Bereich einer Kommunikationsreichweite zwischen 100 % und 120 % der Gitterweite eine höhere Genauigkeit. Für eine höhere Kommunikationsreichweite dreht sich dieses Verhältnis jedoch um. Dennoch stellt das linear gewichtete AWCL für reale Szenarien eine kostengünstige Alternative zum quadratisch gewichteten WCL dar, da eine Quadrierung hier nicht erforderlich ist.



(a) 3D Darstellung



(b) 2D Darstellung

Abbildung 3.12: Fehler der Positionsschätzung bei Verwendung des AWCL Ansatzes mit quadratischer Gewichtung in Abhängigkeit von der gewählten Kommunikationsreichweite und des eingesetzten Reduktionsanteils.

Für das präsentierte AWCL-Verfahren existiert ebenso wie für das zugrunde liegende WCL-Verfahren und das CL-Verfahren ein ideales Verhältnis aus Gitterweite und Kommunikationsreichweite, bei der der mittlere Fehler der Distanzschätzung minimal ist. In Tabelle 3.2 wird dieses Verhältnis und der jeweils erreichte mittlere und maximale Fehler der Positionsschätzung für die drei genannten Verfahren dargestellt. Besonders hervorzuheben ist dabei der AWCL-Ansatz mit linearer Wichtung, welcher die geringsten Fehler erzielt

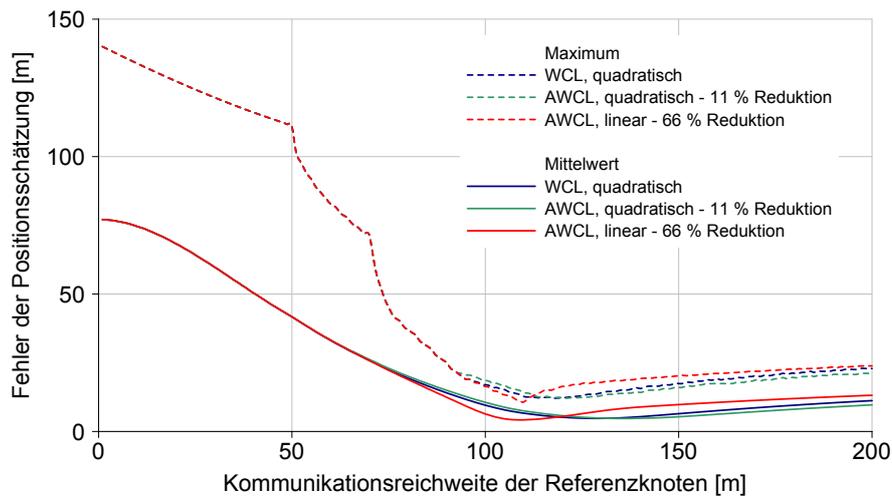


Abbildung 3.13: Gegenüberstellung des Positionsschätzungsfehlers von quadratisch gewichtetem WCL und linear sowie quadratisch gewichtetem AWCL in Abhängigkeit von der verwendeten Kommunikationsreichweite.

und gleichzeitig wenig Rechenaufwand benötigt und mit einer Kommunikationsreichweite arbeitet, welche die Gitterweite übersteigt.

	CL	WCL		AWCL	
		linear	quadr.	linear	quadr.
Kommunikationsreichweite ¹ [%]	87	96	129	105	136
Reduktionsanteil [%]	–	–	–	55	11
Fehler der Positionsschätzung					
Durchschnitt ¹ [%]	18	5,5	4,76	4	4,72
Maximum ¹ [%]	45	18	13,72	10,7	13,87

¹ normiert auf die Gitterweite

Tabelle 3.2: Vergleich der erreichten Positionsschätzungsfehler der Verfahren CL, WCL und AWCL unter Verwendung jeweils angegebenen idealen Konstellation.

3.3.2.4 Nachbetrachtung

Wirkprinzip Wie zuvor gezeigt, bewirkt die beim AWCL-Verfahren angewandte Reduktion der Gewichte, dass der resultierende Fehler der Positionsschätzung im Mittel reduziert wird. Dies bedeutet nicht, dass eine individuelle Schätzposition durch den Einsatz der Reduktion in jedem Fall verbessert wird. Die Verbesserung kommt jedoch dadurch zustande, dass in einer Vielzahl der betrachteten Fälle eine Verbesserung stattfindet, welche zudem

stärker wiegt als ebenso auftretende Verschlechterungen. Eine Begründung dafür soll das nachfolgende Gedankenexperiment liefern.

Eine grundlegende Eigenschaft schwerpunktbasierter Positionsschätzungsverfahren mit ausschließlich positiver Wichtung besteht darin, dass sich eine geschätzte Position grundsätzlich innerhalb des aus den Positionen der beteiligten Referenzknoten aufgespannten konvexen Polygons befindet. Eine Manipulation der Gewichte wie im AWCL-Verfahren vorgenommen, kann daher immer nur eine Verschiebung der Schätzposition innerhalb dieser konvexen Hülle bewirken. Die durch das Verfahren vorgenommene Reduktion wird in ihrem Ausmaß von dem kleinsten auftretenden Gewicht bestimmt. Die Manipulation ist umso stärker je größer das kleinste Gewicht ist. Gleichzeitig gilt, dass ein höheres Gewicht eine höhere räumliche Nähe widerspiegelt. Dies bedeutet, dass das Verfahren bei einer großen konvexen Hülle eine geringere Manipulation vornimmt als bei einer kleinen konvexen Hülle. Daher wird das Ausmaß des Fehlers, welcher durch die Manipulation auftreten kann, automatisch beschränkt.

Kommunikationsreichweite Zur Evaluation des vorgestellten Verfahrens wurde ein modellhafter Verlauf des LQI verwendet, welcher auf der Basis zuvor getätigter Messungen entstand. Mit dem gewählten Verlauf und der Diskretisierung auf 256 Werte wurde eine gewisse Realitätsnähe der vorgenommenen Simulationen erreicht. Das gewählte Modell beinhaltet jedoch keine zufällige Komponente und simuliert somit eine kreisförmige Signalausbreitung mit punktsymmetrischem Verlauf. In der Realität besteht in der Regel eine Abweichung von dieser Annahme. Die in der Arbeit miteinander verglichenen Verfahren sind jedoch gleichermaßen von dieser Bevorteilung durch das gewählte Modell betroffen, sodass das angenommene Modell zum Zweck des Vergleichs ausreichend ist. Darüber hinaus konnte in [FB09] und anderen Arbeiten die Leistungsfähigkeit des Verfahrens unter realen Bedingungen gezeigt werden.

3.3.3 Das SBCL Verfahren

3.3.3.1 Motivation

Eines der einfachsten approximativen Positionsbestimmungsverfahren stellt das bereits genannte CL-Verfahren dar, welches sich vor allem dadurch auszeichnet, dass es als distanzfreies Verfahren lediglich Informationen darüber benötigt, welche Referenzknoten sich in Kommunikationsreichweite eines Blindknotens befinden. Eine Distanzschätzung ist

hingegen nicht notwendig. Durch die in [BHE00] beschriebene Anordnung der Referenzknoten in einer quadratischen Gitterstruktur werden durch die Kommunikationsreichweiten der Referenzknoten Überlappungsgebiete erzeugt, innerhalb derer allen Blindknoten die gleiche Schätzposition zugeordnet wird. Die Positionsschätzung mittels CL wird durch die in Gleichung (3.6) dargestellte Berechnung realisiert, wobei die Menge B_i die für einen Blindknoten u_i in Reichweite befindlichen Referenzknoten darstellt.

$$\begin{pmatrix} u_{i(x)} \\ u_{i(y)} \end{pmatrix} = \frac{1}{|B_i|} \sum_{j \in I(B_i)} \begin{pmatrix} b_{j(x)} \\ b_{j(y)} \end{pmatrix} \quad (3.6)$$

Die Namensgebung des CL-Verfahrens legt nahe, dass es sich hierbei jeweils um den Schwerpunkt eines Überlappungsgebietes handelt, wodurch eine Minimierung des Positionsschätzungsfehlers erreicht würde. Die nachfolgenden Ausführungen legen jedoch dar, dass diese Annahme häufig nicht erfüllt ist. Das Ziel des Shape Based Centroid Localization (SBCL)-Verfahrens [BST09b] besteht darin, die bekannte Positionsbestimmung mittels CL dahingehend zu erweitern, dass die Positionsbestimmung stärker dem Grundgedanken der Schwerpunktbestimmung entspricht und somit eine gesteigerte Genauigkeit in der Positionsbestimmung erreicht wird.

3.3.3.2 Analyse

Bei der Verwendung der CL-basierten Lokalisierung werden die in Abbildung 3.14(a) dargestellten Überlappungsgebiete auf Basis der Kommunikationsreichweite der Referenzknoten gebildet. Form, Größe und Anzahl der Überlappungsgebiete variieren mit dem Verhältnis der Kommunikationsreichweite R_{KB} zur Gitterweite L_B . Entspricht die Kommunikationsreichweite einem Wert zwischen 70,71 % und 100 % der Gitterweite, so ergeben sich die in Abbildung 3.14(a) dargestellten Zellformen.

Ein denkbarer Einsatz von Sensornetzwerken besteht in der Überwachung geschlossener Räume innerhalb eines Gebäudes. In diesem Fall ist es naheliegend, die Referenzknoten zur Positionsbestimmung weiterer Knoten jeweils in den Ecken eines Raumes zu platzieren. Unter dieser Annahme wird das Gebiet der Positionsbestimmung durch die Positionen der Referenzknoten begrenzt, was eine veränderte Form der Überlappungsgebiete zur Folge hat. Die in Abbildung 3.14(b) dargestellten Zellformen treten immer dann auf, wenn die Verbindung zweier Referenzknoten eine Gebietsgrenze beschreibt. Die nachfolgenden Betrachtungen basieren auf den in Abbildung 3.14(b) dargestellten Zellformen.

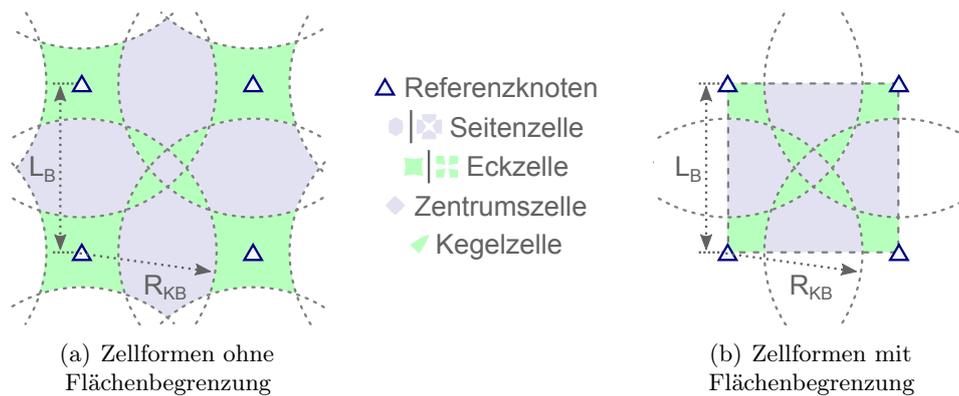


Abbildung 3.14: Darstellung der bei der Lokalisierung mittels CL auftretenden, als Zellen bezeichneten, Überlappungsgebiete der Kommunikationsreichweiten der beteiligten Referenzknoten: (a) ohne Betrachtung von Gebietsgrenzen und (b) unter Berücksichtigung eines eingeschränkten Überwachungsgebietes.

Betrachtet man nun die durch CL ermittelten Positionsschätzungen und die durch die Zellformen gegebenen Schwerpunkte, so ist festzustellen, dass diese nur im Fall der Zentrumszelle einander entsprechen. Die Position einer Kegelzelle und dessen Schwerpunkt variiert hingegen mit der Kommunikationsreichweite. Werden Eck- und Seitenzellen durch die Gebietsgrenzen eingeschränkt, so verschiebt sich auch hier der Schwerpunkt bei veränderlicher Kommunikationsreichweite. Während durch geeignete Wahl der Kommunikationsreichweite eine Überdeckung des Schwerpunktes der Kegelzellen mit den fixen Positionsschätzpunkten des CL erreicht werden kann, ist dies bei den eingeschränkten Eck- und Seitenzellen ausgeschlossen. Abbildung 3.15 illustriert diesen Umstand am besonderen Beispiel der Kegelzellen.

Der Unterschied zwischen dem ermittelten Schätzwert und dem Schwerpunkt der Zelle liegt darin begründet, dass bei CL jeweils der Schwerpunkt der durch die in Reichweite befindlichen Referenzknoten aufgespannten geometrischen Form ermittelt wird. Im Fall einer Kegelzelle ist dies ein Dreieck, welches die Ausmaße der Kegelzelle weit übertrifft. Analog dazu handelt es sich bei einer Seitenzelle um den Streckenschwerpunkt zweier benachbarter Referenzknoten und bei einer Eckzelle um die Position eines Referenzknoten. Im Folgenden werden unterschiedliche Ansätze unter dem Oberbegriff des SBCL vorgestellt, mit deren Hilfe eine genauere Positionsschätzung auf Basis des Flächenschwerpunkts ermöglicht wird.

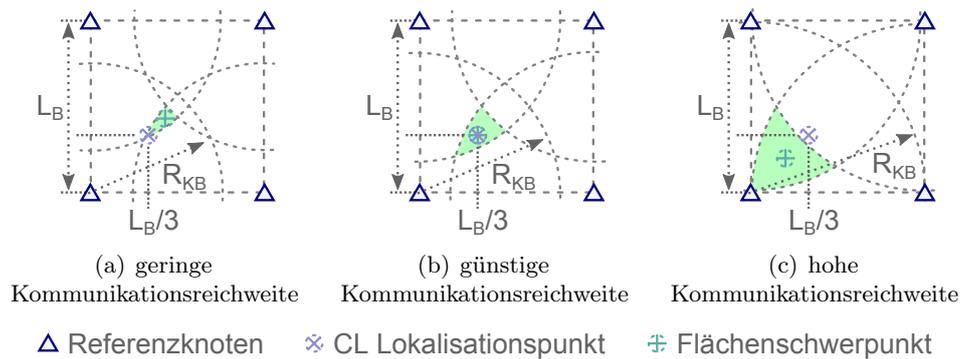


Abbildung 3.15: Darstellung des Einflusses der Kommunikationsreichweite auf den Flächenschwerpunkt einer Kegelzelle: (a) bei geringer Kommunikationsreichweite, (b) bei einer Kommunikationsreichweite von 83 % der Gitterweite und (c) bei hoher Kommunikationsreichweite.

3.3.3.3 Algorithmenbeschreibung

Die unter dem Oberbegriff des SBCL zusammengefassten Ansätze setzen Informationen über die Position und Ausdehnung der durch Überlagerung der Kommunikationsreichweiten gebildeten Zellen voraus. Diese stehen, wie eingangs beschrieben, in einem funktionalen Zusammenhang mit der gewählten Kommunikationsreichweite. Diese Reichweite dient daher als zusätzliche Eingangsgröße der nachfolgend beschriebenen Ansätze.

Realer Schwerpunkt Die Berechnung des realen Schwerpunktes kann aufgrund ihrer Komplexität für den Einsatz auf einem Blindknoten ausgeschlossen werden. Sie kann jedoch als Referenz dienen. Das Ergebnis der realen Schwerpunktberechnung kann zudem jeweils in einer Lookup-Tabelle auf jenen Referenzknoten hinterlegt werden, dessen Kommunikationsreichweite die jeweiligen Zellen abdeckt. Anstelle einer Berechnung würde die Positionsbestimmung in diesem Fall darin bestehen, für eine gegebene Kombination aus Referenzknoten in Reichweite den entsprechenden Eintrag der Schätzposition aus einer Tabelle zu ermitteln. Aufgrund des eingangs beschriebenen Einflusses der Kommunikationsreichweite beschränkt sich die Gültigkeit einer solchen Lookup-Tabelle jeweils auf eine zuvor festgelegte Kommunikationsreichweite. In dem vorliegenden Fall wurden die tatsächlichen Schwerpunkte durch eine Mittelung aller in einer Zelle befindlichen Punkte unter Verwendung einer ausreichend hohen Granularität numerisch ermittelt. Es wurde ein Überwachungsgebiet entsprechend der Abbildung 3.14(b) simuliert, welches in 100×100 Punkte unterteilt wurde.

Approximation durch virtuelle Referenzknoten Die Verwendung virtueller Referenzknoten stellt ein Verfahren dar, welches sich dadurch auszeichnet, dass im Unterschied zu dem zuvor beschriebenen Verfahren im Kern weiterhin das bekannte CL-Verfahren zur Positionsbestimmung Verwendung findet. Es lässt sich daher auch auf ähnliche Verfahren, wie beispielsweise das WCL-Verfahren, anwenden. Der Grundansatz dieses Vorgehens besteht darin, die auftretenden Zellen durch geometrische Formen anzunähern, deren Schwerpunkt dem Schwerpunkt der Zelle möglichst nahe kommt. Zum Aufspannen dieser Formen sollen sowohl existierende als auch zusätzliche virtuelle Referenzknoten verwendet werden. Die Positionsschätzung kann dann durch Einbeziehung der jeweils notwendigen realen und virtuellen Referenzknoten in das CL-Verfahren erfolgen. Abbildung 3.16 stellt die für diesen Ansatz notwendigen virtuellen Referenzknoten, als V_i bezeichnet, und die damit erreichten geometrischen Hilfsflächen exemplarisch dar.

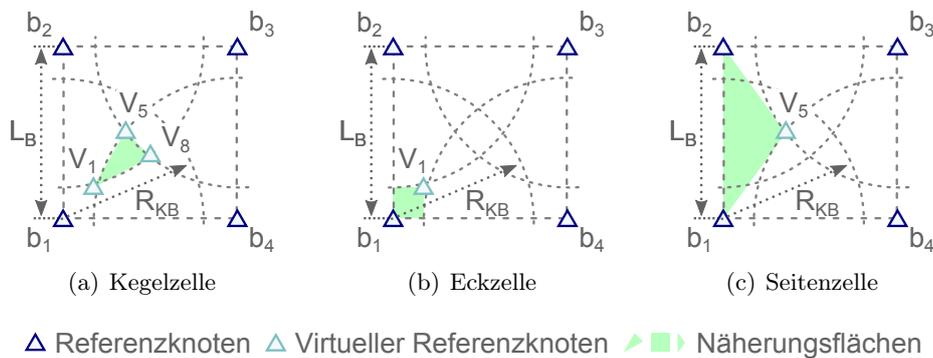


Abbildung 3.16: Beispielhafte Darstellung der Approximation auftretender Zellen und Flächenschwerpunkte durch virtuelle Referenzknoten für den Fall (a) einer Kegenzelle, (b) einer Eckzelle sowie (c) einer Seitenzelle.

Die Bestimmung der Positionen der virtuellen Referenzknoten kann mit Hilfe der Position der realen Referenzknoten und den bekannten Rechenvorschriften für rechtwinklige Dreiecke erfolgen. Für die in Abbildung 3.16 illustrierten virtuellen Referenzknoten ist diese Berechnung in Gleichung (3.7) dargestellt. Als Eingangsparameter dienen die Kommunikationsreichweite R_{KB} und die Gitterweite L_B . Analog dazu erfolgt die Ermittlung der Position der weiteren virtuellen Referenzknoten. Um den Berechnungsaufwand auf den Sensorknoten zu minimieren, bietet sich auch in diesem Fall eine einmalige Vorberechnung häufig genutzter Werte. Diese können durch die realen Referenzknoten an die Blindknoten übertragen werden.

$$\begin{pmatrix} v_{1(x)} \\ v_{1(y)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_{1(x)} \\ b_{1(y)} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} L_B - R_{KB} \\ L_B - R_{KB} \end{pmatrix} \quad (3.7a)$$

$$\begin{pmatrix} v_{5(x)} \\ v_{5(y)} \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} b_{1(x)} + b_{2(x)} \\ b_{1(y)} + b_{2(y)} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} L_B - \frac{1}{2}\sqrt{4R_{KB}^2 - L_B^2} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.7b)$$

$$\begin{pmatrix} v_{8(x)} \\ v_{8(y)} \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} b_{1(x)} + b_{4(x)} \\ b_{1(y)} + b_{4(y)} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ L_B - \frac{1}{2}\sqrt{4R_{KB}^2 - L_B^2} \end{pmatrix} \quad (3.7c)$$

Der eigentlichen Berechnung der Schätzposition nach dem CL-Verfahren ist bei diesem Ansatz nun eine zusätzliche Auswahl der zu verwendenden virtuellen bzw. realen Referenzknoten vorangestellt. Während die Bestimmung des realen Schwerpunktes nur mit erhöhtem Aufwand und jeweils nur für eine ausgewählte Kommunikationsreichweite möglich ist, stellt die Verwendung der virtuellen Referenzknoten eine allgemeinere Lösung dar, welche die Kommunikationsreichweite in ihrer Berechnung berücksichtigt.

Approximation durch lineare Näherung Der Ansatz der linearen Näherung orientiert sich erneut stärker an der Position der realen Schwerpunkte, versucht diese jedoch in Abhängigkeit von der Kommunikationsreichweite darzustellen. Hierzu wurden die variablen Abstände der realen Schwerpunkte der auftretenden Zellen zu den jeweils nächstgelegenen Gebietsgrenzen ermittelt und über eine Regression als lineare Funktion der Kommunikationsreichweite dargestellt. Auf diese Weise ergeben sich für Kegel-, Eck- und Seitenzelle die in Gleichung (3.8) dargestellten Distanzfunktionen d_K , d_E und d_S . Abbildung 3.17(a) stellt diese Distanzen exemplarisch dar.

$$d_K(R_{KB}) = -0,94R_{KB} + 1,12 \quad (3.8a)$$

$$d_E(R_{KB}) = -0,59R_{KB} + 0,58 \quad (3.8b)$$

$$d_S(R_{KB}) = -0,58R_{KB} + 0,61 \quad (3.8c)$$

Mit Hilfe dieser Distanzfunktionen lässt sich, abhängig von den in Reichweite befindlichen Referenzknoten, die schwerpunkt-basierte Positionsschätzung durchführen. Die Gleichun-

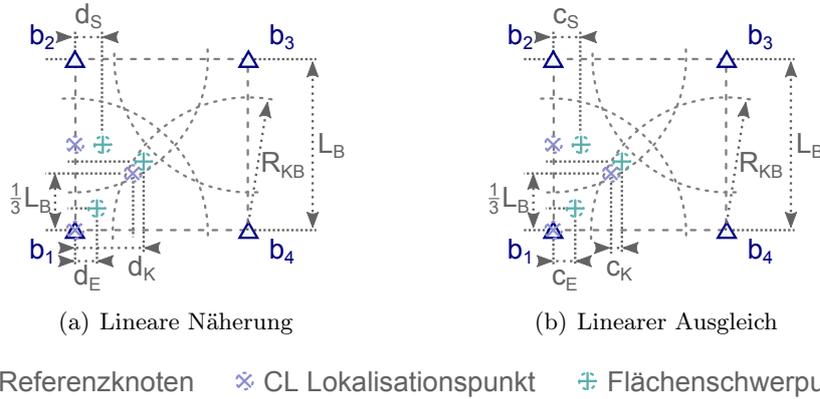


Abbildung 3.17: Ermittlung des Flächenschwerpunktes durch lineare Näherungsfunktionen: (a) Approximation des Schwerpunktes durch lineare Näherung und (b) Korrektur der durch CL ermittelten Position mittels linearer Ausgleichsfunktion.

gen (3.9a) bis (3.9c) stellen die Berechnung der Schätzpositionen U_K , U_E und U_S beispielhaft für die in den Abbildungen 3.16(a) bis 3.16(c) gezeigten Zellen dar. Die Ermittlung der übrigen Positionsschätzungen erfolgt analog.

$$\begin{pmatrix} u_K(x) \\ u_K(y) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1(x) \\ b_1(y) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} d_K(R_{KB}) \\ d_K(R_{KB}) \end{pmatrix} \quad (3.9a)$$

$$\begin{pmatrix} u_E(x) \\ u_E(y) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1(x) \\ b_1(y) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} d_E(R_{KB}) \\ d_E(R_{KB}) \end{pmatrix} \quad (3.9b)$$

$$\begin{pmatrix} u_S(x) \\ u_S(y) \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} b_1(x) + b_2(x) \\ b_1(y) + b_2(y) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} d_S(R_{KB}) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.9c)$$

Approximation durch linearen Ausgleich Eine Abwandlung der linearen Näherung stellt das bislang unveröffentlichte Verfahren des linearen Ausgleichs dar. Im mathematischen Sinne entspricht dieser Ansatz der zuvor genannten Näherung. Auch hier werden, abhängig vom Zelltyp, Distanzfunktionen ermittelt. Als Bezugspunkte der in Gleichung (3.10) dargestellten Distanzfunktionen, welche sich aus den in Gleichung (3.8) gegebenen Funktionen ergeben, dienen in diesem Fall jedoch nicht die Gebietsgrenzen, sondern die durch CL ermittelten fixen Schätzwerte. Abbildung 3.17(b) stellt diesen Bezug grafisch dar.

$$c_K(R_{KB}) = \frac{1}{3}L_B - d_K(R_{KB}) = 0,94R_{KB} + \frac{1}{3}L_B - 1,12 \quad (3.10a)$$

$$c_E(R_{KB}) = d_E(R_{KB}) = -0,59R_{KB} + 0,58 \quad (3.10b)$$

$$c_S(R_{KB}) = d_S(R_{KB}) = -0,58R_{KB} + 0,61 \quad (3.10c)$$

Trotz der offenkundigen Ähnlichkeit zu dem zuvor beschriebenen Verfahren, bietet dieser Ansatz einen entscheidenden Vorteil gegenüber allen zuvor beschriebenen Ansätzen. So lassen sich aus den ermittelten Distanzfunktionen Korrekturvektoren erstellen, welche sich durch eine geschickte Aufteilung individuell jedem Referenzknoten zuordnen lassen. Ein Blindknoten erhält dann von jedem Referenzknoten b_j zusätzlich zu dessen Position drei Korrekturvektoren $\mathbf{c}_{j,1}$, $\mathbf{c}_{j,2}$ und $\mathbf{c}_{j,3}$. Für die in Abbildung 3.17 dargestellten Referenzknoten b_1 bis b_4 werden diese Korrekturvektoren beispielhaft in den Gleichungen (3.11a) bis (3.11d) dargestellt.

$$\mathbf{c}_{1,1} = \begin{pmatrix} +c_E(R_{KB}) \\ +c_E(R_{KB}) \end{pmatrix} \quad \mathbf{c}_{1,2} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} +c_S(R_{KB}) \\ +c_S(R_{KB}) \end{pmatrix} \quad \mathbf{c}_{1,3} = \begin{pmatrix} -c_K(R_{KB}) \\ -c_K(R_{KB}) \end{pmatrix} \quad (3.11a)$$

$$\mathbf{c}_{2,1} = \begin{pmatrix} +c_E(R_{KB}) \\ -c_E(R_{KB}) \end{pmatrix} \quad \mathbf{c}_{2,2} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} +c_S(R_{KB}) \\ -c_S(R_{KB}) \end{pmatrix} \quad \mathbf{c}_{2,3} = \begin{pmatrix} -c_K(R_{KB}) \\ +c_K(R_{KB}) \end{pmatrix} \quad (3.11b)$$

$$\mathbf{c}_{3,1} = \begin{pmatrix} -c_E(R_{KB}) \\ -c_E(R_{KB}) \end{pmatrix} \quad \mathbf{c}_{3,2} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} -c_S(R_{KB}) \\ -c_S(R_{KB}) \end{pmatrix} \quad \mathbf{c}_{3,3} = \begin{pmatrix} +c_K(R_{KB}) \\ +c_K(R_{KB}) \end{pmatrix} \quad (3.11c)$$

$$\mathbf{c}_{4,1} = \begin{pmatrix} -c_E(R_{KB}) \\ +c_E(R_{KB}) \end{pmatrix} \quad \mathbf{c}_{4,2} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} -c_S(R_{KB}) \\ +c_S(R_{KB}) \end{pmatrix} \quad \mathbf{c}_{4,3} = \begin{pmatrix} +c_K(R_{KB}) \\ -c_K(R_{KB}) \end{pmatrix} \quad (3.11d)$$

In Abhängigkeit von der Anzahl der in Reichweite befindlichen Referenzknoten wählt der Blindknoten u_i , entsprechend der gewählten Indizes die Korrekturvektoren der gegebenen Referenzknoten aus und fügt diese durch einfache Addition der mittels CL bestimmten Schätzposition hinzu. Die auf diese Weise vorgenommene Ermittlung der Schätzposition ist in Gleichung (3.12) dargestellt.

$$\begin{pmatrix} u_{i(x)} \\ u_{i(y)} \end{pmatrix} = \frac{1}{|B_i|} \sum_{j \in I(B_i)} \begin{pmatrix} b_{j(x)} \\ b_{j(y)} \end{pmatrix} + \sum_{j \in I(B_i)} \mathbf{c}_{j,|B_i|} \quad (3.12)$$

Durch dieses Vorgehen wird die Anzahl der durch den Blindknoten zu bearbeitenden, mitunter recht aufwendigen, Entscheidungsprozesse maßgeblich reduziert. Die verbliebene Auswahl des richtigen Korrekturvektors beschränkt sich zudem auf eine einfache Indexermittlung. Auch in diesem Fall bleibt die ursprüngliche CL-Berechnung im Kern erhalten.

Ein weiterer Vorteil des beschriebenen Ansatzes besteht in der vergleichsweise einfachen Erweiterbarkeit für eine beliebige Anzahl an Referenzknoten. Eine konkrete Beschreibung einer solchen Anpassung wird in Kapitel 3.3.4 dargestellt.

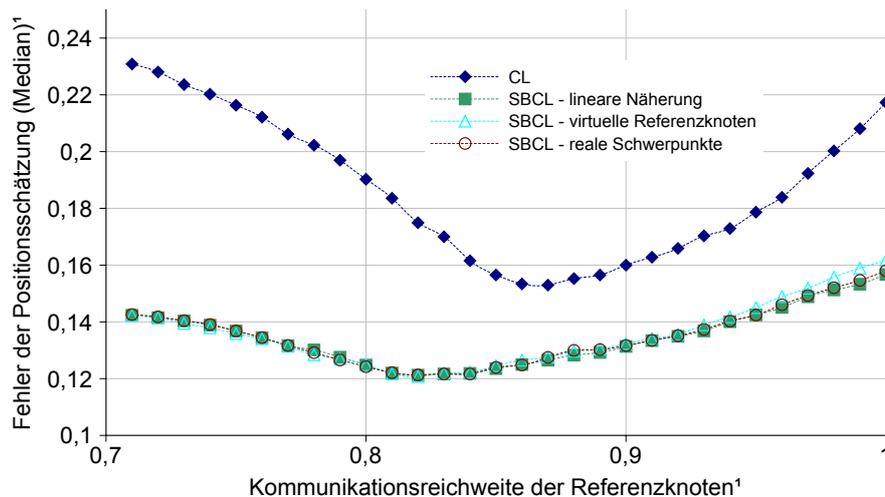
3.3.3.4 Evaluation

Zur Bewertung der vorgestellten Ansätze der virtuellen Referenzknoten sowie der linearen Näherung wurde erneut ein Überwachungsgebiet simuliert, welches der Darstellung in Abbildung 3.14(b) entspricht. Das simulierte Gebiet wurde mit rasterförmig angeordneten Simulationenpunkten versehen, wobei an jedem Simulationenpunkt eine Positionsschätzung mit Hilfe der präsentierten Ansätze durchgeführt und der euklidische Abstand zwischen ermittelter Position und tatsächlicher Position als Positionsschätzungsfehler bestimmt wurde. Als Bewertungsreferenz dient neben der Positionsschätzung mittels CL das Verfahren der realen Flächenschwerpunkte. Die nachträglich hinzugefügte Methode des linearen Ausgleichs wurde nicht explizit simuliert. Aufgrund der mathematischen Zusammenhänge entspricht diese jedoch den dargestellten Ergebnissen der linearen Näherung. Den durchgeführten Simulationen liegen die in Tabelle 3.3 dargestellten Parameter zugrunde. Da die vorgestellten Methoden, wie auch der CL-Algorithmus, distanzfreie Ansätze darstellen, wurde auf die Verwendung eines Ausbreitungsmodells verzichtet und eine idealisierte kreisförmige Kommunikationsreichweite angenommen.

Gesamtfläche	100 * 100 m ²
Gitterweite	100 m
Kommunikationsreichweite	71...100 m
Simulationenpunkte	100 * 100

Tabelle 3.3: Verwendete Simulationsparameter

Abbildung 3.18 stellt einen Vergleich der medianen Positionsschätzfehler der untersuchten Verfahren für unterschiedliche Kommunikationsreichweiten dar. In der Grafik zeigt sich deutlich der Unterschied der erreichten Genauigkeit bei Verwendung des herkömmlichen CL-Verfahrens gegenüber der Verwendung der tatsächlichen Flächenschwerpunkte. Weiterhin lässt sich erkennen, dass die vorgestellten Approximationsansätze, trotz geringerer mathematischer Komplexität, eine Lokalisierung ermöglichen, welche qualitativ annähernd der Verwendung der realen Schwerpunkte entspricht.

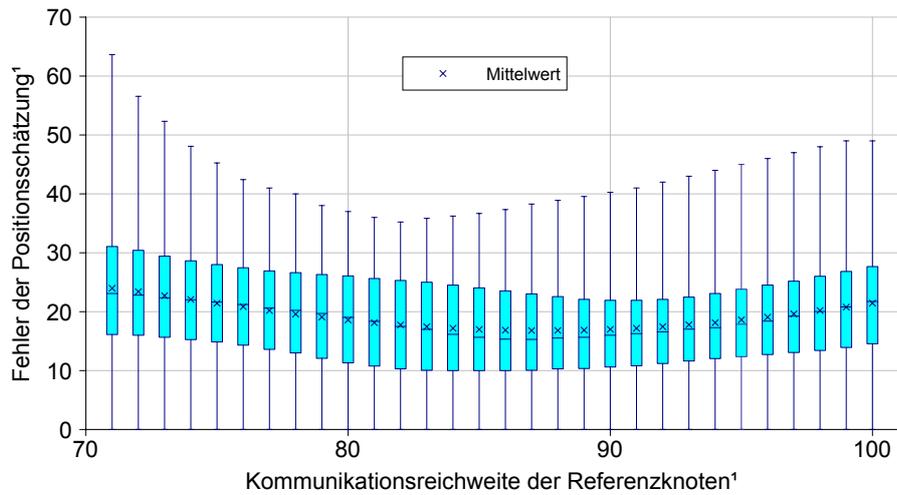


¹ normiert auf die Gitterweite L_B

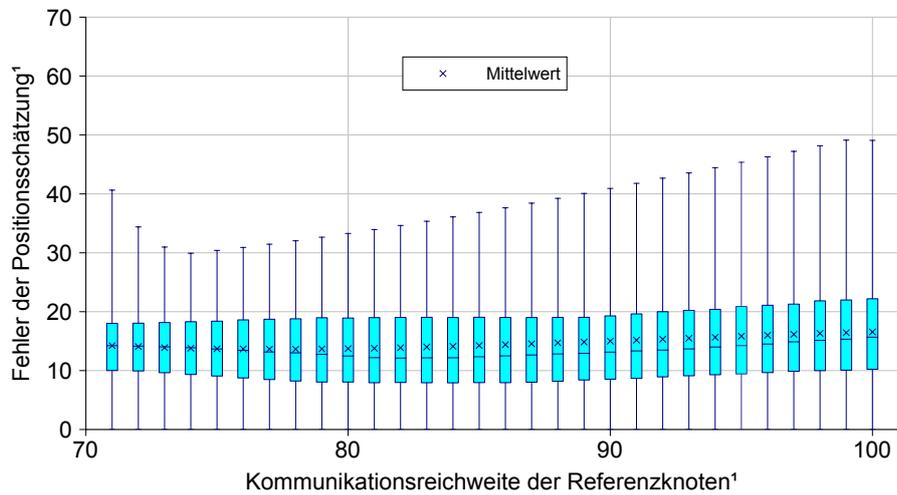
Abbildung 3.18: Vergleich der medianen Positionsschätzfehler bei Anwendung der SBCL Ansätze auf Kegel-, Seiten- und Eckzelle.

Unterschiede zwischen den präsentierten SBCL-Ansätzen werden erst bei Betrachtung der statistischen Auswertung in Abbildung 3.19 sichtbar. So lässt sich beispielsweise erkennen, dass bei geringer Kommunikationsreichweite der maximal auftretende Fehler bei Verwendung des Ansatzes der virtuellen Referenzknoten größer ist als bei Verwendung der linearen Näherung oder der realen Schwerpunkte. Weiterhin zeigen sich geringe Unterschiede in den beiden letztgenannten Ansätzen, welche im Mittel jedoch kaum von Bedeutung sind.

Für den dargestellten Spezialfall eines durch vier Referenzknoten begrenzten Feldes kann aufgrund der vorgestellten Ergebnisse konstatiert werden, dass eine Verschiebung der CL Schätzpunkte in die tatsächlichen Flächenschwerpunkte eine deutliche Steigerung der Genauigkeit der Positionsschätzung bewirkt. Für eine effiziente Umsetzung dieser Verschiebung stehen mehrere nahezu gleichwertige Verfahren zur Verfügung. Das Verfahren der linearen Annäherung stellt dabei eines der flexibelsten dar, welches nahezu der Genauigkeit



(a) CL-Verfahren



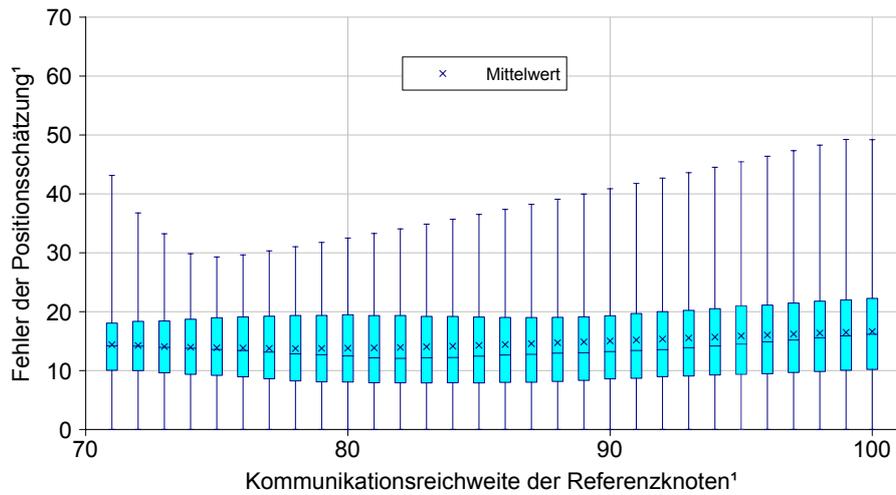
(b) lineare Näherung

¹ normiert auf die Gitterweite L_B

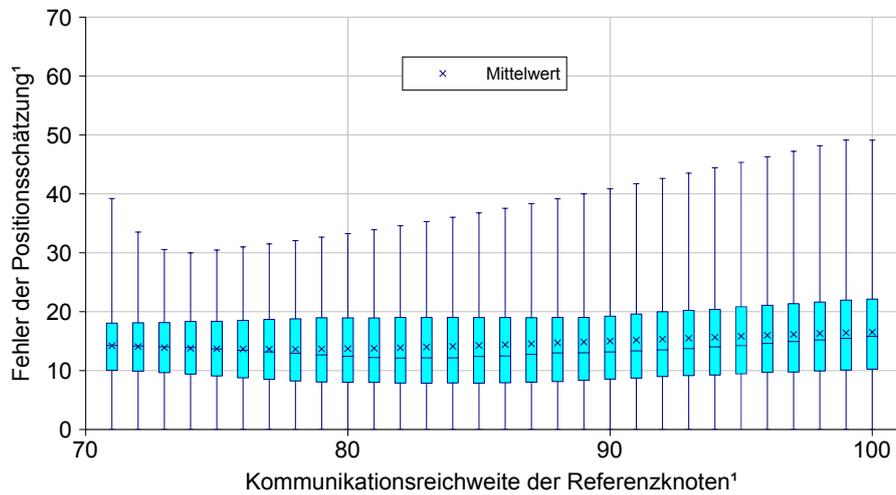
Abbildung 3.19: Statistischer Vergleich der Positionsschätzungsfehler in Abhängigkeit von der Kommunikationsreichweite bei Anwendung der SBCL Ansätze auf Kegel-, Seiten- und Eckzelle.

der realen Schwerpunkte entspricht. Gleiche Genauigkeit bei größerer Flexibilität bietet aufgrund der einfacheren Erweiterbarkeit der Ansatz des linearen Ausgleichs.

Bei einer Anwendung des Korrekturansatzes auf eine größere Fläche mit einer entsprechend höheren Zahl an Referenzknoten treten die Effekte, welche durch die Anpassung der Seiten- und Eckzellen erreicht werden, in den Hintergrund. In diesem Fall profitiert das Verfahren ausschließlich von der Anpassung der Kegelzellen. Die in Abbildung 3.20 dargestellten



(c) virtuelle Referenzknoten



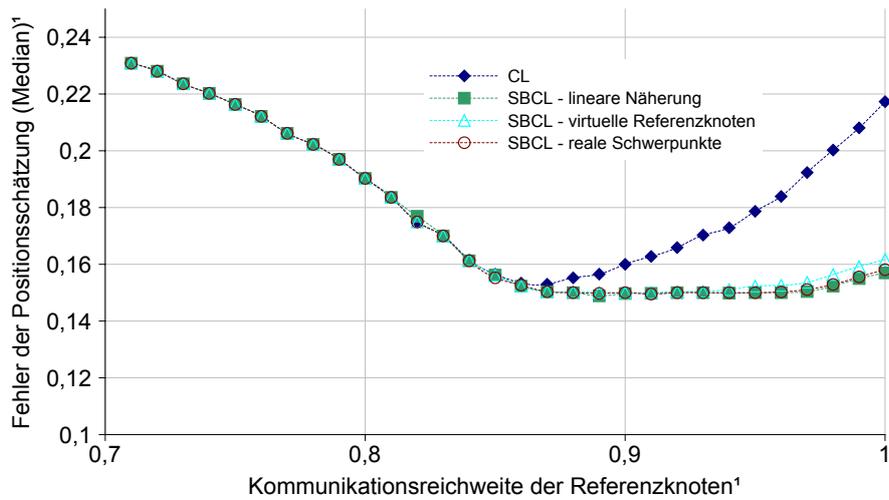
(d) reale Schwerpunkte

¹ normiert auf die Gitterweite L_B

Abbildung 3.19: Statistischer Vergleich der Positionsschätzungsfehler in Abhängigkeit von der Kommunikationsreichweite bei Anwendung der SBCL Ansätze auf Kegel-, Seiten- und Eckzelle.

Ergebnisse spiegeln die erreichbare Genauigkeit für diesen Fall wider. Für die Simulation wurde auf die Anpassung von Seiten- und Eckzellen verzichtet.

Anhand der Abbildung ist zu erkennen, dass der Einfluss der Kegelzellen bei niedriger Kommunikationsreichweite äußerst gering ist. Erst ab einer Kommunikationsreichweite entsprechend in etwa 87 % der Gitterweite, zeigt sich der Einfluss der Schwerpunktkorrektur.



¹ normiert auf die Gitterweite L_B

Abbildung 3.20: Vergleich der medianen Positionsschätzfehler bei Anwendung der SBCL Ansätze auf die Kegelzellen.

Dennoch ist gerade bei einer hohen Kommunikationsreichweite eine deutliche Steigerung der Genauigkeit der Positionsschätzung zu verzeichnen.

3.3.3.5 Nachbetrachtung

Kommunikationsreichweite Aufgrund der Einfachheit der Algorithmen wurde sowohl in der Modellbildung als auch in der Simulation das idealisierte Modell einer kreisförmigen Kommunikationsreichweite angenommen. Obwohl dieses Modell in der Regel nicht der realen Signalausbreitung entspricht, konnte in Untersuchungen des zugrunde liegenden CL eine ausreichende Übereinstimmung der auftretenden Überlappungsgebiete festgestellt werden [BHE00]. Es wurde daher auch in dieser Arbeit verwendet, um die vorgestellten Verfahren mit dem zugrunde liegenden CL zu vergleichen. In der Realität sind daher fehlerhafte Zuordnungen zu den auftretenden Zellen zu erwarten, welche die dargestellten Algorithmen jedoch gleichermaßen betreffen. Darüber hinaus konnte in [BRT06] gezeigt werden, dass die absolute Kommunikationsreichweite, welche in diesem Verfahren zum Tragen kommt, weit weniger von der idealisierten Modellvorstellung abweicht, als die auftretende Signalstärke.

3.3.4 Weiterentwicklungen und Ausblicke

Ähnliche Arbeiten Der Einfluss und die Bedeutung der verbesserten approximativen Lokalisierung mittels AWCL zeigt sich anhand zahlreicher Referenzierungen. So wird in [FB09] eine reale Sensornetzwerkanwendung beschrieben, in der neben weiteren Algorithmen auch AWCL zur Positionsbestimmung verwendet wurde. Bei den durchgeführten Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass AWCL von allen untersuchten Algorithmen, darunter WCL und mehrere Least Squares Ansätze, die besten Lokalisierungsergebnisse bietet. Durch eine zusätzliche Anpassung des Verfahrens konnten die Autoren darüber hinaus eine weitere Verbesserung erreichen.

Inspiziert durch AWCL, dessen Vorgänger und weitere Algorithmen wird in [LB09] ein als Relative Span Weighted Centroid Localization (RWL) bezeichneter Algorithmus vorgestellt und erfolgreich getestet. Der Algorithmus arbeitet ebenfalls mit dem minimal auftretenden Gewicht. Dieses wird von allen Gewichten einmalig subtrahiert. Der RWL stellt daher einen Spezialfall des AWCL dar, wobei ein Reduktionsanteil von $q = 100\%$ gewählt wurde.

Bekannte Schwächen Auf CL basierende Verfahren besitzen zwei grundlegende Schwächen, welche abhängig von der Netzwerktopologie auftreten können. Eine Schwachstelle betrifft die sogenannten Randeffekte. Befindet sich ein Blindknoten nahe genug an einem Rand des Netzwerks, so kann es vorkommen, dass dieser aus dem Inneren des Netzwerks eine Reihe von Referenzknoten empfängt, während er von außerhalb des Netzes keine Ortsinformationen erhält. In einem solchen Fall kann ein Übergewicht der empfangbaren Referenzknoten dazu führen, dass die Schätzposition des Blindknotens in Richtung der Netzwerkmitte gezogen wird. Im Randbereich eines Netzwerks kann die Positionsschätzung so selbst unter Idealbedingungen wie einer regelmäßigen Anordnung der Referenzknoten und einem idealen Signalstärkeverlauf von der Positionsschätzung an vergleichbaren Positionen im Kern des Netzwerks abweichen. Im Rahmen des SBCL-Verfahrens wurde durch zusätzliches Wissen die Positionsschätzung im Randbereich verbessert. Eine weitere Möglichkeit, dieses Problem zu bekämpfen, besteht darin, zusätzliche Referenzknoten außerhalb des eigentlichen Netzwerks zu platzieren. Ist dies nicht möglich, so können wie in [BSG⁺09] beschrieben situationsabhängig virtuelle Referenzknoten erzeugt oder reale Referenzknoten unterdrückt werden.

Eine weitere Schwäche kann vor allem bei zufälliger Verteilung der Referenzknoten auftreten und betrifft die ungleichmäßige Anordnung, welche zu einer Übergewichtung einer Position oder Richtung führen kann. Zur Illustration dieses Problems sei das in Abbildung 3.21

dargestellte Minimalbeispiel gegeben, bei dem sich zwei Referenzknoten auf nahezu der gleichen Position befinden. Bei Verwendung eines auf CL basierenden Lokalisierungsverfahrens würde die Schätzposition des Blindknotens mit doppelter Gewichtung in die Richtung der zwei Referenzknoten gezogen. Um diese und andere Effekte abzuschwächen, kann der Abstand der Referenzknoten zueinander als zusätzliches Gewicht verwendet werden. Wird jeder Referenzknoten mit der Summe der Distanzen gewichtet, die er zu den übrigen in der Positionsschätzung verwendeten Referenzknoten aufweist, so kann das bestehende Übergewicht verschoben oder gar aufgehoben werden.



Abbildung 3.21: Beispielszenario zur Illustration der durch ungünstige Topologie verursachten Wichtungsfehler in CL basierten Verfahren.

Netzrekonstruktion Eine weitere Herausforderung drahtloser Sensornetzwerke, welche auf den ersten Blick nur wenig mit der Positionsbestimmung gemein hat, besteht darin, durch Ausfälle entstandene Lücken in der Kommunikation, welche in Extremfällen eine Partitionierung des Netzwerks bedeuten, mit Hilfe von mobilen Sensorknoten zu schließen. Treten mobile Knoten im Netzwerk auf, so wird häufig von Mobile Sensor Networks (MSNs) oder Wireless Sensor and Actuator Networks (WSANs) gesprochen. Zur Lösung dieses Problems existieren sowohl zentralisierte Ansätze mit optimaler Lösung [SSSA11] als auch verteilte [SAY07] sowie heuristische Ansätze [AYA09]. Auch bei dieser Problemstellung kann der in WCL verwendete Ansatz des gewichteten Mittelwertes eine effiziente und zudem vollständig verteilte, dezentrale Lösung bieten. So besteht ein möglicher Lösungsansatz in einer Art invertiertem WCL, bei dem ein mobiler Knoten von anderen Nachbarknoten umso stärker abgestoßen wird, je geringer deren Abstand ist. Auf diese Art ließe sich, wie in Gleichung (3.13) dargestellt, für jeden mobilen Knoten m_i ein Verschiebevektor \mathbf{v}_i in Abhängigkeit von der maximal zulässigen Kommunikationsreichweite R_K ermitteln. Zur Ermittlung der Bewegung wird die Menge N_i der mit n bezeichneten Nachbarknoten mit bekannter Position verwendet. Aus Gründen der Darstellung wird weiterhin der Hilfsvektor d_{ij} verwendet, welcher den Distanzvektor zwischen dem mobilen Knoten m_i und dessen Nachbarknoten n_i darstellt.

$$\mathbf{d}_{ij} = \begin{pmatrix} m_{i(x)} \\ m_{i(y)} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} n_{j(x)} \\ n_{j(y)} \end{pmatrix} \quad (3.13a)$$

$$\begin{pmatrix} v_{i(x)} \\ v_{i(y)} \end{pmatrix} = \frac{1}{|N_i|} \sum_{j \in I(N_i)} \mathbf{d}_{ij} \left(\frac{R_K}{\|\mathbf{d}_{ij}\|} - 1 \right) \quad (3.13b)$$

Die so gefundene Gleichung ließe sich wiederum um eine Gewichtung, welche für eine realistische Anwendung die Signalempfangsstärke berücksichtigt, wie in Gleichung (3.14) gezeigt, erweitern. Auf dieser Grundlage kann nun auch der Einfluss einer dem AWCL entsprechenden Anpassung untersucht werden.

$$\begin{pmatrix} v_{i(x)} \\ v_{i(y)} \end{pmatrix} = \left(\sum_{j \in I(N_i)} w_{ij} \right)^{-1} \sum_{j \in I(N_i)} \mathbf{d}_{ij} \left(\frac{R_K}{\|\mathbf{d}_{ij}\|} - 1 \right) w_{ij} \quad (3.14a)$$

$$w_{ij} = RSSI_{ij} \quad (3.14b)$$

Bei einer Verfolgung dieses Verfahrens müsste über den dargestellten Ansatz hinaus darauf geachtet werden, dass auch bei ungünstiger Konstellation eine gegensätzliche Bewegung mobiler Knoten nicht dazu führt, dass diese außer Reichweite geraten. Desweiteren wäre die Einführung eines Schwellenwertes oder eines anderen Kriteriums sinnvoll, welches eine Entscheidung zur Notwendigkeit einer Verschiebung ermöglicht.

Kooperative Verfahren Die vorgestellten Verfahren auf Basis der Mittelwertberechnungen erfüllen in der dargestellten Form den Charakter egoistischer Verfahren. Um eine Lokalisierung auch dann zu ermöglichen, wenn sich nur unzureichend viele Referenzknoten in Reichweite eines Blindknoten befinden, lassen sich diese Verfahren jedoch einfach zu kooperativen Verfahren erweitern. Der einfachste Ansatz stellt hier die Verwendung von Hop-Distanzen anstelle von direkt ermittelten Distanzen dar. Ein Blindknoten müsste dazu die Nachrichten der in Reichweite befindlichen Referenzknoten entsprechend weiterleiten und mit einem Hop-Count versehen. Darüber hinaus können einmal lokalisierte Blindknoten ihre berechnete Position an andere Blindknoten weitergeben, welche diese dann mit einer ggf. geringeren Gewichtung verwenden können. Das Mittel der Kooperation ermöglicht

es Blindknoten auch, Information darüber zu erlangen, welche Referenzknoten sie nicht empfangen und diese ggf. negativ in ihre Berechnung eingehen zu lassen.

Selektive Verwendung von Referenzknoten Bei der Verwendung des AWCL hängt die Wirkung des Reduktionsanteils entscheidend von dem Gewicht des Referenzknotens ab, welcher das geringste Gewicht besitzt. Daher macht es bei diesem Algorithmus mehr als bei anderen Algorithmen Sinn, die Auswirkungen einer Selektion der Referenzknoten zu untersuchen. In dem speziellen Fall bietet es sich an, weit entfernte Referenzknoten mit sehr geringem Einfluss aus der Berechnung auszuschließen, wodurch der Effekt der in AWCL praktizierten Reduzierung bei den übrigen Referenzknoten stärker zum Tragen kommt.

Adaptives SBCL Durch das im Abschnitt 3.3.3 beschriebene SBCL-Verfahren konnte für den dort beschriebenen Spezialfall einer durch vier Referenzknoten begrenzten Fläche eine wesentliche Steigerung der Genauigkeit der Positionsschätzung gegenüber dem zugrunde liegenden CL-Verfahren erzielt werden. Eine Korrektur des Schwerpunktes wie in SBCL beschrieben ist jedoch auch in anderen Fällen vorteilhaft. So sollten die Schätzpositionen von Seiten- und Eckzelle immer dann korrigiert werden, wenn die Zellen durch Gebietsgrenzen eingeschränkt werden. Eine Korrektur der Kegelizele stellt darüber hinaus unabhängig von Gebietsgrenzen eine Verbesserung dar. Das als linearer Ausgleich beschriebene SBCL-Verfahren ermöglicht es, durch nachfolgend beschriebene Modifikationen den Korrekturansatz auf eine beliebige Zahl regelmäßig angeordneter Referenzknoten zu erweitern.

Um eine allgemeingültige Korrektur der Kegelizele zu erhalten, muss die Richtung der Korrektur durch den Blindknoten bestimmt werden. Dies kann durch die Ermittlung eines in Gleichung (3.15) dargestellten Richtungsvektors \mathbf{e}_i , unter Verwendung der CL Schätzposition realisiert werden.

$$\mathbf{e}_i = 3 \left(\left[\frac{1}{L_B} \frac{1}{|B_i|} \sum_{j \in I(B_i)} \begin{pmatrix} b_{j(x)} \\ b_{j(y)} \end{pmatrix} \right] - \frac{1}{L_B} \frac{1}{|B_i|} \sum_{j \in I(B_i)} \begin{pmatrix} b_{j(x)} \\ b_{j(y)} \end{pmatrix} \right) \quad (3.15)$$

Der Betrag des Korrekturvektors wird weiterhin durch die in Gleichung (3.10a) gegebene Distanzfunktion $c_K(R_{KB})$ durch die Referenzknoten vorgegeben. Die Bestimmung der korrigierten Schätzposition erfolgt durch Gleichung (3.16a). Für die Anpassung der Korrektur von Seiten- und Eckzelle ist es Aufgabe der Referenzknoten, darüber zu informieren, ob diese sich an einer Gebietsgrenze befinden und daher eine Korrektur erforderlich ist. Da im

Fall einer Eckzelle diese mit genau einem Referenzknoten b_j assoziiert ist, kann dieser den Korrekturvektor $\mathbf{c}_{j,1}$ direkt anpassen. Die Positionsschätzung erfolgt in der beschriebenen Form gemäß Gleichung (3.16b). Im Fall einer Seitenzelle hingegen hilft die Verwendung eines Entscheidungsvektors \mathbf{g}_j der vom Referenzknoten b_j bereitgestellt wird. Dieser trägt in der jeweiligen Komponente eine Eins, wenn eine Korrektur entlang dieser Dimension erfolgen soll bzw. eine Null, wenn eine Korrektur in dieser Dimension nicht erforderlich ist. Durch elementweise Multiplikation der Entscheidungsvektoren mit dem resultierenden Korrekturvektor kann die Korrektur seitens des Blindknotens gesteuert werden. Die Ermittlung der Schätzposition einer Seitenzelle ist in Gleichung (3.16c) dargestellt.

$$\begin{pmatrix} u_{i(x)} \\ u_{i(y)} \end{pmatrix} = \frac{1}{|B_i|} \sum_{j \in I(B_i)} \begin{pmatrix} b_{j(x)} \\ b_{j(y)} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e_{i(x)} \\ e_{i(y)} \end{pmatrix} \circ \begin{pmatrix} c_K(R_{KB}) \\ c_K(R_{KB}) \end{pmatrix} \quad (3.16a)$$

$$\begin{pmatrix} u_{i(x)} \\ u_{i(y)} \end{pmatrix} = \frac{1}{|B_i|} \sum_{j \in I(B_i)} \begin{pmatrix} b_{j(x)} \\ b_{j(y)} \end{pmatrix} + \sum_{j \in I(B_i)} \mathbf{c}_{j,1} \quad (3.16b)$$

$$\begin{pmatrix} u_{i(x)} \\ u_{i(y)} \end{pmatrix} = \frac{1}{|B_i|} \sum_{j \in I(B_i)} \begin{pmatrix} b_{j(x)} \\ b_{j(y)} \end{pmatrix} + \sum_{j \in I(B_i)} \begin{pmatrix} c_{j,2(x)} \\ c_{j,2(y)} \end{pmatrix} \circ \prod_{j \in I(B_i)} \mathbf{g}_j \quad (3.16c)$$

Zur Verdeutlichung der Funktionsweise der Korrektur- und Entscheidungsvektoren dient das in Abbildung 3.22 illustrierte Beispiel. Die in diesem Beispiel notwendigen Belegungen der Vektoren sind in Tabelle 3.4 dargestellt.

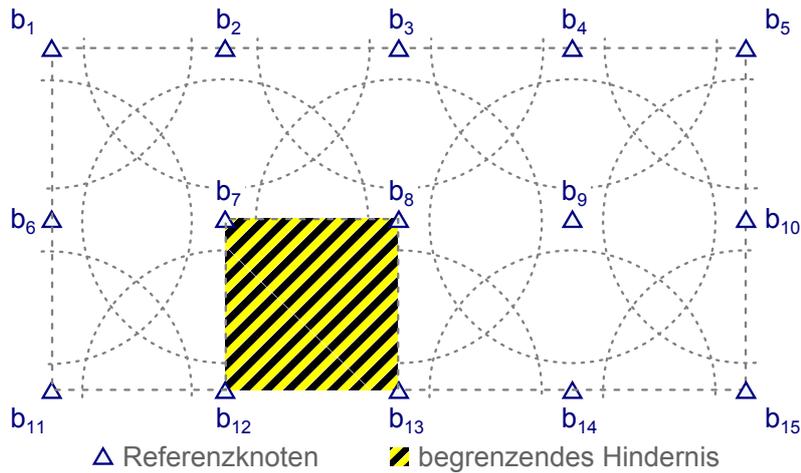


Abbildung 3.22: Beispielszenario zur Illustration der Adaptivität des SBCL-Ansatzes mit linearem Ausgleich.

Referenzknoten	$c_{1(x)}$	$c_{1(y)}$	$c_{2(x)}$	$c_{2(y)}$	$c_{3(x)}$	$c_{3(y)}$	$g(x)$	$g(y)$
b_1	$+c_E$	$-c_E$	$+c_S$	$-c_S$	c_K	c_K	1	1
b_2, b_3, b_4	0	$-c_E$	0	$-c_S$	c_K	c_K	0	1
b_5	$-c_E$	$-c_E$	$-c_S$	$-c_S$	c_K	c_K	1	1
b_6	$+c_E$	0	$+c_S$	0	c_K	c_K	1	1
b_7	0	0	$-c_S$	$+c_S$	c_K	c_K	1	1
b_8	0	0	$+c_S$	$+c_S$	c_K	c_K	1	1
b_9	0	0	0	0	c_K	c_K	0	0
b_{10}	$-c_E$	0	$-c_S$	0	c_K	c_K	1	0
b_{11}, b_{13}	$+c_E$	$+c_E$	$+c_S$	$+c_S$	c_K	c_K	1	1
b_{12}, b_{15}	$-c_E$	$+c_E$	$-c_S$	$+c_S$	c_K	c_K	1	1
b_{14}	0	$+c_E$	0	$+c_S$	c_K	c_K	0	1

Tabelle 3.4: Belegung der Korrektur- und Entscheidungsvektoren des adaptiven SBCL für das in Abbildung 3.22 dargestellte Beispielszenario.

SBCL für andere CL-basierte Verfahren Als distanz-freies Verfahren stellt sich das CL-Verfahren als besonders geeignet für eine Anpassung nach dem SBCL-Ansatz dar, da Blindknoten innerhalb einer Zelle auf eine einzige Position geschätzt werden. Diese Position lässt sich mittels SBCL optimal anpassen. Die dargestellten Zelltypen treten jedoch auch bei verwandten Algorithmen wie dem WCL-Verfahren oder dem AWCL-Verfahren auf. Zwar werden die Blindknoten einer Zelle in diesem Fall nicht auf eine feste Position geschätzt, dennoch zeigt sich, dass die Positionsschätzung der Knoten innerhalb einer Zelle in Richtung eines bestimmten Punktes deuten. Daher ist es auch in diesem Fall angebracht, eine Korrektur der berechneten Position durchzuführen.

3.4 Exakte Lokalisierung

3.4.1 Ausgangsverfahren

Die nachfolgend beschriebenen Verfahren der exakten Lokalisierung basieren auf dem als DLS bezeichneten Positionsbestimmungsverfahren [RBTB06]. Diese Methode nutzt das in Kapitel 2.2.6 beschriebene Prinzip der Multilateration und verwendet zur Lösung des überbestimmten Gleichungssystems die Methode der kleinsten Quadrate. Zur Positionsbestimmung befinden sich zufällig verteilte Referenzknoten innerhalb des Sensornetzwerks. Die Zahl der zu lokalisierenden Blindknoten übersteigt in der Regel die Zahl der Referenzknoten. Zudem kann von einer Mobilität der Blindknoten ausgegangen werden.

Für die Linearumformung des Gleichungssystems wird beim DLS-Ansatz die Methode mittels Linearisierer verwendet, bei der eine der Gleichungen von allen anderen Gleichungen subtrahiert wird. Der Referenzknoten aus dieser Gleichung wird nachfolgend als Linearisierer b_L bezeichnet. Das resultierende lineare Gleichungssystem besitzt die in Gleichung (3.17) angegebene Form. Zur Berechnung der gesuchten Position \mathbf{u} dienen einerseits die Positionen \mathbf{b}_i und \mathbf{b}_L der in der Menge B zusammengefassten Referenzknoten, und andererseits die zu ermittelnden Abstände d_{ui} sowie d_{uL} zwischen Blindknoten und Referenzknoten. Weiterhin werden die Abstände d_{iL} zwischen den Referenzknoten b_i und dem als Linearisierer verwendeten Referenzknoten b_L verwendet, welche sich aus den Positionen der Referenzknoten ergeben.

$$\frac{1}{2} [d_{uL}^2 + d_{iL}^2 - d_{ui}^2] = \sum_{d=1}^{dim} (u_{(d)} - b_{L(d)}) (b_{i(d)} - b_{L(d)}) \quad (3.17)$$

Das derart angepasste Gleichungssystem lässt sich in der in Gleichung (3.18a) dargestellten Matrixschreibweise mit den in Gleichung (3.18b) gegebenen Entsprechungen darstellen.

$$\mathbf{A}\alpha = \mathbf{b} \quad (3.18a)$$

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} b_{k_1(x)} - b_{L(x)} & b_{k_1(y)} - b_{L(y)} \\ \vdots & \vdots \\ b_{k_n(x)} - b_{L(x)} & b_{k_n(y)} - b_{L(y)} \end{pmatrix}, \quad (3.18b)$$

$$\alpha = \begin{pmatrix} u_{(x)} - b_{L(x)} \\ u_{(y)} - b_{L(y)} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{b} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} d_{uL}^2 + d_{k_1L}^2 - d_{uk_1}^2 \\ \vdots \\ d_{uL}^2 + d_{k_nL}^2 - d_{uk_n}^2 \end{pmatrix}$$

Die Indizierung der Referenzknoten erfolgt an dieser Stelle durch die Indexmenge $K = \{k_1, k_2, \dots, k_n\} = \{I(B) \setminus L\}$. Die Menge $I(B)$ stellt die Indizes der in der Menge B zusammengefassten, zur Positionsbestimmung verwendeten Referenzknoten dar. An dieser Stelle erfolgt aus Gründen der Darstellung eine Einschränkung auf zwei mit x und y bezeichnete Dimensionen.

Die Lösung des Gleichungssystems durch die Methode der kleinsten Quadrate, dargestellt in Gleichung (3.19a), erfolgt mit Hilfe der Normalgleichungen gemäß Gleichung (3.19b).

$$\min_{\alpha} \|\mathbf{A}\alpha - \mathbf{b}\| \quad (3.19a)$$

$$\alpha = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{b} \quad (3.19b)$$

Die spezielle Charakteristik des DLS besteht darin, dass die dargestellte Positionsbestimmung weder auf dem Blindknoten noch auf der Senke stattfindet. Beide Ansätze bergen jeweils eigene Nachteile. Eine vollständige Berechnung auf dem Blindknoten ist aufgrund der beschränkten Ressourcen häufig nicht oder nur mit erhöhtem zeitlichen und energetischen Aufwand möglich. Für eine Berechnung auf der Senke hingegen müssten für jede Lokalisierung die spezifischen Messdaten des Blindknotens an die Senke sowie anschließend die berechnete Position an den Blindknoten übertragen werden. Dies erfordert vor allem Zeit und Energie. Der DLS-Ansatz verfolgt daher eine Zweiteilung der Berechnung. Zu diesem Zweck werden Berechnungsschritte, welche unabhängig von den Messdaten der Blindknoten sind, in der in Gleichung (3.20) dargestellten Vorberechnung auf der Senke ausgeführt. Die Ergebnisse dieser Berechnungen werden anschließend an die Blindknoten übertragen.

$$\mathbf{A}_p = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T, \mathbf{d}_p = \begin{pmatrix} d_{k_1 L}^2 \\ \vdots \\ d_{k_n L}^2 \end{pmatrix} \quad (3.20)$$

In einer von den Blindknoten durchgeführten Nachberechnung bestimmen diese unter Einbeziehung der von ihnen ermittelten Abstände zu den Referenzknoten ihre eigene Position. Die Nachberechnung ist in Gleichung (3.21) festgehalten. Die Position des Linearisierers kann wahlweise durch die Senke oder den Linearisierer selbst bereitgestellt werden. Hierzu wird in der Beschreibung des Verfahrens keine Aussage getroffen.

$$\begin{pmatrix} u(x) \\ u(y) \end{pmatrix} = \mathbf{A}_p \frac{1}{2} \left(\begin{pmatrix} d_{uL}^2 - d_{uk_1}^2 \\ \vdots \\ d_{uL}^2 - d_{uk_n}^2 \end{pmatrix} + \mathbf{d}_p \right) + \mathbf{b}_L \quad (3.21)$$

Der algorithmische Ablauf des DLS-Verfahrens besteht im Wesentlichen aus vier Schritten, welche sich, wie in Abbildung 3.23 dargestellt, auf Referenzknoten, Senke und Blindknoten verteilen. In der Initialisierungsphase findet die Übertragung der Positionen der Referenz-

knoten an die Senke statt. In der anschließenden Phase wird genau eine Vorberechnung durch die Senke erstellt. Diese wird in der Kommunikationsphase an die Blindknoten übermittelt. In der gleichen Phase empfangen die Blindknoten Informationen von den Referenzknoten, welche ihnen eine Distanzschätzung erlauben. Abschließend wird in der Nachberechnungsphase die gesuchte Position seitens der Blindknoten berechnet. Wie in Abbildung 3.23 dargestellt, sollte neben der eigentlichen Vorberechnung zusätzlich ein Vektor \mathbf{v}_{ID} übertragen werden, welcher die Zuordnung der von den Referenzknoten empfangenen Informationen zu den Komponenten der Vorberechnung in der Nachberechnungsphase ermöglicht.

