

Ressourcenarme und dezentrale Lokalisierung autonomer Sensorknoten in Sensornetzwerken

Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
der Fakultät für Informatik und Elektrotechnik
der Universität Rostock

vorgelegt von:

Jan Blumenthal, geb. am 26.06.1974 in Rostock
aus Stäbelow

Rostock, 06.01.2008

Als Dissertation genehmigt von der
Fakultät für Informatik und Elektrotechnik
der Universität Rostock

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Dirk Timmermann, Universität Rostock
Prof. Dr.-Ing. Hartmut Pfüller, Universität Rostock
Prof. Dr. rer. nat. Stefan Fischer, Universität zu Lübeck

Tag der öffentlichen 15.Juli 2008
Verteidigung:

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Institut für Angewandte Mikroelektronik und Datentechnik an der Fakultät für Informatik und Elektrotechnik der Universität Rostock.

Ich möchte mich an dieser Stelle ausdrücklich bei meinem wissenschaftlichen Mentor Herrn Prof. Dr.-Ing. Dirk Timmermann für die motivierenden Gespräche, seine Geduld und das Schaffen des nötigen Freiraums zur Erstellung dieser Schrift bedanken. Danken möchte ich auch Herrn Dr. Frank Golatowski und Herrn Dr. Frank Reichenbach für die zahlreichen Impulse und Denkanstöße.

Mein spezieller Dank geht an die Abgeordneten des Landtages von Mecklenburg-Vorpommern für ihre Weitsicht, eine Gesetzesgrundlage zu schaffen, die mir das Studium an einer Hochschule ohne reguläres Abitur ermöglichte. Die sich mir dadurch eröffnete Welt des Wissens fasziniert mich bis heute ungebrochen.

Ich möchte mich weiterhin bei den Korrekturlesern meiner Arbeit bedanken: Kristina Rimate, Dr. Matthias Handy, Andreas Bobek und Michael Grothmann. Sie haben viel Zeit und Aufwand investiert, um mir Hinweise für den Feinschliff dieser Arbeit zu geben.

Ganz besonders danken möchte ich meiner lieben Frau Andrea und meinem kleinen Sohn Jonas, der mir jeden Tag mit seiner Unbeschwertheit das Leben versüßt. Sie haben viele Einschränkungen während der Zeit der Anfertigung dieser Arbeit ertragen. Schließlich möchte ich an dieser Stelle auch meinen Eltern, Gisela und Joachim Blumenthal, für die jahrelange Unterstützung danken.

Rostock, 06.01.2008

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnisse	IX
Abkürzungsverzeichnis.....	IX
Verzeichnis grafischer Symbole	XI
Verzeichnis mathematischer Symbole	XI
1 Einleitung	1
1.1 Einführung	1
1.2 Motivation	5
1.3 Gliederung	6
2 Distanzermittlung in Sensornetzwerken	9
2.1 Einleitung	9
2.2 Time of Arrival.....	10
2.3 Time Difference of Arrival.....	12
2.4 Symmetric Double Sided Two Way Ranging	14
2.5 Hop-Count	15
2.6 Lighthouse Localization System	18
2.7 Implizite Distanzermittlung.....	20
2.8 Neighborhood Intersection	22
2.9 Received Signal Strength	24
2.10 Minimale Übertragungsleistung	29
2.11 Link Quality.....	34
2.12 Distanzgenauigkeit	36
2.13 Zusammenfassung	39
3 Grundlagen der Lokalisierung	41
3.1 Einleitung	41
3.2 Klassifikation der Ortsangaben	41
3.3 Klassifikation der Lokalisierungsverfahren	42
3.4 Ursachen des Lokalisierungsfehlers	45
3.5 Mathematische Verfahren	46

3.5.1	Triangulation.....	47
3.5.2	Trilateration	48
3.5.3	Methode der kleinsten Quadrate	52
3.6	Lokalisierung in Sensornetzwerken	54
3.6.1	Berechnungsverfahren	56
3.6.2	Näherungsverfahren.....	59
3.6.3	Analyseverfahren.....	63
3.7	Zusammenfassung.....	64
4	Schwerpunktbestimmung	65
4.1	Algorithmus	65
4.2	Zwischenfazit	68
4.3	Grenzen der Schwerpunktbestimmung	70
4.4	Optimale Kalibrierung	72
4.5	Power-Error-Product.....	78
4.6	Optimale Übertragungreichweite	80
4.7	Randfehlerkorrektur	87
4.8	Zusammenfassung.....	107
5	Gewichtete Schwerpunktbestimmung	109
5.1	Algorithmus	109
5.2	Adaptive Schwerpunktbestimmung	115
5.3	Enhanced Weighted Centroid Localization	117
5.4	Auswirkungen von Distanzungenauigkeiten	121
5.5	Kalibrierungsfehler	126
5.6	Einfluss unterschiedlicher Beaconanordnungen	129
5.7	Zusammenfassung.....	134
6	Lokalisierung in der Praxis	135
6.1	Scatterweb-Plattform	135
6.2	Lokalisierungssystem.....	137
6.3	Beaconsoftware.....	138
6.4	Sensorknotensoftware	140
6.5	Zusammenfassung.....	144

7 Zusammenfassung	145
7.1 Ergebnisse.....	145
7.2 Ausblick.....	146
Literatur	147
A Anhang	159
A.1 Schwerpunktbestimmung mit Randfehlerkorrektur	159
A.2 Gewichtete Schwerpunktbestimmung mit Normierung	162
A.3 Verzeichnis der Algorithmen	163
A.4 Tabellenverzeichnis.....	163
A.5 Abbildungsverzeichnis	164

Abkürzungsverzeichnis

3/2 NA	Verfahren zur impliziten Distanzbestimmung
ACK	Acknowledgement, Bestätigungsnachricht
ADU, A/D	Analog-Digital-Umsetzer, Analog-Digital-Wandler
AHS	Average Hop Size, Durchschnittliche Hop-Distanz
AoA	Angle of Arrival
AWCL	Adaptive Weighted Centroid Localization
CAN	Controller Area Network (Feldbus)
CC1010	Mikrocontroller der Firma Texas Instruments (TI)
CL	Centroid Localization, Lokalisierung durch Schwerpunktbestimmung
CLwEC	Centroid Localization with Edge Correction
CMS	Code Modulus Synchronization, Verfahren zur Eliminierung des Clock-Offsets
DAU	Digital-Analog-Umsetzer
DV	Distance Vector, Position eines Referenzknotens inkl. Hop-Anzahl
DV-Hop	Verfahren der Distanzbestimmung
ED	Energy Detection, Ermittlung der Empfangsleistung
EDV	Elektronische Datenverarbeitung
ESB	Embedded Sensor Board
EWCL	Enhanced Weighted Centroid Localization
FP	Floating Point, Fließkommazahl
FPGA	Field Programmable Gate Array
FPU	Floating Point Unit, Fließkommaeinheit des Prozessors
FSPM	Free Space Propagation Model
FxP	Fixed Point, Festkommazahl
GPL	GNU Public License, Lizenzsystem freigegebener Software
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communications (frz. Groupe Spéciale Mobile)
I/O	Input/Output
ID	Identifier, Index, zugeordnete bzw. einmalige Nummer
IDW	Inverse Distance Weighting
IF	Intermediate Frequency

ISO	International Organization for Standardization, Internationale Organisation für Normung
ISR	Interrupt Service Routine
JTAG	Joint Test Action Group, Verfahren zum Testen elektronischer Hardware
LGS	Lineares Gleichungssystem
LNA	Low Noise Amplifier
LQI	Link Quality Indicator
LS	Least Squares, Methode der kleinsten Quadrate
MAC	Medium Access Control
MCL	Minimal Coupling Loss
MdkQ	Methode der kleinsten Quadrate
MEMS	Micro-Electro-Mechanical System, Kombination aus Sensoren, Aktoren und Schaltungen in einem Chip
MTP	Minimal Transmission Power (Distanzermittlungsverfahren)
n.a.	Non applicable, nicht anwendbar
NIDES	Neighborhood Intersection Distance Estimation Scheme
OSI	Open Systems Interconnection
PA	Power Amplifier
PEP	Power-Error-Product
PIT	Point-in-Triangulation-Test
PWM	Pulse-width Modulation, Pulsweitenmodulation
QR	QR Decomposition, QR-Zerlegung
RAM	Random Access Memory, flüchtiger Datenspeicher
RSSI	Received Signal Strength Indicator
RTT	Round Trip Time
SDS-TWR	Symmetric Double Sided Two Way Ranging, Distanzermittlungsverfahren
SFD	Start-of-Frame, Kennzeichnung einer beginnenden Nachrichtenübertragung
SFR	Special Function Register
SNR	Signal Noise Ratio, Signal-Rausch-Verhältnis
SNW	Sensor Network, Sensornetzwerk
SVD	Singular Value Decomposition, Singulärwertmethode
TDoA	Time Difference of Arrival
TI	Texas Instruments
ToA	Time of Arrival
VDD	Positive Versorgungsspannung
WCL	Weighted Centroid Localization

WDV	Weighted Distance Vector, Gewichteter Distanz-Vektor
WGS	World Geodetic System
WLAN	Wireless LAN

Verzeichnis grafischer Symbole

	Knoten mit bekannter Position (z. B. ein Beacon)
	Knoten mit bekannter Position und in Reichweite
	Bestimmte Position eines Knotens
	Knoten mit unbekannter Position
	Virtueller, nicht existenter, Knoten mit festgelegter Position
	Überlappungsbereich. Entsteht durch Reichweitenüberdeckung mehrerer Netzwerkteilnehmer
	Überlappungsbereich, der als Randbereich erkannt wird
	Überlappungsbereich, der als Kernzone erkannt wird
	Geschätzter Übertragungsbereich
	Ideale Übertragungsreichweite eines Netzwerkknotens. Alle Knoten innerhalb des gestrichelten Bereiches sind in Reichweite des Senders.
	Synchronisationszeitpunkt
	Funkübertragung
	Ultraschallübertragung
	Ungültiger bzw. nicht messbarer Bereich

Verzeichnis mathematischer Symbole

\overline{bn}	Nachbarschaftsvektor, akkumulierte Anzahl der Nachbarn der Beacons
$\overline{bv_i}$	Nachbarschaftsvektor eines Beacons
\tilde{f}	Durchschnittlicher Fehler
$\tilde{n}_{Beacons}$	Mittlere Anzahl empfangbarer Beacons
\tilde{n}	Durchschnittliche Knotenanzahl im Empfangsbereich eines Sensorknotens
A	Fläche bzw. Übertragungsbereich
a	Seitenlänge eines gleichseitigen Dreiecks
b	Bitgenauigkeit, Quantisierung einer Größe in b Bits, Anzahl der Beacons im Netzwerk, Seitenlänge eines Sechsecks
B	Menge der bekannten bzw. empfangenen Beaconpositionen

$B(x;y)$	Beacon, Referenzknoten, Sensorknoten mit bekannter Position
bs	Basisstation
BS	Menge aller Basisstationen
c	Korrekturfaktor der Distanzbestimmung (DV-Hop)
C	Menge der Referenzknoten in einem abgegrenzten Gebiet
c_{Luft}	Lichtgeschwindigkeit in Luft
cm	Connectivity metric, Konnektivitätsmetrik
d	Distanz
d_e	Erwartungswert der Distanzmessung
d_f	fehlerbehafteter Messwert einer Distanz
d_{ij}	Distanz zwischen den Knoten i und j
E, \underline{E}	Halbebene und gegenüberliegende Halbebene
f	Lokalisierungsfehler, Frequenz
f_{Clock}	Taktfrequenz
f_o	Offsetfehler
f_q	Abstand der Referenzknoten
f_q	Quantisierungsfehler
g	Grad des Gewichts
G	Gain, Antennengewinn
gw	Gateway, Schnittstelle vom Sensornetzwerk in andere Netzwerke
GW	Menge aller Gateways
h	Hop Count, Hop-Anzahl, Häufigkeit
$h(B_i; B_j)$	Teilgraph einer Hyperbel mit den Brennpunkten B_i und B_j
K	Konstante
I	Teilmenge aller Messungen, $I \subset M$
l	Länge
L	Systemverluste einer Antenne
m	Messung, Anzahl der linear unabhängigen Lösungen
M	Menge aller Messungen
n	Anzahl, z. B. Knotenanzahl, Bitanzahl
N_i	Menge aller Sensorknoten in der Nachbarschaft des Sensorknotens Sk_i
$O(n)$	Komplexität eines Verfahrens
$\underline{P}(x;y)$	Ermittelte, fehlerhafte Position eines Sensorknotens
$P(x;y)$	Position in der Ebene
PL	Path Loss, Dämpfung des Signals
P_{TX}, P_{RX}	Sende- bzw. Empfangsleistung

q	Quantisierungsstufen
r	Radius
$rg(\underline{A})$	Rang der Matrix \underline{A}
RZ	Rundenzähler
s	Skalierungsverhältnis zwischen wahrer und berechneter Distanz
$S(x;y)$	Schwerpunkt einer Fläche
Sk	Sensorknoten
SK	Menge aller Sensorknoten
β	Path Loss Exponent
SW_{TX}	Sendewert (Registereintrag) zur Konfiguration der Sendeleistung
T	Periode
tr	Transmission range, Übertragungreichweite eines Knotens
t_r	Reaktionszeit
TR	Menge der Referenzknoten im Empfangsbereich eines Sensorknotens
t_s	Synchronisierungsfehler (Zeit) zwischen Sender und Empfänger
u	Unbekannte (Knoten ohne Position)
\underline{v}	Residuenvektor eines überbestimmten Gleichungssystems
v	Verhältnis aus Übertragungreichweite und Beaconabstand
w	Gewicht
wc	Gewichteter Korrekturfaktor der Distanzbestimmung (WDV-Hop)
x	Koordinate (Abszisse)
\underline{x}	Lösungsvektor eines Gleichungssystems
y	Koordinate (Ordinate)
α	Winkel
Δd	Fehler der Distanzmessung
Δt	Zeitdifferenz
$\varepsilon, \varepsilon_o, \varepsilon_r$	Permittivität
θ	Neigung zur z-Achse
λ	Wellenlänge
$\mu(x;y)$	Sensorknotendichte
μ, μ_0, μ_r	Permeabilität
σ_d	Standardabweichung der Distanzmessung
σ_{RX}	Standardabweichung der Signalstärkemessung
φ	Drehwinkel um z-Achse

1 Einleitung

1.1 Einführung

Die rasante Entwicklung der Mikroelektronik steigert die Funktionalität elektronischer Bauelemente und verringert gleichzeitig die Kosten zur Herstellung dieser Komponenten. Die Kombination aus vielen dieser hochintegrierten Standardkomponenten erlaubt die Massenproduktion sehr komplexer Einzelsysteme wie dem Personalcomputer oder dem Mobiltelefon, die unser Leben zunehmend beeinflussen.

Die hohen Kommunikationsanforderungen unserer Zeit sowie die nur im Verbund zu lösenden Aufgabenstellungen erforderten eine Vernetzung dieser Systeme, was die Entwicklung des Internets maßgeblich beschleunigte. Industrielle Anwendungen, z. B. die Steuerung von Maschinen, sind dagegen durch hochspezialisierte eingebettete Geräte kleinerer Stückzahl gekennzeichnet.

Alle benannten Einzelsysteme besitzen jedoch eine signifikante räumliche Ausdehnung und sind zumeist fest mit einer vorhandenen Infrastruktur, z. B. dem Stromnetz oder dem Mobilfunknetz, verbunden. In Umgebungen, die keinen Zugang zu einer Basisinfrastruktur besitzen, sind sie faktisch nicht einsetzbar. Die räumliche Ausdehnung der Geräte unterbindet zudem häufig den direkten Einsatz als Messinstrument, da der Messgegenstand von der Masse und dem Volumen maßgeblich beeinflusst werden würde. Vielfach wurden daher lediglich die Sensoren als Datenquelle im Bereich des Messgegenstandes platziert und über Leitungen mit einer zentralen komplexen Einheit (Datensenke) verbunden. Diese Konfiguration schränkt jedoch die Flexibilität und das Skalierungsverhalten der Messanordnung vor allem in großflächigen Umgebungen drastisch ein.

Erst die in jüngster Zeit verstärkt einsetzende Miniaturisierung und die fortschreitende Entwicklung der Mikrosystemtechnik (engl. MEMS) führen zur Konstruktion winziger hochintegrierter und autonom arbeitender Sensorknoten. Die anvisierte Zielgröße eines Knotens liegt in der Größenordnung eines Staubkorns, auch als Smart Dust bezeichnet [Doh01a], obwohl er aus einem Mikrocontroller, Speicher, Sensoren bzw. Aktoren, einer Kommunikationseinheit und einer Energiequelle, z. B. einer Batterie, besteht (Abbildung 1).

Die Übertragung der Messergebnisse zwischen einzelnen Sensorknoten und den Datensenken des Systems erfolgt zumeist per Funk. Durch den Wegfall der bisher notwendigen drahtgebundenen Energieversorgung kann auf eine aufwändige Verkabelung der Einsatzgebiete vollständig verzichtet werden. Sensorknoten benötigen folglich keine Basisinfrastruktur. Der erforderliche Installationsaufwand reduziert sich auf die Platzierung der Sensorknoten und die Einrichtung der Datensenken. Sie sind durch diese Flexibilität für Messungen in riesigen Gebieten prädestiniert.

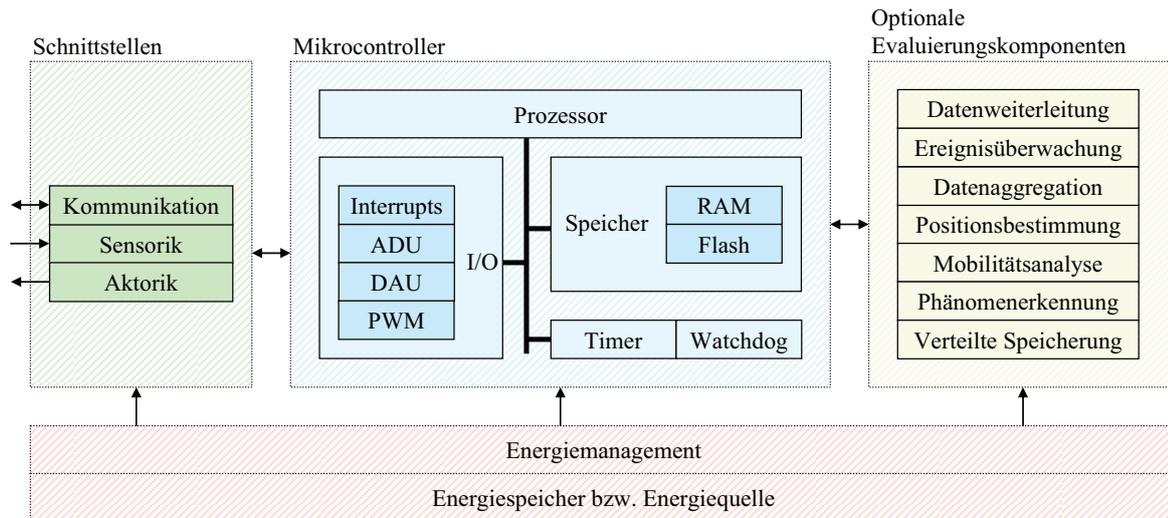


Abbildung 1: Modell eines Sensorknotens

Eine Vielzahl von Sensorknoten bildet ein infrastrukturloses und selbstkonfigurierendes Sensornetzwerk (SNW). Die Sensorknoten Sk_i ($Sk_i \in SK$) werden dazu über dem Beobachtungsgebiet A verteilt. Hauptaufgabe dieser Netzwerke ist die Überwachung großer und zumeist schwer zugänglicher Gebiete oder umfangreicher Prozessketten, in denen die für herkömmliche Überwachungssysteme benötigte Infrastruktur nur mit unverhältnismäßig hohem bzw. unwirtschaftlichem Aufwand errichtet werden kann.

Das Ziel der Sensornetzwerke besteht in der möglichst genauen Abbildung der realen Umgebung U auf eine für die Weiterverarbeitung in EDV-Systemen geeignete Darstellung ($f:U \rightarrow u(x;y)$). Die Sensoren der Knoten dienen dabei der singulären Informationsgewinnung. Sie messen die Umgebungsdaten und wandeln sie im Analog-Digital-Umsetzer (ADU) in digitale Daten um.

Die endliche Menge von eingesetzten Sensorknoten führt jedoch zu einer diskontinuierlichen Abtastung der Umgebung. Die Menge der Messdaten M ist demnach endlich, da nur an einzelnen Punkten $P_m(x;y)$ im Beobachtungsgebiet A eine Messung $m(x;y)$ erfolgt. Für alle anderen Punkte des Beobachtungsgebietes $P_i(x;y) \notin M$ kann die gesuchte Information nur durch Approximation bestimmt werden.

Mit jedem Sensornetzwerk kann immer nur eine genäherte Abbildung der Wirklichkeit ermittelt werden. Die Abbildungsgenauigkeit der untersuchten Umgebungsbedingungen ist somit maßgeblich von der Dichte der Sensorknoten $\mu(x;y)$ abhängig. Die Abhängigkeit des Abbildungsfehlers von der Sensorknotendichte zwingt daher zu hohen Sensorknotendichten und folglich in realen Umgebungen zum Einsatz von hunderten bzw. tausenden von Sensorknoten, falls entsprechend hohe Anforderungen gestellt werden.

Sensornetzwerke besitzen aufgrund ihrer Flexibilität enormes Potenzial für neue Anwendungen. Sie können beispielsweise effizient zur schnellen Detektion von Waldbränden,

der frühzeitigen Erkennung möglicher Deichdurchbrüche, dem Monitoring von Patienten oder der nahtlosen Kühlkettenkontrolle beim Transport verderblicher Waren eingesetzt werden [Aky02, Kar03].

Die Sensorknoten eines Beobachtungsgebietes ermitteln vor Ort die Umgebungsdaten und beginnen mit einer Vorverarbeitung, z. B. einer Mittelwertbildung, der Eliminierung von Ausreißern oder der Überwachung von Messschranken. Im Anschluss erfolgt gegebenenfalls das zielgerichtete Zusammenfassen von Messdaten mehrerer Sensorknoten (Datenaggregation). Zusätzlich kann aus den gewonnenen Messdaten durch Kooperation mehrerer benachbarter Sensorknoten auch eine höherwertige Information extrahiert werden (Datenkollaboration), z. B. eine Mobilitätsinformation oder die Ausdehnung eines begrenzten Gebietes (Gruppierung von Sensorknoten, Phänomenerkennung) innerhalb des Sensornetzwerkes (Abbildung 2). Die ermittelten Ergebnisse werden an die Datensinken des Systems weitergeleitet, wobei Senken außerhalb der direkten Überreichweite nur durch Zwischenübertragungen unbeteiligter Sensorknoten erreicht werden können. Die zielgerichtete Übertragung über verschiedene Netzteilnehmer erfordert daher den Einsatz angepasster Routingverfahren [Jan02, Akk03, Ka00].

Die Konvertierung der Nachrichten des Sensornetzwerkes in andere Netzwerke erfolgt in Gateways gw_i ($gw_i \in GW$, $GW \subseteq SK$), wie Abbildung 2 visualisiert. Gateways sind ebenfalls Sensorknoten, die eine zweite Kommunikationsschnittstelle besitzen. Diese Umsetzung ist notwendig, wenn die Datenauswertung oder die Administration des Sensornetzwerkes aus dem Internet oder über ein per Feldbus, z. B. CAN, angeschlossenes System erfolgen soll. Die Gateways übermitteln die Nachrichten im Allgemeinen zu Basisstationen bs_i weiter ($bs_i \in BS$, $bs_i \notin SK$). In den Basisstationen erfolgt die applikationsspezifische Auswertung der Messdaten. Dort werden die Messdaten analysiert und gegebenenfalls Aktionen, z. B. Alarmauslösung bzw. Aktorensteuerung, initiiert.

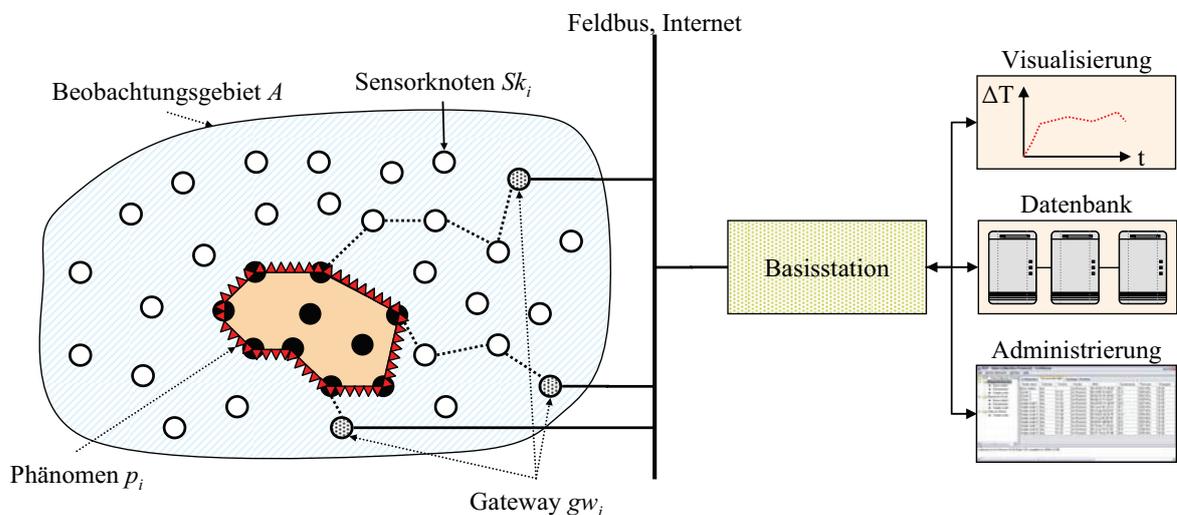


Abbildung 2: Sensornetzwerk in der Praxis

Ein Sensorknoten muss daher neben den datenzentrierten Aufgaben (Messen, Vorverarbeiten) auch infrastrukturelle Aufgaben (Routing, Datenkollaboration) übernehmen, um die eigene und die Existenz des gesamten Netzwerkes im Sinne der gewünschten Anwendung zu ermöglichen. Diese Form des Altruismus ist ein Schwerpunkt in der Sensornetzwerkforschung und zeigt sich in zahlreichen wissenschaftlichen Arbeiten zu der dynamischen Zuweisung von Rollen an einzelne Sensorknoten [Rei06a] bzw. der dynamischen Clusterbildung [Han02].

Die Beziehungen eines Knotens zu seiner Umgebung können auf sehr unterschiedliche Weise beschrieben werden. Die gemessene Distanz zwischen Netzwerkteilnehmern ist die am häufigsten verwendete Form einer Nachbarschaftsinformation. Neben der Distanz gibt es weitere Beschreibungen, die die Umgebung angemessen abbilden, z. B. die Information, in welchem Raum sich etwas befindet. Alle Informationen, die dem Zweck dienen, den Sensorknoten im Sensornetzwerk einzuordnen und ihn bei der Selbstorganisation zu unterstützen, werden unter dem Begriff *Kontext* zusammengefasst. In [Foldoc] heißt es „Kontext ist, was uns umgibt und irgendetwas eine Bedeutung zumisst.“ Abbildung 3 zeigt schematisch eine Übersicht über mögliche Kontextinformationen, die die Voraussetzung für Context-Awareness bilden, d. h. die Fähigkeit, das eigene Verhalten entsprechend der Zielstellung, den derzeitigen Umgebungsbedingungen und den aktuellen Fähigkeiten anzupassen. Durch die zufällige Verteilung der Sensorknoten über einem unbekanntem Gebiet besitzen sie zunächst keinerlei Ortsinformationen. Dadurch ist das Messdatum nahezu wertlos, denn eine korrekte Evaluierung benötigt die Zuordnung des Messwertes zum Ort der Messung. Eine erfolgreiche Lokalisierung ist jedoch auch für weitere Aufgaben unerlässlich, z. B. für geographisches Routing [Ku03, Sub05]. Für Sensorknoten ist daher eine Lokalisierung zwingend erforderlich. Diese benötigt zur Positionsberechnung zusätzliche Informationen aus der Umwelt, die gemessen oder von Nachbarknoten angefordert werden müssen.

Bei der Entwicklung von Sensornetzwerken muss die resultierende Energiebilanz aller

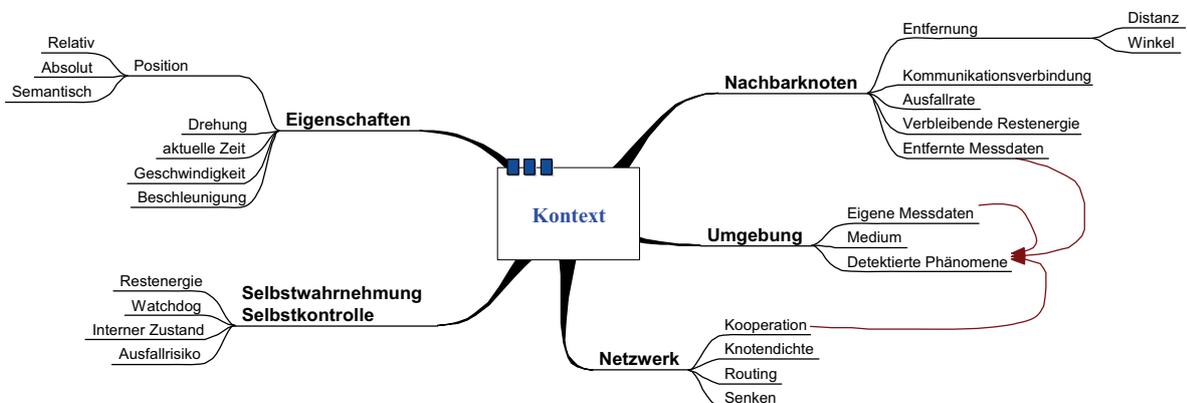


Abbildung 3: Klassifizierung von möglichen Kontextinformationen eines Sensorknotens

Aktivitäten unbedingt berücksichtigt werden. Dies schließt den dynamisch initiierten Energieverbrauch der laufenden Software (Energiesparmodi, Abschaltung von Komponenten, Berechnungshäufigkeit) ebenso mit ein wie den Energiebedarf der Hardware [Blu05d]. Alle bislang aufgezählten Aktivitäten des Sensorknotens (Messen, Berechnen, Übertragen, Empfangen, Aggregieren, Lokalisieren) beeinflussen den Energieverbrauch des Sensorknotens, wobei das Übertragen und Empfangen von Nachrichten per Funk einen relativ hohen Anteil einnimmt. Ein hoher Energieverbrauch widerspricht jedoch dem Ziel einer jahrelangen Laufzeit bei zugleich stark begrenzter Speicherkapazität der Batterie, wenn als Maßstab die Zielgröße eines Staubkornes zugrunde gelegt wird.