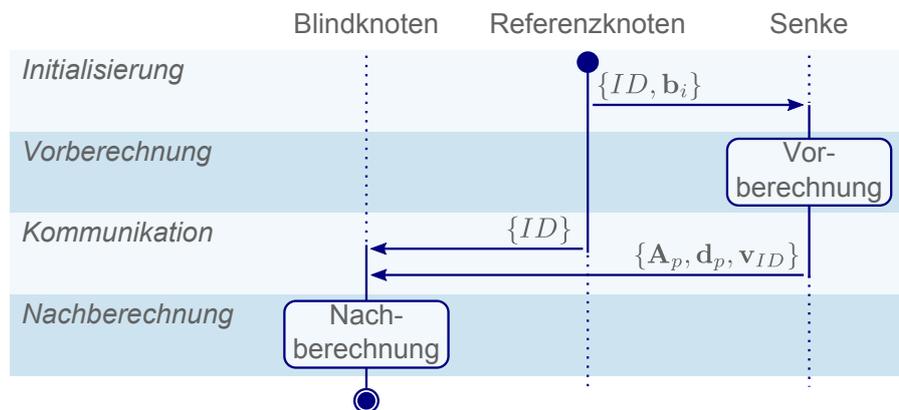


Abbildung 3.23: Algorithmische Darstellung des DLS-Verfahrens in vier Phasen.

3.4.2 Das sDLS Verfahren

3.4.2.1 Motivation

Das eingangs beschriebene DLS-Verfahren bietet durch die Verteilung der Gesamtberechnung auf Senke und Blindknoten eine Reihe von Vorteilen. So werden die Blindknoten lediglich durch eine moderate Nachberechnung belastet und die für die Nachberechnung notwendigen Daten, welche von den Blindknoten ermittelt wurden, müssen nicht zur Senke übermittelt werden. Erweitert man die Algorithmenbeschreibung dahingehend, dass die einmal erstellte Vorberechnung abrufbereit auf den Referenzknoten gespeichert wird, so bietet das Verfahren zudem eine kurze Reaktionszeit, um eine Positionsermittlung durchzuführen.

Neben diesen Vorteilen ergeben sich bei näherer Betrachtung jedoch auch einige Nachteile. Diese resultieren aus der Eigenschaft, dass das DLS-Verfahren für das gesamte Netzwerk lediglich eine Vorberechnung vorsieht. Diese Vorberechnung beinhaltet alle im Netzwerk

enthaltenen Referenzknoten, welche an dieser Stelle in der Menge B_{Net} zusammengefasst werden. Dieser Umstand bedingt, dass die Vorberechnung umso umfangreicher ist, je mehr Referenzknoten im Netzwerk enthalten sind, bzw. je größer das Netzwerk ist. Die nachfolgende Liste nennt die daraus resultierenden Problemstellungen:

Kommunikation Die aus der Vorberechnung resultierenden Daten müssen im gesamten Netzwerk verteilt werden. Der Aufwand der Kommunikation steigt mit der Größe des Netzwerks.

Berechnung Durch die Verwendung sämtlicher Referenzknoten in der Vorberechnung müssten diese auch in der Nachberechnung berücksichtigt werden. Der Berechnungsaufwand für die Blindknoten steigt mit der Größe des Netzwerks.

Anwendbarkeit Für die Realisierung der Nachberechnung benötigt ein Blindknoten eine Distanzschätzung zu allen in der Vorberechnung enthaltenen Referenzknoten. Eine direkte Distanzschätzung mittels Signalempfangsstärke, wie sie häufig angenommen wird, ist in großen Netzwerken lediglich für einen Bruchteil der Referenzknoten möglich. Eine alternative Distanzschätzung, beispielsweise mittels DV-Hop, lässt sich hingegen nur mit extremem Aufwand und mit einer höheren Ungenauigkeit realisieren. Das DLS-Verfahren ist daher nur bis zu einer bestimmten Netzwerkgröße anwendbar.

Gewichtung Aufgrund der verwendeten Linearumformung mittels Linearisierer gehen die Referenzknoten mit einfacher Wichtung in die Positionsberechnung ein. Der Linearisierer tritt hingegen in jeder Gleichung des Gleichungssystems auf und geht daher mit mehrfacher Gewichtung in die Berechnung ein. Der Einfluss des Linearisierers und der damit verbundenen Ungenauigkeit der Distanzschätzung steigt mit der Größe des Netzwerks.

Insbesondere die Problematik der Anwendbarkeit erfordert die Entwicklung neuer Algorithmen, welche die Grundidee der mehrgeteilten Berechnung fortführen und gleichzeitig die aufgeführten Probleme bekämpfen. Zwar besteht mit dem als Mobile Distributed Least Squares (mDLS) [RLT08] bezeichneten Ansatz bereits ein Verfahren, welches die Möglichkeit der Anpassung einzelner Zeilen der Vorberechnung demonstriert, dieses stellt jedoch aus mehreren Gründen keine Alternative zu den nachfolgend beschriebenen Verfahren dar. Zum einen dient das Verfahren dazu, einen kleinen Teil der Vorberechnung aufgrund weniger nicht erreichbarer Referenzknoten anzupassen, und bietet in einem Szenario, in dem eine Distanzschätzung zu einem Großteil der Referenzknoten nicht möglich ist, keine effiziente Alternative zu einer vollständigen Berechnung auf dem Blindknoten. Zum anderen

ist dieses Verfahren nur dann anwendbar, wenn der Linearisierer nicht zu der Menge jener Referenzknoten zählt, zu denen dem Blindknoten keine Distanzschätzung vorliegt. Bei einem Netzwerk mit ausreichender Größe stellt dies jedoch die Ausnahme dar.

3.4.2.2 Algorithmenbeschreibung

Aufgrund der zuvor genannten Problemstellungen besteht die Zielsetzung für den nachfolgend beschriebenen Scalable Distributed Least Squares (sDLS)-Algorithmus in den folgenden Eckpunkten.

1. Jedem Blindknoten soll eine Distanzschätzung zu jenen Referenzknoten möglich sein, welche er für die Positionsschätzung mit Hilfe der ihm bereitgestellten Vorberechnung benötigt.
2. Jedem Blindknoten soll eine Distanzschätzung zu dem verwendeten Linearisierer möglich sein.
3. Die zu einem Blindknoten zu übertragende Datenmenge soll unabhängig von der Größe des Netzes auf eine obere Grenze reduziert werden.
4. Der für die Nachberechnung notwendige Rechenaufwand seitens der Blindknoten soll unabhängig von der Netzgröße auf eine obere Grenze reduziert werden.

Zum Erreichen der genannten Ziele besteht die initiale Idee des sDLS darin, jedem Blindknoten eine individuelle Vorberechnung zur Verfügung zu stellen, welche genau jene Referenzknoten berücksichtigt, die sich in der Kommunikationsreichweite des Blindknotens und damit im Bereich einer direkten Distanzschätzung befinden. Für die Erstellung einer solchen Vorberechnung ist jedoch die Kenntnis über die genaue Position des Blindknotens oder zumindest eine exakte Aussage über die Nachbarschaft des Blindknotens erforderlich. Während die Position des Blindknotens als gesuchte Größe nicht verfügbar ist, widerspricht die Übermittlung von spezifischen zur Lokalisierung bestimmten Daten des Blindknotens an die Senke dem Grundgedanken von DLS. Der kommunikative Aufwand einer individuellen Vorberechnung für jeden Blindknoten überstiege darüber hinaus den Aufwand, welcher notwendig wäre, um die vollständige Berechnung auf der Senke auszuführen.

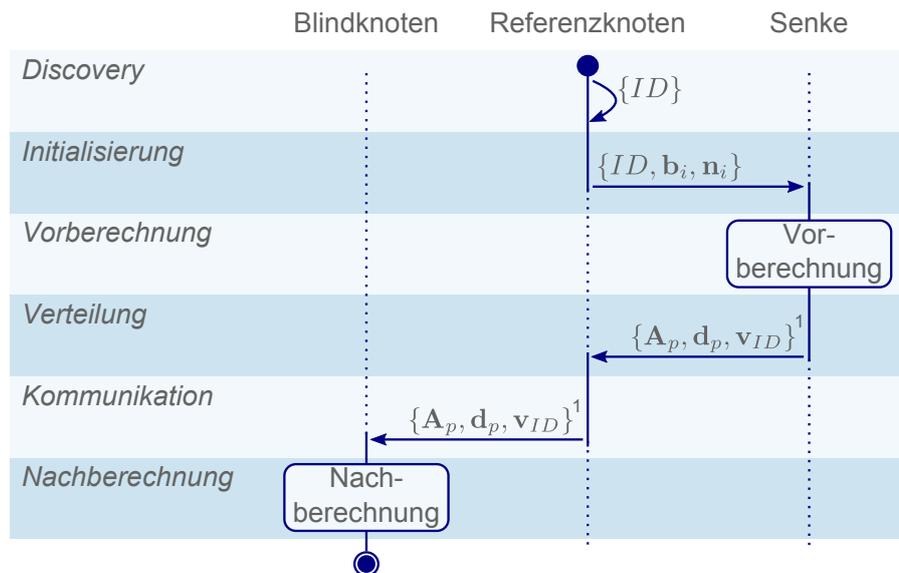
Der durch sDLS praktizierte Ansatz stellt gewissermaßen einen Kompromiss zwischen einer auf den Blindknoten zugeschnittenen und einer netzweiten Vorberechnung dar, wie sie von DLS vorgenommen wird. Um dies zu erreichen, wird jedem Referenzknoten eine individuelle Vorberechnung zugeordnet, welche neben dem Referenzknoten selbst jene Referenzknoten enthält, die sich in dessen Kommunikationsreichweite befinden. Die Menge aus dem

Referenzknoten b_i und dessen in Reichweite befindlichen Nachbarreferenzknoten soll an dieser Stelle mit B_i bezeichnet werden. Zur Durchführung der Positionsbestimmung ist nun jeder Blindknoten angehalten, die Vorberechnung jenes Referenzknotens zu verwenden, welcher den geringsten Abstand zum Blindknoten aufweist. So wird gewährleistet, dass die Menge der Referenzknoten, welche sich in Kommunikationsreichweite des Blindknotens befinden, eine möglichst hohe Übereinstimmung mit der Menge der in der Vorberechnung verwendeten Referenzknoten aufweist.

Trotz dieser Vorgaben ist es zu erwarten, dass einem Blindknoten einerseits zu wenigen Referenzknoten der Vorberechnung keine Distanzschätzung möglich ist, ihm andererseits jedoch zusätzliche Informationen von Referenzknoten vorliegen, welche nicht Teil der Vorberechnung sind. Für die Handhabung solcher Referenzknoten wurden unterschiedliche Strategien entwickelt, die zu verschiedenen Varianten des sDLS geführt haben. Diese unterschiedlichen sDLS-Ansätze, welche nachfolgend detaillierter beschrieben werden, profitieren von einer gezielten Auswahl des Linearisierers. Im Unterschied zu DLS, welches eine zufällige Auswahl des Linearisierers vornimmt, wird bei sDLS jeweils jener Referenzknoten zur Linearumformung verwendet, der auch als Adressat der individuellen Vorberechnung dient. Ein Blindknoten empfängt eine Vorberechnung somit jeweils von dem in der Vorberechnung verwendeten Linearisierer, welcher zusätzlich jener Referenzknoten mit der geringsten Distanz zum Blindknoten ist.

Der algorithmische Ablauf des sDLS-Ansatzes, welcher in Abbildung 3.24 dargestellt ist, weist im Vergleich zum DLS-Verfahren zwei zusätzliche Phasen auf. Er stellt jedoch kein wesentliches Unterscheidungsmerkmal der verschiedenen Varianten des sDLS dar und variiert diesbezüglich lediglich in den übertragenen Daten.

Die erste, sogenannte Discovery Phase stellt bereits ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal zum DLS dar. In diesem Abschnitt findet ein Informationsaustausch der Referenzknoten statt, bei dem Broadcast-Nachrichten an Referenzknoten innerhalb der Kommunikationsreichweite versendet werden. Sie ermöglichen es jedem Referenzknoten, eine Liste der Referenzknoten innerhalb des eigenen Empfangsbereichs zu erstellen. In der anschließenden Initialisierungsphase werden die so gewonnenen Listen zusammen mit der Position der Referenzknoten an die Senke übermittelt. Es folgt die Vorberechnungsphase, in der individuelle Vorberechnungen durch die Senke erstellt werden. Anschließend folgt die Verteilungsphase, innerhalb derer die Vorberechnungen an die jeweils zugehörigen Referenzknoten übertragen werden. Diese werden dort dauerhaft gespeichert, um in der darauf folgenden Kommunikationsphase an Blindknoten innerhalb der jeweiligen Kommunikationsreichweite übertragen zu werden. Die Kommunikationsphase muss dabei keinesfalls



¹ Daten abhängig von der gewählten sDLS Variante

Abbildung 3.24: Algorithmische Darstellung der sDLS Verfahren in sechs Phasen.

direkt an die Verteilungsphase anschließen, sondern kann mit beliebiger Verzögerung, in Intervallen oder auf Anfrage eines Blindknoten stattfinden. Diese Phase dient ebenfalls der Ermittlung von Distanzschätzungen. Da ein Blindknoten bei Verwendung von sDLS von jedem in Reichweite befindlichen Referenzknoten eine Vorberechnung erhält, ist eine separate Nachricht zur Distanzbestimmung wie im Fall von DLS nicht notwendig. In der anschließenden Nachberechnungsphase findet zunächst die Auswahl der Vorberechnung auf der Grundlage der erfolgten Distanzschätzungen statt. Im Anschluss daran erfolgt, abhängig von der jeweiligen sDLS Variante, eine Anpassung von Vorberechnung und/oder Distanzschätzung. Abschließend erfolgt die Berechnung der Schätzposition mit Hilfe der angepassten Eingangsdaten.

sDLS mit Anpassung Die initiale Variante des sDLS, welche an dieser Stelle kurz als Scalable Distributed Least Squares (initial approach) (sDLSⁱ) [BSLT09] bezeichnet werden soll, orientiert sich besonders stark an der eingangs beschriebenen Idealvorstellung einer Vorberechnung, welche genau jene Referenzknoten berücksichtigt, die sich in Reichweite des Blindknotens befinden. Um dies zu erreichen, ist es Aufgabe des Blindknotens, die von ihm ausgewählte Vorberechnung dahingehend anzupassen, Referenzknoten, welche sich außerhalb der Kommunikationsreichweite befinden, aus der Vorberechnung zu entfernen, sowie zusätzliche, in Reichweite befindliche Referenzknoten der Vorberechnung hinzuzu-

fügen. Aufgrund der zuvor beschriebenen Wahl des Linearisierers ist sichergestellt, dass dieser sich in jedem Fall in Reichweite des Blindknotens befindet und eine Anpassung einzelner Zeilen der Matrizen möglich ist.

Um eine solche nachträgliche Anpassung zu ermöglichen, verwendet der sDLSⁱ-Ansatz anstelle der Normalengleichung die in Kapitel 2.2.7 dargestellte QR-Dekomposition zur Lösung des Gleichungssystems. Sie ermöglicht das ebenfalls in Kapitel 2.2.7 dargestellte Updating und Downdating der Matrizen \mathbf{Q} und \mathbf{R} . Durch die Zerlegung der Matrix \mathbf{A} wie in Gleichung (3.22) beschrieben, ergibt sich für die Verwendung von sDLSⁱ eine veränderte Vorberechnung, welche in Gleichung (3.23) dargestellt ist.

$$\mathbf{A} = \mathbf{QR} = \mathbf{Q} \begin{pmatrix} \mathbf{R}_1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.22)$$

$$\mathbf{Q}_p = \mathbf{Q}^T \quad (3.23a)$$

$$\mathbf{R}_p = \mathbf{R}_1 \quad (3.23b)$$

$$\mathbf{d}_p = \begin{pmatrix} d_{k_1L}^2 \\ \vdots \\ d_{k_nL}^2 \end{pmatrix} \quad (3.23c)$$

Wie in allen sDLS-Varianten wird diese Vorberechnung individuell für jeweils einen Referenzknoten erstellt. Die vom Blindknoten zu realisierende Nachberechnung leitet sich aus der in Gleichung (3.24) dargestellten Lösung des Gleichungssystems ab.

$$\mathbf{R}\alpha = \mathbf{Q}^T \mathbf{b} \quad (3.24a)$$

$$\begin{pmatrix} \mathbf{R}_p \\ \mathbf{0} \end{pmatrix} \alpha = \mathbf{Q}_p \frac{1}{2} \left(\begin{pmatrix} d_{uL}^2 - d_{uk_1}^2 \\ \vdots \\ d_{uL}^2 - d_{uk_n}^2 \end{pmatrix} + \mathbf{d}_p \right) \quad (3.24b)$$

Aufgrund des in Gleichung (3.25) dargestellten Aufbaus der verwendeten Matrizen wird für die Ermittlung der Schätzposition nur ein kleiner Teil der Matrix \mathbf{Q}_p verwendet. Unnötige Berechnungsschritte seitens des Blindknotens werden vermieden.

$$\mathbf{R}_p = \begin{pmatrix} r_{1(x)} & r_{1(y)} \\ 0 & r_{2(y)} \end{pmatrix} \quad (3.25a)$$

$$\alpha = \begin{pmatrix} u_{(x)} - b_{L(x)} \\ u_{(y)} - b_{L(y)} \end{pmatrix} \quad (3.25b)$$

$$\mathbf{Q}_p = \begin{pmatrix} \mathbf{q}_1 \\ \mathbf{q}_2 \\ \vdots \end{pmatrix} \quad (3.25c)$$

Die abschließende in Gleichung (3.26) dargestellte Berechnung der Schätzposition erfolgt in zwei Schritten, wobei zunächst eine Koordinate ermittelt wird, welche anschließend bei der Ermittlung der zweiten Koordinate Verwendung findet.

$$u_{(y)} = \frac{1}{r_{2(y)}} \frac{\mathbf{q}_2}{2} \left(\begin{pmatrix} d_{uL}^2 - d_{uk_1}^2 \\ \vdots \\ d_{uL}^2 - d_{uk_n}^2 \end{pmatrix} + \mathbf{d}_p \right) + b_{L(y)} \quad (3.26a)$$

$$u_{(x)} = \frac{1}{r_{1(x)}} \left(\frac{\mathbf{q}_1}{2} \left(\begin{pmatrix} d_{uL}^2 - d_{uk_1}^2 \\ \vdots \\ d_{uL}^2 - d_{uk_n}^2 \end{pmatrix} + \mathbf{d}_p \right) - r_{1(y)} (u_{(y)} - b_{L(y)}) \right) + b_{L(x)} \quad (3.26b)$$

Wie anschließend in Abschnitt 3.4.2.3 dargestellt wird, konnte durch die Einführung von sDLSⁱ erreicht werden, dass sowohl Kommunikation als auch der Rechenaufwand je Blindknoten durch eine obere Grenze, welche unabhängig von der Anzahl der Referenzknoten ist, beschränkt werden. Die wichtigste Errungenschaft besteht jedoch darin, dass jeder Blindknoten, in dessen Kommunikationsreichweite sich mindestens drei Referenzknoten befinden, eine Positionsschätzung mit Hilfe der gewählten Vorberechnung durchführen kann. Eine aufwendige Distanzschätzung zu allen im Netzwerk befindlichen Referenzknoten über mehrere Hops ist nicht notwendig. Der durch die Anpassung der Vorberechnung anfallende Rechenaufwand ist trotz oberer Begrenzung jedoch verhältnismäßig hoch, was vor allem in kleinen Netzwerken auffällt, in denen sich der Umfang der Vorberechnung von

DLS und sDLS nur geringfügig unterscheiden. Der Rechenaufwand für die Anpassung der Vorberechnung übersteigt den Aufwand der tatsächlichen Positionsbestimmung um ein Vielfaches. Um den Rechenaufwand zu senken, wurden daher weitere Varianten des sDLS-Verfahrens entwickelt.

sDLS ohne Einfügen Eine Möglichkeit, ohne zusätzlichen Aufwand den Umfang der durch den Blindknoten realisierten Nachberechnung zu reduzieren, besteht darin, auf die Anreicherung der Vorberechnung mit zusätzlichen Referenzknoten aus der Kommunikationsreichweite des Blindknotens zu verzichten. Dieser Ansatz wird als Scalable Distributed Least Squares (no insert) (sDLSⁿⁱ) [BST09a] bezeichnet. Durch den dargestellten Verzicht fließen weniger Informationen in die resultierende Positionsschätzung ein als bei Verwendung des sDLSⁱ-Ansatzes, wodurch eine Reduzierung der Genauigkeit zu erwarten ist. Darüber hinaus ist zu beachten, dass zur Positionsschätzung weiterhin die Informationen von mindestens drei Referenzknoten notwendig sind. Das sDLSⁿⁱ-Verfahren berücksichtigt diesen Umstand, indem weiterhin zusätzliche Referenzknoten zur Vorberechnung hinzugenommen werden, sofern dies notwendig ist, um diese Minimalanforderung zu erfüllen.

sDLS ohne Entfernen Ein weitaus schwierigeres Problem als der Verzicht auf zusätzliche Referenzknoten stellt die Handhabung von Referenzknoten dar, welche sich außerhalb der Reichweite des Blindknotens befinden, dessen Positionsdaten jedoch bereits einen Teil der Vorberechnung ausmachen. Um in einem solchen Fall eine Nachberechnung durchführen zu können und eine Positionsschätzung zu erhalten, existieren zwei Lösungsansätze. So kann zum einen die Vorberechnung, wie in sDLSⁱ praktiziert, angepasst werden. Zum anderen besteht die Möglichkeit, die fehlenden Distanzinformationen durch Schätzwerte zu ersetzen. Diesen Ansatz verfolgt die als Scalable Distributed Least Squares (no delete) (sDLSnd) [BST09c] bezeichnete Variante des sDLS.

Ebenso wie sDLSⁱ und sDLSⁿⁱ profitiert auch dieser Ansatz von der dargestellten Wahl des Linearisierers. Da der zur Linearumformung verwendete Referenzknoten mit jenem Referenzknoten übereinstimmt, welchen der Blindknoten als den Referenzknoten mit der kürzesten Distanz ausgewählt hat, ist der euklidische Abstand zwischen Blindknoten und Linearisierer besonders klein. Im Vergleich dazu ist der Abstand zwischen dem Linearisierer und einem Referenzknoten, welcher sich außerhalb der Reichweite des Blindknotens befindet, besonders groß. Wie in Abbildung 3.25 ersichtlich, ist außerdem gewährleistet, dass ein solcher Referenzknoten, außerhalb der Reichweite des Blindknotens, sich nur in einer

beschränkten Richtung befinden kann, welche in etwa der Richtung von Blindknoten zu Linearisierer entspricht.

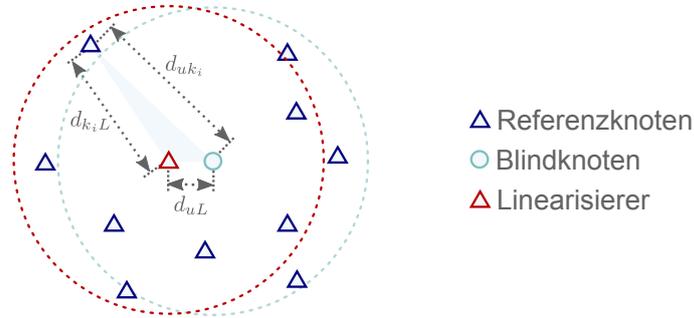


Abbildung 3.25: Darstellung der in sDLS verwendeten Distanzapproximation zur Distanzschätzung nicht direkt erreichbarer Referenzknoten.

Zu dieser geometrischen Voraussetzung kommt hinzu, dass die quadrierte Distanz zwischen Linearisierer und einem beliebigen anderen in der Vorberechnung verwendeten Referenzknoten durch den Vektor \mathbf{d}_p gegeben ist. Zur Lösung der Nachberechnung verwendet der sDLSnd-Ansatz daher die Summe aus dem ermittelten Abstand zwischen Blindknoten und Linearisierer und der durch die Vorberechnung gegebenen Distanz zwischen Linearisierer und Referenzknoten als Distanzschätzung zu diesem Referenzknoten, sofern sich dieser außerhalb der Reichweite des Blindknotens befindet. Die mathematische Umsetzung der in Abbildung 3.25 gezeigten Näherung ist in Gleichung (3.27) dargestellt.

$$d_{uk_i} = d_{uL} + d_{k_iL} = d_{uL} + \sqrt{d_{pk_i}} \quad (3.27)$$

Durch die Verwendung von Referenzknoten außerhalb der Reichweite des Blindknotens fließen, verglichen mit sDLSⁱ und sDLSⁿⁱ, mehr Informationen in die Positionsschätzung ein. Einer möglichen Steigerung der Genauigkeit aufgrund des Informationsgewinns steht jedoch eine mögliche Verschlechterung aufgrund der ungenauen Distanzschätzung gegenüber. Da das Datedating einer Matrix jedoch wesentlich mehr Aufwand erfordert als das Updating, kann durch den sDLSnd-Ansatz eine wesentliche Reduzierung des Rechenaufwandes erzielt werden.

sDLS ohne Anpassung Mit Hilfe der zuvor beschriebenen Varianten des sDLSⁿⁱ und des sDLSnd ist es möglich, jeweils einen von zwei Teilaspekten der Anpassung der Vorberechnung zu umgehen und einen Großteil des Rechenaufwandes einzusparen. Um die Berechnung auf dem Blindknoten auf ein Minimum zu reduzieren, ist eine Kombination

beider Ansätze sinnvoll. Diese einfache Kombination wurde unter der Bezeichnung Scalable Distributed Least Squares (no update) (sDLS^{nu}) [BST10a] veröffentlicht. Da in diesem Fall jedoch, wie in sDLSⁿⁱ beschrieben, weiterhin die Möglichkeit der Anpassung aufrecht erhalten wird, um gegebenenfalls die Vorberechnung derart zu erweitern, dass diese mindestens die Informationen von drei Referenzknoten enthält, ist die zu übertragende Datenmenge je Vorberechnung verhältnismäßig hoch. Vergleicht man die zu übertragende Datenmenge einer sDLS Vorberechnung mit der einer DLS Vorberechnung bei gleicher Anzahl der in der Vorberechnung berücksichtigten Referenzknoten, so kann diese Datenmenge im Falle von sDLS die im Fall von DLS anfallende Datenmenge um ein Vielfaches übersteigen. Der Grund für diesen Unterschied liegt in der Verwendung der QR-Dekomposition. Während die Größe der Matrix \mathbf{A}_p lediglich eine lineare Abhängigkeit von der Zahl der enthaltenen Referenzknoten aufweist, ist die Größe der Matrix \mathbf{Q}_p quadratisch von dieser abhängig. Um eine Reduzierung des Kommunikationsaufwandes zu erreichen, wird bei der als Scalable Distributed Least Squares (normal equation) (sDLS^{ne}) [BST10b] bezeichneten Variante des sDLS die Möglichkeit zur Anpassung der Vorberechnung aufgegeben und zur Verwendung der Normalengleichung zur Lösung des Gleichungssystems zurückgekehrt. Dadurch kann es zu einigen Fällen kommen, in denen eine Positionsschätzung mittels sDLS^{ne} nicht möglich ist, eine Positionsschätzung mit einer der anderen sDLS Varianten hingegen möglich gewesen wäre.

Die dargestellten Varianten des sDLS weisen Unterschiede in den genutzten Lösungsansätzen sowie der verwendeten Anpassung der Vorberechnung auf. Dies resultiert in unterschiedlichen Datenmengen bei den Vorberechnungen sowie unterschiedlichen Mengen an Referenzknoten, welche letztendlich zur Positionsschätzung verwendet werden. Tabelle 3.5 stellt die dargestellten Varianten anhand diverser Gesichtspunkte gegenüber. Hierbei stellen die Mengen B_i und B_u jeweils die Menge der Referenzknoten dar, welche sich in der Reichweite des Referenzknotens b_i bzw. in der Reichweite des Blindknotens u befinden.

3.4.2.3 Evaluation

Zur Evaluation der entwickelten sDLS-Ansätze werden diese anhand vier verschiedener Gesichtspunkte bewertet. So wird zunächst der Prozentsatz der Blindknoten ermittelt, welche eine Positionsschätzung mit Hilfe des jeweiligen Verfahrens durchführen können. Blindknoten, welche ihre Position auf diese Weise nicht ermitteln können, müssten in einer realen Anwendung auf einfachere Verfahren wie das in Kapitel 3.3.2 vorgestellte AWCL-Verfahren oder auf Multihop-Mechanismen zurückgreifen. Dies ist jedoch nicht Gegenstand der erfolgten Untersuchungen. Als weiteres Kriterium dient der Rechenaufwand,

	sDLS ⁱ	sDLS ⁿⁱ	sDLS nd	sDLS ^{ne}
Vorbereitung				
Referenzknoten n_p	$ B_i $	$ B_i $	$ B_i $	$ B_i $
Matrix \mathbf{A}_p ¹	-	-	-	$2(n_p - 1)$
Matrix \mathbf{Q}_p ¹	$(n_p - 1)^2$	$(n_p - 1)^2$	$(n_p - 1)^2$	-
Matrix \mathbf{R}_p ¹	3	3	3	-
Vektor \mathbf{d}_p ¹	$n_p - 1$	$n_p - 1$	$n_p - 1$	$n_p - 1$
Gesamt ¹	$n_p^2 - n_p + 3$	$n_p^2 - n_p + 3$	$n_p^2 - n_p + 3$	$3n_p - 3$
Nachberechnung				
Einfügen	✓	-	✓	-
Entfernen	✓	✓	-	-
Distanzschätzung	-	-	✓	✓
Referenzknoten ²	$ B_u $	$ B_i \cap B_u $	$ B_i \cup B_u $	$ B_i $
Rechenaufwand	sehr hoch	hoch	mittel	niedrig

¹ Anzahl zu übertragender Gleitkommaeinträge² verwendete Referenzknoten nach Anpassung der Vorbereitung

Tabelle 3.5: Vergleich vorgestellter Varianten des sDLS-Verfahrens.

welcher auf einem Blindknoten zur Realisierung der Nachberechnung notwendig ist. Als drittes Bewertungskriterium dient der Kommunikationsaufwand. Rechenaufwand und Kommunikationsaufwand stehen unter dem Einfluss der Anzahl der Referenzknoten, welche im Mittel in eine Positionsschätzung einfließen. Abschließend wird die jeweils erreichte Genauigkeit betrachtet. Als Vergleichsalgorithmus dient der DLS-Algorithmus, welcher auch den Ausgangspunkt der dargestellten Entwicklungen markiert.

Zur Untersuchung der genannten Algorithmen wurde die in Kapitel 2.5 beschriebene erweiterte Version des Prowler/Rmase-Netzwerksimulators verwendet, welche ein realitätsnahes Signalausbreitungsmodell verwendet. In einem simulierten Gebiet mit quadratischer Form wurden Blind- und Referenzknoten sowie eine Senke zufällig verteilt. Anschließend wurde zunächst ein Routingbaum aufgebaut, welcher als Grundlage der Kommunikation für die untersuchten Verfahren diente. Um den Einfluss der Netzwerkgröße zu untersuchen, wurde diese im Rahmen der durch die Rechenkapazität begrenzten Möglichkeiten variiert. Zu jeder untersuchten Netzgröße wurden 100 Simulationen durchgeführt. Die verwendeten Simulationsparameter sind in Tabelle 3.6 zusammengefasst dargestellt.

Erfolgsquote Für eine erfolgreiche Positionsschätzung mittels DLS oder sDLS müssen einerseits nach Anpassung der Vorbereitung die Informationen von mindestens drei Referenzknoten in der Vorbereitung enthalten sein. Andererseits müssen zu allen in der Vorbereitung enthaltenen Referenzknoten Distanzschätzungen vorliegen. Da eine Dis-

Gesamtfläche	50 * 50 m ² ...300 * 300 m ²
Kommunikationsreichweite ¹	30 m
Blindknoten	12...450
Referenzknoten	12...450
Senkenknoten	1
Verteilung der Knoten	zufällig
Anzahl Simulationen	100

¹ Kommunikationsreichweite variiert gemäß des verwendeten Kanalmodells

Tabelle 3.6: Verwendete Simulationsparameter

tanzschätzung über mehrere Hops in großen Netzen äußerst aufwendig wäre, wird an dieser Stelle das Vorliegen einer Distanzschätzung zu einem Referenzknoten angenommen, sofern der betreffende Blindknoten eine von diesem Referenzknoten ausgesandte Nachricht direkt empfängt. Abbildung 3.26 stellt die mittlere Erfolgsquote der beschriebenen Verfahren in Abhängigkeit von der Netzgröße dar.

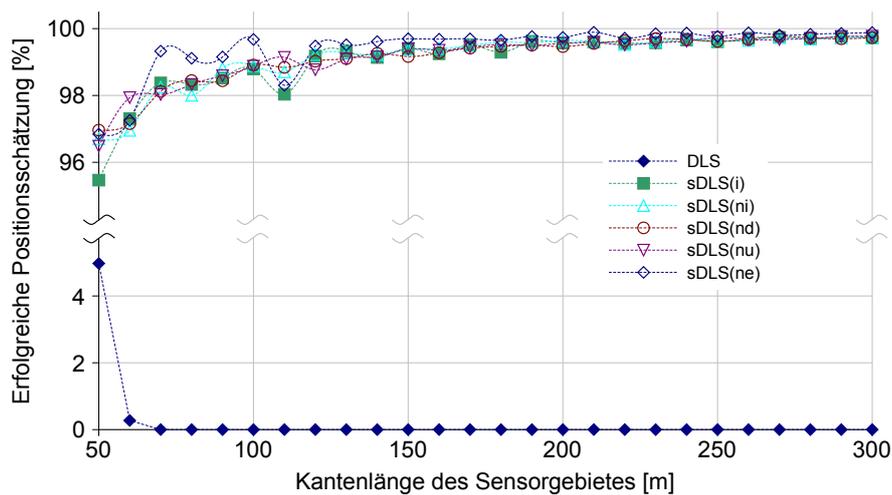


Abbildung 3.26: Vergleich des Anteils an Blindknoten, welche durch Verwendung des jeweiligen Verfahrens zur Schätzung der eigenen Position in der Lage sind.

Für die Verwendung des DLS zeigt sich, dass dieser für kleine Netzwerke in einigen Fällen gerade noch funktioniert. In diesen Fällen existieren wenige Blindknoten, welche sich in der Mitte des Netzwerks befinden und daher alle im Netz befindlichen Referenzknoten in ihrer Kommunikationsreichweite vereinen. Wird jedoch ein größeres Netzwerk angenommen, so nähert sich die Zahl erfolgreicher Lokalisierungen schnell der Nullmarke. Für die Verwendung der sDLS-Verfahren zeigt sich ein gegensätzlicher Verlauf. In kleineren Netzwerken treten prozentual mehr Blindknoten auf, welche aufgrund ihrer Randlage weniger als die

geforderten drei Referenzknoten in ihrer Kommunikationsreichweite vereinen. Je größer das betrachtete Netzwerk ist, desto geringer fällt der Prozentsatz dieser Randbereichsknoten aus. In großen Netzwerken kann durch die Verwendung von sDLS daher eine Erfolgsquote von nahezu 100 % erzielt werden.

Aufgrund der dargestellten Erfolgsquote ist eine Positionsbestimmung mittels DLS in den meisten Fällen nicht möglich. Um das Verfahren dennoch hinsichtlich nachfolgender Kriterien vergleichen zu können, wurden die fehlenden Distanzschätzungen auf der Basis des verwendeten Signalausbreitungsmodells zur Verfügung gestellt. Die Signalstärke weit entfernter Knoten sinkt dabei unterhalb des für den Nachrichtenempfang notwendigen Schwellenwertes. Unter realen Bedingungen lässt sich ein solches Signal durch den Empfänger nicht mehr detektieren bzw. nicht von dem üblichen Rauschen unterscheiden. Diese Werte wurden daher lediglich zum Zwecke der Vergleichbarkeit verwendet. Für die nachfolgenden Diskussionen wurden auf diese Weise alle Blindknoten zur Positionsschätzung mittels DLS befähigt.

Rechenaufwand Der auf einem Blindknoten anfallende Rechenaufwand ist bei den untersuchten Verfahren maßgeblich von der Anzahl der Referenzknoten abhängig, deren Informationen im Prozess der Nachberechnung zur Positionsschätzung eines Blindknotens eingesetzt werden. Abbildung 3.27 stellt die mittlere Anzahl der in der Nachberechnung verwendeten Referenzknoten gegenüber. Hier ist bereits deutlich zu erkennen, dass das DLS die größte Anzahl an Referenzknoten verwendet, da bei diesem Verfahren alle im Netzwerk verfügbaren Referenzknoten verrechnet werden. Deutlich weniger Referenzknoten fließen in die Positionsschätzung mittels sDLSⁱ ein. Im Vergleich der sDLS-Verfahren verwendet der sDLSⁿⁱ-Ansatz die wenigsten Referenzknoten, da hier zwar Daten aus der Vorberechnung entfernt werden, jedoch keine zusätzlichen Daten eingefügt werden. Die meisten Referenzknoten werden in diesem Vergleich durch das sDLSnd-Verfahren verarbeitet. Hier werden zusätzliche Daten hinzugefügt, jedoch keine Daten entfernt.

Aufgrund dieser Betrachtung sollte das DLS-Verfahren den höchsten Rechenaufwand besitzen, während der sDLSⁿⁱ-Ansatz den geringsten Aufwand erzeugt. Zur eigentlichen Nachberechnung des Gleichungssystems kommt im Fall von sDLS jedoch die Anpassung der Vorberechnung hinzu. Jedes Einfügen oder Entfernen von Daten aus der Vorberechnung verursacht daher in hohem Maße weiteren Rechenaufwand. So erfordert der sDLSⁱ-Ansatz im Mittel etwa vier Einfügungen und in etwa ebenso viele Entfernungen. Wie in Abbildung 3.28 dargestellt, konnte die Zahl der Einfügungen durch die Einführung der Varianten sDLSⁿⁱ und sDLS^{nu} deutlich reduziert werden. Bei sDLS^{ne} wird aufgrund der geringen Anzahl

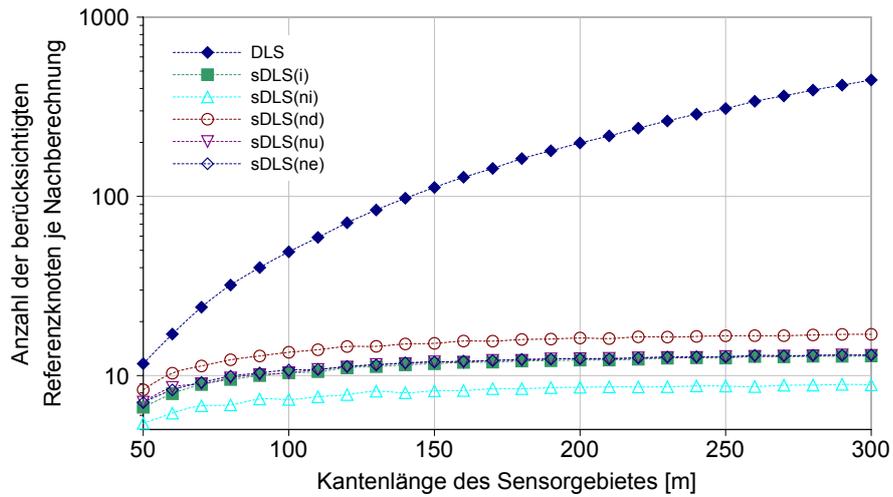


Abbildung 3.27: Vergleich der durch einen Blindknoten jeweils in der Nachberechnung berücksichtigten Referenzknoten.

notwendiger Anpassungen vollständig auf das Einfügen zusätzlicher Daten verzichtet. Die Anzahl der Entfernungen beträgt im Fall von sDLSⁱ und sDLSⁿⁱ in etwa vier. Bei den übrigen Varianten wird auf das Entfernen vollständig verzichtet, wodurch jedoch zusätzlicher Aufwand für die dargestellten Distanzschätzungen anfällt.

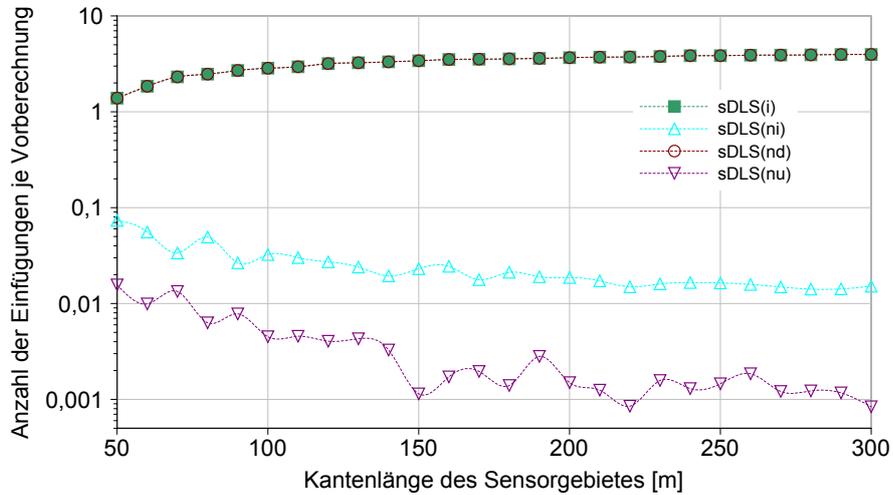


Abbildung 3.28: Vergleich der zur Positionsschätzung durchschnittlich durch einen Blindknoten durchgeführten Einfügeoperationen.

Nachberechnung, Anpassung der Vorberechnung und Distanzschätzung bilden zusammen den untersuchten Rechenaufwand, welcher von einem Blindknoten zur Positionsbestimmung aufgewendet werden muss. Um diesen abzuschätzen, wurden während der Simulation

für jeden erfolgreich lokalisierten Blindknoten die Anzahl der durchgeführten Rechenoperationen protokolliert. Da unterschiedliche Operationen unterschiedlichen Aufwand bedeuten, wurden Additionen und Subtraktionen, Multiplikationen und Divisionen sowie Potenzbildungen und Wurzeloperationen jeweils in einer Gruppe zusammengefasst. Die aus diesen Rohdaten resultierenden Mittelwerte sind in den nachfolgenden Abbildungen dargestellt. Zur Bewertung der so gebildeten Komplexitätsklassen dient der nachfolgende Exkurs.

Exkurs - Computerarithmetik Die Bewältigung verschiedener arithmetischer Operationen findet in Computersystemen, speziell in Mikrocontrollern auf unterschiedliche Weise statt. Als ein Aufwandsmaß dient an dieser Stelle die Anzahl notwendiger Taktzyklen, welche sich wiederum auf Bearbeitungsdauer und die darauf verwandte Energie auswirken. Moderne Mikrocontroller wie auch der häufig in Sensornetzwerken verwendete MSP430 sind zur Realisierung von Rechenaufgaben mit einer arithmetisch-logische Einheit (engl. Arithmetic Logic Unit (ALU)) ausgestattet. Dieses Hardwareelement ermöglicht unter anderem die Addition ganzzahliger Werte aber auch Verschiebeoperationen in einem Taktzyklus. Diese Operationen finden in Hardware statt. Zur Realisierung von Multiplikation und Division steht in seltenen Fällen ein Hardwaremultiplizierer zur Verfügung, welcher eine Multiplikation in zwei bis drei Taktzyklen realisiert. In der Regel ist dies jedoch nicht der Fall, sodass diese Operationen durch wiederholte Anwendungen von Additions- und Schiebeoperationen in Software realisiert sind und daher eine Vielzahl an Taktzyklen beanspruchen. Je nach verwendetem Algorithmus wird die Anzahl der Taktzyklen sowohl durch die Bitbreite der Zahl als auch durch die Zahl selbst beeinflusst. Der Umgang mit gebrochenen Zahlen, sogenannten Gleitkommazahlen, wie sie im dargestellten Fall vorausgesetzt sind, baut wiederum auf der Verwendung der Grundrechenarten und Basisoperationen für ganze Zahlen auf. So lässt sich zum Beispiel die Multiplikation zweier Gleitkommazahlen auf die Multiplikation der Mantissen und die Addition der Exponenten zurückführen. Solche in Software realisierte arithmetische Operationen werden meist durch Bibliotheken bereitgestellt. Für den MSP430 Mikrocontroller stellt das sogenannte Floating-Point Package diese Basisfunktionen bereit. Als Anhaltspunkt lässt sich aus der Begleitliteratur bei einer 32-Bit Gleitkommadarstellung eine etwa doppelt so lange Bearbeitungszeit für Multiplikation und Division entnehmen (ca. 400 Taktzyklen), als es für Addition oder Subtraktion (ca. 200 Taktzyklen) der Fall ist. Zur Berechnung von Potenzen ist der Aufwand noch einmal ungleich höher. In dem vorliegenden Fall finden jedoch lediglich zwei unterschiedliche Potenzfunktionen Anwendung. Dies ist einerseits das Quadrat sowie andererseits die Quadratwurzel. Zur Berechnung der Quadratwurzel

wird häufig das Newton-Raphson-Verfahren verwendet, welches auf Division und Addition basiert. Zur Lösung einer Gleichung der Form $y = \sqrt{x}$ startet dieses iterative Verfahren mit einer beliebig gewählten Schätzung y_0 . Ausgehend von dieser Schätzung erfolgt eine schrittweise Verfeinerung der Schätzung durch Anwendung von Gleichung (3.28). Soll eine exakte Lösung ermittelt werden, so dient als Abbruchkriterium, dass der Wert y_i bei wiederholter Iteration konstant bleibt. In der Praxis wird durch eine sechsfache Anwendung von Gleichung (3.28) meist eine ausreichend hohe Genauigkeit erzielt. Da die Gleitkomma-division in dieser Rechnung den größten Aufwand darstellt, kann die Berechnung einer Wurzel in etwa mit dem sechsfachen Aufwand einer Division beziffert werden.

$$y_i = (x/y_{i-1} + y_{i-1}) / 2 \quad (3.28)$$

Abbildung 3.29 stellt zunächst die Anzahl der von den unterschiedlichen Ansätzen benötigten Additionen gegenüber. In der Darstellung ist zu erkennen, dass die Anzahl der Additionen im Fall des DLS-Verfahrens mit wachsender Zahl an Referenzknoten bzw. mit zunehmender Größe des Sensorgebietes stetig steigt. Bei Verwendung der sDLS-Verfahren hingegen strebt die Zahl der Additionen einen je nach Verfahren unterschiedlichen festen Wert an. Das als sDLSⁱ bezeichnete Verfahren, welches unter den sDLS-Varianten das Verfahren mit dem größten Aufwand darstellt, bietet aufgrund dieser Eigenschaft, bereits bei der durch die Simulation erfassten Netzwerkgröße, eine diesbezüglich bessere Performance als das DLS-Verfahren, da es weniger Additionen benötigt. Durch die Einführung der weiteren Varianten konnte dieser Wert fortwährend reduziert werden. Anhand der Verfahren sDLSⁿⁱ und sDLSnd ist deutlich zu erkennen, dass der Verzicht auf die Entfernung von Daten wesentlich mehr zur Aufwandsreduzierung beiträgt, als der Verzicht auf das Einfügen zusätzlicher Daten. Das sDLS^{ne}-Verfahren bietet in diesem Vergleich die beste Performance.

Bei der Betrachtung der, in Abbildung 3.30 dargestellten, zur Lokalisierung angewandten Multiplikationen fällt auf, dass in dem dargestellten Bereich bei Verwendung des sDLSⁱ-Ansatzes wesentlich mehr Multiplikationen notwendig sind als für den DLS-Ansatz. Dies ist den recht aufwendigen Operationen zur Anpassung der Vorberechnung geschuldet. Dennoch ist auch hier ein asymptotischer Kurvenverlauf erkennbar. Der ansteigende Verlauf im Falle von DLS hingegen bedingt ein unbeschränktes Anwachsen für besonders große Sensornetzwerke. Auch im Fall der Multiplikationen konnte durch die Einführungen weiterer Verfahren eine drastische Reduzierung erreicht werden. Auch hier stellt der sDLS^{ne}-

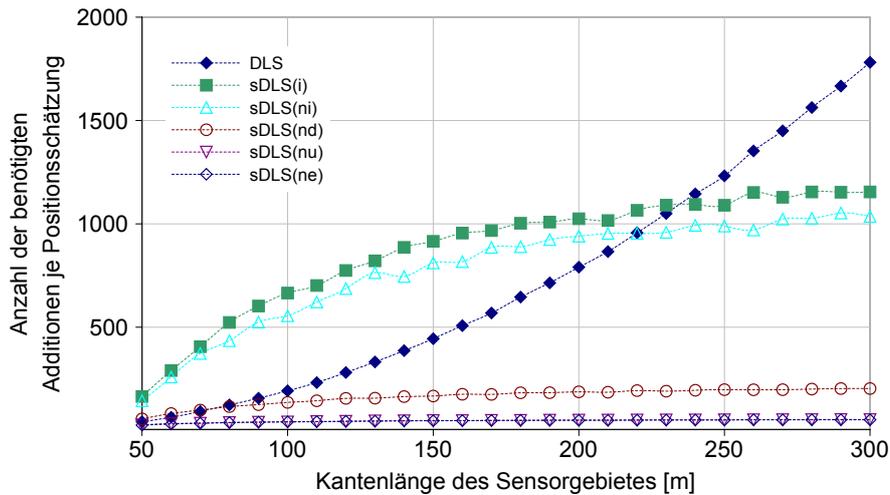


Abbildung 3.29: Vergleich der zur Positionsschätzung notwendigen Additionsoperationen im Rahmen der auf dem Blindknoten durchgeführten Nachberechnung.

Ansatz ein Minimum dar und ist somit auch in der Lage, eine bessere Performanz zu gewährleisten als das DLS-Verfahren.

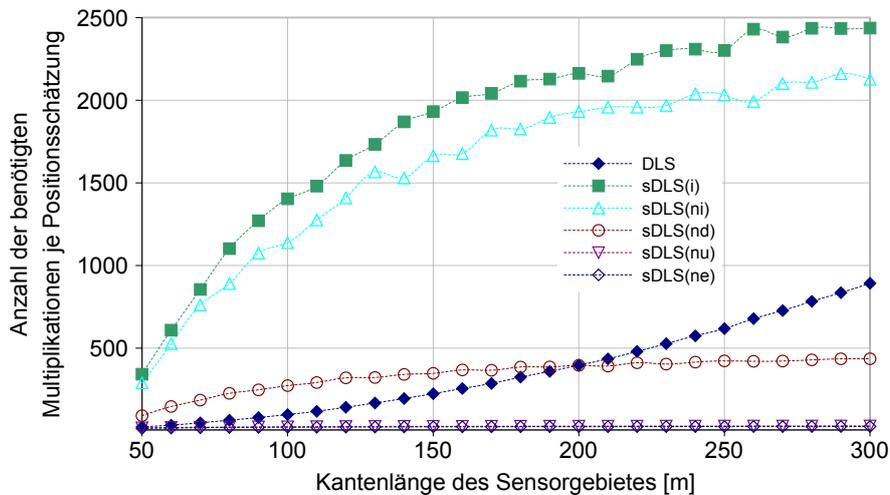


Abbildung 3.30: Vergleich der zur Positionsschätzung notwendigen Multiplikations- und Divisionsoperationen im Rahmen der auf dem Blindknoten durchgeführten Nachberechnung.

Betrachtet man die Anzahl der Potenzoperationen in Abbildung 3.31, so zeigt sich ein deutlich höherer Aufwand bei der Verwendung von DLS. Bedenkt man, dass die Potenzoperationen bei DLS ausschließlich aus der Quadratbildung bestehen, wohingegen sDLS-Verfahren sowohl bei der Anpassung der vorberechneten Daten als auch bei der Distanz-

schätzung einen geringen Anteil an Quadratwurzeloperationen aufweisen, so relativiert sich dieser Eindruck ein wenig. Dennoch gilt auch hier ein stetiger Anstieg im Fall von DLS und minimaler Aufwand im Fall von sDLS^{ne}.

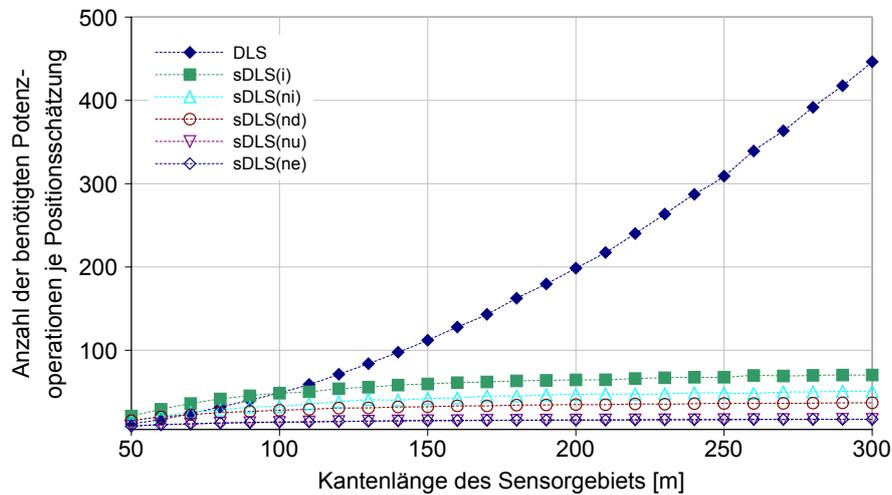


Abbildung 3.31: Vergleich der zur Positionsschätzung notwendigen Potenzoperationen im Rahmen der auf dem Blindknoten durchgeführten Nachberechnung.

Der auf einem Blindknoten anstehende Rechenaufwand wird im Fall der sDLS-Verfahren lediglich durch die Dichte der Referenzknoten bestimmt, nicht jedoch wie im Fall von DLS von der Größe des Netzwerks. Der asymptotische Verlauf der gezeigten Abbildungen ergibt sich daher ausschließlich aus dem Einfluss der Randgebiete, in denen Referenzknoten wie auch Blindknoten weniger Referenzknoten zu ihren Nachbarn zählen können, da mitunter große Teile ihrer Kommunikationsreichweite Bereiche außerhalb des Netzwerks abdecken. In den gezeigten Abbildungen sollte gerade der Einfluss der Netzgröße demonstriert werden. Die Dichte der Referenzknoten wurde daher in den beschriebenen Simulationen konstant gehalten.

Kommunikation Für eine realitätsnahe Bewertung des Kommunikationsaufwands wurde ein Routingverfahren nach dem Prinzip eines spannenden Baumes implementiert. Dieses weist einzelnen Knoten beim Aufbau des Baumes die Rolle eines Routingknotens zu, welche dieser unabhängig von seiner Rolle als Blindknoten oder Referenzknoten wahrnimmt. Abbildung 3.32 stellt die quantitative Verteilung der genannten Rollen in den simulierten Netzwerken dar.

Zur Bewertung der anfallenden Kommunikationslast dienen zwei Kriterien. Zum einen die durch die Senke, in Form von Vorberechnungen, in das Netzwerk injizierte Datenmenge

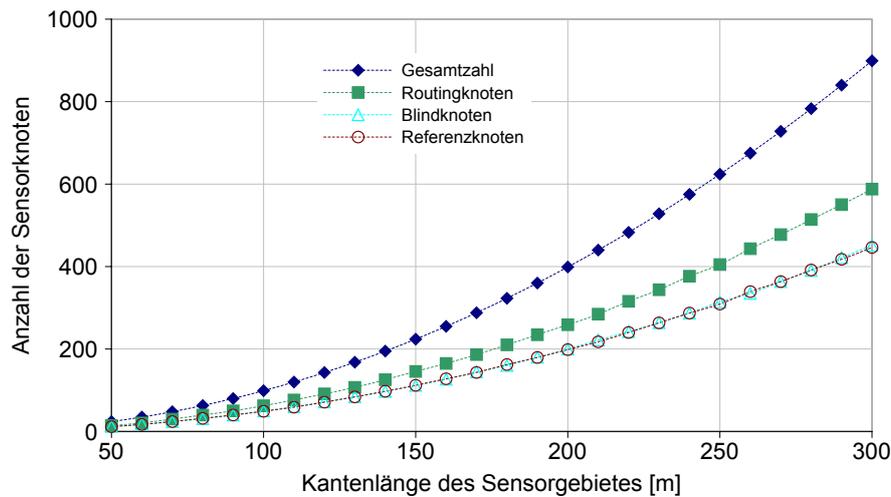


Abbildung 3.32: Anteil der Sensorknoten, welche in der Simulation die jeweiligen Rollen wahrnehmen. Das Routing kann sowohl von Blindknoten als auch von Referenzknoten übernommen werden.

und zum anderen die mittlere Kommunikationslast, welche durch einen Routing- oder Referenzknoten im Laufe des gesamten Positionsbestimmungsverfahrens bewältigt werden muss. Die versandten Daten wurden zu diesem Zweck auf der Routingebene protokolliert. Jedes übersandte Datum im Fließkommaformat wurde mit vier Byte erfasst, ein ganzzahliger Wert hingegen mit zwei Byte.

Abbildung 3.33 stellt zunächst die durch die Senke erzeugte Dateninjektion entsprechend der untersuchten Verfahren gegenüber. Es ist zu erkennen, dass durch das auf der Lösung mittels Normalengleichung basierende DLS-Verfahren die geringste Menge an Daten in das Netz injiziert wird. Wie nachfolgend in Abbildung 3.34 gezeigt wird, ist dies jedoch gleichzeitig die Menge an Daten, welche an alle Blindknoten übertragen werden muss. Wird zur Positionsbestimmung eines der auf der QR-Dekomposition basierenden Verfahren angewendet, so wird die mit Abstand größte Menge an Daten produziert. Durch die Einführung des $sDLS^{ne}$ -Verfahrens konnte die zu transferierende Datenmenge maßgeblich gesenkt werden. Dennoch wird durch das $sDLS^{ne}$ -Verfahren etwa die zehnfache Menge an Daten von der Datensinke erzeugt.

Betrachtet man nun die durchschnittlich von einem am Prozess der Positionsbestimmung beteiligten Sensorknoten transferierte Datenmenge, so zeigt sich der Vorteil des $sDLS$ -Ansatzes. Von den durch die Senke erzeugten Daten werden in diesem Fall jedem Blind- und Referenzknoten nur jene Daten übermittelt, welche für den Lokalisierungsprozess notwendig sind. Ein Routingknoten transferiert daher umso weniger Daten, je weiter

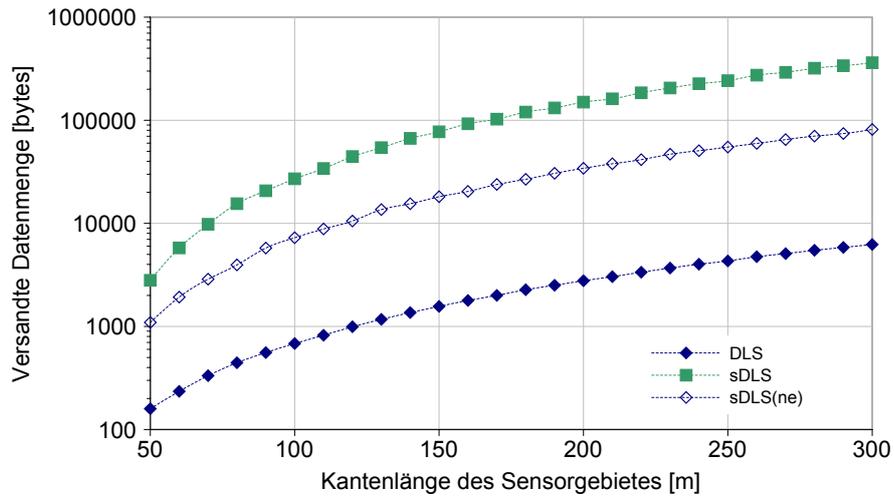


Abbildung 3.33: Vergleich der durch die Senke ins Netz injizierten Daten zur Positionsschätzung unter Verwendung von DLS, sDLS und sDLS^{ne}.

er von der Senke entfernt ist. Dies schlägt sich in dem in Abbildung 3.34 dargestellten Kurvenverlauf nieder. So sinkt die mittlere Datenlast je Knoten bei Verwendung der sDLS-Verfahren unter die bei Verwendung von DLS auftretende Datenlast, wenn das Netzwerk eine Größe von 40000 m^2 bzw. 400 Knoten überschreitet. Bei der Verwendung von sDLS^{ne} ist die durchschnittlich auftretende Last über das gesamte Spektrum der simulierten Netzwerkgröße hinweg geringer als im Fall von DLS. Dieser positive Effekt ist umso stärker, je größer das Netzwerk ist.

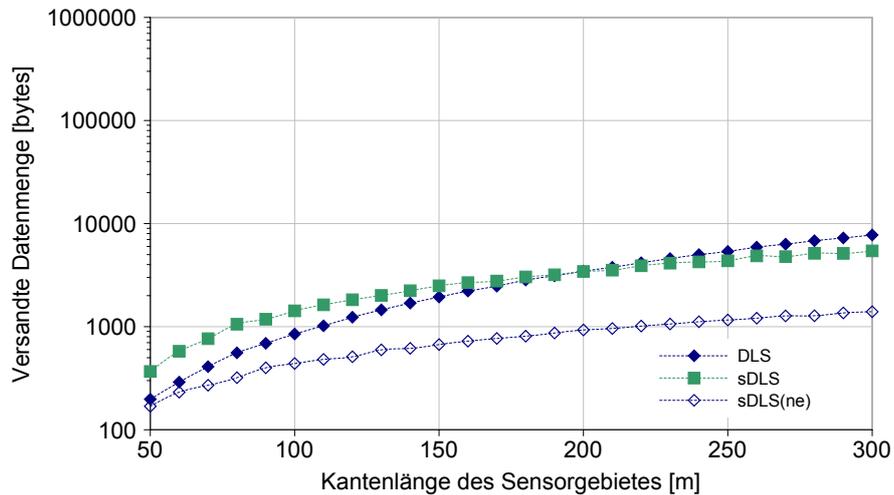


Abbildung 3.34: Vergleich der zur Positionsschätzung durchschnittlich durch einen Knoten transferierten Datenmenge unter Verwendung von DLS, sDLS und sDLS^{ne}.

Genauigkeit Eines der wichtigsten Kriterien für ein Positionsbestimmungsverfahren stellt die erreichte Genauigkeit in der Positionsschätzung dar. Hierfür wurde in den Simulationen jeweils die Distanz zwischen tatsächlicher Position und der geschätzten Position ermittelt und durch eine Mittelwertbildung ausgewertet. Auch hier ist zu beachten, dass die erzielten Genauigkeiten bei DLS lediglich zu Vergleichszwecken bestimmt wurden, eine Positionsbestimmung aufgrund fehlender Distanzschätzungen jedoch in der Regel nicht möglich gewesen ist. Die Abbildung 3.35 illustriert die jeweils erzielten mittleren Fehler in Abhängigkeit von der Netzwerkgröße. Deutlich zu erkennen ist, dass die Genauigkeit des DLS-Verfahrens mit zunehmender Netzgröße abnimmt. Dies ist zum einen auf die steigende Zahl weit entfernter Referenzknoten mit ungenauer Distanzschätzung zurückzuführen. Eine weitere Ursache stellt der Einfluss des Linearisierers dar. Der Einfluss dieses Referenzknotens steigt mit der Anzahl der Referenzknoten im Netz. Gleichzeitig steigt der Anteil der Blindknoten, welche sich außerhalb der Reichweite dieses Knotens befinden. Auch der Abstand zu diesem Knoten und damit die Genauigkeit der Abstandsschätzung steigen. Diese Aneinanderkettung ungünstiger Umstände sorgt für eine schlechte Positionsschätzung.

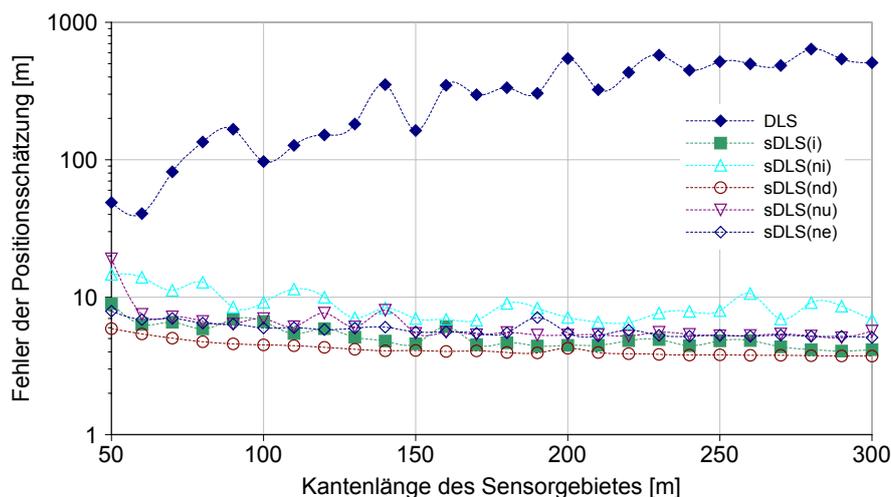


Abbildung 3.35: Vergleich der bei der Positionsschätzung durchschnittlich auftretenden Abweichung von der tatsächlichen Position unter Verwendung von DLS, sDLS und sDLS^{ne}.

Weiterhin ist aus der Abbildung zu entnehmen, dass die Genauigkeit des der Idealvorstellung folgenden sDLSⁱ-Ansatzes die zweitbeste Genauigkeit bietet. Übertroffen wird dieses Verfahren lediglich von sDLSnd, welches unter den sDLS-Ansätzen die meisten Referenzknoten je Positionsbestimmung berücksichtigt. Abschließend lässt sich aus der Grafik entnehmen, dass auch das mit besonders geringem Aufwand realisierbare Verfahren des

sDLS^{ne} eine akzeptable Genauigkeit bietet, welche der Genauigkeit des sDLSⁱ-Verfahrens sehr nahe kommt.

3.4.2.4 Potenzial und Vorteile

Im vorangegangenen Abschnitt wurden bereits einige Vorteile des sDLS-Ansatzes diskutiert. Zu diesen messbaren Vorteilen kommen weitere Vorteile zum Beispiel im Netzwerkdesign hinzu. So lässt sich die Menge der kommunizierten Daten im Fall von sDLS durch die Verwendung mehrerer Senken sowie durch die geschickte Positionierung der Senke, wie in Abbildung 3.36 dargestellt, deutlich reduzieren. Das DLS-Verfahren hingegen vermag es aufgrund der starren Struktur nicht, einen Vorteil aus diesen Designvarianten zu ziehen.

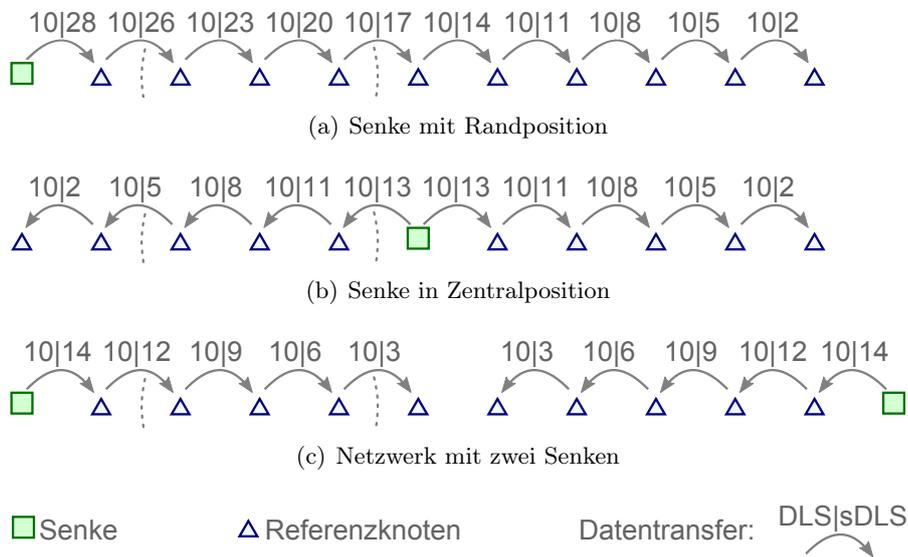


Abbildung 3.36: Vereinfachte Darstellung unterschiedlicher Netzwerkdesigns mit der daraus folgenden Datenübertragungsmenge für DLS und sDLS. Während der DLS die Vorteile der zentralen oder dualen Senke nicht ausnutzen kann, kann sDLS von einem solchen Netzwerkdesign profitieren.

3.4.2.5 Nachbetrachtung

Anzahl Blindknoten Die Anzahl der verwendeten Blindknoten entsprach in den verwendeten Simulationen jeweils der Anzahl der Referenzknoten. Diese auf den ersten Blick realitätsferne Annahme beeinträchtigt die erzielten Ergebnisse jedoch nicht. Wie bereits beschrieben, sind Rechen- und Kommunikationsaufwand sowie die erzielbare Genauigkeit ausschließlich von der Dichte der Referenzknoten abhängig. Eine höhere Anzahl

an Blindknoten würde lediglich eine breitere Datenbasis und somit eine Glättung der Ergebniskurven bewirken. Aufgrund der Komplexität der durchgeführten Simulationen sowie der Leistungsfähigkeit der Simulationsumgebung wurde auf eine solche Konstellation verzichtet.

Eine Erhöhung der Dichte der Referenzknoten hingegen hätte einerseits einen gesteigerten Aufwand zur Folge, ließe andererseits im Fall von sDLS auch eine Steigerung der Genauigkeit erwarten. Im Fall von DLS hingegen ist dies nicht zu erwarten, da hier gerade die weit entfernten Referenzknoten einen hohen Fehlereintrag verursachen und dies durch eine Steigerung der Anzahl der Referenzknoten verstärkt werden würde.

Verteilung des Kommunikationsaufwandes Als ein Nachteil des dargestellten Verfahrens kann die ungleiche Verteilung der Kommunikationslast innerhalb des Netzwerks betrachtet werden. Diese ist umso höher, je näher sich ein Routingknoten an der Senke befindet. Dieses Problem ist jedoch nicht auf das dargestellte Verfahren begrenzt, sondern stellt ein allgemeines Problem innerhalb der Sensornetzwerkforschung dar. Es wird durch das dargestellte Verfahren lediglich verstärkt. Zur Bekämpfung des Problems kann eine höhere Anzahl an Knoten nahe der Senke verwendet werden, um die dort entstehende Last stärker zu verteilen. Ebenso kann die Verwendung mehrerer Senken zur Reduzierung dieses Problems genutzt werden. Während das Problem im Allgemeinen von periodisch an die Senke übertragenen Messdaten verursacht wird, ist im Rahmen des dargestellten Verfahrens lediglich ein einmaliger Datenversand notwendig. Unter der Annahme immobiler Referenzknoten kann die auf den Referenzknoten gespeicherte Vorberechnung anschließend zur Positionsschätzung beliebig vieler mobiler und stationärer Blindknoten genutzt werden.

3.4.3 Das HDLS Verfahren

3.4.3.1 Motivation

In Kapitel 3.4.2 konnte gezeigt werden, dass das als sDLS^{ne} bezeichnete Verfahren zur Positionsbestimmung eines Blindknotens das Ausgangsverfahren des DLS einerseits durch die eingeführte Flexibilität und Skalierbarkeit und andererseits durch die erreichbare Genauigkeit übertrifft. Das speziell für den Einsatz in sehr großen Netzwerken konzipierte Verfahren überzeugt in diesen durch einen im Vergleich geringen Rechen- und Kommunikationsaufwand. Dennoch konnten aufgrund der durchgeführten Simulationen einige Ausreißer bezüglich der erreichten Genauigkeit beobachtet werden. Zudem konnte gezeigt werden, dass auch eine höhere Genauigkeit, beispielsweise mit dem grundlegenden

sDLSⁱ-Verfahren erreicht werden kann, welches jedoch wesentlich höhere Anforderungen an Kommunikation und Rechenaufwand stellt. Ein zentraler Schwachpunkt des Verfahrens besteht in der Distanzschätzung zwischen Blindknoten und jenem Referenzknoten, welcher mit der kürzesten Distanz zum Blindknoten geschätzt wird. Da dieser Knoten sowohl die verwendete Vorberechnung zur Verfügung stellt, als auch in der Rolle des Linearisierers mit einer besonders hohen Gewichtung in die Berechnung eingeht, trägt er in besonderem Maße zum Erfolg der Positionsschätzung bei. Durch die starke Gewichtung und die Anordnung der in der Vorberechnung verwendeten Referenzknoten bewirkt er tendenziell eine Verschiebung der Schätzposition in Richtung der eigenen Position. Eine Fehleinschätzung dieser Distanz wirkt sich daher besonders stark auf das Ergebnis aus. Um einem solchen Fehler vorzubeugen, kann beispielsweise eine weitere Positionsschätzung unter Verwendung der Vorberechnung desjenigen Referenzknotens erfolgen, welcher die zweitgeringste Distanz aufweist. Eine Verrechnung beider Schätzpositionen kann einen Fehler bei einer der Schätzpositionen abschwächen. Die daraus folgende neue Schätzposition sollte sich auf einer Geraden zwischen den beiden ursprünglichen Schätzpositionen und somit auch nahe der tatsächlichen Position des Blindknotens befinden. Zur Verrechnung der einzelnen Schätzpositionen sollte ein möglichst einfaches Verfahren, wie es aus dem Bereich der approximativen Lokalisierung bekannt ist, verwendet werden. Aus diesem Zusammenspiel aus exakter und approximativer Lokalisierung leitet sich die Namensgebung des nachfolgend beschriebenen Hybrid Distributed Least Squares (HDLS)-Verfahrens [BSGT11, BSGT12] ab, dessen Ziel in der Steigerung der Genauigkeit liegt.

3.4.3.2 Algorithmenbeschreibung

Die grundlegende Idee des Verfahrens besteht darin, mehr als nur eine Schätzposition mit Hilfe der durch die in Reichweite befindlichen Referenzknoten bereitgestellten Vorberechnungen nach dem sDLS^{ne}-Verfahren zu bestimmen. Die so bestimmten Positionen werden anschließend als virtuelle Referenzknoten behandelt und mit Hilfe eines approximativen Positionsbestimmungsverfahrens zu einer endgültigen Positionsschätzung zusammengezogen. Für die konkrete Umsetzung des Verfahrens und den daran geknüpften Erfolg spielen Faktoren wie die Anzahl der verwendeten Vorberechnungen sowie das verwendete approximative Lokalisierungsverfahren eine tragende Rolle. Die nachfolgenden Ausführungen bieten eine Darstellung unterschiedlicher Strategien, welche im Zuge dieser Arbeit simulativ untersucht und bewertet wurden.

Auswahl virtueller Referenzknoten Für die Auswahl der genutzten Vorberechnungen wurden sowohl Ansätze untersucht, welche sich auf die Anzahl der genutzten Vorberechnungen beziehen, als auch Ansätze, welche die Entfernungen der verwendbaren Referenzknoten ins Verhältnis setzen, um nur Referenzknoten aus einem bestimmten Umkreis zu berücksichtigen. Dies ermöglicht es beispielsweise, nur dann mehrere Vorberechnungen zu verwenden, wenn die damit assoziierten Referenzknoten eine ähnliche Distanz zum Blindknoten aufweisen.

Approximative Positionsschätzung Für die Zusammenführung der virtuellen Referenzknoten mittels approximativer Positionsschätzungsverfahren wurde das in der Arbeit bereits beschriebene CL-Verfahren verwendet. Da zu erwarten ist, dass eine Positionsschätzung mittels sDLS^{ne} umso genauer ausfällt, je geringer die Distanz zwischen Blindknoten und dem die Vorbereitung bereitstellenden Referenzknoten ist, erscheint eine gewichtete Zusammenführung der virtuellen Referenzknoten sinnvoll. Zu diesem Zweck wurden einerseits der als WCL bekannte Ansatz sowie andererseits das in der Arbeit entwickelte AWCL-Verfahren zur Ermittlung der Schätzposition aus den zuvor berechneten virtuellen Referenzpositionen untersucht. Werden die berechneten Positionen der virtuellen Referenzknoten in der Menge V_u zusammengefasst dargestellt, so ergeben sich für die Berechnung der Schätzposition mittels CL, WCL und AWCL die in den Gleichungen (3.29a) bis (3.29c) dargestellten Berechnungen. Für die Belegung des Gewichtungsexponenten g wurde in den Untersuchungen ein Wert von eins verwendet.

$$\mathbf{u} = \sum_{i \in I(V_u)} \mathbf{v}_i \quad (3.29a)$$

$$\mathbf{u} = \left(\sum_{i \in I(V_u)} w_{ui}^g \right)^{-1} \sum_{i \in I(V_u)} w_{ui}^g \mathbf{v}_i \quad (3.29b)$$

$$\mathbf{u} = \left(\sum_{i \in I(V_u)} w'_{ui}{}^g \right)^{-1} \sum_{i \in I(V_u)} \mathbf{v}_i w'_{ui}{}^g \quad (3.29c)$$

$$w'_{ui} = w_{ui} - q * \min_{k \in I(B_i)} (w_{uk})$$

Gewichtung Werden das WCL- oder das AWCL-Verfahren zur Kombination der Einzelschätzungen verwendet, so ergibt sich die Frage der Gewichtung der Einzelschätzungen.

Um gute Einzelschätzungen stärker zu gewichten als weniger gute, wurde eine Gewichtung mit Hilfe der Signalstärke jener Referenzknoten untersucht, welche die für die jeweilige Einzelschätzung verwendeten Vorberechnungen zur Verfügung stellten. Dies folgt aus der Annahme, dass Vorberechnungen umso bessere Ergebnisse bedingen, je geringer die Distanz des jeweiligen Referenzknotens zum Blindknoten ist. Eine entsprechende Gewichtung ist in Gleichung (3.30) angegeben.

$$w_{ui} = RSS_{ui} \quad (3.30)$$

Als weiterer Ansatz der Gewichtung dient die Annahme, dass Vorberechnungen umso bessere Positionsschätzungen ergeben, je mehr der darin verrechneten Referenzknoten sich in der Kommunikationsreichweite des Blindknotens befinden. Die Gewichtung w_{ui} einer auf der Vorberechnung eines Referenzknotens b_i basierenden Einzelschätzung v_i setzt sich in diesem Fall aus der Menge B_i der in der Vorberechnung enthaltenen Referenzknoten und der Menge B_u der in Reichweite des Blindknotens befindlichen Referenzknoten zusammen und ist in Gleichung (3.31) dargestellt. Das Gewichtungskriterium ist in diesem Fall die Ähnlichkeit der aus Referenzknoten bestehenden Nachbarschaft von Referenzknoten und Blindknoten. Diese Gewichtung wird daher nachfolgend als Similarity based Weighted Centroid Localization (SWCL) bezeichnet.

$$w_{ui} = \frac{|B_i \cap B_u|}{|B_i|} \quad (3.31)$$

Reduktionsanteil Findet AWCL bei der Zusammenführung der virtuellen Referenzpositionen Anwendung, so kann zusätzlich der darin verwendete Reduktionsanteil q untersucht werden.

Distanzapproximation Zur Ermittlung der als virtuelle Referenzpositionen genutzten Einzelschätzungen mittels sDLS^{ne} erfolgt eine Schätzung der Distanz zwischen Blindknoten und Referenzknoten, welche zwar in der jeweiligen Vorberechnung enthalten sind, sich jedoch nicht in Reichweite des Blindknotens befinden. Zu diesem Zweck wurde mit sDLSnd eine Approximation auf Basis des Abstandes zwischen Blindknoten und Linearisierer sowie der in der Vorberechnung enthaltenen Distanz zwischen Linearisierer und Referenzknoten eingeführt. Die Verwendung dieser Näherung wurde durch die Tatsache motiviert, dass die Distanz zwischen Blindknoten und Linearisierer besonders klein ist, die Distanz zwischen Linearisierer und Referenzknoten hingegen besonders groß. Da nun auch

Vorberechnungen verwendet werden, bei denen diese Vorbedingung nicht mehr gegeben ist, ist auch eine Modifikation dieser Distanzschätzung in Betracht zu ziehen, um den Erfolg des HDLS-Verfahrens zu sichern. Es wurden daher zwei, auf der in sDLS^{ne} verwendeten Distanzapproximation basierende, Strategien der Approximation untersucht. Einerseits die unveränderte Anwendung der Approximation, welche für die Verarbeitung jeder Vorberechnung individuell ausgeführt wird. Dieser Ansatz wird nachfolgend als unabhängige Approximation bezeichnet. Dies führt jedoch dazu, dass für einen Referenzknoten je nach Vorberechnung unterschiedliche Distanzen geschätzt werden. Der zweite, als abhängige Approximation bezeichnete, Ansatz wirkt diesem Phänomen entgegen. Hierbei werden die Vorberechnungen der verwendeten Referenzknoten in der Reihenfolge ihres Abstandes zum Blindknoten verarbeitet. Beginnend mit der Vorberechnung des Referenzknotens mit der geringsten Distanz werden die bei der Verarbeitung der Vorberechnung geschätzten Distanzen gespeichert und bei nachfolgenden Vorberechnungen wieder verwendet. Dadurch wird erreicht, dass für jeden Referenzknoten außerhalb der Reichweite des Blindknotens die geringste und somit realitätsnaheste Distanzschätzung verwendet wird.

3.4.3.3 Evaluation

Zur Evaluation des beschriebenen HDLS-Verfahrens wurde der bereits bei sDLS verwendete und in Kapitel 2.5.1.2 beschriebene Simulator auf Basis von Prowler / Rmase verwendet. Insbesondere das darin verwendete Kanalmodell wurde auch in dieser Untersuchung genutzt. Wie bereits bei der Untersuchung der unterschiedlichen Varianten des sDLS wurde auch hier ein quadratisches Sensorgebiet simuliert, welches mit zufällig platzierten Blind- und Referenzknoten sowie einer zufällig platzierten Senke versehen ist. Auch in diesem Fall wurde die Ausdehnung des Simulationsgebietes und somit die Anzahl der darin befindlichen Knoten variiert. Eine Übersicht der verwendeten Simulationsparameter ist in Tabelle 3.7 gegeben.

Gesamtfläche	50 * 50 m ² ...300 * 300 m ²
Kommunikationsreichweite ¹	30 m
Blindknoten	12...450
Referenzknoten	12...450
Senkenknoten	1
Verteilung der Knoten	zufällig
Anzahl Simulationen	100

¹ Kommunikationsreichweite variiert gemäß des verwendeten Kanalmodells

Tabelle 3.7: Verwendete Simulationsparameter

Bei jeder durchgeführten Simulation führten alle Blindknoten Positionsschätzungen mit den unterschiedlichsten Variationen des HDLS-Verfahrens sowie mittels sDLSⁱ und sDLS^{ne} durch, welche als Referenz dienen. Für die Darstellung der unterschiedlichen Varianten wird an dieser Stelle eine Namenskonvention eingeführt, welche in Abbildung 3.37 als Syntaxdiagramm dargestellt ist. Die aus diesem Diagramm ableitbaren Kombinationen der einzelnen Parameter spiegeln zugleich die untersuchten Varianten wieder.

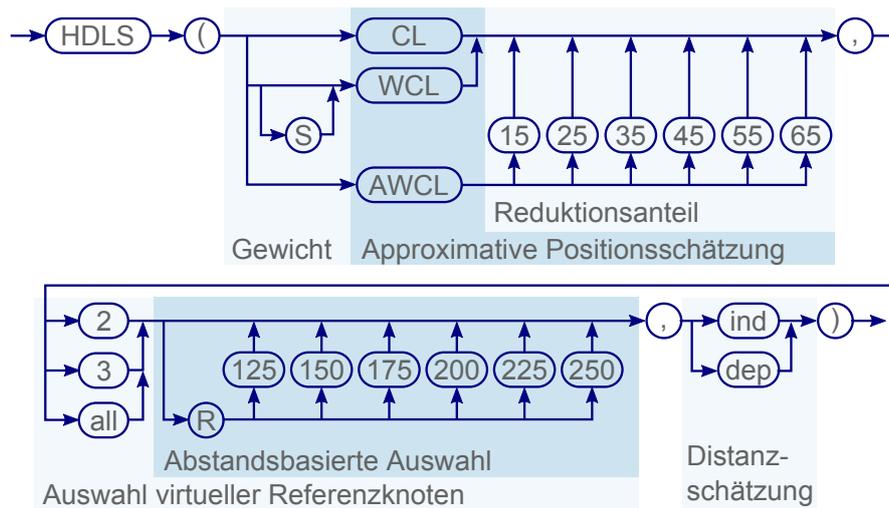


Abbildung 3.37: Darstellung der untersuchten Variationen von HDLS und deren Namensgebung als Syntaxdiagramm.

Die Namenskonvention beinhaltet zunächst den Namen des verwendeten approximativen Schätzverfahrens, welcher im Fall von AWCL durch die Angabe des prozentualen Reduktionsanteils erweitert wird. Die Gewichtung ist außer im Fall von SWCL über die Signalempfangsstärke realisiert. Anschließend wird die Strategie, die zur Auswahl der verwendeten Vorberechnungen genutzt wurde, genannt. Hier wird zunächst nach der maximal verwendeten Zahl an Vorberechnungen unterschieden. Zusätzlich zu dieser Höchstgrenze kann eine weitere distanzbasierte Begrenzung der verwendeten Vorberechnungen stattfinden. Diese ist durch ein „R“ gefolgt von der prozentualen Angabe der geringsten Distanz zwischen Blindknoten und Referenzknoten gekennzeichnet. In diesem Fall werden nur Vorberechnungen von Referenzknoten berücksichtigt, welche sich innerhalb des so festgelegten Radius um den Blindknoten befinden. Als dritte Komponente beinhaltet die Namenskonvention die verwendete Strategie der Distanzschätzung. In diesem Fall steht „ind“ (engl. independent) für die unabhängige Approximation, während die abhängige Approximation durch „dep“ (engl. dependent) symbolisiert wird. Ist beispielsweise von „HDLS(SWCL,3R150,dep)“ die Rede, so ist damit das HDLS-Verfahren unter Verwendung

der SWCL-Approximation gemeint, welches die Vorberechnungen des Referenzknotens mit dem geringsten Abstand zum Blindknoten, sowie jener Referenzknoten beinhaltet, deren Abstände zum Blindknoten maximal 150 % des erstgenannten Abstandes betragen. Die Anzahl der Vorberechnungen ist zusätzlich auf eine Höchstzahl von drei begrenzt und für die Distanzapproximation weit entfernter Referenzknoten gilt der Ansatz der abhängigen Approximation.

In der nachfolgenden Darstellung der Untersuchungsergebnisse werden zunächst die ausgewählten Verfahren mit unabhängiger Distanzschätzung betrachtet, bevor auf die Ergebnisse der Verfahren mit abhängiger Distanzschätzung eingegangen wird. Dabei wird zunächst lediglich die erreichbare Genauigkeit betrachtet, bevor für eine Auswahl der gezeigten Verfahren eine Analyse des Rechenaufwands erfolgt. Eine Auswertung der aufgewendeten Kommunikationslast findet nicht statt, da alle dargestellten Verfahren, inklusive des sDLS^{ne}-Verfahrens auf den gleichen kommunizierten Daten basieren und sich darin nicht unterscheiden. Ein Unterschied liegt lediglich im Vergleich zum sDLSⁱ-Verfahren vor. Ein diesbezüglicher Vergleich zwischen sDLSⁱ und sDLS^{ne} wurde bereits in Kapitel 3.4.2 dargestellt.

HDLS mit unabhängiger Distanzschätzung In Abbildung 3.38 ist zunächst ein Vergleich von HDLS-Varianten unter Verwendung der einfachen CL-Approximation dargestellt. Hier zeigt sich bereits, dass allein durch die Verwendung der zwei Vorberechnungen mit der geringsten Distanz zum Blindknoten eine deutliche Steigerung der Genauigkeit in Bezug auf das zugrunde liegende sDLS^{ne}-Verfahren erzielt werden kann. Es kann ebenfalls diagnostiziert werden, dass durch die so erfolgte Kombination mehrerer Einzelschätzungen der Kurvenverlauf im Vergleich zu sDLSⁱ und sDLS^{ne} stabilisiert werden konnte. Das Verfahren bietet eine höhere Robustheit gegenüber einzelnen Ausreißern. Weiterhin ist zu erkennen, dass der Genauigkeitsgewinn umso geringer wird, je mehr Einzelschätzungen hinzugezogen werden. Tatsächlich ist bei zu vielen Einzelschätzungen sogar eine Verschlechterung zu beobachten. So ist der Fehler der Positionsschätzung im Falle von HDLS(CL,2,ind) häufig geringer als im Fall von HDLS(CL,all,ind). Die Genauigkeit des sDLSⁱ kann durch diese einfache Version des HDLS jedoch nicht erreicht werden.

In Abbildung 3.39 erfolgt ein ähnlicher Vergleich jedoch unter Verwendung der signalstärkebasierten Approximation mittels WCL. Auch hier kann bereits durch die Kombination von nur zwei Einzelschätzungen eine entscheidende Steigerung der Genauigkeit erzielt werden, welche die der CL-basierten Variante bereits übertrifft. Anders als in Abbildung 3.38 tritt aufgrund der Gewichtung keine Verschlechterung durch die Verwendung aller verfügbaren

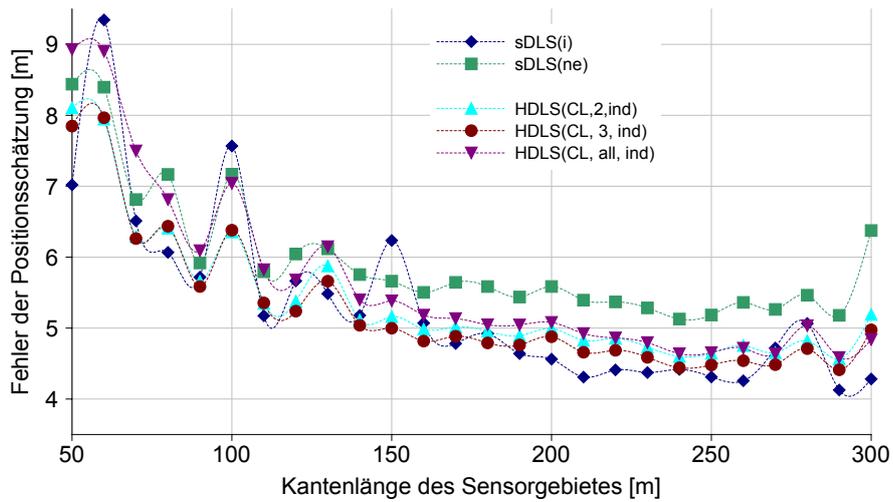


Abbildung 3.38: Darstellung des durchschnittlichen Fehlers der Positionsschätzung unterschiedlicher HDLS Varianten mit CL-Approximation und unabhängiger Distanzschätzung.

Vorberechnungen auf. Hier kann durch den HDLS(WCL,all,ind)-Ansatz sogar eine durchgehend genauere Positionsschätzung erzielt werden, als durch die Verwendung des sDLSⁱ-Verfahrens.

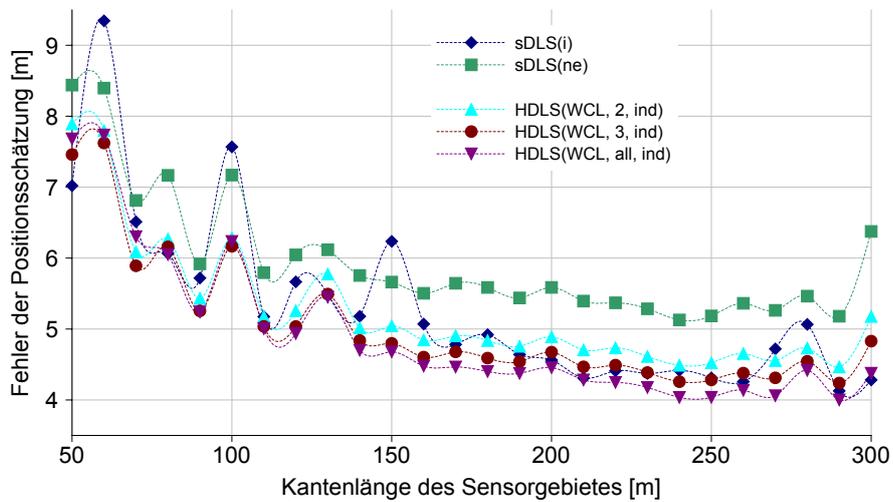


Abbildung 3.39: Darstellung des durchschnittlichen Fehlers der Positionsschätzung unterschiedlicher HDLS Varianten mit WCL-Approximation und unabhängiger Distanzschätzung.

Die erreichte Genauigkeit unter Verwendung des als SWCL bezeichneten Approximationsansatzes auf Basis der Ähnlichkeit der in Reichweite befindlichen Referenzknoten ist in Abbildung 3.40 dargestellt. Hier ist zu erkennen, dass beide Verfahren sich zwar in ihrem

Verlauf ähneln, der SWCL-Ansatz jedoch keinerlei Vorteil im Vergleich zum WCL-Ansatz zeigt.

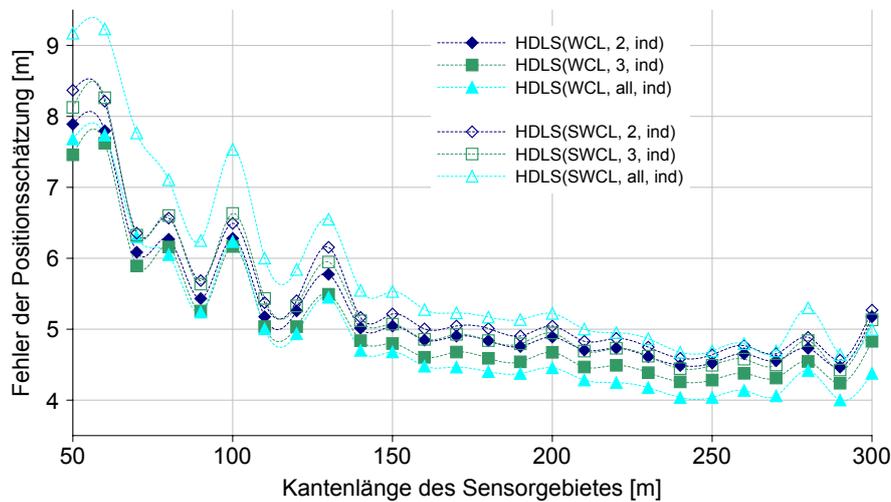


Abbildung 3.40: Vergleich des durchschnittlichen Fehlers der Positionsschätzung unterschiedlicher HDLS Varianten mit WCL-Approximation sowie mit SWCL-Approximation.

Als weiteres approximatives Verfahren wird der AWCL-Ansatz betrachtet. Die Untersuchungen des AWCL-Verfahrens in Kapitel 3.3.2 haben gezeigt, dass das Verfahren am besten arbeitet, wenn ein Reduktionsanteil von 55 % verwendet wird. Der Vergleich in Abbildung 3.41 findet daher auch auf Basis dieses Reduktionsanteils statt. Die gesamte Abbildung ähnelt sehr stark dem Verhalten der WCL-basierten Ansätze. Die als HDLS(AWCL55,all,ind) bezeichnete Variante übertrifft dabei in einigen Fällen auch die Genauigkeit von HDLS(WCL,all,ind). Weitere Untersuchungen mit verändertem Reduktionsanteil haben zwar nur geringen Einfluss des Reduktionsanteils gezeigt, es konnte jedoch festgestellt werden, dass auch im Kontext von HDLS ein Reduktionsanteil von 55 % die besten Ergebnisse liefert.

Für die auf unabhängiger Approximation basierenden Varianten des HDLS kann an dieser Stelle festgestellt werden, dass die höchste Genauigkeit erzielt wird, wenn alle Vorberechnungen, die einem Blindknoten aufgrund der in Reichweite befindlichen Referenzknoten zur Verfügung stehen, zur Generierung von Einzelschätzungen genutzt und mittels AWCL und einem Reduktionsanteil von 55 % kombiniert werden. Die gezeigten Ergebnisse spiegeln jedoch lediglich das Verhalten der Ansätze wieder, bei denen die Anzahl verwendeter Vorberechnungen durch einen nominalen Wert begrenzt wird. Gleiche Untersuchungen wurden, wie in Abbildung 3.37 beschrieben, auch für den distanz-basierten Ansatz zur Bestimmung

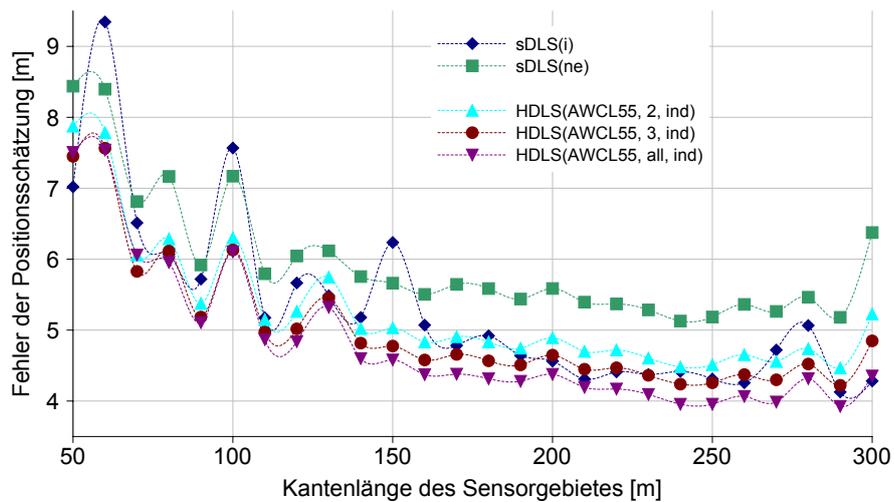


Abbildung 3.41: Darstellung des durchschnittlichen Fehlers der Positionsschätzung unterschiedlicher HDLS Varianten mit AWCL-Approximation und unabhängiger Distanzschätzung.

der verwendeten Referenzknoten vorgenommen. Stellvertretend für diese Untersuchungen sollen an dieser Stelle die in Abbildung 3.42 dargestellten Ergebnisse betrachtet werden. Die Darstellung zeigt einen Vergleich von auf AWCL basierenden Varianten des HDLS, welche zum einen durch eine nominale Begrenzung und zum anderen durch eine distanz-basierte Begrenzung geprägt sind und als Alternativen zueinander genutzt werden können. So erzielt eine Begrenzung auf 150 % in etwa die gleiche Genauigkeit wie eine Begrenzung auf zwei Vorberechnungen und eine Begrenzung auf 200 % ähnelt einer Begrenzung auf drei Vorberechnungen. Eine Begrenzung auf 250 % ist indes erwartungsgemäß noch nicht in der Lage, die Genauigkeit der unbegrenzten Variante zu erreichen.

Betrachtet man zu den gleichen Varianten des HDLS den in Abbildung 3.43 dargestellten Rechenaufwand, so zeigt sich, dass die dargestellten Varianten mit distanz-basierter Begrenzung jeweils mehr Rechenaufwand bedeuten als die vergleichbaren Varianten mit nominaler Begrenzung. Lediglich die Variante mit einer Begrenzung auf 250 % besitzt einen erwartungsgemäß niedrigeren Rechenaufwand als die unbegrenzte Variante, bleibt bei der Genauigkeit allerdings auch hinter dieser zurück. Die dargestellte Anzahl an Rechenoperationen wurde ebenso wie bei den Untersuchungen in Kapitel 3.4.2 nach Operationen unterteilt untersucht, da das Verhältnis dieser Gruppen zueinander jedoch bei allen untersuchten Varianten des HDLS nahezu konstant ist, wird an dieser Stelle und im weiteren Verlauf der Auswertung lediglich die Summe aller Operationen betrachtet. Zumindest

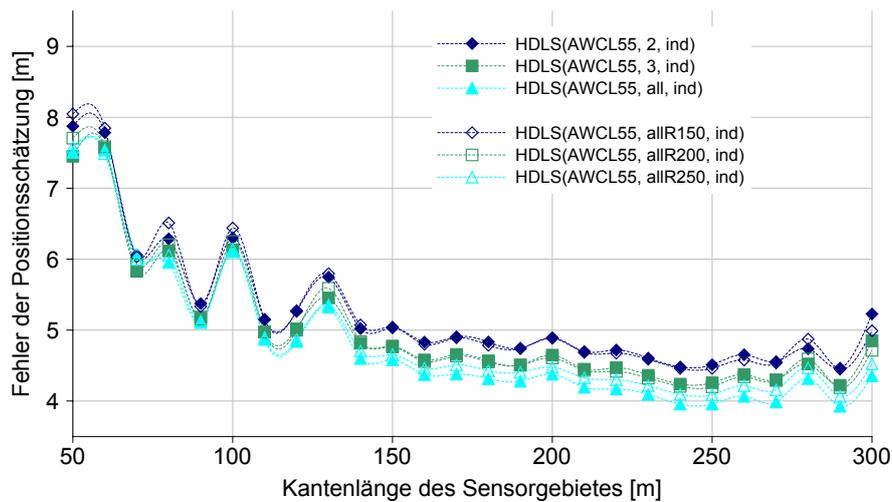


Abbildung 3.42: Darstellung des durchschnittlichen Fehlers der Positionsschätzung unterschiedlicher HDLS Varianten mit nominaler und distanzbasierter Beschränkung der verwendeten Einzelschätzungen.

in Verbindung mit der unabhängigen Distanzschätzung stellt die reichweitenbegrenzte Auswahl der Vorberechnungen keine ernstzunehmende Alternative dar.

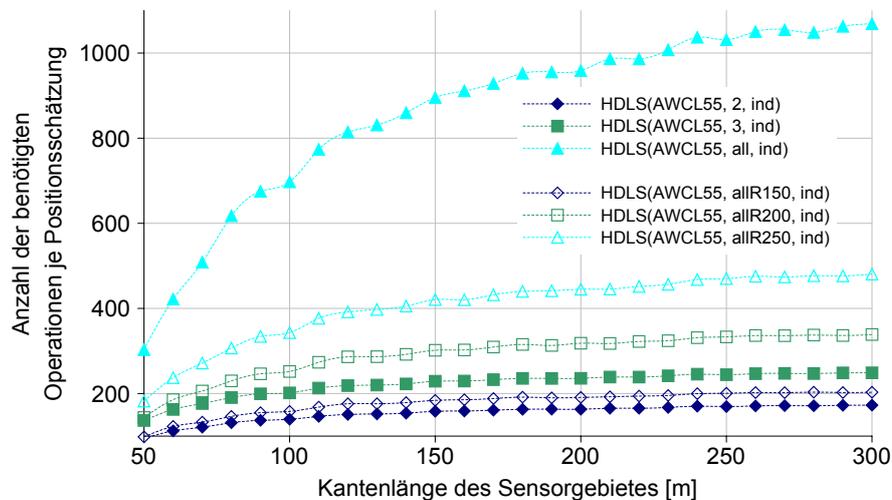


Abbildung 3.43: Vergleich der im Durchschnitt für die Berechnung auf dem Blindknoten verwendeten Rechenoperationen bei unterschiedlichen HDLS Varianten mit nominaler und distanzbasierter Beschränkung der verwendeten Einzelschätzungen.

HDLS mit abhängiger Distanzschätzung Die zuvor beschriebenen Untersuchungen mit unabhängiger Distanzapproximation wurden gemäß Abbildung 3.37 ebenfalls für die abhän-

gige Distanzschätzung vorgenommen. Um den Einfluss dieser Distanzschätzungsstrategie zu illustrieren, soll an dieser Stelle Abbildung 3.44 dienen, welche in Anlehnung an Abbildung 3.38 die erreichte Genauigkeit unter Verwendung der CL-Approximation betrachtet. Wie in Abbildung 3.38 gezeigt, konnte die Genauigkeit von $sDLS^i$ mit dieser Approximation unter Verwendung der unabhängigen Distanzschätzung im Mittel nicht erreicht werden. In Abbildung 3.37 ist hingegen klar zu erkennen, dass aufgrund der verbesserten Distanzschätzung bereits bei der Verwendung von nur zwei Vorberechnungen die Genauigkeit des $sDLS^i$ -Verfahrens übertroffen wird. Ähnlich wie bei der unabhängigen Distanzschätzung kann auch hier die Genauigkeit durch Verwendung weiterer Vorberechnungen verbessert werden. Eine Verschlechterung der Genauigkeit bei zu hoher Anzahl verwendeter Einzelschätzungen ist hingegen nicht zu beobachten.

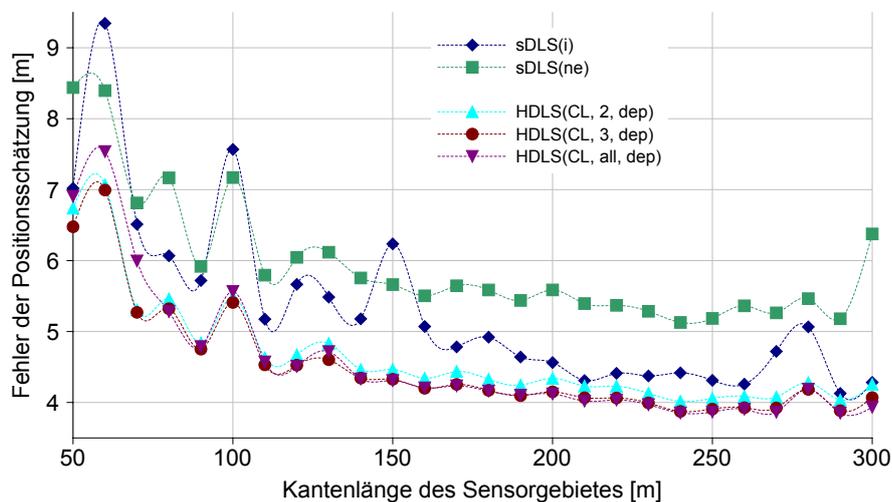


Abbildung 3.44: Darstellung des durchschnittlichen Fehlers der Positionsschätzung unterschiedlicher HDLS-Varianten mit CL-Approximation und abhängiger Distanzschätzung.

Diese Verbesserung auf Basis der abhängigen Distanzschätzung zeigt sich durchgehend bei allen HDLS-Varianten. Um dies in einem Überblick zu illustrieren, zeigt Abbildung 3.45 für jedes approximative Positionsschätzungsverfahren jeweils die beste Variante mit unabhängiger und mit abhängiger Distanzschätzung. Dies ist bei allen dargestellten Varianten eine Variante ohne Begrenzung der Einzelschätzungen oder zumindest mit einer hohen distanzbasierten Begrenzung. Deutlich zu erkennen ist, dass die Varianten mit abhängiger Distanzschätzung jeweils in einer höheren Genauigkeit resultieren als die Varianten mit unabhängiger Distanzschätzung.

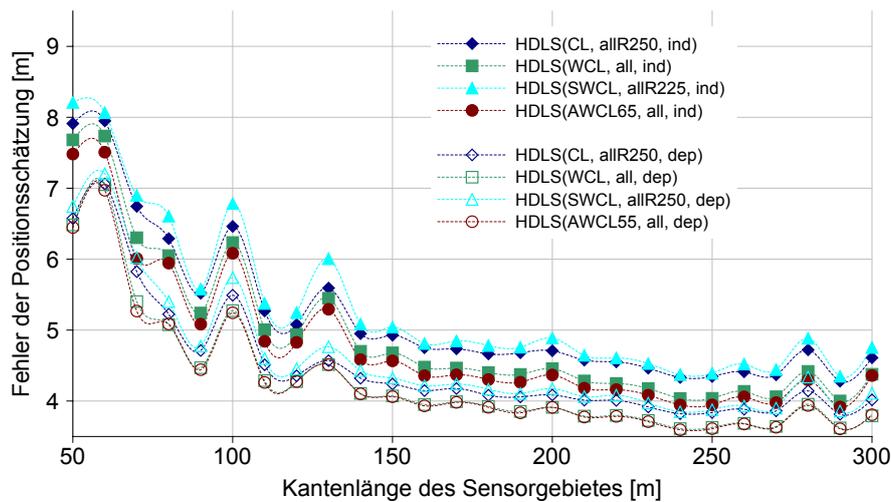


Abbildung 3.45: Darstellung des durchschnittlichen Fehlers der Positionsschätzung für HDLS-Varianten mit der jeweils höchsten Genauigkeit, unterteilt nach verwendeter Kombinationsmethode sowie der Art der Distanzschätzung.

Für die abschließende Bewertung des HDLS-Verfahrens ist in Abbildung 3.46 jeweils die Variante dargestellt, welche mit einer absoluten Obergrenze von zwei oder drei verwendeten Vorberechnungen bzw. ohne diese Obergrenze die höchste Genauigkeit erzielt. Dabei kann zunächst festgestellt werden, dass alle drei Vertreter des HDLS die abhängige Distanzschätzung verwenden und die Auswahl der verwendeten Vorberechnungen ausschließlich durch eine nominale Obergrenze gegeben ist. Eine Begrenzung aufgrund der unterschiedlichen Abstände der Referenzknoten zum Blindknoten führte in keinem der Fälle zu einem herausragenden Ergebnis. Die unterschiedlichen Abstände und die damit verbundene unterschiedliche Güte der Vorberechnungen konnte vielmehr durch die Gewichtung der Einzelschätzungen berücksichtigt werden. So fällt auf, dass die höchste Genauigkeit in zwei von drei Fällen durch Verwendung der AWCL-Approximation und in einem Fall durch die WCL-Approximation erzielt wurde. Wie bereits an anderer Stelle erwähnt, tritt bereits bei der Kombination von nur zwei Einzelschätzungen eine enorme Steigerung ein, welche sowohl das zugrunde liegende $sDLS^{ne}$ -Verfahren als auch das weit bessere Verfahren des $sDLS^i$ übertrifft, welches auf einer Vorberechnung basiert, die exakt die vom Blindknoten erreichbaren Referenzknoten enthält. Bei Hinzuziehen weiterer Vorberechnungen treten nur noch kleinere Verbesserungen auf. Dennoch wird die höchste Genauigkeit erreicht, wenn alle mit Hilfe der gegebenen Vorberechnungen durchgeführten Einzelschätzungen kombiniert werden. Der auftretende Positionsschätzungsfehler in großen Netzwerken wird mittels $HDLS(AWCL15,2,dep)$ auf etwa 78 % des Wertes von $sDLS^{ne}$ gesenkt. Mittels $HDLS(AWCL55,all,dep)$ ist sogar eine Senkung auf 73 % möglich.

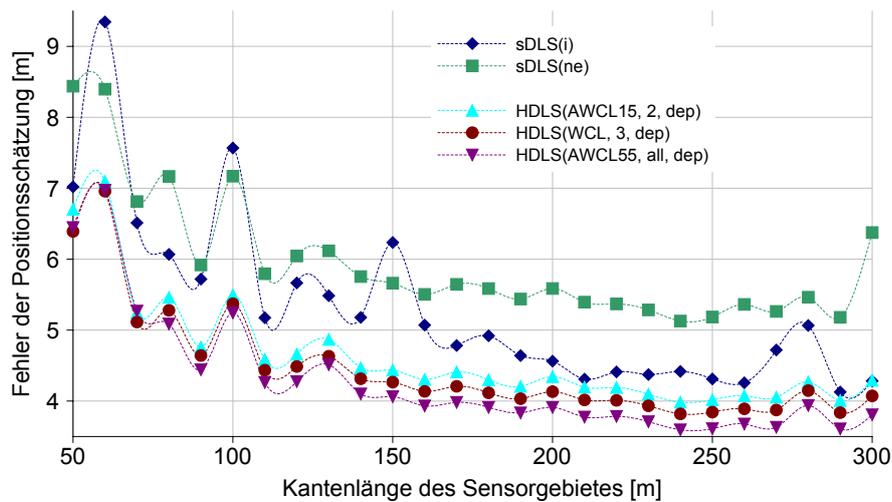


Abbildung 3.46: Vergleich des Positionsschätzungsfehlers der HDLS Varianten mit der jeweils höchsten Genauigkeit, unterteilt nach der maximalen Anzahl verwendeter Einzelschätzungen.

Die erreichte Verbesserung der Genauigkeit kann zu weiten Teilen durch die unterschiedliche Anzahl der insgesamt in der Positionsschätzung berücksichtigten Referenzknoten erklärt werden. Abbildung 3.47 zeigt diese für die zuvor genannten Verfahren. Hier ist zu erkennen, dass bei Verwendung von sDLSⁱ und sDLS^{ne} jeweils in etwa gleich viele Referenzknoten in die Positionsschätzung einfließen. Beide Verfahren unterscheiden sich diesbezüglich lediglich durch die Auswahl bzw. die Verteilung der verwendeten Referenzknoten. Während diese sich bei sDLSⁱ um den Blindknoten konzentrieren, sind sie bei sDLS^{ne} gleichmäßig um den ausgewählten Referenzknoten verteilt, wodurch sDLSⁱ eine höhere Genauigkeit erreicht. Im Fall von HDLS spielen sowohl geometrische Aspekte als auch die Anzahl der berücksichtigten Referenzknoten eine Rolle. So ist bei der Verwendung von zwei und drei Einzelmessungen bereits eine deutliche Steigerung der Anzahl verwendeter Referenzknoten zu erkennen. Da in diesen Fällen die Vorberechnungen der zwei bzw. drei Referenzknoten mit der geringsten Distanz zum Blindknoten verarbeitet werden, tritt gleichzeitig eine Verbesserung der Geometrie auf. Die zusätzlich berücksichtigten Referenzknoten bieten einen Ausgleich zu den Referenzknoten, welche durch die erste Vorberechnung einbezogen werden. Dieser Umstand zeigt sich auch darin, dass der Sprung von einer Einzelschätzung bei sDLS^{ne} zu zwei Einzelschätzungen stärker ausfällt als der darauf folgende Unterschied bei Verwendung von drei Einzelschätzungen. Die meisten Referenzknoten werden erwartungsgemäß bei der Kombination aller erzielbaren Einzelmessungen berücksichtigt.

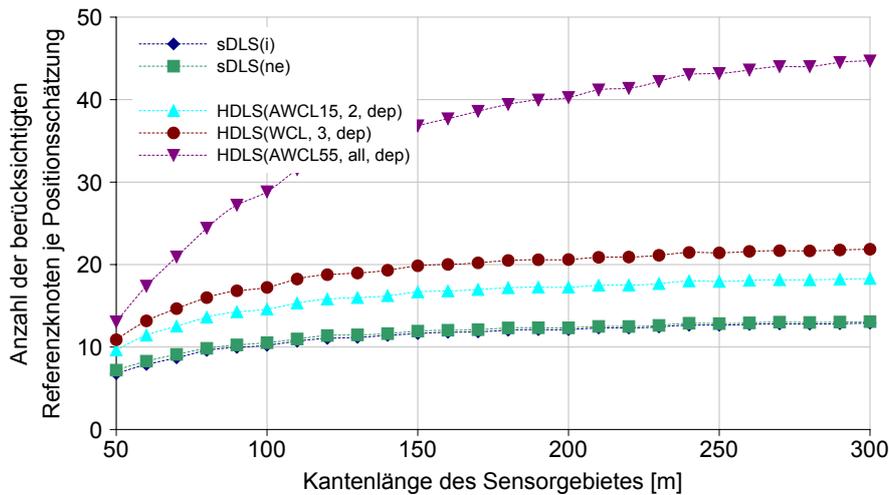


Abbildung 3.47: Vergleich der je Positionsschätzung berücksichtigten Referenzknoten der HDLS-Varianten mit der jeweils höchsten Genauigkeit, unterteilt nach der maximalen Anzahl verwendeter Einzelschätzungen.

Entscheidend für die Bewertung der dargestellten Verfahren ist jedoch nicht allein die erreichte Genauigkeit, sondern ebenso der dafür aufgewandte Rechenaufwand. Abbildung 3.48 stellt zu diesem Zweck die jeweils verwendeten mathematischen Operationen vergleichend dar. Hier ist zunächst zu erkennen, dass auch bei Verwendung aller Einzelschätzungen nur etwa ein Drittel des Rechenaufwands nötig ist, der durch die Matrix-Operationen bei der Verwendung des $sDLS^i$ -Verfahrens auftritt. Weiterhin kann festgestellt werden, dass jede zusätzlich verwendete Einzelschätzung den Gesamtaufwand um jeweils etwa 80 % des bei $sDLS^{ne}$ verwendeten Aufwands steigert, da einzelne Ergebnisse, wie einmal durchgeführte Distanzschätzungen, wieder verwendet werden. Als eine wesentliche Erkenntnis kann festgehalten werden, dass bereits durch die Kombination von nur zwei Einzelschätzungen eine enorme Steigerung der Genauigkeit erreicht wird, wobei der notwendige Rechenaufwand auf weniger als das Doppelte gesteigert wird. Die so erreichte Genauigkeit übertrifft die des $sDLS^i$ -Verfahrens, welches weit mehr als das Fünfzehnfache des Rechenaufwands beansprucht.

3.4.3.4 Nachbetrachtung

Verteilung des Kommunikationsaufwandes Ebenso wie bei den in Kapitel 3.4.2 dargestellten $sDLS$ -Verfahren besteht auch bei diesem Ansatz das Problem der ungleichen Verteilung der Kommunikationslast. Als Gegenmaßnahmen für dieses allgemein bekannte Problem gelten die in Kapitel 3.4.2.5 genannten Ansätze.

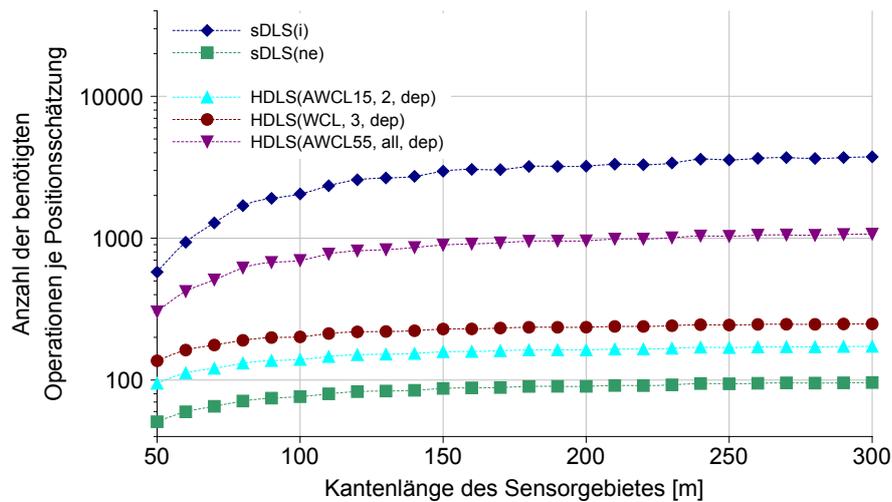


Abbildung 3.48: Vergleich der je Positionsschätzung vom Blindknoten verwendeten Rechenoperationen der HDLS-Varianten mit der jeweils höchsten Genauigkeit, unterteilt nach der maximalen Anzahl verwendeter Einzelschätzungen.

Anzahl durchgeführter Simulationsläufe Wie auch bei dem zugrunde liegenden sDLS-Verfahren hätte auch hier eine höhere Anzahl an Simulationsläufen zu einer teilweisen Glättung der dargestellten Ergebniskurven beitragen können. Aufgrund der begrenzten zeitlichen und rechentechnischen Ressourcen wurde jedoch davon abgesehen. Darüber hinaus zeigen die auftretenden Ausreißer sehr gut, in welchem Maß sich diese ungünstigen Eingangswerte auf die jeweiligen Verfahren auswirken. Da alle Verfahren auf jeweils identische Simulationsläufe angewandt wurden, zeigt sich so auch eine hohe Korrelation innerhalb der HDLS-Varianten, sowie an einigen Stellen die Fähigkeit dieser, die beim sDLS-Verfahren auftretenden Ausreißer auszugleichen.

3.4.4 Das sRAL Verfahren

3.4.4.1 Motivation

Die in den vorhergehenden Kapiteln dargestellten Verfahren des sDLS und des HDLS stellen eine Entwicklungslinie, ausgehend vom DLS-Verfahren dar. Im Fokus dieser Entwicklung steht die Skalierbarkeit des Verfahrens, um den Einsatz in großen Netzwerken zu ermöglichen. Dies konnte im Wesentlichen durch Modifikationen im algorithmischen Ablauf realisiert werden, wodurch gleichzeitig eine Steigerung der Genauigkeit erzielt wurde. Eine andere Entwicklungslinie wurde zeitgleich durch einen weiteren Projektpartner verfolgt. Der daraus resultierende, als Resource Aware Localization (RAL) [BB10, BRB10] bezeichnete

Ansatz, welcher nachfolgend kurz erläutert wird, verfolgt eine Reduzierung des auf den Sensorknoten erforderlichen Rechenaufwands und ermöglicht zudem eine Steigerung der erreichbaren Genauigkeit.

Da das RAL-Verfahren aufgrund seiner Ähnlichkeit zum DLS-Ansatz die gleichen Probleme beim Einsatz in großen Sensornetzen aufweist, besteht das Ziel der Entwicklung des nachfolgend beschriebenen Scalable Resource Aware Localization (sRAL)-Verfahrens darin, die durch RAL erreichten Vorteile mit denen des sDLS-Ansatzes zu kombinieren und in der Folge eine skalierbare Version des RAL-Verfahrens zu schaffen [BBS⁺11].

Das RAL-Verfahren Das als RAL bezeichnete Verfahren verfolgt zunächst eine Reduzierung des erforderlichen Rechenaufwands zur Realisierung der Nachberechnung auf dem Blindknoten. Um dies zu erreichen, wurde eine veränderte Linearumformung verwendet, welche nicht auf der Subtraktion einzelner Gleichungen des Gleichungssystems beruht, sondern die in jeder Gleichung vorhandenen Quadratterme der gesuchten Position in einer weiteren Variablen substituiert. Das Verfahren ist in Kapitel 2.2.6 beschrieben. Aufgrund dieses Vorgehens tritt einerseits eine weitere Unbekannte auf, andererseits steht im Vergleich zu der zuvor verwendeten Linearumformung eine zusätzliche Gleichung zur Verfügung. Das resultierende Gleichungssystem entspricht der in Gleichung (3.32) angegebenen Form. Die Indexmenge der verwendeten Referenzknoten $K = \{k_1, k_2, \dots, k_n\} = I(B)$ erstreckt sich über die Menge B der verfügbaren Referenzknoten. Einschränkungen bezüglich der Lösungsmethode werden durch diesen Ansatz nicht vorgenommen. Als effizienteste Lösung wird weiterhin die Normalengleichung verwendet.

$$\mathbf{A}\alpha = \mathbf{b} \tag{3.32a}$$

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} -2b_{k_1(x)} & -2b_{k_1(y)} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -2b_{k_n(x)} & -2b_{k_n(y)} & 1 \end{pmatrix}, \tag{3.32b}$$

$$\alpha = \begin{pmatrix} u(x) \\ u(y) \\ w \end{pmatrix}, \mathbf{b} = \begin{pmatrix} d_{uk_1}^2 - d_{0k_1}^2 \\ \vdots \\ d_{uk_n}^2 - d_{0k_n}^2 \end{pmatrix}$$

Die Bestandteile der als Vorbereitung versendeten Daten erfahren durch die Umstellung des Verfahrens eine geringfügige Veränderung. Einerseits ändern sich Form und Inhalt der Matrix \mathbf{Q}_p aufgrund der veränderten Matrix \mathbf{Q} . Hier kann jedoch auf die Übertragung der letzten Zeile verzichtet werden, da diese lediglich der Ermittlung der nicht relevanten Größe w dient. An die Stelle des ursprünglich als \mathbf{d}_p bezeichnete Vektors tritt der Vektor \mathbf{e}_p , welcher nunmehr nicht die Distanzen zwischen Linearisierer und weiteren Referenzknoten enthält, da auf die Verwendung eines Linearisierers verzichtet wurde. Die zu übertragenden Daten, welche im Vergleich zu DLS drei Einträge zu je zwei Byte mehr beinhalten, sind in Gleichung (3.33) zusammengefasst dargestellt.

$$\mathbf{A}_p = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T, \mathbf{e}_p = \begin{pmatrix} d_{0k_1}^2 \\ \vdots \\ d_{0k_n}^2 \end{pmatrix} \quad (3.33)$$

Die abschließende Positionsschätzung auf dem Blindknoten erfolgt mit Hilfe der in Gleichung (3.34) angegebenen Nachberechnung, wobei auf die Ermittlung der Unbekannten Größe w verzichtet werden kann.

$$\begin{pmatrix} u(x) \\ u(y) \\ w \end{pmatrix} = \mathbf{A}_p \left(\begin{pmatrix} d_{uk_1}^2 \\ \vdots \\ d_{uk_n}^2 \end{pmatrix} - \mathbf{e}_p \right) \quad (3.34)$$

Die Verwendung des RAL-Ansatzes bietet den Vorteil, dass je nach Anzahl der Referenzknoten auf eine Reihe von Additionsoperationen verzichtet werden kann. Darüber hinaus konnte in [NBB10] gezeigt werden, dass aufgrund des Verzichts auf einen Linearisierer eine höhere Genauigkeit als bei Verwendung des DLS-Verfahrens erreicht wird. Dies ist auf den meist negativen Einfluss des übermäßig stark gewichteten Linearisierers zurückzuführen.

3.4.4.2 Algorithmenbeschreibung

Um die in sDLS beschriebenen Ansätze der Skalierbarkeit auf das RAL-Verfahren zu übertragen, besteht ein wesentlicher Punkt in der Einführung individueller Vorberechnungen. Ebenso wie bei sDLS wird dabei für jeden Referenzknoten eine Vorberechnung erstellt, welche die eigenen Informationen sowie die Informationen der in dessen Reichweite befindlichen Referenzknoten enthält. Die Wahl der Vorberechnung durch den Blindknoten

erfolgt auch hier, indem die Vorberechnung des Referenzknotens mit der geringsten Distanz gewählt wird. Ebenso wie bei sDLSⁱ wäre an dieser Stelle eine Umstellung auf die Lösungsmethode der QR-Dekomposition möglich, um Vorberechnungen seitens der Blindknoten anpassen zu können. Um jedoch rechenaufwendige Operationen zur Anpassung der Matrix zu verhindern, wird stattdessen direkt eine dem sDLS^{ne} ähnliche Lösung angestrebt. Wie in Kapitel 3.4.2 beschrieben, kann bei sDLS^{ne} auf das Entfernen von Matrixzeilen verzichtet werden, indem für nicht erreichbare Referenzknoten eine Distanzschätzung auf Basis der Vorberechnung erfolgt. Durch die veränderte Vorberechnung besteht diese Möglichkeit bei sRAL zunächst nicht, da die Informationen des Vektors \mathbf{d}_p nicht in dem verwendeten Vektor \mathbf{e}_p enthalten sind. Um diese Distanzschätzung dennoch zu ermöglichen, wird die Vorberechnung des sRAL-Verfahrens um den Vektor \mathbf{d}_p erweitert, welcher die Distanzen zwischen dem mit der Vorberechnung assoziierten Referenzknoten und den in der Vorberechnung verwendeten Referenzknoten enthält. Anders als im Fall von sDLS^{ne} gehen diese jedoch einfach und nicht in quadratischer Form ein. Die in sRAL verwendete Vorberechnung beinhaltet daher die in Gleichung (3.35) dargestellten Daten, wobei die Indexmenge K der verwendeten Referenzknoten zu $K = I(B_i)$ aus der Menge der B_i hervor geht, welche den Referenzknoten b_i und die in dessen Reichweite befindlichen Referenzknoten enthält. Die Indizierung L weist in diesem Fall lediglich den Referenzknoten aus, welcher die Vorberechnung bereitstellt.

$$\mathbf{A}_p = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T, \mathbf{e}_p = \begin{pmatrix} d_{0k_1}^2 \\ \vdots \\ d_{0k_n}^2 \end{pmatrix}, \mathbf{d}_p = \begin{pmatrix} d_{k_1L}^2 \\ \vdots \\ d_{k_nL}^2 \end{pmatrix} \quad (3.35)$$

3.4.4.3 Evaluation

Zur Evaluation des sRAL-Verfahrens dient zunächst der gleiche simulative Aufbau, wie er bereits bei der Evaluation der sDLS-Ansätze verwendet wurde. Die verwendeten Simulationsparameter sind in Tabelle 3.8 zusammengefasst dargestellt. Als Referenzalgorithmus dient neben dem sDLS^{ne}-Verfahren und dem RAL-Ansatz auch das DLS-Verfahren, welches als gemeinsamer Ausgangspunkt diene. Die Bewertung des Verfahrens erfolgt wie schon bei der Untersuchung der sDLS-Verfahren anhand der Gesichtspunkte Rechenaufwand, Kommunikation und Genauigkeit.

Gesamtfläche	50 * 50 m ² ...200 * 200 m ²
Kommunikationsreichweite ¹	30 m
Blindknoten	12...200
Referenzknoten	12...200
Senkenknoten	1
Verteilung der Knoten	zufällig
Anzahl Simulationen	100

¹ Kommunikationsreichweite variiert gemäß des verwendeten Kanalmodells

Tabelle 3.8: Verwendete Simulationsparameter

Rechenaufwand Abbildung 3.49 betrachtet zunächst die Anzahl der im Mittel auf einem Blindknoten notwendigen Additionsoperationen, welche zur Vollendung der Positionsschätzung notwendig sind. Hier ist zunächst festzuhalten, dass im Fall von sRAL weniger Additionen benötigt werden, als bei der Verwendung von sDLS^{ne}. Diese Beobachtung korreliert mit den ebenfalls abgetragenen Werten der Verfahren DLS und RAL. Diese steigen jedoch mit der gewählten Netzwerkgröße an, während sDLS^{ne} und sRAL in einem niedrigen Niveau verharren. Der Unterschied zwischen den beiden Verfahren ist hauptsächlich durch die Einsparung der Vektoraddition in der in Gleichung (3.21) dargestellten Nachberechnung bedingt.

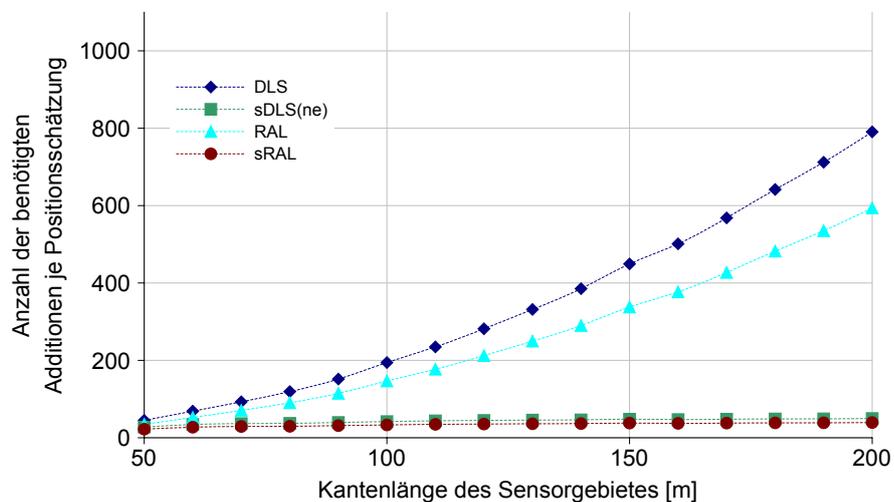


Abbildung 3.49: Vergleich der zur Positionsschätzung notwendigen Additionsoperationen im Rahmen der auf dem Blindknoten durchgeführten Nachberechnung.

Bei Betrachtung der aufgewendeten Multiplikationen in Abbildung 3.50 kann festgestellt werden, dass der sRAL-Ansatz erwartungsgemäß eine beträchtliche Aufwandsreduzie-

zung im Vergleich zu dem zugrunde liegenden RAL-Verfahren bewirkt. Ein signifikanter Unterschied zu den auf DLS basierten Pendanten ist jedoch nicht erkennbar.

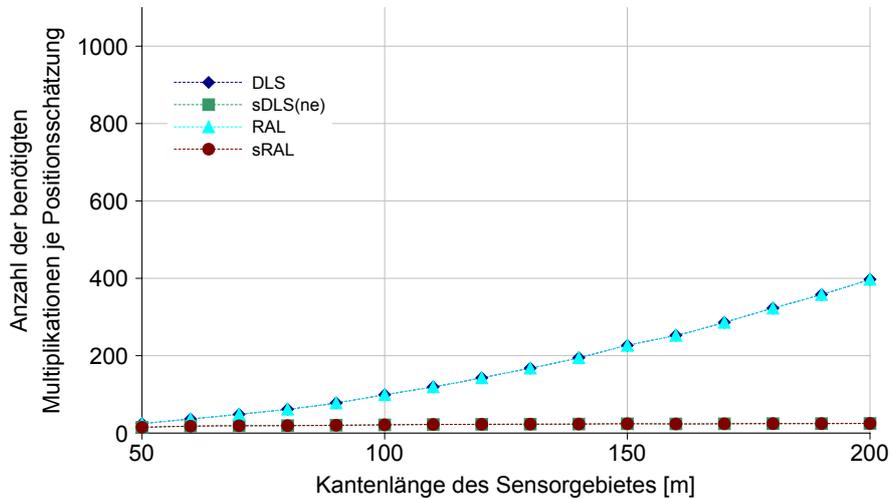


Abbildung 3.50: Vergleich der zur Positionsschätzung notwendigen Mutliplikationsoperationen im Rahmen der auf dem Blindknoten durchgeführten Nachberechnung.

Ein ähnliches Bild zeigt sich auch bei der Betrachtung der Potenzoperationen. Hier werden durch das sDLS^{ne}-Verfahren jedoch marginal mehr Operationen benötigt. Dies ist auf die eher selten angewendete Distanzschätzung zurückzuführen, welche aufgrund der unterschiedlich gestalteten \mathbf{d}_p Vektoren im Fall von sDLS zusätzliches Wurzelziehen erfordert.