Neben dem Energieverbrauch existieren in Sensornetzwerken weitere limitierende Bedingungen, wie z. B. der begrenzte Datenspeicher. Dies resultiert aus der begrenzten Größe der Sensorknoten wie auch dem Energieverbrauch pro Informationsspeicherung. Die meisten Übertragungsprotokolle setzen zur fehlerfreien Kommunikation per Funk einen freien Übertragungskanal voraus. Die anderenfalls auftretenden Kollisionen bedingen eine Neuübertragung von Nachrichten und führen zur Überlastung des Kanals und damit zu einem erheblich höheren Energieverbrauch [Cup00]. Die Informationsübertragung per Funk schränkt somit die verfügbare Kanalkapazität gegenüber einer kabelgebundenen Übertragung deutlich ein. Folglich muss die Reduzierung der Nachrichtenanzahl ebenfalls ein Ziel bei der Entwicklung von Sensornetzwerken sein.

Systeme mit stark limitierenden Randbedingungen bei Energieverbrauch, physikalischer Größe, Speicherbedarf, Kanalauslastung werden auch als ressourcenarm bezeichnet. Folglich müssen sich, ausgehend von den hergeleiteten Einschränkungen, die Entwicklung und Dimensionierung von ressourcensparenden Anwendungen für Sensornetzwerke zwingend an diesen Kriterien orientieren. Eine offene Frage bleibt, ob die Fortschritte bei der Entwicklung ressourcensparender Technologien eher zu einer weiteren Miniaturisierung der Sensorknoten oder eher zu komplexeren Bauelementen und Algorithmen mit tendenziell steigendem Ressourcenbedarf führen werden.

1.2 Motivation

Die Lokalisierungsverfahren für Sensornetzwerke unterliegen ebenfalls den beschriebenen Einschränkungen. Bei der Entwicklung, der Evaluierung bzw. der Dimensionierung dieser Verfahren muss der Ressourcenverbrauch neben der Positionsgenauigkeit zwingend analysiert werden. Vor allem in großen Netzwerken sind zumeist Verfahren vorteilhaft, die eine dezentrale Lokalisierung ermöglichen und deren Kommunikationsaufwand nur linear mit der Netzwerkgröße skaliert.

Ein Teilgebiet der Lokalisierungsverfahren, die dezentralen Näherungsverfahren, ist durch eine sehr einfache Positionsberechnung, niedrigen Speicherverbrauch und geringen Kommunikationsaufwand gekennzeichnet. Die existierenden Verfahren weisen jedoch einen relativ hohen Lokalisierungsfehler auf.

Das Ziel dieser Arbeit besteht in der Genauigkeitsverbesserung der dezentralen Näherungsverfahren auf autonom arbeitenden Sensorknoten bei nahezu gleichbleibendem Ressourcenaufwand der Lokalisierung. Besondere Beachtung findet dabei die Analyse der Genauigkeit hinsichtlich ihres Stabilitätsverhaltens unter realistischen Bedingungen.

1.3 Gliederung

Diese Arbeit ist in sieben Kapitel aufgeteilt (Abbildung 4). Dieses erste Kapitel beschreibt einleitend die wesentlichen Grundlagen der Sensornetzwerke, untersucht die Netzwerke hinsichtlich ihrer besonderen Limitierungen und definiert das Ziel dieser Schrift.

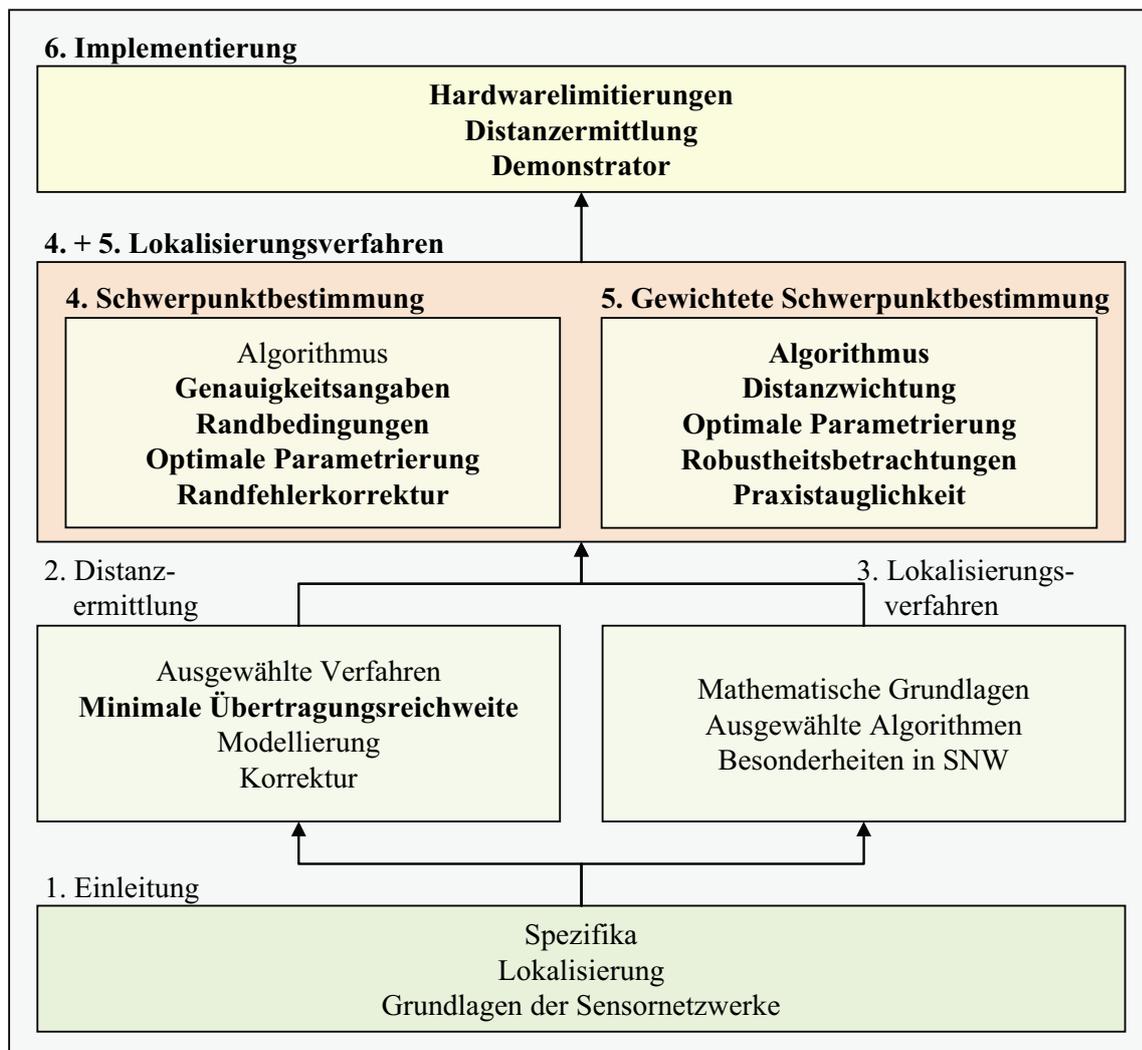


Abbildung 4: Gliederung der Arbeit (Abschnitte mit eigenen Beiträgen in fetter Schrift)

Das nachfolgende Kapitel 2 stellt ausführlich bereits publizierte und neue Verfahren zur Distanzermittlung zwischen Sensorknoten vor. Sie bilden die Voraussetzung für die meisten Lokalisierungsalgorithmen in Sensornetzwerken.

Die Grundlagen der Lokalisierung werden eingehend in Kapitel 3 dargelegt, gefolgt von einer Klassifizierung und einer detaillierten Analyse ausgewählter Lokalisierungsalgorithmen für Sensornetzwerke. Den Hauptteil dieser Arbeit stellt die Beschreibung der einfachen Schwerpunktbestimmung in Kapitel 4 dar, indem dieses Näherungsverfahren, seine Vor- und Nachteile sowie seine zahlreichen Randprobleme eingehend untersucht werden. Ausgehend von den durchgeführten Analysen werden neue Verfahren zur optimalen Justierung der Schwerpunktbestimmung sowie zur deutlichen Reduzierung des Lokalisierungsfehlers vorgestellt.

Eine weitere deutliche Fehlerverringerng wird durch die in Kapitel 5 präsentierten Verfahren der gewichteten Schwerpunktbestimmung erreicht. Neben den ebenfalls existenten Randproblemen werden zusätzlich zahlreiche Analysen zur Robustheit der Schwerpunktverfahren im Vergleich zu mathematisch optimalen Verfahren unter realistischen Einsatzszenarien diskutiert.

Die Beschreibung einer erfolgreichen Implementierung der Lokalisierung von Sensorknoten in einer realen Umgebung auf Basis der neu vorgestellten Verfahren rundet den Hauptteil der Arbeit in Kapitel 6 ab. Diese Schrift schließt mit einer Zusammenfassung der präsentierten Verfahren und Ergebnisse in Kapitel 7.

2 Distanzermittlung in Sensornetzwerken

2.1 Einleitung

Die Lokalisierung von Sensorknoten erfordert grundsätzlich Angaben über die Wechselbeziehungen des Knotens zu seiner Umwelt. Diese Informationen können in Form von Nachbarschaftsbeziehungen, Konnektivitätsmetriken, der Kenntnis von Referenzpositionen, der Neigung und Drehung von Knoten zueinander zur Verfügung stehen. Die meisten Lokalisierungsverfahren setzen allerdings ermittelte Distanzen zwischen den Sensorknoten in einem metrischen Koordinatensystem voraus [Nor02]. Diese Distanzen müssen aus den detektierten Umgebungsbedingungen ermittelt werden. Da es sich um einen Messvorgang handelt, kann diese Distanz nur fehlerbehaftet gewonnen werden. Eine Lokalisierung (vgl. Kap. 3) erfordert jedoch möglichst exakte Distanzen, weil der Messfehler der Distanz die Genauigkeit der ermittelten Position maßgeblich beeinflusst.

In diesem Kapitel werden ausgewählte Verfahren zur Distanzermittlung vorgestellt und bewertet. Es wird dargelegt, wo die grundlegenden Ursachen der Genauigkeitsunterschiede liegen und wie sie reduziert bzw. korrigiert werden können. Der Fokus liegt hierbei auf der Ermittlung einer numerischen Distanz in einem absoluten Bezugssystem, da dies die Voraussetzung für die weitere Betrachtung der in Kap. 3.6 beschriebenen Lokalisierungsverfahren bildet.

Eine gemessene Größe d eines Systems kann durch den exakten Erwartungswert d_e und den Fehler Δd beschrieben werden. In einem System mit unendlich vielen unabhängigen Messungen unterliegt der Messwert d der Normalverteilung. Daraus folgt zunächst, dass bei bekannter Standardabweichung σ eine Aussage über die Häufigkeit eines bestimmten Messwertes in einem bestimmten Intervall i gegeben werden kann. Andererseits folgt daraus aber auch, dass es unendlich viele verschiedene Messergebnisse gibt [Ram03].

$$d = d_e \pm \Delta d \quad (1)$$

In binären Rechnersystemen ist neben der Messung auch eine Quantisierung und Speicherung der gemessenen Größe in einem b -Bit breiten Datentyp der Kapazität 2^b erforderlich. Folglich muss für jede Quantisierung festgelegt werden, welches Intervall $I \subset M$ aus der Menge aller Messungen betrachtet und weiterverarbeitet wird $\{d_e \mid i_{min} < d_e < i_{max}\}$.

Der minimale Quantisierungsfehler f_q resultiert bei angenommener Fehlerfreiheit der Übertragungskette vom Messgerät bis zum erforderlichen Analog/Digital-Umsetzer aus dem Fehler der A/D-Wandlung $f_{AD} \approx 1 \text{ Bit}$.

$$f_q = \frac{i_{\max} - i_{\min} + 1}{2^b} \quad (2)$$

Folglich erfährt die Messgröße d einen zusätzlichen nicht zu vernachlässigenden Fehler in Abhängigkeit des Quantisierungsfehlers f_q der A/D-Wandlung und des verwendeten Datentyps.

$$d = \left\lfloor \frac{d_e \pm \Delta d}{f_q} \right\rfloor \quad (3)$$

Bei der nachfolgenden Betrachtung der wichtigsten Distanzermittlungsverfahren werden die Mess- und Quantisierungsfehler i. d. R. nicht beachtet. Dies ist in den zugrunde liegenden theoretischen Modellen begründet, die einen Messfehler zumeist vernachlässigen. Es ist jedoch zwingend erforderlich, dass im realen Einsatz die Modelle entsprechend den lokalen Gegebenheiten angepasst und kalibriert werden.

2.2 Time of Arrival

Ein ausgesendetes Funksignal breitet sich im Vakuum vom Sender mit Lichtgeschwindigkeit $c_{\text{Vakuum}} \approx 299792 \text{ km/s}$ aus. In Materie verringern die Materialeigenschaften des Übertragungsmediums, Permittivität $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ und Permeabilität $\mu = \mu_0 \mu_r$, die Ausbreitungsgeschwindigkeit auf z.B. $c_{\text{Luft}} = 297702 \text{ km/s}$. Bei bekannten Materialeigenschaften und demnach bekannter Ausbreitungsgeschwindigkeit c_{Luft} kann durch Ermittlung der Übertragungsdauer Δt die zurückgelegte Entfernung d des Signals berechnet werden ($c = d/\Delta t$). Dieses Messverfahren wird als Time-of-Arrival (ToA) bezeichnet [Par96].

Die Übertragungsdauer Δt berechnet sich aus der Differenz von Start- und Empfangszeit. Dazu wird die Zeit unmittelbar vor dem Emittieren des Signals gemessen und der zu übermittelnden Nachricht hinzugefügt. Im Empfänger wird nach der Detektion des Signals die Ankunftszeit ermittelt.

$$c_{\text{Luft}} = \frac{d}{\Delta t} \quad (4)$$

Die technische Realisierung dieser Distanzmessung gestaltet sich jedoch sehr schwierig. Um die Übertragungsdauer Δt exakt messen zu können, müssen Sender (B_i) und alle Empfänger (Sk_j) sehr genau aufeinander synchronisiert werden [Sto05b].

Für eine beispielhafte Distanz ($d = 30 \text{ cm}$) in einem Sensornetzwerk (Abbildung 5a) beträgt die durchschnittliche Übertragungsdauer in Luft lediglich $\Delta t = 0,3\text{m}/299702\text{km/s} \approx 1\text{ns}$. Der Synchronisierungsfehler (Skew) t_s zwischen Sender und Empfänger muss demnach wesent-

lich kleiner als $t_s < 1\text{ns}$ sein, um Distanzen von $d \geq 30\text{cm}$ überhaupt detektieren zu können. Diese Zeitspanne entspricht jedoch bereits einem erforderlichen Takt von $f_{\text{Clock}} = 1/t_s = 1\text{GHz}$ (ohne Beachtung des Abtasttheorems nach Nyquist [Sha49]). Ein Einsatz in aktuell verfügbaren Sensornetzwerken ohne zusätzlichen Hardwareaufwand erscheint daher derzeit sehr unrealistisch.

Lanzisera et al. präsentierten in [Lan06] ein prototypisches System zur Distanzermittlung auf Basis zusätzlicher rekonfigurierbarer Hardwarebausteine (FPGA). Der durchschnittliche Fehler der Distanzbestimmung im Freien (auch Außenbereich, engl. Outdoor) beträgt $f \approx 1\text{m}$, ist jedoch gerade bei kleinen Distanzen $d < 4\text{m}$ größer $f > 1\text{m}$. Die erforderliche Synchronisation wird durch die erneute Übertragung der Nachricht an den Sender bei gleichzeitiger Eliminierung des Clock-Offsets durch Einsatz des CMS-Verfahrens (Code Modulus Synchronization) garantiert.

Eine Möglichkeit, ohne die notwendige Synchronisation zwischen Sender und Empfängern auszukommen, besteht in der Ermittlung der Laufzeitdifferenz verschiedener Signale. Ein Sender B_i startet dazu die Distanzermittlung durch Übertragung eines Synchronisationssignals per Funk unmittelbar gefolgt von dem Aussenden eines zweiten Signals geringerer Ausbreitungsgeschwindigkeit c_2 , z.B. eines Ultraschallsignals (Abbildung 5b) mit $c_2 \approx 340\text{m/s}$. Das zweite Signal breitet sich deutlich langsamer als das Funksignal aus. Der zeitliche Abstand, in dem beide bei einem Empfänger eintreffen, steigt linear mit dem Abstand zum Sender.

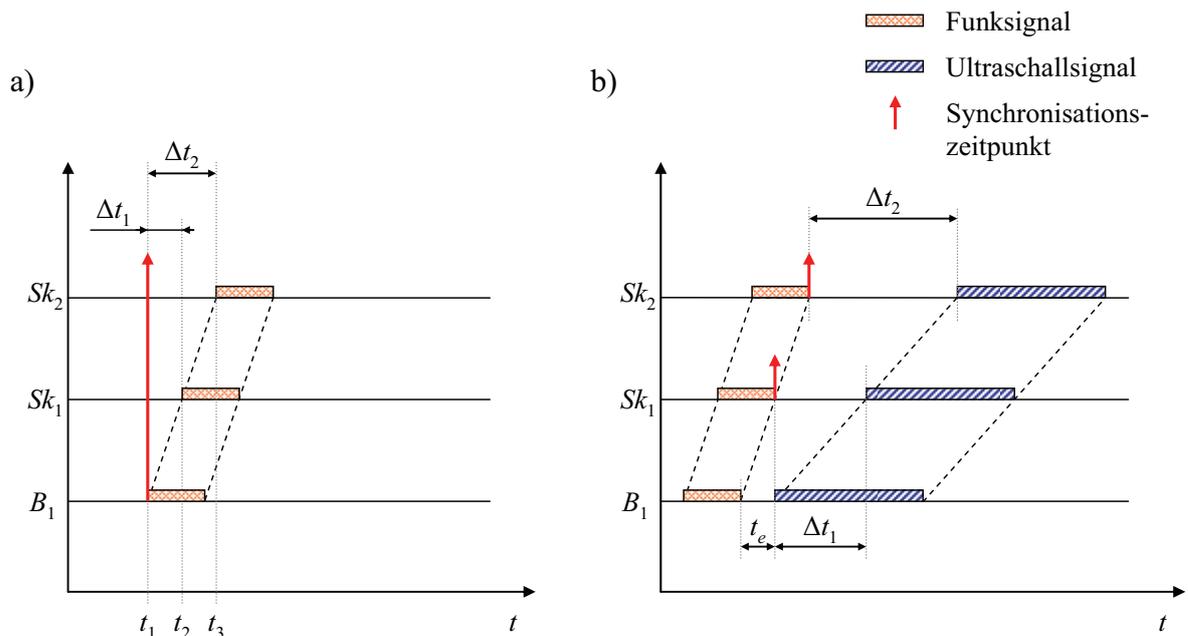


Abbildung 5: Distanzermittlung durch Time-of-Arrival (ToA) bei a) globalem Synchronisationszeitpunkt b) lokalem Synchronisationszeitpunkt

Der Empfänger startet nach der Detektion des Synchronisationssignals die interne Zeitmessung und ermittelt die Dauer Δt , bis das zweite, langsamere Signal ebenfalls beim Empfänger eintrifft. Aus der Dauer Δt kann bei bekannter Ausbreitungsgeschwindigkeit c_2 die Distanz d zwischen Sender und Empfänger bestimmt werden (Gleichung 5).

$$d = (\Delta t - t_e) \cdot c_2 \quad (5)$$

Die von Savvides et al. vorgestellten Medusa-Sensorknoten benutzen diese Methode der Zeitdifferenzmessung [Sav01]. Die eingesetzten Sensorknoten wurden dazu mit einer Funk-einheit und mehreren kreisförmig angeordneten Ultraschallsendern ausgestattet. Die durchgeführte Distanzbestimmung lieferte mit $f = 2\%$ (2cm auf 3m) einen sehr geringen Fehler, ist aber verglichen mit anderen Verfahren durch den hohen Hardwareaufwand für die zusätzlichen Übertragungseinheiten relativ teuer.

2.3 Time Difference of Arrival

Die erforderliche exakte Zeitsynchronisation des ToA-Verfahrens zwischen allen Sendern und allen Empfängern ist in der Praxis mit tausenden von Sensorknoten kaum realisierbar. Um den Synchronisationsaufwand deutlich zu verringern, kann das Time-Difference-of-Arrival-Verfahren (TDoA) eingesetzt werden [Stu99, Gus03]. Dieses Verfahren benötigt lediglich zwei exakt aufeinander abgestimmte Sender. Eine Synchronisation der Empfänger ist nicht erforderlich.

Beim TDoA-Verfahren senden die synchronisierten Sender B_1 und B_2 (Abbildung 6) gleichzeitig eine Nachricht aus. Ein Empfänger, z. B. Sk_1 , empfängt in Abhängigkeit der tatsächlichen Entfernungen d_1 und d_2 zunächst die Nachricht des näher liegenden Knotens B_2 , gefolgt vom entfernteren Knoten B_1 .

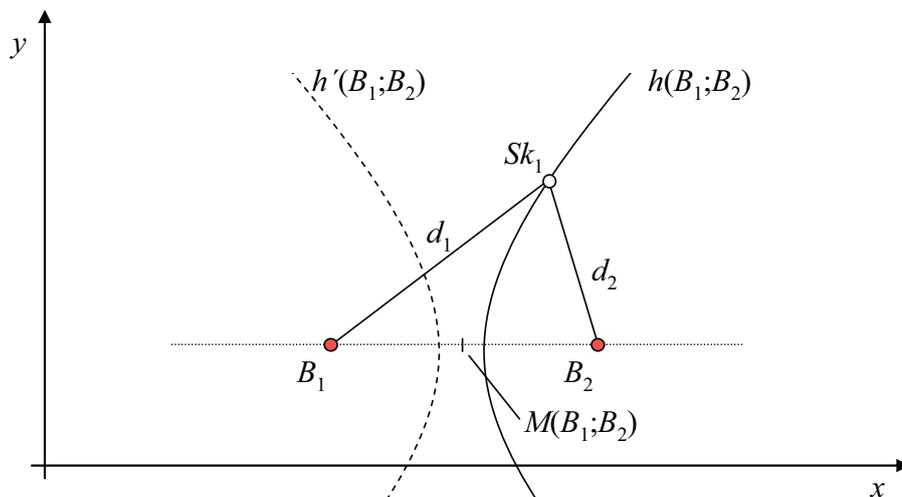


Abbildung 6: Implizite Distanzbestimmung durch das Verfahren Time Difference of Arrival (TDoA)

Mit Beginn des ersten Empfangs startet der Sensorknoten Sk_1 eine Zeitmessung, die bei Empfang des zweiten Signals die Zeitdifferenz Δt der eingehenden Signale symbolisiert. Da sich die Signale in homogenen Medien mit konstanter Geschwindigkeit c gleichmäßig ausbreiten, ist die Wegdifferenz Δd proportional zur Zeitdifferenz Δt .

$$\Delta d = \Delta t \cdot c = d_1 - d_2 \quad (6)$$

Gleichzeitig entspricht Δd der Differenz der wahren Wegstrecken d_1 und d_2 , deren Beträge sich aus den Abstandsvektoren $\overline{B_i Sk_1}$ ($i = 1; 2$) ergeben. Durch Dividieren der Betragsdifferenz (Gleichung 6) entsteht die allgemeine Hyperbelgleichung des TDoA-Verfahrens (Gleichung 7).

$$1 = \frac{\sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2}}{\Delta d} - \frac{\sqrt{(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2}}{\Delta d} \quad (7)$$

Ein Sensorknoten kann sich beim TDoA-Verfahren folglich nur auf einer Hyperbel mit den Brennpunkten B_1 und B_2 befinden. Da die Hyperbel zwei Lösungskurven $h(B_1; B_2)$ bzw. $h'(B_1; B_2)$ definiert, muss bei der nachfolgenden Berechnung die korrekte Kurve selektiert werden. Im gezeigten Beispiel (Abbildung 6) trifft aufgrund der geringeren Entfernung ($d_1 < d_2$) die Nachricht des Knotens B_2 vor der Nachricht des Knotens B_1 ein. Somit kann der Sensorknoten Sk_1 nur auf $h(B_1; B_2)$ und nicht auf $h'(B_1; B_2)$ liegen.

Um die korrekte Position auf der Hyperbel $h(B_1; B_2)$ zu detektieren, muss mindestens ein zweites Knotenpaar, z. B. B_1 und B_3 , ebenfalls eine Nachricht aussenden und somit eine zweite Hyperbel $h(B_1; B_3)$ definieren. Der Schnittpunkt der Hyperbeln $h(B_1; B_2)$ und $h(B_1; B_3)$

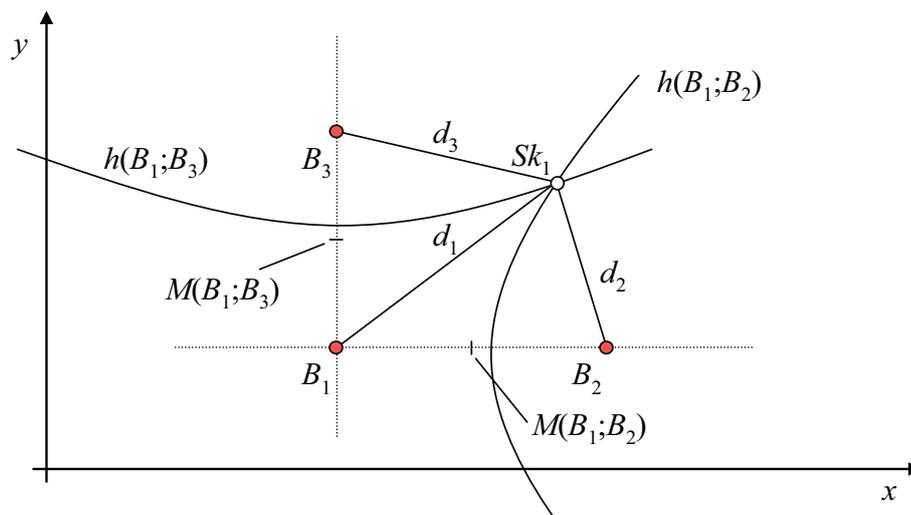


Abbildung 7: Positionsbestimmung im Schnittpunkt zweier durch das TDoA-Verfahren ermittelter Hyperbeln $h(B_1; B_2)$ und $h(B_1; B_3)$

entspricht der Position des Sensorknotens Sk_j (Abbildung 7). In seltenen Fällen schneiden sich die Hyperbeln zweifach, sodass durch die bedingte Doppeldeutigkeit der bislang ermittelten Position eine dritte Hyperbelbestimmung notwendig wird.

Das TDoA-Verfahren ermittelt somit keine exakte Distanz d . Diese liegt vielmehr implizit in dem sich aufspannenden Gleichungssystem (Gleichung 8) vor.

$$1 = \frac{\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}}{\Delta d_{ij}} - \frac{\sqrt{(x-x_j)^2 + (y-y_j)^2}}{\Delta d_{ij}} \quad (8)$$

2.4 Symmetric Double Sided Two Way Ranging

Die Distanzbestimmung basierend auf der Laufzeit von Signalen stellt in den bisher betrachteten Verfahren sehr hohe Anforderungen an die Synchronisation der Uhrzeit und die Taktgenauigkeit aller Kommunikationspartner. Ein typisches Sensornetzwerk besteht jedoch eher aus einer Vielzahl ressourcenarmer Empfänger und nicht aus wenigen ressourcenstarken Referenzknoten. Diesen Widerspruch versucht das Verfahren Symmetric Double Sided Two Way Ranging (SDS-TWR) aufzulösen.