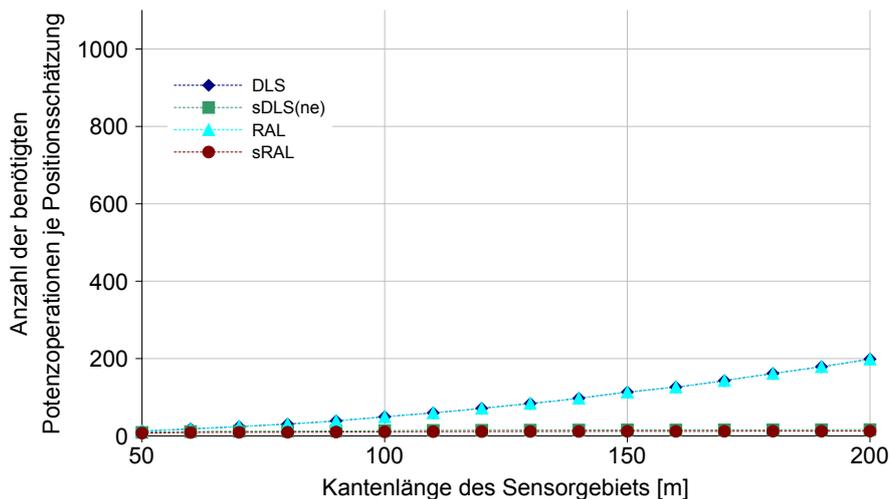


Abbildung 3.51: Vergleich der zur Positionsschätzung notwendigen Potenzoperationen im Rahmen der auf dem Blindknoten durchgeführten Nachberechnung.

Kommunikation Zur Bewertung der erforderlichen Kommunikation wurde, wie auch in Kapitel 3.4.2.3 geschehen, zum einen die Menge der durch die Senke ins Netz injizierten Daten erfasst und zum anderen die von einem Routing- oder Referenzknoten durchschnittlich versandte Datenmenge ermittelt. In Abbildung 3.52 ist zunächst die Gesamtmenge der durch die Senke ins Netz eingebrachten Daten dargestellt. Mit nahezu gleicher Datenmenge werden bei den Algorithmen DLS und RAL jeweils die geringsten Datenmengen ins Netzwerk injiziert. Aufgrund der hohen Anzahl individueller Vorberechnungen ist die durch sDLS^{ne} und sRAL eingebrachte Datenmenge um ein Vielfaches höher. Hier zeigt sich auch ein deutlicher Unterschied zwischen den beiden Verfahren. So werden beim sRAL-Ansatz aufgrund des zusätzlichen, für die Distanzschätzung verwendeten Vektors, mehr Daten versandt als es bei sDLS^{ne} der Fall ist.

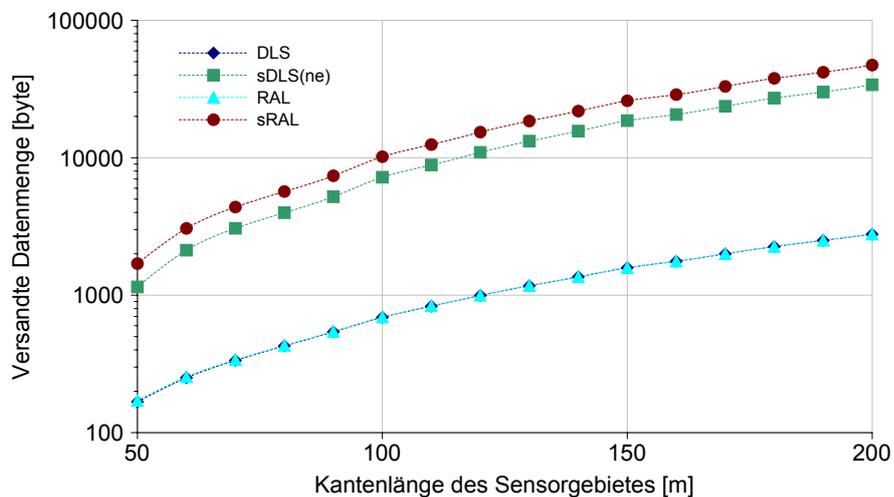


Abbildung 3.52: Vergleich der durch die Senke ins Netz injizierten Daten zur Positionsschätzung unter Verwendung der untersuchten Verfahren.

Betrachtet man nun die in Abbildung 3.53 dargestellte Datenmenge, die je Knoten im Durchschnitt transferiert wird, so zeigt sich der positive Effekt der bei sDLS^{ne} und sRAL genutzten individuellen Vorberechnungen. Da diese jeweils nur an einen Referenzknoten adressiert sind, nimmt die Menge der zu übertragenden Daten mit der Entfernung zur Senke stark ab, sodass ein Großteil der Knoten in diesem Fall weit weniger Daten transferieren muss als es bei DLS oder RAL der Fall ist. Dies spiegelt sich in der dargestellten Grafik derart wieder, dass mit steigender Netzwerkgröße jeder Routing- bzw. Referenzknoten im Durchschnitt weniger Kommunikationsaufkommen bewältigt als bei Verwendung einer einzigen Vorberechnung. Wie schon in Abbildung 3.52 zeigt sich auch hier die etwas

geringere im Fall von $sDLS^{ne}$ verwendete Datenmenge, was erneut auf die zusätzlich notwendigen Daten zurückzuführen ist.

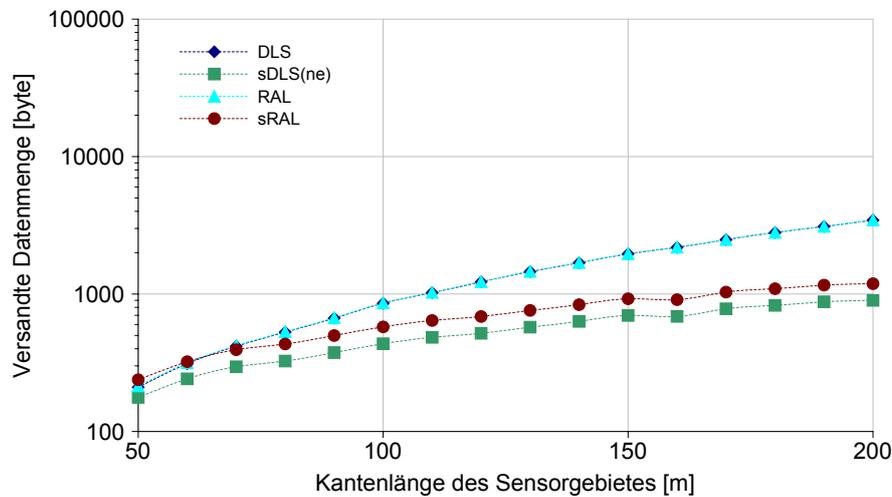


Abbildung 3.53: Vergleich der zur Positionsschätzung durchschnittlich durch einen Knoten transferierten Datenmenge unter Verwendung der untersuchten Verfahren.

Genauigkeit Zur Bewertung der erreichten Genauigkeit dient der Mittelwert der Distanz zwischen tatsächlicher Position eines Blindknotens und der geschätzten Position. Im Unterschied zu den in Kapitel 3.4.2.3 dargestellten Untersuchungen zum Komplex der $sDLS$ -Verfahren findet an dieser Stelle eine abweichende Behandlung des DLS -Verfahrens sowie des RAL -Ansatzes statt. Während in Kapitel 3.4.2.3 die Abstände zu den in großer Zahl auftretenden Referenzknoten, welche sich außerhalb der Reichweite eines Blindknotens befinden, mit Hilfe des Kanalmodells approximiert wurden, wird an dieser Stelle auch für DLS und RAL die in Kapitel 3.4.2 beschriebene, für $sDLS^{nd}$ und $sDLS^{ne}$ eingesetzte Distanzschätzung verwendet. Da dies jedoch lediglich dazu dient, Vergleichswerte im Bezug auf die erreichte Genauigkeit zu erhalten, wurden die notwendigen Abstände zwischen dem Referenzknoten mit der jeweils geringsten Distanz zum Blindknoten und den verbleibenden Referenzknoten vom Simulator bereitgestellt. Die eigentlich dafür notwendige Kommunikation sowie der zusätzliche Rechenaufwand wurden in den entsprechenden Abschnitten jedoch nicht betrachtet.

Die in Abbildung 3.54 dargestellten Ergebnisse der Untersuchung zeigen, dass bei Verwendung des DLS -Verfahrens die mit Abstand größten Fehler in der Positionsschätzung auftreten. Beim RAL -Ansatz hingegen ist der auftretende mittlere Positionsfehler wesentlich geringer und zudem unabhängig von der Größe des betrachteten Netzwerks. Die

Ursache dieses Phänomens liegt in der Verwendung des Linearisierers. Beim DLS-Verfahren fällt diesem speziellen Referenzknoten eine sehr hohe Gewichtung zu. Er bestimmt maßgeblich die Positionsschätzung und den daraus resultierenden Fehler. Eine ungenaue Distanzschätzung zu diesem Referenzknoten wirkt sich besonders stark aus. Beim RAL-Verfahren gibt es diesen speziellen Knoten nicht. Jeder Referenzknoten geht mit gleicher Gewichtung in die Positionsschätzung ein. In großen Netzwerken befindet sich die Mehrheit der Referenzknoten außerhalb der Reichweite eines beliebigen Blindknotens. Diese Distanzen werden mit Hilfe des Abstandes zum nächstgelegenen Referenzknoten und den tatsächlichen Distanzen zwischen diesem Referenzknoten und dem jeweils außer Reichweite befindlichen Referenzknoten approximiert. Da die Distanz zwischen Blindknoten und dem zur Approximation genutzten nächstgelegenen Referenzknoten im Vergleich sehr gering ist, stimmen die derart approximierten Distanzen bis auf diese kleine Abweichung mit den Distanzen überein, welche der Referenzknoten zu den übrigen Referenzknoten misst. Aufgrund dieser Übereinstimmung stimmt die mittels RAL geschätzte Position in etwa mit der Position dieses Referenzknotens überein. Die dargestellte Lokalisierung mittels RAL entspricht daher in diesem Fall einer Nearest Neighbor Lokalisierung.

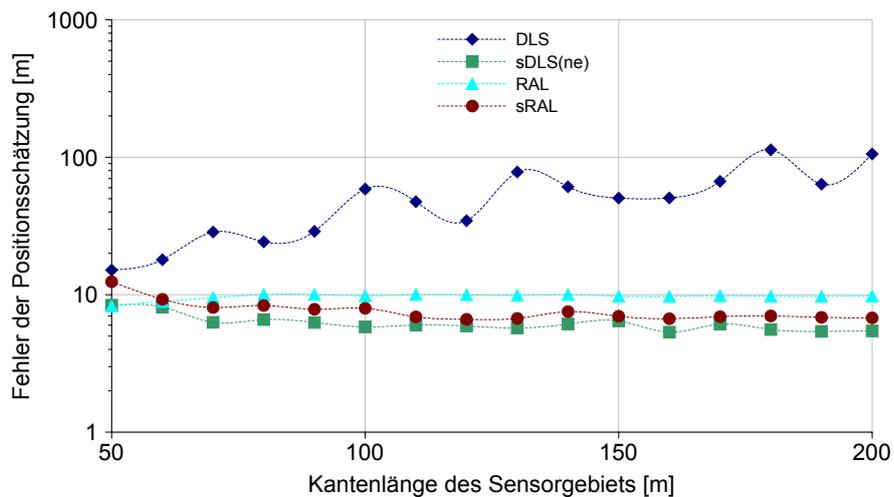


Abbildung 3.54: Vergleich der bei der Positionsschätzung durchschnittlich auftretenden Abweichung von der tatsächlichen Position unter Verwendung der untersuchten Verfahren.

Durch Verwendung des sRAL-Ansatzes kann die mittels RAL erzielte Genauigkeit entscheidend verbessert werden. Der Verlauf des Graphen gegenüber der verwendeten Netzwerkgröße ähnelt dem bei sDLS^{ne} beobachteten Verlauf. Es ist jedoch festzustellen, dass mittels sDLS^{ne} nochmals geringere Positionsschätzungsfehler erzielt werden. Dies ist auf den scheinbar positiven Effekt des in sDLS^{ne} verwendeten Linearisierers zurückzuführen.

Um diesen Effekt genauer zu untersuchen und das zunächst unerwartete Ergebnis zu manifestieren, wurden weitere Simulationen durchgeführt, welche nachfolgend dargestellt sind.

Idealistische Simulation In einer früheren Arbeit [NBB10] wurden das DLS-Verfahren und der RAL-Ansatz bereits mit Hilfe einer weiteren Simulationsumgebung verglichen, wobei dem RAL eine höhere Genauigkeit attestiert wurde. Der in Abbildung 3.55(a) dargestellte Aufbau dieser Simulation bestand in der kreisförmigen Anordnung von Referenzknoten, in deren Zentrum ein Blindknoten platziert wurde, welcher mit Hilfe der umliegenden Referenzknoten eine Positionsschätzung durchführt. Die bekannten Distanzen zwischen Blindknoten und Referenzknoten wurden durch eine gleichverteilte Abweichung von $\pm 10\%$ verfälscht. Bei der Darstellung der jeweils unterschiedlichen Schätzpositionen aus 10000 Simulationen, ähnlich den Darstellungen in den Abbildungen 3.55(b) und 3.55(c), konnte ein klarer Unterschied in der Verteilung der Schätzpositionen beider Verfahren festgestellt werden. Während diese im Fall von RAL eine Kreisform bilden, tritt beim DLS-Verfahren eine elliptische Verteilung auf, wobei die Hauptachse in Richtung des verwendeten Linearisierers zeigt.

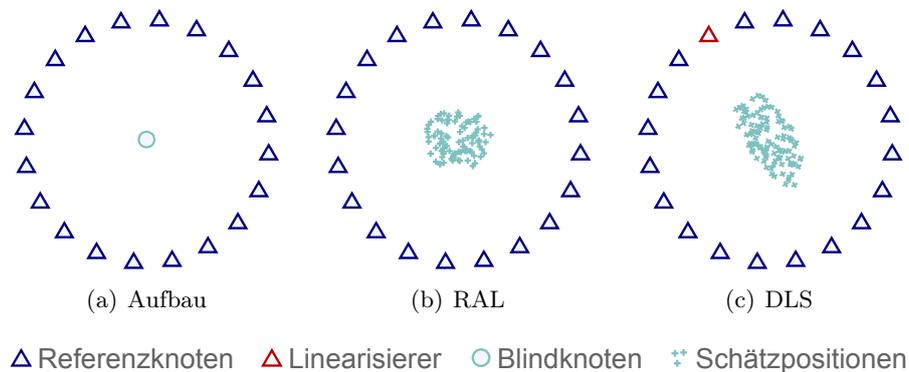


Abbildung 3.55: Darstellung des in [NBB10] genutzten Simulationsaufbaus (a) und modellhafte Verteilung der Positionsschätzungen unter Verwendung von RAL (b) und DLS (c).

Für die nachfolgend dargestellten Untersuchungen wurde diese Simulation in veränderter Form durchgeführt. So wurde der Prozess der Positionsschätzung nicht nur für das Zentrum durchgeführt, sondern für insgesamt 1 Million Punkte, welche in einem regelmäßigen quadratischen Raster angeordnet sind. Für jeden dieser Punkte wurde der Fehler der Positionsschätzung als Distanz zwischen tatsächlichem Punkt und der geschätzten Position bestimmt und über 2000 Simulationen gemittelt. Um den Einfluss des Linearisierers in

den verschiedenen Verfahren zu untersuchen, wurde einerseits die Anzahl der Referenzknoten und andererseits das verwendete additive Rauschen variiert. Die verwendeten Simulationsparameter sind in Tabelle 3.9 zusammengetragen. Den Simulationen liegt die Annahme zugrunde, dass den platzierten Blindknoten eine Distanzschätzung zu allen im Netz befindlichen Referenzknoten möglich ist. Die Verfahren des RAL und des sRAL unterscheiden sich in dieser Simulation daher nicht.

Gesamtfläche	$2 * 2 m^2$
Kommunikationsreichweite ¹	∞
Distanzfehlermodell	adaptives gleichverteiltes Rauschen
Distanzfehler	$\pm 0 \% \dots \pm 100 \%$
Blindknoten ²	1000000
Referenzknoten	4...100
Senkenknoten ³	1
Verteilung der Referenzknoten	kreisförmig, gleichmäßig
Verteilung der Blindknoten	rasterförmig
Anzahl Simulationen	2000

¹ Eine Distanzschätzung ist an jeder Position gewährleistet

² Die Positionsschätzung erfolgt an 1000000 Punkten ³ Ist in der Simulation nicht von Relevanz

Tabelle 3.9: Verwendete Simulationsparameter

Um den Einfluss des Linearisierers zu demonstrieren, sind in Abbildung 3.56 die Ergebnisse für ein Netzwerk mit 20 Referenzknoten und einer verwendeten Abweichung von $\pm 10 \%$ für die untersuchten Verfahren dargestellt. Da bei RAL/sRAL kein Linearisierer verwendet wird, konzentriert sich das Gebiet, in dem die höchste Genauigkeit erzielt wird, wie in Abbildung 3.56(a) dargestellt, im Zentrum des aus Referenzknoten gebildeten Kreises. Anders verhält es sich bei der Verwendung des DLS-Verfahrens, dargestellt in Abbildung 3.56(b). Hier tritt der geringste Lokalisierungsfehler auf, wenn sich der Blindknoten an einem Punkt zwischen Zentrum und Linearisierer befindet. Die genaue Position dieses Punktes hängt von der Anzahl der verwendeten Referenzknoten ab. Der sDLS-Ansatz unterscheidet sich von den zuvor genannten Verfahren dahingehend, dass der Linearisierer nicht statisch durch einen Referenzknoten dargestellt wird, sondern jeweils der Referenzknoten als Linearisierer dient, welcher die geringste Distanz zum Blindknoten aufweist. Abbildung 3.56(c) lässt daher erkennen, dass sich die Region mit der höchsten Genauigkeit auf einer Kreisbahn um das Zentrum befindet. Im Zentrum selbst erreicht sDLS in dieser Abbildung eine geringere Genauigkeit als RAL/sRAL, im Bereich nahe der Referenzknoten bietet es jedoch eine höhere Genauigkeit und deckt dabei einen größeren Bereich ab.

Um den Bereich, in dem sDLS^{nc} über RAL/sRAL dominiert, besser darzustellen, wird in Abbildung 3.57 die Differenz der Positionsschätzungsfehler von sDLS und sRAL ver-

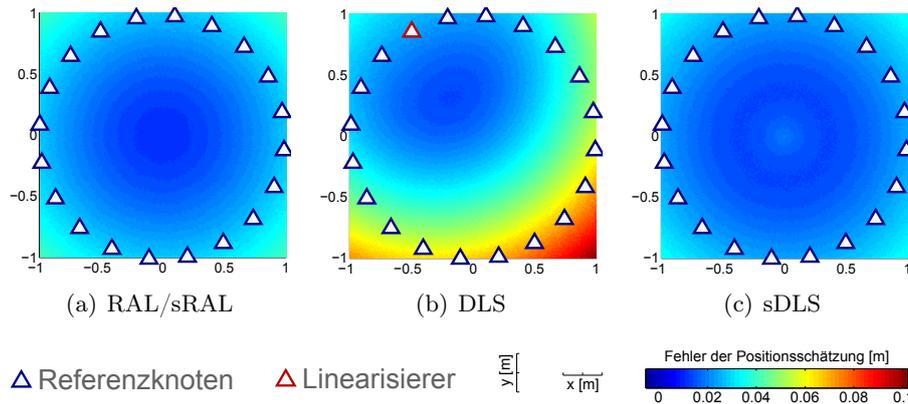


Abbildung 3.56: Darstellung der räumlichen Verteilung auftretender Fehler der Positionsschätzung für die Verfahren (a) RAL/sRAL, (b) DLS und (c) sDLS.

wendet. Um die Anzahl der Referenzknoten und den gewählten Distanzschätzungsfehler als Einflussfaktoren zu untersuchen, wurden beide Parameter variiert. Abbildung 3.57 stellt die Ergebnisse dieser Untersuchung für eine Auswahl an Parameterkombinationen bildlich dar. Eine weiße Markierung stellt dabei die Stellen gesondert dar, an denen beide Verfahren die gleiche Genauigkeit bieten. Aus den Darstellungen ist zu erkennen, dass das sRAL-Verfahren innerhalb der weiß markierten Grenze, nahe des Zentrums dominiert, während sDLS außerhalb dieser Grenze eine höhere Genauigkeit bietet. Beide Verfahren unterscheiden sich dabei umso stärker, je fehlerbehafteter die Distanzschätzung gewählt wird. Der Bereich, in dem das sDLS-Verfahren über das sRAL-Verfahren dominiert, ist umso größer, je kleiner die Anzahl verwendeter Referenzknoten ist.

Die gezeigten Ergebnisse werden durch weitere Grafiken in den Abbildungen 3.58 und 3.59 untermauert, welche jeweils einen Querschnitt der dargestellten Netzwerke entlang der x -Achse darstellen. In Abbildung 3.58 ist die Anzahl der Referenzknoten von vier bis 100 variierend dargestellt. Die Abweichung der Distanzschätzung ist mit $\pm 20\%$ als konstant angenommen. Zu erkennen ist, dass selbst bei einer hohen Zahl von 100 Referenzknoten sRAL nur innerhalb eines Radius von etwa 50 % der Distanz zwischen Zentrum und Referenzknoten eine höhere Genauigkeit bietet als sDLS^{ne}. Die Fläche, innerhalb der sDLS^{ne} dominiert, ist somit in jedem Fall größer. Es ist jedoch andererseits festzuhalten, dass sRAL bei einer hohen Zahl an Referenzknoten innerhalb des von ihm dominierten Gebietes eine weit höhere Genauigkeit bietet als sDLS^{ne}. Außerhalb dieses Gebietes ist es andersherum nicht der Fall. Bei einer geringen Zahl an Referenzknoten hingegen ist das sDLS^{ne}-Verfahren sehr viel genauer als sRAL.

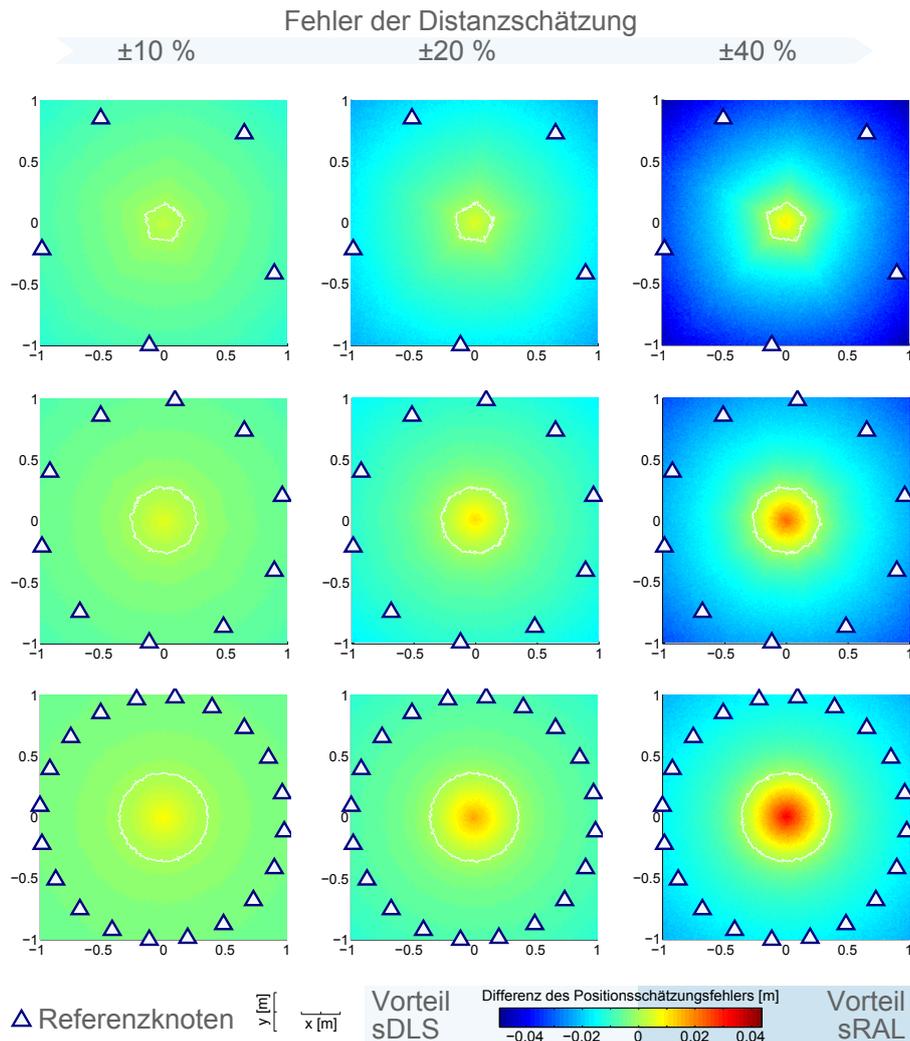


Abbildung 3.57: Vergleich der Verfahren RAL/sRAL und sDLS mit Hilfe der Differenz des Positionsschätzungsfehlers $e_{sDLS} - e_{sRAL}$ für unterschiedliche Anzahl an Referenzknoten und unterschiedliche Abweichung der Distanzinformation.

In Abbildung 3.59 wurde die Anzahl der Referenzknoten auf 20 festgesetzt, um den Einfluss der Abweichung der Distanzschätzung zu illustrieren und diese von $\pm 0\%$ bis $\pm 100\%$ zu variieren. In der dargestellten Grafik bestätigt sich, dass diese keinen Einfluss auf die Größe der jeweils durch eines der Verfahren dominierten Gebiete hat. Es ist jedoch erkennbar, dass das sRAL-Verfahren weit weniger anfällig für Fehler in der Distanzschätzung ist als das sDLS-Verfahren.

In der Summe bestätigen die Ergebnisse aus den Abbildungen 3.57, 3.58 und 3.59 die zuvor in Abbildung 3.54 festgestellte Beobachtung, nach der die Genauigkeit des sDLS^{ne}-Verfah-

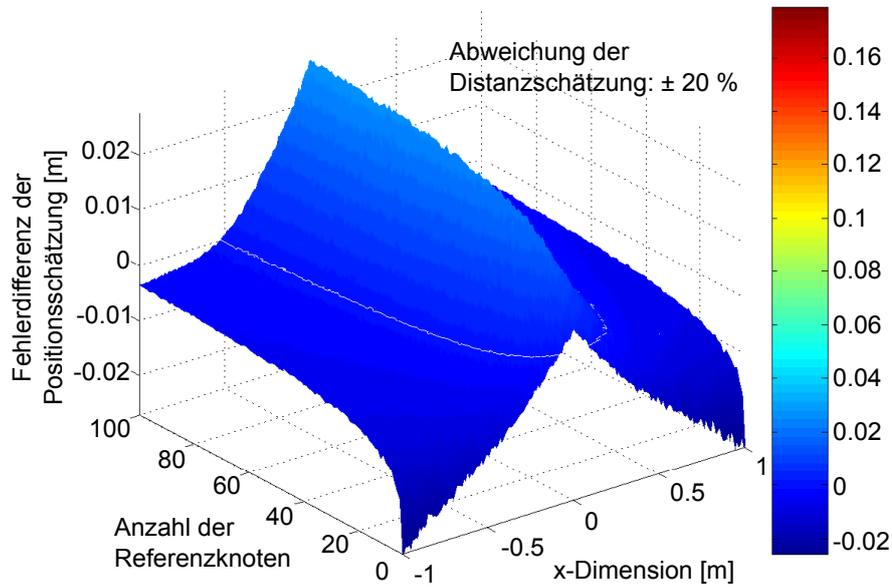


Abbildung 3.58: Querschnitt der Fehlerdifferenz von sDLS und sRAL, dargestellt über einer variablen Anzahl verwendeter Referenzknoten.

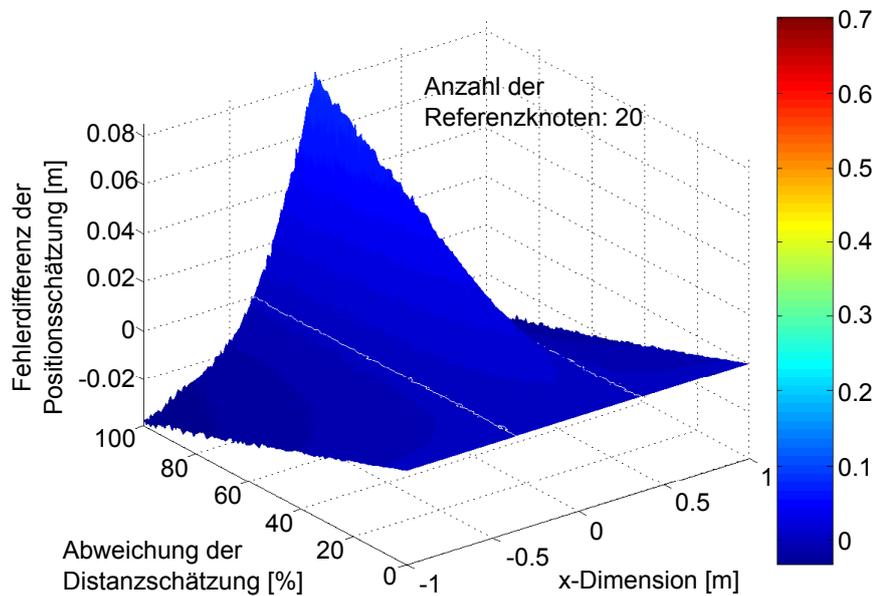


Abbildung 3.59: Querschnitt der Fehlerdifferenz von sDLS und sRAL, dargestellt über einer variablen Abweichung der geschätzten Distanz.

rens im Mittel höher ist, als die mit sRAL erreichte Genauigkeit. Betrachtet man die zuletzt dargestellten Ergebnisse, so ist festzustellen, dass sDLS^{ne} bei wenigen Referenzknoten und vor allem dann dominiert, wenn sich der Blindknoten nicht im Zentrum der umliegenden Referenzknoten befindet. Es ist aufgrund der zufälligen Verteilung der Referenzknoten in oben gezeigter Simulation davon auszugehen, dass sich ein Blindknoten selten im Zentrum der umliegenden Referenzknoten befindet und daher das sDLS^{ne}-Verfahren dominiert. In den Abbildungen konnte zudem gezeigt werden, dass sDLS-basierte Verfahren eine umso höhere Genauigkeit erzielen, je geringer der Abstand des Blindknotens zum Linearisierer ist. Dieser zieht die Schätzposition des Blindknotens gewissermaßen an. Da der Linearisierer im Fall von sDLS^{ne} stets der Referenzknoten mit der geringsten Distanz zum Blindknoten ist, entfaltet der höher gewichtete Linearisierer in diesem Fall eine positive Wirkung. Das Gegenteil ist beim einfachen DLS-Verfahren der Fall, wo dieser häufig weit entfernt vom Blindknoten ist und eine negative Wirkung besitzt.

3.4.4.4 Nachbetrachtung

Verteilung des Kommunikationsaufwandes Wie bei den sDLS-Verfahren, so besteht auch bei diesem Ansatz das Problem der ungleichen Verteilung der Kommunikationslast. Als Gegenmaßnahmen für dieses allgemein bekannte Problem gelten die in Kapitel 3.4.2.5 genannten Ansätze.

3.4.5 Weiterentwicklungen und Ausblicke

Konstruktion der Vorberechnung Für die in diesem Kapitel betrachteten Verfahren des sDLS und des sRAL, sowie darauf aufbauende Ansätze wurde die Annahme getroffen, dass nur zu Referenzknoten innerhalb der eigenen Kommunikationsreichweite verwertbare Distanzschätzungen vorgenommen werden können. Dementsprechend wurden die individuell erstellten Vorberechnungen so gestaltet, dass sie jeweils nur die Daten eines Referenzknotens sowie der in dessen Reichweite befindlichen Referenzknoten enthalten. Das Verfahren wirkt dabei einer stetigen Komplexitätssteigerung bei Verwendung aller Referenzknoten entgegen. Gleichzeitig bedingt diese Annahme jedoch auch eine gewisse Dichte an Referenzknoten, um eine erfolgreiche Lokalisierung möglichst vieler Blindknoten gewährleisten zu können. Um diese Eingrenzung aufzubrechen und bei gleicher Dichte mehr Referenzknoten in die Vorberechnung einzubeziehen, kann der Einzugsradius auf eine festgelegte Anzahl an Hops erweitert werden. Da es zu erwarten ist, dass die Genauigkeit der geschätzten Abstände mit der Zahl der Hops abnimmt, ist es ratsam, Referenzknoten in 1-Hop-Distanz stärker

zu gewichten als Referenzknoten mit größerer Entfernung. Unterschiedliche Möglichkeiten zur Gewichtung in DLS-basierten Verfahren werden nachfolgend diskutiert.

sDLS und Gewichtung Um eine gezielte Gewichtung einzelner Referenzknoten in der sDLS-basierten Lokalisierung zu erreichen, muss zunächst eine ungewichtete Methode des sDLS betrachtet werden. Hier zeigt sich bei näherem Hinsehen, dass die als sDLS betrachteten Verfahren aufgrund der verwendeten Linearumformung keineswegs ungewichtet sind, sondern eine Gewichtung des einen Linearisierers mit der Anzahl der weiteren Referenzknoten vornehmen. Das sRAL-Verfahren stellt hingegen eine ungewichtete Methode dar. Eine weitere Möglichkeit, um eine Gewichtung bei der Linearumformung zu vermeiden, besteht darin, nicht wie im Fall von sDLS, eine Zeile des Gleichungssystems von allen anderen zu subtrahieren, sondern paarweise jede Zeile von der jeweils nachfolgenden abzuziehen. Dabei ist darauf zu achten, dass die letzte Zeile entsprechend von der ersten abzuziehen ist. Solch eine ungewichtete Linearumformung vorausgesetzt, kann eine nahezu beliebige Gewichtung der Gleichungen erfolgen. Eine weitere Möglichkeit der Gewichtung besteht darin, die Linearumformung mittels mehrerer Linearisierer zu gestalten und diese von jeweils unterschiedlich vielen Gleichungen abzuziehen. Bei allen Möglichkeiten der Gewichtung ist jedoch darauf zu achten, dass eine Distanzapproximation wie in sDLS^{ne} geschehen, wie schon im Fall von sRAL, nur mit erhöhtem Aufwand möglich ist. Wird jedoch im gesamten Verfahren von einer Multi-Hop-Distanzschätzung ausgegangen, so erübrigt sich die in sDLS^{ne} verwendete Distanzapproximation.

sRAL und Gewichtung Bei der Verwendung des RAL-Ansatzes tritt, anders als bei DLS-basierten Verfahren, keine Gewichtung auf. Alle Referenzknoten gehen mit gleicher Gewichtung in die Positionsschätzung ein. Beim Vergleich des sDLS^{ne}-Verfahrens mit dem sRAL-Verfahren in Kapitel 3.4.4 konnte festgestellt werden, dass gerade diese Gewichtung zu einer höheren Genauigkeit des sDLS^{ne}-Verfahrens führt. Dieses Defizit des sRAL-Verfahrens kann durch eine gezielte Gewichtung des Referenzknotens bekämpft werden, welcher sich jeweils in der von ihm bereitgestellten Vorberechnung befindet. Auf diese Weise kann nicht nur die in sDLS^{ne} verwendete Gewichtung nachgebildet werden. Durch eine gezielte Feinabstimmung der Gewichtung sowie eine zusätzliche Gewichtung weiterer in der Vorberechnung verwendeter Referenzknoten besteht die Möglichkeit eine höhere Genauigkeit zu erzielen, als es mit sDLS^{ne} möglich ist.

Numerische Stabilität Für den Ansatz des $sDLS^{ne}$ wie auch für das sRAL-Verfahren wurde als Lösungsmethode die Verwendung der Normalengleichung anstelle der in $sDLS^i$ verwendeten QR-Dekomposition verwendet, da die Menge der zu übertragenden Daten der Vorberechnung hierdurch geringer ausfällt. Ein Nachteil der Normalengleichung besteht jedoch in der mangelnden numerischen Stabilität. Die Lösung mittels QR-Dekomposition ist im Unterschied zur Verwendung der Normalengleichung rückwärts stabil. Dies bedeutet, dass Fehler in den Eingangswerten sowie Fehler durch Rundungen von diesem Lösungsverfahren maximal bis zu einer festen Schranke verstärkt werden. Bei der Lösung mittels Normalengleichung hingegen, kann das Verfahren selbst hohe Fehler induzieren. Eine weitere Verbesserung auf Basis des $sDLS^{ne}$ -Verfahrens kann daher dadurch erzielt werden, dass anstelle der Normalengleichungen die QR-Dekomposition als Lösungsverfahren verwendet wird. Dies bedeutet jedoch keinen Rückschritt zu der als $sDLS^{nu}$ bezeichneten Variante. So sollte als wichtigstes Unterscheidungsmerkmal der vollständige Verzicht auf jedwede Anpassung der Vorberechnung aus dem $sDLS^{ne}$ -Ansatz erhalten bleiben. Diese Forderung ermöglicht es, anstelle der vollständigen Matrix \mathbf{Q}_p , lediglich die zur Positionsschätzung benötigte erste und zweite Zeile dieser Matrix zu übertragen. Somit kann erreicht werden, dass Kommunikation und Berechnungsaufwand der Nachberechnung weiterhin auf dem Niveau der als $sDLS^{ne}$ bezeichneten Variante rangieren, die Fehleranfälligkeit des Verfahrens jedoch gesenkt wird.

Ausreißer in der Positionsschätzung Wie in den Kapiteln 3.4.2 und 3.4.4 gezeigt, besteht bei auf DLS-basierten Verfahren, anders als bei der Verwendung der approximativen Verfahren, das Problem, dass durch eine ungünstige Kombination der Eingangswerte, insbesondere der Geometrie der Referenzknoten verbunden mit der ungenauen Distanzschätzung, teils extreme Ausreißer auftreten können. Diese liegen in Einzelfällen sogar außerhalb des untersuchten Gebietes. Die Erkennung und Behandlung solch fehlerhafter Schätzungen stand nicht im Fokus der untersuchten Verfahren, kann aber bereits durch einfache Ansätze realisiert werden. So kann beispielsweise nach erfolgter Positionsschätzung überprüft werden, ob die berechnete Position innerhalb des Untersuchungsgebietes liegt oder aber ob der daraus resultierende Abstand zu erkannten Nachbarknoten eine bestehende Kommunikation überhaupt zulässt. Ebenso kann der in Kapitel 5 beschriebene Ansatz zur Ausreißerererkennung verwendet werden, um durch Vergleiche mit Positionsangaben benachbarter Knoten festzustellen, ob die eigene Position in diesen Bereich passt. Wird die eigene Position als Ausreißer erkannt, so bietet es sich an, auf ein Verfahren der approximativen Lokalisierung zurückzugreifen. Das HDLS-Verfahren stellt bereits einen ersten Ansatz dar, bei dem durch die Kombination von exakten und approximativen Verfahren

ein Verbesserung der Positionsschätzung erzielt wurde. Ein weiteres Verfahren, welches einen ähnlichen Ansatz verwendet und im Zusammenhang mit den präsentierten Verfahren entstanden ist, stellt die Lokalisierung mittels Hybrid Plausible Approach for Error Reduced Localization (HyPEARLoc) [SBGT11] dar. Dieses Verfahren adressiert gezielt die auftretenden Ausreißer, indem es die geschätzten Abstände zu den Referenzknoten mit den aus der Positionsschätzung resultierenden Abständen vergleicht und daraus eine Güte bestimmt. Dieser als RATE bezeichnete Wert ist umso größer, je unrealistischer die Schätzposition erscheint. Die Berechnung von Schätzposition und RATE erfolgt zum einen für das exakte sDLS-Verfahren, als auch für den approximativen AWCL-Ansatz. Die ermittelten Schätzpositionen können so miteinander verglichen werden. Um aus beiden Einzelschätzungen eine resultierende Positionsschätzung zu ermitteln, wird der gewichtete Mittelwert beider Positionen verwendet, wobei der RATE-Wert der jeweils anderen Einzelschätzung zur Gewichtung genutzt wird. Dieses Vorgehen kann, wie in Gleichung (3.36) dargestellt, ebenso als die Kombination der Einzelschätzungen mittels WCL interpretiert werden. Die mit Hilfe dieses Ansatzes erreichte Genauigkeit übertrifft im Mittel die Genauigkeit der verwendeten Einzelverfahren sDLS und AWCL.

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_{HyPEARLoc} &= \left(\sum_{loc \in L} w_{loc} \right)^{-1} \sum_{loc \in L} \mathbf{u}_{loc} w_{loc} \\ w_{loc} &= \sum_{l \in \{L \setminus loc\}} RATE_l \\ L &= \{sDLS, AWCL\} \end{aligned} \tag{3.36}$$

Clustergestütztes sDLS Als ein Nachteil von sDLS kann die Tatsache betrachtet werden, dass an jeden Referenzknoten eine individuelle Vorberechnung mittels Routing übertragen wird. Es liegt daher die Vermutung nahe, dass weitere Einsparungen in der Kommunikation möglich sind, wenn mehrere Referenzknoten die gleiche Vorberechnung verwenden. Solche Referenzknoten könnten zu Clustern zusammengefasst werden. Bei genauerer Betrachtung der bestehenden sDLS- und sRAL-Verfahren liegt bereits hier eine Clusterbildung vor, welche man als Mikrocluster bezeichnen kann. Jeder Cluster zeichnet sich dabei durch einen äußeren Einzugsbereich, welcher die Referenzknoten der Vorberechnung erfasst, und einen inneren Wirkungsbereich aus, welcher die Blindknoten beinhaltet, von denen die Vorberechnung genutzt wird. Der Wirkungsbereich wird somit von den Voronoi-Linien zu den umliegenden Referenzknoten begrenzt, während der Einzugsbereich durch die Kommu-

nikationsreichweite des Referenzknotens vorgegeben ist. Benachbarte Cluster überlappen sich in ihrem Einzugsbereich. Bei der Wahl anderer Clusterformen oder Clustergrößen sollte darauf geachtet werden, dass Blindknoten im Wirkungsbereich zur Lokalisierung notwendige Referenzknoten im Einzugsbereich erreichen können, oder zumindest eine adäquate Distanzschätzung gewährleistet werden kann. Im Rahmen dieser Arbeit wurden verschiedene Clustergrößen in quadratischer Form untersucht. Es konnten jedoch keine signifikanten Vorteile gegenüber den bislang verwendeten Mikroclustern festgestellt werden. Dies ist zum einen durch einen höheren Aufwand bei der Distanzschätzung und Nachberechnung begründet. Zum anderen ist festzuhalten, dass auf diese Weise zwar insgesamt weniger Vorberechnungen erstellt werden müssen, diese jedoch einen entsprechend größeren Umfang besitzen. Eine wesentliche Steigerung der Genauigkeit konnte ebenfalls nicht erreicht werden. Eine weitere Möglichkeit für den Einsatz von Clustern im Kontext von sDLS besteht darin, die Clustergröße so zu wählen, dass eine Mindestanzahl oder aber auch eine vorgegebene Anzahl an Referenzknoten in den Einzugsbereich und somit in die Vorberechnung einbezogen werden.

Nutzung der Referenzknoten Referenzknoten unterscheiden sich zunächst dadurch von anderen Sensorknoten, dass sie Informationen zu ihrer eigenen Position besitzen. Da die Ermittlung der Position durch die Referenzknoten, zum Beispiel mittels GPS, sowie die Verbreitung dieser Information zum einen energieaufwendig und zum anderen von zentraler Bedeutung sind, kann davon ausgegangen werden, dass Referenzknoten in vielen Fällen über eine bessere Energieversorgung und damit einhergehend über eine höhere Rechenkapazität verfügen. In diesen Fällen kann es sinnvoll sein, die Ermittlung der Vorberechnung nicht auf einer zentralen Senke durchzuführen, sondern direkt auf den betroffenen Referenzknoten. Somit würde ein Großteil des Kommunikationsaufwandes gespart werden. Ein weiterer Ansatz, der ebenfalls möglich ist, besteht in einer Dreiteilung der gesamten Positionsschätzung. So könnte bei Verwendung der Normalengleichung der mathematisch aufwendige Teil zur Bildung der inversen Matrix, gemäß Gleichung (3.37a), durch die Senke vorgenommen werden. Die resultierende Matrix, welche an die Referenzknoten gesendet werden muss, hätte in diesem Fall eine feste Größe von vier Einträgen. Auf dem Referenzknoten kann daraus, wie in Gleichung (3.37b) dargestellt, die bekannte Vorberechnung gebildet werden, da die notwendigen Positionsdaten der umliegenden Referenzknoten bereits in der Disco-

very Phase übertragen werden könnten. Abschließend kann die bekannte Nachberechnung mittels Gleichung 3.37c erfolgen.

$$\mathbf{A}_0 = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \quad (3.37a)$$

$$\mathbf{A}_p = \mathbf{A}_0 \mathbf{A}^T, \mathbf{d}_p = \begin{pmatrix} d_{k_1 L}^2 \\ \vdots \\ d_{k_n L}^2 \end{pmatrix} \quad (3.37b)$$

$$\begin{pmatrix} u(x) \\ u(y) \end{pmatrix} = \mathbf{A}_p \frac{1}{2} \left(\begin{pmatrix} d_{uL}^2 - d_{uk_1}^2 \\ \vdots \\ d_{uL}^2 - d_{uk_n}^2 \end{pmatrix} + \mathbf{d}_p \right) + \mathbf{b}_L \quad (3.37c)$$

Manipulation der geschätzten Distanzen Ein weiterer Ansatz zur Verbesserung der Positionsschätzung bei ungenauer Distanzschätzung kann darin bestehen, die ermittelten Distanzen, welche zusammen in eine Positionsschätzung eingehen, in ähnlicher Weise wie bei dem in Kapitel 3.3.2 beschriebenen AWCL-Verfahren zu reduzieren, bevor diese in die Berechnung eingehen. Auf diese Weise würde zwar keine gezielte Korrektur erfolgen, es ist jedoch zu erwarten, dass der durchschnittliche Fehler der Positionsschätzung verringert werden kann, da der negative Einfluss zu geringer Distanzschätzungen nach ersten Beobachtungen kleiner ist als der Einfluss zu hoher Distanzschätzungen. Liegen zur Positionsbestimmung jedoch exakte Distanzmessungen vor, so würde ein solcher Ansatz eine Verschlechterung bewirken.

3.5 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit sind ein Reihe von Verfahren zur Positionsbestimmung von Sensorknoten entstanden. Dabei wurden sowohl Verfahren der approximativen Lokalisierung untersucht, welche jedwede Distanzinformation allenfalls als Mittel zur Gewichtung verwenden, als auch Verfahren der exakten Lokalisierung, welche eine direkte Verwendung der Distanzinformation verfolgen und unter der Annahme exakter Distanzinformatoren eine exakte Positionsbestimmung ermöglichen.

Im Bereich der approximativen Verfahren wurde mit dem SBCL-Ansatz ein Verfahren vorgestellt, welches auf Distanzinformationen zwischen Blind- und Referenzknoten vollständig verzichtet. Es ist daher in Konkurrenz zum bekannten CL-Verfahren zu sehen und erreicht durch die Einbeziehung zusätzlicher Informationen wie dem Abstand der Referenzknoten zueinander und dessen Kommunikationsreichweite eine Steigerung der Lokalisierungsgenauigkeit. Zwar wird die Position von Sensorknoten innerhalb des Netzwerks auch weiterhin auf wenige feste Punkte geschätzt, diese sind jedoch günstiger angeordnet. Durch die Einbeziehung der Signalempfangsstärke als ein mögliches Maß, welches die Distanz zwischen Referenz- und Blindknoten widerspiegelt, hat es das WCL-Verfahren geschafft, die Positionsschätzung gegenüber dem CL-Verfahren durch Gewichtung der Referenzknoten zu verbessern. Das in dieser Arbeit entwickelte AWCL-Verfahren greift diesen Ansatz auf und erreicht durch eine Anpassung der verwendeten Gewichte eine Steigerung der Positionsschätzung ohne die Einbeziehung zusätzlicher Informationen. Der damit geschaffene Algorithmus wurde auch von anderen Wissenschaftlern in diesem Bereich aufgegriffen, wodurch auch innerhalb einer realen Anwendung seine Überlegenheit bestätigt werden konnte.

Die im Bereich der exakten Lokalisierung entwickelten Verfahren bauen auf dem als DLS bekannten Verfahren auf. Das Multilaterationsverfahren, welches sich durch eine Verteilung der Berechnung auf Senke und Blindknoten auszeichnet, zeigt den wesentlichen Nachteil, dass es in Netzwerken mit großer Ausdehnung nicht bzw. nur mit enormem Aufwand anwendbar ist. Die Verwendung eines einzigen Linearisierungsknotens innerhalb der global gültigen Vorberechnung bewirkt zusätzlich eine Steigerung des Fehlers in der Positionsschätzung mit der Größe des Netzwerks. Mit den sDLS-Verfahren stellt diese Arbeit eine konsequente Weiterentwicklung des Ansatzes vor, wobei die einst globale Vorberechnung durch eine lokal gültige Vorberechnung ersetzt wird. Die vorgestellten Entwicklungen, an deren Spitze das sDLS^{ne}-Verfahren steht, ermöglichen so eine Anwendung des Verfahrens innerhalb beliebig großer Sensornetze und erreichen durch die gezielte Auswahl des Linearisierungsknotens eine Steigerung der Genauigkeit. Das so geschaffene Verfahren ermöglicht zudem den sinnvollen Einsatz mehrerer Senken zur Vorberechnung und zeichnet sich durch einen konstanten Rechenaufwand, unabhängig von der Netzwerkgröße, aus. Mit der Entwicklung des sRAL-Verfahrens fand eine weitere Anwendung dieses Ansatzes auf eine Abwandlung des DLS-Verfahrens statt, welche sowohl die Überlegenheit des Ansatzes selbst als auch die des sDLS^{ne}-Verfahrens verdeutlichte.

Durch die Verwendung des sDLS^{ne}-Ansatzes erhält ein Blindknoten die Möglichkeit, aus mehreren Vorberechnungen zu wählen und seine Positionsschätzung somit auf unterschied-

lichen Zusammensetzungen von Referenzknoten basieren zu lassen. Die so ermittelten Schätzpositionen können aufgrund der vorliegenden Geometrie sowie Ungenauigkeiten in die Distanzschätzung unterschiedlich stark und mit unterschiedlicher Richtung von der eigentlichen Position abweichen. Mit dem HDLS-Verfahren wurde eine Möglichkeit geschaffen, um einzelne Schätzpositionen, welche im Idealfall gleichmäßig um die reale Position verteilt sind, zu einer Gesamtschätzung zusammenzuführen und somit eine weitere Steigerung der Genauigkeit zu erreichen. Als Mittel der Zusammenführung der einzelnen Schätzpositionen erwies sich das in dieser Arbeit entwickelte AWCL-Verfahren ein weiteres Mal als besonders geeignet. Das so geschaffene hybride Verfahren aus exakter und approximativer Lokalisierung stellt wiederum ein neues exaktes Verfahren dar, da es unter der Annahme exakter Distanzschätzungen die tatsächliche Position des Blindknotens korrekt ermittelt.

Kapitel 4

Clustering in drahtlosen Sensornetzwerken

4.1 Motivation

Die vielfältigen Aufgaben innerhalb eines drahtlosen Sensornetzwerks gehen über die einfache Messwertaufnahme hinaus, wie in Kapitel 2.1.4 dargelegt. Selbstorganisiert gilt es beispielsweise, ein Routing zu ermöglichen und anfallende Aufgaben wie die Messwertaufnahme, die Aggregation und die Kommunikation mit Hilfe sogenannter Rollen unter den verfügbaren Sensorknoten zu verteilen. Um den Energieverbrauch jedes einzelnen Knotens und somit die Lebenszeit des gesamten Netzwerks zu optimieren gilt es weiterhin, Redundanzen in der Netzabdeckung zu erkennen und eine zeitliche Aufgabenteilung unter den Sensorknoten zu erreichen. Lässt sich bei kleinen Anordnungen durch eine ganzheitliche Betrachtung noch ein globales Optimum erzielen, so bewirkt eine globale Betrachtung in großen Netzwerken mehr Aufwand als Nutzen. Die Lösung zur Bewältigung all dieser Aufgaben besteht in großen Netzwerken darin, diese in kleinere Bereiche, sogenannte Cluster, zu unterteilen und innerhalb dieser eine lokale Lösung der anstehenden Aufgaben zu erreichen.

Die in dieser Arbeit entstandenen Verfahren zur Clusterbildung verfolgen das Ziel, die Lebenszeit des Netzwerks durch einen optimierten Schlaf-/Wachzyklus der Sensorknoten zu erhöhen. Sie abstrahieren dabei von den detaillierten und komplexen Aufgaben einzelner Sensorknoten, indem sie stellvertretend die Aufgaben der flächendeckenden Messwertermittlung sowie der Gewährleistung einer netzwerkweiten Kommunikation betrachten.

4.2 Einordnung der untersuchten Verfahren

Im Zuge der vorliegenden Arbeit sind zwei unterschiedliche Verfahren zur Unterteilung drahtloser Sensornetzwerke in Cluster entstanden. Wie aus Abbildung 4.1 ersichtlich, dient das Dual Phase Mutual Assistance in a Cluster Environment (2-MASCLE)-Verfahren der Erzeugung gleichförmiger, regelmäßig angeordneter Cluster, unter Verwendung der Ortsinformationen der Sensorknoten. Bei Beacon Based Clustering (BBC) hingegen erfolgt die Bildung ungleichförmiger Cluster ohne die Verwendung expliziter Ortsinformationen. Die Anordnung der Cluster erfolgt auch bei BBC in einem regelmäßigen Muster.

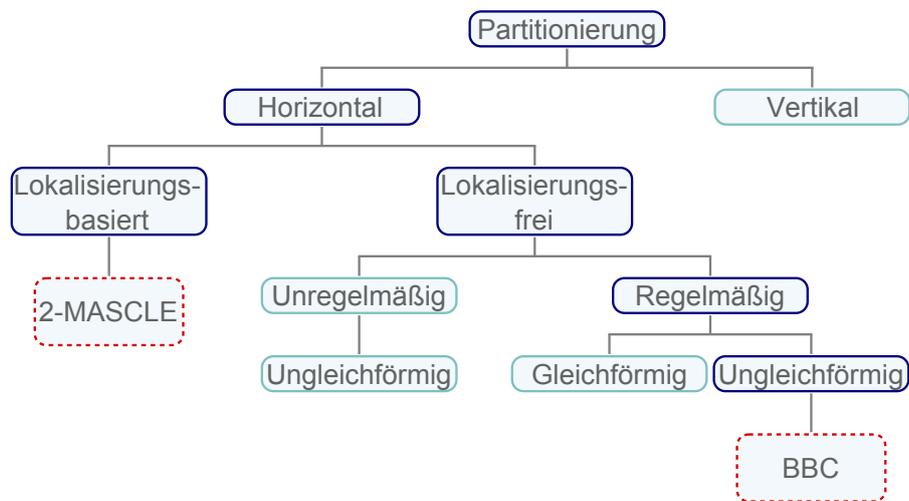


Abbildung 4.1: Einordnung der untersuchten Verfahren des Clustering gemäß der gegebenen Klassifizierung.

4.3 Geografisches Clustering mit MASCLE

4.3.1 Ausgangsverfahren

Die Entwicklung von 2-MASCLE [SBLT07] basiert auf zwei unterschiedlichen Ansätzen der Netzwerkpartitionierung. So verfolgt das Verfahren einerseits eine horizontale Aufteilung des Netzwerks in Cluster, strebt jedoch gleichzeitig nach einer vertikalen Aufteilung der so gebildeten Cluster in sogenannte Cover. Das Verfahren enthält daher Einflüsse des geografischen Cluster-Verfahrens XGAF [SKRT07] sowie der vertikalen Aufteilung der Sensorknoten nach den K-Cover-Verfahren [AGP04].

4.3.1.1 XGAF

Das Ziel von XGAF besteht darin, Sensorknoten, welche aufgrund der vorherrschenden Redundanz nicht zur Abdeckung der vollen Netzwerkfunktionalität benötigt werden, zeitweise in einen energiesparenden Schlafzustand zu versetzen und im Wechsel mit anderen Sensorknoten zu aktivieren. Durch dieses Wechselspiel und der damit einhergehenden Energieersparnis einzelner Knoten soll eine Verlängerung der Netzlebenszeit erreicht werden. Es wird eine zufällige Verteilung der Sensorknoten angenommen.

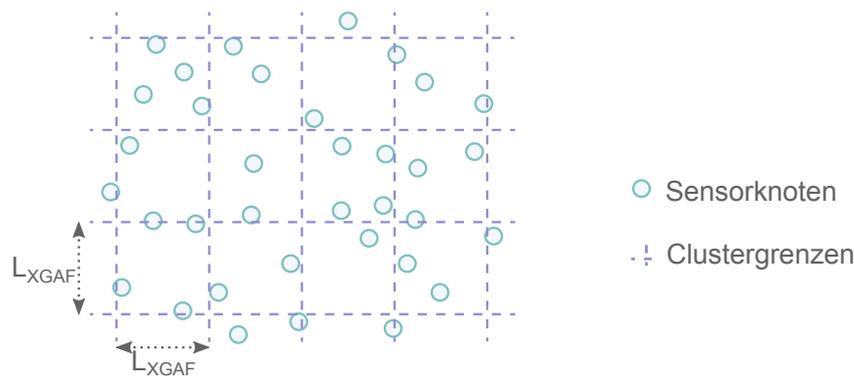


Abbildung 4.2: Strukturierung eines Sensornetzwerks durch Verwendung quadratischer XGAF-Cluster.

Zur Erkennung redundanter Knoten werden alle im Netzwerk befindlichen Sensorknoten anhand ihrer geografischen Position vordefinierten quadratischen Clustern zugeordnet. Abbildung 4.2 zeigt eine solche Unterteilung des Netzwerks in quadratische Cluster. Die Größe der Cluster wird dabei so bemessen, dass alle Knoten, welche sich innerhalb eines Clusters befinden, unabhängig von ihrer Position, eine vollständige Abdeckung des Clusters bewirken. Bei der Berechnung der Clustergröße wird bei XGAF sowohl die Kommunikationsabdeckung als auch die Sensorabdeckung berücksichtigt.

Der Berechnung der Seitenlänge eines Clusters liegen die in Abbildung 4.3 illustrierten Designkriterien zugrunde. Zur Gewährleistung der sensorischen Abdeckung soll der Durchmesser einer Zelle die Sensorreichweite nicht überschreiten, damit ein Sensorknoten, welcher sich im ungünstigsten Fall in der Ecke eines Clusters befindet, den gesamten Cluster abdeckt. Zur Gewährleistung der Kommunikationsabdeckung wird eine Kommunikation mit allen acht Clustern angestrebt, welche direkt an einen Cluster angrenzen. Die Zellgröße wird daher zusätzlich so limitiert, dass der Durchmesser der Zelle maximal der halben Kommunikationsreichweite entspricht. Zur Modellierung beider Reichweiten wird eine kreisförmige Ausbreitung angenommen. Aus den gegebenen Größen, der Kommunikations-

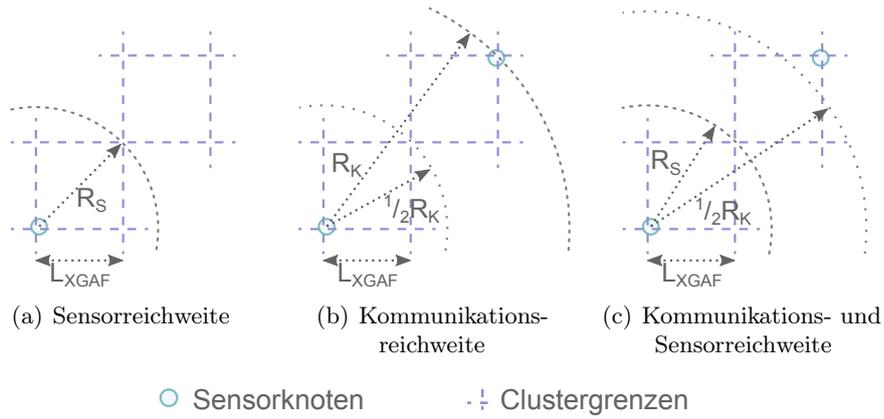


Abbildung 4.3: Größenbestimmung von XGAF-Clustern mittels (a) Sensorreichweite und (b) Kommunikationsreichweite. Bei gemeinsamer Betrachtung (c) stellt die Sensorreichweite häufig den limitierenden Faktor dar.

reichweite R_K und der Sensorreichweite R_S , wird unter Verwendung von Gleichung (4.1) die Kantenlänge L_{XGAF} bestimmt.

$$L_{XGAF} = \frac{\min(R_S; R_K/2)}{\sqrt{2}} \quad (4.1)$$

Die so bestimmte Kantenlänge der Cluster kann anschließend von jedem Sensorknoten individuell verwendet werden, um unter Verwendung von Gleichung (4.2) die Zugehörigkeit eines Sensorknotens k zu einem Cluster zu ermitteln. Jeder Cluster innerhalb des Netzwerks ist zu diesem Zweck durch einen eindeutigen Cluster Identification Vector (CIV) bestimmt. Die Position eines Sensorknotens k ist durch seine Koordinaten $k_{(x)}$ und $k_{(y)}$ symbolisiert.

$$CIV = \begin{pmatrix} CIV_{(x)} \\ CIV_{(y)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lfloor k_{(x)}/L_{XGAF} \rfloor \\ \lfloor k_{(y)}/L_{XGAF} \rfloor \end{pmatrix} \quad (4.2)$$

Durch eine geeignete Rollenverteilungsstrategie, welche durch XGAF nicht weiter spezifiziert ist, kann in derart geclusterten Netzwerken zu jedem Zeitpunkt der Großteil der Knoten in einen energiesparenden Schlafzustand versetzt werden. Lediglich ein Knoten je Cluster muss aktiv sein, um die Funktionalität des Netzwerks zu gewährleisten.

4.3.1.2 K-Covering

Das Ziel von K-Covering besteht darin, die Knoten eines drahtlosen Sensornetzwerks so in Gruppen einzuteilen, dass zu jedem Zeitpunkt lediglich eine der Gruppen aktiv sein muss, um eine möglichst hohe Abdeckung des Netzwerks zu erreichen. Aus dieser Forderung heraus ergibt sich bereits die Eigenschaft, dass diese Gruppen, auch *Cover* genannt, nicht durch ihre Größe und Position gekennzeichnet sind. Stattdessen sollen alle gebildeten Gruppen in ihrem Ausmaß gleichermaßen das gesamte Netzwerk abdecken. Durch die Einteilung der im Netzwerk verfügbaren Knoten in k solcher Cover soll erreicht werden, dass jeder Knoten nur den k -ten Teil eines gegebenen Zeitraums aktiv ist und sich seine gesamte Lebenszeit somit um k vervielfacht. Abbildung 4.4 zeigt eine solche vertikale Partitionierung eines Netzwerks in Cover.

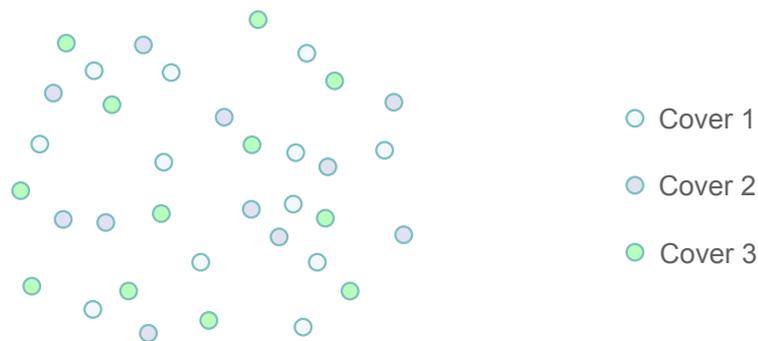


Abbildung 4.4: Strukturierung eines Sensornetzwerks unter Verwendung von Covern.

Die optimale Aufteilung der Knoten in Cover ist als *Set Covering* oder Mengenüberdeckungsproblem bekannt und ist eines von 21 NP-vollständigen Problemen der Graphentheorie [Kar72]. Zur Bildung der Cover werden in [AGP04] drei unterschiedliche Strategien vorgestellt und untersucht. Neben einem zentralen und einem dezentralen Greedy-Algorithmus wird auch eine zufallsbasierte Zuordnung untersucht.

4.3.2 Das 2-MASCLE Verfahren

4.3.2.1 Motivation

Wie bereits an anderer Stelle erwähnt, stellt das Clustering ein gängiges Mittel dar, um Sensorknoten in kleinen Gruppen zu organisieren und so den Energieverbrauch des Netzwerks zu minimieren und folglich die Netzlebenszeit des Netzwerks zu verlängern. Ein Beispiel für diese Anwendung des Clusterings stellt das XGAF-Verfahren dar, welches als

Ausgangspunkt für die Entwicklung von 2-MASCLE diene. Durch eine grafische Analyse von XGAF, wie in Abbildung 4.5 dargestellt, lässt sich zeigen, dass der durch XGAF garantiert abgedeckte Bereich eines Clusters die Cluster Grenzen weit überschreitet. Zum Zweck dieser Analyse wurde die Hilfsgröße der *Working Range* (R_W) eingeführt, welche, wie in Gleichung (4.3) dargestellt, den limitierenden Charakter von Sensorreichweite R_S und Kommunikationsreichweite R_K in sich vereint.

$$R_W = \min(R_S; R_K/2) \quad (4.3)$$

Unter Verwendung dieser Working Range lässt sich die garantierte Abdeckung eines Clusters konstruieren, indem um jeden Punkt, welcher sich auf der Grenze des Clusters befindet, ein Kreis mit dem Radius R_W gezogen wird. Die Schnittmenge der so entstehenden Kreise stellt den Bereich der garantierten Abdeckung dar. Gleichung (4.4c) stellt diese Fläche A_{Cov} als eine Menge von Punkten in der euklidischen Ebene E dar, wobei $K(M, r)$ die Menge der Punkte einer Kreisfläche mit dem Radius r und dem Mittelpunkt M darstellt und $G(M, r)$ die Menge der Punkte symbolisiert, welche die Grenze eines quadratischen Clusters mit der Kantenlänge r und dem Mittelpunkt M beschreiben.

$$K(M, r) = \{X \in E \mid \|X - M\| \leq r\} \quad (4.4a)$$

$$G(M, r) = \{X \in E \mid (\|(X_{(x)} - M_{(x)})\| \leq r/2) \wedge (\|(X_{(y)} - M_{(y)})\| \leq r/2)\} \quad (4.4b)$$

$$A_{Cov} = \bigcap_{M_K \in G} K(M_K, R_W) \quad (4.4c)$$

Betrachtet man die Abdeckungsbereiche von vier Clustern, welche jeweils eine Kante mit einem fünften Cluster gemeinsam haben, so wird ersichtlich, dass dieser fünfte Cluster bereits zu einem Großteil abgedeckt ist. Abbildung 4.5(b) stellt diese Abdeckung grafisch dar. Ließe sich dieser Cluster vollständig durch seine Nachbarn abdecken, so ließen sich diverse Vorteile erreichen.