Ein einfacher Ansatz, die ressourcenarmen Sensorknoten hinsichtlich ihrer Synchronisationsanforderungen zu entlasten, wird durch das Round-Trip-Time-Verfahren (RTT) ermöglicht. Bei diesem Verfahren sendet ein Sensorknoten Sk_1 eine Nachricht an einen Zielknoten Sk_2 und startet gleichzeitig eine Zeitmessung (Abbildung 8a). Der Zielknoten beantwortet die erhaltene Nachricht mit einer Bestätigung (engl. Acknowledgement, ACK) nach einer definierten Reaktionszeit t_R . Bei Erhalt der Bestätigung im Sensorknoten Sk_1 wird die Zeitmessung gestoppt. Die gemessene Zeitdauer Δt_{12} setzt sich aus den Übertragungszeiten Δt_{F12} und Δt_{F21} , der Reaktionszeit des Empfängers t_R sowie den Verzögerungszeiten Δt_{CSi} , hervorgerufen durch fehlende Taktsynchronisation (Clock-Skew) und Taktdrift (Clock-Drift), zusammen und erlaubt somit eine Distanzbestimmung unter Vernachlässigung der unbekanntenen Verzögerungszeiten Δt_{CSi} (Gleichung 9).

$$d = c \cdot \frac{\Delta t - \Delta t_R}{2} \quad (9)$$

Der Vorteil des Verfahrens besteht in dem Verzicht auf eine Synchronisation der Uhrzeit zwischen den beiden Sensorknoten. RTT kann jedoch nur effizient eingesetzt werden, wenn die Reaktionszeit t_R des Empfängers tatsächlich bekannt bzw. deterministisch ist. Dies wird durch automatisch erzeugte Acknowledgement-Signale unmittelbar nach der Detektion des Signals in der MAC-Schicht des Empfängers (ISO-Schichtenmodell der Kommunikation

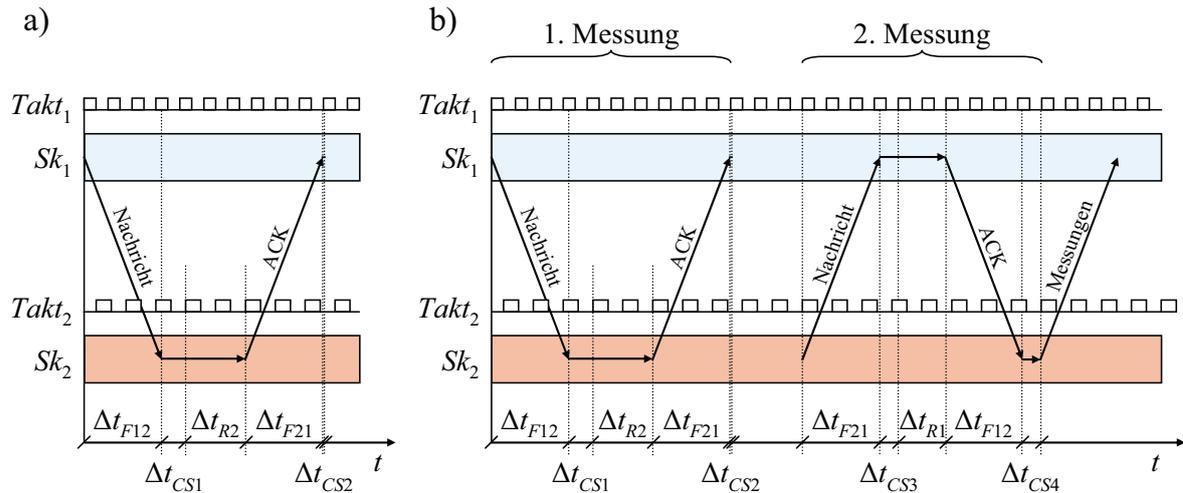


Abbildung 8: Distanzbestimmung durch a) Round Trip Time (RTT) b) Symmetric Double Sided Two Way Ranging (SDS-TWR)

[ISO96]) erreicht. Eine nicht-deterministische Beantwortung durch höhere Kommunikationsschichten wird dadurch vermieden.

Das Round-Trip-Time-Verfahren (RTT) hat jedoch den Nachteil, dass es sehr anfällig auf die Taktdrift zwischen den Kommunikationspartnern reagiert. Das Symmetric Double Sided Two Way Ranging (SDS-TWR) reduziert den dadurch verursachten Distanzfehler [Nan07]. Dazu wird die Distanzmessung doppelt durchgeführt (Abbildung 8b). In der ersten Messung wird die Nachricht, wie bei RTT, von Sensorknoten Sk_1 an Sk_2 übertragen und sogleich mit einem ACK bestätigt. Aus der Zeitdauer Δt_{12} bestimmt Sk_1 die Distanz d_{12} . Die zweite Messung wird in Sensorknoten Sk_2 durch Senden einer zweiten Nachricht initiiert, die Sensorknoten Sk_1 mit einem ACK beantwortet. Sensorknoten Sk_2 ermittelt nach Empfang des ACK die Zeitdauer Δt_{21} sowie die Distanz d_{21} und übermittelt diese an Sk_1 . Das arithmetische Mittel aus den Distanzen d_{12} und d_{21} ergibt die gesuchte Distanz d .

2.5 Hop-Count

In einigen Sensornetzwerken ist es aufgrund von geringen Genauigkeitsanforderungen der Lokalisierung oft ausreichend, statt möglichst genauen Distanzen nur grobe Näherungswerte zu bestimmen. Diese Näherungswerte unterscheiden sich von exakten Entfernungen dadurch, dass sie beispielsweise skaliert und dadurch nicht mehr einheitentreu sind. Dies erschwert die Lokalisierung immens, da viele Algorithmen gleiche Einheiten von Koordinaten und Entfernungen verlangen (vgl. Kap. 3.5.3).

In einem Multihop-Netzwerk mit vielen Teilnehmern, in dem eine direkte Verbindung zwischen zwei beliebigen Sensorknoten unwahrscheinlich ist, kann eine genäherte Entfernung auch durch die Anzahl der notwendigen Übertragungen (Hops bzw. Hop-Anzahl, engl. hop count) von der Quelle über Hilfsknoten bis hin zum Ziel angegeben werden.

In einem beispielhaften Netzwerk (Abbildung 9) können sich die Referenzknoten B_1 und B_2 nicht direkt erreichen, sodass Sensorknoten Sk_i eine Nachricht des Knotens B_1 an B_2 weiterleiten muss (Forwarding). Die erforderliche Anzahl der Übertragungen (Hops) beträgt demnach in diesem Fall $h_{12} = 2$, die wahre Distanz zwischen den Referenzknoten jedoch insgesamt $d_{e,12} = 40\text{m}$.

In größeren Netzwerken mit mehreren Alternativrouten wird als genäherte Distanz jeweils die kleinste Hopanzahl angenommen. Da sich die Sensorknoten entlang der ermittelten Routen i. d. R. nicht auf einer Linie befinden, existiert zusätzlich zum Skalierungsfehler noch ein Linearisierungsfehler in Abhängigkeit der gewählten Route. Folglich ist es nicht möglich, aus einer ermittelten Hop-Anzahl ($h_{12} = 2$) und einer bekannten Distanz ($d_{e,12} = 40\text{m}$) die exakte Distanz einer zweiten Route, z. B. zwischen B_1 und B_3 mit $h_{13} = 6$ und $d_{e,13} = 100\text{m}$, korrekt zu berechnen.

Um eine genäherte Distanz zu ermitteln, kann statt des Hop-Counts auch einfach eine Gesamtdistanz durch Addition der geschätzten Einzeldistanzen zwischen den Sensorknoten ermittelt werden. Dieses Verfahren wird als Sum_Dist (Summe der Distanzen) bezeichnet [Lan03, Bus07]. Es führt jedoch zu einer enormen Fehlerfortpflanzung von Schätz- und Messfehlern und löst die Probleme der Linearisierungs- und Skalierungsfehler nicht.

Niculescu et al. stellten mit dem Algorithmus DV-Hop ein Verfahren für Sensornetzwerke vor, das den Skalierungsfehler reduziert und den Linearisierungsfehler durch die Kombination von Nachbarinformationen aus der Abhängigkeit der Einzelrouten löst und auf Knotenebene anhebt [Nic01]. Dies wird erreicht, indem aus allen in einem Referenzknoten B_j bekannten Routen zu anderen Referenzknoten B_k ($j \neq k$) ein Korrekturfaktor c_j aus den wahren Entfernungen und den ermittelten Hops errechnet wird. Dieser Korrekturfaktor symbolisiert die durchschnittliche Länge eines Hops (Average Hop Size, AHS).

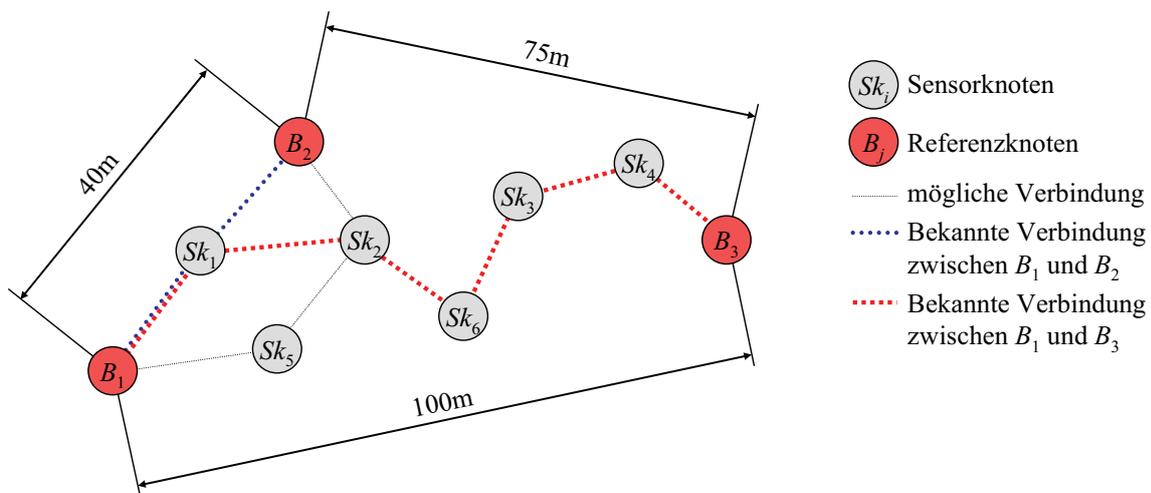


Abbildung 9: Bestimmung der Hop-Anzahl zwischen verschiedenen Sensorknoten eines Netzwerkes [Nic01]

$$c_j = \frac{\sum \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}}{\sum h_i} \quad (10)$$

Somit existiert für alle Referenzknoten B_j eines Systems ein Korrekturfaktor c_j (Tabelle 1a). Er wird in dem Distanzvektor (Distance Vector, DV), bestehend aus den Positionsinformationen des Referenzknotens und der Hop-Anzahl, im Netzwerk durch kontrolliertes Fluten (Controlled Flooding) verteilt. Die Sensorknoten korrigieren ihre ermittelten Hop-Anzahlen mit dem Korrekturfaktor des ihnen am nächsten liegenden Referenzknotens.

$$d_{ij} = h_{ij} \cdot c_j \quad (11)$$

Für den Sensorknoten Sk_5 aus Abbildung 9 beträgt der Korrekturfaktor aufgrund der Nähe zu B_1 somit $c_5 = 17,50m$ (Tabelle 1b).

Tabelle 1: a) Korrekturfaktor c_i der Referenzknoten $B_1..B_3$ für die gegebene Beispielkonfiguration (vgl. Abbildung 9) b) Distanzbestimmung des Sensorknotens Sk_5 ($c_5 = 17,5m$, $wc_5 = 16,23m$)

a)		b)			
Referenzknoten B_j	Korrekturfaktor c_j	Referenzknoten B_j	Hops h_{sj}	DV-HOP d_{sj}	WDV-HOP $d_{sj} \cdot h_{sj} \cdot wc_5$
B_1	$c_1 = \frac{\sum(40m + 100m)}{\sum(2+6)} = 17,50m$	B_1	1	$17,5m$	$16,23m$
B_2	$c_2 = \frac{\sum(40m + 75m)}{\sum(2+5)} = 16,42m$	B_2	2	$35,0m$	$32,46m$
B_3	$c_3 = \frac{\sum(75m + 100m)}{\sum(5+6)} = 15,90m$	B_3	5	$87,5m$	$81,15m$

Die unbegründete Selektion des ersten Referenzknotens zur lokalen Berechnung des Korrekturfaktors auf einem Sensorknoten Sk_i führt zu einem unbegründeten Informationsverzicht. Huang et al. schlugen deshalb eine gewichtete Berechnung (Weighted Distance Vector, WDV-Hop) aller empfangenen Korrekturfaktoren c_j der Referenzknoten vor [Hua06]. Gemäß Gleichung 12 beträgt die gewichtete, durchschnittliche Hop-Distanz des Knotens Sk_5 daher lediglich $wc_5 = (17,50m \cdot 1 + 16,42m \cdot 2 + 15,90m \cdot 5) / (1 + 2 + 5) = 16,23m$ gegenüber $c_5 = 17,5m$ des DV-Hop-Verfahrens (vgl. Abbildung 9).

$$wc_i = \frac{\sum_{j=1}^m h_j \cdot c_j}{\sum_{j=1}^m h_j} \quad (12)$$

Die Hop-Anzahl als Distanznäherung bildet eine geeignete Voraussetzung zur Berechnung von Startwerten von iterativen Verfahren, wie z. B. des Hop-Terrain-Algorithmus [Sava02]. Das Verfahren berechnet in seiner 1. Phase aus der Hop-Anzahl multipliziert mit der durchschnittlichen Hop-Distanz die Entfernung (Extended Range) zum außerhalb der eigenen Übertragungreichweite liegenden Referenzknoten. Liegen insgesamt drei Distanzen vor, kann eine Initialposition des Knotens durch Trilateration ermittelt werden. In der zweiten Phase des Verfahrens werden die Initialpositionen in mehreren Iterationen verfeinert.

Eine Distanzschätzung basierend auf Hop-Anzahl zwischen Sensorknoten ist als Voraussetzung für eine Positionsschätzung durchaus ausreichend. Das Verfahren offenbart seine Schwächen jedoch in Umgebungen mit vielen Hindernissen, da dort die Distanzen zu verdeckten Sensorknoten massiv verfälscht werden. Eine weitere Schwäche des Verfahrens zeigt sich in der mit steigendem Hop-Count abnehmenden Konnektivität [Tur06], d. h. die Ermittlung der Hop-Counts zu weiter entfernten Referenzknoten wird unwahrscheinlicher.

2.6 Lighthouse Localization System

Das Lighthouse Localization System wurde von Römer vorgestellt [Röm05]. Es basiert auf rotierenden Lichtquellen konstanter Winkelgeschwindigkeit, die parallele Lichtstrahlen der Gesamtbreite b ausstrahlen. Die Umlaufzeit einer Lichtquelle dauert t_{Turn} .

Die Distanzermittlung erfolgt durch Zeitmessung des direkten Lichtempfangs (Line of Sight) in einem Sensorknoten Sk_i . Abbildung 10a zeigt für den Sensorknoten Sk_i beispielhaft, wie das Licht zum Zeitpunkt $t = 0$ erstmalig empfangen werden kann. Durch die fortschreitende Drehung der Lichtquelle empfängt Sk_i bis zum Zeitpunkt $t_{Beam,i}$ (gestrichelter Rahmen) das Licht. Danach kann Sk_i das Licht bis zur nächsten Drehung der Lichtquelle nicht mehr empfangen.

Da die Dauer des Lichtempfangs $\Delta t = t_0 - t_{Beam,i}$ mit der Entfernung des Empfängers zum Sender sinkt, muss auch der Winkel α_i mit zunehmender Distanz d_i kleiner werden (Abbildung 10b). Er berechnet sich aus dem Verhältnis der gemessenen Zeit $t_{Beam,i}$ zur Umlaufzeit t_{Turn} mit anschließender Umrechnung ins Bogenmaß [Sto06].

$$\alpha_i = 2\pi \frac{t_{Beam,i}}{t_{Turn}} \quad (13)$$

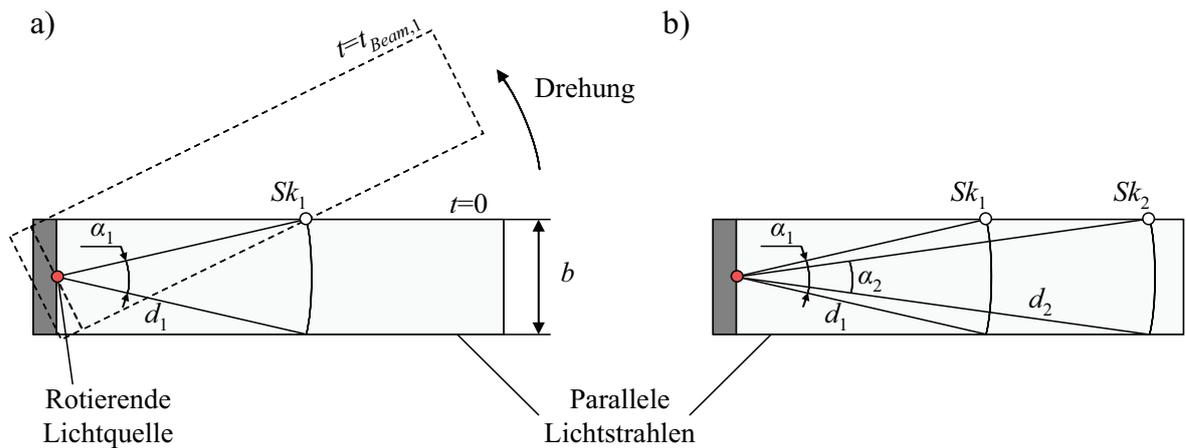


Abbildung 10: Lighthouse Localization System [Röm03] a) Winkelbestimmung durch Zeitmessung b) Distanzberechnung aus Winkeln

Die Berechnung der Distanz d_i basiert auf trigonometrischen Funktionen. Die Winkelbeziehungen des rechtwinkligen Dreiecks definieren, dass der Sinus des halben Winkels $\alpha_i/2$ dem Verhältnis aus der halben Breite des Strahlenbündels $b/2$ und der Distanz zwischen Lichtquelle und dem Sensorknoten entspricht.

$$\sin\left(\frac{\alpha_i}{2}\right) = \frac{b}{2d_i} \quad (14)$$

Durch Einsetzen der Gleichung 13 in Gleichung 14 und Umformen nach d_i entsteht die finale Berechnungsvorschrift zur Distanzermittlung (Gleichung 15).

$$d_i = \frac{b}{2 \sin\left(\pi \frac{t_{Beam,i}}{t_{Turn}}\right)} \quad (15)$$

Der Einsatz einer unterbrechungsfreien Lichtemission der Breite b ist technisch jedoch kaum realisierbar bzw. unwirtschaftlich. Römer schlägt daher vor, statt eines parallelen Lichtbündels zwei parallele Strahlen (virtuelle Beams) mit entsprechender Kennzeichnung zu verwenden.

Das vorgestellte Verfahren zeichnet sich vor allem durch die geringe Komplexität für Berechnung und Kommunikationsaufwand aus. Im Idealfall kann mit drei in einer Ebene liegenden rotierenden Lichtquellen jeder Sensorknoten drei Distanzen zu Referenzknoten ermitteln. Eine Anwendung im Raum ist ebenso denkbar, wenn mehrere zueinander versetzt arbeitenden Lichtquellen eingesetzt werden. Ein weiterer Vorteil des Verfahrens besteht in der sehr hohen Distanzgenauigkeit, die keinerlei Abhängigkeiten vom Winkel α_i zeigt (vgl. Kap. 2.12) und nur durch zu vernachlässigende Beugungseffekte beeinträchtigt wird.

2.7 Implizite Distanzermittlung

Viele Lokalisierungsverfahren erfordern zur Positionsermittlung die Kenntnis dreier gemessener Distanzen zu bekannten Referenzknoten (Abbildung 11). Für die mathematisch exakte Lokalisierung ist kennzeichnend, dass sich ein Knoten $Sk_1(x;y)$ genau im Schnittpunkt dreier Kreise mit den Radien d_i ($0 < i \leq 3$) der drei bekannten Referenzknoten $B_i(x;y)$ befindet. In diesem Fall kann die Position des Sensorknotens eindeutig bestimmt werden (vgl. Kap. 3.5.2).

In Sensornetzwerken kann es aufgrund der zufälligen Verteilung der Sensorknoten vorkommen, dass weniger als drei Referenzknoten B_i ($0 < i < 3$) in Reichweite sind, sodass nicht genügend Distanzwerte direkt bestimmt werden können und die Lokalisierung mehrdeutig wird. Abbildung 12 zeigt beispielhaft eine Konfiguration für die Sensorknoten Sk_1 und Sk_2 , die beide lediglich die Referenzknoten B_1 und B_2 kennen.

Die Nachbarschaftsbeziehungen N ergeben sich somit wie folgt: $Sk_1 \in N(B_1) \cap N(B_2)$, $Sk_2 \in N(B_1) \cap N(B_2)$, $B_1 \in N(Sk_1) \cap N(Sk_2)$ und $B_2 \in N(Sk_1) \cap N(Sk_2)$. Die anschließende Lokalisierung ist daher nicht eindeutig. Sie besitzt für beide Knoten Sk_1 und Sk_2 zwei Lösungen, nämlich exakt die Schnittpunkte der gestrichelten Kreise, die sich durch die ermittelten Distanzen ergeben. Die Symmetrieachse g_{12} , die durch Beacons B_1 und B_2 verläuft, teilt die Ebene in zwei Halbebenen $\{E | E \cap Sk_1, B_1, B_2 | E \neq Sk_2\}$ und $\{\underline{E} | \underline{E} \cap Sk_2, B_1, B_2 | \underline{E} \neq Sk_1\}$.

Barbeau et al. stellten für diese Konstellation den Algorithmus 3/2 NA (the three/two neighbor algorithm) vor [Bar04], der die Zweideutigkeit durch implizite Berechnung einer dritten Distanz auflöst, wenn geeignete zusätzliche Nachbarinformationen vorliegen.

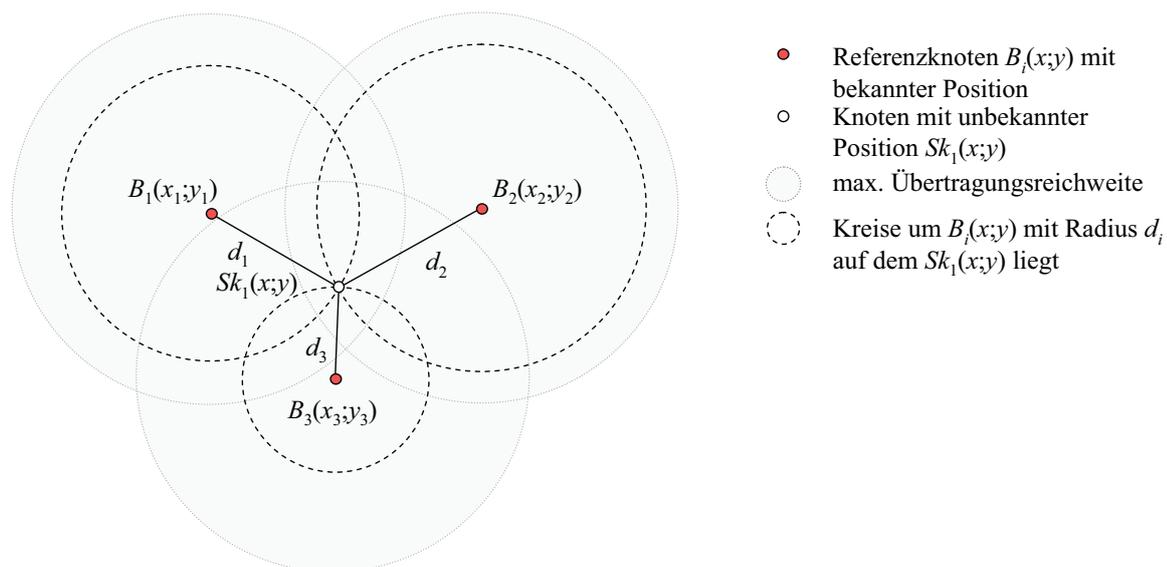


Abbildung 11: Positionsbestimmung des Knotens $Sk_1(x;y)$ bei Kenntnis von drei gemessenen Distanzen d_i zu drei gegebenen Referenzknoten $B_i(x;y)$ ($1 \leq i \leq 3$)

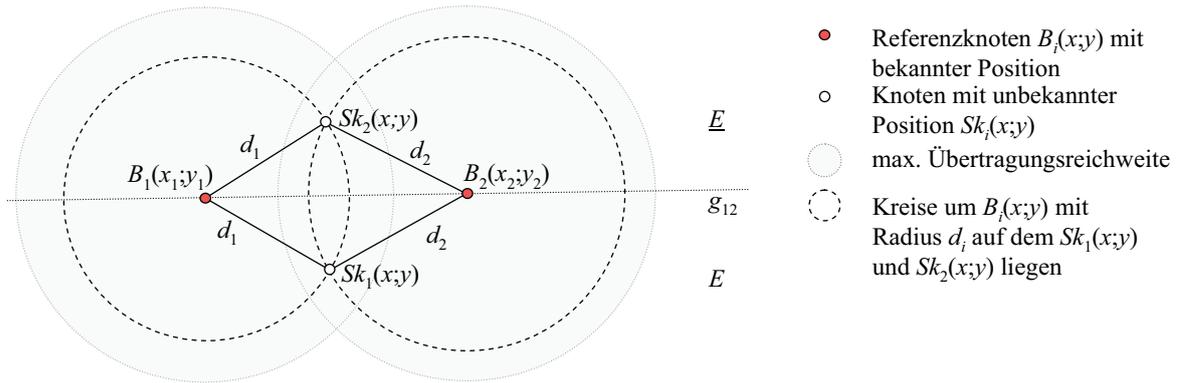


Abbildung 12: Zweideutige Positionsbestimmung der Knoten Sk_1 und Sk_2 bei Empfang von nur zwei Positionsinformationen (B_1 und B_2).

Angenommen, es kommt ein zusätzlicher Knoten B_3 hinzu, der seine Position ebenfalls kennt (Abbildung 13). Er sei in Reichweite von $Sk_1 \rightarrow Sk_1 \in N(B_1) \cap N(B_2) \cap N(B_3)$. Knoten Sk_1 hat somit Verbindung zu drei Nachbarknoten $B_1..B_3$ und kennt die Distanzen $d_1..d_3$ zu diesen Knoten. Er kann seine Position folglich eindeutig bestimmen. Für Knoten Sk_2 ergeben sich zwei mögliche Fälle. Im trivialen Fall $Sk_2 \in N(B_1) \cap N(B_2) \cap N(B_3)$ kann die Position ebenfalls eindeutig berechnet werden.

Ist Sk_2 jedoch nicht im Empfangsbereich von B_3 , gilt folglich $Sk_2 \in N(B_1) \cap N(B_2) \cap \bar{N}(B_3)$, d. h. die Lösung ist weiterhin zweideutig. Wenn für Sk_2 der Nachweis gelingt, dass es in der gegenüberliegenden Halbebene zu Sk_1 liegt, kann Sk_2 ebenfalls seine Position korrekt bestimmen, denn in diesem Fall kann die Lösung nicht die Position von Sk_1 sein. Dazu wird über den Referenzpunkt B_3 neben der Position nur noch die Zuordnung zu einer der Halbebenen E bzw. \bar{E} benötigt.

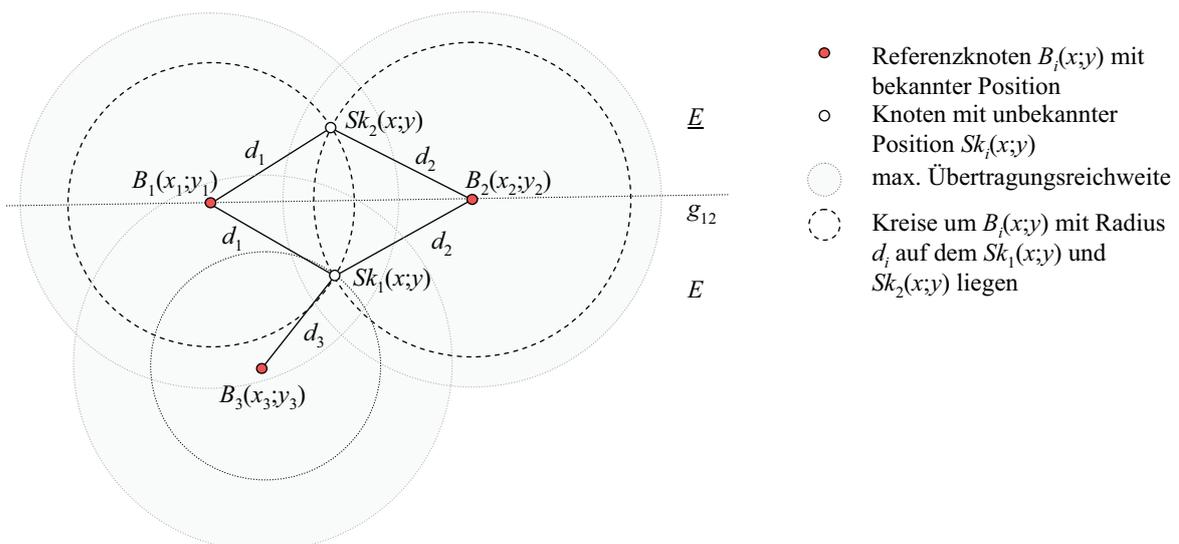


Abbildung 13: Eindeutige Lokalisierung der Knoten Sk_1 und Sk_2 bei Kenntnis eines dritten Referenzknotens $B_3 \in N(Sk_1)$, $B_3 \notin N(Sk_2)$

Kann durch eine geeignete Methode die Bedingung $B_3 \in (N(B_1) \cup N(B_2)) \cap (N(Sk_1) \cup N(Sk_2))$ nachgewiesen werden, ist die Ermittlung der Halbebene, in der B_3 liegt, ebenfalls möglich. Im gezeigten Beispiel reduziert sich die Bedingung zu $B_3 \in N(B_1) \cap N(Sk_1) \rightarrow B_3, Sk_1 \in E \rightarrow Sk_2 \in E$. Bei Anwendung eines idealen Ausbreitungsmodells (Free Space Propagation Model, vgl. Kap. 2.9) kann durch einfache Geometrie nachgewiesen werden, dass $B_3 \in E$, wenn für die verwendete Übertragungreichweite tr (engl. transmission range) die Bedingung $d(Sk_1; B_3) \leq tr < d(Sk_2; B_3)$ gilt. Der Vergleich über die Übertragungreichweite stellt die Verbindung zwischen einem beliebigen Referenzpunkt $B_3 \in N(B_1) \cup N(B_2)$ und den Knoten Sk_1 und Sk_2 her. Zur Ermittlung der eindeutigen Position haben Barbeau et al. folgenden Algorithmus vorgeschlagen:

Algorithmus 1: 3/2 NA-Algorithmus zur Berechnung der Position bei scheinbar vorliegender Zweideutigkeit der Eingangsdaten

1. Warte auf Nachrichten von Nachbarknoten
 - a. Merke Position B_i
 - b. Bestimme Distanz d_i
2. Positionsbestimmung
 - a. Bestimme durch ein geeignetes Verfahren die Position des Sensorknotens Sk_1 aus drei bekannten Referenzknoten.
 - b. Übertrage Position an Nachbarn.
3. Wenn nach festgelegtem Zeitablauf nur zwei Referenzknoten, z. B. B_1 und B_2 , bekannt sind, dann
 - a. Bestimme durch ein geeignetes Verfahren die zweideutigen Positionen Sk_1 und Sk_2 aus diesen beiden Referenzknoten.
 - b. Stelle Anfrage an B_1 und B_2 , um Koordinaten ihrer positionierten Nachbarn zu erhalten.
 - c. Wenn $N(B_1) \cup N(B_2) \neq \emptyset$ gilt, dann nehme ein $B_3 \in N(B_1) \cup N(B_2)$ und berechne die Distanz $d(B_3; Sk_1)$ und $d(B_3; Sk_2)$.
 - d. Wenn $d(B_3; Sk_1) < tr$, dann ist Sk_1 die korrekte Lösung, anderenfalls Sk_2 .

2.8 Neighborhood Intersection

Buschmann et al. stellten mit dem Neighborhood Intersection Distance Estimation Scheme (NIDES) ein Distanzermittlungsverfahren vor, das auf dem Austausch von Nachbarschaftsinformationen basiert [Bus06]. Es verzichtet dabei auf explizite Messungen und benötigt keine aufwändige Synchronisation zwischen den Sensorknoten, setzt jedoch gleichverteilte Sensorknoten und symmetrische Verbindungen voraus.

Abbildung 14 veranschaulicht die Bestimmung der Distanz d zwischen den Sensorknoten Sk_A und Sk_B an einem Beispiel. Die Hälfte der gesuchten Distanz d entspricht dabei der Übertragungreichweite tr abzüglich einer Länge l . Diese Größe l beschreibt die halbe Breite der Überlappungsfläche A .

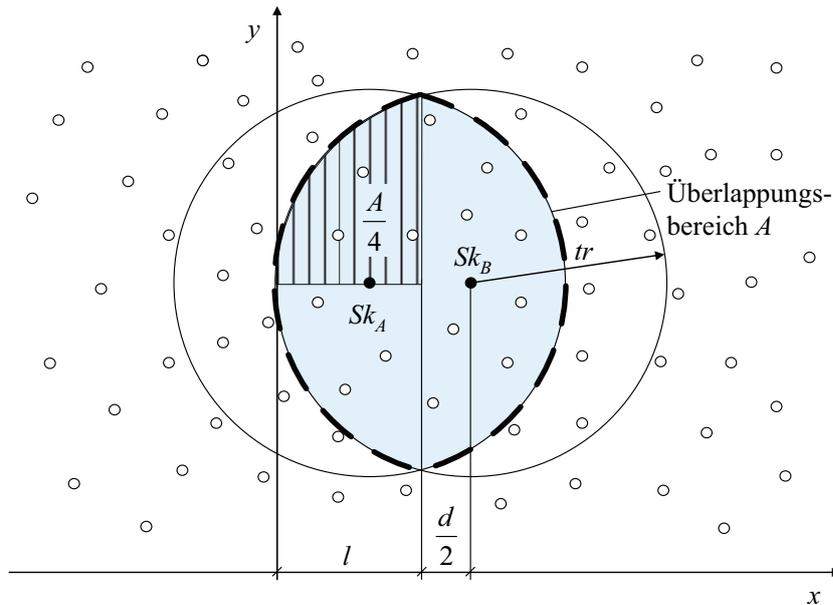


Abbildung 14: Neighborhood Intersection Distance Estimation Schema (nach [Bus06])

$$d = 2(tr - l) \quad (16)$$

Zur Ermittlung der Fläche A übertragen beide Sensorknoten eine Nachricht, die unter idealen Bedingungen (vgl. Kap. 2.12) im Abstand tr der Sender empfangen werden können. Es bildet sich aus den Übertragungsbereichen eine Schnittfläche A (gestrichelt eingerahmte Fläche), deren n_A eingeschlossene Sensorknoten Sk_i ($1 \leq i \leq n_A$) gemeinsame Nachbarknoten beider Sensorknoten Sk_A und Sk_B sind.

Durch die vorausgesetzte Gleichverteilung der Sensorknoten ist die durchschnittliche Anzahl \tilde{n} der im Übertragungsbereich A_{TR} πtr^2 eines sendenden Knotens liegenden Nachbarknoten konstant. Da die Sensorknotendichte μ im gesamten Netzwerk konstant ist, gilt folgender Zusammenhang:

$$\frac{n_A}{A} = \frac{\tilde{n}}{\pi tr^2} = \mu \quad (17)$$

Die Schnittfläche A besteht aus vier gleich großen Teilflächen A' . Gleichung 17 kann somit nach A' umgestellt werden:

$$A' = \frac{1}{4} \frac{n_A}{\tilde{n}} \pi \cdot tr^2 \quad (18)$$

Bei bekannter Teilfläche A' können die Länge l des Kreisbogens (Gleichung 19) und somit auch die Distanz d (Gleichung 16) berechnet werden.

$$l = tr + 2\sqrt{2}tr \sin \left(\frac{\arcsin \left(\frac{3\sqrt{2}(4A' - \pi tr^2)}{16tr^2} \right)}{3} \right) \quad (19)$$

Die mit NIDES erreichte Distanzgenauigkeit schwankt zwischen $0,25tr$ und $0,1tr$. Der Distanzfehler sinkt sogar mit zunehmender Sensorknotendichte leicht. Das Verfahren besteht zudem durch seinen geringen Berechnungsaufwand, vorausgesetzt Gleichung 19 wird entsprechend approximiert.

2.9 Received Signal Strength

Die Übertragung von Signalen per Funk ist mit der Übertragung von elektrischer Energie vom Sender in sein unmittelbares Umfeld verbunden. Alle Knoten in diesem Umfeld können das Signal empfangen, bis sich das Signal durch die Dämpfung innerhalb des Mediums hinreichend abgeschwächt hat.

Die beim Empfänger aufgenommene Energie ist abhängig von der Entfernung zum Sender, den räumlichen Gegebenheiten und weiteren Faktoren wie der Homogenität des Übertragungsmediums, möglichen Interferenzen und Reflexionen, Beugungen an Ecken und Kanten, der Form und Lage der Antennen, der Richtcharakteristik etc.

Eine weit verbreitete Methode, eine Distanz in einem Netzwerk zu messen, nutzt die Abschwächung eines Signals mit der Entfernung zum Sender aus. Sie basiert auf dem Free Space Propagation Model (FSPM). Es gilt unter folgenden Bedingungen:

- kreisrunde Abstrahlcharakteristik des Signals,
- Übertragungsmedium Vakuum,
- homogener Raum,
- keine Beugung,
- keine Reflexionen und
- keine Hindernisse.

Friis hat für dieses ideale Modell die Friis'sche Transmissionsgleichung (Gleichung 20) zur Berechnung der Empfangsleistung P_{RX} veröffentlicht [Fri46]. Die Empfangsleistung ist direkt proportional zur Sendeleistung P_{TX} , den Antennengewinnen G_{RX} und G_{TX} . Zusätzlich beeinflussen Übergangswiderstände, Filterverluste, Materialabweichungen und andere Hardwareinflüsse die Höhe der Empfangsleistung P_{RX} . Diese Vielzahl von Fehlern eines Systems wird in der Konstanten L zusammengefasst.

$$\frac{P_{RX}}{P_{TX}} = \frac{G_{RX} G_{TX}}{L} \left(\frac{\lambda_0}{4\pi d} \right)^2 \quad (20)$$

P_{RX} : Sendeleistung [W]
 P_{TX} : Empfangsleistung [W]
 G_{RX} : Gewinn Sender
 G_{TX} : Gewinn Empfänger
 L : Systemverluste
 λ_0 : Wellenlänge [m]
 d : Entfernung [m]

Anhand der Gleichung 20 ist weiterhin ersichtlich, dass sowohl die Wellenlänge λ_0 als auch die Distanz d die Empfangsleistung quadratisch beeinflussen. Somit fällt die Empfangsleistung P_{RX} mit 20dB/Dekade [Rap02]. Bei gegebener Empfangsleistung kann durch Umformen die Entfernung zwischen Sender und Empfänger bestimmt werden.

$$d = \frac{\lambda_0}{4\pi} \sqrt{\frac{G_{RX} G_{TX} P_{TX}}{P_{RX} L}} \quad (21)$$

Die Dämpfung des Signals in Abhängigkeit der Entfernung d wird auch als Path-Loss PL bezeichnet und im logarithmischen Leistungsmaß angegeben. Der Path-Loss des Signals darf am Empfänger nicht größer als die maximale Empfangsempfindlichkeit PL_{max} (Receiver Sensitivity) sein, damit das Signal korrekt entschlüsselt werden kann.

$$PL[\text{dB}] = 10 \log \frac{P_{TX}}{P_{RX}} = -10 \log \left(\frac{G_{RX} G_{TX}}{L} \left(\frac{\lambda_0}{4\pi d} \right)^2 \right) \quad (22)$$

Die Friis'sche Gleichung 20 ist lediglich eine Näherung für die Empfangsleistung P_{RX} , wenn sich der Empfänger im Fernfeld des Senders befindet und die Distanz zum Sender d größer als die Fraunhofer Distanz d_f ist. Sie berechnet sich aus der größten physikalischen Ausdehnung D der Antenne und der Wellenlänge λ_0 , wobei gilt $d_f \cong D$ und $d_f \cong \lambda_0$.

$$d_f = \frac{2D^2}{\lambda_0} \quad (23)$$

Die Empfangsleistung P_{RX} kann auch relativ zu einer bekannten Referenzdistanz d_0 ($d_0 > d_f$) ausgedrückt werden. Dies ist besonders von Vorteil, wenn

- die Antennengewinne G_{TX} und G_{RX} ,
- die Systemverluste L oder
- die exakte Wellenlänge λ_0

unbekannt sind. In diesem Fall eliminiert die Verhältnisgleichung aus Gleichung 20

$$P_{RX}(d) = P_{RX}(d_0) \left(\frac{d}{d_0} \right)^2 \quad d_f < d_0 \leq d \quad (24)$$

und Gleichung 22 die unbekanntenen Größen.

$$\begin{aligned} PL[\text{dB}] &= PL(d_0) + 10 \log \left(\frac{P_{RX}(d)}{P_{RX}(d_0)} \right) \\ &= PL(d_0) + 20 \log \frac{d}{d_0} \end{aligned} \quad (25)$$

Die Messung der Empfangsleistung ist in IEEE 802.11 standardisiert [IEEE99], jedoch keinesfalls trivial [Bar02]. In der Regel wird die Empfangsleistung als Indikator (Received Signal Strength Indicator, RSSI) angegeben. Der ermittelte Messwert darf in einem Wertebereich zwischen 0..255 liegen. In der Praxis schwankt die Bandbreite dieses Wertebereiches jedoch und ist abhängig von der Implementierung sowie der eingesetzten Hardware. Oft beträgt die Auflösung eines RSSI nur wenige Bit und ist zumeist nichtlinear. Folglich muss für jede Konfiguration eine Kalibrierung und Linearisierung erfolgen, sofern eine aussagekräftige Distanz bestimmt werden soll.

Die RSSI-Messung soll am RF-Transceiver des CC1010 der Firma Chipcon beispielhaft demonstriert werden [Chi03]. Das eingehende Signal wird an der Antenne empfangen und liegt mit der Leistung P_{RX} an Pin RF_IN an (Abbildung 15). Nach dem Empfang erfolgt eine Verstärkung im LNA (Low Noise Verstärker) und eine Frequenzwandlung im Mixer. In der nachfolgenden IF-Stufe (Intermediate Frequency) wird das Signal erneut verstärkt und anschließend gefiltert.

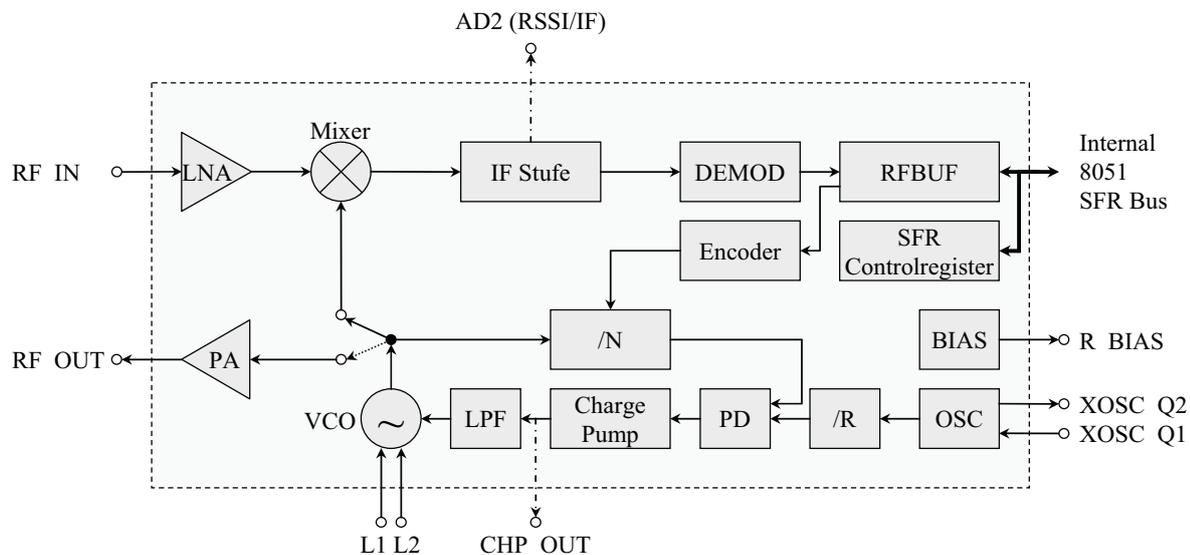


Abbildung 15: Vereinfachtes Blockschaltbild des RF-Transceivers CC1010 [Chi03]

Nach der IF-Stufe liegt an AD2 (RSSI/IF) des Mikrocontrollers CC1010 ein zum ursprünglichen Empfangssignal umgekehrt proportionaler Strom an. Der Strom wird über einem Widerstand in die Spannung U_{RSSI} gewandelt und im A/D-Wandler des CC1010 digitalisiert (Abbildung 16a). Die Übertragungsfunktion zwischen U_{RSSI} und P_{RX} [dBm] ist nahezu linear und kann durch die lineare Regression $P_{RX} = 46,9 \cdot U_{RSSI} - 53,9$ genähert werden (siehe Abbildung 16b).

Die Konfigurationsregister (Special Function Register, SFR) ADDATH und ADDHTL des Mikrocontrollers CC1010 enthalten nach der A/D-Wandlung die Spannungswerte bezogen auf die Betriebsspannung ($VDD = 3,3V$) in Zweierkomplementdarstellung (RSSI_read). Nach der Konvertierung des Wertes durch die Vorschrift „Wenn $RSSI_read \geq 128$, dann $RSSI_dec = RSSI_read - 256$, sonst $RSSI_dec = RSSI_read$ “ kann die Empfangsleistung P_{RX} direkt extrahiert werden.

Ausgehend von den theoretischen Erwartungen wurden mehrfach Messreihen zur Empfangsleistung im Freifeld durchgeführt. In Abbildung 17 ist exemplarisch die Messung unter nahezu idealen Bedingungen (absolut freies Gelände) dargestellt. Trotz dieser sehr guten Umgebungsbedingungen hatten die ermittelten Varianzen der verschiedenen Messreihen teilweise sehr hohe Werte, die eine Distanzermittlung durch Einzelmessungen unrealistisch erscheinen lassen.

Die hohe Varianz und die damit kaum nutzbaren Distanzwerte liegen jedoch vielfach in der nicht-optimierten Technologie des CC1010 begründet [Sri06].

Besonders auffällig im Vergleich der gemessenen Empfangsleistung ist die Diskrepanz zur theoretisch erwarteten Leistung. Folglich existieren neben dem Übertragungsmedium weitere Fehlerquellen in der Übertragungskette.

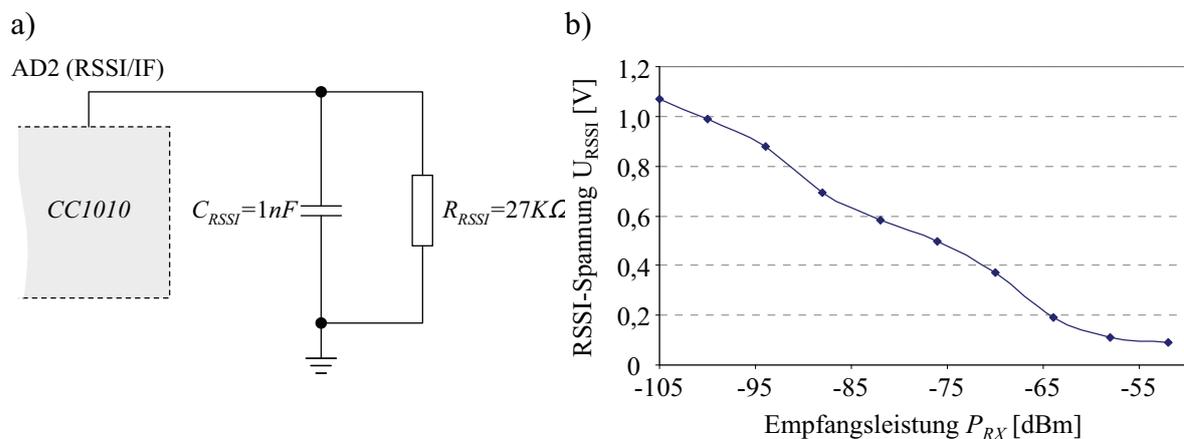


Abbildung 16: a) Messschaltung zur Ermittlung der RSS-Spannung b) Typischer Verlauf der RSS-Spannung des CC1010 bei 868 MHz in Abhängigkeit der Empfangsleistung (unter Laborbedingungen) [Chi03]

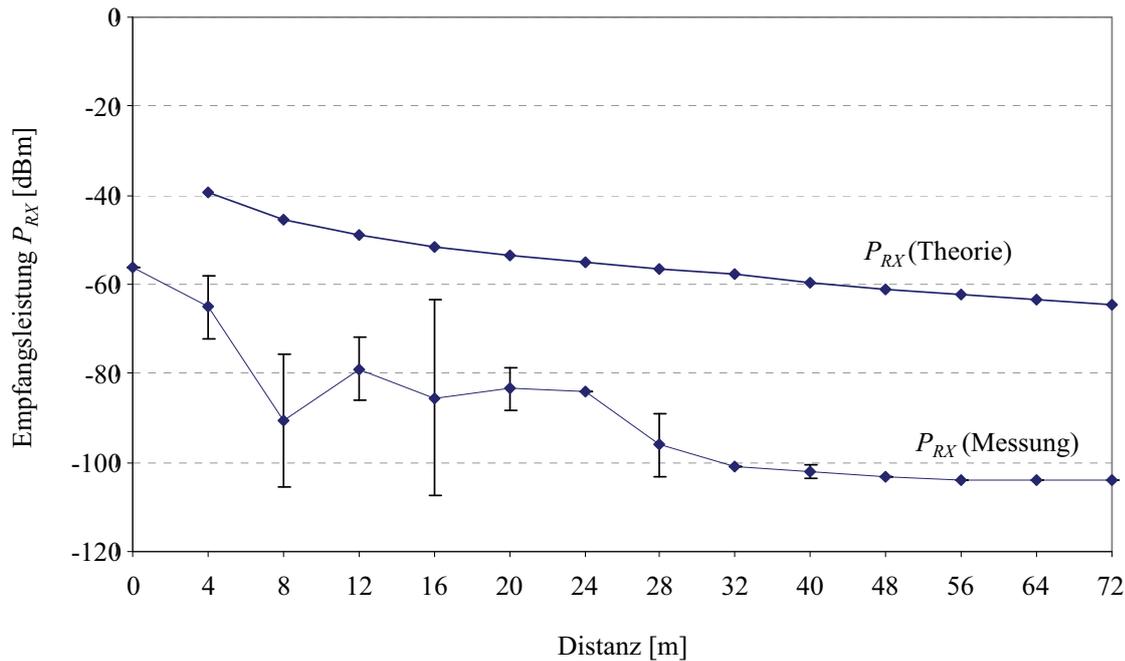


Abbildung 17: Empfangsleistung P_{RX} im Vergleich (Theorie vs. Praxis). Die Messung erfolgte zwischen zwei CC1010 Transceivern der Firma Chipcon am Strand von Rostock-Warnemünde.

Der Fehler der RSSI-Bestimmung setzt sich aus einer Vielzahl möglicher Einzelfehler einer Übertragungskette zusammen. Abbildung 18 zeigt beispielhaft die Übertragungsglieder eines typischen Sensorknotens (CC1010). Die Praxis zeigt (Abbildung 17), dass die letztendlich deutliche Abweichung der gemessenen Empfangsleistung zur theoretisch erwarteten Empfangsleistung nicht nur durch die Funkübertragung (Antenne \rightarrow Medium \rightarrow Antenne) verursacht wird, sondern auch durch andere Übertragungsglieder.

Für eine möglichst genaue Distanzschätzung auf Basis des RSSI ist daher die Kenntnis der anderen Übertragungsglieder inklusive ihrer Abweichungen erforderlich. In der Praxis jedoch finden sich in den Datenblättern der Mikrocontroller-Hersteller kaum Angaben zu Übertragungsfunktionen einzelner Komponenten. Die Gründe liegen in der fehlenden Nachfrage nach solchen Informationen und dem relativ hohen Aufwand zur Ermittlung dieser Kennlinien. Erschwerend kommt hinzu, dass die Angabe der Funktionen ebenfalls einer nichtgewollten Freigabe technischer Details gleichkommt.

Zudem gibt es aber auch Übertragungsglieder, deren Funktion stark von den Umgebungsbedingungen, z. B. Stabilität der Spannungsversorgung und Taktdrift, Eigenschaften des Übertragungsmediums, abhängig ist. Es ist somit notwendig, eine Korrektur der Messergebnisse vorzunehmen. Eine Möglichkeit kann eine einmalige Kalibrierung beim Start des Messvorgangs sein [Sav05].

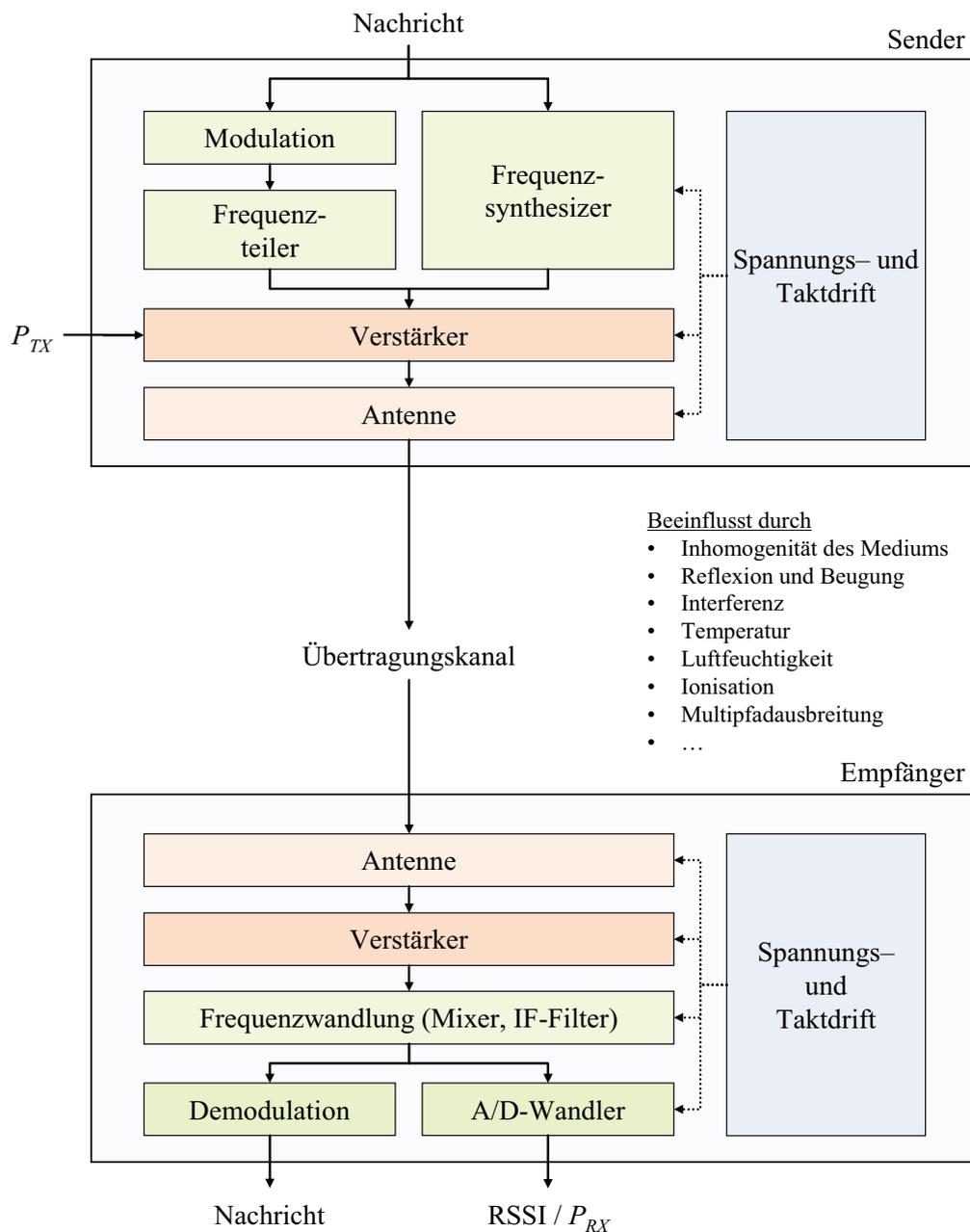


Abbildung 18: Übertragungsglieder eines Sensorknotens bei der Nachrichtenübermittlung per Funk

2.10 Minimale Übertragungsleistung

Die Distanzbestimmung auf Basis der Empfangsleistung eines Signals benötigt eine geeignete Beschaltung am A/D-Wandler des Mikrocontrollers (Abbildung 16a). Fehlt jedoch diese Schaltung, besitzt der Mikrocontroller keinen A/D-Wandler oder mangelt es aufgrund einer Hardwareabstraktionsschicht an dem nötigen Zugriff auf die Hardware, kann die Empfangsstärke nicht gemessen und folglich kein RSSI bestimmt werden. In Systemen, die

eine Konfiguration der Sendeleistung P_{TX} (auch Übertragungsleistung) ermöglichen, kann das Prinzip der Messung einer Empfangsleistung indirekt angewendet werden.

In einem idealen System mit isotropen Antennen können die Antennengewinne mit $G_{TX} = 1$ und $G_{RX} = 1$ sowie die Systemverluste $L = 1$ vernachlässigt werden. Somit vereinfacht sich Gleichung 22 wie folgt:

$$PL[\text{dB}] = -20 \log\left(\frac{\lambda_0}{4\pi d}\right) \quad (26)$$

Abbildung 19 veranschaulicht die Dämpfung des Signals (Path Loss) in Abhängigkeit der Distanz bei verschiedenen Trägerfrequenzen in dem vorgenannten idealen System. Die minimale Dämpfung (Minimal Coupling Loss, MCL) der betrachteten Frequenzen variiert zwischen 26dB und 44dB ($\Delta PL = 18\text{dB}$). Diese Path-Loss-Differenz ist für alle betrachteten Distanzen konstant. Folglich steigt die benötigte Empfangsempfindlichkeit zur Übertragung einer Nachricht bis zur Distanz d mit der verwendeten Frequenz. Somit steigt auch die benötigte Sendeleistung P_{TX} mit der verwendeten Trägerfrequenz.