Um eine vollständige Abdeckung dieses fünften Clusters zu erreichen, wurde das 2-MASCLE-Verfahren entwickelt, welches nachfolgend genannte Vorteile erzielt. Durch die gesteigerte Abdeckung erreicht ein Cluster eine garantierte Abdeckung, welche der Fläche von mehr als zwei Clustern entspricht. Diese doppelte Abdeckung lässt sich direkt in eine Halbierung der Aktivzeit eines Clusters überführen. Durch eine wechselseitige Aktivierung von zwei Gruppen von Clustern lässt sich somit ein Covering aus zwei Covern nachbilden,



Abbildung 4.5: Abdeckungsbereiche bei Verwendung von XGAF-Clustern: (a) Abdeckung durch einen Cluster, (b) Abdeckung eines Clusters durch vier angrenzende Nachbarn.

bei dem jedes Cover eine vollständige Abdeckung garantiert. Dadurch lassen sich die Sensorknoten effizienter nutzen, was letztlich zu einer Steigerung der Netzlebenszeit führt, wie in Abschnitt 4.3.2.3 gezeigt wird. Die doppelte Abdeckung eines Clusters lässt sich weiterhin dahingehend verwenden, dass bei Ausfall eines Clusters benachbarte Cluster herangezogen werden können, um die entstandene Lücke in der Abdeckung auszugleichen. In 2-MASCLE wird dieses Vorgehen als Heilung eingeführt.

4.3.2.2 Algorithmenbeschreibung

Clusterdimensionierung Um die angestrebte Abdeckung zu erreichen, wird in 2-MASCLE eine geänderte Clustergröße verwendet. Die Kantenlänge eines Clusters wird gemäß Gleichung (4.5) soweit verkleinert, dass die sich daraus ergebende Fläche der garantierten Abdeckung im Verhältnis zur Clustergröße sich soweit vergrößert, dass diese das Zentrum der horizontal und vertikal angrenzenden Cluster erreicht.

$$L_{2M} = \frac{\min(R_S; R_K/2)}{\sqrt{2,5}} \quad (4.5)$$

Durch die so angepasste Clustergröße ergibt sich die angestrebte Abdeckung und eine garantierte Kommunikationsreichweite, welche es jedem Cluster erlaubt, in horizontaler und vertikaler Richtung über einen angrenzenden Cluster hinweg mit dem darauf folgenden Cluster zu kommunizieren. Die so garantierte Kommunikationsreichweite ist eine notwendige Voraussetzung für den zweiphasigen Betrieb des Netzwerks. Abbildung 4.6 illustriert die erreichte garantierte Abdeckung in Bezug auf Kommunikation und Sensorik, wobei $2R_W$ entsprechend Gleichung (4.3) mindestens der Kommunikationsreichweite entspricht.

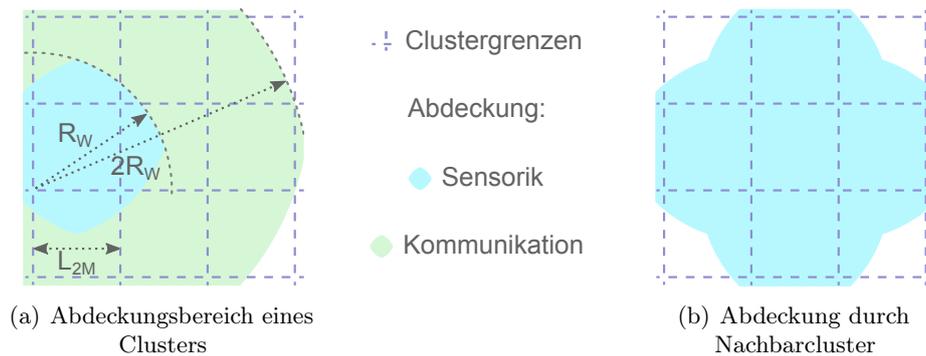


Abbildung 4.6: Abdeckungsbereiche bei Verwendung von 2-MASCLE-Clustern: (a) kommunikative und sensorische Abdeckung durch einen Cluster, (b) Abdeckung eines Clusters durch vier angrenzende Nachbarn.

Durch die erreichten Veränderungen ist es nun möglich, das so in Cluster unterteilte Netzwerk gemäß des Grundgedankens des Coverings in ein geclustertes Netzwerk mit zwei Aktivitätsphasen zu überführen. Abbildung 4.7 stellt die so erfolgte Überführung grafisch dar.

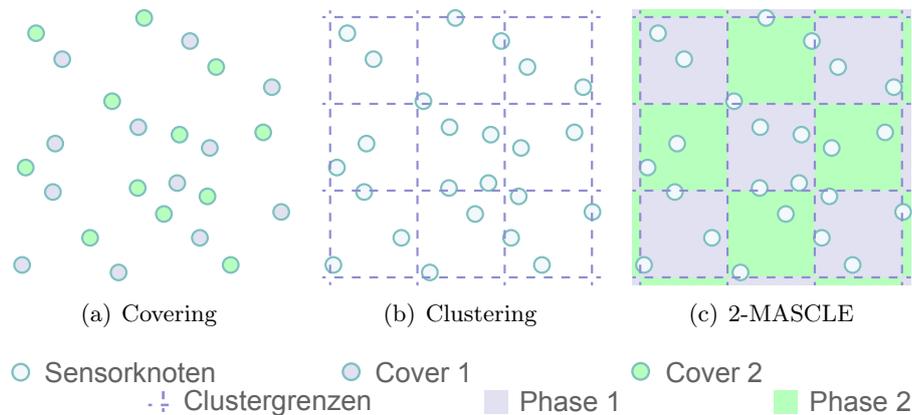


Abbildung 4.7: Organisation von Sensornetzwerken mittels (c) 2-MASCLE als Kombination aus (a) Covering und (b) Clustering.

Clusterzuordnung Die Zuordnung von Sensorknoten zu Clustern erfolgt, wie in Gleichung (4.6) dargestellt, nach dem aus XGAF bekannten Prinzip mit Hilfe der Koordinaten $k_{(x)}$ und $k_{(y)}$ eines Sensorknotens.

$$CIV = \begin{pmatrix} CIV_{(x)} \\ CIV_{(y)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lfloor k_{(x)}/L_{2M} \rfloor \\ \lfloor k_{(y)}/L_{2M} \rfloor \end{pmatrix} \quad (4.6)$$

Zweiphasiger Betrieb Für den zweiphasigen Betrieb müssen entstandene Cluster zusätzlich in zwei Gruppen eingeteilt werden. Diese Einteilung erfolgt mit Hilfe der Group Identification Number (GID), welche analog zu dem bereits bekannten CIV eingeführt wird. Die Berechnung der GID erfolgt mittels Gleichung (4.7). Jeder Cluster mit gleicher GID gehört der gleichen Gruppe und damit der gleichen Phase an.

$$GID = CIV_{(x)} + CIV_{(y)} - 2 \left\lfloor \frac{CIV_{(x)} + CIV_{(y)}}{2} \right\rfloor \quad (4.7)$$

In einem Sensornetzwerk, welches, wie beschrieben, nach Clustern und Phasen partitioniert ist, muss nun zu jedem Zeitpunkt nur ein Knoten je Cluster aktiv sein, sofern dieser der aktiven Phase zugehörig ist. Alle anderen Knoten können in einem energiesparenden Schlafzustand verweilen. Um zu gewährleisten, dass zu jedem Zeitpunkt nur Sensorknoten aktiv sind, welche einem Cluster der aktiven Phase angehören, wird der in Abbildung 4.8 dargestellte Algorithmus bereitgestellt. Dieser ermöglicht es jedem Sensorknoten, anhand der aktuellen Zeit und der ihm zugeordneten GID seine Aktivität zu bestimmen. Der Algorithmus setzt an dieser Stelle eine zuvor erfolgte Synchronisation der Knoten voraus. Es ist jedoch davon auszugehen, dass häufig auch eine ungenaue Synchronisation ausreichend ist, sofern der daraus resultierende Zeitunterschied wesentlich kleiner ist als die Dauer einer aktiven Phase.

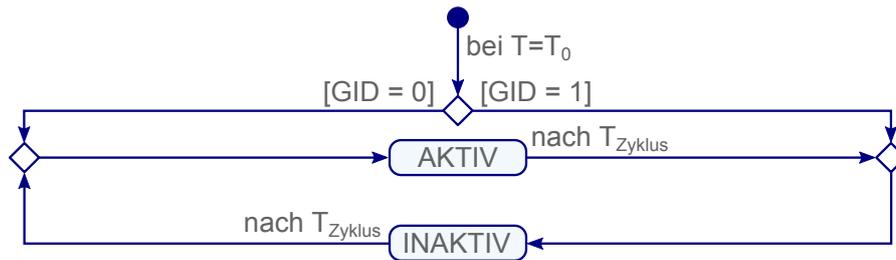


Abbildung 4.8: Algorithmus zur Realisierung des Phasenwechsels in 2-MASCLE.

Der Algorithmus startet auf allen Sensorknoten zum Zeitpunkt T_0 . Alle Knoten ordnen sich anhand ihrer GID der aktiven oder inaktiven Phase zu. Nach Ablauf der Zeitspanne T_{Zyklus} wechseln die Knoten von der aktiven in die inaktive Phase und umgekehrt. Befindet sich ein Knoten in einem aktiven Zustand, so ist es die Aufgabe einer geeigneten Rollenverteilung,

aus den Sensorknoten eines aktiven Clusters einen aktiven Knoten für die nachfolgende Phase zu bestimmen.

Heilung Um eine effiziente Nutzung der Sensorknoten zu gewährleisten, wurde der beschriebene zweiphasige Betrieb um eine Heilungskomponente erweitert. Diese ermöglicht es, bei einem Ausfall eines aktiven Clusters, zusätzliche Cluster der nicht aktiven Phase zu aktivieren und somit die entstandene Lücke auszugleichen. Für die Heilung werden alle vier horizontal und vertikal an den zu heilenden Cluster angrenzende Cluster aktiviert. Eine um diese Funktionalität erweiterte Algorithmusbeschreibung ist in Abbildung 4.8 dargestellt.

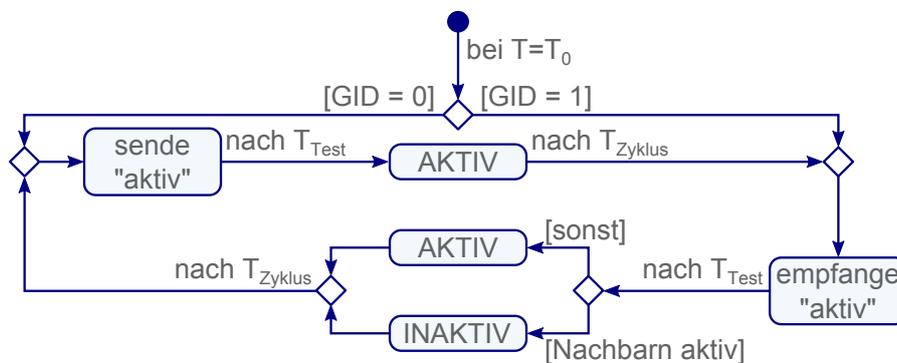


Abbildung 4.9: Algorithmus zur Realisierung des Phasenwechsels in 2-MASCLE mit zusätzlicher Heilung.

Da es dem ausgefallenen Cluster nicht möglich ist, die Heilung zu steuern, prüfen alle aktiven Cluster, ob deren vier Nachbarn erfolgreich aus der Schlafphase zurückkehren, bevor sie selbst in die Schlafphase wechseln. Zu diesem Zweck wurde jeder Phase eine Zeitspanne T_{Test} vorangestellt. Knoten, die planmäßig in die aktive Phase wechseln, versenden in dieser Zeit eine Aktivitätsnachricht. Knoten, die vor dem Eintritt in die inaktive Phase stehen, empfangen in dieser Zeit die Aktivitätsnachrichten ihrer Nachbarcluster. Es ist dabei der Implementierung der Rollenverteilung überlassen, ob für diese Prüfung alle Knoten eines Clusters in einen aktiven Zustand versetzt werden oder ob lediglich der innerhalb der Phase aktive Knoten für Prüfung und Heilung verantwortlich ist.

4.3.2.3 Evaluation

Um das entwickelte 2-MASCLE-Verfahren zu bewerten, wurde dieses anhand nachfolgender Gesichtspunkte mit einem nicht partitionierten Netzwerk, sowie mit den Verfahren XGAF

und K-Covering verglichen, welche als Ausgangspunkt der Entwicklung dienten. Die zur Evaluation verwendeten Metriken sind wie folgt definiert.

Netzlebenszeit: Die Netzlebenszeit wird an dieser Stelle als Vielfaches der Lebenszeit eines Knotens dargestellt.

Clusterbasierte Abdeckung: Nur Cluster, welche von dem garantierten Abdeckungsbereich eines besetzten Clusters erfasst sind, werden als abgedeckte Fläche gezählt. Bei XGAF betrifft dies jeden Cluster, welcher mit mindestens einem Knoten besetzt ist. Bei 2-MASCLE werden zusätzlich jene Cluster gezählt, welche durch ihre Nachbarn garantiert abgedeckt werden.

Tatsächliche Abdeckung: Die tatsächlich durch einen Knoten abgedeckte Fläche, welche einem Kreis mit dem Radius R_W entspricht, wird betrachtet.

Aktive Knoten: Die Anzahl der durch das jeweilige Verfahren aktivierten Sensorknoten. Je höher die Anzahl aktiver Knoten, desto höher ist der Ressourcenverbrauch im Netzwerk.

Knoteneffizienz: Die Knoteneffizienz stellt das Verhältnis zwischen der durch einen Knoten durchschnittlich abgedeckten Fläche und der Fläche dar, welche maximal durch einen Knoten abgedeckt werden kann. Die Berechnung der Knoteneffizienz KE unter Verwendung der Gesamtfläche A und der Anzahl aktiver Sensorknoten N_{akt} ist in Gleichung (4.8) angegeben.

$$KE = \frac{A/N_{akt}}{\pi * R_W^2} \quad (4.8)$$

Zur Untersuchung der genannten Algorithmen wurden in einem simulierten Gebiet zufällig Sensorknoten platziert. Anschließend erfolgte eine zufällige Auswahl der aktiven Sensorknoten gemäß den jeweiligen Algorithmen. Aufgrund der erfolgten Auswahl wurde die jeweils erreichte Abdeckung ermittelt. Nach Ablauf einer Zeiteinheit, welche die Lebenszeit eines einzelnen Knotens symbolisiert, wurden die zuvor aktiven Knoten aus der Simulation entfernt. Der Energievorrat dieser Knoten wurde als erschöpft betrachtet. Anschließend wurden je nach Algorithmus erneut aktive Knoten aus der Menge der verbliebenen Knoten bestimmt und gegebenenfalls ein Phasenwechsel vorgenommen. Zur Vereinfachung wurde an dieser Stelle eine identische Lebenszeit aller Knoten vorausgesetzt.

Die Randbereiche von Sensornetzwerken stellen in vielen Fällen ein Problem dar, da hier andere Bedingungen vorherrschen als im Innern des Netzwerks. In den durchgeführten Untersuchungen tritt vor allem das Problem auf, dass Cluster, welche sich am Rand eines

Netzwerks befinden, nicht die maximal mögliche Anzahl an Nachbarclustern besitzen. Da das Verhältnis von Randbereich und Kernbereich von der Fläche des untersuchten Gebietes abhängt, führt eine Betrachtung des Randbereiches in der Regel zu einer schlechten Vergleichbarkeit mit anderen Simulationen. In der Simulation wurde daher auf die Betrachtung des Randbereichs verzichtet, indem von einer in sich geschlossenen Fläche ausgegangen wurde, bei der dem Maximalwert einer Dimension der Minimalwert der gleichen Dimension folgt. Um auftretende Randeffekte in der Realität zu vermeiden, können zusätzliche Knoten außerhalb des zu untersuchenden Gebietes ausgebracht werden, sodass sich das Untersuchungsgebiet im Kernbereich des Sensornetzwerks befindet.

Zur Evaluation wurden die in Tabelle 4.1 angegebenen Parameter verwendet, diese wurden so gewählt, dass ein fairer Vergleich dahingehend möglich ist, als dass die gewählten Ausmaße der vom Netzwerk abgedeckten Fläche einem ganzzahligen Vielfachen der resultierenden Clustergrößen entspricht und somit nur vollständige Cluster entstehen.

Gesamtfläche	646 * 646 m ²
Working Range	26,87 m
Anzahl Simulationen	500
Ausgebrachte Sensorknoten ¹	17000

¹ sofern nicht anders angegeben

Tabelle 4.1: Verwendete Simulationsparameter

Die in Abbildung 4.10 illustrierten Ergebnisse stellen den Grad der Abdeckung eines Netzwerks der Anzahl der zufällig platzierten Knoten gegenüber. Die beste Abdeckung wird hier durch ein nicht partitioniertes Netzwerk erzielt, da die Abdeckung jedes einzelnen Knotens vollständig genutzt wird und alle Knoten aktiv sind. Die Darstellung der Covering-Verfahren zeigt jedoch einen rapiden Abfall der Abdeckung, je geringer der Anteil der aktiven Knoten ist. Die clusterbasierte Auswertung von 2-MASCLE und XGAF, gekennzeichnet durch den Zusatz „cb“, zeigt, dass hier wesentlich mehr Knoten benötigt werden, um jeden Cluster zu besetzen. Es ist zu beobachten, dass 2-MASCLE ohne Heilung bei gleicher Knotenanzahl eine geringere Abdeckung als XGAF erreicht. Wird jedoch die Heilung verwendet, so erreicht 2-MASCLE eine deutlich bessere Abdeckung. Betrachtet man nun die tatsächliche Abdeckung der Verfahren, so zeigt sich, dass 2-MASCLE mit verwendeter Heilung eine nahezu identische Abdeckung erreicht wie das nicht partitionierte Netzwerk. Ohne Heilung entspricht die Abdeckung in etwa der von 2-Covering, welches die Hälfte der verfügbaren Knoten aktiviert.

Eine Metrik, welche eng mit der durchschnittlichen Abdeckung verwandt ist, stellt die in Abbildung 4.11 gezeigte Wahrscheinlichkeit einer vollständigen Abdeckung eines Netzwerks

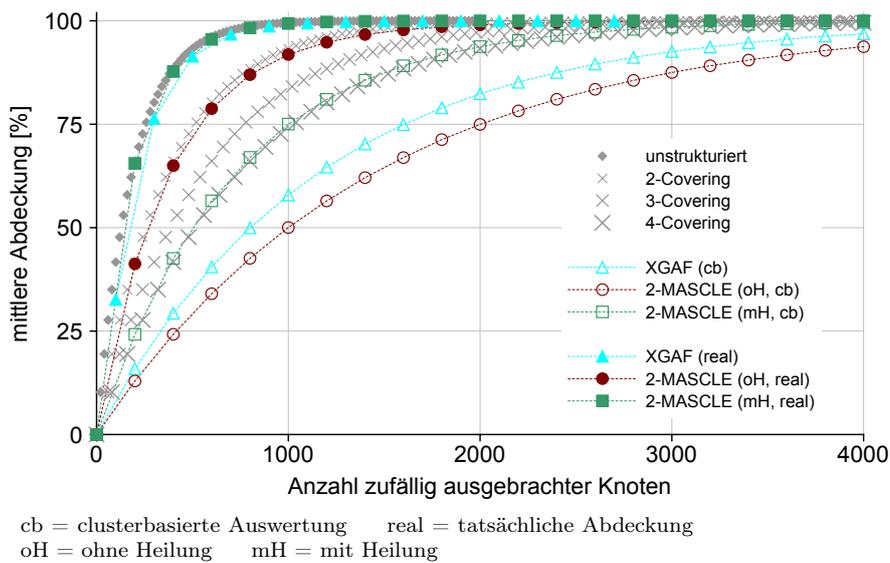


Abbildung 4.10: Erreichte mittlere Abdeckung eines Sensornetzwerks in Abhängigkeit von der Zahl zufällig verteilter Sensorknoten.

dar. Auch hier stellt sich eine ähnliche Staffelung der Verfahren dar. Es ist jedoch zu beobachten, dass, unter Betrachtung der realen Abdeckung, 2-MASCLE mit Heilung mit wesentlich weniger ausgebrachten Sensorknoten mit hoher Wahrscheinlichkeit eine vollständigere Netzabdeckung gewährleistet als 2-Covering und XGAF. Ebenso stellt die reale wie auch die clusterbasierte Betrachtung den enormen Einfluss der Heilung klar heraus.

Die zuvor gezeigten Ergebnisse orientieren sich an der Menge der ausgebrachten Sensorknoten. Diese stellt zwar ein wichtiges Kriterium dar, wichtig ist jedoch auch die Frage, wieviele der ausgebrachten Knoten zu einem Zeitpunkt aktiv sind. Die in Abbildung 4.12 dargestellten Ergebnisse zeigen die Anzahl aktiver Knoten im zeitlichen Verlauf. Auf die Darstellung des K-Covering-Verfahrens wird an dieser Stelle verzichtet, da für diese über einen Zeitraum von k Lebenszyklen zu jeder Zeit der k -te Teil der ausgebrachten 17000 Knoten aktiv ist, bevor der Energievorrat aller Knoten erschöpft ist. Die Abbildung lässt vor allem zu Beginn deutlich erkennen, dass unter Verwendung des 2-MASCLE-Verfahrens deutlich weniger Knoten aktiviert werden, als bei der Verwendung von XGAF. Dies schlägt sich auch darin nieder, dass bei Verwendung von 2-MASCLE längere Zeit die initiale Anzahl an Knoten aktiviert werden, was eine garantierte vollständige Abdeckung bedeutet. Sobald der erste ausgefallene Cluster auftritt, zeigt sich der Unterschied zwischen den beiden 2-MASCLE-Varianten. Unter Verwendung der Heilungsstrategie werden zusätzliche Cluster aktiviert und somit eine höhere Abdeckung erzielt. Dadurch wird über einen länge-

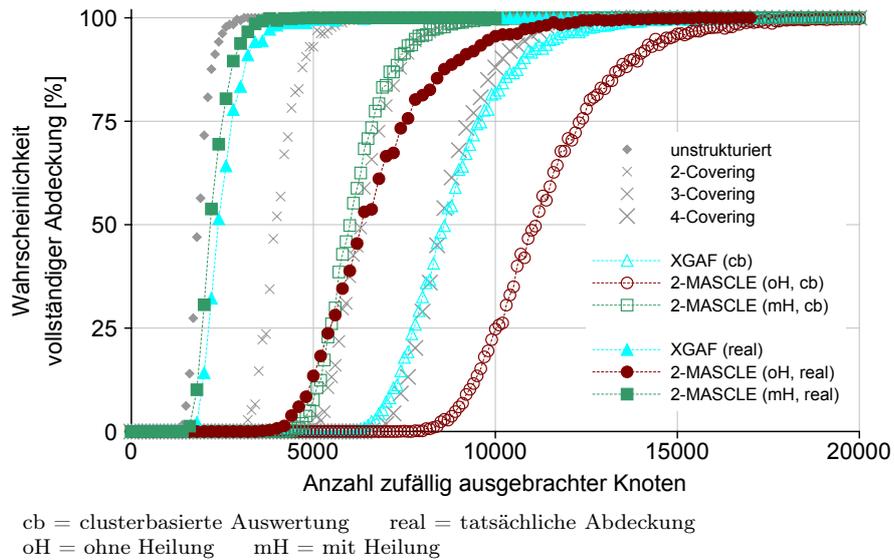
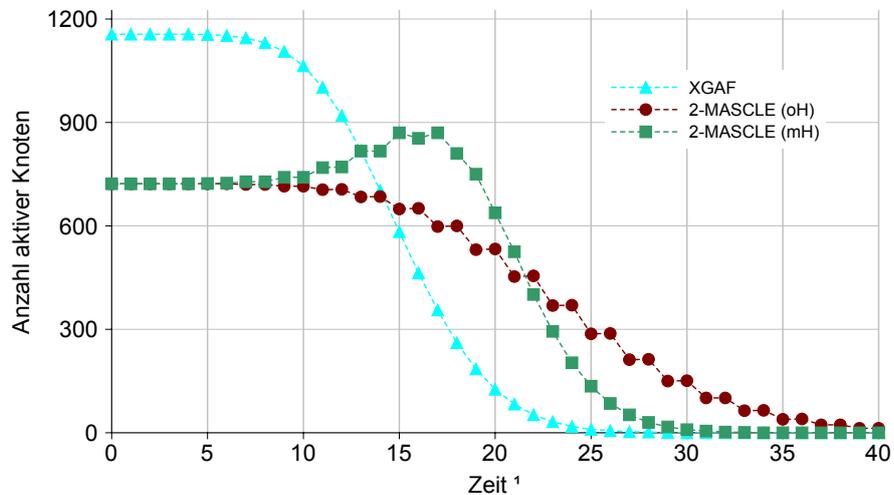


Abbildung 4.11: Wahrscheinlichkeit vollständiger Abdeckung eines Sensornetzwerks in Abhängigkeit von der Zahl zufällig verteilter Sensorknoten.

ren Zeitraum eine vollständige Abdeckung garantiert. Der so entstandene Mehrverbrauch resultiert schließlich darin, dass zum Ende des betrachteten Zeitraums weniger Knoten aktiv sind, als es bei der Variante ohne Heilung der Fall ist.

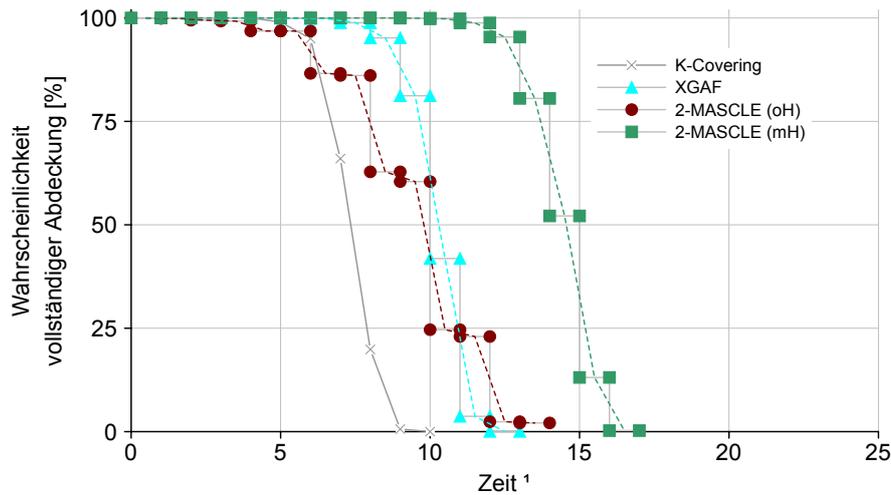


¹ normiert auf die Lebenszeit eines einzelnen Knotens
oH = ohne Heilung mH = mit Heilung

Abbildung 4.12: Anzahl aktiver Sensorknoten in Abhängigkeit von der verstrichenen Zeit, dargestellt als Vielfaches der Lebenszeit eines Knotens.

Eine exakte Darstellung zum Grad der Abdeckung im zeitlichen Verlauf bietet Abbildung 4.13. Auch hier zeigt sich die Stärke von 2-MASCLE unter Verwendung der Hei-

lungsfunktionalität. Neben den simulativ ermittelten Werten, welche jeweils den Beginn und das Ende einer Phase markieren, sind in der Grafik die über zwei Werte berechneten gleitenden Mittelwerte als gestrichelte Trendlinie dargestellt. Die Angaben des K-Covering beziehen sich jeweils auf das Covering, welches sich zu dem gewählten Zeitpunkt in der letzten Phase befindet. Die Wahrscheinlichkeit der vollständigen Abdeckung des jeweils abgetragenen Coverings ist für die Dauer der verstrichenen Zeitspanne konstant und nimmt ab dem dargestellten Zeitpunkt einen Wert von 0 an.

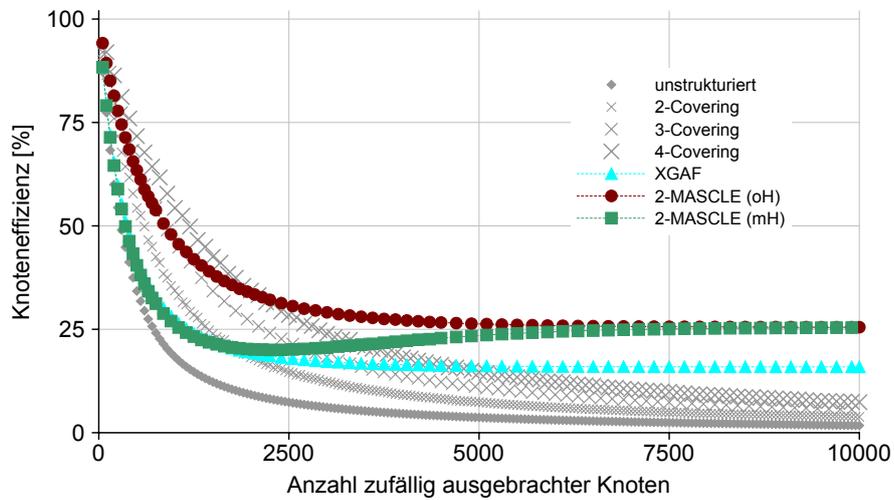


¹ normiert auf die Lebenszeit eines einzelnen Knotens
oH = ohne Heilung mH = mit Heilung

Abbildung 4.13: Wahrscheinlichkeit vollständiger Abdeckung eines Sensornetzwerks in Abhängigkeit von der verstrichenen Zeit, dargestellt als Vielfaches der Lebenszeit eines Knotens.

Abschließend erfolgt in Abbildung 4.14 eine Betrachtung der Knoteneffizienz. Befinden sich wenige Knoten im Netzwerk, so werden diese nahezu vollständig genutzt, da keine Gebiete entstehen, welche mehrfach abgedeckt sind. Je höher jedoch die Anzahl der ausgebrachten Knoten, desto häufiger findet eine redundante Abdeckung statt. Dies spiegelt sich in einer sinkenden Knoteneffizienz wieder. Bei K-Covering sowie dem unstrukturierten Netzwerk nähert sich die Knoteneffizienz der Nulllinie an, da keine Begrenzung bezüglich der Anzahl der aktiven Knoten stattfindet. Bei XGAF wird eine Knoteneffizienz von 15,92 % erreicht, während 2-MASCLE eine Knoteneffizienz von 25,46 % anstrebt. Eine Herleitung sowie ein Vergleich dieser Werte bietet Tabelle 4.2. Sind nicht genügend Knoten für eine vollständige Abdeckung aller Cluster vorhanden, führt die Verwendung der Heilungsfunktionalität bei 2-MASCLE dazu, dass zusätzliche Knoten der nicht aktiven Phase aktiviert werden, wodurch die Knoteneffizienz gemäß Gleichung (4.8) absinkt. Erst

wenn genügend Sensorknoten vorhanden sind und eine Heilung nicht mehr notwendig ist, erreichen beide 2-MASCLE-Varianten die gleiche Knoteneffizienz.



oH = ohne Heilung mH = mit Heilung

Abbildung 4.14: Darstellung der erreichten Knoteneffizienz in Abhängigkeit von der Anzahl zufällig ausgebrachter Sensorknoten.

	K-Covering	XGAF	2-MASCLE
Ausgebrachte Sensorknoten N	∞	∞	∞
Anzahl Phasen P	K	1	2
Kantenlänge L	–	$R_W/\sqrt{2}$	$R_W/\sqrt{2,5}$
Aktive Sensorknoten N_{akt}	N/P	$\lceil \sqrt{A}/L \rceil^2 / P$	$\lceil \sqrt{A}/L \rceil^2 / P$
Knoteneffizienz KE^1	$\frac{A*P}{N*\pi*R_W^2}$	$\frac{A*P}{\lceil \sqrt{A}/L \rceil^2 * \pi * R_W^2}$	$\frac{A*P}{\lceil \sqrt{A}/L \rceil^2 * \pi * R_W^2}$
Knoteneffizienz $\lim_{N \rightarrow \infty} KE$	0%	15,92% ²	25,46% ²

¹ durch Substitution der gegebenen Größen in Gleichung (4.8)

² unter Verwendung der in Tabelle 4.1 beschriebenen Gesamtfläche und Working Range

Tabelle 4.2: Vergleich der rechnerisch erreichbaren Knoteneffizienz in Abhängigkeit von der Menge der ausgebrachten Knoten N und der Gesamtfläche des Netzwerks A .

4.3.2.4 Nachbetrachtung

Lebenszeit Bei der Untersuchung der dargestellten Algorithmen wurde eine identische Lebenszeit für alle Sensorknoten des Netzwerks angenommen. Tatsächlich ergeben sich jedoch bereits aufgrund von Schwankungen in der Fertigung sowie äußeren Einflüssen

wie Temperaturschwankungen leicht unterschiedliche Lebenszeiten. Ein weit größerer Unterschied in der Lebenszeit von Sensorknoten entsteht durch die unterschiedlich intensive Verwendung der Knoten. So wird häufig davon ausgegangen, dass Knoten, welche sich nahe der Senke befinden, mehr Nachrichten transportieren und daher eine kürzere Lebenszeit haben. Unter der Annahme einer idealen Aggregation, bei der jeder Knoten ebenso viele Daten sendet wie er empfängt, kann diese starke Schwankung jedoch vermieden werden. Die Annahme identischer Lebenszeiten kann somit gerechtfertigt werden.

Reichweiten Für die Entwicklung und Evaluation von 2-MASCLE wurde von einer kreisförmigen Sensor- und Kommunikationsreichweite ausgegangen. Diese Annahme entspricht vor allem in Bezug auf die Kommunikationsreichweite nicht den Bedingungen in realen Szenarien. Im Kontext des vorgestellten Algorithmus ist diese dennoch anwendbar, da weder durch die Sensorik erfasste Daten noch durch die Kommunikation vermittelte Informationen als Eingangsgrößen der Algorithmen dienen. Die kreisförmig angenommenen Reichweiten können ferner als garantierte Reichweiten betrachtet werden, welche in der realen Anwendung übertroffen werden.

4.3.3 Weiterentwicklungen und Ausblicke

Mit der in 2-MASCLE erstmals praktizierten Cluster-basierten Heilung markiert dieses Verfahren den Anfang einer Reihe weiterer, auf den beschriebenen Ideen basierender Arbeiten. Neben diesen Arbeiten werden nachfolgend ebenso einige Ideen beschrieben, welche mögliche Forschungsansätze in diesem Bereich darstellen.

Clustergröße Mit der Entwicklung von Quadruple Phase Mutual Assistance in a Cluster Environment (4-MASCLE) [SBGT09] wurde eine im Vergleich zu XGAF nochmals verkleinerte Clusterstruktur untersucht, welche den Betrieb des Netzwerks in vier statt zwei Phasen ermöglicht. Durch die in Abbildung 4.15(b) dargestellte, feinere Aufteilung des Netzwerks wurden darüber hinaus neue Konstellationen zur Heilung ermöglicht. Die Heilung kann dadurch flexibler und in einigen Fällen bereits durch zwei benachbarte Cluster erfolgen. Durch die vorgenommene Verdoppelung der Phasenanzahl wird weiterhin erreicht, dass zu jedem Zeitpunkt nur jeder vierte Cluster und insgesamt nochmals weniger Sensorknoten aktiv sind. Eine weitere Verfeinerung, beispielsweise zum Erreichen von acht Phasen, wäre, wie in Abbildung 4.15(c) dargestellt, ebenfalls denkbar. Dabei sind jedoch zwei limitierende Faktoren zu beachten. Zum einen wird die mittels Lokalisierung durchgeführte Zuordnung von Sensorknoten zu Clustern umso schwieriger, je kleiner die

Cluster gewählt werden. Zum anderen bietet eine kleinere Clusterstruktur zwar mehr Möglichkeiten der Heilung, das Abstimmungsverfahren, mit dem benachbarte Cluster die Heilung organisieren, wird jedoch ungleich aufwendiger. Es wäre daher darauf zu achten, dass der zur Heilung notwendige Overhead den erreichten Heilungseffekt nicht zunichtemacht. Wie in Abbildung 4.15(a) dargestellt, können jedoch auch kleinere Änderungen der Clustergröße, ohne eine Steigerung der Anzahl der Aktivitätsphasen, zu Verbesserungen des MASCLE-Verfahrens führen. So kann beispielsweise eine Verkleinerung der Cluster eine effizientere Heilung bewirken.

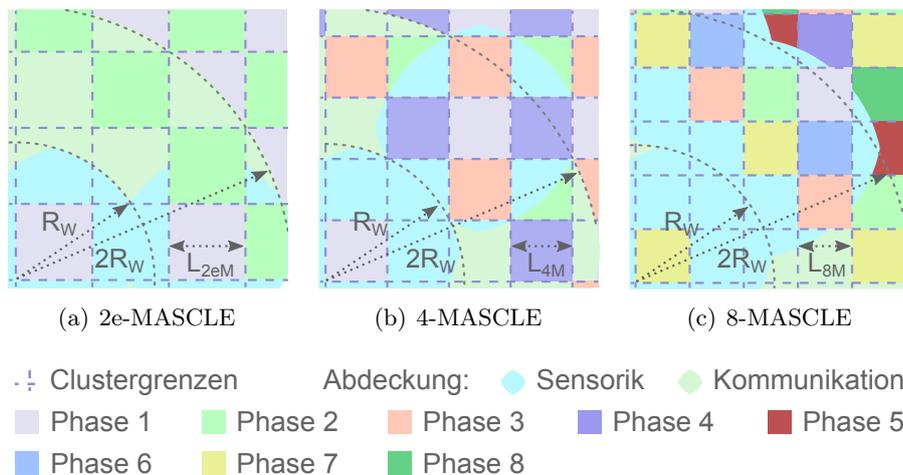


Abbildung 4.15: Variation der Clustergröße führt zu weiteren MASCLE-Verfahren: (a) 2e-MASCLE mit verbesserter Heilung, (b) 4-MASCLE mit verbesserter Heilung und höherer Phasenzahl, (c) 8-MASCLE mit nochmals erhöhter Phasenzahl.

Clusterform Durch die Entwicklung von Hexagon Mutual Assistance in a Cluster Environment (Hex-MASCLE) [SBT11a] fand eine Anwendung der MASCLE-Prinzipien auf sechseckige Clusterstrukturen statt. Die Anwendung des Prinzips auf weitere Clusterformen, wie in [SBT10b] beschrieben, ist jedoch ebenso denkbar. Abbildung 4.16 zeigt verschiedene Clusterformen mit regelmäßiger Anordnung.

Clusterbildung Ein Nachteil der bislang existierenden MASCLE-Algorithmen ist dadurch gegeben, dass die Zuordnung der Sensorknoten aufgrund ihrer Position erfolgt. Eine Anwendung der MASCLE-Prinzipien auf lokalisierungsfreie Cluster-Verfahren wie das in Kapitel 4.4.2 beschriebene BBC oder die in [SBT08b, SBYT09] beschriebenen Verfahren stellt daher eine Möglichkeit für zukünftige Untersuchungen dar.

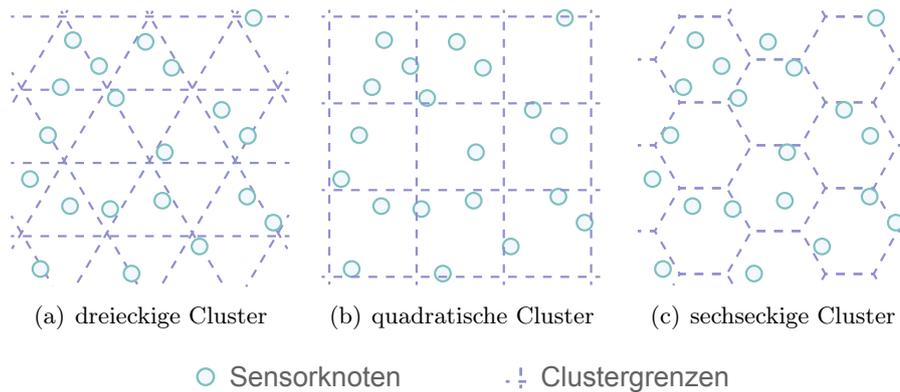


Abbildung 4.16: Alternative Clusterformen zur Partitionierung drahtloser Sensornetze: (a) Dreieck, (b) Quadrat, (c) Sechseck.

Clusterhierarchie Die Größe der gebildeten Cluster wird in den bestehenden MASCLE-Verfahren auf der Grundlage von Sensorreichweite und Kommunikationsreichweite bestimmt. Häufig erfolgt die stärkere Einschränkung dabei durch die Sensorreichweite. Dies führt dazu, dass bei einer vielfach höheren Kommunikationsreichweite unnötig viele Sensorknoten als Router fungieren. Abhilfe kann an dieser Stelle eine Trennung von Kommunikations- und Sensorreichweite bringen. So könnte, wie in Abbildung 4.17 dargestellt, ein Kommunikationscluster aus mehreren Sensorclustern bestehen oder die Dimensionierung von Sensor- und Kommunikationscluster unabhängig voneinander erfolgen. Die Zuordnung von Sensorcluster und Kommunikationscluster könnte in diesem Fall durch den Abstand der Clustermittelpunkte erfolgen.

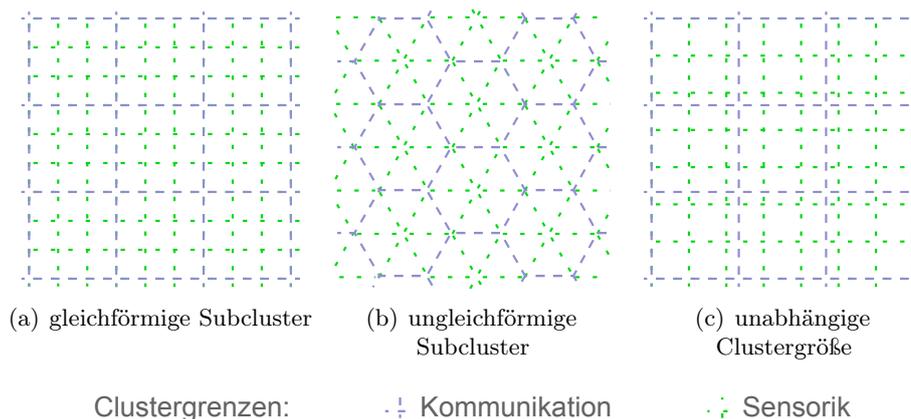


Abbildung 4.17: Möglichkeiten zur Trennung von Kommunikations- und Sensorreichweite in MASCLE-basierten Verfahren: (a) gleichförmige Subcluster, (b) ungleichförmige Subcluster, (c) voneinander unabhängige Clustergrößen.

Clustermobilität Durch die zufällige Verteilung von Sensorknoten im Netzwerk ergibt es sich, dass einige Cluster mehr Knoten enthalten und andere Cluster verhältnismäßig wenig. In einigen Fällen kann es vorkommen, dass Sensorknoten so dicht an einer Clustergrenze liegen, dass eine geringe Verschiebung der Grenze eine grundlegende Änderung in der Anzahl der Clustermember eines Clusters bewirkt. Um die Abhängigkeit von der Wahl der Clustergrenzen zu verringern und den Ressourcenverbrauch gleichmäßiger auf die Cluster zu verteilen, wäre eine globale Verschiebung der Clustergrenzen in festgelegten Intervallen denkbar. Eine Möglichkeit, dies zu realisieren stellt die Verwendung von Subclustern dar. Da die ursprünglichen Cluster dann aus einer festen Zahl an Subclustern bestehen, würde eine Änderung der Zuordnung der Subcluster zu den Clustern somit eine Verschiebung der Clustergrenzen bewirken. Abbildung 4.18 illustriert eine solche Verschiebung der Clustergrenzen für eine aktive Phase. Ein sinnvoller Zeitpunkt zum Verschieben der Clustergrenzen wäre jeweils nach zwei Phasenwechseln. Werden statt der jeweils aktuellen Clustergrenzen die jeweils aktiven Subcluster betrachtet, so würde in dem gewählten Beispiel aus einem zweiphasigen 2-MASCLE ein achtphasiges MASCLE entstehen.

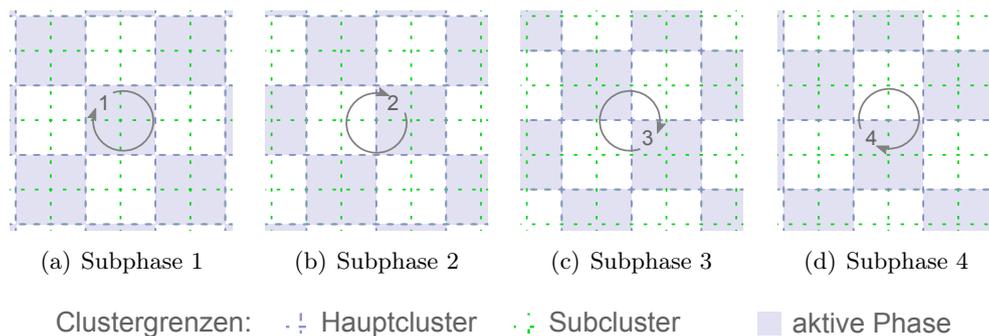
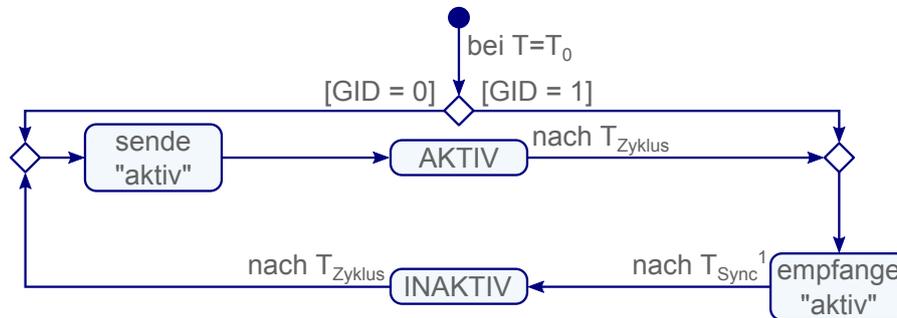


Abbildung 4.18: Darstellung einer Möglichkeit zur zyklischen Verschiebung der Clustergrenzen mit Hilfe von Subclustern.

Selbstsynchronisation Das beschriebene 2-MASCLE setzt für eine korrekte Funktionsweise eine vorhergehende Synchronisation der Sensorknoten voraus. Die gewählte Clusterstruktur bietet jedoch auch eine Möglichkeit, bei der auf eine vorhergehende Synchronisation weitgehend verzichtet werden kann. Wie in Abbildung 4.19 dargestellt ist es für eine derartige integrierte Synchronisation erforderlich, dass jeder Cluster, ähnlich wie bei der in Abbildung 4.9 dargestellten Heilung, zu Beginn seiner Aktivitätsphase eine Nachricht versendet. Cluster welche in die inaktive Phase wechseln möchten, müssen so lange warten, bis sie von allen horizontal und vertikal angrenzenden Clustern eine solche Aktivitätsnachricht erhalten haben. Dieses Warten ist durch die variable Zeitspanne T_{Sync} dargestellt.

Durch das Warten ergibt sich eine Empfänger-Empfänger-Synchronisation von bis zu vier Clustern, welche an den zuletzt sendenden Cluster angrenzen.



¹ variabler Zeitraum, welcher verstreicht, bis von allen angrenzenden Nachbarn eine „aktiv“-Nachricht empfangen wurde

Abbildung 4.19: Algorithmus zur Realisierung einer selbstständigen Synchronisation der Phasen in 2-MASCLE.

Durch fortlaufende Anwendung des Algorithmus erfolgt so eine Synchronisation des gesamten Netzwerks auf Basis jenes Clusters, welcher zu Beginn als letztes aktiv wurde. Der Zeitraum T_{Sync} wird nach und nach minimiert. Die maximale Anzahl an Zyklen, welche bis zur vollständigen Synchronisation durchlaufen werden muss, ergibt sich bei einem lückenlosen rechteckigen Sensornetzwerk aus der Anzahl Cluster entlang der längsten Kante. Obwohl das dargestellte Verfahren lediglich eine Beschreibung auf Cluster-Ebene liefert, lässt es sich mit geringem Aufwand auf die Synchronisation der Sensorknoten übertragen, da es sich hier um eine Synchronisation der Empfänger handelt und lediglich das Senden durch eine geeignete Rollenverteilung innerhalb der Cluster organisiert werden muss.

4.4 Lokalisierungsfreies Clustering mit BBC

4.4.1 Ausgangsverfahren

Die Entwicklung von BBC [SBT10a] geht auf Arbeiten im Bereich des Clusterings sowie Arbeiten im Bereich der Lokalisierung zurück. Motivierend seitens der Clustering-Verfahren war die Arbeit an dem in Abschnitt 4.3.2 beschriebenen 2-MASCLE, einem Vertreter des geografischen Clusterings, welches als solches das Manko aufweist, dass jeder Sensorknoten Informationen zu seiner geografischen Position besitzen muss, um sich korrekt einem Cluster zuzuordnen. Diese Voraussetzung galt es mit Hilfe des BBC zu beseitigen. Auf der Seite

der Lokalisierung spielten Arbeiten im Bereich der grobkörnigen, schwerpunkt-basierten Lokalisierung CL [BHE00] in die Entwicklung von BBC hinein.

4.4.1.1 Geografisches Clustering

Das geografische Clustering verfolgt den Ansatz, Sensorknoten anhand ihrer Position in Gruppen zu unterteilen. Ein einfaches Beispiel für diese Art der Unterteilung stellt die in Abbildung 4.20 illustrierte Verwendung quadratischer Cluster dar, wie es zum Beispiel bei XGAF aber auch dem in Abschnitt 4.3.2 vorgestellten 2-MASCLE der Fall ist.

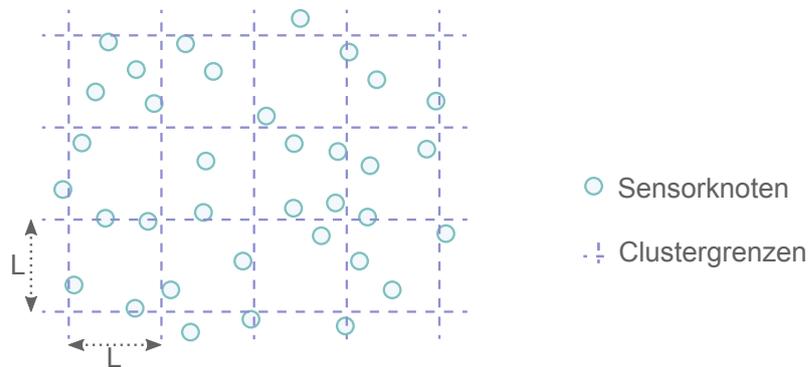


Abbildung 4.20: Strukturierung eines Sensornetzwerks durch Verwendung quadratischer Cluster.

Die verwendeten Cluster sind in der Regel durch eine feste Größe gekennzeichnet, welche an dieser Stelle durch ihre Kantenlänge L gegeben ist. Zusammen mit der Position $(k_{(x)}, k_{(y)})^T$ eines Sensorknotens k kann die Zuordnung zu einem Cluster durch die Ermittlung des CIV gemäß Gleichung (4.9) erfolgen.

$$CIV = \begin{pmatrix} CIV_{(x)} \\ CIV_{(y)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lfloor k_{(x)}/L \rfloor \\ \lfloor k_{(y)}/L \rfloor \end{pmatrix} \quad (4.9)$$

Für weiterführende Informationen bezüglich geografischem Clustering sei an dieser Stelle auf die Kapitel 2.3 und 4.3 verwiesen.

4.4.1.2 Schwerpunkt-basierte Lokalisierung

Die schwerpunkt-basierte Lokalisierung stellt eine einfache und vor allem ressourcenschonende Möglichkeit der Lokalisierung dar, welche mit einem Mindestmaß an Informationen

eine lokale Bestimmung der Position eines Sensorknotens durch den Knoten selbst ermöglicht. Sie setzt, wie in Abbildung 4.21 dargestellt, die Präsenz einiger Referenzknoten voraus, welche in einer quadratischen Gitterstruktur angeordnet sind.

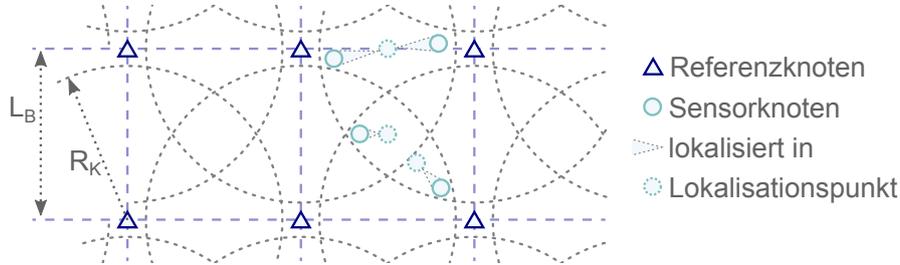


Abbildung 4.21: Darstellung der schwerpunkt-basierten Lokalisierung mit Hilfe des CL-Verfahrens.

Jeder dieser Referenzknoten verfügt über eine begrenzte Kommunikationsreichweite innerhalb welcher er in periodischen Intervallen eine Nachricht aussendet, welche Informationen bezüglich der eigenen Position enthält. Diese Reichweite kann modellhaft als ein Kreis mit entsprechender Reichweite angenommen werden. Für das in [BHE00] beschriebene CL wurde eine Kommunikationsreichweite R_K angenommen, welche in etwa 90 % der Gitterweite L_B entspricht. Die Positionsbestimmung auf einem Sensorknoten u_i erfolgt, wie in Gleichung (4.10) dargestellt, durch die Mittelwertbildung der Positionen der in der Menge B_i zusammengefassten Referenzknoten b , welche durch den Knoten empfangen werden.

$$\begin{pmatrix} u_{i(x)} \\ u_{i(y)} \end{pmatrix} = \frac{1}{|B_i|} \sum_{b \in B_i} \begin{pmatrix} b_{(x)} \\ b_{(y)} \end{pmatrix} \quad (4.10)$$

Als Eingangsgrößen dienen lediglich die Positionen der Referenzknoten, sowie die Information, welche der Referenzknoten sich innerhalb der Kommunikationsreichweite befinden. Eine Auswertung der Empfangssignalstärke zur Annäherung des Abstandes zu den Referenzknoten, wie es in anderen Verfahren häufig der Fall ist, findet hingegen nicht statt. Wie in Abbildung 4.21 dargestellt, ergeben sich durch diese Art der Lokalisierung Bereiche, gebildet durch die Überschneidung der Reichweiten der Referenzknoten, innerhalb derer sich dort befindliche Sensorknoten auf eine identische Position lokalisieren.

4.4.2 Das BBC Verfahren

4.4.2.1 Motivation

Die Zielstellung bei der Entwicklung von BBC bestand darin, Sensorknoten, ähnlich wie beim geografischen Clustering XGAF, in lokal begrenzte Gruppen zu unterteilen, ohne jedoch eine Lokalisierung der Sensorknoten vorauszusetzen. Um dies zu erreichen sollten die beim Lokalisierungsverfahren CL auftretenden Überlappungsbereiche zur Gruppierung der Sensorknoten und somit zur Lokalisierung verwendet werden.

4.4.2.2 Algorithmenbeschreibung

Für die Partitionierung des Netzwerks in geografische Cluster verwendet BBC in einer quadratischen Gitterstruktur angeordnete Referenzknoten. Anders als bei dem zugrunde liegenden CL-Verfahren müssen diese Referenzknoten jedoch keine Information über ihre geografische Lage besitzen. Die Gruppierung der Sensorknoten kann unabhängig von der geografischen Position allein auf der Grundlage der empfangenen Referenzknoten erfolgen.

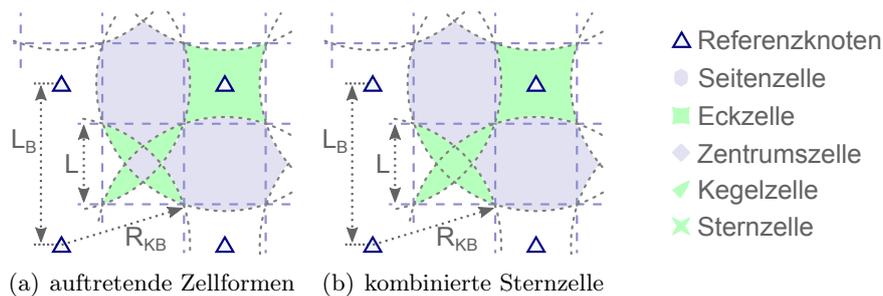


Abbildung 4.22: Darstellung der durch Überlappungsbereiche auftretenden Zellformen bei BBC: (a) Darstellung mit auftretenden Zentrums- und Kegelzellen. (b) Darstellung mit aus Zentrums- und Kegelzellen gebildeter Sternzelle.

Um ein Clustering zu erreichen, welches sich der quadratischen Clusterform annähert, ist es notwendig, geeignete Zellen aus den entstehenden Überlappungsbereichen zu extrahieren. Um dies zu erreichen, werden die entstehenden Zellen zunächst, wie in Abbildung 4.22 dargestellt, in die Zelltypen *Eckzelle*, *Seitenzelle*, *Kegelzelle* und *Zentrumszelle* unterteilt. Um eine gleichmäßigere Unterteilung der abgedeckten Fläche zu erreichen, verwendet BBC das Konstrukt der *Sternzelle*, welche einen Zusammenschluss aus Zentrumszelle und den jeweils angrenzenden Kegelzellen darstellt.

Aus der Darstellung in Abbildung 4.22 lässt sich bereits eine gute Approximation der quadratischen Cluster erkennen, dessen Clusterlänge L der halben Gitterweite L_B ent-

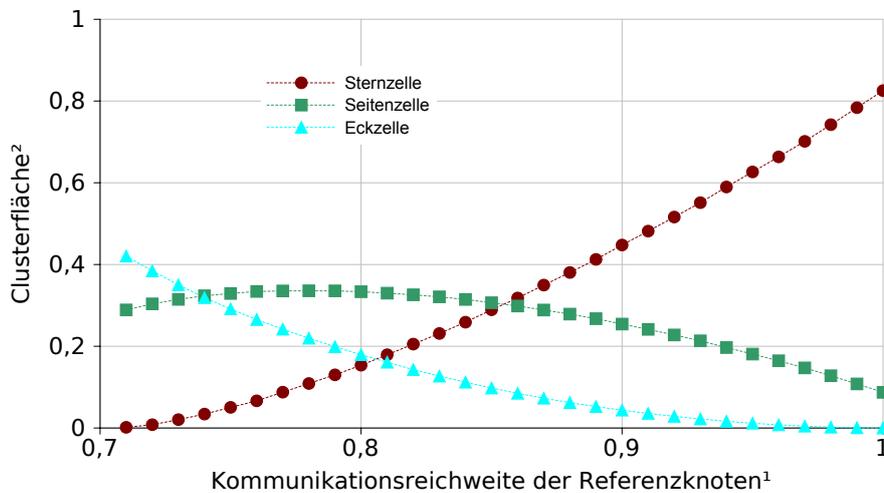
spricht. Um die resultierenden Zellen wie in Abbildung 4.22 zu erhalten, müssten die Gitterweite L_B und die Kommunikationsreichweite der Referenzknoten, nachfolgend als Referenzreichweite R_{KB} bezeichnet, dem in Gleichung (4.11) beschriebenen Verhältnis folgen.

$$R_{KB}^2 = \left(\frac{1}{4}L_B\right)^2 + \left(\frac{3}{4}L_B\right)^2$$

$$R_{KB} = \frac{\sqrt{10}}{4}L_B \tag{4.11}$$

$$R_{KB} = 0,79 * L_B$$

Um eine ausgewogene Partitionierung zu erreichen, sollten neben der optischen Ähnlichkeit weitere Kritikpunkte erfüllt sein. Zu diesen zählt eine möglichst gleichmäßige Verteilung von Sensorknoten auf die sich ergebenden Cluster. Um dies zu gewährleisten, sollten die Flächen der einzelnen Cluster möglichst gleich groß sein. Abbildung 4.23 zeigt die Flächeninhalte von Eck-, Seiten- und Sternzelle, normalisiert auf die quadratische Gitterweite L_B^2 , in Abhängigkeit von der Referenzreichweite R_{KB} . Sie zeigt, dass bei einer Reichweite zwischen $0,8L_B$ und $0,81L_B$ die kleinste entstehende Fläche ein Maximum aufweist.

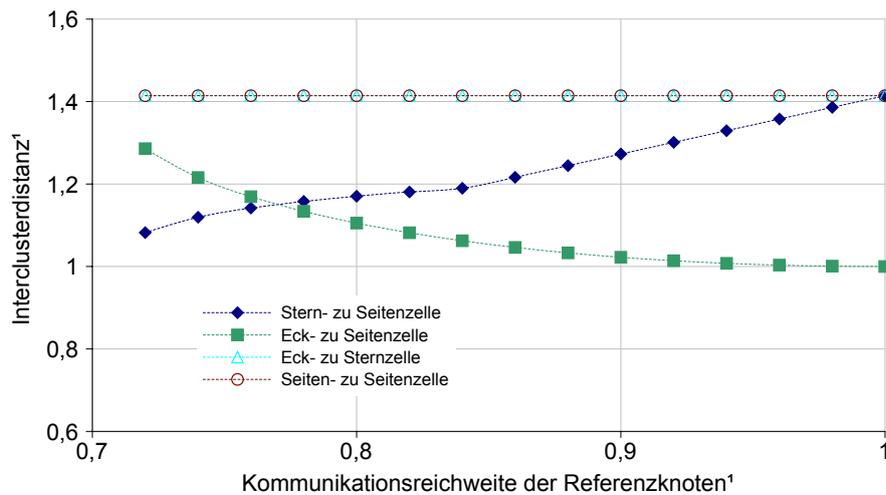


¹ normiert auf die Gitterweite L_B ² normiert auf die quadratische Gitterweite L_B^2

Abbildung 4.23: Flächenvergleich der bei BBC auftretenden Clusterformen.

Ein weiteres Kriterium stellt der maximal erreichbare Abstand zweier Sensorknoten dar, welche sich in benachbarten Clustern befinden. Diese Interclusterdistanz stellt die minimal erforderliche Kommunikationsreichweite der Sensorknoten dar. Abbildung 4.24 zeigt

diesen auf die Gitterweite normierten Abstand in Abhängigkeit von der verwendeten Referenzreichweite. Das Ergebnis zeigt, dass Paarungen von Clustern existieren, bei denen die Interclusterdistanz einen konstanten Wert annimmt, welcher das Maximum der untersuchten Paarungen darstellt. Der untersuchte maximale Kommunikationsabstand ist daher nicht von der Referenzreichweite abhängig, sofern die Kommunikation zwischen allen möglichen Nachbarpaarungen gewährleistet werden soll. Wird jedoch auf eine diagonale Kommunikation verzichtet, so wird das Optimum erreicht, wenn die Referenzreichweite zwischen $0,76L_B$ und $0,78L_B$ liegt.

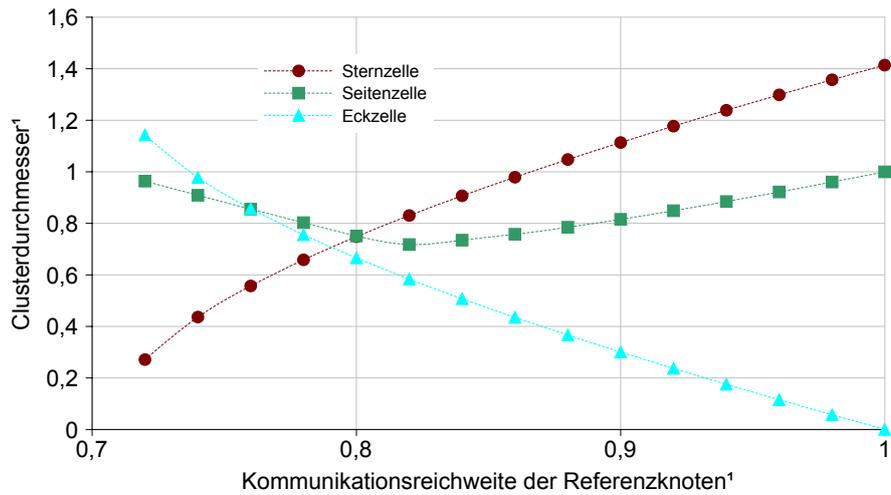


¹ normiert auf die Gitterweite L_B

Abbildung 4.24: Vergleich der entstehenden Interclusterdistanzen zwischen den bei BBC auftretenden Clusterformen.

Ein letztes Kriterium stellt vor allem im Hinblick auf eine Anwendung wie bei XGAF der maximale Durchmesser eines Clusters dar. Dieser stellt die minimale Sensorreichweite dar, die ein Sensorknoten besitzen muss, um den gesamten Cluster von jeder Position innerhalb des Clusters überwachen zu können. Abbildung 4.25 zeigt, dass das Maximum der dargestellten maximalen Clusterdurchmesser aller Clusterformen, ein Minimum bei einer Referenzreichweite von $0,8L_B$ erreicht.

Werden nun abschließend Sensor- und Kommunikationsreichweite der Sensorknoten, die Fläche der entstehenden Zellen und die in Gleichung (4.11) ermittelte Referenzreichweite betrachtet, so lässt sich abschließend sagen, dass die Sensorreichweite eines Sensorknotens in der Regel einer stärkeren Einschränkung unterliegen wird als die Kommunikationsreichweite. Zur Verwendung von BBC wird daher eine Kommunikationsreichweite der Sensorknoten empfohlen, welche 80 % der Gitterweite L_B entspricht. Um eine Verwendung von BBC



¹ normiert auf die Gitterweite L_B

Abbildung 4.25: Vergleich der entstehenden Clusterdurchmesser der bei BBC auftretenden Clusterformen.

im Sinne von XGAF zu erreichen, muss die gewählte Gitterweite dem Doppelten der in XGAF verwendeten Kantenlänge L_{XGAF} entsprechen.

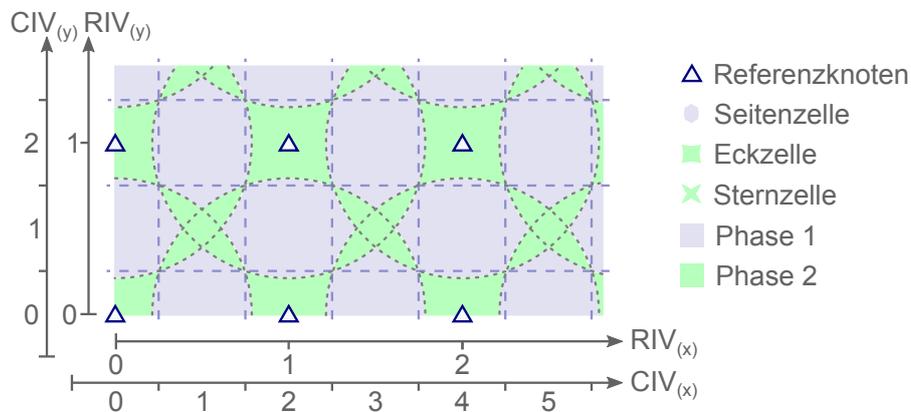


Abbildung 4.26: Identifikation von Sensorclustern mittels CIV durch Verwendung des fortlaufenden RIV.