Die weit verbreiteten Sensorknoten der Firma Scatterweb, auch als Embedded Sensor Boards (ESB) bezeichnet, nutzen das lizenzfreie 868-MHz-Band zur Übertragung von

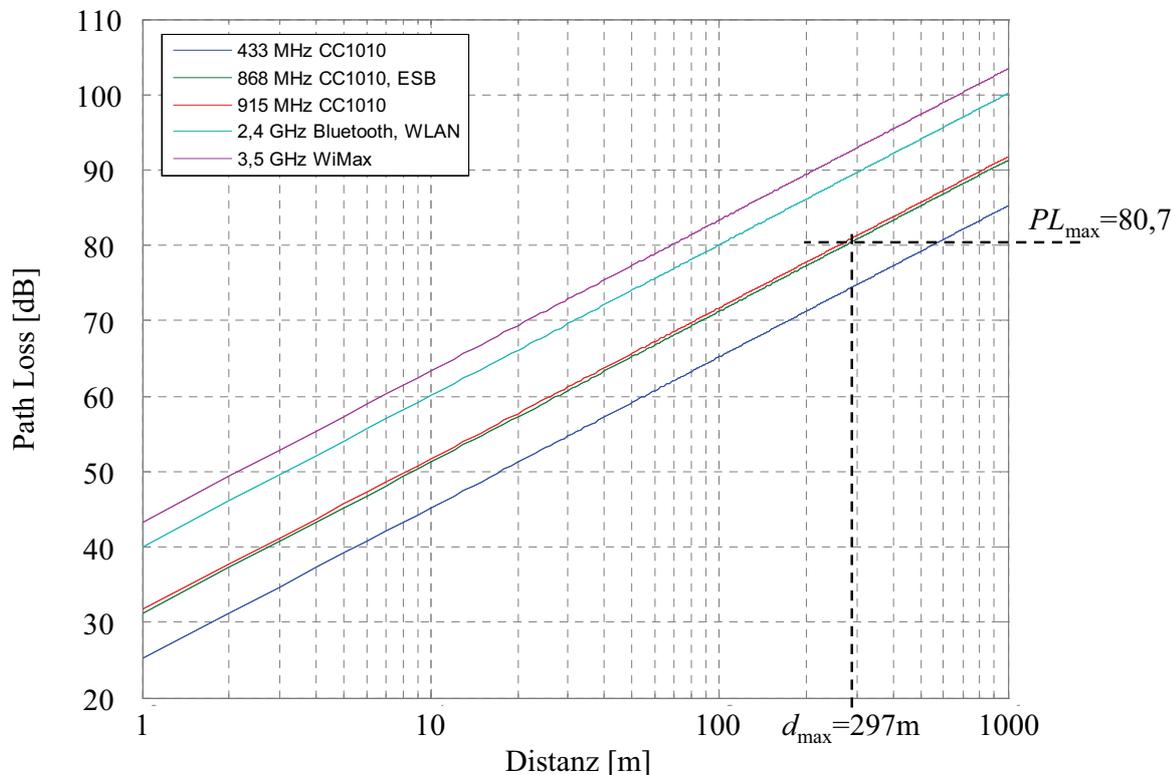


Abbildung 19: Path-Loss (PL) eines Signals in Abhängigkeit der Distanz zwischen Sender und Empfänger bei verschiedenen Trägerfrequenzen

Nachrichten [Sch04]. Diese Sensorknoten kennzeichnet eine maximale Empfangssensitivität der Receiver von PL_{max} 80,75dB [Dei06]. Sie können daher eine maximale Übertragungsreichweite von d_{max} 297m erreichen (Abbildung 19). Für weiter entfernte Sensorknoten ist ein gesendetes Signal nicht mehr detektierbar.

$$d_{max} = \frac{\lambda_0}{4\pi 10^{\frac{-PL_{max}}{20}}} \quad (27)$$

Bei bekannter maximaler Sendeleistung $P_{TX,max}$ kann die minimale Empfangsleistung $P_{RX,min}$, die für den korrekten Empfang eines Signals benötigt wird, durch Umstellen der Gleichung 22 ermittelt werden (Gleichung 28). Für die ESB-Sensorknoten beträgt bei einer maximalen Sendeleistung $P_{TX,max}$ 0,75mW die minimale Empfangsleistung nach 297m ca. $P_{RX,min}$ 0,63pW.

$$P_{RX,min} = \frac{P_{TX,max}}{10^{\frac{PL_{max}}{10}}} \quad (28)$$

Die gemessene Empfangsleistung eines Signals kann, wie in Kap. 2.9 beschrieben, zur Berechnung einer Entfernung zum Sender benutzt werden (Abbildung 20a). Charakteristisch für dieses Verfahren ist, dass i. d. R. eine Nachricht mit maximaler Sendeleistung $P_{TX,max}$ übertragen wird, um möglichst viele Sensorknoten im Umkreis $0 < d \leq d_{max}$ zu erreichen. In Reichweite befindliche Sensorknoten können durch Ablesen des zur gemessenen Empfangsleistung gehörenden Distanzwertes auf der Leistungskurve die Entfernung zum

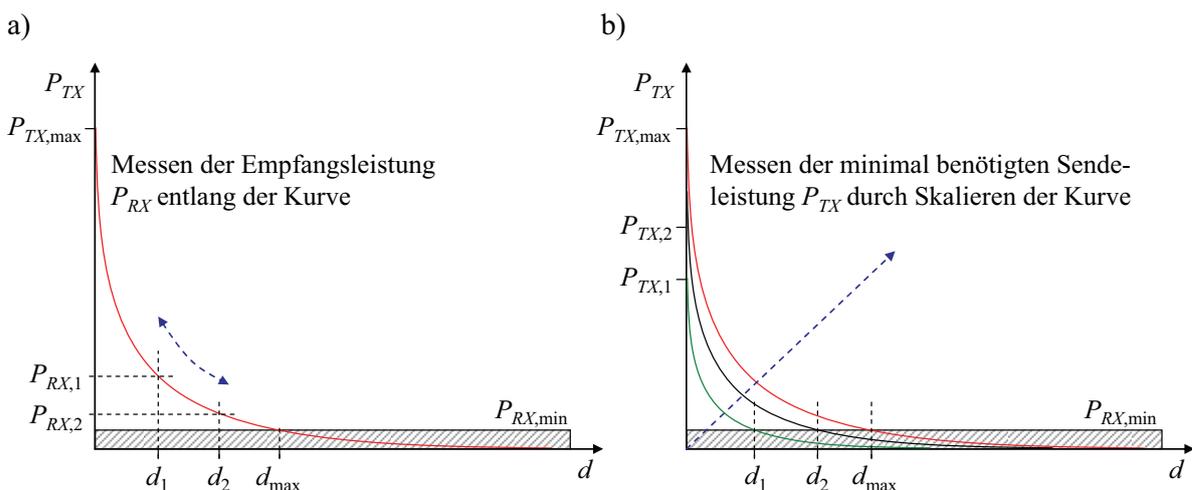


Abbildung 20: Entfernungsermittlung zwischen Sender und Empfänger einer Nachricht durch a) Messen der Empfangsfeldstärke (RSSI) b) Minimale Übertragungsleistung $P_{TX,min}$ (MTP)

Sender bestimmen. Sensorknoten in größeren Entfernungen $d > d_{max}$ zum Sender können das Signal aufgrund der zu hohen Dämpfung PL_{max} und der demnach unterschrittenen minimalen Empfangsleistung $P_{RX,min}$ nicht empfangen.

Ein neuer Ansatz zur Bestimmung der Distanz zwischen Sender und Empfänger besteht im Detektieren der minimal notwendigen Sendeleistung $P_{TX,min}$ (Minimal Transmission Power, MTP), bei der ein ausgesendetes Signal empfangen werden kann [Blu06a]. Bei gegebener minimaler Empfangsleistung $P_{RX,min}$ bestimmt sich $P_{TX,min}$ für eine gegebene Distanz d wie folgt:

$$P_{TX,min} = \frac{P_{RX,min} L}{G_{RX} G_{TX}} \left(\frac{4\pi d}{\lambda_0} \right)^2 \quad (29)$$

Im Gegensatz zur RSS-Methode, bei der die Empfangsleistung und die Distanz auf der Leistungskurve liegen, skaliert das MTP-Verfahren die Leistungskurve und verschiebt somit den Schnittpunkt der minimalen Empfangsleistung in Abhängigkeit der Distanz wie Abbildung 20b veranschaulicht [Blu06b].

Der Ansatz der Distanzermittlung besteht darin, eine Nachricht mit zunehmender Sendeleistung $P_{TX,i}$ beginnend mit $P_{TX,min}$ mehrfach in das Übertragungsmedium zu senden ($\{P_{TX,i} : P_{TX,min} < P_{TX,i} < P_{TX,max}\}$) und den eingestellten Registerwert der Sendeleistung $SW_{TX,i}$ im Transceiver jeweils in der zu übertragenden Nachricht zu kodieren.

$$P_{TX,i} = f(SW_{TX,i}) \quad 0 < i \leq i_{max} \quad (30)$$

Die in Übertragungreichweite des Senders befindlichen Empfänger einer Nachricht speichern den jeweils kleinsten Sendewert $SW_{TX,min}$. Dieser minimale Sendewert $SW_{TX,min}$ stellt somit einen Schwellwert dar, bei dem eine der insgesamt i_{max} Nachrichten eines Senders am Empfänger erstmalig empfangen werden $P_{RX,i} \geq P_{RX,min}$.

$$P_{RX,i} = f(SW_{TX,i}) \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad P_{RX,i} \geq P_{RX,min} \quad (31)$$

Aus diesem Schwellwert $SW_{TX,min}$ kann die Distanz d zwischen Sender und Empfänger berechnet werden, da er die maximal erreichbare Distanz der eingestellten minimalen Sendeleistung bestimmt. Die detektierte Empfangsleistung entspricht in dieser Entfernung der minimal detektierbaren Leistung $P_{RX,min}$ (Gleichung 28), die sich aus der maximalen Empfangsempfindlichkeit PL_{max} ergibt (vgl. Abbildung 19).

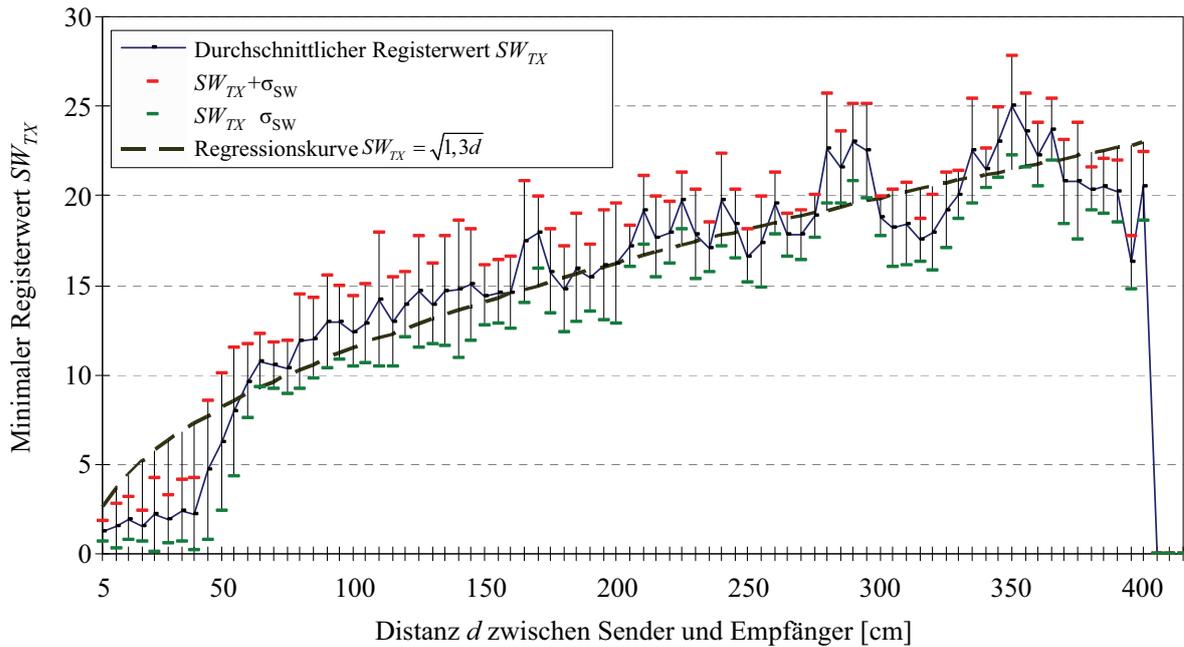


Abbildung 21: Minimaler Registerwert SW_{TX} des ESB-Transceivers zur Konfiguration der minimalen Sendeleistung $P_{TX,min}$ in Abhängigkeit der Distanz d zwischen zwei Sensorknoten bei 40 Messungen pro Distanz im Labor

$$d = \sqrt{\frac{f(SW_{TX,min})}{P_{RX,min}} \left(\frac{\lambda}{4\pi}\right)^2} \quad (32)$$

Da der Zusammenhang zwischen dem Registerwert SW_{TX} und der Sendeleistung P_{TX} i. d. R. unbekannt ist und nicht in den Datenblättern der Mikrocontroller bzw. Sensorknotenhersteller ausgewiesen ist, muss er empirisch ermittelt werden. Abbildung 21 veranschaulicht eine beispielhafte Messung des minimalen Registerwertes SW_{TX} in Abhängigkeit der Distanz mit den Embedded Sensor Boards (ESB).

Die dargestellten minimalen Registerwerte wurden pro Distanz zum sendenden Knoten aus dem Mittelwert der 40 durchgeführten Einzelmessungen bestimmt. Für jeden Mittelwert wurde zusätzlich die Standardabweichung σ_{SW} bestimmt.

Die aufgenommene Messreihe hat eine im Vergleich zu Messungen der Empfangsleistung überraschend hohe Auflösung gerade im Nahbereich und eine sehr geringe Standardabweichung der Einzelmessung (vgl. Abbildung 17). Die Distanzermittlung ist zwar bei einer Einzelmessung immer noch zu ungenau, jedoch kann durch Mehrfachmessung und geeignete Aggregation der ermittelten Registerwerte eine statistisch höhere Sicherheit erreicht werden (vgl. Kap. 6.4).

Die Linearisierung der gezeigten Messreihe aus Abbildung 21 konnte durch Quadrierung des minimalen Registerwertes SW_{TX} erreicht werden. Durch die anschließende lineare

Regression und die Berechnung der Quadratwurzel konnte der Zusammenhang aus Registerwert und Distanz für diese Konfiguration ermittelt werden.

$$SW_{TX} = \sqrt{1,3d} \quad (33)$$

Folglich kann auch der in Gleichung 30 formal beschriebene Zusammenhang für die minimale Sendeleistung $P_{TX,min}$ durch Einsetzen der nach d umgeformten Gleichung 33 in Gleichung 29 ermittelt werden.

$$P_{TX,min} = \frac{P_{RX,min} L}{G_{RX} G_{TX}} \left(\frac{4\pi \cdot SW_{TX,min}^2}{1,3\lambda_0} \right)^2 \quad (34)$$

Somit gilt für die verwendeten Sensorknoten (ESB) in der untersuchten Umgebung folgender Zusammenhang:

$$P_{TX} \sim SW_{TX}^4 \quad (35)$$

Die Distanzbestimmung anhand der minimalen Sendeleistung $P_{TX,min}$ ist ein probates Mittel, um Entfernungen zwischen zwei Sensorknoten in Systemen zu bestimmen, die keine bzw. sehr ungenaue Messeinrichtungen zur Empfangsleistungsbestimmung besitzen. Die vorgestellte Methode zeichnet sich vor allem durch ihre geringe Standardabweichung aus. Diese resultiert aus dem geringen Einfluss von Interferenzen und Reflexionen, da jeweils nur die Leistungswerte der kürzesten Strecke (direkte Verbindung) für die Distanzermittlung benutzt werden. Im Vergleich zur RSSI-Bestimmung werden zudem alle Fehlerquellen der Mess- und Quantisierungsstufen vermieden (Abbildung 18).

Das erforderliche Senden mehrerer Nachrichten mit unterschiedlichen Übertragungsleistungen erhöht jedoch im Vergleich zur RSSI-Bestimmung den Energieverbrauch und die Anzahl der Übertragungen und somit auch die Kanalauslastung maßgeblich. Das MTP-Verfahren ist folglich besonders für Systeme geeignet, in denen die RSSI-Bestimmung ungenau bzw. nicht möglich ist und ausreichend Energie zur Verfügung steht.

2.11 Link Quality

Ein weiteres Distanzermittlungsverfahren basiert auf dem Link Quality Indicator (LQI). Im Gegensatz zur reinen Empfangsstärkemessung als Voraussetzung der RSSI-Bestimmung, wird bei der Ermittlung der Link Quality noch auf weitere Eigenschaften der Verbindung zwischen zwei Kommunikationspartner eingegangen, z. B.

- die gemessene Empfangsstärke
- die tatsächliche Datenrate vs. mögliche Datenrate
- erkannte Paketverluste
- erfolgte Übertragungswiederholungen
- Signal-Rausch-Verhältnis

Bei der Kombination der einzelnen Eigenschaften ist dem Hersteller gemäß der Standardisierung nach IEEE 802.15.4 [IEEE06] freigestellt, welche der folgenden Kennwerte einer Übertragung in die LQI-Berechnung miteinfließen. Wörtlich heißt es dort: „The LQI measurement is a characterization of the strength and/or quality of a received packet. The measurement may be implemented using receiver ED¹, a signal-to-noise ratio estimation, or a combination of these methods. The use of the LQI result by the network or application layers is not specified in this standard.“ Da die Kalkulation nicht definiert ist und daher auf inkonsistenten Methoden der Hersteller beruht, ist eine allgemeingültige und qualifizierte Aussage zur Abgrenzung der Link Quality gegenüber anderen Distanzermittlungsverfahren nicht möglich. Ebenso ist ein Vergleich zwischen den LQI-Werten verschiedener Plattformen wenig sinnvoll.

In homogenen Netzwerken mit identischen Transceivern besteht bei ausreichender Dokumentation durchaus die Möglichkeit, den LQI zur Distanzschätzung zu benutzen. In Zigbee-basierten Systemen [ZA05] der Firma Chipcon/Texas Instruments existiert mit dem CC2420 ein leistungsstarker Transceiver, der auch den LQI bereitstellt. Hinsichtlich der Berechnungsgrundlage ist die Dokumentation jedoch zweideutig. Einerseits wird der LQI aus dem Durchschnitt der ersten 8 korrelierten Symbole nach dem Start_of_Frame (SFD) der Nachricht gebildet – andererseits aus dem „Length Field“ und der „PHY Service Data Unit“ des physikalischen Frames [TI07].

Eine empirische Messung der Link Quality mit dem Zigbee-Development Kit CC2420 der Firma Texas Instruments (vormals Chipcon) zeigte einen nahezu idealen, kontinuierlich abfallenden Graphen zwischen LQI und Distanz. Die Messungen erfolgten zwischen einem an einen PC angeschlossenen Koordinator und vier verschiedenen beweglichen Routern auf freiem Feld in einer Höhe $h = 20\text{cm}$ ohne weitere Hindernisse. Besonders bemerkenswert ist gegenüber den RSSI- und MTP-Verfahren die sehr geringe Varianz des LQI. Das Messergebnis wird durch die Ausreißer bei einer Distanz $d \approx 7\text{m}$ getrübt, die sich hauptsächlich durch Reflexionen am Boden erklären [Lin96].

¹ ED: engl. Energy Detection, Ermittlung der Empfangsleistung

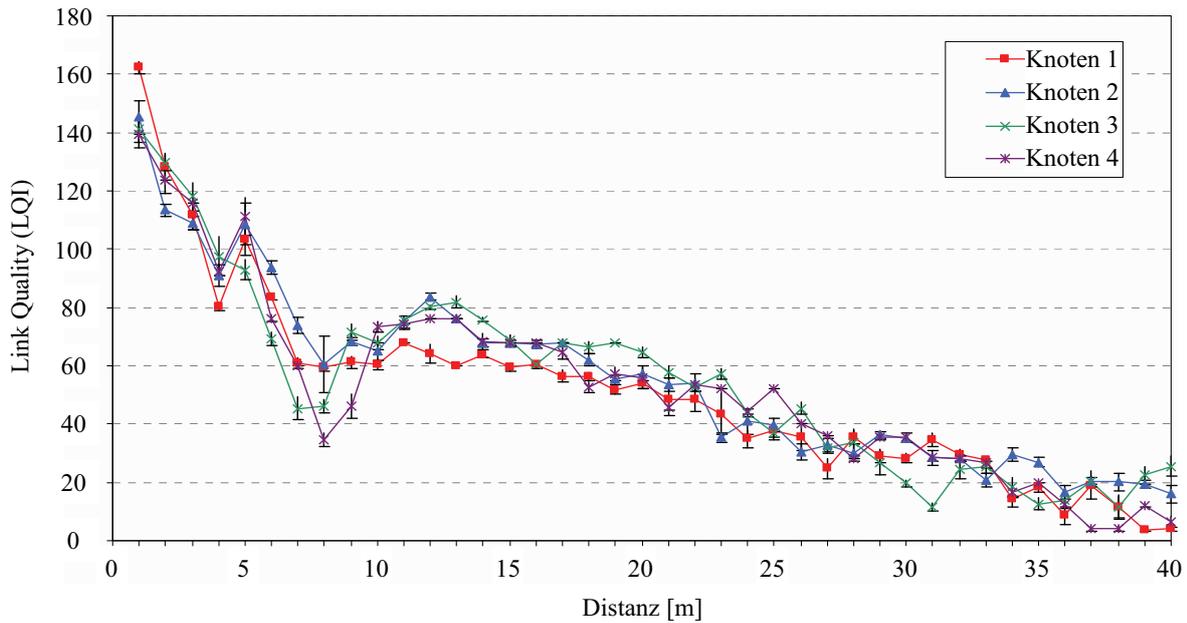


Abbildung 22: Verbindungsqualität (Link Quality) vier verschiedener Zigbee-Sensorknoten (CC2420) der Firma Texas Instruments (TI)

2.12 Distanzgenauigkeit

In Anwendungsszenarien unter idealen Bedingungen (umgebendes Vakuum, keine Hindernisse bzw. Störsender usw.) zwischen zwei mit idealen isotropen Antennen ausgestatteten Kommunikationspartnern ist das Free Space Propagation Model (FSPM) basierend auf der Friis'schen Gleichung (vgl. Kap. 2.9) ein geeignetes Modell zur Ermittlung der Entfernung zwischen Sender und Empfänger [Rap02]. In realistischen Einsätzen mit diversen Umwelteinflüssen wie inhomogenen Übertragungsmedien, Hindernissen, Reflexionen und Beugungen verändert sich die Abstrahlcharakteristik einer Antenne deutlich. Sie bildet Haupt- und Nebenkeulen (Abbildung 23), deren Eigenschaften von diversen Konstruktionsparametern, Lage, Drehung und weiteren Umwelteinflüssen abhängig sind [Bal97, Zho04]. Für die auf der gemessenen Empfangsleistung (RSSI) bzw. vergleichbarer Verfahren (MTP) basierende Distanzermittlung ist charakteristisch, dass alle Empfänger auf einer Hüllfläche, deren tatsächliches Ausmaß aufgrund der zahlreichen Einflüsse stark schwankt, dieselbe Leistung P_{RX} detektieren. Sie ermitteln folglich bei Anwendung des FSPM alle dieselbe Entfernung (vgl. Gleichung 21) zum Sender, obwohl die tatsächlichen Distanzen sehr unterschiedlich sind. In der Endkonsequenz führt dies zu einer fehlererhöhenden Wirkung auf die nachfolgende Lokalisierung durch die stark fehlerbehafteten Distanzwerte [Whi05].

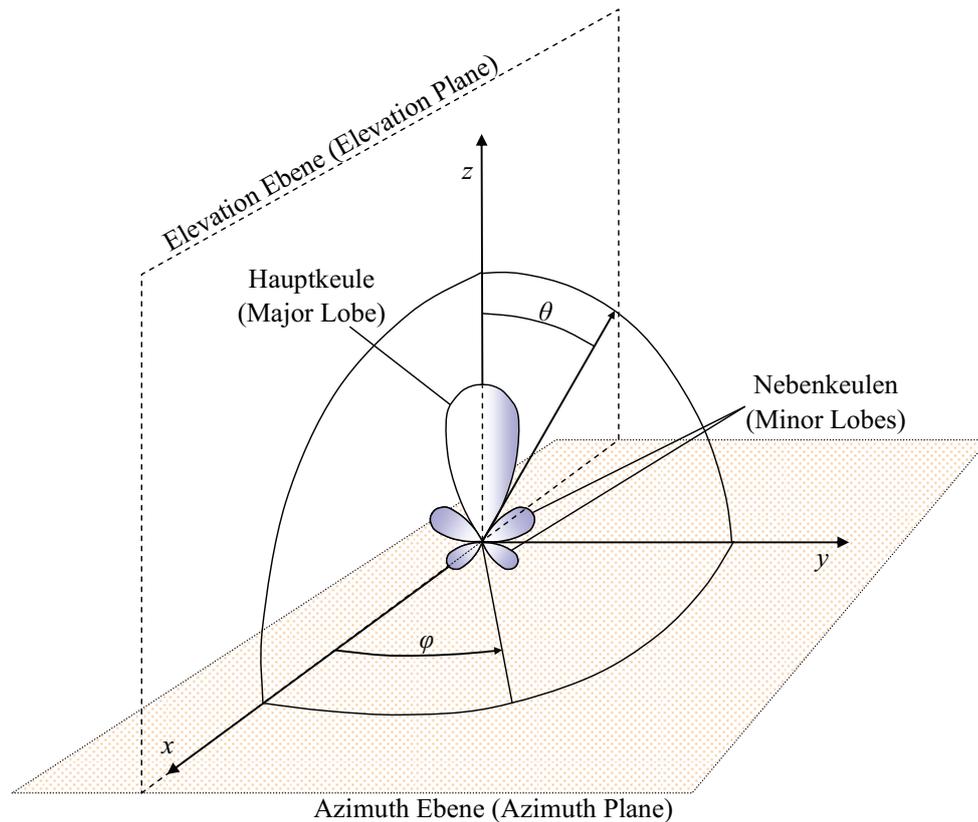


Abbildung 23: Typisches Antennendiagramm mit Haupt- und Nebenkeulen senkrecht ausgerichteter Stabantennen [Bal97]

Präventiv kann einer sehr ungenauen Distanzermittlung entgegengewirkt werden, wenn sich alle Sender und Empfänger in einer Ebene mit annähernd gleichen Ausbreitungseigenschaften befinden. Transceiver wie der CC1010 [Chi03] mit parallel zueinander stehenden Stabantennen (Azimuth Plane) zeigen ein nahezu ausgeglichenes Antennendiagramm (Abbildung 24a). Stehen die Stabantennen jedoch im Lot zueinander, werden die typischen Haupt- und Nebenkeulen sichtbar, die eine Distanzermittlung deutlich erschweren [Sei05]. Für eine exakte Korrektur der ermittelten Distanzen müsste in diesem Fall für jeden Transceiver ein individuelles Modell erstellt werden. Dies ist aufgrund des enormen Aufwandes zur Ermittlung sämtlicher Parameter nicht durchführbar.

Einen Ausweg aus dem Dilemma zeigen Khan et al. [Kha06]. Sie schlugen vor, den Sender in festen Zeitabständen um einen Winkel $\Delta\theta$ zu drehen und die zu sendende Nachricht erneut zu übermitteln, wodurch sich eine kreisförmige Übertragungscharakteristik mit der Übertragungsreichweite tr näherungsweise ergibt (Abbildung 25). Die Sensorknoten sind dadurch in der Lage, die in ihre Richtung zeigende Hauptkeule zu detektieren, die sich zudem in der größten gemessenen Empfangsleistung $P_{RX,max}$ niederschlägt. Aus der höchsten Empfangsleistung kann gemäß Gleichung 21 die Distanz ermittelt werden.

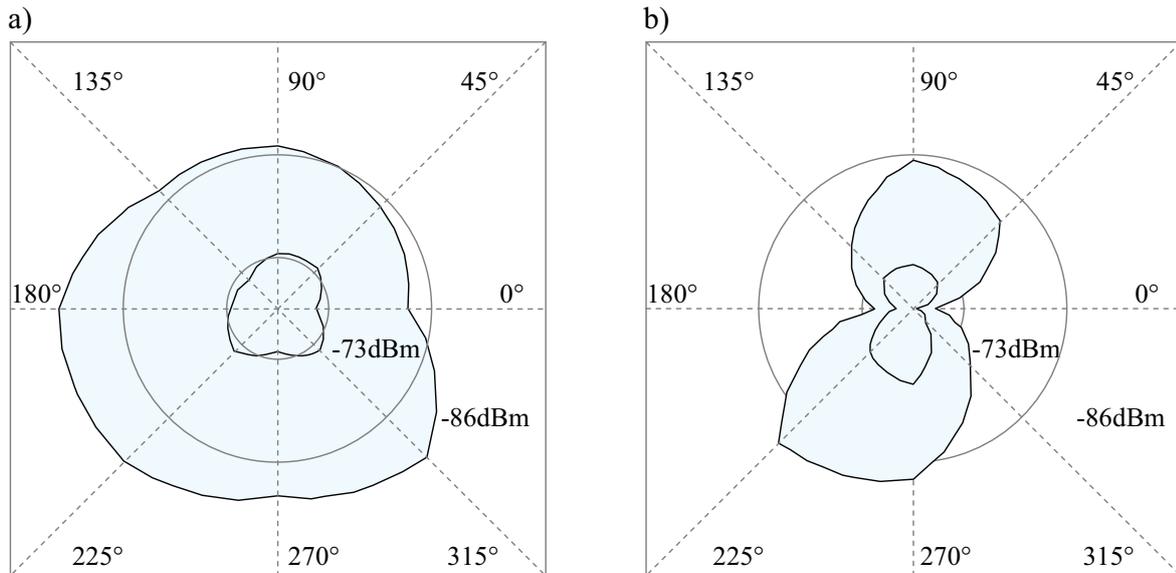


Abbildung 24: Ausbreitungscharakteristik eines CC1010 in einer Ebene a) $\theta=90^\circ$ (Azimuth Plane) b) $\theta=0^\circ$ (Elevation Plane) nach [Sei05]

Die Eigenschaften eines Funksignals mit der Ausbildung von Haupt- und Nebenkeulen können jedoch auch ausgenutzt werden, indem durch Überlagerung (Interferenz) der Signale mehrerer Sender die resultierende Reichweite über die ursprüngliche Reichweite eines Sensorknotens erhöht wird. Dieser Effekt wird Beamforming genannt [Kro07]. Als Neben Ergebnis besteht somit auch die Möglichkeit, durch eine Korrelation aus der Empfangsleistung und den Positionsdaten der Sender sowie deren Distanzen zueinander die Entfernung zu beiden Sendern zu ermitteln.

Das nicht-isotrope Ausbreitungsverhalten der Funksignale kann durch eine Vielzahl von Modellen genähert werden. Das Ground-Reflection-(2-Ray)-Model erweitert das Free

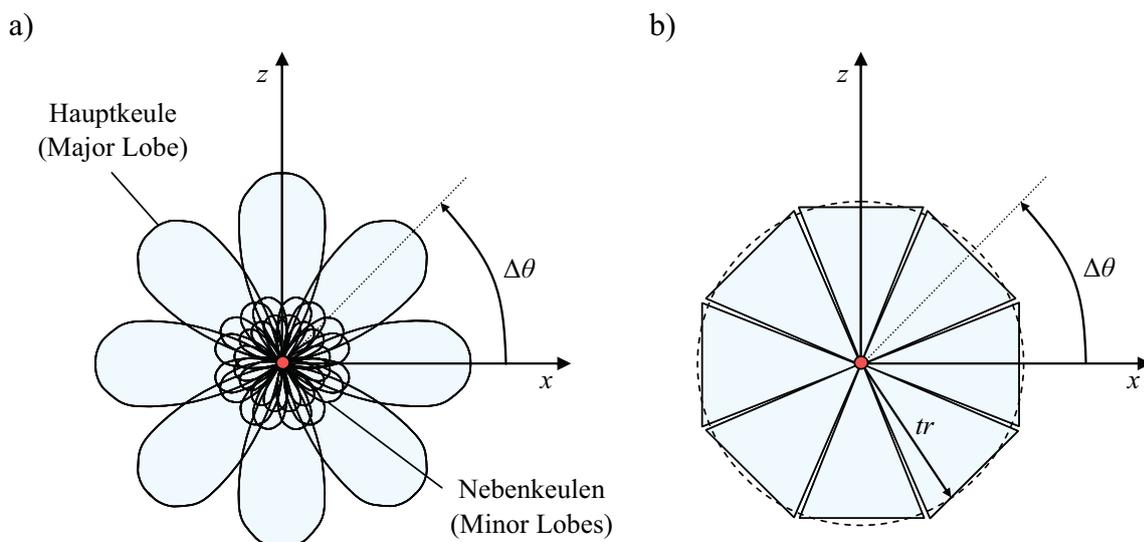


Abbildung 25: a) Resultierendes Antennendiagramm (genähert) bei rotierenden Sendern (Elevation Plane) b) Antennenmodell der rotierenden Sensorknoten [Kha06]

Space Propagation Model und berücksichtigt neben der direkten Übertragung auch Reflexionen des Signals am Boden [Feu94]. Um den Einfluss verschiedener Umgebungen näherungsweise analytisch zu beschreiben, wurde das Path-Loss-Model entwickelt [Lee85, Lan96, Sei91]. Es beachtet die Abschwächung eines Signals in verschiedenen Übertragungsmedien durch Einführung eines Path-Loss-Exponenten β . Die im Vakuum geltende Friis'sche Gleichung 25 ($\beta = 2$) wird in die allgemein gültigere Gleichung 36 überführt. Der Path-Loss-Exponent wurde für diverse Einsatzszenarien bereits empirisch ermittelt [Rap02]. Er beträgt z. B. in Gebäuden mit Hindernissen zwischen $\beta = 4$ und $\beta = 6$.

$$\overline{PL}[\text{dB}] = PL(d_0) + \beta 10 \log \frac{d}{d_0} \quad (36)$$

Um in der Praxis genaue Distanzen zu detektieren, muss eine geeignete Kalibrierung vorgenommen werden. Whitehouse et al. beobachteten, dass bereits eine kleine Änderung der Sendefrequenz eine Änderung des RSSI bewirken und die Distanzermittlung deutlich beeinträchtigen. Sie schlugen eine Kalibrierungsmethode für Empfangsleistungsmessungen vor, die auch Laufzeitmessungen und Antennengewinne berücksichtigt [Whi02].

Savvides et al. publizierten das Lokalisierungssystem „Medusa“, das zur Distanzbestimmung die Laufzeit eines Ultraschallsignals nahezu linear zur Distanz sehr genau detektiert [Sav01]. Die langsamere Ausbreitungsgeschwindigkeit eines Ultraschallsignals ermöglicht in dem vorgestellten System sogar eine Distanzdetektion bei durch Reflexionen verursachter Multipfadausbreitung [Har97]. Das von Römer vorgestellte Lighthouse Localization System ermittelt die Distanz zwischen Sender und Empfänger, wie in Kap. 2.6 beschrieben, durch die Messung der Zeitdauer eines rotierenden Lichtstrahles [Röm03]. Bei direkter Sicht zwischen beiden Kommunikationspartnern und Vermeidung von Reflexionen und Beugungen ermittelt das Verfahren ausreichend genaue Distanzwerte [Röm05].

2.13 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden verschiedene Verfahren zur Distanzermittlung in Sensornetzwerken vorgestellt. Es wurde dargelegt, dass die Genauigkeit einer ermittelten Entfernung in der Praxis unter Umständen erheblich von den Erwartungswerten abweichen kann. Dies begründet sich in den zumeist idealen Annahmen der zugrunde liegenden Berechnungsmodelle, die die Realität, d. h. die Abhängigkeit von diversen Umgebungsbedingungen, nur annähernd beschreiben können. In Abschnitt 2.12 wurden daher Modelle und Verfahren vorgestellt, die eine Verbesserung der Genauigkeit erreichen können, wenn sie mit den Originalverfahren kombiniert werden. Den Anwendungsentwickler eines Sensornetzwerkes zwingt diese Problematik jedoch zu einem permanenten Abgleich seiner Modelle mit den tatsächlichen Umgebungsbedingungen.

3 Grundlagen der Lokalisierung

3.1 Einleitung

Die Kenntnis der eigenen Position ist für die Auswertung der Messdaten der Sensorknoten in den meisten Anwendungsfällen zwingend erforderlich, da anderenfalls keine räumliche Unterscheidung der Messwerte möglich ist. Die initiale Position zufällig verteilter Sensorknoten sowie die aktuelle Position mobiler Sensorknoten ist jedoch unbekannt, sie muss daher aus geeigneten Zusatzinformationen ermittelt werden. Dieser Vorgang wird auch Lokalisierung genannt [Bor96].

Die Lokalisierung von Objekten ist ein sehr bedeutendes Teilgebiet der Mathematik und keineswegs auf den Einsatz in Sensornetzwerken beschränkt. Typische Beispiele sind die Navigation von Schiffen, die Positionsbestimmung durch Beobachtung von Rädern (Odometrie) oder die Zielaufklärung für Artilleriegeschütze. In den letzten Jahren ermöglichte die Einführung satellitengestützter Systeme, wie dem amerikanischen GPS (Global Positioning System [Par96]) oder dem europäischen Pendant Galileo [Den06], die Entwicklung zahlreicher weiterer Lokalisierungsanwendungen wie die der Kraftfahrzeug-Navigationssysteme. Zellulare GSM-Mobilfunknetze erlauben sogar eine relativ genaue Eingrenzung von Standorten aktivierter Mobiltelefone [Pro05].

In Sensornetzwerken können viele der bekannten Lokalisierungsverfahren aufgrund der besonderen Rahmenbedingungen und zahlreichen Ressourcenlimitierungen nicht unverändert eingesetzt werden. Für Sensornetze wurden daher eine Vielzahl von Lokalisierungsalgorithmen adaptiert und publiziert, die in wissenschaftlichen Übersichtsartikeln gegenübergestellt und verglichen wurden [Bac05, Sto05b, Cze06, Lis04, He03].

3.2 Klassifikation der Ortsangaben

Die Angabe der Position eines Sensorknotens kann sehr unterschiedlich erfolgen. Die meisten Verfahren setzen orthogonale Koordinaten voraus, in denen die Koordinatenlinien senkrecht zueinander stehen. Geradlinige kartesische Koordinaten bestehen wie auch krummlinige Polarkoordinaten im n -dimensionalen Raum aus n Zahlenwerten. In einem dreidimensionalen Raum kann die Position eines Punktes somit durch die Angabe von drei Koordinaten $P(x;y;z)$ oder durch $P(r;\varphi;v)$ bestehend aus Radius r , Drehwinkel φ und Neigungswinkel v , bezogen auf den Koordinatenursprung, exakt angegeben werden. Ist der Koordinatenursprung unbekannt und existiert kein Referenzpunkt, können die Positionen zwischen zwei Punkten auch relativ in der Form $p(\Delta x;\Delta y;\Delta z)$ zueinander angegeben werden, wenn beide Koordinatensysteme die gleiche Ausrichtung besitzen [Sri07].

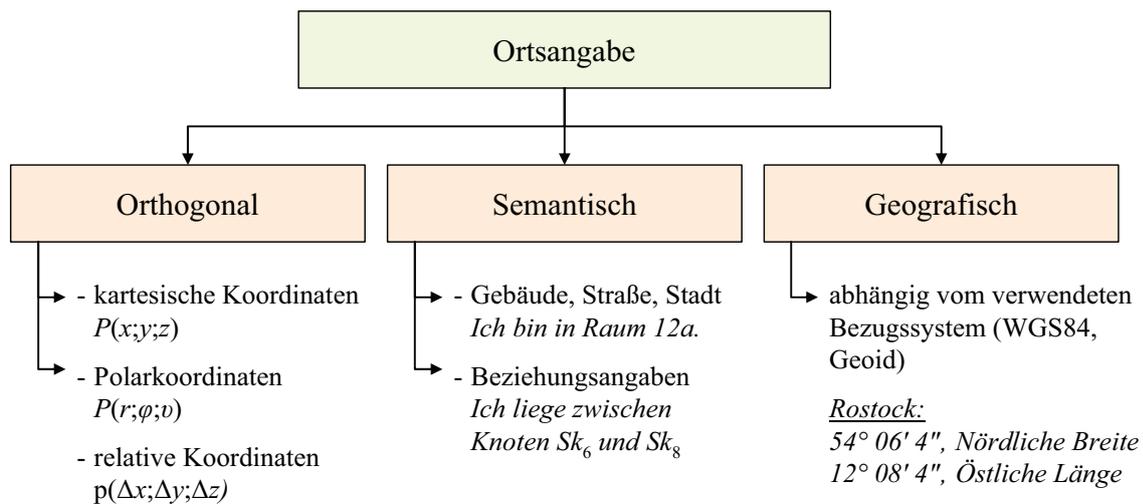


Abbildung 26: Klassifikation der Ortsangaben

Neben den orthogonalen Koordinaten können Positionen jedoch auch in geografischen Koordinaten angegeben werden (Abbildung 26). Sie dienen der möglichst genauen Ortsangabe auf der Erde, die durch unterschiedliche Referenzellipsoide (Kugel, Geoid) modelliert wird. Somit erfolgt eine Positionsangabe in Abhängigkeit zum verwendeten Bezugssystem. Neben der Angabe in Zahlenwerten ist eine Positionsangabe auch durch semantische Zuordnungen der Form „Sensorknoten Sk_6 befindet sich in Raum 12a“ möglich. Diese Beschreibungsform ist besonders für Systeme geeignet, die bereits einen Datenbestand, z. B. über die Größe und Lage von Räumen, enthalten und in denen eine explizite Positionsangabe nicht erforderlich ist.

Bei der Analyse von Lokalisierungsverfahren wird zur Vereinfachung in der Literatur nur die zweidimensionale Ebene betrachtet. Dies gilt für die Positionen $P(x;y)$ der in dieser Arbeit betrachteten Verfahren entsprechend.

3.3 Klassifikation der Lokalisierungsverfahren

Die Verfahren zur Bestimmung einer Position (Lokalisierung) können in drei große Klassen unterteilt werden (Abbildung 27). Die Berechnungsmethoden stellen die in der Wissenschaft und in der Praxis am häufigsten benutzten Verfahren dar. Sie kennzeichnet vor allem ein extrem kleiner Lokalisierungsfehler f , der der Abweichung von der wahren zur ermittelten Position entspricht, und der, bei hinreichend genauen Eingangsdaten, verschwindend gering ist ($f \rightarrow 0$). Diese hohe Genauigkeit kann zumeist nur durch hohen Ressourcenaufwand erreicht werden, denn die Verfahren benötigen Fließkommaberechnungen (Floating Point, FP) oder aufwändige Festkommaberechnungen (Fixed Point, FxP), erzeugen tendenziell einen sehr hohen Datenverkehr zur Ermittlung der Eingangsdaten, erfordern oft große Datenspeicher und führen aufgrund ihrer Komplexität zu einer hohen Prozessorlast.

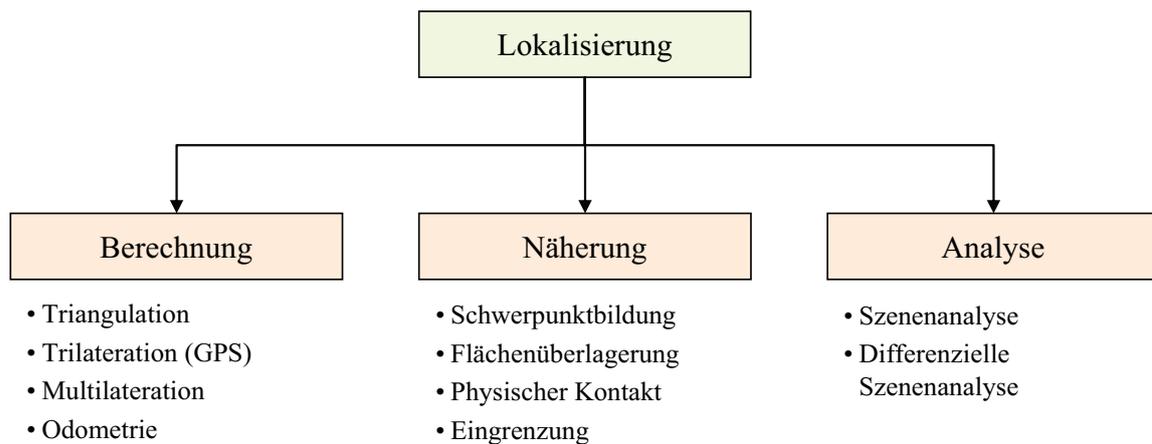


Abbildung 27: Klassifikation der Lokalisierungsverfahren [Hig01a]

Die zweite Klasse der Lokalisierungsverfahren ist durch sehr einfache Berechnungsmethoden gekennzeichnet. Typische Vertreter dieser Verfahren basieren auf der Lokalisierung durch Eingrenzung (vgl. Kap. 3.6) bzw. durch Schwerpunktbestimmung (vgl. Kap. 4-6). Sie ermöglichen eine Umsetzung auch auf stark ressourcenlimitierten Systemen, z. B. den Smartdust-Sensorknoten, weil die Berechnung i. d. R. eine sehr geringe Komplexität besitzt und wenig Datenspeicher notwendig ist. Der Nachteil dieser Verfahren besteht in dem teilweise deutlich höheren durchschnittlichen Lokalisierungsfehler gegenüber den Berechnungsverfahren. Der durchschnittlichen Lokalisierungsfehler kann selbst bei exakten Eingangsdaten keine genaue Position ermitteln ($f \rightarrow f_{min}, f_{min} > 0$).

Die dritte große Kategorie der Lokalisierungsverfahren stellen die Analyseverfahren dar. Diese Verfahren erfordern die Erstellung einer vordefinierten Datenbank, die entscheidende Umgebungsdaten des Netzwerkes enthält. Aus den gemessenen Eingangsdaten eines Objektes und durch den Vergleich mit der vorhandenen Datenbank wird die gesuchte Position approximiert. Diese Klasse von Verfahren ist besonders für semantische Ortsangaben geeignet, da die Zuordnung mithilfe der Datenbank unkompliziert, reproduzierbar und konvertierbar ist. Die durch die Konvertierung ermittelten kartesischen Positionen sind jedoch stark fehlerbehaftet.

Lokalisierungsverfahren werden zudem in zentrale und dezentrale Verfahren unterteilt. Die zentralen Methoden sammeln alle Eingangsdaten an einer zentralen Stelle (Basisstation) und berechnen alle gesuchten Positionen in einem Vorgang. In Sensornetzwerken führt dieser Ansatz zu einer sehr starken Ressourcenbelastung, da:

1. Sensorknoten im Umfeld der Basisstation durch häufiges Weiterleiten von Funksignalen einem extrem hohen Energieverbrauch unterliegen, frühzeitig ausfallen und folglich die Basisstation isolieren.
2. Die Basisstation für die Berechnung von u.U. tausenden Positionen große Datenspeicher für riesige Matrizen vorhalten und zur Berechnung leistungsfähige Prozessoren besitzen muss.
3. Die Bandbreite des Übertragungskanals schnell erschöpft ist, weil zahlreiche Sensorknoten nahezu gleichzeitig senden und demnach erneute Übertragungen erforderlich werden. Erschwerend kommt die Bidirektionalität der Verbindungen hinzu, da die Ergebnisse der Basisstation zurück an die Sensorknoten weitergeleitet werden müssen.

Auch zahlreiche Versuche der Gruppenbildung (Clustering [Hei02]) und der Datenaggregation können dieses Skalierungsproblem nicht lösen, da die zu übertragenden Informationen nicht beliebig verdichtet werden können.

Bei der dezentralen bzw. verteilten Lokalisierung erfolgt die Positionsberechnung in jedem Teilnehmer vollständig autark. Er ermittelt selbstständig die benötigten Daten durch Messung bzw. gegebenenfalls durch Austausch mit seinen Nachbarn. Das Skalierungsproblem der zentralen Methoden tritt insofern nur lokal begrenzt für jeden Knoten auf. Die Ressourcenanforderungen der dezentralen Algorithmen sind i. d. R. geringer, da nur wenige Eingangsdaten in eine Position umgerechnet werden müssen. Die wenigen und lokal begrenzten Eingangsdaten führen jedoch gegenüber den zentralen Algorithmen aufgrund ihrer geringeren Redundanz zu höheren Lokalisierungsfehlern.

Eine weitere Unterscheidung der Lokisierungsalgorithmen ist auch anhand benötigter Referenzknoten, auch Beacons genannt, möglich. Beacons sind Sensorknoten, die neben den typischen applikationsspezifischen Aufgaben der Sensorknoten eine per Definition exakte Position besitzen. Sie werden in der Literatur auch als Fixpunkte, Anchors oder Leuchttürme bezeichnet. Der Einsatz dieser Beacons erhöht die durchschnittliche Genauigkeit deutlich, da im Sensornetzwerk auf eine sukzessive Lokalisierung von Knoten zu Knoten verzichtet werden kann.

Werden zur Lokalisierung Daten benachbarter Sensorknoten benötigt, muss die Übertragung dieser Daten gegen unbefugte Änderungen geschützt werden. Anderenfalls können Manipulationen an den Eingangsdaten bzw. Angriffe gegen das Netzwerk die Lokalisierung massiv beeinträchtigen und somit den effizienten Einsatz verhindern [Sri07, Hu03]. Dies führte zur Entwicklung zahlreicher sicherheitsbewusster Lokisierungsalgorithmen, wie z. B. SerLoc [Laz04] oder Secure Localization Algorithm [Anj05].

3.4 Ursachen des Lokalisierungsfehlers

Die benötigten Eingangsdaten der Lokalisierungsverfahren können sehr vielfältig sein. Abgesehen von einfachen Distanzmessungen (vgl. Kap. 2) können auch Winkel zwischen Sensorknoten, Positionen anderer Netzwerkteilnehmer bzw. Beacons, Geschwindigkeit [Hu04], Zeit u. v. a. in die Berechnung miteinbezogen werden. Da die Messung dieser Größen sehr ungenau sein kann, wird der resultierende Lokalisierungsfehler maßgeblich von ihnen beeinflusst. Viele Arbeiten konzentrieren sich daher darauf, auf Messungen scheinbar vollständig zu verzichten, indem sie eine Distanzfreiheit („range-free“) ihrer Algorithmen propagieren [He03, Sto06]. Nur kann der Verzicht auf eine explizite Messung keinesfalls auch den Verzicht einer quantisierten Distanz bedeuten, die durch die Konnektivität zweier Netzwerkteilnehmer implizit gegeben ist. Es bedeutet vielmehr, dass die Distanz mit einer Quantisierungsaufösung von $q \geq 2$ Stufen dargestellt werden kann. Liegt ein Sensorknoten in Reichweite, ist die Distanz $d = 1$ (wahr bzw. true). Ist hingegen ein Sensorknoten außerhalb der Reichweite, ist $d = 0$ (falsch bzw. false).

Neben den Messfehlern existieren eine Reihe weiterer Fehlerquellen bei der Lokalisierung [Sav05b], wie die Klassifizierung in Abbildung 28 übersichtlich darstellt. Unter Modellfehlern wird dabei die Abweichung der Realität vom benutzten Modell verstanden. Ein typisches Beispiel ist die Distanzermittlung basierend auf der detektierten Empfangsleistung (vgl. Kap. 2.9), dem i. d. R. das kreisförmige Friis'sche Ausbreitungsmodell zugrunde liegt, das jedoch mit der Realität in Form einer schwer bestimmbarer Ausbreitungscharakteristik kaum Übereinstimmung zeigt. Dies trifft ebenso auf die weithin gemachte Annahme bidirektionaler Verbindungen zu. Diese Theorie geht davon aus, dass wenn ein Knoten Sk_A einen anderen Knoten Sk_B sieht, dieser auch Knoten Sk_A sehen muss. Die Realität bestätigt diese Annahme jedoch keinesfalls, wie Turau et al. eindrucksvoll nachwiesen [Tur06].

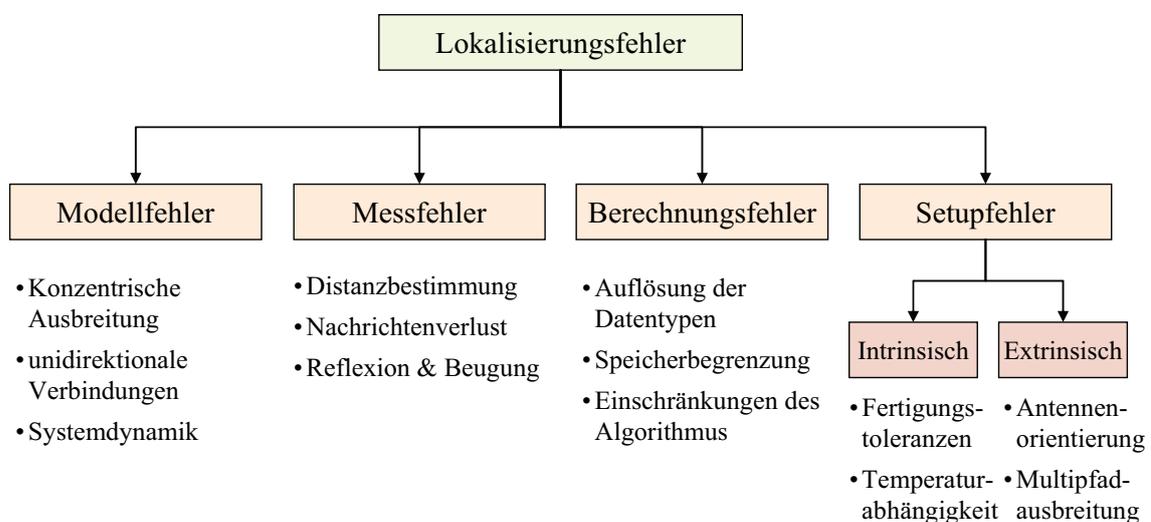


Abbildung 28: Ursachen der Lokalisierungsfehler (inspiriert durch Savvides [Sav05])

Eine weitere, meist unterschätzte, Kategorie von Fehlern sind die Berechnungsfehler. Die mathematischen Berechnungsverfahren liefern zweifellos korrekte Ergebnisse, soweit keine Irregularitäten, z. B. in Form einer Speicherbegrenzung oder eines Überlaufs durch Verlassen des Wertebereichs der verwendeten Datentypen, auftreten. Dieser vom Grundsatz her systematische Fehler ist bei geeigneter Adaptierung der Algorithmen theoretisch jedoch sehr gut vermeidbar.

Zusätzlich beeinflussen die intrinsischen und extrinsischen Setupfehler den Lokalisierungsfehler deutlich. Als intrinsische Fehler werden die ursächlich im Innern der Sensorknoten liegenden Fehlerquellen bezeichnet, z. B. Fertigungstoleranzen der verwendeten Bauteile oder die Abhängigkeit von Umgebungsbedingungen wie Luftfeuchtigkeit bzw. Temperatur. Bei extrinsischen Fehlerquellen liegen die Ursachen des Fehlers nicht im Sensorknoten selbst, sondern in seiner Umgebung, z. B. seiner Anordnung im Netzwerk, der Antennenorientierung oder existierenden Hindernissen.

3.5 Mathematische Verfahren

Die folgenden drei Abschnitte stellen kurz die wichtigsten mathematischen Berechnungsverfahren vor, die die Basis für die meisten Lokalisierungsalgorithmen in Sensornetzwerken bilden (vgl. Kap. 3.6).

Viele der nachfolgenden Algorithmen setzen zur Berechnung der Positionen die Kenntnis von mindestens drei Nachbar- bzw. Referenzknoten voraus. Diese Anforderung kann über den Vergleich mit der Sensorknotendichte $\mu(x;y)$ validiert werden. Sie ergibt sich aus der differenziellen Betrachtung der Anzahl n der verteilten Sensorknoten im Beobachtungsgebiet A .

$$\mu(x; y) = \frac{dn}{dA} \quad (37)$$

Bei bekannter Sensorknotenanzahl und vorliegender Gleichverteilung der Sensorknoten kann die Dichtefunktion zu folgender linearen Gleichung vereinfacht werden.

$$\mu(x; y) = \frac{n}{A} \quad (38)$$

In diesem Fall entspricht die Sensorknotendichte μ_i im Umfeld eines Sensorknotens i der Dichte der Sensorknoten im gesamten Sensornetzwerk $\mu(x;y)$. Bei angenommener konzentrischer Übertragungsreichweite tr_i kann die Sensorknotendichte μ_i auch aus der durchschnittlichen Anzahl \tilde{n}_i aller in Reichweite befindlichen Nachbarn Sk_j ($Sk_j \in SK_i; 0 < j \leq \tilde{n}_i$) berechnet werden.

$$\mu_i = \frac{\tilde{n}_i}{\pi t r_i^2} \quad (39)$$

3.5.1 Triangulation

Die Triangulation (lat., auch trigonometrische Netzlegung) ist ein aus der Mathematik und der Geodäsie bekanntes Verfahren zur exakten Ermittlung von Distanzen und Positionen. Es basiert auf der Aufteilung einer Ebene in Dreiecke, deren Eckpunkte durch Kantenlängen und bekannte bzw. ermittelte Winkel eindeutig bestimmt sind (vgl. Abbildung 29a). Für die eindeutige Distanzermittlung aller unbekanntesten Seiten ist es ausreichend, für jedes Dreieck sukzessiv eine Distanz und zwei Winkel zu bestimmen. Diese Winkel können auch rekursiv durch bereits bestimmte Winkel anderer Dreiecke ermittelt werden. Für die korrekte Skalierung der ermittelten Distanzen ist die Kenntnis einer einzigen Distanz im gesamten Netzwerk erforderlich, da sonst die berechneten Ergebnisse nicht eindeutig sind (Kongruenzsätze für Dreiecke).

Die Berechnung einer Knotenposition in einem Sensornetzwerk sei beispielhaft anhand der Abbildung 29b (Vorwärtseinschneiden [Bro95]) kurz erläutert. Gesucht ist die Position $P(x;y)$ in Abhängigkeit der bekannten Positionen zu den Referenzknoten $B_1(x_1;y_1)$ und $B_2(x_2;y_2)$. Zunächst müssen aus den gegebenen Knotenpositionen $B_1(x_1;y_1)$ und $B_2(x_2;y_2)$ die Strecke r_{12} und der Drehwinkel zum Koordinatenursprung φ_{12} ermittelt werden (40).