Um eine eindeutige Zuordnung von Sensorknoten und Clustern zu erreichen ist die Bestimmung des CIV notwendig. Da BBC ohne Positionsinformationen arbeitet, wird zur Bildung des CIV eine durchlaufende Sortierung der Referenzknoten in beide Richtungen, in Form eines Reference Identification Vector (RIV), vorausgesetzt. Diese ist in Abbildung 4.26 beispielhaft dargestellt. Mit Hilfe des RIV lässt sich der CIV eines Sensorknotens wie in

Gleichung (4.12) angegeben berechnen, wobei B_i die Menge der Referenzknoten angibt, welche durch den Sensorknoten i empfangen werden.

$$CIV_i = \begin{pmatrix} CIV_{i(x)} \\ CIV_{i(y)} \end{pmatrix} = \left[\frac{2}{|B_i|} \sum_{b \in B_i} \begin{pmatrix} RIV_{b(x)} \\ RIV_{b(y)} \end{pmatrix} \right] \quad (4.12)$$

4.4.2.3 Evaluation

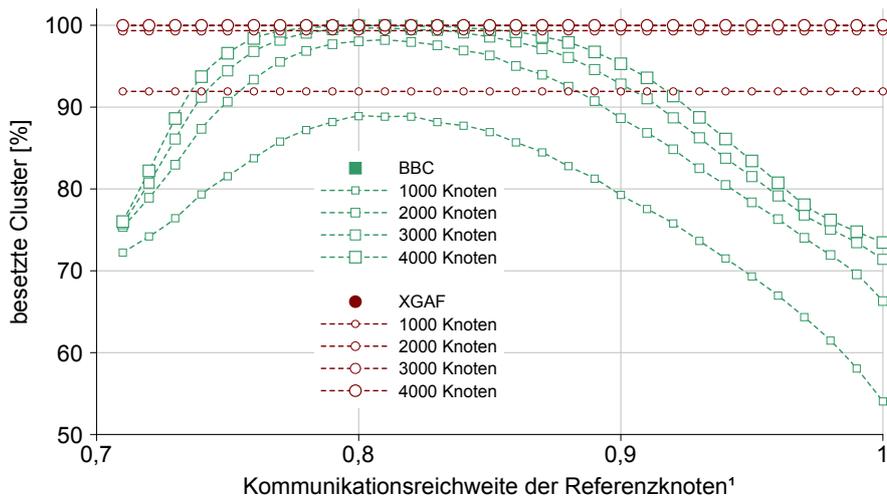
Zur Bewertung der so beschriebenen Partitionierungsmethode wird diese mit dem Clusteringverfahren XGAF verglichen. Der simulativen Untersuchung liegen die in Tabelle 4.3 dargestellten Randbedingungen zugrunde, wobei die verwendete Working Range modellhaft als kreisförmig angenommen wird.

Gesamtfläche	1000 * 1000 m^2
Working Range	70,7 m
Anzahl Simulationen	1000
Gitterweite (BBC)	100 m
Kantenlänge (XGAF)	50 m

Tabelle 4.3: Verwendete Simulationsparameter

Die in Abbildung 4.27 dargestellten Ergebnisse dienen der Untersuchung der Anzahl besetzter Cluster in Abhängigkeit der für BBC verwendeten Referenzreichweite und der Anzahl ausgebrachter Sensorknoten. Die Darstellung bestätigt zum einen die empfohlene Referenzreichweite von $0,8L_B$, da die Anzahl abgedeckter BBC-Cluster hier ein Maximum aufweist. Zum anderen zeigt sich, dass bei Verwendung weniger Sensorknoten die Anzahl der besetzten BBC-Cluster denen der bei XGAF verwendeten Cluster nachsteht. Der Grund dafür liegt in der geringen Fläche der Stern- und Eckzellen, dessen Flächeninhalt bei einer Referenzreichweite von $0,8L_B$, wie in Abbildung 4.23 ersichtlich, weniger als 20 % der quadratischen Gitterweite entspricht. Die Fläche eines XGAF-Clusters hingegen entspricht in diesem Vergleich 25 % der quadratischen Gitterweite.

Mit der durch Abbildung 4.27 bestätigten Referenzreichweite von $0,8L_B$ erfolgte eine detaillierte Untersuchung der Netzwerkabdeckung. Die daraus resultierenden Ergebnisse sind in Abbildung 4.28 dargestellt. Sie zeigen, dass die erreichte mittlere Abdeckung der Netzwerkfläche sowohl bei Verwendung von XGAF als auch bei Verwendung von BBC nahezu identisch ist. Lediglich bei der Betrachtung der vollständig abgedeckten Netzwerke zeigt sich ein leichter Vorteil von XGAF.



¹ normiert auf die Gitterweite L_B

Abbildung 4.27: Vergleich der Anzahl besetzter Cluster in Abhängigkeit von der Anzahl ausgebrachter Sensorknoten und der gewählten Kommunikationsreichweite der Referenzknoten.

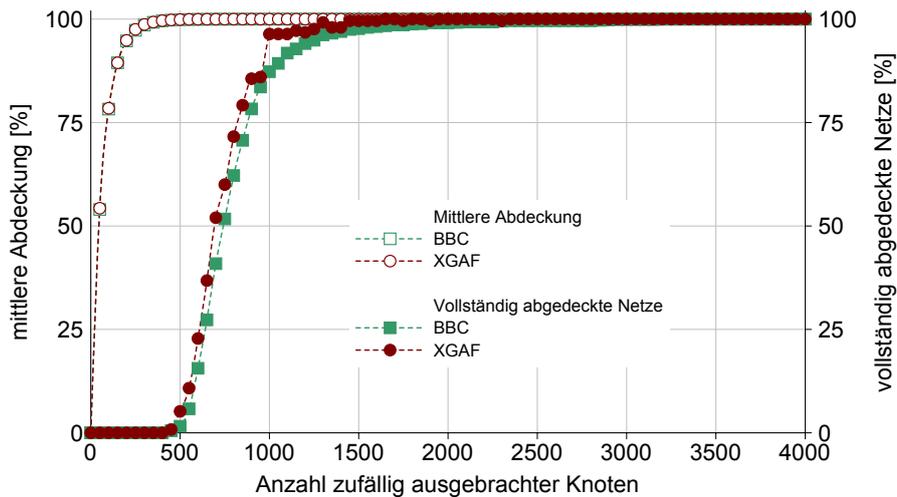


Abbildung 4.28: Vergleich der erreichten Abdeckung in Abhängigkeit von der Anzahl ausgebrachter Sensorknoten.

4.4.2.4 Nachbetrachtung

Reichweiten Sowohl für die Entwicklung als auch für die Untersuchung von BBC wurde für die Ausbreitung der Working Range der Sensorknoten sowie der Kommunikationsreichweite der Referenzknoten eine kreisförmige Modellvorstellung verwendet. Die Modellierung der Working Range folgte dabei den gleichen Maßgaben, welche bereits bei der Unter-

suchung von XGAF und 2-MASCLE in Abschnitt 4.3.2.4 beschrieben wurden. Für die Modellierung der Referenzreichweite gilt darüber hinaus, dass bereits in der Veröffentlichung von CL [BHE00] beschrieben wurde, dass trotz der Unterschiede zwischen Modell und Wirklichkeit eine befriedigende Übereinstimmung hinsichtlich der auftretenden Überlappungsgebiete beobachtet werden konnte. Dies kann erneut darauf zurückgeführt werden, dass nicht die Empfangssignalstärke sondern lediglich die Empfangsreichweite zur Verwendung herangezogen wird. Für den Vergleich mit XGAF ist eine derart idealisierte Referenzreichweite auch daher sinnvoll, da für die Clusterzuordnung im Fall von XGAF ebenfalls von einer idealen, da exakten, Lokalisierung der Sensorknoten ausgegangen wurde.

Referenzknoten In der dargestellten Form setzt BBC das Vorhandensein exakt platzierter immobiler Referenzknoten voraus. Diese Modellvorstellung kann im praktischen Einsatz gegen wenige mobile Referenzknoten substituiert werden, welche an den dafür vorgesehenen Positionen die erforderliche Nachricht versenden und so über die Zeit alle erforderlichen Referenzpositionen abdecken.

4.4.3 Weiterentwicklungen und Ausblicke

BBC stellt eine Möglichkeit bereit, um mit verhältnismäßig geringem Aufwand eine Partitionierung eines Sensornetzwerks in geografische Cluster zu erreichen. Das von BBC verwendete Schlüsselprinzip liegt dabei in der gezielten Platzierung von Referenzknoten. Dieses Prinzip lässt sich über die in BBC gewählte Anwendung hinaus verwenden, um Cluster in weiteren Formen und Größen zu erzeugen.

Clusterformen Eine naheliegende Anpassung von BBC besteht darin, Sensorknoten nicht anhand der durch die Kommunikationsreichweite der Referenzknoten aufgespannten Überlappungsgebiete zu gruppieren, sondern die von einem Sensorknoten empfangenen Referenzknoten aufsteigend nach ihrer Entfernung zu sortieren und jene Sensorknoten zusammenzufassen, welche den gleichen Referenzknoten an erster Stelle dieser Nachbarschaftsliste führen. Die so entstehenden Cluster folgen damit dem Prinzip des Voronoi-Diagramms [OBSC00]. Je nach Anordnung der Referenzknoten lassen sich so verschiedene Clusterformen erzeugen, wie in Abbildung 4.29 dargestellt.

Das entwickelte BBC-Verfahren setzt sich jedoch durch zwei wesentliche Vorteile von einer derartigen Verwendung des Voronoi-Prinzips ab. Zum einen erfordern die auf Voronoi basierenden Verfahren ein Maß für den Abstand eines Sensorknotens zu den ihn umgebenden Referenzknoten. Dieses kann zum Beispiel durch die Signalempfangsstärke gegeben

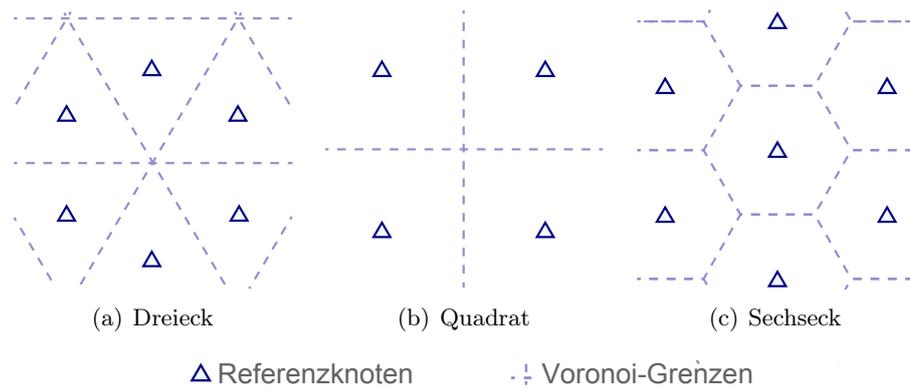


Abbildung 4.29: Clustering mittels Voronoi-Diagrammen ermöglicht die Konstruktion verschiedenster Clusterformen durch gezielte Anordnung der Referenzknoten: (a) Dreieck, (b) Quadrat, (c) Sechseck.

sein. Diese ist jedoch verhältnismäßig unzuverlässig und nicht in jedem Fall verfügbar. Zum anderen bietet BBC den noch stärker wiegenden Vorteil der Effizienz. Erfolgt die Clusterbildung mittels Voronoi, so wird jeder Referenzknoten dazu verwendet, genau einen Cluster zu erzeugen. In dem beschriebenen BBC-Verfahren werden durch einen Referenzknoten hingegen vier Cluster erzeugt.

Es ist jedoch anzumerken, dass durch intensivere Auswertung der Eingangsdaten auch bei Verwendung von Voronoi eine höhere Effizienz erreicht werden kann. Werden Sensorknoten zum Beispiel nicht allein nach dem ersten Referenzknoten der oben beschriebenen Nachbarschaftsliste gruppiert, sondern zusätzlich nach dem zweiten, so ergeben sich, wie in Abbildung 4.30 dargestellt, weitere Cluster. Diese sind in der Literatur als Voronoi-Diagramme höherer Ordnung bekannt [OBSC00].

Weitere Formen lassen sich durch getrennte Betrachtung der Raumdimensionen erreichen.

Anwendungen Neben der Anpassung der Clusterform ist auch eine Anpassung an den Zweck der Partitionierung möglich. So beschreibt Chessboard Clustering (CC) [DX06] ein Verfahren, bei dem ein Sensornetzwerk ähnlich wie bei 2-MASCLE in schachbrettartige Cluster unterteilt wird, um sogenannte *High-End-Sensors*, Sensorknoten mit besonderen Fähigkeiten, welche als Clusterheads dienen sollen, in zwei Gruppen, entsprechend der schwarzen und weißen Felder, einzuteilen. Auf dieser Grundlage werden in einer ersten Phase zunächst die High-End-Sensors der ersten Gruppe verwendet bis deren Energievorrat erschöpft ist. Anschließend werden in einer zweiten Phase die High-End-Sensors der zweiten Gruppe verwendet. Für diese Anwendung ist weniger die Form einzelner Cluster,

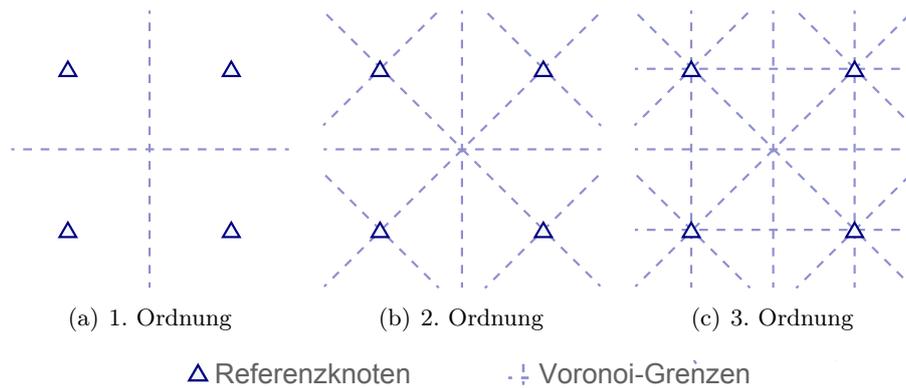


Abbildung 4.30: Effizientes Clustering mittels Voronoi-Diagrammen höherer Ordnung, konstruiert durch multiple Auswertung der Nachbarschaftsliste: (a) erster Referenzknoten gemeinsam, (b) erster und zweiter Referenzknoten gemeinsam, (c) erster, zweiter und dritter Referenzknoten gemeinsam.

als vielmehr die Gesamtfläche der Cluster einer Phase entscheidend. Mit Hilfe der Referenzreichweite kann BBC so angepasst werden, dass zwei Gruppen in schachbrettähnlichem Muster entstehen, welche jeweils eine gleich große Fläche einnehmen. Ein so angepasstes BBC, dargestellt in Abbildung 4.31, wird erreicht, wenn die Referenzreichweite R_{KB} auf rund $0,91L_B$ festgelegt wird.

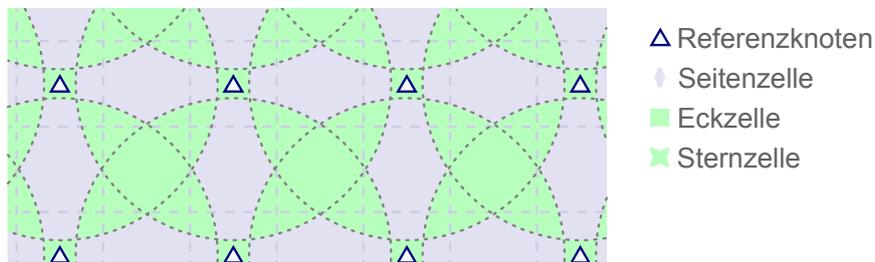


Abbildung 4.31: Anpassung des BBC-Clustering für die Anwendung des CC-Verfahrens. Die Fläche der Cluster einer Farbe entspricht der Fläche der Cluster der jeweils anderen Farbe.

4.5 Zusammenfassung

In den vorangegangenen Abschnitten wurden zwei unterschiedliche Verfahren des Clustering beschrieben, welche im Rahmen dieser Arbeit entstanden sind. Mit 2-MASCLE wurde ein Verfahren des geografischen Clustering vorgestellt. Die Sensorknoten sind zur Zuordnung zu ihrem jeweiligen Cluster darauf angewiesen, Wissen über ihre eigene Positi-

on zu besitzen. Das zweite vorgestellte Verfahren namens BBC bietet eine Möglichkeit, Sensorknoten ohne dieses Wissen in geografische Cluster einzuordnen.

Der in Abschnitt 4.3.2 beschriebene 2-MASCLE-Algorithmus stellt eine Weiterentwicklung des bestehenden XGAF-Algorithmus und gleichzeitig eine Kombination aus Clustering und Covering dar. Das entwickelte Verfahren erreicht durch seine Zweiphasenstrategie eine garantierte vollständige Abdeckung des Sensornetzwerks mit weniger aktiven Sensorknoten als das zugrunde liegende XGAF-Verfahren. Vor allem durch das neu eingeführte Mittel der Heilung kann die Abdeckung des Netzwerks über einen weit höheren Zeitraum garantiert werden als mit anderen vergleichbaren Verfahren. 2-MASCLE bietet darüber hinaus eine Reihe von Ansatzpunkten für weitere Innovationen. Beispielhaft hierfür wurde in Abschnitt 4.3.3 auf Größe und Form der Cluster sowie auf Möglichkeiten der Clusterhierarchie sowie der Clusterbildung eingegangen.

Das in Abschnitt 4.4.2 beschriebene BBC ermöglicht es, Sensorknoten ohne Verwendung von Positionsdaten in geografische Cluster einzuteilen. Zur Partitionierung dienen durch Referenzknoten aufgespannte Überlappungsbereiche, welche der schwerpunktbasierten Lokalisierung entlehnt sind. Die so aufgebauten Cluster lassen sich in Verfahren mit quadratischen Clustern, wie XGAF oder den MASCLE-Verfahren verwenden und erreichen eine annähernd gleiche Performance.

Kapitel 5

Fehlerhafte Knoten in Sensornetzwerken

5.1 Motivation

Die Möglichkeiten und Szenarien zum Einsatz drahtloser Sensornetzwerke sind scheinbar unbegrenzt. Dies trifft jedoch nicht auf die den Sensorknoten zur Verfügung stehende Energie zu. Jede Aktivität der Knoten, sei es eine Berechnung, das Senden von Datenpaketen, das Verweilen in Empfangsbereitschaft oder die Ermittlung eines Messwertes verbraucht einen Teil der knappen Energie und verkürzt so die Lebenszeit von Sensorknoten und Netzwerk. Selbstverständlich ist der sparsame Umgang mit dieser Ressource daher gängige Praxis. So werden Clusterisierung und Aggregation dazu eingesetzt, um zu erreichen, dass beteiligte Sensorknoten möglichst selten aktiv sein müssen und nur die tatsächlich notwendige Zahl an Datenpaketen versendet werden muss. Dennoch beachten all diese Verfahren nicht, dass im Fall eines defekten Sensors Energie verbraucht wird, um fehlerhafte Daten zu erfassen, zu verarbeiten und durch das Netzwerk zu versenden. Um diesen unnötigen Energieverbrauch einschränken zu können, ist es notwendig, dass Sensorknoten vor Ort Informationen über die Güte der von ihnen ermittelten Daten erhalten. Im Folgenden wird daher ein Verfahren vorgestellt, welches es ermöglicht, fehlerhafte Messwerte durch lokal begrenzte Kommunikation zu erkennen. Es bildet daher die Grundlage für ein erweitertes Energiemanagement und lässt sich, wie abschließend erläutert, auch zur Fehlerdetektion in weiteren Gebieten wie der Lokalisierung verwenden.

5.2 Einordnung des untersuchten Verfahrens

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde, speziell für den Einsatz in drahtlosen Sensornetzwerken, ein Verfahren zur Detektion von Fehlern innerhalb erhobener Messwerte entwickelt, welches, wie in Abbildung 5.1 dargestellt, in die in Kapitel 2.4 beschriebene

Klassifizierung eingeordnet werden kann. Das Verfahren, welches den Sensorknoten eine Anpassung ihres Verhaltens bzw. eine Umbildung der Rollenverteilung ermöglichen soll, dient der dezentralen Detektion lokaler Ausreißer und verarbeitet kontinuierliche Eingangsgrößen. Der als Efficient Localized Detection of Erroneous Nodes (ELDEN) [BSST10] bezeichnete Algorithmus ermöglicht die Fehlerdetektion innerhalb des Netzwerks, um die so gewonnene Information direkt weiterverwenden zu können.

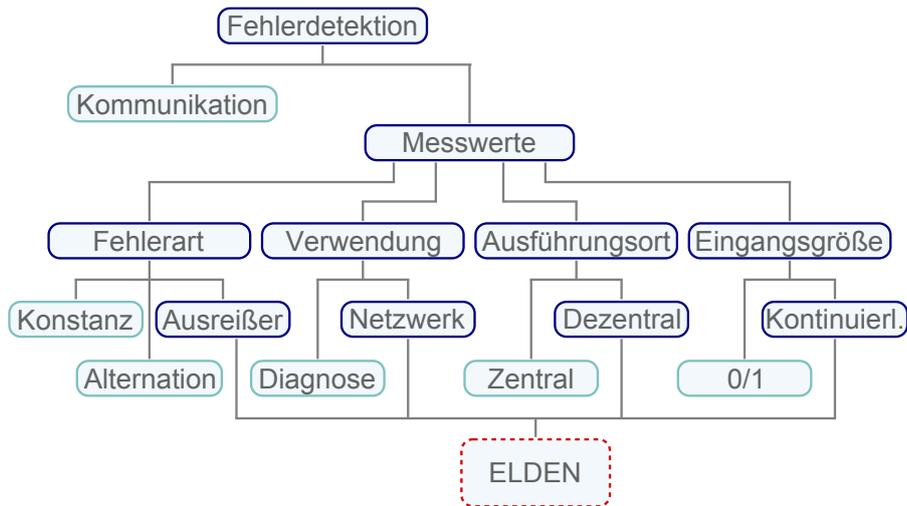


Abbildung 5.1: Einordnung des untersuchten Fehlerdetektionsverfahrens gemäß der gegebenen Klassifizierung.

5.3 Identifizierung fehlerbehafteter Sensorknoten

5.3.1 Ausgangsverfahren

Das nachfolgend beschriebene Verfahren zur Detektion fehlerbehafteter Sensorknoten entstand unter dem Einfluss einer von Ding et al. vorgestellten Arbeit zur fehlertoleranten Erkennung des Grenzverlaufs lokal begrenzter, durch Sensoren erfassbarer Ereignisse [DCXC05]. In ihrem Beitrag stellen die Autoren einerseits einen Algorithmus zur Erkennung von Ereignisgrenzen dar und widmen sich andererseits der Identifizierung fehlerhafter Sensorwerte. Sowohl der darin vorgestellte Algorithmus als auch das darauf aufbauende ELDEN-Verfahren nehmen eine Sonderstellung innerhalb der für Sensornetzwerke entwickelten Fehlererkennungsverfahren ein. Diese begründet sich dadurch, dass die Verfahren einerseits dezentral, im jeweiligen Kontext eines betroffenen Sensorknotens

agieren und andererseits beliebige skalare Eingangswerte verarbeiten, wohingegen andere bekannte Verfahren lediglich binäre Eingangswerte akzeptieren.

Das von Ding et al. vorgestellte Verfahren basiert auf einer mehrstufigen Kommunikation, wobei zunächst die Sensorwerte umliegender Sensorknoten statistisch ausgewertet werden, um anschließend auf der Grundlage dieser erneut kommunizierten Daten eine Bewertung der Sensordaten zu realisieren. Der erste Schritt des Verfahrens besteht darin, dass jeder Knoten k_i seinen aktuellen Messwert $v(k_i)$ an die in seiner Kommunikationsreichweite befindlichen Knoten kommuniziert. Folglich verfügt jeder Knoten k_i über Messwerte der ihm benachbarten Knoten, welche zusammen mit dem eigenen Messwert in der Menge $V(k_i)$ dargestellt werden. Unter Verwendung des Medians $med(V(k_i))$ ermittelt anschließend jeder Knoten k_i einen individuellen Differenzwert $d(k_i)$ gemäß Gleichung (5.1).

$$d(k_i) = v(k_i) - med(V(k_i)) \quad (5.1)$$

Der so ermittelte Differenzwert wird nun erneut innerhalb der einfachen Kommunikationsreichweite kommuniziert, wodurch jeder Knoten k_i anschließend über die Menge der Differenzwerte $D(k_i)$ verfügt. Mittelwert und Standardabweichung über diese Differenzmenge werden anschließend verwendet, um eine Normalisierung des ermittelten Differenzwertes zu erzielen und einen Entscheidungswert $e(k_i)$ gemäß der Gleichungen (5.2) und (5.3) zu bestimmen.

$$\mu(D(k_i)) = \frac{1}{|D(k_i)|} \sum_{d_j \in D(k_i)} d_j \quad (5.2)$$

$$\sigma(D(k_i)) = \sqrt{\frac{1}{|D(k_i)| - 1} \sum_{d_j \in D(k_i)} (d_j - \mu(D(k_i)))^2}$$

$$e(k_i) = \frac{d(k_i) - \mu(D(k_i))}{\sigma(D(k_i))} \quad (5.3)$$

Anhand eines Schwellenwertes θ_{Ding} erfolgt abschließend die Bewertung des Messwertes $v(k_i)$ als fehlerhaft bzw. fehlerfrei. Diese Entscheidung wird anhand von Gleichung (5.4) getroffen.

$$v(k_i) = \begin{cases} \text{fehlerhaft} & \text{für } |e(k_i)| > \theta_{Ding} \\ \text{fehlerfrei} & \text{für } |e(k_i)| \leq \theta_{Ding} \end{cases} \quad (5.4)$$

Die Darstellung in Abbildung 5.2 zeigt den zuvor beschriebenen Prozess und stellt die Einbeziehung der benachbarten Sensorknoten in einfacher und doppelter Kommunikationsreichweite dar.

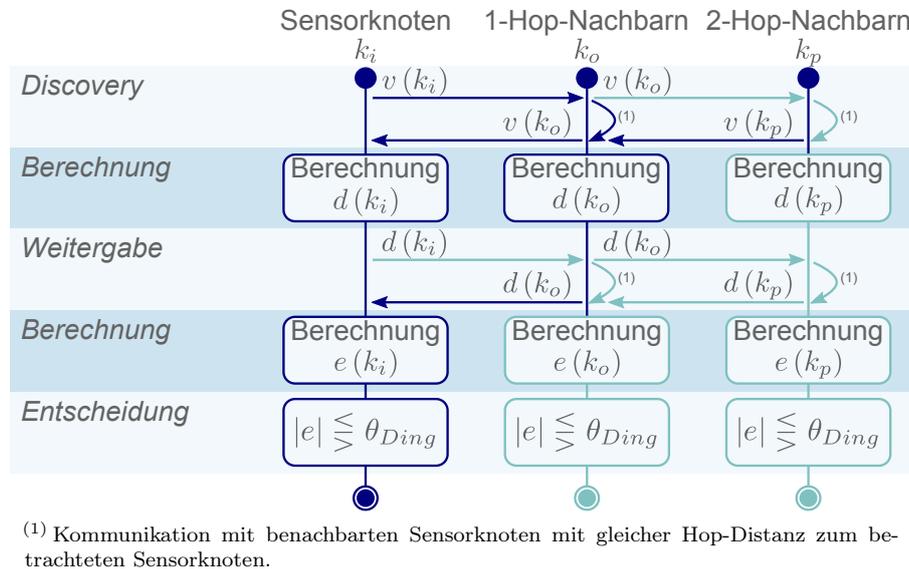


Abbildung 5.2: Darstellung des Fehlerdetektionsverfahrens von Ding et al. mit farblicher Hervorhebung der in den Entscheidungsprozess des betrachteten Sensorknotens eingehenden Kommunikations- und Berechnungsprozesse benachbarter Sensorknoten.

5.3.2 Das ELDEN Verfahren

5.3.2.1 Motivation

Das im Zuge der Arbeit entwickelte ELDEN-Verfahren greift den im zuvor beschriebenen Verfahren genutzten Ansatz der Verwendung des Medians als ein gegen Ausreißer stabiles Mittel auf und verfolgt eine konsequente Verwendung dieses einfachen mathematischen Verfahrens. Ziel der Entwicklung ist ein Verfahren zur Detektion fehlerhafter Messwerte, welches mit wenigen, mathematisch einfachen Operationen arbeitet und einen geringen Mehraufwand an zusätzlicher Kommunikation erfordert. Vor dem Hintergrund der adressierten Anwendung, fehlerhaften Sensorknoten eine ihren Fähigkeiten entsprechende Aufgabe zuzuweisen, sollte das Verfahren eine geringe Ausfallrate aufweisen, um die Leistungsfähigkeit des Sensornetzwerks nicht durch eine mögliche Inaktivierung fehlerfreier Knoten zu schmälern. Andernfalls könnten schnell so viele Sensorknoten als fehlerhaft deklariert und infolge dessen deaktiviert werden, dass eine flächenhafte und feingranulare

sensorische Abdeckung des Sensorgebietes nicht mehr gewährleistet ist. Ferner soll davon ausgegangen werden, dass durch das Zusammenspiel aus kostenoptimierter Produktion und teils unvorsichtiger Ausbringung der Sensorknoten, zum Beispiel durch den Abwurf aus einem Fahrzeug oder Flugzeug, eine geringe Zahl fehlerhaft arbeitender Sensorknoten zu erwarten ist, welche für die vorliegende Arbeit in einem Bereich um etwa 10% angenommen wird.

5.3.2.2 Algorithmenbeschreibung

Der unter dem Namen ELDEN entwickelte und veröffentlichte Algorithmus arbeitet in der Anfangsphase wie der zuvor beschriebene Algorithmus von Ding et al.. Wie es für einen Großteil verteilter, lokaler Algorithmen charakteristisch ist, so beginnt auch das ELDEN-Verfahren mit einer Broadcast- oder Discovery-Phase, in der alle Sensorknoten k_i ihren aktuellen Messwert $v(k_i)$ an die in Kommunikationsreichweite befindlichen Sensorknoten versenden. In der Folge hat jeder Knoten Kenntnis über die Messwertmenge $V(k_i)$ der Knotenmenge K_i , welche den Knoten selbst sowie die Knoten innerhalb der Kommunikationsreichweite umfasst.

Im Anschluss daran erfolgt, wie auch in dem als Ausgangspunkt genutzten Verfahren, die Ermittlung des Medians $med(V(k_i))$. Hierfür ist es erforderlich, die Elemente der Menge $V(k_i)$ zu ordnen, um den Median als den im Zentrum befindlichen Wert bzw. ggf. den Mittelwert der beiden im Zentrum befindlichen Werte zu bestimmen. Wie in Gleichung (5.5) dargestellt, wird dieser Wert dazu verwendet, um den Differenzwert $d(k_i)$ zu bestimmen.

$$d(k_i) = v(k_i) - med(V(k_i)) \quad (5.5)$$

An dieser Stelle ist die für das ELDEN-Verfahren notwendige Kommunikation bereits zu 100 % abgeschlossen und auch ein Großteil des Berechnungsaufwands ist bereits erfolgt. Um eine Normalisierung des Differenzwertes zu erreichen, wird erneut auf das Prinzip des Medians zurückgegriffen. Dieser stellt lediglich den bekanntesten und am häufigsten verwendeten Spezialfall der Zerlegung von Messwertmengen in Quantile dar. Er teilt die Menge der betrachteten Messwerte in zwei gleich große Teilmengen auf. Ein weiterer häufig verwendeter Fall ist die Aufteilung in vier Teilmengen. Die Grenzwerte dieser Teilmengen werden als Quartile bezeichnet, wobei das zweite Quartil den Median darstellt. Die Differenz zwischen dem ersten und dritten Quartil wird als Inter-Quartil-Range (IQR) bezeichnet. Dieser IQR findet bei dem dargestellten ELDEN-Verfahren zur Normalisierung

des Differenzwertes Verwendung. Mit Hilfe von Gleichung (5.6) erfolgt nun die Ermittlung des Entscheidungswertes $e(k_i)$.

$$e(k_i) = \frac{d(k_i)}{IQR(V(k_i))} \quad (5.6)$$

Mit Hilfe des so ermittelten Entscheidungswertes erfolgt abschließend mit Hilfe von Gleichung (5.7) und dem darin verwendeten Schwellenwert θ_{ELDEN} die Bewertung des Messwertes $v(k_i)$ als fehlerhaft oder fehlerfrei. Der jeweils anzuwendende Schwellenwert ist ebenso wie beim zuvor beschriebenen Verfahren je nach Messgröße und Ausprägung des Netzwerks empirisch zu bestimmen.

$$v(k_i) = \begin{cases} \text{fehlerhaft} & \text{für } |e(k_i)| > \theta_{ELDEN} \\ \text{fehlerfrei} & \text{für } |e(k_i)| \leq \theta_{ELDEN} \end{cases} \quad (5.7)$$

Das dargelegte Fehlerdetektionsverfahren ELDEN, welches im Vergleich zum Ausgangsverfahren mit deutlich geringerem Kommunikations- und Berechnungsaufwand auskommt, ist in Abbildung 5.3 bildhaft dargestellt.

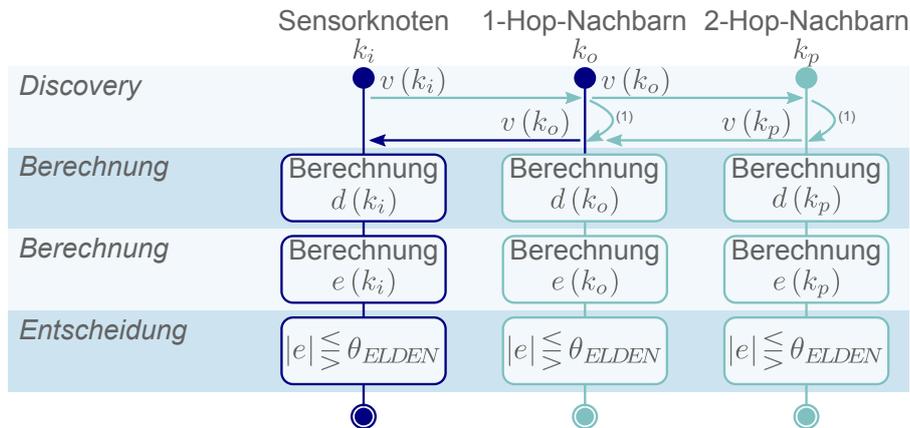


Abbildung 5.3: Darstellung des ELDEN Fehlerdetektionsverfahrens mit farblicher Hervorhebung der in den Entscheidungsprozess des betrachteten Sensorknotens eingehenden Kommunikationsprozesse benachbarter Sensorknoten.

5.3.2.3 Evaluation

Um das entwickelte Verfahren zu bewerten, wurde es in einem simulativen Netzwerkaufbau mit dem als Ausgangsverfahren genannten Algorithmus von Ding et al. verglichen, welches,

wie eingangs dargestellt, als eines der wenigen Verfahren in diesem Bereich ebenfalls eine kontinuierliche Messgröße als Eingangswert zulässt.

Für die Simulation erfolgte eine zufällige Platzierung von Sensorknoten in einem vorgegebenen Sensorgebiet. Als beispielhafte physikalische Messgröße diente die Temperatur. Jedem Sensorknoten wurde ein individueller Temperaturwert zugewiesen, welcher einem für das Sensorgebiet vorgegebenen Temperaturwert zuzüglich einer normalverteilten Standardabweichung entspricht. Einige Sensorknoten wurden darüber hinaus zufällig als fehlerhaft festgelegt. Der Messwert dieser Knoten wurde zusätzlich um einen als Fehlerdifferenz bezeichneten Wert verfälscht.

Von besonderer Bedeutung bei der Erkennung fehlerhafter Sensorknoten ist neben dem Verhältnis von fehlerhaften zu fehlerfreien Knoten auch die Anzahl der für den Vergleich verwendeten Sensorknoten. Diese ist von der simulierten Kommunikationsreichweite und der Anzahl der verwendeten Sensorknoten abhängig. Beide Größen wurden im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen variiert. Zur Bestimmung eines günstigen Schwellenwertes θ wurde auch dieser in begrenztem Maße variiert. Eine zusammenfassende Darstellung der verwendeten Simulationsparameter sowie der variierten Größen ist in Tabelle 5.1 angegeben.

Gesamtfläche	500 * 500 m ²
Ausgebrachte Sensorknoten	500, 1000, 1500
Schwellenwert θ	1...4
Temperaturmesswert	20°C ± 2 K
Fehlerdifferenz	5...50 K
Fehlerhafte Knoten	5...50 %
Kommunikationsreichweite	25...250 m
Anzahl Simulationen ¹	200

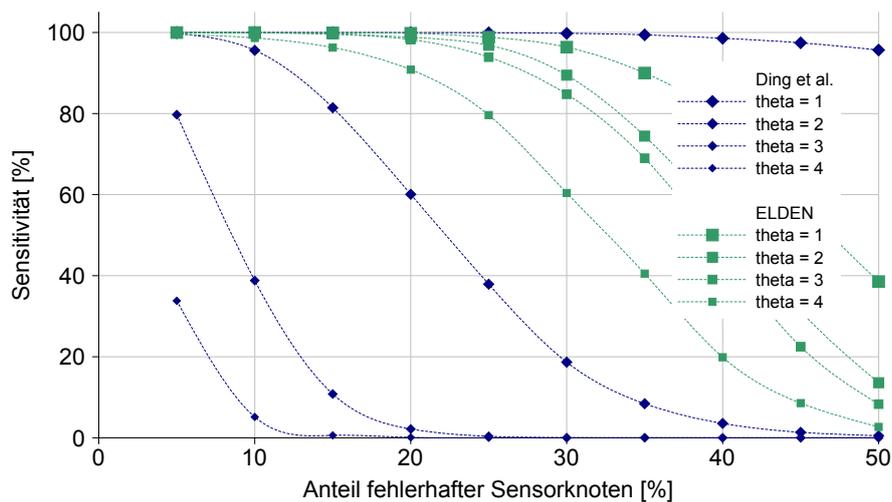
¹ je Parameterkombination

Tabelle 5.1: Verwendete Simulationsparameter

Zur Bewertung der einzelnen Detektionsverfahren dient zum einen die Sensitivität, welche den Anteil der tatsächlich richtig erkannten fehlerhaften Knoten an der Gesamtzahl der fehlerhaften Knoten darstellt. Diese wird auch als True Positive Rate bezeichnet. Zum anderen wird ebenso die Ausfallrate oder auch False Positive Rate zum Vergleich herangezogen, welche den Anteil der fehlerfreien Sensorknoten darstellt, welche fälschlicherweise als fehlerhaft detektiert werden. Während für die Sensitivität ein möglichst hoher Wert angestrebt wird, gilt es, für die Ausfallrate einen möglichst kleinen Wert zu erreichen.

In einem ersten Schritt der Untersuchungen galt es zunächst für beide vorgestellten Verfahren einen adäquaten Schwellenwert θ_{Ding} bzw. θ_{ELDEN} zu bestimmen. Hierfür wurde

ein realitätsnahes Szenario mit einer Gesamtzahl von 500 Knoten und einer Kommunikationsreichweite von 100 m verwendet. Die Fehlerdifferenz wurde mit 20 K angenommen. In Abbildung 5.4 ist zunächst die Sensitivität der Verfahren für unterschiedliche Schwellenwerte dargestellt. Es ist zu erkennen, dass das Verfahren von Ding et al. mit einem Schwellenwert von $\theta_{Ding} = 1$ im gesamten untersuchten Bereich einen sehr hohen Anteil der fehlerhaften Sensorknoten erkennt. Bei einem Schwellenwert von $\theta_{Ding} = 2$ jedoch sinkt die Sensitivität bereits bei einem Anteil von etwa 15 % fehlerhaften Knoten deutlich ab und ist umso schlechter, je höher der Schwellenwert gewählt wird. Das vorgestellte ELDEN-Verfahren erreicht mit einem Schwellenwert von $\theta_{ELDEN} = 1$ bis zu einem Anteil von 25 % fehlerhaften Knoten eine nahezu gleich hohe Sensitivität wie das Vergleichsverfahren und unterschreitet bei 40 % fehlerhaften Knoten eine Marke von 80 % Sensitivität. Auch bei diesem Verfahren sinkt die Sensitivität mit steigendem Schwellenwert. Es ist jedoch zu konstatieren, dass auch für die Schwellenwerte $\theta_{ELDEN} = 2$ und $\theta_{ELDEN} = 3$ eine hohe Sensitivität bei einer Fehlerrate bis 25 % erreicht wird.

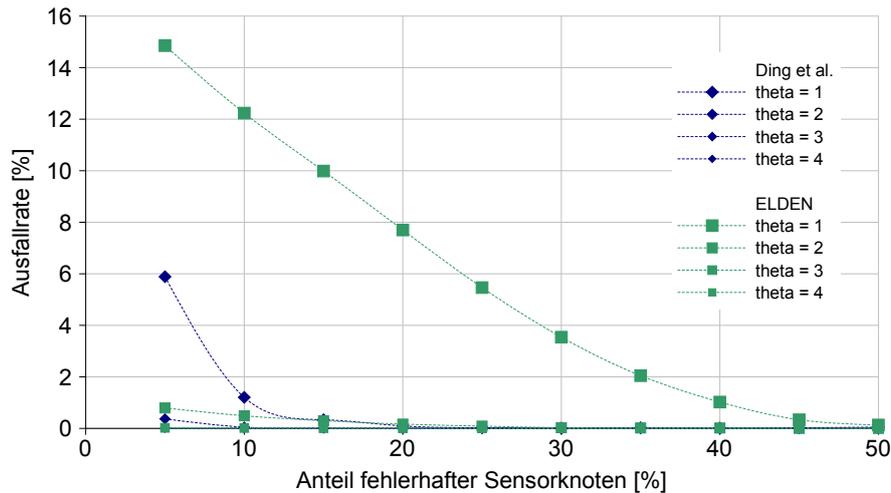


* Ausgebrachte Knoten: 500; Kommunikationsreichweite: 100 m; Fehlerdifferenz: 20 K

Abbildung 5.4: Gegenüberstellung der untersuchten Verfahren anhand der Sensitivität in Abhängigkeit vom Gesamtanteil fehlerbehafteter Sensorknoten und des gewählten Schwellenwertes.

Abbildung 5.5 betrachtet zum gleichen Szenario die Ausfallrate der dargestellten Fehlererkennungsverfahren. Hier zeigt sich, dass das Verfahren von Ding et al. bei einem gewählten Schwellenwert von $\theta_{Ding} = 1$ über einen weiten Bereich der untersuchten Fehlerrate eine verhältnismäßig hohe Ausfallrate aufweist. Dies ist vor allem dann der Fall, wenn lediglich ein geringer Teil der Sensorknoten fehlerhaft ist. Wird der Schwellenwert hingegen höher gewählt, tendiert die Fehlerrate gegen Null. Wesentlich geringer fällt die Ausfallrate bei dem

vorgestellten ELDEN-Verfahren aus. Dennoch ist auch hier eine leicht erhöhte Ausfallrate bei einem Schwellenwert von $\theta_{ELDEN} = 1$ sowie eine gegen Null tendierende Ausfallrate für höhere Schwellenwerte zu erkennen. Für die nachfolgenden Untersuchungen wurde der Schwellenwert $\theta_{ELDEN} = 2$ als sinnvolle Belegung verwendet, welcher einerseits eine sehr niedrige Ausfallrate und andererseits eine hohe Sensitivität bietet. Im Fall des Verfahrens von Ding et al. wurde ein Schwellenwert von $\theta_{Ding} = 1$ gewählt, da hier mit einem höheren Schwellenwert eine zu geringe Sensitivität erreicht werden würde.

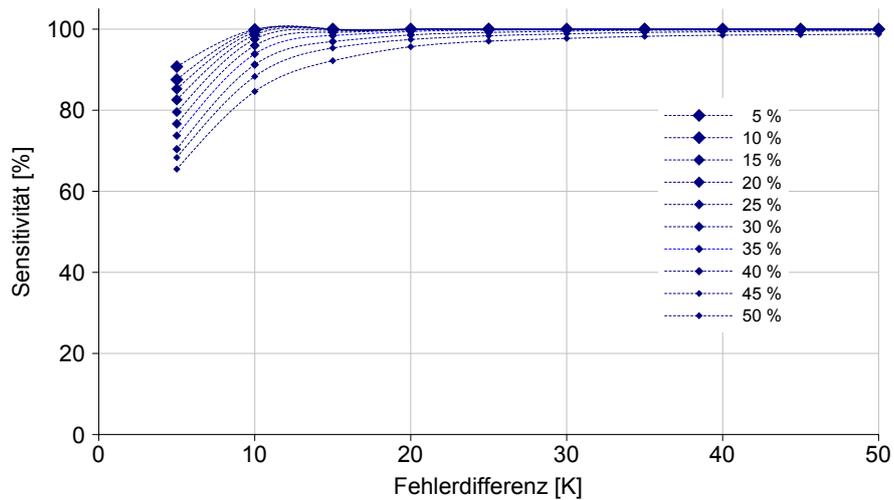


* Ausgebrachte Knoten: 500; Kommunikationsreichweite: 100 m; Fehlerdifferenz: 20 K

Abbildung 5.5: Gegenüberstellung der untersuchten Verfahren anhand der Ausfallrate in Abhängigkeit vom Gesamtanteil fehlerbehafteter Sensorknoten und des gewählten Schwellenwertes.

Im Weiteren wurde der Einfluss der Fehlerdifferenz auf die Sensitivität und Ausfallrate der vorgestellten Verfahren untersucht. Beispielhaft ist in den nachfolgenden Abbildung 5.6 bis 5.9 erneut eine Kommunikationsreichweite von 100 m bei einer Gesamtanzahl von 500 Knoten dargestellt. Die Fehlerdifferenz und die Anzahl fehlerhafter Knoten wurde gemäß den Darstellungen variiert. Abbildung 5.6 zeigt die Sensitivität des Vergleichsverfahrens von Ding et al.. Diese steigt einerseits mit der Fehlerdifferenz und fällt andererseits umso geringer aus, je mehr fehlerhafte Knoten sich im Netzwerk befinden.

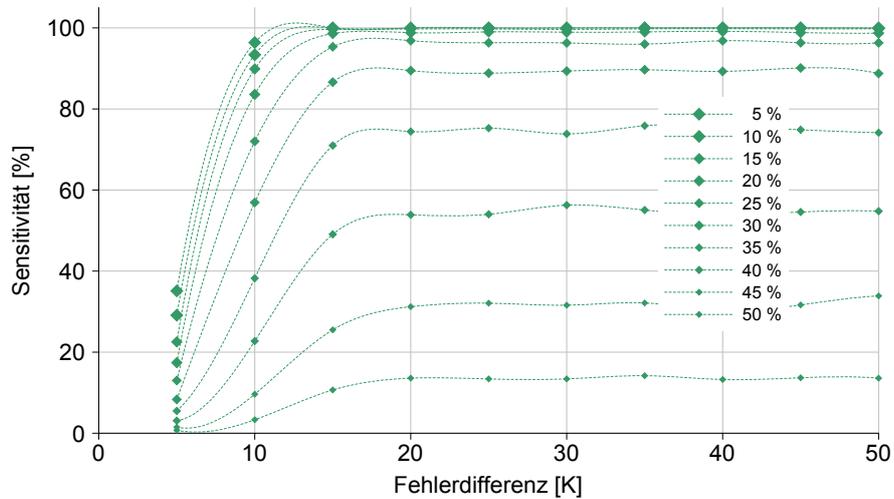
Auch das ELDEN-Verfahren zeigt dieses Verhalten, wie in Abbildung 5.7 dargestellt. Die Anzahl fehlerbehafteter Knoten hat hier jedoch einen ungleich höheren Einfluss, was sich in einer sehr geringen Sensitivität bei einer hohen Zahl fehlerhafter Sensorknoten zeigt. Ist diese jedoch geringer als 25 % und nimmt die Fehlerdifferenz einen Wert von mindestens 15 K an, so liefern beide Verfahren vergleichbare Ergebnisse. Das ELDEN-Verfahren ist



* Ausgebrachte Knoten: 500; Kommunikationsreichweite: 100 m

Abbildung 5.6: Sensitivität des Verfahrens von Ding et al. in Abhängigkeit von der Fehlerdifferenz, dargestellt für unterschiedlich hohe Anteile fehlerbehafteter Sensorknoten und einen gewählten Schwellenwert von $\theta_{Ding} = 1$.

somit in der Lage, signifikante Abweichungen bei einer moderaten Anzahl fehlerbehafteter Sensorknoten sicher zu erkennen.

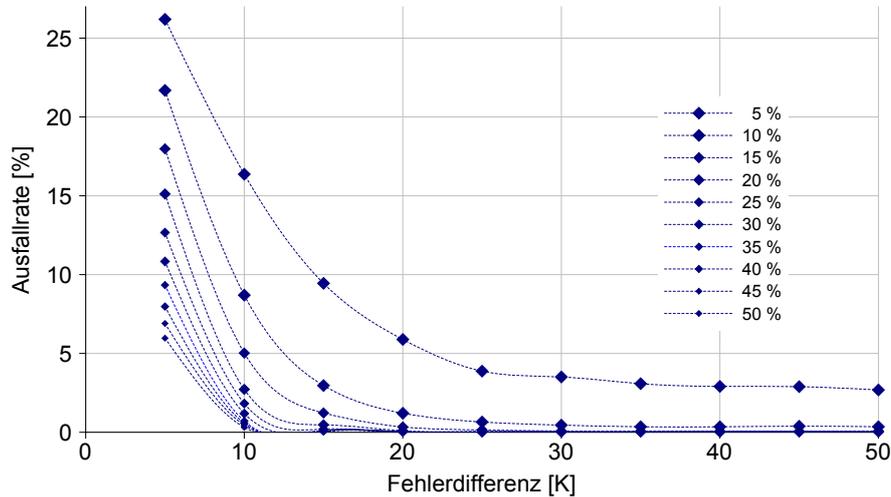


* Ausgebrachte Knoten: 500; Kommunikationsreichweite: 100 m

Abbildung 5.7: Sensitivität des ELDEN-Verfahrens in Abhängigkeit von der Fehlerdifferenz, dargestellt für unterschiedlich hohe Anteile fehlerbehafteter Sensorknoten und einen gewählten Schwellenwert von $\theta_{ELDEN} = 2$.

Die Stärken des in dieser Arbeit entwickelten Verfahrens zeigen sich bei der Betrachtung der Ausfallrate. Abbildung 5.8 zeigt zunächst die Ausfallrate des Vergleichsverfahrens. Diese ist

umso geringer, je mehr fehlerhafte Knoten im Netz existieren. Zudem sinkt die Ausfallrate mit steigender Fehlerdifferenz. Zu beachten ist an dieser Stelle jedoch, dass gerade bei einer geringen Zahl fehlerhafter Knoten auch bei einer signifikanten Fehlerdifferenz eine vergleichsweise hohe Ausfallrate im einstelligen Bereich zu verzeichnen ist.

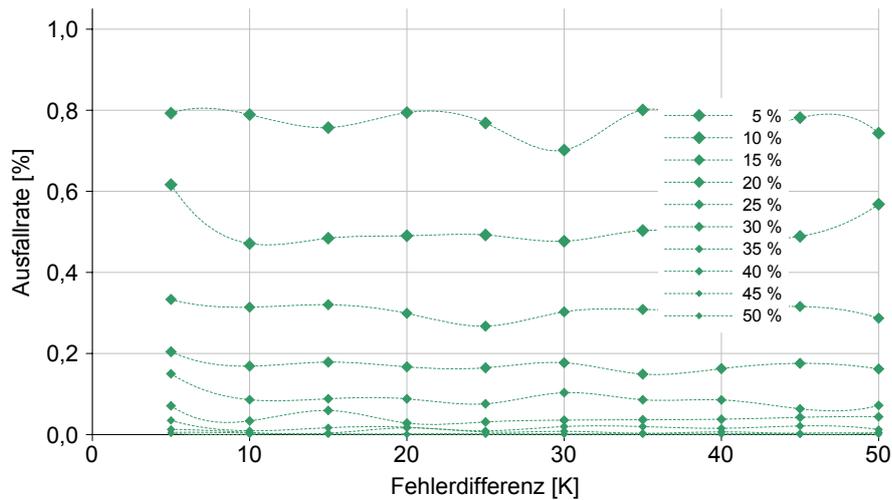


* Ausgebrachte Knoten: 500; Kommunikationsreichweite: 100 m

Abbildung 5.8: Ausfallrate des Verfahrens von Ding et al. in Abhängigkeit von der Fehlerdifferenz, dargestellt für unterschiedlich hohe Anteile fehlerbehafteter Sensorknoten und einen gewählten Schwellenwert von $\theta_{Ding} = 1$.

Im Unterschied dazu befindet sich die Ausfallrate des ELDEN-Verfahrens auch bei einer geringen Anzahl fehlerbehafteter Knoten deutlich unterhalb von 1 %. Auch hier sinkt die Ausfallrate mit zunehmender Zahl fehlerbehafteter Knoten. Im Unterschied zum Vergleichsverfahren erscheint die Ausfallrate des ELDEN-Verfahrens im Wesentlichen jedoch unabhängig von der gewählten Fehlerdifferenz.

Weiterer Einfluss auf die Sensitivität sowie die Ausfallrate der dargestellten Verfahren ist durch die Anzahl der zur Berechnung verwendeten Sensorknoten zu erwarten. Wie viele Sensorknoten sich in der Kommunikationsreichweite eines Sensorknotens befinden ist zum Einen von der Kommunikationsreichweite selbst und zum Anderen von der als Knotendichte bezeichneten Anzahl ausgebrachter Sensorknoten je Quadratmeter und damit von der Gesamtzahl der verwendeten Sensorknoten abhängig. Die daraus resultierende Zahl der in Reichweite befindlichen Sensorknoten wird nachfolgend als Nachbarschaft bezeichnet. Während in der Veröffentlichung des ELDEN-Verfahrens [BSST10] noch detaillierter auf den Einfluss der gewählten Kommunikationsreichweite eingegangen wird, soll an dieser Stelle nur kurz der Einfluss der sich daraus ergebenden Nachbarschaft betrachtet werden.



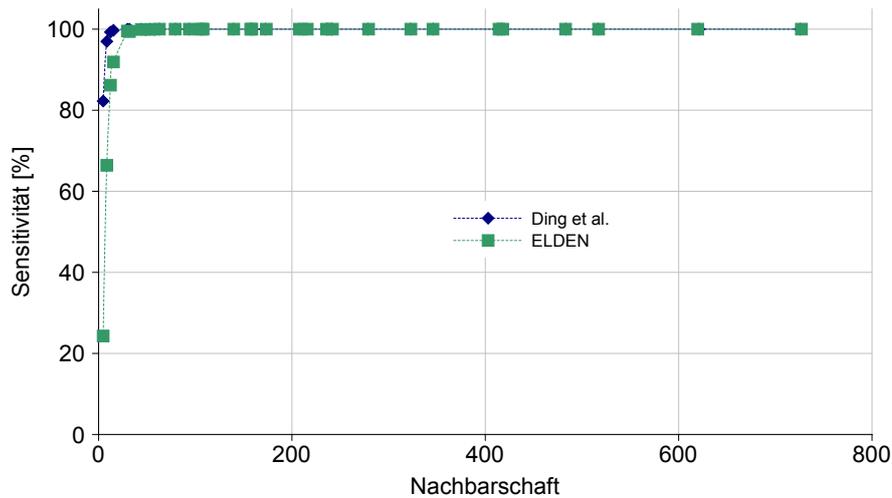
* Ausgebrachte Knoten: 500; Kommunikationsreichweite: 100 m

Abbildung 5.9: Ausfallrate des ELDEN-Verfahrens in Abhängigkeit von der Fehlerdifferenz, dargestellt für unterschiedlich hohe Anteile fehlerbehafteter Sensorknoten und einen gewählten Schwellenwert von $\theta_{ELDEN} = 2$.

In Abbildung 5.10 ist die Sensitivität der konkurrierenden Verfahren in Abhängigkeit von der Nachbarschaft dargestellt. Dem Vergleich ist ein Anteil von 10 % fehlerhaften Knoten und eine Fehlerdifferenz von 20 K zugrunde gelegt. Während das Verfahren der Autoren Ding et al. bereits ab einer Nachbarschaft von 12 Sensorknoten eine Sensitivität von mehr als 99 % aufweist, benötigt das neue ELDEN-Verfahren etwa 30 Sensorknoten um eine solche Sensitivität zu erreichen.

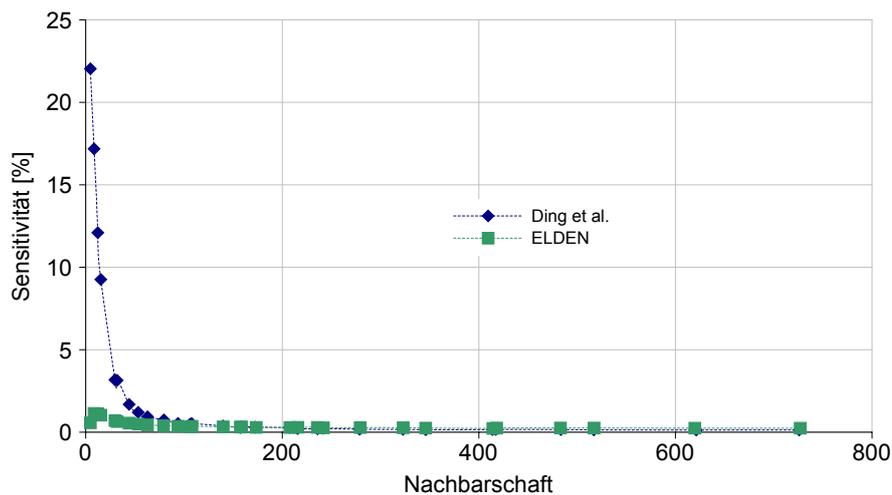
Anders sieht es hingegen bei der Ausfallrate aus. Die hohe Sensitivität des zum Vergleich herangezogenen Verfahrens geht zu Lasten einer sehr hohen Ausfallrate. So werden durch das Verfahren von Ding et al. bei einer sehr geringen Nachbarschaft mehr als 20 % der fehlerfreien Sensorknoten als fehlerbehaftet bewertet. Das in dieser Arbeit entwickelte ELDEN-Verfahren hingegen zeigt seine Stärke mit einer konstant geringen Ausfallrate um 1 %.

Die Entwicklung des vorgestellten ELDEN-Verfahrens entstand aus dem Anspruch, Sensorknoten zu erkennen, welche aufgrund äußerer Einflüsse oder bedingt durch Alterungsprozesse fehlerhafte Messwerte liefern. Dies soll es ermöglichen, diese anschließend zu deaktivieren oder ihnen andere Aufgaben zuzuweisen. Aufgrund dieser Annahme ist davon auszugehen, dass die Anzahl fehlerhafter Sensorknoten nicht sprunghaft steigt und somit bei wiederholter Anwendung des Verfahrens zu jedem Zeitpunkt eher gering ausfällt. Um die Funktion des Netzes nicht negativ zu beeinflussen, sollte das Detektionsverfahren eine



* Fehlerdifferenz: 20 K; Fehlerbehaftete Knoten: 10%
Schwellenwerte: $\theta_{Ding} = 1$, $\theta_{ELDEN} = 2$

Abbildung 5.10: Sensitivität der untersuchten Fehlerdetektionsverfahren in Abhängigkeit von der Nachbarschaft.



* Fehlerdifferenz: 20 K; Fehlerbehaftete Knoten: 10 %
Schwellenwerte: $\theta_{Ding} = 1$, $\theta_{ELDEN} = 2$

Abbildung 5.11: Ausfallrate der untersuchten Fehlerdetektionsverfahren in Abhängigkeit von der Nachbarschaft.

möglichst geringe Ausfallrate aufweisen. Beide Ansprüche werden an dieser Stelle durch das ELDEN-Verfahren bedient, welches zudem die ressourcenschonendere Alternative darstellt. Bei den in Abbildung 5.10 dargestellten Ergebnissen ist darüber hinaus zu bemerken, dass das Verfahren von Ding et al., bedingt durch die zweite Kommunikationsphase, bis zu vier mal mehr Sensorknoten zur Entscheidungsfindung verwendet.

5.3.2.4 Nachbetrachtung

Kommunikationsreichweite Zur Simulation der dargestellten Verfahren wurde die Kommunikationsreichweite der Sensorknoten durch eine kreisförmige Modellvorstellung abstrahiert. Diese entspricht zwar nicht der tatsächlich auftretenden Ausbreitung der zur Kommunikation verwendeten elektromagnetischen Wellen, der Abstraktionsgrad ist für die dargestellte Untersuchung jedoch ausreichend und es sind keine signifikanten Unterschiede bei Verwendung anderer Ausbreitungsmodelle zu erwarten. Der Grund für diese Annahme besteht darin, dass in diesem Fall keine Auswertung der Signalempfangsstärke stattfindet und darüber hinaus keines der dargestellten Verfahren durch die Verwendung des gewählten Ausbreitungsmodells bevorteilt wird.

Anwendbarkeit Die dargestellten Verfahren der Fehlerdetektion basieren auf der Annahme einer kontinuierlich verlaufenden Eingangsgröße. Ein solch kontinuierlicher Verlauf ist neben dem gewählten Beispiel der Raumtemperatur aber auch bei der Position eines Sensorknotens gegeben. Punktuell auftretende Phänomene bewerten die Verfahren hingegen als fehlerhafte Messungen. Aber auch bei einer gegebenen kontinuierlichen Eingangsgröße ist darauf zu achten, dass die Dichte der Sensorknoten eine kontinuierliche Erfassung ermöglicht. Sind diese Voraussetzungen erfüllt, so ist in Abhängigkeit von der Charakteristik des zu erfassenden Phänomens sowie der gegebenen Netzgeometrie ein passender Schwellenwert zu bestimmen.

5.3.3 Weiterentwicklungen und Ausblicke

Multi-Hop-Verfahren Das dargestellte Verfahren verwendet zur Fehlererkennung die Messwerte der in der einfachen Kommunikationsreichweite befindlichen Nachbarknoten, welche durch eine direkte Kommunikation je Sensorknoten ausgetauscht werden. Das Verfahren erzielt dadurch einen Performancegewinn im Vergleich zum dargestellten Konkurrenzverfahren, welches eine zweite Kommunikation voraussetzt. Gleichzeitig reduziert es die Zahl der nutzbaren Vergleichswerte auf etwa 25 % und reduziert damit die erreichbare Sensitivität. Um eine höhere Sensitivität zu erreichen, wäre es möglich, die Messwerte der in der doppelten Kommunikationsreichweite befindlichen Sensorknoten in einer zweiten Kommunikationsphase im Two-Hop-Verfahren zu übertragen. Das so entstehende Verfahren würde sich trotz dieses Zugeständnisses durch einen geringen Rechenaufwand und eine besonders geringe Ausfallrate auszeichnen.

Clusterbasierte Fehlererkennung Das dargestellte Verfahren zur Erkennung fehlerhafter Sensorknoten bietet in der gezeigten Form die Möglichkeit fehlerhafte Sensorknoten aufgrund lokaler Vergleiche zu erkennen. In einem realen Einsatz ist eine wiederholte Detektion auf fehlerbehaftete Knoten in regelmäßigen Abständen denkbar, um Fehler aufgrund von Alterungsprozessen und unvorhergesehenen Ereignissen zu erkennen. Um die Ressourcen der Sensorknoten zu schonen und nicht bei jeder Anwendung des Verfahrens alle verfügbaren Sensorknoten einzubeziehen, ist eine stufenweise Anwendung auf Basis von Clustern denkbar. Hierbei können unterschiedliche Szenarien betrachtet werden.

Dient die Clusterstruktur dazu, eine Aggregation innerhalb eines Clusters durchzuführen, so erscheint es sinnvoll, im Zuge der Aggregation das Verfahren zur Erkennung fehlerhafter Knoten zunächst nur innerhalb des Clusters anzuwenden. Ergibt sich aufgrund dieser Untersuchung der Verdacht eines fehlerhaften Sensorknotens, so kann die Prüfung mit einem geänderten Schwellenwert unter Einbeziehung aller in Kommunikationsreichweite befindlichen Sensorknoten wiederholt werden.

Wird die Clusterstruktur dazu verwendet, um einen Großteil der Sensorknoten innerhalb eines Clusters zu deaktivieren und nur die zur Netzabdeckung notwendigen Cluster aktiv zu halten, so kann eine sinnvolle Anwendung des ELDEN-Verfahrens darin bestehen, zunächst die aufgrund des Clusteringprozesses aktiven Sensorknoten in die Fehlererkennung einzubeziehen. Hierfür kann ein erster Schwellenwert verwendet werden. Wird aufgrund dieser Auswertung ein fehlerhafter Knoten vermutet, so kann das Verfahren in einem weiteren Schritt, verknüpft mit einem weiteren Schwellenwert, innerhalb des betroffenen Clusters angewendet werden. Kann auch auf dieser Ebene ein Zweifel nicht ausgeräumt werden, so könnten die Sensorknoten aller umliegenden Cluster, bzw. jene Sensorknoten, welche sich in Kommunikationsreichweite des betroffenen Knotens befinden, in einer dritten Anwendung des Verfahrens einbezogen werden. Auch hier besteht wieder die Möglichkeit, einen angepassten Schwellenwert zu verwenden. Die Anwendung der dritten Stufe würde in diesem Fall der in ELDEN beschriebenen Anwendung entsprechen, wohingegen die vorhergehenden Stufen dazu dienen, bei nicht auftretenden Fehlern den Aufwand gering zu halten.

Bei Verwendung der auf Clustern basierten Strategien ist darauf zu achten, dass eine Anwendung aller definierten Stufen die Ausnahme darstellen sollte. Ist dies nicht der Fall, so besteht die Gefahr, dass sich die anvisierte Aufwandsersparnis ins Gegenteil umkehrt und der Aufwand der vorgeschalteten Prüfungsstufen jene Ersparnis überschreitet, welche dadurch erreicht werden soll, dass die nachgestellte vollständige Prüfung vermieden wird. Um dies zu erreichen, aber auch aufgrund der geringeren Anzahl jeweils verfügbarer

Vergleichsdaten ist eine Verwendung unterschiedlicher Schwellenwerte sinnvoll. Dies ist vor allem bei der Analyse innerhalb eines Clusters notwendig, da hier verstärkt mit Randeffekten zu rechnen ist und eine essentielle Grundannahme des Verfahrens verletzt wird. Diese besagt, dass ein untersuchter Sensorknoten zu allen Seiten von benachbarten Sensorknoten umgeben ist. Dadurch ist auch bei einem Messwertgefälle gewährleistet, dass sich der betrachtete Sensorknoten mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht am Rand eines solchen Gefälles befindet, oder der gemessene Wert zumindest dem Trend der umliegenden Messwerte folgt.

Anwendungsmöglichkeiten In der dargestellten Form wurde das Verfahren zunächst auf die Erkennung fehlerhafter Sensorknoten ausgelegt, welche aufgrund fehlerhafter Sensorik von der Realität stark abweichende Messwerte bezüglich eines physikalisch auftretenden Phänomens erfassen. Das Verfahren selbst dient jedoch nur der Analyse der auftretenden Messwerte und ist daher nicht an einen physikalisch vorhandenen Sensor gekoppelt. Um die aus einem Lokalisierungsverfahren resultierende Schätzposition eines Sensorknoten zu bewerten, kann diese bzw. jeweils eine Komponente der Position als Messwert betrachtet werden. Auf diese Weise kann das Verfahren dazu genutzt werden, um eine fehlerhafte Positionsbestimmung zu erkennen. Ebenso kann als Eingangsgröße die Anzahl der in Reichweite befindlichen Sensorknoten verwendet werden. Wird hierbei ein Sensorknoten als fehlerhaft detektiert bzw. der betrachtete Meßwert als Ausreißer erkannt, so ist davon auszugehen, dass die Funkeinheit dieses Sensorknotens beschädigt oder der Knoten selbst ungünstig positioniert ist. Auch eine Einbeziehung der Signalempfangsstärke ist in diesem Zusammenhang denkbar.