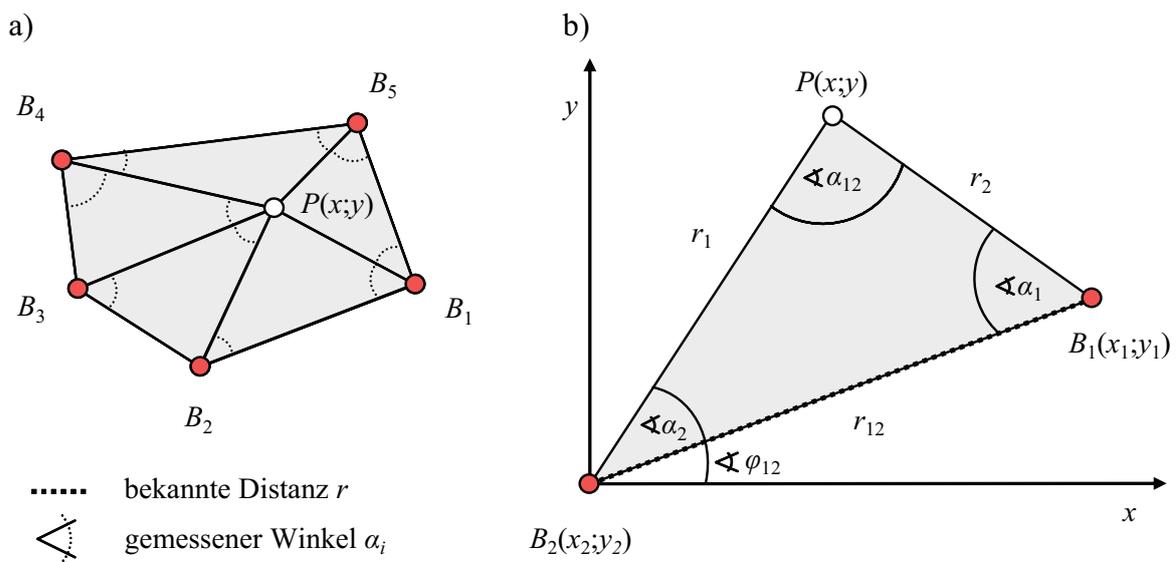


Abbildung 29: a) Aufteilung eines Netzwerkes in Dreiecke bei einer Triangulation, b) Distanzbestimmung durch Triangulation aus zwei gemessenen Winkeln (α_1, α_2) und einer bekannten Distanz r_{12}

$$r_{12} = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$$

$$\tan \varphi_{12} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (40)$$

Die temporären Größen r_{12} , φ_{12} und $\alpha_{12} = 180^\circ - \alpha_1 - \alpha_2$ bilden lediglich die Basis zur Berechnung der gesuchten Distanzen r_1 und r_2 , indem sie durch Aufstellung des Sinussatzes in Beziehung gesetzt werden (41).

$$\frac{r_{12}}{\sin \alpha_{12}} = \frac{r_1}{\sin \alpha_1} = \frac{r_2}{\sin \alpha_2} \quad (41)$$

Nach Berechnung der Distanzen kann die endgültige Position $P(x;y)$ einerseits direkt erfolgen, indem die Winkelbeziehungen des Dreiecks erneut ausgenutzt werden.

$$\begin{cases} x \\ y \end{cases} = \begin{cases} x_2 + r_{12} \cdot \sin(\varphi_{12}) \\ y_2 + r_{12} \cdot \cos(\varphi_{12}) \end{cases} \quad (42)$$

Andererseits kann die Position $P(x;y)$ aber auch über die Trilateration (vgl. Kap. 3.5.2) mit geringerem Aufwand ermittelt werden, da in diesem Fall auf die für ressourcenarme Systeme aufwändige $\arctan()$ -Funktion verzichtet werden kann. Aus den dargelegten Überlegungen wird deutlich, dass für die Berechnungen

- a) höherwertige Funktionen (\sin , \cos , \tan , \arctan) benötigt werden,
- b) Fallunterscheidungen der $\arctan()$ -Funktion durchgeführt werden müssen und
- c) die Rekursion zur Winkel- und Distanzbestimmung über mehrere Knoten sehr viel Zeit benötigen kann.

Alle drei Kriterien stellen somit relativ hohe Anforderungen an die zur Verfügung stehende Hardware der Sensorknoten. Insbesondere muss die Unterstützung von Fließkommazahlen garantiert sein.

3.5.2 Trilateration

Bei der Trilateration handelt es sich um ein mathematisches Verfahren zur Berechnung von Positionen mittels eines linearen Gleichungssystems (LGS). Ein lineares Gleichungssystem $\underline{A} \cdot \underline{x} = \underline{b}$ besitzt eine eindeutige Lösung, wenn die einzelnen Zeilen des Gleichungssystems linear unabhängig sind, d. h. die Matrix \underline{A} regulär ist ($\det(\underline{A}) \neq 0$ und \underline{A}^{-1} existiert). Nachfolgend wird davon ausgegangen, dass eine korrekte Lösung des LGS durch die Angabe expliziter Koordinaten charakterisiert ist. Die triviale Lösung bzw. eine Lösung in Parameterform sind nicht gesucht und gelten im Sinne der Lokalisierung hier als falsch.

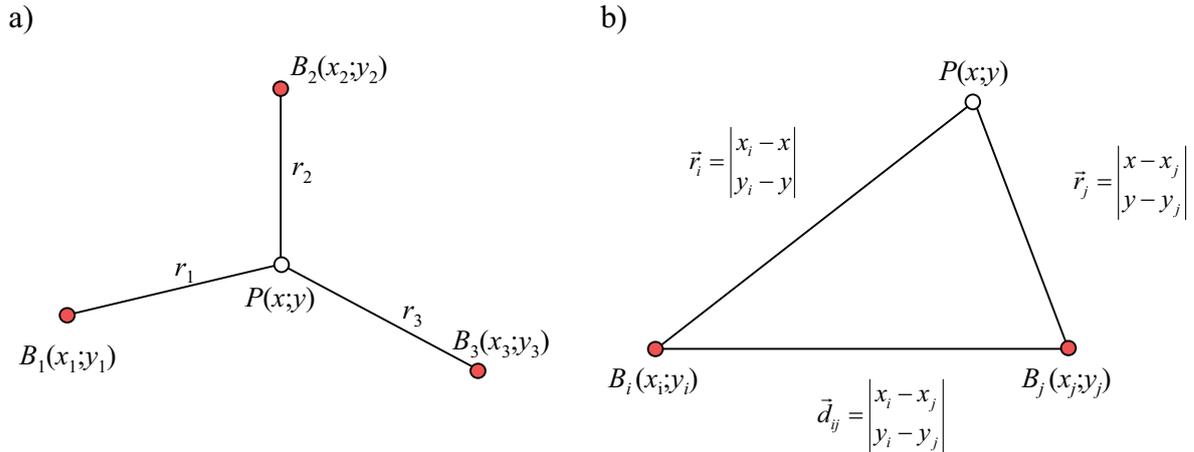


Abbildung 30: a) Trilateration aus drei gemessenen Distanzen r_i und bekannten Referenzpositionen $B_i(x_i; y_i)$ b) Zusammenhang zwischen den Distanzen d_{ij} , r_i und r_j und den bekannten Positionen $B_i(x_i; y_i)$ und $B_j(x_j; y_j)$ sowie der gesuchten Position $P(x; y)$

In Sensornetzwerken ist die Trilateration anwendbar, wenn ein Sensorknoten seine Position $P(x; y)$ bestimmen möchte und die Positionen sowie die Abstände zu $n \geq 3$ Nachbarknoten bekannt sind.

Die Trilateration berechnet die gesuchte Position aus gemessenen Distanzen $r_i = |\vec{r}_i|$ von der gesuchten Position $P(x; y)$ zu den Referenzknoten B_i ($1 \leq i \leq 3$). Dazu werden zuerst die drei Abstandsgleichungen (euklidische Distanz) zu den drei Referenzknoten aufgestellt.

$$\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} = r_i \quad 1 \leq i \leq 3 \quad (43)$$

Die Abstandsgleichungen müssen durch Umformungen linearisiert werden, um sie in die Form des Gleichungssystems $\underline{A} \cdot \underline{x} = \underline{b}$ zu überführen. Die Matrix \underline{A} repräsentiert dabei die Lösung des Gleichungssystems und besteht im zweidimensionalen Fall aus $\underline{x} = \{x; y\}$.

$$\underline{A} = \begin{bmatrix} a_{1,1} & \dots & a_{1,m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n-1,1} & \dots & a_{n-1,m} \end{bmatrix} \quad \underline{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_m \end{bmatrix} \quad \underline{b} = \begin{bmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_{n-1} \end{bmatrix} \quad (44)$$

Für die Linearisierung wird die j -te Gleichung des Systems ($1 \leq j \leq m$) in alle anderen Gleichungen eingesetzt. Grundsätzlich ist die Wahl dieser Gleichung beliebig. Das resultierende Gleichungssystem besteht somit nur noch aus zwei Gleichungen mit insgesamt $n - 1 - m + 2$ Lösungen.

$$\begin{aligned}
(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 &= r_i^2 \\
(x-x_j + x_j - x_i)^2 + (y-y_j + y_j - y_i)^2 &= r_i^2 \\
((x-x_j) - (x_i - x_j))^2 + ((y-y_j) - (y_i - y_j))^2 &= r_i^2 \\
(x-x_j)^2 - 2(x-x_j)(x_i - x_j) + (x_i - x_j)^2 &= r_i^2 \\
+(y-y_j)^2 - 2(y-y_j)(y_i - y_j) + (y_i - y_j)^2 & \\
(x-x_j)(x_i - x_j) + (y-y_j)(y_i - y_j) &= \frac{(x-x_j)^2 + (y-y_j)^2 + (x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 - r_i^2}{2}
\end{aligned} \tag{45}$$

Die resultierende Formel (45) kann durch Einsetzen der Distanzen r_j und d_{ij} vereinfacht werden (46).

$$\begin{aligned}
r_j^2 &= (x-x_j)^2 + (y-y_j)^2 \\
d_{ij}^2 &= (x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2
\end{aligned} \tag{46}$$

Die Distanz r_j kennzeichnet die Entfernung von $P(x;y)$ zum Referenzknoten B_j und ist für die gesamte Trilateration konstant. Die Distanz d_{ij} ergibt sich aus der Entfernung der bekannten Knotenpositionen B_i ($1 \leq i \leq n$, $i \neq j$) zum Referenzknoten B_j . Beide Größen sind im statischen Netzwerk konstant. Jedoch muss

- a) r_j aktualisiert werden, wenn P oder B_j ihre Position ändern bzw.
- b) d_{ij} muss aktualisiert werden, wenn B_i oder B_j ihre Position ändern.

Aus (45,46) ergibt sich folgende allgemeine Form der Gleichung für die Trilateration:

$$(x-x_j)(x_i - x_j) + (y-y_j)(y_i - y_j) = \frac{r_j^2 - r_i^2 + d_{ij}^2}{2} \tag{47}$$

Die Matrixschreibweise des Gleichungssystems bei $n = 3$ Referenzknoten ($j = 1$) im zweidimensionalen Fall ist somit:

$$\underbrace{\begin{vmatrix} x_2 - x_j & y_2 - y_j \\ x_3 - x_j & y_3 - y_j \end{vmatrix}}_{\underline{A}} \cdot \underbrace{\begin{vmatrix} x - x_j \\ y - y_j \end{vmatrix}}_{\underline{x}} = \frac{1}{2} \underbrace{\begin{vmatrix} r_1^2 - r_2^2 + d_{21}^2 \\ r_1^2 - r_3^2 + d_{31}^2 \end{vmatrix}}_{\underline{b}} \tag{48}$$

Abbildung 31 veranschaulicht eine typische Beispielkonfiguration, bei der die Position des Punktes $P(x;y)$ aus den gemessenen Distanzen $r_1 = 2$, $r_2 = 3$ und $r_3 = 6$ zu den Referenzpunkten $B_1(x;y)$, $B_2(x;y)$ und $B_3(x;y)$ bestimmt werden soll. Als Referenzpunkt wird $B_1(1;1)$ gewählt ($j = 1$). Alle d_{ij} des Gleichungssystems sind dadurch Distanzen zu $B_1(1;1)$.

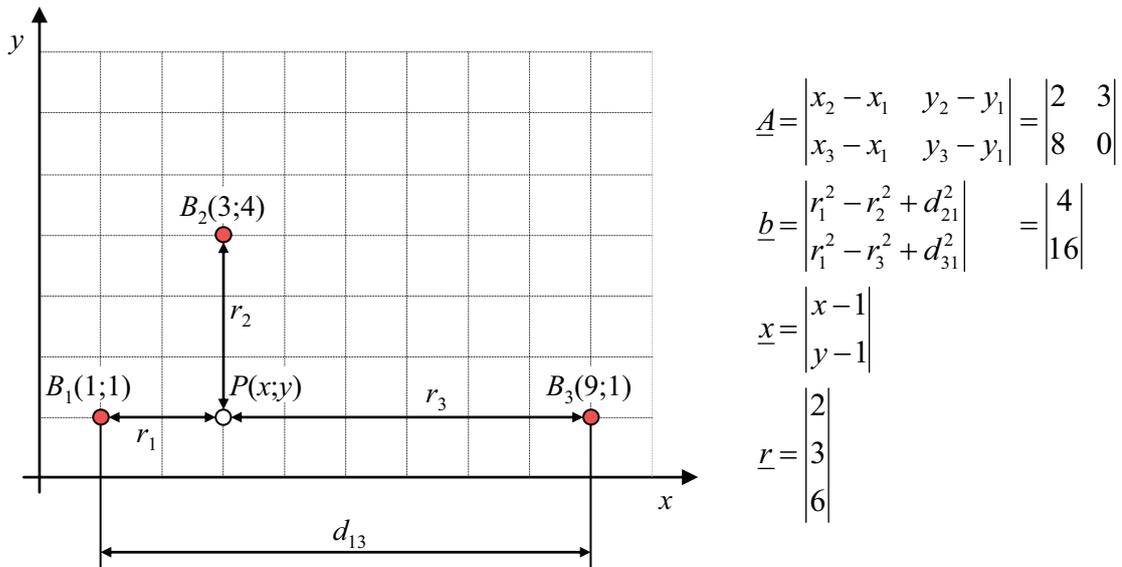


Abbildung 31: Trilateration an einem Beispiel

Das Gleichungssystem $\underline{x} = \underline{A}^{-1} \underline{b}$ kann durch ein direktes Verfahren, z. B. durch Ausrechnen der inversen Matrix \underline{A}^{-1} , gelöst werden. Zuvor muss durch den Rang der Matrix \underline{A} überprüft werden, ob die Anzahl der linear unabhängigen Lösungen $rg(\underline{A})$ der Zeilenanzahl m des Vektors \underline{x} entspricht. Er wird durch das Gaußsche Eliminationsverfahren ermittelt und beträgt im eingeführten Beispiel $rg(\underline{A}) = 2$, d. h. es existiert eine gültige Lösung für den Lösungsvektor \underline{x} .

Die Berechnung von \underline{A}^{-1} gestaltet sich bei einer 2×2 -Matrix relativ einfach, da sie sich schnell durch Ausrechnen der adjungierten Unterdeterminanten [Bro95], auch als Kofaktor bzw. Adjunkte bezeichnet, bestimmen lässt (49).

$$\begin{aligned} \text{cof}_{mn}(\underline{A}) &=_{\text{def}} (-1)^{m+n} \det(\underline{A}_{mn}) & 1 \leq m \leq 2 \\ & & 1 \leq n \leq 2 \end{aligned}$$

$$\tilde{\underline{A}} = \begin{vmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{vmatrix} \quad (49)$$

$$\tilde{\underline{A}} = \begin{vmatrix} 0 & -3 \\ -8 & 2 \end{vmatrix}$$

Die Kofaktoren \underline{A}_{ik} ergeben die temporäre Matrix $\tilde{\underline{A}}$, aus der \underline{A}^{-1} bestimmt wird (50).

$$\underline{A}^{-1} = \frac{1}{\det(\underline{A})} \tilde{\underline{A}} = \frac{1}{a_{11} \cdot a_{22} - a_{21} \cdot a_{12}} \tilde{\underline{A}}$$

$$\underline{A}^{-1} = \begin{vmatrix} 0 & 0,1250 \\ 0,3333 & -0,0833 \end{vmatrix} \quad (50)$$

Das endgültige Gleichungssystem (Gleichung 51) lautet somit

$$\begin{aligned} \underline{x} &= \underline{A}^{-1} \underline{b} \\ \begin{vmatrix} x-1 \\ y-1 \end{vmatrix} &= \begin{vmatrix} 0 & 0,1250 \\ 0,3333 & -0,0833 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 4 \\ 16 \end{vmatrix} \end{aligned} \quad (51)$$

und ermöglicht die explizite Berechnung der Koordinaten des Knotens $P(x;y)$.

$$\begin{aligned} x-1 &= 0 \cdot 4 + 0,1250 \cdot 16 & \rightarrow & x = 3 \\ y-1 &= 0,3333 \cdot 4 - 0,0833 \cdot 16 & & y = 1 \end{aligned} \quad (52)$$

Das Beispiel zeigt deutlich, dass die Positionsbestimmung mittels Trilateration für kleine symmetrische Matrizen relativ einfach zu berechnen ist. Deutlich aufwändiger wird die Berechnung bei größeren Matrizen, für die dann im Einzelfall geeignete Verfahren angewendet werden können (Gauß-Verfahren, Gauß-Jordan-Eliminierung).

3.5.3 Methode der kleinsten Quadrate

Ist einem Sensorknoten Sk_j nur die Position eines Referenzknotens B_i ($n = 1$) und dessen Entfernung d_{ij} bekannt, muss er sich auf einem Kreis um B_i mit dem Radius d_{ij} befinden. Sind dagegen zwei Referenzknoten ($n = 2$) bekannt, ist die ermittelte Position zweideutig (vgl. Kap. 2.7, Abbildung 12). Bei drei Eingangswerten ($n = 3$) ermittelt die Trilateration im nicht-trivialen Fall eine eindeutige Position $P(x;y)$.

In realen Umgebungen mit einer hohen Sensorknotendichte ändert sich, auch durch die Dynamik der Netzwerke bedingt, die Anzahl der Nachbarknoten und somit auch die Anzahl der Eingangswerte sporadisch und ist es gilt zumeist $n > 3$. Ermittelt der Sensorknoten jedoch mehr als drei Referenzknoten und Distanzen, hat das Gleichungssystem $\underline{A} \cdot \underline{x} = \underline{b}$ (Gleichung 48) bei linearer Unabhängigkeit der Zeilen keine Lösung, d. h. die Position kann nicht ermittelt werden. Die Lösung dieses überbestimmten Gleichungssystems kann nur hinsichtlich eines Optimierungskriteriums genähert bestimmt werden. Ein geeignetes Kriterium ist die Minimierung der Fehlerquadratsumme nach Gauß, auch als Methode der kleinsten Quadrate (MdkQ, engl. Least Squares, LS) bezeichnet.

Die höhere Anzahl der Eingangsdaten $n > 3$ resultiert in einer unsymmetrischen Bildung der Matrix $\underline{A}(n-1;m)$, da die Anzahl der gesuchten Größen weiterhin $m = 2$ ist. Insofern kann $\underline{A} \cdot \underline{x} = \underline{b}$ (Gleichung 48) nur einen Lösungsvektor liefern, wenn zusätzlich ein Residuenvektor \underline{v} eingeführt wird.

$$\underline{A} \underline{x} - \underline{b} = \underline{v} \quad (53)$$

Gesetzt den Fall, $\underline{A} \cdot \underline{x}$ und \underline{v} sind orthogonal zueinander, dann sind der Betrag des Residuenvektors $|\underline{v}|$ und somit auch die quadratische Fehlersumme minimal.

$$\|\underline{v}\| = \sum_{i=1}^n v_i^2 \rightarrow \min. \quad (54)$$

Die Gleichung $\underline{A}^T \cdot \underline{v} = 0$ garantiert ebenfalls die geforderte Orthogonalität, sodass folgende Herleitung gilt:

$$\begin{aligned} \underline{A}^T \underline{v} &= 0 \\ \underline{A}^T (\underline{Ax} - \underline{b}) &= 0 \\ \underline{A}^T \underline{Ax} - \underline{A}^T \underline{b} &= 0 \\ \underline{A}^T \underline{Ax} &= \underline{A}^T \underline{b} \\ \underline{x} &= (\underline{A}^T \underline{A})^{-1} \underline{A}^T \underline{b} \end{aligned} \quad (55)$$

Die Formel ermöglicht die näherungsweise Berechnung einer Position $P(x;y)$ aus n bekannten Referenzknoten trotz Überbestimmung des Gleichungssystems.

Zur Veranschaulichung der Berechnung einer Position $P(x;y)$ wird das bereits beschriebene Beispiel aus Kap. 3.5.2 (Abbildung 31) um einen zusätzlichen Referenzknoten $B_4(6;1)$ erweitert (Abbildung 32). Der gemessene Abstand sei jedoch statt der exakten Distanz $\hat{r}_4 = \overline{PB_4} = 3$ nur $r_4 = 2,5$.

Das resultierende Gleichungssystem der Form $\underline{A} \cdot \underline{x} = \underline{b}$ besteht nunmehr aus 3 Gleichungen ($n = 4$) bei $m = 2$ gesuchten Unbekannten. Die genaue Analyse der gemessenen Distanzen im Vektor \underline{r} zeigt, dass aufgrund der fehlerhaften Messdaten das LGS nicht die exakte Lösung $\hat{\underline{x}} = \{3, 0; 1, 0\}$, sondern lediglich eine Näherung ermitteln kann.

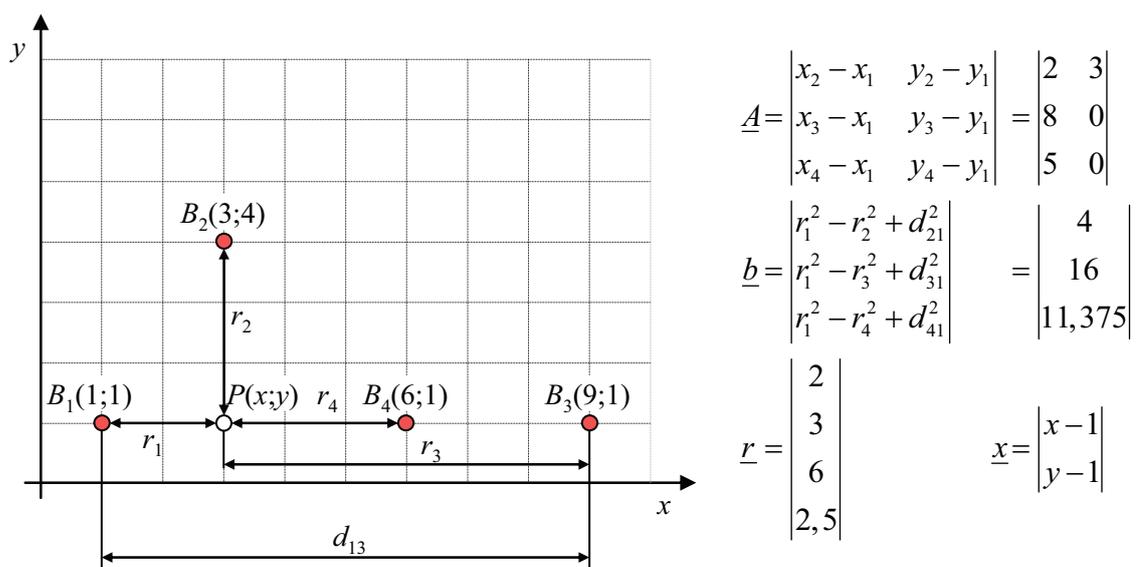


Abbildung 32: Methode der kleinsten Quadrate an einem Beispiel

Die Berechnung startet mit der Überprüfung der linearen Unabhängigkeit der Zeilen des LGS, indem der Rang der Matrix \underline{A} ermittelt wird. Er beträgt $rg(\underline{A}) = 2 \leq m$, demzufolge dieses LGS nach Abzug der Referenzposition $B_I(1;1)$ den Lösungsvektor $\underline{x} = \{3,07;0,94\}$ liefert.

Eine Besonderheit des Verfahrens besteht darin, dass der Term $(\underline{A}^T \underline{A})^{-1} \underline{A}^T$ (vgl. Gleichung 55) die Matrix $\underline{A}(n-1;m)$ in eine kleinere Matrix $\underline{A}'(m;m)$ konvertiert, wodurch ein Informationsverlust auftritt. Da die Speicherung von Zahlen in begrenzten Datentypen (int, long) erfolgt, besteht die Gefahr, dass eine Überschreitung des Wertebereichs ebenfalls zu einem Informationsverlust durch Abschneiden bzw. Rundung führt, der vor allem bei größeren Messfehlern der Distanzen in sehr hohen Positionsungenauigkeiten resultiert [Bro95], wie die Simulationen in Kap. 5.4 eindrucksvoll zeigen. Folglich ist der Einsatz dieses Verfahrens nur bei genauen Distanzmessungen sinnvoll, die jedoch in Sensornetzwerken schwer realisierbar sind (vgl. Kap. 2).

Der Konvertierungsfehler kann behoben werden, indem andere Berechnungsverfahren, z. B. die Singulärwertzerlegung (engl. Singular Value Decomposition, SVD) oder die QR-Zerlegung (engl. QR Decomposition), angewendet werden. Beide Verfahren konvergieren deutlich besser, erhöhen jedoch die Berechnungskomplexität deutlich.

3.6 Lokalisierung in Sensornetzwerken

Die vorgestellten mathematischen Lokalisierungsverfahren konvergieren in idealen Umgebungen mit exakten Distanzmessungen sehr gut. In Sensornetzwerken hingegen bedingen eine Vielzahl von lokalen Herausforderungen zusätzliche Anpassungen der verteilten Algorithmen [Sav04a], z. B.

- die Analyse der Messdatenverteilung und die Modellierung der Rauschfunktionen sowie deren Einfluss auf die Messung,
- ein angemessener Kompromiss aus Kosten- und Energieaufwand für Kommunikation und Berechnung,
- das Zahlenverhältnis aus Referenzknoten und einfachen Sensorknoten in Abhängigkeit der lokalen Gegebenheiten,
- das Skalierungs- und Reaktionsverhalten der verteilten Algorithmen auf dynamische Veränderungen u. a. hervorgerufen durch die Mobilität der Knoten oder des Messgegenstandes, Änderungen von Gruppengrößen, verändernde Konnektivität, variable Nachbarschaftsknoten, schwankende bzw. inhomogene Knotendichte und
- das Reaktionsverhalten des gesamten Netzwerkes auf Änderungen der Netzwerkparameter. Im Gegensatz dazu konzentrieren sich die meisten Publikationen auf das Reaktionsverhalten einzelner Sensorknoten.

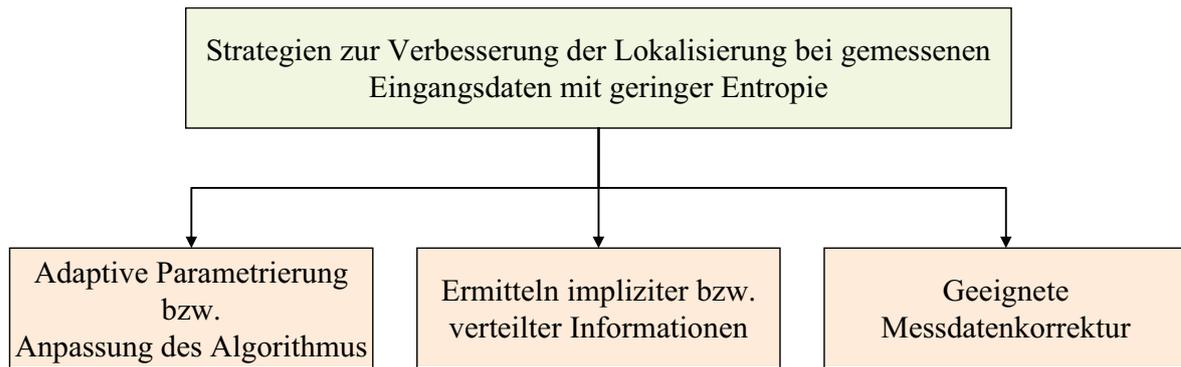


Abbildung 33: Strategien zur Verbesserung der Lokalisierung

Da in Sensornetzwerken die Messungen großen Schwankungen unterliegen (vgl. Kap. 2), besteht die primäre Aufgabe bei der Lokalisierung darin, diese Schwankungen in geeigneter Weise zu korrigieren bzw. auszugleichen. Bei der Implementierung der Algorithmen bieten sich daher mindestens drei Strategien an (Abbildung 33). Die erste Möglichkeit besteht in der Anpassung bzw. korrekten Parametrierung des Algorithmus. Hierzu sind eine Analyse des theoretischen Verfahrens unter idealen Voraussetzungen und ein Vergleich des Verfahrens mit vorliegenden Umgebungsbedingungen erforderlich. Ein Beispiel für eine viel versprechende Analyse besteht in der korrekten Parametrierung der Übertragungreichweite der Lokalisierung mittels Schwerpunktbestimmung (Kap. 4) und in der adaptiven Gewichts-anpassung der gewichteten Schwerpunktbestimmung (Kap. 5).

Eine weitere Strategie, die Lokalisierungsgenauigkeit deutlich zu erhöhen, besteht in dem Ausnutzen des Informationsgewinns durch eine höhere Anzahl von Messungen, wodurch die Einzelinformation zunehmend redundant wird, der Informationsgehalt der Menge der Messungen jedoch steigt. Wie in Kap. 3.5.3 beschrieben wurde, kann die Position durch Überbestimmung genauer ermittelt werden. Die Genauigkeit eines Messdatums, also das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR), erhöht sich bei n Messwerten um den Faktor \sqrt{n} , da das Rauschen im Gegensatz zur Nutzinformation nur stochastisch auftritt. Eine erhöhte Anzahl der Messdaten resultiert jedoch andererseits auch in höherem Kommunikationsaufwand und steigendem Speicherverbrauch, sodass ein dem Einsatzszenario angepasster Kompromiss aus beiden Kriterien austariert werden muss.

Stehen nur wenige Messwerte zur Verfügung, können bei Kenntnis geeigneter Nachbarschaftsinformationen Messwerte gegebenenfalls korrigiert oder aus anderen Informationen extrahiert werden. Das beschriebene Verfahren 3/2-NA (Kap. 2.7) zur Ermittlung eines dritten Referenzknotens stellt ein typisches Beispiel für die Extraktion eines Distanzwertes aus zwei bekannten Referenzknoten und deren Nachbarschaftsinformationen dar. Es ermöglicht dadurch die Anwendung der Trilateration (Kap. 3.5.2), die mit nur zwei Distanzwerten zu keiner expliziten Lösung führt. In Kap. 4 wird ein weiteres Verfahren vorgestellt, das bei Kenntnis der Netzwerktopologie die Lokalisierung nachhaltig verbessert.