Potential zur Energieoptimierung Jede einzelne Erfassung eines Umgebungsparameters mit Hilfe eines drahtlosen Sensorknotens ist aus energetischer Betrachtung mit einer Reihe von Kosten verbunden. Zu diesen zählen neben der aufgebrauchten Energie für Erfassung und Verarbeitung des Messwertes vor allem die notwendigen Kosten, um den erhobenen Messwert von der Datenquelle bis zur Senke zu transportieren, welche die Verbindung zwischen Sensornetzwerk und Nutzer darstellt. Dabei bleibt der Energieverbrauch in der Regel nicht auf den betrachteten Sensorknoten beschränkt, da weitere Sensorknoten an der Übermittlung beteiligt sind und die ermittelten Daten empfangen und weiterleiten müssen. Darüber hinaus kann die Weiterleitung einer Nachricht auch den Energieverbrauch von Sensorknoten beeinflussen, welche nicht an der Übertragung beteiligt sind, jedoch zusätzliche Zeit im Empfang verbringen müssen, um anschließend eigene Nachrichten zu versenden. Es

ist daher besonders sinnvoll, die Übertragung fehlerhafter Sensorwerte unter Verwendung des dargestellten Fehlererkennungsverfahrens zu vermeiden, um den Energievorrat der übrigen Sensorknoten im Netzwerk nicht unnötig zu strapazieren. Eine eingehende Untersuchung dieses in [BSL⁺09] beschriebenen Ansatzes ließ sich im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht realisieren. Dennoch weist die Erkennung fehlerhafter Sensorknoten, wie in [SBT11b] beschrieben, ein großes Potential besonders in durch Clusterverfahren strukturierten Sensorsorknetzwerken auf. Durch die dort häufig angewendete Rollenverteilung gibt es einerseits Sensorknoten, welche hauptsächlich für die Datengewinnung zuständig sind, während andere Sensorknoten mit der Verarbeitung und Weiterleitung der Daten betraut sind. Durch die Erkennung fehlerhafter Sensorknoten hinsichtlich Kommunikation und Sensorik wird eine optimale Verteilung der existierenden Rollen ermöglicht, wodurch eine bestmögliche Nutzung des Netzwerks erreicht werden kann.

5.4 Zusammenfassung

Mit dem vorgestellten ELDEN-Verfahren konnte ein Verfahren zur Detektion fehlerbehafteter Sensorknoten gefunden werden, welches sich einerseits durch geringe Ressourcenanforderungen und andererseits durch eine hohe Sensitivität und eine geringe Ausfallrate auszeichnet. Besonders dann, wenn nur wenige der eingesetzten Sensorknoten fehlerhaft sind, ermöglicht ELDEN eine zuverlässige Detektion, ohne dabei eine nennenswerte Zahl fehlerfreier Sensorknoten als fehlerbehaftet zu detektieren. So arbeitet dieses Verfahren auch dann nahezu fehlerfrei, wenn bis zu 25 % der eingesetzten Sensorknoten fehlerbehaftet sind.

Das Verfahren, welches ursprünglich zur Detektion von Fehlern in der Sensorik der Sensorknoten konzipiert wurde, lässt sich darüber hinaus vielseitig einsetzen. So lassen sich beispielsweise Unstimmigkeiten in der Kommunikation, welche zum Beispiel durch eine Beschädigung der Antenne oder eine ungünstige Lage bedingt sein können, erkennen, indem die Anzahl empfangbarer Nachbarknoten oder die durch eine Aggregatfunktion zusammengefasste Signalempfangsstärke als Eingangswert des Verfahrens genutzt wird. Durch Verwendung der einzelnen Komponenten einer Positionsschätzung oder einer auf der Positionsschätzung basierenden Aggregatfunktion wie dem mittleren Abstand läßt sich wiederum eine ermittelte Schätzposition als fehlerhaft oder fehlerarm beurteilen.

Das vorgestellte Verfahren zeichnet sich dabei durch die Verwendung kontinuierlicher Eingangswerte und die dezentrale Berechnung aus. Im Vergleich mit dem durch Ding et al. publizierten Konkurrenzverfahren benötigt es weniger Kommunikation und zeichnet

sich durch eine weniger aufwendige Berechnung aus. Obwohl das Konkurrenzverfahren mit Hilfe der verwendeten zweiten Kommunikationsphase Informationen aus einem doppelt so großen Umkreis in seine Entscheidung einfließen lässt, sind die erzielten Ergebnisse des ELDEN-Verfahrens im fokussierten Anwendungsbereich als gleichwertig oder gar besser zu beurteilen.

Kapitel 6

Zusammenfassung

6.1 Ergebnisse

In der vorliegenden Arbeit wurden drei zentrale Herausforderungen in drahtlosen Sensornetzwerken thematisiert: Die Positionsbestimmung von Sensorknoten innerhalb eines Netzwerks, die Unterteilung eines Sensornetzwerks mit Hilfe sogenannter Cluster, und die Erkennung von Fehlern in den durch Sensorknoten erhobenen Werten. Bei der Betrachtung dieser Themen wurden zum einen die bestehenden Beziehungen zwischen diesen Themenkomplexen analysiert. So stellt die Lokalisierung ein zentrales Thema dar, da sie einerseits als Voraussetzung für ein positionsbasiertes, geografisches Clustering dient, und die Ergebnisse der Positionsschätzung andererseits durch ein geeignetes Fehlererkennungsverfahren bewertet werden können. Zum anderen konnte im Fall des präsentierten BBC-Verfahrens gezeigt werden, wie Techniken der Positionsbestimmung dazu verwendet werden können, um eine Clusterisierung des Netzwerks zu erreichen, ohne dabei eine vollständige Positionsschätzung durchzuführen. In den nachfolgenden Abschnitten werden die in den einzelnen Themenkomplexen erreichten Ergebnisse zusammenfassend dargestellt.

6.1.1 Verfahren der Lokalisierung

Die Lokalisierung bezeichnet die Positionsbestimmung einzelner Sensorknoten und stellt eine Grundvoraussetzung für positionsbasierte Verfahren im Bereich des Routings oder des Clusterings dar. Im Rahmen dieser Arbeit wurden sowohl Verfahren der exakten Lokalisierung als auch Verfahren der approximativen Lokalisierung entwickelt.

Das in Kapitel 3.3.2 präsentierte AWCL-Verfahren stellt eine Weiterentwicklung des approximativen WCL-Verfahrens dar, bei dem eine Positionsschätzung durch eine gewichtete Mittelwertbildung der Positionen von Referenzknoten erreicht wird, welche sich innerhalb

der Kommunikationsreichweite des zu lokalisierenden Blindknotens befinden. Durch die Manipulation der zur Wichtung verwendeten Eingangswerte, welche mit dem Abstand zwischen Blindknoten und Referenzknoten korrelieren, wird eine situationsabhängige Veränderung der Schätzposition gegenüber der Schätzung des WCL-Verfahrens erreicht. Ist die Entfernung zu mindestens einem Referenzknoten sehr hoch, so ist der anfängliche Wichtungswert für diesen Referenzknoten sehr gering. Die Manipulation der Gewichte durch das AWCL-Verfahren ist in diesem Fall minimal, wodurch das Ergebnis der Positionsschätzung dem WCL-Verfahren entspricht. Sind die anfänglichen Wichtungswerte hingegen hoch – dies ist der Fall, wenn die in Reichweite befindlichen Referenzknoten eine relativ geringe Distanz zum Blindknoten aufweisen – so sorgt die Manipulation der Gewichtung mittels AWCL für eine Verfeinerung, indem die Differenzen zwischen den Gewichten stärker zum Tragen kommen. Mit Hilfe von Simulationen konnte gezeigt werden, dass das Verfahren auf diese Weise vielfach eine genauere Positionsschätzung ermöglicht, als das zugrunde liegende WCL-Verfahren. Vergleicht man die beiden Verfahren unter Verwendung der jeweils idealen Kommunikationsreichweite, so ergibt sich für das AWCL-Verfahren ein im Mittel um 27 % geringerer Fehler in der Positionsschätzung. Darüber hinaus ist das Verfahren aufgrund des adaptiven Charakters weniger stark vom optimalen Verhältnis aus Kommunikationsreichweite und Distanz der Referenzknoten zueinander abhängig. Da die optimale Kommunikationsreichweite des AWCL-Verfahrens die angenommene Distanz zwischen zwei benachbarten Referenzknoten überschreitet und so eine Kommunikation der Referenzknoten untereinander zulässt, ist es für den realen Einsatz weit besser geeignet, als das WCL-Verfahren. Dies konnte über die dargestellten Simulationen hinaus auch durch den Einsatz des Verfahrens in realen Netzwerken belegt werden [FB09].

Ein weiteres approximatives Verfahren zur Positionsschätzung wurde in Kapitel 3.3.3 vorgestellt. Das präsentierte SBCL-Verfahren stellt einen Ansatz zur Verbesserung der Positionsschätzung auf Basis des CL-Verfahrens dar. Das CL-Verfahren zeichnet sich einerseits durch eine einfache Berechnung, der ungewichteten Mittelwertbildung, aus und benötigt andererseits als Distanzinformation nur die Kenntnis darüber, dass sich ein Referenzknoten in Kommunikationsreichweite zum Blindknoten befindet. Das SBCL-Verfahren behält diese grundlegenden Eigenschaften bei und ergänzt das Verfahren um die Nutzung des gegebenenfalls implizit vorhandenen Wissens über die vorgegebene Geometrie des Netzwerks. Bei beiden Verfahren, dem CL-Verfahren und dem SBCL-Verfahren, findet eine Unterteilung des Netzwerks anhand der Überlappung der Kommunikationsreichweiten der Referenzknoten statt. Das CL-Verfahren verwendet als Schätzung zwar eine Schwerpunktberechnung, jedoch handelt es sich dabei nicht um den Schwerpunkt des jeweiligen

Überlappungsgebietes, in dem sich ein Blindknoten befindet, sondern um den Schwerpunkt des durch die in Reichweite befindlichen Referenzknoten gebildeten konvexen Polygons bzw. der Strecke oder des Punktes. Um die Genauigkeit der Positionsschätzung zu erhöhen, zielt das vorgestellte SBCL-Verfahren darauf ab, die tatsächlichen Schwerpunkte als Positionsschätzung zu nutzen. Um dies zu erreichen, werden verschiedene Methoden zur Annäherung des Schwerpunktes vorgestellt. Je nach verwendetem Verhältnis aus Kommunikationsreichweite und dem Abstand zweier benachbarter Referenzknoten lässt sich durch die Anwendung des SBCL-Verfahrens ein um bis zu 39 % geringerer mittlerer Fehler der Positionsschätzung erzielen, als durch die Verwendung des CL-Verfahrens. Handelt es sich um einen Netzaufbau aus nur vier im Quadrat angeordneten Referenzknoten, so ergibt sich durch den SBCL-Ansatz ein im Vergleich zum CL-Verfahren um 20 % geringeres Minimum des mittleren Fehlers der Positionsschätzung. Wird das Verfahren hingegen ohne die Korrektur der sich aus dieser Einschränkung ergebenden Randgebiete betrachtet, so bleibt das bisherige Minimum bestehen, die erreichte Genauigkeit wird jedoch wesentlich unabhängiger von der exakten Einhaltung der idealen Kommunikationsreichweite.

Im Bereich der exakten Verfahren zur Positionsschätzung wurden in dieser Arbeit im wesentlichen drei unterschiedliche Algorithmen präsentiert, welche jeweils Weiterentwicklungen des bekannten DLS-Verfahrens darstellen. Beim DLS-Ansatz selbst handelt es sich um einen Algorithmus zur Positionsbestimmung mittels Multilateration, bei dem die Berechnung in zwei Einzelrechnungen unterteilt ist. Ein von den Blindknoten unabhängiges Zwischenergebnis wird zentral auf der Senke ermittelt und an die Blindknoten verteilt, welche dieses Zwischenergebnis für den zweiten Berechnungsteil weiterverwenden. Ein wesentlicher Nachteil des Verfahrens ergibt sich daraus, dass dieses Zwischenergebnis, welches als Vorberechnung bezeichnet wird, für alle Blindknoten im Netzwerk gültig ist und daher Informationen über alle Referenzknoten enthält. Der Umfang dieses Zwischenergebnisses ergibt sich daher aus der Anzahl der Referenzknoten. Sowohl die Kommunikation als auch die Komplexität der Nachberechnung steigt daher mit der Größe des betrachteten Sensornetzwerks. Darüber hinaus muss ein Blindknoten zu jedem Referenzknoten, zu dem Informationen in der Vorberechnung enthalten sind, eine Distanzschätzung einbringen, um die Nachberechnung und damit die Positionsschätzung abschließen zu können. Dies ist ab einer gewissen Größe nur noch mit enormem Aufwand möglich. Durch das sDLS-Verfahren bleibt der Grundansatz der zweigeteilten Berechnung erhalten. Die genannten Nachteile des DLS-Verfahrens werden jedoch dadurch bekämpft, dass individuelle, auf jeden Referenzknoten angepasste, Vorberechnungen ermittelt und an die Referenzknoten kommuniziert werden. Die Größe dieser individuellen Vorberechnungen ist unabhängig von der Netzwerk-

größe. Zur Positionsbestimmung ist jeder Blindknoten angehalten, die Vorberechnung des Referenzknotens zu nutzen, welcher die geringste Distanz zum Blindknoten aufweist. Es ergeben sich so räumliche Cluster, in denen jeweils gleiche Vorberechnungen verwendet werden. Durch die Anwendung des sDLS-Ansatzes kann die Nachberechnung durch den Blindknoten mit ihm zur Verfügung stehenden lokalen Distanzinformationen vorgenommen werden. Der grundlegende Ansatz des sDLS konnte durch fortlaufende Weiterentwicklung zum aktuellen sDLS^{ne}-Verfahren optimiert werden. Dieses zeichnet sich durch einen im Vergleich zum DLS-Verfahren äußerst geringen Rechenaufwand aus. Auch der erreichte mittlere Fehler der Positionsschätzung konnte durch Verwendung des sDLS^{ne}-Verfahrens auf einen Bruchteil des theoretisch mittels DLS erzielten Fehlers gesenkt werden. Hierbei ist anzumerken, dass eine Positionsschätzung mittels DLS in sehr großen Netzwerken praktisch nahezu unmöglich ist. Schlussendlich wurde auch die im Durchschnitt durch einen Knoten zu kommunizierende Datenmenge reduziert. Durch die Senke selbst wird jedoch eine höhere Datenmenge in das Netz injiziert. Da die versandten Daten individuell auf den Adressaten zugeschnitten sind, nimmt die Menge der zu kommunizierenden Daten mit steigender Entfernung zur Senke ab.

Parallel zur Entwicklung der sDLS-Algorithmen wurde im gleichen Forschungsprojekt das RAL-Verfahren entwickelt. Bei diesem Verfahren handelt es sich ebenfalls um eine Weiterentwicklung des DLS-Ansatzes, wobei durch ein geändertes Berechnungsverfahren eine Reduzierung des Fehlers der Positionsschätzung erreicht werden konnte. Dieser Ansatz dient als Grundlage für das in Kapitel 3.4.4 vorgestellte sRAL-Verfahren. Dieses stellt eine Kombination des in RAL verwendeten Berechnungsansatzes mit dem aus den sDLS-Verfahren bekannten algorithmischen Ansatz der individuellen Vorberechnungen dar. Im Rahmen der Evaluation dieses Verfahrens konnte gezeigt werden, dass der Berechnungsaufwand des RAL-Verfahrens in etwa dem des DLS-Verfahrens entspricht. Das sRAL-Verfahren realisiert analog dazu eine ähnliche Reduzierung des Berechnungsaufwandes gegenüber dem RAL-Verfahren, wie das sDLS-Verfahren gegenüber dem DLS-Verfahren. Im Vergleich des sRAL-Verfahrens mit dem sDLS-Verfahren besteht in etwa Gleichheit in Bezug auf den Berechnungsaufwand. Betrachtet man die notwendige Kommunikation der Verfahren, so wird diese durch Verwendung des sRAL Verfahrens, im Vergleich zum RAL-Verfahren, ebenfalls reduziert, fällt jedoch etwas höher aus, als beim sDLS-Verfahren. Der mittlere Fehler der Positionsschätzung fällt bereits beim RAL-Ansatz wesentlich geringer aus, als beim DLS-Verfahren. Dies ist auf den besonderen Einfluss eines einzelnen zur Linearumformung genutzten Referenzknotens zurückzuführen, welcher beim DLS-Verfahren vorliegt und durch den RAL-Ansatz eliminiert wurde. Durch Verwendung des sRAL-Verfahrens

konnte der Fehler der Positionsschätzung nochmals um etwa 30 % reduziert werden. Er ist damit jedoch um etwa 25 % höher als beim sDLS-Verfahren, da sich hier der Einfluss des zur Linearumformung genutzten Referenzknotens, anders als beim DLS-Verfahren, positiv auf das Ergebnis der Positionsschätzung auswirkt. Der Grund für dieses Phänomen liegt in der besonderen und individuellen Auswahl dieses Referenzknotens, wie in Kapitel 3.4.4 näher erläutert.

Das fünfte, in Kapitel 3.4.3 vorgestellte, Verfahren zur Positionsschätzung ist das HDLS-Verfahren, welches eine Kombination aus exaktem und approximativem Verfahren darstellt. Der sDLS-Ansatz bietet die Möglichkeit seitens des Blindknotens aus verschiedenen Vorberechnungen, der in Kommunikationsreichweite befindlichen Referenzknoten, zu wählen. Das vorgestellte sDLS-Verfahren sieht zwar eine sinnvolle Vorschrift zur Auswahl der zu verwendenden Vorberechnung vor, diese muss aber nicht in jedem Fall die beste Wahl darstellen. Der Ansatz des HDLS-Verfahrens besteht darin, nicht nur einmal, sondern mehrfach zu wählen und auf der Basis verschiedener Vorberechnungen je eine Positionsschätzung durchzuführen. Die sich dadurch ergebenden Schätzpositionen werden anschließend durch ein approximatives Positionsschätzungsverfahren zu einer gemeinsamen Positionsschätzung kombiniert. Im Rahmen der präsentierten Untersuchungen wurden sowohl die Anzahl und Auswahl der zu verwendenden exakten Einzelschätzungen als auch das zur Kombination der Einzelschätzungen verwendete approximative Verfahren variiert. Darüber hinaus wurden zwei unterschiedliche Strategien der Distanzschätzung untersucht, bei der diese entweder im Rahmen jeder Einzelschätzung separat betrachtet werden oder durch Kombination die jeweils vielversprechendste Distanzschätzung für alle Einzelschätzungen gewählt wird, in denen diese benötigt wird. Durch Verwendung des HDLS-Ansatzes konnte der mittlere Fehler der Distanzschätzung bereits durch die Kombination von nur zwei Einzelschätzungen beträchtlich reduziert werden. Durch die Verwendung weiterer Einzelschätzungen lässt sich der Fehler weiter reduzieren. Zur Kombination der Einzelschätzungen hat sich in vielen Fällen das AWCL-Verfahren als besonders vorteilhaft erwiesen. Für die Realisierung der Distanzschätzung sollten die gewählten Vorberechnungen in Kombination betrachtet werden. Auf diese Weise kann durch die Kombination von nur zwei Einzelschätzungen bereits eine Reduzierung des mittleren Fehlers der Positionsschätzung um ca. 22 % erreicht werden. Wird hingegen die maximal mögliche Zahl an Einzelschätzungen miteinander kombiniert, so wird eine Reduzierung von etwa 27 % erreicht. Der notwendige Rechenaufwand wird hingegen durch jede weitere Einzelschätzung um etwa 80 % des Aufwandes gesteigert, welche für die Berechnung mit nur einer Einzelschätzung notwendig ist. Obwohl das Verfahren Techniken der approximativen Positionsschätzung verwendet, wurde es

im Rahmen dieser Arbeit in den Bereich der exakten Verfahren eingeordnet, da durch die Kombination der Einzelschätzungen ein exaktes Ergebnis generiert wird, sofern die verwendeten Einzelschätzungen ebenfalls exakt erfolgt sind.

Exakte Verfahren werden nur dann ihrem Namen gerecht und liefern exakte Ergebnisse, wenn die verwendeten Eingangswerte, also die Distanzen zwischen Blind- und Referenzknoten, exakt ermittelt werden konnten. Ist dies nicht der Fall, so führt die Positionsschätzung zu einer falschen Position. Das Ausmaß der Abweichung der ermittelten Position von der tatsächlichen Position hängt von einer Vielzahl von Faktoren ab. Neben dem Fehler der Distanzschätzung spielen auch die Geometrie, das verwendete Berechnungsverfahren und die konkrete Konstellation der Distanzfehler zu den beteiligten Referenzknoten eine Rolle. Wie am Beispiel von sDLS gesehen, kann es so in Einzelfällen zu extremen Fehlern in der Positionsschätzung kommen. Approximative Verfahren hingegen, erzielen auch mit fehlerfreien Eingangswerten nur eine grobe Schätzung der tatsächlichen Position. Nur in Ausnahmefällen, bei günstiger Geometrie, stimmt diese Schätzung mit der tatsächlichen Position überein. Ein Vorteil der approximativen Verfahren besteht jedoch darin, dass der mögliche Fehler der Positionsschätzung durch die in Kommunikationsreichweite befindlichen Referenzknoten begrenzt ist. So ergibt sich die Menge der möglichen Schätzpositionen bei den vorgestellten CL-basierten Verfahren aus der konvexen Hülle der Positionen der zur Schätzung verwendeten Referenzknoten. Die geschätzte Position liegt also innerhalb des größtmöglichen konvexen Polygons, welches aus den Positionen der in Kommunikationsreichweite befindlichen Referenzknoten gebildet werden kann. Dies hat zur Folge, dass bei fehlerhaften Eingangswerten mit Hilfe approximativer Verfahren zum Teil genauere Positionsschätzungen möglich sind als durch die Verwendung exakter Verfahren. Da es jedoch immer von der konkreten Situation abhängig ist, durch welche Art von Verfahren ein besseres Ergebnis erzielt wird, ist eine Kombination aus exaktem und approximativem Verfahren wie im Beispiel des vorgestellten HDLS-Verfahrens sinnvoll.

6.1.2 Verfahren des Clusterings

Die Unterteilung eines Sensornetzwerks in sogenannte Cluster stellt eine Aufgabe dar, welche häufig anhand der Positionsdaten von Sensorknoten erfolgt. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden zwei Verfahren der Clusterbildung vorgestellt, wobei eines das Vorhandensein von Positionsdaten wie beschrieben voraussetzt, das andere hingegen die Unterteilung der Sensorknoten durch Techniken der Positionsschätzung realisiert, ohne tatsächlich eine Position zu berechnen.

Das in Kapitel 4.3.2 vorgestellte 2-MASCLE-Verfahren stellt eine Weiterentwicklung des XGAF-Verfahrens sowie den grundlegenden Ansatz für eine Reihe von MASCLE-Verfahren dar. Beide Verfahren unterteilen das Netzwerk in quadratische Cluster. Während beim XGAF-Verfahren die Größe der Cluster so gewählt ist, dass je Cluster nur ein Sensorknoten aktiv sein muss, um eine vollständige Abdeckung des Netzwerks in Bezug auf Kommunikation und Sensorik zu erhalten, muss bei Verwendung des 2-MASCLE-Verfahrens, aufgrund kleinerer Cluster, nur jeder zweite Cluster durch einen aktiven Knoten besetzt sein. Aktive und inaktive Cluster ordnen sich bei diesem Verfahren in einem Schachbrett-Muster an, wobei die inaktiven Cluster zu jeweils einem Viertel von je einem ihrer aktiven Nachbarcluster abgedeckt werden. Diese Eigenschaft ermöglicht einerseits einen zweiphasigen Betrieb des Netzwerks, bei dem in jeder Phase jeweils eine Hälfte der Cluster aktiv ist. Andererseits kann die Funktionalität ausgefallener Cluster aufgrund dieser Eigenschaft durch angrenzende Nachbarcluster übernommen werden. Dieses Vorgehen wird als Heilung bezeichnet. Mit den durchgeführten Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass vor allem durch die Verwendung der Heilungseigenschaft eine wesentlich effizientere Nutzung der Sensorknoten erreicht wird, da mittels 2-MASCLE eine gleich große Fläche mit weniger Sensorknoten abgedeckt werden kann, als durch Verwendung des XGAF-Verfahrens. Dies resultiert in einer höheren Abdeckung und einer verlängerten Lebenszeit des Sensornetzwerks.

Das ortsbasierte Clustering von Sensornetzwerken stellt ein recht anschauliches Beispiel dar, in dem zwar einerseits möglichst genaue Ortsinformationen seitens der Sensorknoten vorausgesetzt werden, damit diese sich dem jeweils richtigen Cluster zuordnen können. Andererseits wird diese Ortinformation durch die Zuordnung zu einem Cluster dazu verwendet, um den Sensorknoten eine sehr viel grobere Ortsinformation in Form einer Cluster-ID zuzuweisen. In Bezug auf das Clustering ist eine exakte Positionsbestimmung daher nicht notwendig, sofern eine approximative Lokalisierung eine korrekte Zuordnung zu den Clustern ermöglicht. Das in Kapitel 4.4.2 vorgestellte BBC-Verfahren beschreitet diesen Weg, in dem es die grundlegende Technik des approximativen CL-Verfahrens zur Clusterbildung nach dem Vorbild des XGAF-Verfahrens verwendet. Bei der Verwendung des CL-Verfahrens wird für Blindknoten, welche sich in der Kommunikationsreichweite einer identischen Menge an Referenzknoten befinden, eine identische Schätzposition ermittelt. Es findet defacto eine Unterteilung der Blindknoten anhand der sich überlappenden Kommunikationsreichweiten der Referenzknoten statt. Durch die Kombination mehrerer solcher, aneinander angrenzender, Überlappungsgebiete, sowie durch eine gezielte Anpassung des Verhältnisses der Gitterweite zur Kommunikationsreichweite ermöglicht das BBC-Verfahren

die Unterteilung der Referenzknoten in Cluster von unterschiedlicher Form. Trotz der unterschiedlichen Form dieser Cluster besitzen alle Cluster eine in etwa gleich große Fläche sowie maximale Ausdehnung und erfüllen damit ein wesentliches Kriterium, um im Sinne des XGAF-Verfahrens oder des 2-MASCLE-Verfahrens zu fungieren. Für die Unterteilung der Sensorknoten in die entstehenden Cluster ist weder seitens der Sensorknoten noch seitens der Referenzknoten eine exakte Ortsinformation erforderlich. Die durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass mittels BBC in Cluster unterteilte Netzwerke eine in etwa gleich gute Abdeckung erzielen, wie durch XGAF geclusterte Sensornetzwerke, ohne jedoch auf eine Lokalisierung angewiesen zu sein.

6.1.3 Verfahren zur Fehlerdetektion

Während mit der Clusterbildung ein Themenkomplex betrachtet wurde, welcher häufig auf die Ergebnisse einer Lokalisierung angewiesen ist, wurde mit der Fehlerdetektion ein Themengebiet bearbeitet, welches dazu dienen kann, die Lokalisierung zu unterstützen. Die Fehlererkennung kann in der in dieser Arbeit betrachteten Form dazu verwendet werden, Fehler in der Positionsschätzung zu erkennen, sofern diese einen gewissen Schwellenwert überschreiten. Das in Kapitel 5.3.2 vorgestellte ELDEN-Verfahren dient allgemein dazu, zu prüfen, ob ein durch einen Sensorknoten erhobener Wert in besonderem Maße von den zum gleichen Phänomen erhobenen Werten benachbarter Sensorknoten abweicht. Um Fehler in diesem Sinne erkennen zu können, muss das betrachtete Phänomen eine räumliche Kontinuität aufweisen. Im Unterschied zu vielen anderen Ansätzen der Fehlerdetektion in Sensornetzwerken werden die notwendigen Berechnungen bei diesem Verfahren nicht auf einer zentralen Senke, sondern individuell von jedem Sensorknoten durchgeführt. Bei dem Verfahren wurde daher auf eine einfache Berechnung Wert gelegt. Die zu bewertenden Eingangswerte sind nicht, wie in einigen anderen Verfahren, auf die binären Werte 0 und 1 beschränkt, sondern können sich über einen beliebigen Zahlenraum erstrecken. Das beschriebene Verfahren orientiert sich an einem von Ding et al. publizierten Algorithmus. Der ELDEN-Ansatz unterscheidet sich von diesem Verfahren im Wesentlichen durch zwei Punkte. Einerseits benötigt das ELDEN-Verfahren mit nur einer Kommunikationsphase je Bewertung ein geringeres Maß an Kommunikation. Andererseits basiert es vollständig auf dem Konzept der Quantile. Die durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass das ELDEN-Verfahren bis zu einem Anteil von etwa 25 % fehlerhafter Knoten eine mit dem Ausgangsverfahren vergleichbar hohe Sensitivität aufweist. Werden von mehr als 25 % der Sensorknoten fehlerhafte Werte ermittelt, so bietet das Verfahren von Ding et al. eine höhere Sensitivität. Im Ausgleich dazu bietet das ELDEN-Verfahren eine

wesentlich geringere Ausfallrate als das Vergleichsverfahren. Es werden also nur wenige fehlerfreie Werte als fehlerbehaftet erkannt. Das neu vorgestellte Verfahren stellt daher eine Verbesserung gegenüber dem Ausgangsverfahren dar, sofern nicht mehr als ein Viertel der Sensorknoten fehlerhafte Werte ermitteln. Es benötigt weniger Ressourcen und bietet eine signifikant geringere Ausfallrate.

6.2 Ausblick

In den jeweiligen Kapiteln zu den in dieser Arbeit vorgestellten Verfahren wurde bereits eine Vielzahl möglicher Weiterentwicklungen präsentiert. An dieser Stelle sollen die wichtigsten dieser Punkte exemplarisch noch einmal hervorgehoben sowie gegebenenfalls weitere Ausblicke vorgestellt werden.

6.2.1 Verfahren der Lokalisierung

Das in dieser Arbeit entwickelte AWCL-Verfahren wurde bereits in einer Reihe anderer Arbeiten aufgegriffen. Eine mögliche Anwendung dieses Verfahrens über die Thematik der Lokalisierung hinaus besteht in der Netzrekonstruktion, wo es dazu genutzt werden kann, mobile Sensorknoten in die richtige Richtung zu steuern, um aufgetretene Lücken im Netzwerk zu schließen. Um der bei CL-basierten Verfahren bestehenden Schwäche der Übergewichtung einer Position oder Richtung aufgrund einer Anhäufung von Referenzknoten entgegenzuwirken, besteht die Möglichkeit, den Abstand der Referenzknoten zueinander in die Gewichtung mit einzubeziehen. Um eine weitere Steigerung der Genauigkeit zu erreichen, wird eine Untersuchung der Anwendung der im Rahmen des SBCL-Verfahrens gezeigten Korrektur auf weitere Verfahren, beispielsweise das AWCL-Verfahren, vorgeschlagen. Die in SBCL dargestellte Korrektur kann über den dargestellten Spezialfall hinaus auch genutzt werden, um zusätzliches Wissen bezüglich der Netztopologie in die Positionsschätzung einfließen zu lassen. Mittels Korrektur- bzw. Entscheidungsvektoren kann zu diesem Zweck die für die Korrektur notwendige Information auf jedem Referenzknoten individuell hinterlegt werden.

Der im AWCL-Verfahren genutzte Ansatz der Reduzierung der ermittelten Distanzwerte kann möglicherweise auch bei den vorgestellten Verfahren der exakten Lokalisierung eine Verbesserung der Positionsschätzung bewirken. Da sowohl das sDLS-Verfahren, als auch das sRAL-Verfahren jeweils nur eine begrenzte Anzahl an Referenzknoten in die Vorberechnung einbeziehen ermöglichen beide Verfahren die Nutzung mehrerer Senken

bzw. leistungsstarker Referenzknoten zur Ermittlung der Vorberechnung. Eine weitere Verbesserungsmöglichkeit beider Verfahren besteht in einer gezielten, feiner abstimmbaren Gewichtung einzelner Referenzknoten. Zu diesem Zweck wurden Möglichkeiten gezeigt, um die in sDLS vorhandene Gewichtung aufzulösen. Ein wichtiger Schritt zur Steigerung der Genauigkeit der Positionsschätzung besteht in der Behandlung von Ausreißern. Dies kann wie im HDLS-Verfahren ohne explizite Ausreißerdetektion oder mit Hilfe geeigneter Mechanismen zur Ausreißerererkennung erfolgen. Hier bietet sich zum Beispiel das in dieser Arbeit entwickelte ELDEN-Verfahren an.

In den vergangenen Jahren wurden durch Forschung und Entwicklung nicht nur die Verfahren und Möglichkeiten zur lokalen Positionsbestimmung verbessert, auch die Satellitennavigation mittels GPS hat eine stetige Weiterentwicklung erfahren. So sind heutige GPS-Empfangschips wesentlich kleiner als noch vor einigen Jahren und benötigen nur noch einen Bruchteil der Energie. Besonders energieintensiv bei der Positionsbestimmung mittels GPS ist die initiale Synchronisation mit dem Satellitensystem sowie der notwendige Empfang der Langzeitdaten. Dieser Vorgang kann bis zu 12,5 Minuten in Anspruch nehmen, bietet jedoch die Möglichkeit, mittels Parallelisierung optimiert zu werden. Nimmt man beide Umstände zusammen, so scheint es sinnvoll, den Einsatz von GPS in drahtlosen Sensornetzwerken noch einmal zu prüfen. Neben dem technologisch reduzierten Energieverbrauch könnte der nachfolgend beschriebene Ansatz den effizienten Einsatz von GPS in drahtlosen Sensornetzwerken ermöglichen. Ein Problem bei der initialen Synchronisation besteht darin, zunächst einen empfangbaren Satelliten auszumachen, wobei im Normalfall auf alle Satelliten der Reihe nach geprüft wird. Durch eine Aufteilung auf mehrere Sensorknoten bräuchte jeder Knoten nur auf einen Satelliten prüfen. Auch beim anschließenden Empfang der Langzeitdaten könnte der Empfang der Daten auf mehrere Sensorknoten verteilt werden. Die gewonnenen Informationen könnten anschließend unter allen Sensorknoten verteilt werden. Für die eigentliche Positionsbestimmung muss jeder Sensorknoten anschließend nur vergleichbar kurze Signale von den Satelliten empfangen.

6.2.2 Verfahren des Clusterings

Das in Kapitel 4.3.2 vorgestellte 2-MASCLE-Verfahren stellt den Ausgangspunkt für eine Reihe weiterer Verfahren, bei denen unter anderem Form und Größe der Cluster variiert wurden, dar. Möglichkeiten für weitere Entwicklungen bildet die Anwendung des MASCLE-Ansatzes auf lokalisierungsfrei geschaffene Cluster wie sie beispielsweise durch das ebenfalls präsentierte BBC-Verfahren entstehen. Zu einer effizienteren Organisation der Sensorknoten kann ebenfalls ein hierarchischer Aufbau aus Clustern und Subclustern dienen. Durch

unterschiedlich große Cluster kann so eine voneinander getrennte Optimierung bezüglich der Kommunikations- und Sensorreichweite erfolgen. Für eine gleichmäßigere Belastung der Sensorknoten ist ebenso ein zeitlich gesteuerter Wechsel der Cluster Grenzen denkbar. Für nachfolgende Arbeiten wird ebenfalls eine Untersuchung der in Kapitel 4.3.3 beschriebenen Möglichkeit der Selbstsynchronisation vorgeschlagen.

Das in Kapitel 4.4.2 dargestellte BBC-Verfahren realisiert die Clusterbildung auf Basis von, aus der approximativen Lokalisierung bekannten, Überlappungsgebieten der Kommunikationsreichweiten von Referenzknoten. Durch eine gezielte Auswertung der in Reichweite befindlichen Referenzknoten und eine veränderte Anordnung dieser lassen sich weitere Clusterformen auf Basis der Voronoi-Linien schaffen. Durch Einbeziehung der räumlichen Nähe der Referenzknoten zu den in Clustern zu organisierenden Sensorknoten können Voronoi-Diagramme höherer Ordnung und dadurch mit wenigen Referenzknoten mehr Cluster geschaffen werden. Darüber hinaus kann eine anwendungsspezifische Anpassung des BBC-Verfahrens erfolgen, um beispielsweise eine Unterteilung des Netzwerks in zwei Subnetze gleicher Fläche zu erreichen.

6.2.3 Verfahren zur Fehlerdetektion

Bei dem in Kapitel 5.3.2 vorgestellten ELDEN-Verfahren gilt es beispielsweise, die Anwendbarkeit zur Erkennung von Positionsschätzungsfehlern in weiterführenden Untersuchungen und den sich daraus ergebenden Gewinn für die Positionsschätzung zu erforschen. Eine ungleich interessantere Anwendung der Fehlerdetektion stellt die Nutzung der zusätzlichen Information zur Anpassung der Rollenverteilung und damit zur Reduzierung des Energieverbrauchs und zur Optimierung der Netzlebenszeit dar. Die Erkennung vorliegender Fehler soll an dieser Stelle dazu dienen, Sensorknoten gemäß ihrer individuellen Leistungsfähigkeit einzusetzen. Zur Verbesserung des ELDEN-Verfahrens wird darüber hinaus die Nutzung von Multi-Hop-Informationen vorgeschlagen.

Anhang A

Vergleich existenter drahtloser Sensornetzwerke

	Deployment ^A	Mobility ^B	Resources ^C	Cost	Energy ^D	Heterogeneity ^E	Modality ^F
Great Duck ^[MCP⁺02]	man, ot	im	Mb	~200 \$	Bat, solar	het. ¹	RF
ZebraNet ^[JOW⁺02]	man, ot	cp	Mb	—	Bat	SNs, GWs	RF
Glacier ^[MOH04]	man, ot	cp	Br	—	Bat	SNs, BS	RF
Herding ^[BCPR04]	man, ot	cp	Br	~1T \$	Bat	hom.	RF
Bathymetry ^[MRW^S03]	man, ot	op	Br	—	Bat	hom.	RF
Ocean ^[GB]	rand, it	cp	Br	~15T \$	Bat	hom.	RF
Grape ^[BTB04]	man, ot	im	Mb	~200 \$	Bat	SNs, GW, BS	RF
Cold Chain ^[RV04]	man, it	op ²	Mb ³	—	Bat	het. ⁴	RF
Avalanche ^[MMSS03]	man, ot	cp	Mb	—	Bat	hom.	RF
Vital Sign ^[BKM04]	man	cp	Mb	—	Bat	het. ⁵	RF, IR ⁶
Power ^[KR04]	man, it	im	Mb	—	Power grid	het. ⁷	RF ⁸
Assembly ^[AMS02]	man, ot	op	Mb	~100 €	Bat	hom. ⁹	RF
Tracking ^[CDH⁺]	rand ¹⁰	op	Mb	~200 \$	Bat	hom.	RF
Mines ^[MNS⁺03]	man	oa	Br	—	Bat	hom.	RF, US ¹¹
Sniper ^[SML⁺04]	man	im	Mb	~200 \$	Bat	hom.	RF

^A man = manual, rand = random, ot = one-time, it = iterative ^B im = immobile, cp = continuous passive, op = occasional passive, oa = occasional active
^C Mb = Matchbox, Br = Brick ^D Bat = battery ^E het. = heterogeneous, hom. = homogeneous, SN = sensor node, GW = gateway, BS = base station
^F RF = radio frequency, IR = infra red, US = ultrasound
¹ weather stations, burrow nodes, gateways ² partly (sensors) ³ matchbox (sensors), brick (relays) ⁴ sensors, relays, access boxes, warehouse
⁵ medical sensors, patient identifier, display device, setup pen ⁶ IR light for setup pen ⁷ sensor nodes, transceivers, central unit ⁸ sensor unidirectional
¹⁰ thrown from aircraft ¹¹ ultrasound for localization

Tabelle A.1: Vergleich bestehender Anwendungen von Sensornetzwerken. Quelle: [RM04]

	Infrastructure ^A	Topology	Coverage	Connectivity	Size ^B	Lifetime ^C
Great Duck	BS, GWs	Star of Clusters	Dense ¹	connected	10s/100s/100/-	7 M ²
ZebraNet	BS, GPS	Graph	Dense ³	sporadic	10s/100s/-/-	1 Y
Glacier	BS, GPS, GSM	Star	Sparse	connected	10s/100s/9/-	Ms
Herding	BS, GPS	Graph	Dense ³	intermittent	-/100s/10/-	Ds-Ws
Bathymetry	GPS	Graph	Sparse ⁴	connected	-/100s/6/50	Ms
Ocean	Satellite	Star	Sparse	intermittent	-/-/1300/3000	4-5 Ys
Grape	BS	Tree ⁵	Sparse ⁶	connected	-/100s/65/-	Ms ⁷
Cold Chain	Relays, access boxes	Tree ⁸	Sparse	intermittent	-/100s/55*/-	Ys
Avalanche	PDA	Star	Dense ⁹	connected	10s/100s/-/-	Ds
Vital Sign	Ad hoc	Single-hop	Dense	connected	10s/-/-/-	Ds - Ms
Power	Transceivers	Layered multihop	Sparse ¹⁰	connected	10s/100s/-/-	Ys
Assembly	Ad hoc	Star	Sparse	connected	10s/-/-/-	Hs
Tracking	UAV ¹¹	Graph	Sparse	intermittent ¹¹	10s/1000s/5/-	Ws - Ys
Mines	Ad hoc	Graph	Dense	connected	-/100s/20/-	Ms - Ys
Sniper	Ad hoc	Graph	Redundant ¹²	connected	-/100s/60/-	Ms - Ys

^A BS = base station, GW = gateway ^B from/to/employed/planned ^C H-Hour, D-Day, W-Week, M-Month, Y-Year
¹ every burrow ² breeding period ³ every animal ⁴ 0.5 - 1 km apart ⁵ three-tiered multi-hop ⁶ 20 m apart ⁷ growth period ⁸ three-tiered multi-hop ⁹ every person
¹⁰ selected outlets ¹¹ Unmanned Aerial Vehicle (UAV) ¹² multiple nodes recognize shot

Tabelle A.1: (Fortsetzung) Vergleich bestehender Anwendungen von Sensornetzwerken. Quelle: [RM04]

Anhang B

Konvention mathematischer Symbole und Notationen

B.1 Symbolik

$\lfloor x \rfloor$ Runden der Zahl x gegen minus unendlich

$\lceil x \rceil$ Runden der Zahl x gegen plus unendlich

$\lceil x \rceil$ Runden der Zahl x zur nächsten natürlichen Zahl, 0,5 wird aufgerundet

$\lfloor x \rfloor$ Runden der Zahl x zur nächsten natürlichen Zahl, 0,5 wird abgerundet

$|M|$ Mächtigkeit der Menge M

$\|\mathbf{v}\|$ euklidische Norm des Vectors \mathbf{v}

$\mathbf{A}\mathbf{B}$ Produkt der Matrizen \mathbf{A} und \mathbf{B}

$\mathbf{A} \circ \mathbf{B}$ elementweise Multiplikation der Matrizen \mathbf{A} und \mathbf{B} ; auch als Schur Produkt oder Hadamard Produkt bezeichnet

$\mathbf{A} \cdot \mathbf{B}$ Inneres Produkt der Matrizen \mathbf{A} und \mathbf{B} ; definiert als $\mathbf{A}^T \mathbf{B}$; bezeichnet das Skalarprodukt, wenn \mathbf{A} und \mathbf{B} Spaltenvektoren vom gleichen Typ darstellen

$\mathbf{A} \otimes \mathbf{B}$ Äußeres Produkt der Matrizen \mathbf{A} und \mathbf{B} ; definiert als $\mathbf{A}\mathbf{B}^T$; bezeichnet das Tensorprodukt, wenn \mathbf{A} und \mathbf{B} Spaltenvektoren vom gleichen Typ darstellen

$\mathbf{a} \times \mathbf{b}$ Kreuzprodukt der Vektoren \mathbf{a} und \mathbf{b}

$\overset{\circ}{\prod} \mathbf{v}_i$ elementweise Multiplikationen der indizierten Vektoren \mathbf{v}_i

B.2 Notation

k_i Sensorknoten mit dem Index i

b_i Referenzknoten mit dem Index i

u_i Blindknoten mit dem Index i

\mathbf{k}_i Ortsvektor \mathbf{k}_i eines Sensorknotens k mit dem Index i

$k_{(i)}$ i -te Komponente des Ortsvektors k

B_i Menge der Referenzknoten innerhalb der Reichweite eines Knotens k_i

$I(B_i)$ Indizes der in der Menge B_i zusammengefassten Referenzknoten

K_i Menge der Sensorknoten innerhalb der Reichweite eines Knotens k_i

$I(K_i)$ Indizes der in der Menge K_i zusammengefassten Knoten

$v(k_i)$ Durch den Knoten k_i erfasster aktueller Messwert

$V(k_i)$ Menge der aktuell gültigen Messwerte, welche durch die in K_i enthaltenen Knoten erfasst wurden

Anhang C

Pfadverlust und Standardabweichung in unterschiedlicher Umgebung

Environment	Pathloss η
Freespace	2
Urban area cellular radio	2,7...3,5
Shadowed urban cellular radio	3...5
In building line-of-sight	1,6...1,8
Obstructed in building	4...6
Obstructed in factories	2...3

Tabelle C.1: Vergleich des Pfadverlustexponenten in unterschiedlicher Umgebung.
Quelle: [Rap02]

Environment	Frequency [MHz]	Pathloss η	Standarddeviation σ [dB]
Retail Stores	914	2,2	8,7
Grocery Store	914	1,8	5,2
Office, hard partition	1500	3,0	7,0
Office, soft partition	900	2,4	9,6
Office, soft partition	1900	2,6	14,1
Factory LOS			
Textile/Chemical	1300	2,0	3,0
Textile/Chemical	4000	2,1	7,0
Paper/Cereals	1300	1,8	6,0
Metalworking	1300	1,6	5,8
Suburban Home			
Indoor Street	900	3,0	7,0
Factory OBS			
Textile/Chemical	4000	2,1	9,7
Retail Stores	1300	3,3	6,8

Tabelle C.2: Vergleich des Pfadverlustexponenten in unterschiedlicher Indoor-Umgebung. Quelle: [Rap02]

Environment	Range over Frequencies		Mean Values	
	Pathloss η	Variance σ^2 [dB]	Pathloss η	Variance σ^2 [dB]
Indoor				
Engineering I	1,4...2,2	5,7...13,0	1,9	5,7
Apartment Hallway	1,9...2,2	3,0...11,0	2,0	8,0
Parking Structure	2,7...3,4	2,4...17,0	3,0	7,9
One-sided Corridor	1,4...2,4	4,0...16,0	1,9	8,0
One-sided Patio	2,8...3,8	1,0...9,2	3,2	3,7
Outdoor				
Concrete Canyon	2,1...3,0	4,8...20,0	2,7	10,2
Plant Fence	4,6...5,1	2,8...5,0	4,9	9,4
Small Boulders	3,3...3,7	8,8...18,2	3,5	12,8
Sandy Flat Beach	3,8...4,6	2,2...10,0	4,2	4,0
Dense Bamboo	4,5...5,4	0,4...46,0	5,0	11,6
Dry Tall Underbrush	3,0...3,9	4,2...16,0	3,6	8,4

Tabelle C.3: 800-1000 MHz – Shadowing Variance Vergleich des Pfadverlustexponenten η und der Shadowing Varianz σ^2 in unterschiedlicher Umgebung für Frequenzen im Bereich 800-1000 MHz. Quelle: [SMP99]

Anhang D

Linearumformung des Gleichungssystems der Multilateration

D.1 Umformung durch Subtraktion einer Gleichung

Im Folgenden wird die Linearumformung zweier Gleichungen (D.1) durch gegenseitige Subtraktion (D.2) dargestellt. Die Umformung resultiert in einer Gleichung (D.3) mit ebenso vielen Unbekannten wie in den Ausgangsgleichungen enthalten waren.

$$d_{ui}^2 = \sum_{d=1}^{dim} (u_{(d)} - b_{i(d)})^2 \quad (D.1a)$$

$$d_{uL}^2 = \sum_{d=1}^{dim} (u_{(d)} - b_{L(d)})^2 \quad (D.1b)$$

$$d_{ui}^2 - d_{uL}^2 = \sum_{d=1}^{dim} (u_{(d)} - b_{i(d)})^2 - \sum_{d=1}^{dim} (u_{(d)} - b_{L(d)})^2 \quad (D.2a)$$

$$d_{ui}^2 - d_{uL}^2 = \sum_{d=1}^{dim} \left[(u_{(d)} - b_{i(d)})^2 - (u_{(d)} - b_{L(d)})^2 \right] \quad (D.2b)$$

$$d_{ui}^2 - d_{uL}^2 = \sum_{d=1}^{dim} \left[\left(u_{(d)}^2 - 2u_{(d)}b_{i(d)} + b_{i(d)}^2 \right) - \left(u_{(d)}^2 - 2u_{(d)}b_{L(d)} + b_{L(d)}^2 \right) \right] \quad (D.2c)$$

$$d_{ui}^2 - d_{uL}^2 = \sum_{d=1}^{dim} \left[-2u_{(d)}b_{i(d)} + b_{i(d)}^2 + 2u_{(d)}b_{L(d)} - b_{L(d)}^2 \right] \quad (D.2d)$$

$$d_{ui}^2 - d_{uL}^2 = \sum_{d=1}^{dim} \left[-2u_{(d)}b_{i(d)} + b_{i(d)}^2 + 2u_{(d)}b_{L(d)} - 2b_{L(d)}^2 + b_{L(d)}^2 + 2b_{i(d)}b_{L(d)} - 2b_{i(d)}b_{L(d)} \right] \quad (\text{D.2e})$$

$$d_{ui}^2 - d_{uL}^2 = \sum_{d=1}^{dim} \left[-2 \left(u_{(d)}b_{i(d)} - u_{(d)}b_{L(d)} + b_{L(d)}^2 - b_{i(d)}b_{L(d)} \right) + (b_{i(d)} - b_{L(d)})^2 \right] \quad (\text{D.2f})$$

$$d_{ui}^2 - d_{uL}^2 - d_{iL}^2 = -2 \sum_{d=1}^{dim} \left[u_{(d)}b_{i(d)} - u_{(d)}b_{L(d)} - b_{i(d)}b_{L(d)} + b_{L(d)}^2 \right] \quad (\text{D.2g})$$

$$\frac{1}{2} [d_{uL}^2 + d_{iL}^2 - d_{ui}^2] = \sum_{d=1}^{dim} \left[u_{(d)} (b_{i(d)} - b_{L(d)}) - b_{L(d)} (b_{i(d)} - b_{L(d)}) \right] \quad (\text{D.2h})$$

$$\frac{1}{2} [d_{uL}^2 + d_{iL}^2 - d_{ui}^2] = \sum_{d=1}^{dim} (u_{(d)} - b_{L(d)}) (b_{i(d)} - b_{L(d)}) \quad (\text{D.2i})$$

$$\frac{1}{2} [d_{uL}^2 + d_{iL}^2 - d_{ui}^2] = \sum_{d=1}^{dim} (u_{(d)} - b_{L(d)}) (b_{i(d)} - b_{L(d)}) \quad (\text{D.3})$$

D.2 Umformung mittels Linearisierer

Eine alternative Umformung besteht in der Verwendung eines sogenannten Linearisierers. In diesem Fall wird ein Referenzknoten als Linearisierer b_L gewählt, dessen Komponenten an geeigneter Stelle zur neutralen Erweiterung der übrigen Gleichungen genutzt werden [MH99]. Die resultierenden linearen Gleichungen entsprechen denen der Umformung durch Subtraktion.

$$d_{ui}^2 = \sum_{d=1}^{dim} (u_{(d)} - b_{L(d)} + b_{L(d)} - b_{i(d)})^2 \quad (D.4a)$$

$$d_{ui}^2 = \sum_{d=1}^{dim} \left[(u_{(d)} - b_{L(d)})^2 + 2(u_{(d)} - b_{L(d)})(b_{L(d)} - b_{i(d)}) + (b_{L(d)} - b_{i(d)})^2 \right] \quad (D.4b)$$

$$d_{ui}^2 - \sum_{d=1}^{dim} (u_{(d)} - b_{L(d)})^2 - \sum_{d=1}^{dim} (b_{L(d)} - b_{i(d)})^2 = \sum_{d=1}^{dim} 2(u_{(d)} - b_{L(d)})(b_{L(d)} - b_{i(d)}) \quad (D.4c)$$

$$d_{ui}^2 - d_{UL}^2 - d_{iL}^2 = \sum_{d=1}^{dim} 2(u_{(d)} - b_{L(d)})(b_{L(d)} - b_{i(d)}) \quad (D.4d)$$

$$d_{ui}^2 - d_{UL}^2 - d_{iL}^2 = \sum_{d=1}^{dim} -2(u_{(d)} - b_{L(d)})(b_{i(d)} - b_{L(d)}) \quad (D.4e)$$

$$\frac{1}{2} [d_{uL}^2 + d_{iL}^2 - d_{ui}^2] = \sum_{d=1}^{dim} (u_{(d)} - b_{L(d)})(b_{i(d)} - b_{L(d)}) \quad (D.4f)$$

D.3 Umformung mittels Substitution

Im Folgenden wird die Linearumformung einer Gleichung mittels Substitution dargestellt. Durch Substitution der Summe aller quadratisch auftretenden Variablen zu einer linear auftretenden Variablen wird eine lineare Form erreicht, welche eine Variable mehr enthält als die Ausgangsgleichung.

$$d_{ui}^2 = \sum_{d=1}^{dim} (u_{(d)} - b_{i(d)})^2 \quad (\text{D.5a})$$

$$d_{ui}^2 = \sum_{d=1}^{dim} (u_{(d)}^2 - 2u_{(d)}b_{i(d)} + b_{i(d)}^2) \quad (\text{D.5b})$$

$$d_{ui}^2 = \sum_{d=1}^{dim} u_{(d)}^2 - 2 \sum_{d=1}^{dim} u_{(d)}b_{i(d)} + \sum_{d=1}^{dim} b_{i(d)}^2 \quad (\text{D.5c})$$

$$d_{ui}^2 - \sum_{d=1}^{dim} b_{i(d)}^2 = \sum_{d=1}^{dim} u_{(d)}^2 - 2 \sum_{d=1}^{dim} u_{(d)}b_{i(d)} \quad (\text{D.5d})$$

$$d_{ui}^2 - \sum_{d=1}^{dim} b_{i(d)}^2 = w - 2 \sum_{d=1}^{dim} u_{(d)}b_{i(d)} \quad (\text{D.5e})$$

$$d_{ui}^2 - d_{0i}^2 = w - 2 \sum_{d=1}^{dim} u_{(d)}b_{i(d)} \quad (\text{D.5f})$$

Literaturverzeichnis

Fremdzitate

- [ADB⁺04] ARORA, A. ; DUTTA, P. ; BAPAT, S. ; KULATHUMANI, V. ; ZHANG, H. ; NAIK, V. ; MITTAL, V. ; CAO, H. ; DEMIRBAS, M. ; GOUDA, M. ; CHOI, Y. ; HERMAN, T. ; KULKARNI, S. ; ARUMUGAM, U. ; NESTERENKO, M. ; VORA, A. ; MIYASHITA, M.: A Line in the Sand: A Wireless Sensor Network for Target Detection, Classification, and Tracking. In: *Computer Networks* 46 (2004), Dezember, Nr. 5, S. 605–634. <http://dx.doi.org/10.1016/j.comnet.2004.06.007>. – DOI 10.1016/j.comnet.2004.06.007. – ISSN 1389–1286. – Military Communications Systems and Technologies
- [AGP04] ABRAMS, Zoë ; GOEL, Ashish ; PLOTKIN, Serge: Set K-Cover Algorithms for Energy Efficient Monitoring in Wireless Sensor Networks. In: *Proceedings of the 3rd International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN '04)*. New York, NY, USA : ACM, April 2004. – ISBN 1–58113–846–6, S. 424–432
- [AGS99] ALBERTS, D.S. ; GARSTKA, J.J. ; STEIN, F.P.: *Network Centric Warfare: Developing and Leveraging Information Superiority*. 2. CCRP Publication Series, 1999 http://www.dodccrp.org/files/Alberts_NCW.pdf. – ISBN 1579060196
- [AJ10] AKYILDIZ, Ian F. ; JORNET, Josep M.: Electromagnetic Wireless Nanosensor Networks. In: *Nano Communication Networks* 1 (2010), März, Nr. 1, S. 3–19. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nancom.2010.04.001>. – DOI 10.1016/j.nancom.2010.04.001. – ISSN 1878–7789

- [AKK04] AL-KARAKI, J. N. ; KAMAL, A. E.: Routing Techniques in Wireless Sensor Networks: A Survey. In: *IEEE Wireless Communications* 11 (2004), Dezember, Nr. 6, S. 6–28. <http://dx.doi.org/10.1109/MWC.2004.1368893>. – DOI 10.1109/MWC.2004.1368893. – ISSN 1536–1284
- [ALM05] ARAMPATZIS, Th. ; LYGEROS, J. ; MANESIS, S.: A Survey of Applications of Wireless Sensors and Wireless Sensor Networks. In: *Proceedings of the 20th IEEE International Symposium on Intelligent Control (ISIC'05) and the 13th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED'05)*, 2005, S. 719–724
- [AMS02] ANTIFAKOS, Stavros ; MICHAHELLES, Florian ; SCHIELE, Bernt: Proactive Instructions for Furniture Assembly. Version: September–Oktober 2002. http://dx.doi.org/10.1007/3-540-45809-3_27. In: BORRIELLO, Gaetano (Hrsg.) ; HOLMQUIST, Lars (Hrsg.): *UbiComp 2002: Ubiquitous Computing* Bd. 2498. Springer Berlin, Heidelberg, September–Oktober 2002. – DOI 10.1007/3-540-45809-3_27, S. 9–35
- [APAE06] ALSINDI, N.A. ; PAHLAVAN, K. ; ALAVI, B. ; EI, X.: A novel Cooperative Localization Algorithm for Indoor Sensor Networks. In: *Proceedings of the 17th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC '06)* IEEE, 2006. – ISBN 1424403294, S. 1–6
- [ASSC02] AKYILDIZ, I. F. ; SU, W. ; SANKARASUBRAMANIAM, Y. ; CAYIRCI, E.: Wireless Sensor Networks: A Survey. In: *Computer Networks* 38 (2002), März, Nr. 4, S. 393–422. [http://dx.doi.org/10.1016/S1389-1286\(01\)00302-4](http://dx.doi.org/10.1016/S1389-1286(01)00302-4). – DOI 10.1016/S1389-1286(01)00302-4. – ISSN 1389–1286
- [ASV09] ASLAM, F. ; SCHINDELHAUER, C. ; VATER, A.: Improving Geometric Distance Estimation for Sensor Networks and Unit Disk Graphs. In: *Proceedings of the 1st International Conference on Ultra Modern Telecommunications Workshops (ICUMT '09)*, 2009, S. 1–5
- [AV10] AKYILDIZ, Ian ; VURAN, Mehmet C.: *Wireless Sensor Networks*. New York, NY, USA : John Wiley & Sons, Inc., 2010. – ISBN 047003601X, 9780470036013

- [AY05] AKKAYA, Kemal ; YOUNIS, Mohamed: A Survey on Routing Protocols for Wireless Sensor Networks. In: *Ad Hoc Networks* 3 (2005), Mai, Nr. 3, S. 325–349. <http://dx.doi.org/10.1016/j.adhoc.2003.09.010>. – DOI 10.1016/j.adhoc.2003.09.010. – ISSN 1570–8705
- [AY07] ABBASI, Ameer A. ; YOUNIS, Mohamed: A Survey on Clustering Algorithms for Wireless Sensor Networks. In: *Computer Communications* 30 (2007), Oktober, Nr. 14–15, S. 2826–2841. <http://dx.doi.org/10.1016/j.comcom.2007.05.024>. – DOI 10.1016/j.comcom.2007.05.024. – ISSN 0140–3664. – Network Coverage and Routing Schemes for Wireless Sensor Networks
- [AYA09] ABBASI, A.A. ; YOUNIS, M. ; AKKAYA, K.: Movement-Assisted Connectivity Restoration in Wireless Sensor and Actor Networks. In: *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems* 20 (2009), September, Nr. 9, S. 1366–1379. <http://dx.doi.org/10.1109/TPDS.2008.246>. – DOI 10.1109/TPDS.2008.246. – ISSN 1045–9219
- [BB10] BORN, Alexander ; BILL, Ralf: Reducing the Calculation for Precise Localization in Wireless Sensor Networks. In: *Proceedings of the 71st IEEE Vehicular Technology Conference (VTC '10 - Spring)*. Taipei, TW, Mai 2010. – ISBN 978–1–4244–2519–8, S. 1–5
- [BBB04] BURRELL, Jenna ; BROOKE, Tim ; BECKWITH, Richard: Vineyard Computing: Sensor Networks in Agricultural Production. In: *IEEE Pervasive Computing* 3 (2004), Januar, Nr. 1, S. 38–45. <http://dx.doi.org/10.1109/MPRV.2004.1269130>. – DOI 10.1109/MPRV.2004.1269130. – ISSN 1536–1268
- [BBJ05] BOKAREVA, T. ; BULUSU, N. ; JHA, S.: SASHA: Toward a Self-Healing Hybrid Sensor Network Architecture. In: *Proceedings of the 2nd IEEE Workshop on Embedded Networked Sensors (EmNetS-II)*, 2005, S. 71–78
- [BCF⁺] BAPTISTA, António ; CHAWLA, Arun ; FENG, Wu-Chang ; FENG, Wu-Chi ; LEEN, Todd ; MAIER, David ; WALPOLE, Jon: *CORIE - The COlumbia RIvEr Observation Project*. <http://www.stccmop.org/CORIE/>, Abruf: 18.01.2011
- [BCPR04] BUTLER, Z. ; CORKE, P. ; PETERSON, R. ; RUS, D.: Virtual Fences for Controlling Cows. In: *Proceedings of the 28th IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'04)* Bd. 5 IEEE, 2004. – ISBN 0780382323, S. 4429–4436

- [BCS06] BOONMA, P. ; CHAMNPRASERT, P. ; SUZUKI, J.: A Biologically Inspired Architecture for Self-Managing Sensor Networks. In: *Proceedings of the 3rd Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON'06)* Bd. 3, 2006, S. 734–739
- [BGGT07] BLUMENTHAL, J. ; GROSSMANN, R. ; GOLATOWSKI, F. ; TIMMERMANN, D.: Weighted Centroid Localization in Zigbee-based Sensor Networks. In: *Proceedings of the 5th IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing (WISP'07)*, 2007, S. 1–6
- [BGLA01] BAO, Lichun ; GARCIA-LUNA-ACEVES, J. J.: A new Approach to Channel Access Scheduling for Ad Hoc Networks. In: *Proceedings of the 7th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom '01)*. New York, NY, USA : ACM, Juli 2001. – ISBN 1–58113–422–3, S. 210–221
- [BHE00] BULUSU, N. ; HEIDEMANN, J. ; ESTRIN, D.: GPS-less low-cost Outdoor Localization for very small Devices. In: *IEEE Personal Communications* 7 (2000), Oktober, Nr. 5, S. 28–34. <http://dx.doi.org/10.1109/98.878533>. – DOI 10.1109/98.878533. – ISSN 1070–9916
- [BKM04] BALDUS, H. ; KLABUNDE, K. ; MÜSCH, G.: Reliable Set-Up of Medical Body-Sensor Networks. Version: 2004. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-24606-0_24. In: *Wireless Sensor Networks* Bd. 2920. Springer Berlin / Heidelberg, 2004. – DOI 10.1007/978-3-540-24606-0_24, S. 353–363
- [BRB10] BORN, Alexander ; REICHENBACH, Frank ; BILL, Ralf: Converting the Nonlinear Least Squares Problem for Localization in Wireless Sensor Networks. In: *Proceedings of the 19th International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN '10)*, 2010, S. 1–6
- [BRR08] BASHA, E.A. ; RAVELA, S. ; RUS, D.: Model-based Monitoring for Early Warning Flood Detection. In: *Proceedings of the 6th ACM Conference on Embedded Network Sensor Systems (SenSys '08)* ACM, 2008, S. 295–308

-
- [BRT06] BLUMENTHAL, J. ; REICHENBACH, F. ; TIMMERMANN, D.: Minimal Transmission Power vs. Signal Strength as Distance Estimation for Localization in Wireless Sensor Networks. In: *Proceedings of the 3rd Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON '06)* Bd. 3, 2006, S. 761–766
- [BTB04] BECKWITH, R. ; TEIBEL, D. ; BOWEN, P.: Pervasive Computing and Proactive Agriculture. In: *Advances in Pervasive Computing: A Collection of Contributions Presented at PERVASIVE (2004)*
- [CDH⁺] CULLER, David ; DOHERTY, Lance ; HILL, Jason ; KUMAR, Sri ; PISTER, Kris: *The 29 Palms Experiment: Tracking vehicles with a UAV-delivered sensor network*. <http://robotics.eecs.berkeley.edu/~pister/29Palms0103/>, Abruf: 18.01.2011
- [CDM⁺09] CASPI, A. ; DORN, J.D. ; MCCLURE, K.H. ; HUMAYUN, M.S. ; GREENBERG, R.J. ; MCMAHON, M.J.: Feasibility Study of a Retinal Prosthesis: Spatial Vision with a 16-Electrode Implant. In: *Archives of ophthalmology* 127 (2009), April, Nr. 4, S. 398
- [CE04] CERPA, Alberto ; ESTRIN, Deborah: ASCENT: Adaptive Self-Configuring Sensor Networks Topologies. In: *IEEE Transactions on Mobile Computing* 3 (2004), Juli–August, S. 272–285. <http://dx.doi.org/10.1109/TMC.2004.16>. – DOI 10.1109/TMC.2004.16. – ISSN 1536–1233
- [CF06] CHITI, F. ; FANTACCI, R.: Wireless Sensor Network Paradigm: Overview on Communication Protocols Design and Application to Practical Scenarios. In: *EURASIP Newsletter* 17 (2006), Dezember, Nr. 4, S. 6–27
- [CFP⁺06] CHINTALAPUDI, K. ; FU, T. ; PAEK, J. ; KOTHARI, N. ; RANGWALA, S. ; CAFFREY, J. ; GOVINDAN, R. ; JOHNSON, E. ; MASRI, S.: Monitoring Civil Structures with a Wireless Sensor Network. In: *IEEE Internet Computing* 10 (2006), März–April, Nr. 2, S. 26–34. <http://dx.doi.org/10.1109/MIC.2006.38>. – DOI 10.1109/MIC.2006.38. – ISSN 1089–7801
- [Cha99] CHANG, Xinjie: Network Simulations with OPNET. In: *Proceedings of the 31st Winter Simulation Conference (WSC'99)* Bd. 1, 1999, S. 307–314
- [Chi04] CHIPCON, AS: *CC1000 datasheet*. Version: 2004. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc1000.pdf>, Abruf: 18.01.2011
-

- [CK93] COHEN, Charles ; KOSS, Frank V.: A Comprehensive Study of Three Object Triangulation. In: *Proceedings of the 8th SPIE Conference on Mobile Robots*, 1993, S. 95–106
- [CK03] CHONG, Chee-Yee ; KUMAR, S.P.: Sensor Networks: Evolution, Opportunities, and Challenges. In: *Proceedings of the IEEE* 91 (2003), August, Nr. 8, S. 1247–1256. <http://dx.doi.org/10.1109/JPROC.2003.814918>. – DOI 10.1109/JPROC.2003.814918. – ISSN 0018–9219
- [CLP05] CHAN, Haowen ; LUK, Mark ; PERRIG, Adrian: Using Clustering Information for Sensor Network Localization. Version: 2005. http://dx.doi.org/10.1007/11502593_11. In: PRASANNA, Viktor K. (Hrsg.) ; IYENGAR, Sitharama (Hrsg.) ; SPIRAKIS, Paul G. (Hrsg.) ; WELSH, Matt (Hrsg.): *Distributed Computing in Sensor Systems* Bd. 3560. Springer Berlin / Heidelberg, 2005. – DOI 10.1007/11502593_11, S. 467–467
- [CLP06] COOK, B.W. ; LANZISERA, S. ; PISTER, K.S.J.: SoC Issues for RF Smart Dust. In: *Proceedings of the IEEE* 94 (2006), Juni, Nr. 6, S. 1177–1196. <http://dx.doi.org/10.1109/JPROC.2006.873620>. – DOI 10.1109/JPROC.2006.873620. – ISSN 0018–9219
- [CNM10] CHEN, D. ; NIXON, M. ; MOK, A.: *WirelessHart: Real-time Mesh Network for Industrial Automation*. Springer Verlag, 2010. – ISBN 1441960465
- [CP04] CHAN, Haowen ; PERRIG, Adrian: ACE: An Emergent Algorithm for Highly Uniform Cluster Formation. Version: 2004. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-24606-0_11. In: *Wireless Sensor Networks* Bd. 2920. Springer Berlin / Heidelberg, 2004. – DOI 10.1007/978-3-540-24606-0_11, S. 154–171
- [CPF⁺] CHINTALAPUDI, Krishna ; PAEK, Jeongyeup ; FU, Tat ; GNAWALI, Omprakash ; GOVINDAN, Ramesh ; JOHNSON, Erik: *NetSHM - Embedded Networks Laboratory*. <http://enl.usc.edu/projects/netshm/index.html>, Abruf: 19.01.2011
- [CPG⁺06] CHINTALAPUDI, K. ; PAEK, J. ; GNAWALI, O. ; FU, T.S. ; DANTU, K. ; CAFFREY, J. ; GOVINDAN, R. ; JOHNSON, E. ; MASRI, S.: Structural damage detection and localization using NETSHM. In: *Proceedings of the 5th International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN'06)*, 2006, S. 475–482

- [CZ05] CHEN, Yunxia ; ZHAO, Qing: On the Lifetime of Wireless Sensor Networks. In: *Communications Letters, IEEE* 9 (2005), November, Nr. 11, S. 976–978. <http://dx.doi.org/10.1109/LCOMM.2005.11010>. – DOI 10.1109/LCOMM.2005.11010. – ISSN 1089–7798
- [DCXC05] DING, M. ; CHEN, D. ; XING, K. ; CHENG, X.: Localized fault-tolerant Event Boundary Detection in Sensor Networks. In: *INFOCOM 2005. 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings IEEE* 2 (2005), März, S. 902–913. <http://dx.doi.org/10.1109/INFCOM.2005.1498320>. – DOI 10.1109/INFCOM.2005.1498320. – ISSN 0743–166X
- [DD04] DOWNARD, I.T. ; DC., NAVAL RESEARCH LAB W.: Simulating Sensor Networks in ns-2. In: *Proceedings of the IEEE* (2004), S. 1–9
- [DEA06] DEMIRKOL, I. ; ERSOY, C. ; ALAGOZ, F.: MAC Protocols for Wireless Sensor Networks: A Survey. In: *IEEE Communications Magazine* 44 (2006), April, Nr. 4, S. 115–121. <http://dx.doi.org/10.1109/MCOM.2006.1632658>. – DOI 10.1109/MCOM.2006.1632658. – ISSN 0163–6804
- [DFB+07] DANG, T. ; FROLOV, S. ; BULUSU, N. ; FENG, W. ; BAPTISTA, A.: Near optimal sensor selection in the Columbia river (CORIE) observation network for data assimilation using genetic algorithms. In: *Proceedings of the 3rd IEEE International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS '07)* Springer-Verlag, 2007, S. 253–266
- [DKB05] DJENOURI, D. ; KHELLADI, L. ; BADACHE, A.N.: A Survey of Security Issues in Mobile ad hoc and Sensor Networks. In: *IEEE Communications Surveys Tutorials* 7 (2005), 4th quarter, Nr. 4, S. 2–28. <http://dx.doi.org/10.1109/COMST.2005.1593277>. – DOI 10.1109/COMST.2005.1593277. – ISSN 1553–877X
- [DL03] DAM, Tijs van ; LANGENDOEN, Koen: An Adaptive Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks. In: *Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys '03)*. New York, NY, USA : ACM, November 2003. – ISBN 1–58113–707–9, S. 171–180

- [DpEG01] DOHERTY, L. ; PISTER, K.S.J. ; EL GHAOUI, L.: Convex Position Estimation in Wireless Sensor Networks. In: *Proceedings of the 20th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM '01)* Bd. 3, 2001, S. 1655–1663
- [DX06] DU, Xiaojiang ; XIAO, Yang: Energy Efficient Chessboard Clustering and Routing in Heterogeneous Sensor Networks. In: *International Journal of Wireless and Mobile Computing* 1 (2006), Februar, S. 121–130. <http://dx.doi.org/10.1504/IJWMC.2006.012471>. – DOI 10.1504/IJWMC.2006.012471. – ISSN 1741–1084
- [DZN⁺06] DU, Xiaojiang ; ZHANG, Ming ; NYGARD, K. ; GUIZANI, M. ; CHEN, Hsiao-Hwa: Distributed Decision Making Algorithm for Self-Healing Sensor Networks. In: *Proceedings of the 19th IEEE International Conference on Communications (ICC '06)* Bd. 8, 2006. – ISSN 8164–9547, S. 3402–3407
- [EGE02] ELSON, Jeremy ; GIROD, Lewis ; ESTRIN, Deborah: Fine-Grained Network Time Synchronization using Reference Broadcasts. In: *ACM SIGOPS Operating Systems Review* 36 (2002), Dezember, S. 147–163. <http://dx.doi.org/10.1145/844128.844143>. – DOI 10.1145/844128.844143. – ISSN 0163–5980
- [Far08] FARAHANI, S.: *ZigBee Wireless Networks and Transceivers*. Newnes, 2008. – ISBN 0750683937
- [FB09] FINK, A. ; BEIKIRCH, H.: RSSI-based Indoor Localization using Antenna Diversity and Plausibility Filter. In: *Proceedings of the 6th Workshop on Positioning, Navigation and Communication (WPNC'09)*, 2009, S. 159–165
- [FJMWM04] FULFORD-JONES, T. ; MALAN, D. ; WELSH, M. ; MOULTON, S.: CodeBlue: An ad hoc Sensor Network Infrastructure for Emergency Medical Care. In: *Proceedings of the 1st International Workshop on Wearable and Implantable Body Sensor Networks (BSN '04)*, 2004, S. 12–14
- [FRWZ07] FASOLO, E. ; ROSSI, M. ; WIDMER, J. ; ZORZI, M.: In-network aggregation techniques for wireless sensor networks: a survey. In: *IEEE Wireless Communications* 14 (2007), April, Nr. 2, S. 70–87. <http://dx.doi.org/10.1109/MWC.2007.358967>. – DOI 10.1109/MWC.2007.358967. – ISSN 1536–1284

- [FSAB⁺] FERNANDEZ-STEGER, Tomas M. ; ARNHARDT, Christian ; BILL, Ralf ; WALTER, Kai ; NIEMEYER, Frank: *SLEWS - Sensorbased Landslide Early Warning System*. <http://www.slews.de>, Abruf: 18.01.2011
- [GB] GOULD, John ; BELBEOCH, Mathieu: *ARGO - Global Ocean Sensor Network*. <http://www.argo.ucsd.edu>, Abruf: 18.01.2011
- [GKS03] GANERIWAL, Saurabh ; KUMAR, Ram ; SRIVASTAVA, Mani B.: Timing-Sync Protocol for Sensor Networks. In: *Proceedings of the 1st international Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys '03)*. New York, NY, USA : ACM, November 2003. – ISBN 1-58113-707-9, S. 138-149
- [GV01] GARDNER, Julian W. ; VARADAN, Vijay K.: *Microsensors, MEMS and Smart Devices*. New York, NY, USA : John Wiley & Sons, Inc., 2001. – ISBN 047186109X
- [GVL96] GOLUB, Gene H. ; VAN LOAN, Charles F.: *Matrix Computations*. 3rd. Baltimore, MD : John Hopkins University Press, 1996. – 694 S. – ISBN 0-8018-5413-X
- [HCB00] 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 (HICSS'00)*, 2000, S. 3005-3014
- [HHB⁺03] HE, Tian ; HUANG, Chengdu ; BLUM, Brian M. ; STANKOVIC, John A. ; ABDELZAHER, Tarek: Range-free localization schemes for large scale sensor networks. In: *Proceedings of the 9th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom '03)*. New York, NY, USA : ACM Press, September 2003, S. 81-95
- [HHL88] HEDETNIEMI, Sandra M. ; HEDETNIEMI, Stephen T. ; LIESTMAN, Arthur L.: A Survey of Gossiping and Broadcasting in Communication Networks. In: *Networks* 18 (1988), Nr. 4, S. 319-349. <http://dx.doi.org/10.1002/net.3230180406>. – DOI 10.1002/net.3230180406. – ISSN 1097-0037

- [HKL⁺06] HE, Tian ; KRISHNAMURTHY, Sudha ; LUO, Liqian ; YAN, Ting ; GU, Lin ; STOLERU, Radu ; ZHOU, Gang ; CAO, Qing ; VICAIRE, Pascal ; STANKOVIC, John A. ; ABDELZAHER, Tarek F. ; HUI, Jonathan ; KROGH, Bruce: VigilNet: An integrated sensor network system for energy-efficient surveillance. In: *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)* 2 (2006), Februar, Nr. 1, S. 1–38. – ISSN 1550–4859
- [HKS⁺04] HE, Tian ; KRISHNAMURTHY, Sudha ; STANKOVIC, John A. ; ABDELZAHER, Tarek ; LUO, Liqian ; STOLERU, Radu ; YAN, Ting ; GU, Lin ; HUI, Jonathan ; KROGH, Bruce: Energy-Efficient Surveillance System using Wireless Sensor Networks. In: *Proceedings of the 2nd International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services (MobiSys '04)*. New York, NY, USA : ACM, Juni 2004. – ISBN 1–58113–793–1, S. 270–283
- [HPJ03] HU, Y.-C. ; PERRIG, A. ; JOHNSON, D.B.: Packet Leashes: A Defense against Wormhole Attacks in Wireless Networks. In: *Proceedings of the 22nd Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM '03)* Bd. 3, 2003. – ISSN 0743–166X, S. 1976–1986
- [HR09] HUBER, P.J. ; RONCHETTI, E.: *Robust Statistics*. John Wiley & Sons, Inc., 2009. – ISBN 0470129905
- [HWLW08] HOFMANN-WELLENHOF, B. ; LICHTENEGGER, H. ; WASLE, E.: *GNSS – Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more*. Springer, 2008. – ISBN 3211730125
- [IGE00] INTANAGONWIWAT, Chalermek ; GOVINDAN, Ramesh ; ESTRIN, Deborah: Directed Diffusion: A Scalable and Robust Communication Paradigm for Sensor Networks. In: *Proceedings of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom '00)*. New York, NY, USA : ACM, August 2000. – ISBN 1–58113–197–6, S. 56–67
- [JBWL06] JEDERMANN, Reiner ; BEHRENS, Christian ; WESTPHAL, Detmar ; LANG, Walter: Applying Autonomous Sensor Systems in Logistics – Combining Sensor Networks, RFIDs and Software Agents. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 132 (2006), November, Nr. 1, S. 370–375. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2006.02.008>. – DOI 10.1016/j.sna.2006.02.008. – ISSN 0924–4247

- [JOW⁺02] 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: *ACM SIGOPS operating systems review* 36 (2002), Oktober, Nr. 5, S. 96–107. – ISSN 0163–5980
- [JPFWL04] JUNIOR, Waldir Ribeiro P. ; PAULA FIGUEIREDO, Thiago H. ; WONG, Hao C. ; LOUREIRO, Antonio A. F.: Malicious Node Detection in Wireless Sensor Networks. In: *Proceedings of the 18th International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS '04)* Bd. 01. Los Alamitos, CA, USA : IEEE Computer Society, April 2004. – ISBN 0–7695–2132–0, S. 24–30
- [JSS01] JAIKAE0, Chaiporn ; SRISATHAPORNPHAT, Chavalit ; SHEN, Chien-Chung: Diagnosis of Sensor Networks. In: *Proceedings of the 14th IEEE International Conference on Communications (ICC '01)*. Helsinki, Finland, Juni 2001, S. 1627–1632
- [KAB⁺05] KRISHNAMURTHY, L. ; ADLER, R. ; BUONADONNA, P. ; CHHABRA, J. ; FLANIGAN, M. ; KUSHALNAGAR, N. ; NACHMAN, L. ; YARVIS, M.: Design and Deployment of Industrial Sensor Networks: Experiences from a Semiconductor Plant and the North Sea. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys '05)* ACM, 2005. – ISBN 159593054X, S. 64–75
- [Kar72] KARP, R. M.: Reducibility Among Combinatorial Problems. In: MILLER, R. E. (Hrsg.) ; THATCHER, J. W. (Hrsg.): *Complexity of Computer Computations*. Plenum Press, 1972, S. 85–103
- [KHB02] KULIK, Joanna ; HEINZELMAN, Wendi ; BALAKRISHNAN, Hari: Negotiation-based Protocols for Disseminating Information in Wireless Sensor Networks. In: *Wireless Networks* 8 (2002), März, S. 169–185. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1013715909417>. – DOI 10.1023/A:1013715909417. – ISSN 1022–0038
- [KI03] KRISHNAMACHARI, Bhaskar ; IYENGAR, S.: Efficient and Fault-Tolerant Feature Extraction in Wireless Sensor Networks. In: *Information Processing in Sensor Networks* (2003), April, S. 488–501

- [KK00] KARP, Brad ; KUNG, H. T.: GPSR: Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Networks. In: *Proceedings of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom '00)*. New York, NY, USA : ACM, Januar 2000. – ISBN 1-58113-197-6, S. 243–254
- [KKP99] KAHN, J.M. ; KATZ, R.H. ; PISTER, K.S.J.: Next Century Challenges: Mobile Networking for Smart Dust. In: *Proceedings of the 5th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom '99)* ACM, 1999. – ISBN 1581131429, S. 271–278
- [KMB02] KINTNER-MEYER, M. ; BRAMBLEY, M.R.: Pros & cons of wireless. In: *ASHRAE journal* 44 (2002), November, Nr. 11, S. 54–61. – ISSN 0001-2491
- [Kno04] KNOT, Terry: Smart Surrogates. In: *BP Frontiers Magazine* 9 (2004), April, 6–10. http://www.bp.com/liveassets/bp_internet/globalbp/STAGING/global_assets/images/fr/downloads/Frontiers_magazine_issue_09_smart_surrogates.pdf
- [KR04] KAPPLER, Cornelia ; RIEGEL, Georg: A Real-World, Simple Wireless Sensor Network for Monitoring Electrical Energy Consumption. Version: 2004. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-24606-0_23. In: *Wireless Sensor Networks* Bd. 2920. Springer Berlin / Heidelberg, 2004. – DOI 10.1007/978-3-540-24606-0_23, S. 339–352
- [KS01] KUMAR, S. ; SHEPHERD, D.: SensIT: Sensor Information Technology for the Warfighter. In: *Proceedings of the 4th International Conference on Information Fusion (Fusion '01)*, 2001, S. 1–7
- [KSKT09] KORKALAINEN, M. ; SALLINEN, M. ; KARKKAINEN, N. ; TUKEVA, P.: Survey of Wireless Sensor Networks Simulation Tools for Demanding Applications. In: *Proceedings of the 5th International Conference on Networking and Services (ICNS '09)*, 2009, S. 102–106
- [Lac87] LACOSS, Richard T.: Distributed Mixed Sensor Aircraft Tracking. In: *Proceedings of the 6th American Control Conference (ACC '87)*, 1987, S. 1827–1830
- [LB09] LAURENDEAU, Christine ; BARBEAU, Michel: Relative Span Weighted Localization of Uncooperative Nodes in Wireless Networks. In: LIU, Benyuan (Hrsg.) ; BESTAVROS, Azer (Hrsg.) ; DU, Ding-Zhu (Hrsg.) ; WANG, Jie (Hrsg.): *Wireless Algorithms, Systems, and Applications* Bd. 5682. Springer Berlin / Heidelberg, 2009, S. 358–367

-
- [LBV06] LANGENDOEN, K. ; BAGGIO, A. ; VISSER, O.: Murphy loves Potatoes: Experiences from a Pilot Sensor Network Deployment in Precision Agriculture. In: *Proceedings of the 20th IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS '06)*, 2006, S. 1–8
- [LHS05] LI, Ning ; HOU, J.C. ; SHA, L.: Design and Analysis of an MST-based Topology Control Algorithm. In: *IEEE Transactions on Wireless Communications* 4 (2005), Mai, Nr. 3, S. 1195–1206. <http://dx.doi.org/10.1109/TWC.2005.846971>. – DOI 10.1109/TWC.2005.846971. – ISSN 1536–1276
- [LL04] LI, Jing ; LAZAROU, Georgios Y.: A Bit-Map-Assisted Energy-Efficient MAC Scheme for Wireless Sensor Networks. In: *Proceedings of the 3rd International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN '04)*. New York, NY, USA : ACM, April 2004. – ISBN 1–58113–846–6, S. 55–60
- [LNV⁺05] LÉDECZI, Ákos ; NÁDAS, András ; VÖLGYESI, Péter ; BALOGH, György ; KUSY, Branislav ; SALLAI, János ; PAP, Gábor ; DÓRA, Sebestyén ; MOLNÁR, Károly ; MARÓTI, Miklós ; SIMON, Gyula: Countersniper system for urban warfare. In: *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)* 1 (2005), November, Nr. 2, S. 153–177. – ISSN 1550–4859
- [LR02] LINDSEY, S. ; RAGHAVENDRA, C.S.: PEGASIS: Power-efficient Gathering in Sensor Information Systems. In: *Proceedings of the 6th IEEE Aerospace Conference (AeroConf '02)* Bd. 3, 2002, S. 1125–1130
- [LSL⁺03] LYNCH, J.P. ; SUNDARARAJAN, A. ; LAW, K.H. ; KIREMIDJIAN, A.S. ; CARRYER, E. ; SOHN, H. ; FARRAR, C.R.: Field validation of a wireless structural monitoring system on the Alamosa Canyon Bridge. In: *Proceedings of the SPIE Forum on Smart Structures and Materials* Bd. 5057, 2003, S. 267–278
- [LWHS02] LI, D. ; WONG, K. ; HU, Y.H. ; SAYEED, A.: Detection, classification and tracking of targets in distributed sensor networks. In: *IEEE Signal Processing Magazine* 19 (2002), Januar, Nr. 2, S. 17–29
- [MA01] MANJESHWAR, Arati ; AGRAWAL, Dharma P.: TEEN: A Routing Protocol for Enhanced Efficiency in Wireless Sensor Networks. In: *Proceedings of the 15th International Parallel & Distributed Processing Symposium (IPDPS '01)* Bd. 3. Los Alamitos, CA, USA : IEEE Computer Society, April 2001. – ISSN 1530–2075, S. 2009–2015
-

- [Mar06] MARTONOSI, M.: Embedded Systems in the Wild: Zebranet Software, Hardware, and Deployment Experiences. In: *ACM Sigplan Notices* 41 (2006), Juli, Nr. 7, S. 1. – ISSN 0362–1340
- [MBB⁺05] MAZUREK, J.A. ; BARGER, J.E. ; BRINN, M. ; MULLEN, R.J. ; PRICE, D. ; RITTER, S.E. ; SCHMITT, D.: Boomerang mobile counter shooter detection system. In: *Proceedings of 1st SPIE Defense, Security, and Sensing Symposium* Bd. 5778, 2005, S. 264–282
- [MCP⁺02] MAINWARING, Alan ; CULLER, David ; POLASTRE, Joseph ; SZEWCZYK, Robert ; ANDERSON, John: Wireless Sensor Networks for Habitat Monitoring. In: *Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA '02)*. New York, NY, USA : ACM, September 2002. – ISBN 1–58113–589–0, S. 88–97
- [MFA07] MAO, Guoqiang ; FIDAN, Barış ; ANDERSON, Brian D. O.: Wireless Sensor Network Localization Techniques. In: *Computer Networks* 51 (2007), Juli, S. 2529–2553. <http://dx.doi.org/10.1016/j.comnet.2006.11.018>. – DOI 10.1016/j.comnet.2006.11.018. – ISSN 1389–1286
- [MFHH02] MADDEN, Samuel ; FRANKLIN, Michael J. ; HELLERSTEIN, Joseph M. ; HONG, Wei: TAG: A Tiny AGgregation Service for Ad-Hoc Sensor Networks. In: *ACM SIGOPS Operating Systems Review* 36 (2002), Dezember, S. 131–146. <http://dx.doi.org/10.1145/844128.844142>. – DOI 10.1145/844128.844142. – ISSN 0163–5980
- [MH99] MURPHY, William S. ; HEREMAN, Willy: Determination of A Position in Three Dimensions using Trilateration and Approximate Distances / Colorado School of Mines. 1999. – Forschungsbericht
- [MLP⁺] MARTONOSI, Margaret ; LYON, Steve ; PEH, Li-Shiuan ; POOR, Vince ; RUBENSTEIN, Dan: *The ZebraNet Wildlife Tracker*. <http://www.princeton.edu/~mrm/zebranet.html>, Abruf: 18.01.2011
- [MMSS03] MICHAHELLES, Florian ; MATTER, Peter ; SCHMIDT, Albrecht ; SCHIELE, Bernt: Applying Wearable Sensors to Avalanche Rescue. In: *Computers & Graphics* 27 (2003), Dezember, Nr. 6, S. 839–847. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cag.2003.08.008>. – DOI 10.1016/j.cag.2003.08.008. – ISSN 0097–8493
- [MMY06] MARONNA, R.A. ; MARTIN, R.D. ; YOHAI, V.J.: *Robust Statistics: Theory and Methods*. John Wiley & Sons, Inc., 2006. – ISBN 0470010924

-
- [MNG05] MANJHI, Amit ; NATH, Suman ; GIBBONS, Phillip B.: Tributaries and Deltas: Efficient and Robust Aggregation in Sensor Network Streams. In: *Proceedings of the 32nd ACM SIGMOD International Conference on Management of Data (SIGMOD '05)*. New York, NY, USA : ACM, Juni 2005. – ISBN 1–59593–060–4, S. 287–298
- [MNS⁺03] MERRILL, W.M. ; NEWBERG, F. ; SOHRABI, K. ; KAISER, W. ; POTTIE, G.: Collaborative Networking Requirements for Unattended Ground Sensor Systems. In: *Proceedings of the 7th IEEE Aerospace Conference (AeroConf '03)* Bd. 5 IEEE, 2003. – ISBN 078037651X, S. 2153–2165
- [MOH04] MARTINEZ, K. ; ONG, R. ; HART, J.: Glacsweb: A Sensor Network for Hostile Environments. In: *Proceedings of the 1st Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON '04)* IEEE, 2004. – ISBN 0780387961, S. 81–87
- [MRWS03] MARSHALL, I. W. ; ROADKNIGHT, C. ; WOKOMA, I. ; SACKS., L.: Self-Organizing Sensor Networks. In: *Proceedings of the 1st UK-UbiNet Workshop (UbiNet '03)*. London, UK, September 2003, S. 1–2
- [NBB10] NIEMEYER, Frank ; BORN, Alexander ; BILL, Ralf: Analysing the Accuracy of Resource Aware Localisation Algorithms for Wireless Geosensor Networks. In: *Proceedings of the 9th International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences (Accuracy '10)*. Leicester, UK, Juli 2010, S. 45–49
- [NGSA08] NATH, Suman ; GIBBONS, Phillip B. ; SESHAN, Srinivasan ; ANDERSON, Zachary: Synopsis Diffusion for Robust Aggregation in Sensor Networks. In: *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)* 4 (2008), April, S. 7:1–7:40. <http://dx.doi.org/10.1145/1340771.1340773>. – DOI 10.1145/1340771.1340773. – ISSN 1550–4859
- [NN01] NICULESCU, D. ; NATH, B.: Ad hoc Positioning System (APS). In: *Proceedings of the 20th Global Telecommunications Conference (GLOBECOM '01)* Bd. 5, 2001, S. 2926–2931
- [NN03] NICULESCU, Dragos ; NATH, Badri: DV Based Positioning in Ad Hoc Networks. In: *Telecommunication Systems* 22 (2003), Januar, S. 267–280. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1023403323460>. – DOI 10.1023/A:1023403323460. – ISSN 1018–4864. – 10.1023/A:1023403323460
-

- [OBSC00] OKABE, A. ; BOOTS, B. ; SUGIHARA, K. ; CHI, S. N.: *Spatial Tessellations: Concepts and Applications of Voronoi Diagrams*. second. Chichester, UK : John Wiley & Sons, Inc., 2000
- [PCB00] PRIYANTHA, Nissanka B. ; CHAKRABORTY, Anit ; BALAKRISHNAN, Hari: The Cricket Location-Support System. In: *Proceedings of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom '00)*. New York, NY, USA : ACM, 2000. – ISBN 1-58113-197-6, S. 32-43
- [PCG⁺05] PAEK, J. ; CHINTALAPUDI, K. ; GOVINDAN, R. ; CAFFREY, J. ; MASRI, S.: A Wireless Sensor Network for Structural Health Monitoring: Performance and Experience. In: *Proceedings of the 2nd IEEE Workshop on Embedded Networked Sensors (EmNetS '05)* IEEE, 2005. – ISBN 0780392469, S. 1-10
- [PHC04] POLASTRE, J. ; HILL, J. ; CULLER, D.: Versatile Low Power Media Access for Wireless Sensor Networks. In: *Proceedings of the 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys '04)* Citeseer, 2004, S. 95-107
- [PKB] PISTER, Kris ; KAHN, Joe ; BOSER, Bernhard: *Smart Dust*. <http://robotics.eecs.berkeley.edu/~pister/SmartDust/>, Abruf: 18.01.2011
- [PLHQ07] PARADIS ; LILIA ; HAN ; QI: A Survey of Fault Management in Wireless Sensor Networks. In: *Journal of Network and Systems Management* 15 (2007), Juni, Nr. 2, S. 171-190. <http://dx.doi.org/10.1007/s10922-007-9062-0>. – DOI 10.1007/s10922-007-9062-0. – ISSN 1064-7570
- [PSJ04] PALCHAUDHURI, S. ; SAHA, A.K. ; JOHNSIN, D.B.: Adaptive Clock Synchronization in Sensor Networks. In: *Proceedings of the 3rd International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN '04)*, 2004, S. 340-348
- [PSW04] PERRIG, Adrian ; STANKOVIC, John ; WAGNER, David: Security in Wireless Sensor Networks. In: *Communications of the ACM* 47 (2004), Juni, S. 53-57. <http://dx.doi.org/10.1145/990680.990707>. – DOI 10.1145/990680.990707. – ISSN 0001-0782

- [PVSA04] PARK, Seung-Jong ; VEDANTHAM, Ramanuja ; SIVAKUMAR, Raghupathy ; AKYILDIZ, Ian F.: A Scalable Approach for Reliable Downstream Data Delivery in Wireless Sensor Networks. In: *Proceedings of the 5th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc '04)*. New York, NY, USA : ACM, Mai 2004. – ISBN 1–58113–849–0, S. 78–89
- [RAF⁺01] RABAEY, J. ; ARENS, E. ; FEDERSPIEL, C. ; GADGIL, A. ; MESSERSCHMITT, D. ; NAZAROFF, W. ; PISTER, K. ; OREN, S.: Smart Energy Distribution and Consumption: Information Technology as an Enabling Force / Center for Information Technology Research in the Interest of Society (CITRIS). Version: 2001. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.2.7688>. 2001. – Forschungsbericht
- [Rap02] RAPPAPORT, T.S.: *Wireless Communications Principles and Practice*. Prentice Hall PTR, 2002. – ISBN 0130422320
- [Ray] RAYTHEON BBN TECHNOLOGIES: *Boomerang shooter detection system*. <http://bbn.com/boomerang>, Abruf: 18.01.2011
- [RBTB06] REICHENBACH, Frank ; BORN, Alexander ; TIMMERMANN, Dirk ; BILL, Ralf: A Distributed Linear Least Squares Method for Precise Localization with Low Complexity in Wireless Sensor Networks. Version: 2006. http://dx.doi.org/10.1007/11776178_31. In: GIBBONS, Phillip (Hrsg.) ; ABDELZAHER, Tarek (Hrsg.) ; ASPNES, James (Hrsg.) ; RAO, Ramesh (Hrsg.): *Distributed Computing in Sensor Systems* Bd. 4026. Springer Berlin / Heidelberg, 2006. – DOI 10.1007/11776178_31. – ISBN 978–3–540–35227–3, S. 514–528
- [Req03] REQUICHA, A.A.G.: Nanorobots, NEMS, and Nanoassembly. In: *Proceedings of the IEEE* 91 (2003), November, Nr. 11, S. 1922–1933. <http://dx.doi.org/10.1109/JPROC.2003.818333>. – DOI 10.1109/JPROC.2003.818333. – ISSN 0018–9219
- [RLT08] REICHENBACH, F. ; LIECKFELDT, D. ; TIMMERMANN, D.: Using QR-Updating with Reduced Complexity for Precise Localization in Mobile Sensor Networks. In: *Proceedings of the 6th Annual Conference on Communication Networks and Services Research (CNSR '08)* IEEE, 2008, S. 432–439

- [RM04] RÖMER, K. ; MATTERN, F.: The Design Space of Wireless Sensor Networks. In: *IEEE Wireless Communications* 11 (2004), Dezember, Nr. 6, S. 54–61. <http://dx.doi.org/10.1109/MWC.2004.1368897>. – DOI 10.1109/MWC.2004.1368897. – ISSN 1536–1284
- [RT07] REICHENBACH, F. ; TIMMERMANN, D.: On Improving the Precision of Localization with Minimum Resource Allocation. In: *Proceedings of the 16th International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN '07)* IEEE, 2007. – ISSN 1095–2055, S. 1093–1098
- [RV04] RIEM-VIS, R.: Cold Chain Management using an Ultra Low Power Wireless Sensor Network. In: *Proceedings of the 1st Workshop on Applications of Mobile Embedded Systems (WAMES '04)*. Boston, USA, Juni 2004, S. 21–23
- [RWA⁺08] RHEE, Injong ; WARRIER, Ajit ; AIA, Mahesh ; MIN, Jeongki ; SICHITIU, Mihail L.: Z-MAC: A hybrid MAC for Wireless Sensor Networks. In: *IEEE/ACM Transactions on Networking* 16 (2008), Juni, S. 511–524. <http://dx.doi.org/10.1109/TNET.2007.900704>. – DOI 10.1109/TNET.2007.900704. – ISSN 1063–6692
- [RWR03] ROUNDY, Shad ; WRIGHT, Paul K. ; RABAEY, Jan M.: *Energy Scavenging for Wireless Sensor Networks with Special Focus on Vibrations*. Springer, 2003. – ISBN 978–1–4020–7663–3
- [SAY07] SENEL, F. ; AKKAYA, K. ; YOUNIS, M.: An Efficient Mechanism for Establishing Connectivity in Wireless Sensor and Actor Networks. In: *Proceedings of the 26th Global Telecommunications Conference (GLOBECOM '07)*, 2007, S. 1129–1133
- [SB10] SHELBY, Z. ; BORMANN, C.: *6LoWPAN: The Wireless Embedded Internet*. John Wiley & Sons, Inc., 2010. – ISBN 978–0–470–74799–5
- [SBK05] SUNDARARAMAN, Bharath ; BUY, Ugo ; KSHEMKALYANI, Ajay D.: Clock Synchronization for Wireless Sensor Networks: A Survey. In: *Ad Hoc Networks* 3 (2005), Mai, Nr. 3, S. 281–323. <http://dx.doi.org/10.1016/j.adhoc.2005.01.002>. – DOI 10.1016/j.adhoc.2005.01.002. – ISSN 1570–8705
- [SH03] STANN, F. ; HEIDEMANN, J.: RMST: Reliable Data Transport in Sensor Networks. In: *Proceedings of the 1st IEEE International Workshop on Sensor Network Protocols and Applications (SNPA '03)*, 2003, S. 102–112

- [SHK⁺06] SOBEIH, A. ; HOU, J.C. ; KUNG, Lu-Chuan ; LI, Ning ; ZHANG, Honghai ; CHEN, Wei-Peng ; TYAN, Hung-Ying ; LIM, Hyuk: J-Sim: A Simulation and Emulation Environment for Wireless Sensor Networks. In: *IEEE Wireless Communications* 13 (2006), August, Nr. 4, S. 104–119. <http://dx.doi.org/10.1109/MWC.2006.1678171>. – DOI 10.1109/MWC.2006.1678171. – ISSN 1536–1284
- [SHS01] SAVVIDES, A. ; HAN, C.C. ; STRIVASTAVA, M.B.: Dynamic fine-grained Localization in ad-hoc Networks of Sensors. In: *Proceedings of the 7th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom '01)* ACM, 2001. – ISBN 1581134223, S. 166–179
- [Sim03] SIMON, G.: *Prowler: Probabilistic Wireless Network Simulator*. Version: 2003. <http://www.isis.vanderbilt.edu/projects/nest/prowler>, Abruf: 18.01.2011
- [SKRT07] SALZMANN, J. ; KUBISCH, S. ; REICHENBACH, F. ; TIMMERMANN, D.: Energy and Coverage Aware Routing Algorithm in Self Organized Sensor Networks. In: *Proceedings of the 4th International Conference on Networked Sensing Systems (INSS '07)*, 2007, S. 77–80
- [SML⁺04] SIMON, Gyula ; MARÓTI, Miklós ; LÉDECZI, Ákos ; BALOGH, György ; KUSY, Branislav ; NÁDAS, András ; PAP, Gábor ; SALLAI, János ; FRAMPTON, Ken: Sensor Network-based Countersniper System. In: *Proceedings of the 2nd ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys '04)*. New York, NY, USA : ACM, November 2004. – ISBN 1–58113–879–2, S. 1–12
- [SMP99] SOHRABI, K. ; MANRIQUEZ, B. ; POTTIE, G.J.: Near Ground Wideband Channel Measurement in 800-1000 MHz. In: *Proceedings of the 49th IEEE Vehicular Technology Conference (VTC '09-Spring)* Bd. 1, 1999, S. 571–574
- [SMP01] SRIVASTAVA, Mani ; MUNTZ, Richard ; POTKONJAK, Miodrag: Smart Kindergarten: Sensor-Based Wireless Networks for Smart Developmental Problem-Solving Environments. In: *Proceedings of the 7th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom '01)*. New York, NY, USA : ACM, Juli 2001. – ISBN 1–58113–422–3, S. 132–138

- [SOJ05] SSU, Kuo-Feng ; OU, Chia-Ho ; JIAU, H.C.: Localization with mobile Anchor Points in Wireless Sensor Networks. In: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 54 (2005), Mai, Nr. 3, S. 1187–1197. <http://dx.doi.org/10.1109/TVT.2005.844642>. – DOI 10.1109/TVT.2005.844642. – ISSN 0018–9545
- [SR04] SHANG, Yi ; RUMML, W.: Improved MDS-based Localization. In: *Proceedings of the 23rd Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM '04)* Bd. 4, 2004. – ISSN 0743–166X, S. 2640–2651
- [SRL02] SAVARESE, C. ; RABAEY, J.M. ; LANGENDOEN, K.: Robust Positioning Algorithms for Distributed Ad-Hoc Wireless Sensor Networks. In: *Proceedings of the 13th USENIX Annual Technical Conference (USENIX '02)* USENIX Association, 2002. – ISBN 1880446006, S. 317–327
- [SRZF03] SHANG, Yi ; RUMML, Wheeler ; ZHANG, Ying ; FROMHERZ, Markus P. J.: Localization from Mere Connectivity. In: *Proceedings of the 4th ACM International Symposium on Mobile ad hoc Networking & Computing (MobiHoc '03)*. New York, NY, USA : ACM, Juni 2003. – ISBN 1–58113–684–6, S. 201–212
- [SSSA11] SIR, Mustafa Y. ; SENTURK, Izzet F. ; SISIKOGLU, Esra ; AKKAYA, Kemal: An Optimization-based Approach for Connecting Partitioned Mobile Sensor/Actuator Networks. In: *Proceedings of the 30th IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM '11)*, 2011, S. 525–530
- [SSW] STANKOVIC, Jack ; SON, Sang ; WHITEHOUSE, Kamin: *AlarmNet - Wireless Sensor Networks for Smart Healthcare*. <http://www.cs.virginia.edu/wsn/medical/>, Abruf: 18.01.2011
- [SY04] SIVRIKAYA, F. ; YENER, B.: Time Synchronization in Sensor Networks: A Survey. In: *IEEE Network* 18 (2004), Juli–August, Nr. 4, S. 45–50. <http://dx.doi.org/10.1109/MNET.2004.1316761>. – DOI 10.1109/MNET.2004.1316761. – ISSN 0890–8044

- [TPS⁺05] TOLLE, Gilman ; POLASTRE, Joseph ; SZEWCZYK, Robert ; CULLER, David ; TURNER, Neil ; TU, Kevin ; BURGESS, Stephen ; DAWSON, Todd ; BUONADONNA, Phil ; GAY, David ; HONG, Wei: A Macroscopic in the Redwoods. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys '05)*. New York, NY, USA : ACM, November 2005. – ISBN 1–59593–054–X, S. 51–63
- [Uni78] UNIVERSITY, Carnegie M. (Hrsg.): *Proceedings of the Distributed Sensor Nets Workshop*. Pittsburgh, PA, 1978 . – Dept. Comput. Sci., Carnegie Mellon University
- [U.S] U.S. DEPARTMENT OF ENERGY OFFICE OF SCIENCE: *The Artificial Retina Project*. <http://artificialretina.energy.gov>, Abruf: 18.01.2011
- [VA06] VURAN, Mehmet C. ; AKYILDIZ, Ian F.: Spatial Correlation-Based Collaborative Medium Access Control in Wireless Sensor Networks. In: *IEEE/ACM Transactions on Networking* 14 (2006), April, S. 316–329. <http://dx.doi.org/10.1109/TENT.2006.872544>. – DOI 10.1109/TENT.2006.872544. – ISSN 1063–6692
- [VH08] VARGA, András ; HORNIG, Rudolf: An Overview of the OMNeT++ Simulation Environment. In: *Proceedings of the 1st International Conference on Simulation Tools and Techniques for Communications, Networks and Systems (SIMUTools '08)*. ICST, Brussels, Belgium, Belgium : ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering), März 2008. – ISBN 978–963–9799–20–2, S. 60:1–60:10
- [WAP01] WARNEKE, B. ; ATWOOD, B. ; PISTER, K.S.J.: Smart dust mote forerunners. In: *Proceedings of the 14th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS '01)*, 2001, S. 357–360
- [Wat02] WATKINS, David S.: *Fundamentals of Matrix Computations*. Second. New York : Wiley-Interscience [John Wiley & Sons], 2002 (Pure and Applied Mathematics). – ISBN 0–471–21394–2
- [WCDWG] WELSH, Matt ; CHEN, Bor rong ; DANTU, Karthik ; WISSNER-GROSS, Alex: *CodeBlue - Wireless Sensors for Medical Care*. <http://fiji.eecs.harvard.edu/CodeBlue>, Abruf: 18.01.2011

- [WCK05] WAN, C.-Y. ; CAMPBELL, A.T. ; KRISHNAMURTHY, L.: Pump-slowly, Fetch-quickly (PSFQ): A reliable Transport Protocol for Sensor Networks. In: *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 23 (2005), April, Nr. 4, S. 862–872. <http://dx.doi.org/10.1109/JSAC.2005.843554>. – DOI 10.1109/JSAC.2005.843554. – ISSN 0733–8716
- [WCS⁺07] WARK, Tim ; CORKE, Peter ; SIKKA, Pavan ; KLINGBEIL, Lasse ; GUO, Ying ; CROSSMAN, Chris ; VALENCIA, Phil ; SWAIN, Dave ; BISHOP-HURLEY, Greg: Transforming Agriculture through Pervasive Wireless Sensor Networks. In: *IEEE Pervasive Computing* 6 (2007), April, Nr. 2, S. 50–57. <http://dx.doi.org/10.1109/MPRV.2007.47>. – DOI 10.1109/MPRV.2007.47. – ISSN 1536–1268
- [WEC03] WAN, Chieh-Yih ; EISENMAN, Shane B. ; CAMPBELL, Andrew T.: CODA: Congestion Detection and Avoidance in Sensor Networks. In: *Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys '03)*. New York, NY, USA : ACM, November 2003 (SenSys '03). – ISBN 1–58113–707–9, S. 266–279
- [WFW08] WYMEERSCH, H. ; FERNER, U. ; WIN, M.: Cooperative Bayesian Self-Tracking for Wireless Networks. In: *IEEE Communications Letters* 12 (2008), Juli, Nr. 7, S. 505–507. – ISSN 1089–7798
- [WLLP01] WARNEKE, B. ; LAST, M. ; LIEBOWITZ, B. ; PISTER, K.S.J.: Smart Dust: Communicating with a cubic-millimeter Computer. In: *Computer* 34 (2001), Januar, Nr. 1, S. 44–51. <http://dx.doi.org/10.1109/2.895117>. – DOI 10.1109/2.895117. – ISSN 0018–9162
- [WLW⁺06] WERNER-ALLEN, Geoffrey ; LORINCZ, Konrad ; WELSH, Matt ; MARCILLO, Omar ; JOHNSON, Jeff ; RUIZ, Mario ; LEES, Jonathan: Deploying a Wireless Sensor Network on an Active Volcano. In: *IEEE Internet Computing* 10 (2006), März, Nr. 2, S. 18–25. <http://dx.doi.org/10.1109/MIC.2006.26>. – DOI 10.1109/MIC.2006.26. – ISSN 1089–7801
- [WLW09] WYMEERSCH, H. ; LIEN, J. ; WIN, M.Z.: Cooperative Localization in Wireless Networks. In: *Proceedings of the IEEE* 97 (2009), Februar, Nr. 2, S. 427–450. – ISSN 0018–9219
- [WP08] WU, H. ; PAN, Y.: *Medium Access Control in Wireless Networks*. Nova Science Publishers, 2008. – ISBN 1600219446

-
- [WSL⁺06] WANG, Chonggang ; SOHRABY, K. ; LI, Bo ; DANESHMAND, M. ; HU, Yueming: A Survey of Transport Protocols for Wireless Sensor Networks. In: *IEEE Network* 20 (2006), Mai–Juni, Nr. 3, S. 34–40. <http://dx.doi.org/10.1109/MNET.2006.1637930>. – DOI 10.1109/MNET.2006.1637930. – ISSN 0890–8044
- [WSV⁺08] WOOD, A. ; STANKOVIC, J. ; VIRONE, G. ; SELAVO, L. ; HE, Z. ; CAO, Q. ; DOAN, T. ; WU, Y. ; FANG, L. ; STOLERU, R.: Context-Aware Wireless Sensor Networks for Assisted Living and Residential Monitoring. In: *IEEE Network* 22 (2008), Juli–August, Nr. 4, S. 26–33. – ISSN 0890–8044
- [WSW08] WIN, M.Z. ; SHEN, Y. ; WYMEERSCH, H.: On the Position Error Bound in Cooperative Networks: A Geometric Approach. In: *Proceedings of the 10th International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications (ISSSTA'08)* IEEE, 2008, S. 637–643
- [WZW06] WANG, Ning ; ZHANG, Naiqian ; WANG, Maohua: Wireless Sensors in Agriculture and Food Industry – Recent Development and Future Perspective. In: *Computers and Electronics in Agriculture* 50 (2006), Januar, Nr. 1, S. 1–14. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2005.09.003>. – DOI 10.1016/j.compag.2005.09.003. – ISSN 0168–1699
- [XHE01] XU, Ya ; HEIDEMANN, John ; ESTRIN, Deborah: Geography-informed Energy Conservation for Ad Hoc Routing. In: *Proceedings of the 7th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom '01)*. New York, NY, USA : ACM, Juli 2001. – ISBN 1–58113–422–3, S. 70–84
- [XLY⁺07] XUE, Yunjiao ; LEE, Ho S. ; YANG, Ming ; KUMARAWADU, P. ; GHENNIWA, H.H. ; SHEN, Weiming: Performance Evaluation of NS-2 Simulator for Wireless Sensor Networks. In: *Proceedings of the 20th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE '07)*, 2007. – ISSN 0840–7789, S. 1372–1375
- [Xu07] XU, G.: *GPS: Theory, Algorithms, and Applications*. Springer Verlag, 2007. – ISBN 3540727140
- [YCLZ01] YE, Fan ; CHEN, A. ; LU, Songwu ; ZHANG, Lixia: A Scalable Solution to Minimum Cost Forwarding in Large Sensor Networks. In: *Proceedings of the 10th International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN '01)*, 2001, S. 304–309
-

- [YG02] YAO, Yong ; GEHRKE, Johannes: The Cougar Approach to In-Network Query Processing in Sensor Networks. In: *ACM SIGMOD Record* 31 (2002), September, Nr. 3, S. 9–18. <http://dx.doi.org/10.1145/601858.601861>. – DOI 10.1145/601858.601861. – ISSN 0163–5808
- [YGE01] YU, Yan ; GOVINDAN, Ramesh ; ESTRIN, Deborah: Geographical and Energy Aware Routing: A Recursive Data Dissemination Protocol for Wireless Sensor Networks / University of California Los Angeles (UCLA) Computer Science Department. 2001. – Forschungsbericht
- [YHE02] YE, Wei ; HEIDEMANN, J. ; ESTRIN, D.: An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks. In: *Proceedings of the 21st Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM '02)* Bd. 3, 2002. – ISSN 0743–166X, S. 1567–1576
- [YKR06] YOUNIS, O. ; KRUNZ, M. ; RAMASUBRAMANIAN, S.: Node Clustering in Wireless Sensor Networks: Recent Developments and Deployment Challenges. In: *IEEE Network* 20 (2006), Mai–Juni, Nr. 3, S. 20–25. <http://dx.doi.org/10.1109/MNET.2006.1637928>. – DOI 10.1109/MNET.2006.1637928. – ISSN 0890–8044
- [YWM05] YU, Liyang ; WANG, Neng ; MENG, Xiaoqiao: Real-time Forest Fire Detection with Wireless Sensor Networks. In: *Proceedings of the 1st International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM '05)* Bd. 2, 2005, S. 1214–1217
- [ZC03] ZOU, Y. ; CHAKRABARTY, Krishnendu: Sensor Deployment and Target Localization based on Virtual Forces. In: *22nd Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM '03)* Bd. 2, 2003. – ISSN 0743–166X, S. 1293–1303
- [ZFK09] ZHANG, Ying ; FROMHERZ, Markus ; KUHN, Luks: *Rmase: Routing modeling application simulation environment*. Version: 2009. <http://www2.parc.com/is1/groups/era/nest/Rmase/>, Abruf: 18.01.2011
- [ZLHK08] ZHANG, Junguo ; LI, Wenbin ; HAN, Ning ; KAN, Jiangming: Forest Fire Detection System based on a ZigBee Wireless Sensor Network. In: *Frontiers of Forestry in China* 3 (2008), September, Nr. 3, S. 369–374. <http://dx.doi.org/10.1007/s11461-008-0054-3>. – DOI 10.1007/s11461-008-0054-3. – ISSN 1673–3517. – 10.1007/s11461-008-0054-3

- [ZRS05] ZHENG, T. ; RADHAKRISHNAN, S. ; SARANGAN, V.: PMAC: An Adaptive Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks. In: *Proceedings of the 19th IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS '05)*, 2005, S. 237–244

Eigene Arbeiten

Zitierte Veröffentlichungen

- [BBS⁺11] BEHNKE, Ralf ; BORN, Alexander ; SALZMANN, Jakob ; TIMMERMANN, Dirk ; BILL, Ralf: Combining Scalability and Resource Awareness in Wireless Sensor Network Localization. In: *Proceedings of the 30th IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM '11)*, 2011, S. 531–536
- [BSG⁺09] BEHNKE, Ralf ; SALZMANN, Jakob ; GROSSMANN, Ralf ; LIECKFELDT, Dominik ; TIMMERMANN, Dirk ; THUROW, Kerstin: Strategies to overcome Border Area Effects of Coarse Grained Localization. In: *Proceedings of the 6th Workshop on Positioning, Navigation and Communication 2009 (WPNC'09)*, 2009. – ISBN 978–1–4244–3292–9, S. 95–102
- [BSGT11] BEHNKE, Ralf ; SALZMANN, Jakob ; GORSKI, Philipp ; TIMMERMANN, Dirk: HDLS: Improved Localization via Algorithm Fusion. In: *Proceedings of the 5th International Conference on Sensor Technologies and Applications (SENSORCOMM '11)* IARIA, Xpert Publishing Services, August 2011. – ISBN 978–1–61208–010–9, S. 36–44
- [BSGT12] BEHNKE, Ralf ; SALZMANN, Jakob ; GORSKI, Philipp ; TIMMERMANN, Dirk: Evaluation of Hybrid Distributed Least Squares for Improved Localization via Algorithm Fusion in Wireless Sensor Networks. In: *Sensors & Transducers journal, Special Issue 14-2* (2012), März, S. 179–195. – ISSN 1726–5479
- [BSL⁺09] BEHNKE, Ralf ; SALZMANN, Jakob ; LIECKFELDT, Dominik ; GOLATOWSKI, Frank ; TIMMERMANN, Dirk ; THUROW, Kerstin: Exploiting Malicious Node Detection for Lifetime Extension of Sensor Networks. In: *Proceedings of the 6th Annual IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC '09)*, 2009. – ISBN 978–1–4244–2309–5, S. 1–2

- [BSLT09] BEHNKE, Ralf ; SALZMANN, Jakob ; LIECKFELDT, Dominik ; TIMMERMANN, Dirk: sDLS - Distributed Least Squares Localization for Large Wireless Sensor Networks. In: *Proceedings of the 1st International Conference on Ultra Modern Telecommunications (ICUMT '09)*, 2009. – ISBN 978–1–4244–3941–6, S. 1–6
- [BSST10] BEHNKE, Ralf ; SALZMANN, Jakob ; SIMANOWSKI, Stephan ; TIMMERMANN, Dirk: Efficient Localized Detection of Erroneous Nodes (ELDEN). In: *Proceedings of the 10th IEEE International Conference on Computer and Information Technology (CIT '10)*, 2010. – ISBN 978–0–7695–4108–2, S. 2884–2890
- [BST09a] BEHNKE, Ralf ; SALZMANN, Jakob ; TIMMERMANN, Dirk: Minimizing Cost of Scalable Distributed Least Squares Localization. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on New Technologies, Mobility and Security (NTMS '09)*, IEEE Computer Society, Dezember 2009. – ISBN 978–1–4244–6273–5, S. 1–5
- [BST09b] BEHNKE, Ralf ; SALZMANN, Jakob ; TIMMERMANN, Dirk: SBCL - Improved Centroid Estimation. In: *Proceedings of the 1st International Conference on Ultra Modern Telecommunications (ICUMT '09)*, 2009. – ISBN 978–1–4244–3941–6, S. 1–6
- [BST09c] BEHNKE, Ralf ; SALZMANN, Jakob ; TIMMERMANN, Dirk: sDLSnd - Scalable Distributed Least Squares Localization with reduced Complexity. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on New Technologies, Mobility and Security (NTMS '09)*, IEEE Computer Society, Dezember 2009. – ISBN 978–1–4244–6273–5, S. 1–5
- [BST10a] BEHNKE, Ralf ; SALZMANN, Jakob ; TIMMERMANN, Dirk: Improvements on Scalable Distributed Least Squares Localization for Large Wireless Sensor Networks. In: *Proceedings of the 5th IEEE International Symposium on Wireless Pervasive Computing (ISWPC'2010)*, 2010. – ISBN 978–1–4244–6857–7, S. 273–277
- [BST10b] BEHNKE, Ralf ; SALZMANN, Jakob ; TIMMERMANN, Dirk: sDLSne - Improved Scalable Distributed Least Squares Localization with minimized Communication. In: *Proceedings of the 21st Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC '10)*, 2010. – ISBN 978–0–4244–8015–9, S. 1695–1700

- [BT08] BEHNKE, Ralf ; TIMMERMANN, Dirk: AWCL: Adaptive Weighted Centroid Localization as an efficient improvement of Coarse Grained Localization. In: *Proceedings of the 5th Workshop on Positioning, Navigation and Communication 2008 (WPNC '08)*, 2008. – ISBN 978-1-4244-1798-8, S. 243–250
- [SBGT09] SALZMANN, Jakob ; BEHNKE, Ralf ; GAG, Martin ; TIMMERMANN, Dirk: 4-MASCLE – Improved Coverage Aware Clustering with Self Healing Abilities. In: *Proceedings of the 1st International Symposium on Multidisciplinary Autonomous Networks and Systems (MANS '09)*, IEEE Computer Society, Juli 2009. – ISBN 978-0-7695-3737-5/09, S. 537–543
- [SBGT11] SALZMANN, Jakob ; BEHNKE, Ralf ; GORSKI, Philipp ; TIMMERMANN, Dirk: HyPAERLoc: Plausible Hybrid Localization for Wireless Sensor Networks. In: *Proceedings of the 5th International Conference on Sensor Technologies and Applications (SENSORCOMM '11)* IARIA, Xpert Publishing Services, August 2011. – ISBN 978-1-61208-010-9, S. 51–57
- [SBLT07] SALZMANN, Jakob ; BEHNKE, Ralf ; LIECKFELDT, Dominik ; TIMMERMANN, Dirk: 2-MASCLE – A Coverage Aware Clustering Algorithm with Self Healing Abilities. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing (ISSNIP '07)*, 2007. – ISBN 1-4244-1502-0, S. 739–744
- [SBT08b] SALZMANN, Jakob ; BEHNKE, Ralf ; TIMMERMANN, Dirk: A Self-Organized Localization-Free Clustering Approach for Redundancy Exploitation in Large Wireless Sensor Networks. In: *GI Jahrestagung, Workshop: Adaptive und organische Systeme*, 2008. – ISBN 978-3-88579-228-4, S. 747–754
- [SBT10a] SALZMANN, Jakob ; BEHNKE, Ralf ; TIMMERMANN, Dirk: Redundancy Aware Clustering via Centroid Localization Technique. In: *Proceedings of the 23rd International Conference on Architecture of Computing Systems (ARCS '10)*, 2010. – ISBN 978-3-8007-3222-7, S. 1–7
- [SBT10b] SALZMANN, Jakob ; BEHNKE, Ralf ; TIMMERMANN, Dirk: Tessellating Cell Shapes for Geographical Clustering. In: *Proceedings of the 10th International Conference on Computer and Information Technology (CIT '10)*, IEEE Computer Society, Juni–Juli 2010. – ISBN 978-0-7695-4108-2, S. 2891–2896

- [SBT11a] SALZMANN, Jakob ; BEHNKE, Ralf ; TIMMERMANN, Dirk: Hex-MASCLE - Hexagon based Clustering with Self Healing Abilities. In: *Proceedings of the 12th IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC '11)*, 2011, S. 528–533
- [SBT11b] *Kapitel* OC Principles in Wireless Sensor Networks. In: SALZMANN, Jakob ; BEHNKE, Ralf ; TIMMERMANN, Dirk: *Organic Computing - A Paradigm Shift for Complex Systems*. Birkhauser Verlag AG, 2011 (Autonomic Systems Series). – ISBN 9783034801294
- [SBYT09] SALZMANN, Jakob ; BEHNKE, Ralf ; YOU, Jiaxi ; TIMMERMANN, Dirk: Free-CLASH – Improved Localization Free Clustering in Large Wireless Sensor Networks. In: *Proceedings of the 1st International Conference on Ultra Modern Telecommunications (ICUMT '09)*, 2009. – ISBN 978-1-4244-3941-6, S. 1–6
- [ZBH⁺09] ZEEB, Elmar ; BEHNKE, Ralf ; HESS, Christian ; TIMMERMANN, Dirk ; GOLATOWSKI, Frank ; THUROW, Kerstin: Generic Sensor Network Gateway Architecture for Plug and Play Data Management in Smart Laboratory Environments. In: *Proceedings of the 14th IEEE Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA '09)*, 2009. – ISSN 1946-0759, S. 1–8

Weitere Veröffentlichungen

- [BG07] BEHNKE, Ralf ; GOLATOWSKI, Frank: Drahtlose Sensornetzwerke in der Life Science Automation / Universität Rostock. 2007. – Forschungsbericht
- [BGB⁺09] *Kapitel* Developing and Testing of Software for Wireless Sensor Networks. In: BLUMENTHAL, Jan ; GOLATOWSKI, Frank ; BEHNKE, Ralf ; PRÜTER, Steffen ; TIMMERMANN, Dirk: *Networked Embedded Systems*. CRC Press, 2009 (Embedded Systems Handbook). – ISBN 978-1-4398-0761-3, S. 12-1–12-36
- [BGTT07] BEHNKE, Ralf ; GOLATOWSKI, Frank ; THUROW, Kerstin ; TIMMERMANN, Dirk: Wireless Sensor Networks for Life Science Automation. In: *Proceedings of the 5th International Forum Life Science Automation (LSA '07)*, 2007. – ISBN 978-3-938042-12-0, S. 1–5

- [BSG⁺08] BEHNKE, Ralf ; SALZMANN, Jakob ; GOLATOWSKI, Frank ; THUROW, Kerstin ; TIMMERMANN, Dirk: Integration and Combination of Wireless Sensor Networks for Life Science Automation. In: *Proceedings of the 6th International Forum Life Science Automation (LSA '08)*, 2008. – ISBN 978-3-938042-17-5, S. 72
- [BSZ⁺09] BEHNKE, Ralf ; SALZMANN, Jakob ; ZEEB, Elmar ; GOLATOWSKI, Frank ; TIMMERMANN, Dirk ; THUROW, Kerstin: Wireless Sensor Networks in Life Science Automation. In: *Proceedings of the 7th International Forum Life Science Automation (LSA '09)*, 2009. – ISBN 978-3-938042-23-6, S. 53
- [BVT07] BEHNKE, Ralf ; VERSICK, Daniel ; TAVANGARIAN, Djamshid: Leistungsvermessung von I/O Systemen mit der MPI-IO-Schnittstelle. In: *Proceedings des 2. Workshops Kommunikation in Clusterrechnern und Clusterverbundsystemen (KiCC '07)*, 2007, S. 1–6
- [GGB⁺10] GORSKI, Philipp ; GOLATOWSKI, Frank ; BEHNKE, Ralf ; FABIAN, Christian ; THUROW, Kerstin ; TIMMERMANN, Dirk: Wireless Sensor Networks in Life Science Applications. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Human System Interaction (HSI '10)*, 2010, S. 594–598
- [LYB⁺09] LIECKFELDT, Dominik ; YOU, Jiayi ; BEHNKE, Ralf ; SALZMANN, Jakob ; TIMMERMANN, Dirk: Assessing the Energy Efficiency of Localization in Wireless Sensor Networks. In: *Proceedings of the 6th Annual IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC '09)*, IEEE eXpress Conference Publishing, Januar 2009. – ISBN 978-1-4244-2309-5, S. 1–2
- [LYS⁺09] LIECKFELDT, Dominik ; YOU, Jiayi ; SALZMANN, Jakob ; BEHNKE, Ralf ; TIMMERMANN, Dirk: Characterizing the Energy Efficiency of Localization Algorithms in Wireless Sensor Networks. In: *Proceedings of the 5th International Conference on Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC '09)*, 2009. – ISBN 978-1-60558-569-7, S. 839–843
- [SBT07a] SALZMANN, Jakob ; BEHNKE, Ralf ; TIMMERMANN, Dirk: Analyse regelmäßiger Clusterformen in Sensornetzwerken. In: *Proceedings des 12. Symposiums Maritime Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik*, 2007, S. 375–380

- [SBT07b] SALZMANN, Jakob ; BEHNKE, Ralf ; TIMMERMANN, Dirk: Geographical Clustering with Coarse-Grained Localization. In: *Proceedings of the 5th International Forum Life Science Automation (LSA '07)* LSA, 2007. – ISBN 978-3-938042-12-0
- [SBT08a] SALZMANN, Jakob ; BEHNKE, Ralf ; TIMMERMANN, Dirk: A Localization-Free Wireless Sensor Network Clustering Approach with Convergence to Uniformity. In: *Proceedings of the 6th International Forum Life Science Automation (LSA '08)*, 2008. – ISBN 978-3-938042-17-5, S. 81
- [SBT08c] SALZMANN, Jakob ; BEHNKE, Ralf ; TIMMERMANN, Dirk: Organic Algorithms for Complex Networks. In: *Proceedings of the 8th Colloquium of the SPP 1183 Organic Computing (OC '08)*, 2008, S. 1–5
- [SBT09a] SALZMANN, Jakob ; BEHNKE, Ralf ; TIMMERMANN, Dirk: Anticipatory Route Change Algorithm for Robust Self-Organized Sensor Networks. In: *Proceedings of the 7th International Forum Life Science Automation (LSA '09)* LSA, 2009. – ISBN 978-3-938042-23-6, S. 54
- [SBT09b] SALZMANN, Jakob ; BEHNKE, Ralf ; TIMMERMANN, Dirk: Organic Sensor Networks. In: *Proceedings of the 9th Colloquium of the SPP 1183 Organic Computing (OC '09)*, 2009, S. 1–5
- [WGG⁺10] WAGNER, Benjamin ; GORSKI, Philipp ; GOLATOWSKI, Frank ; BEHNKE, Ralf ; TIMMERMANN, Dirk ; THUROW, Kerstin: Location based Wireless Sensor Services in Life Science Automation. In: *Proceedings of the 4th International Conference on Real-World Wireless Sensor Networks (REALWSN '10)*, 2010, S. 82–93
- [ZBGT09] ZEEB, Elmar ; BEHNKE, Ralf ; GOLATOWSKI, Frank ; TIMMERMANN, Dirk: WS4D-SensorWeb - a generic sensor network gateway architecture. In: *Proceedings of the 7th International Forum Life Science Automation (LSA '09)*, 2009. – ISBN 978-3-938042-23-6, S. 55

Thesen

1. Bestehende Teilaufgaben in drahtlosen Sensornetzwerken, wie beispielsweise die Positionsbestimmung, die Clusterbildung und die Fehlerdetektion stehen in einem engen Verhältnis zueinander und können bei gemeinsamer Betrachtung effizienter gelöst werden.
2. Positionsschätzungsverfahren in drahtlosen Sensornetzwerken bieten eine kostengünstige Alternative zu Satellitennavigationssystemen, um Verfahren des Routings oder des Clusterings mit notwendigen Ortsinformationen zu versorgen.
3. Das in der vorliegenden Arbeit entwickelte sDLS-Verfahren ermöglicht mittels individueller Vorberechnungen den Einsatz des DLS-Ansatzes in beliebig großen Sensornetzwerken.
4. Das in der vorliegenden Arbeit entwickelte sDLS-Verfahren bietet einen geringeren Fehler der Positionsschätzung als das zugrunde liegende DLS-Verfahren, bei gleichzeitiger Reduktion der mittleren Kosten, welche unabhängig von der Netzwerkgröße sind.
5. Algorithmen zur Positionsbestimmung wie das DLS-Verfahren und das sDLS-Verfahren bewirken aufgrund der genutzten Linearumformung eine Übergewichtung eines einzelnen Referenzknotens. Während sich dies im Fall von DLS meist negativ auswirkt, vermag das sDLS-Verfahren diesen Umstand positiv zu nutzen.
6. Unter ungünstigen Bedingungen bezüglich Geometrie und Genauigkeit der verwendeten Distanzinformation können durch die Anwendung von exakten Lokalisierungsverfahren höhere Fehler verursacht werden als durch die Verwendung approximativer Verfahren. Exakte Verfahren können daher durch die Kombination mit approximativen Verfahren verbessert werden.
7. Mittels Reduktion der zur approximativen Positionsbestimmung auf Basis des gewichteten Mittelwertes verwendeten Gewichte, bewirkt das AWCL-Verfahren eine Steigerung der Genauigkeit sowie eine höhere Robustheit gegenüber auftretenden Abweichungen von den Idealwerten der Modellvorstellung.
8. Durch Hinzunahme einfacher, grobkörniger Informationen bezüglich der Netzgeometrie ermöglicht der SBCL-Ansatz eine Steigerung der Genauigkeit der Positionsschätzung gegenüber dem zugrunde liegenden CL-Ansatz.
9. Durch die Kombination unterschiedlicher Einzelschätzungen des exakten sDLS-Ansatzes unter Verwendung des approximativen AWCL-Ansatzes wird, in dem als

HDLS bezeichneten Verfahren, eine genauere Positionsschätzung erreicht, als es durch den sDLS-Ansatz allein möglich ist.

10. Das geografische Clustering setzt Ortsinformationen mit hoher Genauigkeit voraus, um Sensorknoten anhand einer groben räumlichen Struktur zu gruppieren. Das BBC-Verfahren ermöglicht eine vergleichbare Gruppierung von Sensorknoten in geografische Cluster durch Techniken der approximativen Lokalisierung, ohne die Notwendigkeit einer Positionsbestimmung.
11. Das Prinzip des 2-MASCLE-Clusterings ermöglicht eine räumliche und zeitliche Unterteilung von Sensorknoten und bietet besondere Flexibilität aufgrund des vorhandenen Heilungsmechanismus.
12. Das entwickelte ELDEN-Verfahren stellt eine universelle Möglichkeit zur Detektion von Fehlern in erhobenen Daten dar. Das Verfahren bietet eine ähnlich hohe Sensitivität aber eine wesentlich geringere Ausfallrate als vergleichbare Verfahren, bei gleichzeitiger Reduktion von Kommunikations- und Berechnungsaufwand.
13. Zusätzliche Informationen über fehlerhafte oder eingeschränkte kommunikative oder sensorische Fähigkeiten einzelner Sensorknoten können dazu verwendet werden, die Rollenverteilung innerhalb des Netzwerks situationsgerecht anzupassen und somit die Funktionalität des Netzwerks länger zu erhalten.

Ralf Behnke

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die Dissertation zum Thema

**Effiziente Algorithmen der Positionsbestimmung und positionsbasierte
Kontextgewinnung zur Selbstorganisation in drahtlosen Sensornetzwerken**

vollkommen selbst verfasst habe und zu ihrer Anfertigung keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel und Quellen verwendet habe.

Rostock, 01.07.2013

Lebenslauf

Persönliche Daten

Nachname: Behnke
Vorname: Ralf
Adresse: Kurt-Tucholsky-Str. 16
18059 Rostock
E-Mail: Ralf.Behnke@googlemail.com
Geburtsdatum: 29.11.1980
Geburtsort: Berlin

Ausbildung, Wehrdienst

12/2006 – 06/2011 Universität Rostock – Promotionsstudium
10/2001 – 11/2006 Universität Rostock – Studium der Technischen Informatik
11/2006 Diplom (Technische Informatik)
02/2005 Bachelor of Science
07/2000 – 09/2001 Grundwehrdienst, Prangendorf, Mecklenburg-Vorpommern
09/1993 – 07/2000 4. Gymnasium Hellersdorf, Berlin
06/2000 Abitur

Berufserfahrungen

07/2011 – heute Softwareentwickler bei der SIV.AG
02/2007 – 06/2011 Wissenschaftlicher Mitarbeiter der Universität Rostock
01/2007 – 01/2007 Softwareingenieur bei der AIG Analytical Instrument GmbH
10/2005 – 03/2006 Praktikant bei der BMW Forschung und Technik GmbH
01/2004 – 03/2005 Studentische Hilfskraft der Universität Rostock
04/2003 – 12/2003 Studentische Hilfskraft der Universität Rostock