Die Lokalisierungsverfahren in Sensornetzwerken bestehen i. d. R. aus zwei Phasen, einer geeigneten Methode zur Messdatenaufnahme und einem angepassten Algorithmus zur Ermittlung der Knotenposition. Gegebenenfalls existiert noch eine Verfeinerungsstufe, die die eigene Position mit denen der Nachbarn vergleicht bzw. abgleicht. Die Lokalisierung in Sensornetzwerken zielt jedoch neben einer hohen Positionsgenauigkeit auch auf den schonenden Umgang der limitierten Ressourcen der beteiligten Sensorknoten ab. Insofern ist eine gewünschte exakte Lokalisierung durch mathematische Berechnungsmethoden (Kap. 3.5) nicht in allen Fällen anwendbar. In manchen Anwendungsfällen ist sogar eine fehlerbehaftete Schätzung der Position durchaus legitim, wenn dadurch weniger Ressourcen beansprucht werden.

Für Sensornetzwerke wurden in der Vergangenheit unzählige Lokalisierungsverfahren vorgestellt, sodass eine explizite Vorstellung aller Verfahren im Rahmen dieser Arbeit unangebracht und daher auf nachfolgende Vorstellung der wichtigsten Vertreter der in Abbildung 27 genannten Kategorien beschränkt ist.

3.6.1 Berechnungsverfahren

Das Ad-Hoc Positioning System (APS) ist ein Positionsberechnungsverfahren für Sensornetzwerke [Nic01]. Ausgehend von der Annahme, dass ein Sensornetzwerk aus zufällig verteilten Sensorknoten und Referenzknoten besteht und folglich eine Konnektivität zu mindestens drei Beacons gewährleistet ist, werden Näherungsverfahren zur Distanzschätzung zu nicht in Übertragungsreichweite liegenden Referenzknoten vorgestellt. Niculescu et al. schlugen vor, genäherte Distanzen durch die Anzahl der Hops (DV-Hop), die gemittelte Distanz (DV-Distance) und die euklidische Distanz zu bestimmen (vgl. Kap. 2.5). Sobald ein Knoten die Entfernung zu mehr als zwei Referenzknoten ermittelt hat, erfolgt die Lokalisierung anhand der Methode der kleinsten Quadrate.

Der Algorithmus Hop-Terrain nutzt in seiner Start-Phase ebenfalls das Verfahren DV-Distance, um einen Startwert für die anschließende Refinement-Phase zu ermitteln [Sava02]. In dieser Phase werden die bisher berechneten Positionen der Sensorknoten mit den Nachbarknoten getauscht und neu berechnet. Die so stattfindende Iteration wird auf jedem Knoten solange fortgeführt, bis der Unterschied zwischen den Iterationsergebnissen eine Schwelle f_{max} erreicht.

Die Multilateration wurde durch Savvides et al. vorgestellt [Sav01]. Das Verfahren zählt ebenfalls zu den Berechnungsmethoden (Klassifizierung nach Abbildung 27), die bei genauen Distanzwerten auch exakte Positionen ermitteln. Die Autoren unterscheiden drei verschiedene Stufen der Multilateration: die atomare, die iterative und die kollaborative Multilateration.

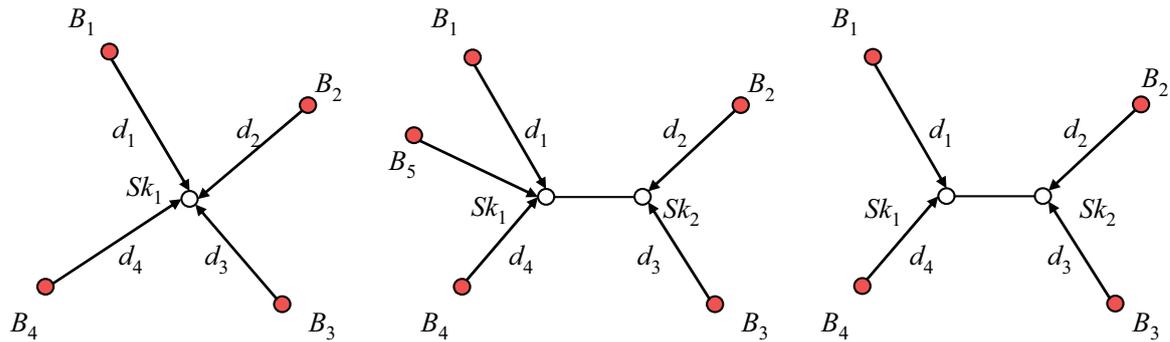


Abbildung 34: Lokalisierung durch a) atomare Multilateration (auch One-Hop Multilateration) b) iterative Multilateration (auch Two-Hop Multilateration) c) kollaborative Multilateration

Die atomare Multilateration basiert exakt auf der klassischen Lösung eines überbestimmten linearen Gleichungssystems mittels der Methode der kleinsten Quadrate (vgl. Kap. 3.5.3). Dazu müssen zu mindestens $n - 3$ Referenzpunkten B_i ($0 < i \leq n$) die Entfernungen d_i bekannt sein (Abbildung 34a). Da es in Sensornetzwerken aufgrund der Dynamik oder schlichtweg durch Kommunikationsabbrüche zu einer schwankenden Anzahl bekannter Referenzknoten kommen kann, wurde die iterative Multilateration entwickelt. Sie definiert, dass jeder Sensorknoten $P_j(x;y)$, der seine Position durch atomare Multilateration bestimmt hat, zu einem Referenzknoten $B_j(x;y)$ wird und dadurch anderen Sensorknoten eine Lokalisierung ermöglicht. So kann Sk_1 (Abbildung 34b) nach seiner Lokalisierung zu einem Referenzknoten für Sk_2 werden. Der Nachteil dieser Methode besteht jedoch darin, dass sich der Lokalisierungsfehler des Knotens $P_j(x;y)$ in den Positionen der anderen Knoten fortpflanzt. In Netzwerkkonfigurationen, in denen aufgrund fehlender Nachbarschaftsinformationen kein Sensorknoten eine atomare Multilateration durchführen kann, ist auch keine iterative Multilateration und somit keine direkte Lokalisierung möglich. Wenn jedoch über mehrere Hops die benötigten Positions- und Distanzinformationen anderer Referenzknoten ermittelt werden können, dann kann durch die kollaborative Multilateration eine Lokalisierung erreicht werden (Abbildung 34c). Dazu muss ein Gleichungssystem aufgestellt werden, indem alle bekannten Knoten und bekannten Distanzen (Edges) in Beziehung gesetzt werden. Es werden im Gegensatz zur atomaren Multilateration (vgl. Kap. 3.5.3) zu allen gemessenen Entfernungen zwischen den Knoten eines Netzwerkes die Distanzgleichungen aufgestellt, unabhängig davon, ob die Position der Knoten bekannt ist oder nicht.

Die Menge der involvierten Knoten N setzt sich aus der Menge B von Referenzknoten ($B \subseteq N$) und der Menge SK von Sensorknoten Sk_i mit unbekannter Position ($SK \subseteq N$) zusammen. Zu den Referenzknoten Sk_j ($Sk_j \subseteq B$) zählen bekannte Beacons und Sensorknoten ohne bestimmte Position, zu denen lediglich die direkte Entfernung bekannt ist.

$$f_i(x_i, y_i) = d_{ij} - \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (56)$$

Das resultierende nicht-lineare Gleichungssystem aus n oder mehr Gleichungen ist für alle $x_i, y_i \forall Sk_i \subseteq SK$ und $x_j, y_j \forall Sk_j \subseteq N$ zu lösen $\{n: n \geq 2 \cdot i_{max} + 1\}$, sodass die Summe der Quadratfehler aus $f_i(x_i, y_i)$ minimal wird.

$$\sum_{i=0}^{i \geq n} f_i(x_i, y_i)^2 \rightarrow \min. \quad (57)$$

Ein nicht-lineares Gleichungssystem ist zumeist nur mit numerischen Iterationsverfahren, z. B. dem Newton-Verfahren, lösbar. Savvides et al. ermitteln die Position mit Hilfe eines Kalman-Filters [Sav02]. Der Kalman-Filter ist ein Regelkreis, der eine Position aus dem aktuellen Zustand und neu zugeführten Eingangsdaten, z. B. nach dem Empfang neuer bzw. veränderter Referenzkoordinaten, berechnen bzw. aktualisieren kann. Bei der Aktualisierung zeichnet sich der Kalman-Filter besonders durch seine Tiefpass-Eigenschaften aus, wodurch die Lokalisierung auch bei stark schwankenden Distanzmessungen stabilisiert wird. Eine weitere Verbesserung stellt die Distanzmessung durch das Hop-Count-Verfahren zu außerhalb der Reichweite liegenden Referenzknoten dar. Die erhöht die Wahrscheinlichkeit der Anwendbarkeit einer iterativen Multilateration und die Berechnung eines Startwertes [Sav03].

Neben den von Savvides et al. vorgestellten Multilaterationsvarianten existieren eine Vielzahl ähnlicher Verfahren, die die Methode der kleinsten Quadrate zu Lokalisierung basierend auf akustischen Distanzmessungen nutzen [Gir06, Kwo05, Hig00]. Die auf Ultraschall basierenden Verfahren wie z. B. Active Bat [Har99, War97] erlauben eine sehr genaue Distanzschätzung durch Time-of-Flight Messungen (vgl. Kap. 2.2).

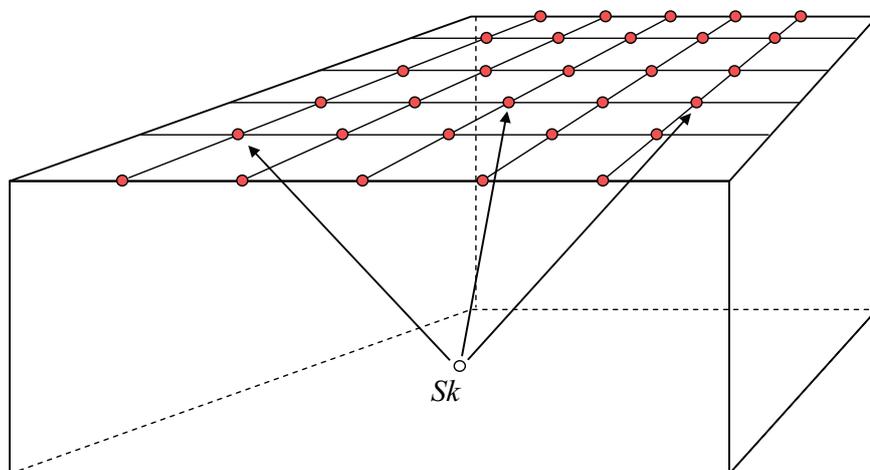


Abbildung 35: Active-Bat-System

Active-Bat-Systeme benötigen vorinstallierte Gitter aus Ultraschallsensoren an der Raumdecke (Abbildung 35). Diese Sensoren messen die Laufzeiten zwischen denen von den Sensorknoten emittierten Funk- und Ultraschallsignalen. Die anschließende Lateration auf einer Basisstation ergibt die gesuchten Positionen der Sensorknoten. Das Verfahren zeichnet sich durch eine hohe Genauigkeit, aber auch einen sehr hohen Installationsaufwand und damit erheblichen Kosten aus.

Das Cricket Location Support System bestimmt wie das Active-Bat-System die Distanzen zu den Beacons aus der Laufzeit der Ultraschallsignale [Pri00]. Im Gegensatz zu Active Bat emittieren bei Cricket die Beacons die Ultraschallsignale. Die Sensorknoten messen die Signallaufzeiten und berechnen daraus ihre Position durch Lateration autark. Das System skaliert dadurch deutlich besser, da der benötigte Funkverkehr nicht von der Anzahl der Sensorknoten sondern nur von der Beacondichte abhängt. Zudem verringern sich die Kosten für die Installation der wenigen Beacons deutlich.

3.6.2 Näherungsverfahren

Ein weit verbreitetes und sehr einfaches Näherungsverfahren ist der Bounding-Box-Algorithmus von Simic et al. [Sim02]. Es nutzt ebenso wie die Multilateration zur Lokalisierung zusätzliche Referenzknoten $B_i(x;y)$ mit bekannter Position. Die Beacons übermitteln ihre Position an alle in Übertragungreichweite tr liegenden Sensorknoten Sk_j . Diese ermitteln durch ein geeignetes Verfahren die Distanzen d_{ij} zu den sendenden Beacons $B_i(x;y)$ und berechnen quadratische Flächen A_i ($2 \cdot d_{ij}^2$ um $B_i(x;y)$), in denen sich der Sensorknoten Sk_j befinden muss (Abbildung 36a).

Durch Vergleich der minimalen und maximalen Koordinaten aller ermittelten Flächen A_i ergibt sich das resultierende Rechteck A_{Sk} (Bounding Box), in dem sich der Sensorknoten Sk_j befindet (Abbildung 36b). In der resultierenden rechteckigen Schnittfläche A_{Sk} wird die gesuchte Position in der Mitte vermutet. Eine genauere Aussage zur Position ist mit diesem

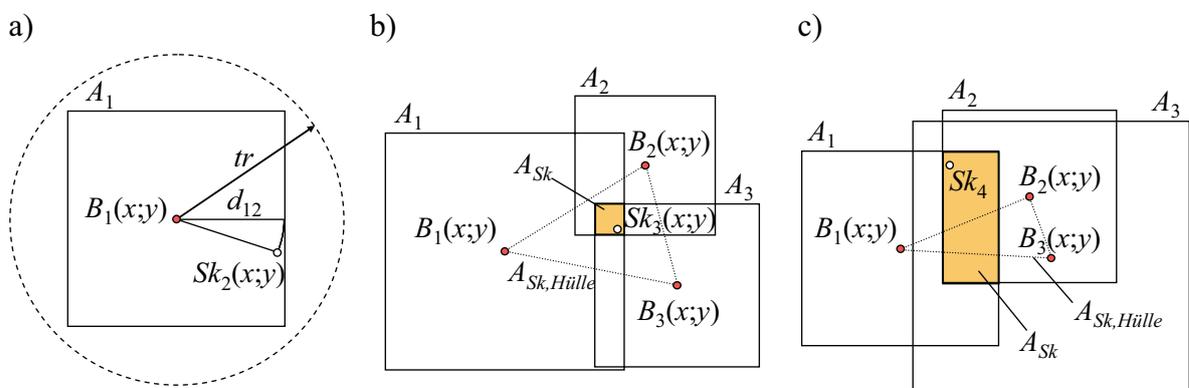


Abbildung 36: a) Bounding Box des Beacons $B_1(x;y)$ b) Bounding Box A_{Sk} des Sensorknotens $Sk_3(x;y)$ ($Sk_3 \in A_{Sk,Hülle}$) c) Bounding Box A_{Sk} ($Sk_4 \notin A_{Sk,Hülle}$)

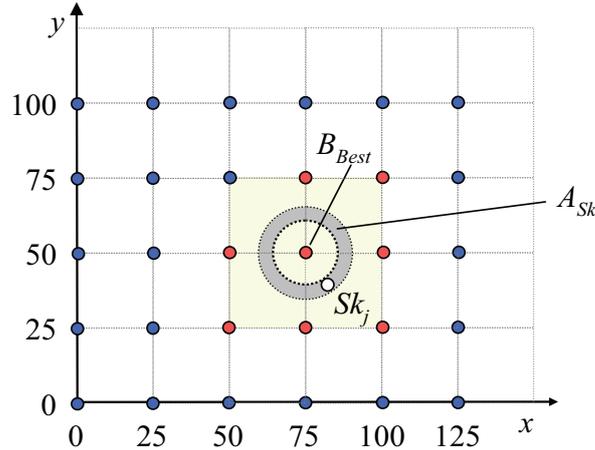


Abbildung 37: Positionsermittlung durch die Chipcon Location Engine [TI06]

Verfahren nicht möglich. Es ist jedoch sehr gut zur Generierung von Startwerten iterativer Verfahren, wie z. B. der kollaborativen Multilateration auf Basis des Kalman-Filters, geeignet [Sav03].

$$\begin{aligned} x_{\min} &= \max(x_i - d_{ij}) \leq x_j \leq \min(x_i + d_{ij}) = x_{\max} \\ y_{\min} &= \max(y_i - d_{ij}) \leq y_j \leq \min(y_i + d_{ij}) = y_{\max} \end{aligned} \quad (58)$$

Ein Nachteil des Bounding-Box-Verfahrens besteht darin, dass ein geringer Lokalisierungsfehler nur erreicht werden kann, wenn sich der Sensorknoten Sk_j innerhalb einer konvexen, durch die Beacons begrenzten, Hüllfläche $A_{Sk,Hülle}$ befindet. Anderenfalls vergrößert sich die Bounding Box A_{Sk} und damit der Fehler sehr stark (Abbildung 36c). Weiterhin zeigt der Algorithmus divergentes bzw. instabiles Verhalten, wenn die Distanzmessungen starkem Rauschen unterliegen, da dann Flächen A_i entstehen können, die sich nicht überlappen und folglich keine Bounding Box bilden können [Whi02].

Die Firma Chipcon stellte mit der Location Engine einen der ersten integrierten Lokalisierungsbausteine für Mikrocontroller CC2431 vor [TI06]. Als Voraussetzung zur Lokalisierung eines Sensorknotens $Sk_j(x,y)$ werden die empfangenen Positionen von 8 Referenzknoten $B_i(x_i,y_i)$ mit der geringsten Distanz d_{ij} gespeichert. Der Beacon $B_{Best}(x_{Best},y_{Best})$ mit der kleinsten Distanz $d_{Best,j}$ zum Sensorknoten Sk_j definiert einen Kreisring um B_{Best} mit dem Radius $tr \ d_{i,Best} + \Delta d$, in dem Sk_j liegt (Abbildung 37). Aus den restlichen bekannten Nachbarpositionen wird die auf dem Kreisring wahrscheinlichste Position durch die Lokalisierungseinheit (Location Engine) bestimmt. Das Verfahren erreicht nach Auskunft des Herstellers in einem $64m \times 64m$ großen Netzwerk einen Fehler $f < 3m \approx 4,7\%$.

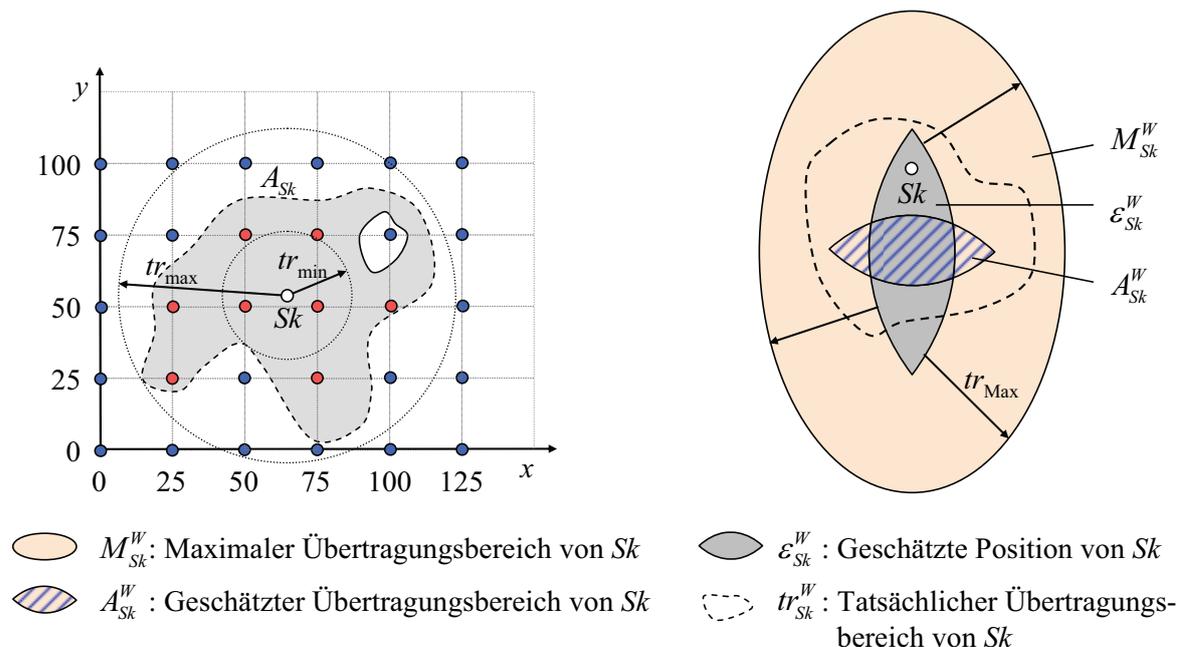
Neben den bisher eingeführten Lokalisierungssystemen existieren noch die auf der Schwerpunktbestimmung basierenden Näherungsverfahren, wie z. B. das Active Badge System [Wan92]. Diese Verfahren werden ausführlich in den Kapiteln 4 und 5 behandelt.

Mit Sextant haben Guha et al. ein Näherungsverfahren vorgestellt, das die Nachteile der ungleichmäßigen Ausbreitungscharakteristik (vgl. Kap. 2.9) durch Eingrenzung verringert [Guh05]. Zudem setzen die Autoren keine symmetrische Konnektivität zwischen den Sensorknoten voraus. Somit impliziert Sk_1 hört Sk_2 nicht, dass Sk_2 auch Sk_1 hört.

Ausgangspunkt des Verfahrens ist der zu lokalisierende Sensorknoten Sk , der die maximale Übertragungsbereichweite tr_{max} zu seinen direkten Nachbarn ermittelt (Abbildung 38a). Folglich gilt für alle Sensorknoten Sk_j , die eine Nachricht von Sk erhalten, dass sie innerhalb eines maximalen Übertragungsbereiches M_{Sk} liegen ($Sk_j \in M_{Sk}$) und die Entfernung d_j zwischen beiden Knoten maximal tr_{max} entspricht ($0 \leq d_j \leq tr_{max}$). Zusätzlich ermittelt der Sensorknoten Sk die minimale Übertragungsbereichweite tr_{min} , bei der eine Nachrichtenübertragung des Knotens Sk in allen Richtungen garantiert werden kann.

Angenommen, die Position des Knotens Sk liegt in der Region ε_{Sk} , dann muss ein in Reichweite befindlicher Sensorknoten Sk_j in der Region M_{Sk} sein (Abbildung 38b). Diese Region M_{Sk} ist definiert als Menge aller Punkte innerhalb tr_{max} um alle Punkte der Region ε_{Sk} . Kann ein Sensorknoten Sk_j eine Nachricht des Knotens Sk nicht empfangen, muss er sich außerhalb der Region A_{Sk} befinden, für die gilt, dass die Distanz aller Punkte der Region ε_{Sk} höchstens tr_{min} entspricht. A_{Sk} bildet demnach die Schnittmenge der Kreise aller Sensorknoten innerhalb ε_{Sk} mit der Übertragungsbereichweite tr_{min} .

Die geschätzte Position des Sensorknoten befindet sich zu Beginn der Lokalisierung in der Mitte des Universums $e_{Sk} \leftarrow U$. Detektiert der Sensorknoten eine Region M_{Sk} , in der er sich befinden muss, existiert ebenfalls eine Teilmenge von Sensorknoten $X \subseteq M_{Sk}$, deren maxi-



**Abbildung 38: a) Beispielhafte Ausbreitungscharakteristik eines Sensorknotens (Fläche A_{Sk})
b) Prinzip der Positionsermittlung des Sextant-Verfahrens**

male Übertragungsbereiche vollständig in M_{Sk} liegen. Folglich reduziert sich e_{Sk} auf die Schnittmenge $e_{Sk} \leftarrow e_{Sk} \cap X$ (siehe e_{Sk} in Abbildung 38b). Kann für eine Region X ausgeschlossen werden, dass der Sensorknoten in ihr liegt, ergibt sich e_{Sk} aus der Differenz der Regionen $e_{Sk} \leftarrow e_{Sk} \setminus X$.

Die Regionen werden beim Sextant-Verfahren durch genäherte Bézier-Kurven beschrieben. Somit können primitive Flächenoperationen, wie z. B. Schnittfläche bilden, Subtraktion und Vereinigung von Flächen, auch auf Sensorknoten ausgeführt werden [Far88].

Der APIT-Algorithmus ist ebenfalls ein Näherungsverfahren zur Lokalisierung von Sensorknoten in Netzwerken hoher Knotendichte [He05]. Die Bestimmung erfolgt in vier Stufen:

1. Sammeln der Positionen bekannter Nachbarbeacons
2. Point-in-Triangulation-Test (PIT)
3. Gewichtsbildung
4. Schwerpunktbestimmung

In der ersten Phase sammelt der zu lokalisierende Sensorknoten Sk_i alle Positionsangaben von n bekannten Beacons B_j ($0 < j \leq n$) und ermittelt gleichzeitig die genäherten Distanzen d_{ij} zu den Beacons. Anschließend in Phase 2 werden aus allen Beaconpositionen insgesamt c Dreiecke gebildet (Abbildung 39a).

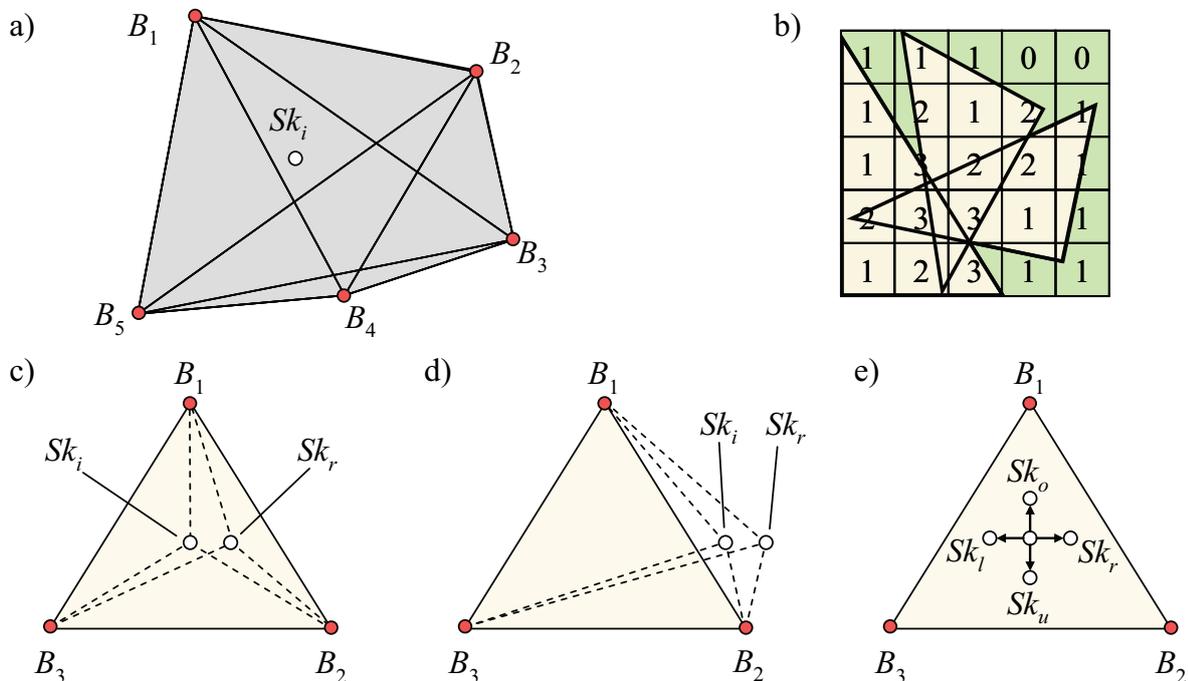


Abbildung 39: a) Dreiecksbildung beim APIT-Algorithmus aus allen bekannten Beaconpositionen b) Ermitteln der wahrscheinlichsten Position durch Zählen der überlagerten Teilflächen c) Point-in-Triangulation-Test (PIT) des Sensorknotens Sk_i und Sk_r innerhalb und d) außerhalb eines Dreiecks e) Prinzip des PIT

$$c = \binom{n}{3} = \frac{n!}{3!(n-3)!} \quad (59)$$

Für jedes aufgestellte Dreieck wird durch den Point-in-Triangulation-Test (PIT) geprüft, ob sich der Sensorknoten Sk_i innerhalb der eingeschlossenen Fläche befindet. Der Test basiert auf der Annahme, dass ein im Dreieck befindlicher Knoten Sk_i die drei Distanzen d_{ij} ($j = 1,2,3$) zu den Eckpunkten des Dreiecks B_j kennt. Wird dieser Sensorknoten leicht verschoben und ist er danach weiterhin innerhalb des Dreiecks, haben sich zwei dieser Distanzen verkürzt und eine verlängert. Anderenfalls liegt er nach der Verschiebung nicht mehr im Dreieck. Da die Position des Sensorknotens unbekannt ist, kann der Test nur approximiert durchgeführt werden.

Eine hohe Sensorknotendichte garantiert im extrem ungünstigen Fall, dass der rechte Nachbar Sk_r des Sensorknotens Sk_i ebenfalls die Beacons B_j ($j = 1,2,3$) kennt und die Distanzen d_{ij} . Diese Distanzen überträgt Sk_r an Sk_i , wodurch dieser durch Vergleich der Distanzen d_{ij} und d_{rj} überprüfen kann, ob eine Rechtsverschiebung des Knotens Sk_i auf die Position des Knotens Sk_r zum Verlassen des Dreiecks führt (Abbildung 39c-d). Dieser Test wird für alle vier Richtungen durchgeführt (Abbildung 39e). Wenn für alle vier Nachbarknoten (Sk_p, Sk_r, Sk_o, Sk_n) nachgewiesen werden kann, dass der Sensorknoten das Dreieck nicht verlässt, ist der PIT bestanden. Der Sensorknoten muss sich folglich in dem Dreieck befinden.

In der dritten Phase werden alle bekannten Beaconpositionen einer Teilfläche des Netzwerkes zugeordnet. Für jede Teilfläche wird die Anzahl der sie berührenden Dreiecke gezählt. In Abhängigkeit des PIT wird je Dreieck inkrementiert (PIT wahr) bzw. dekrementiert, wenn der PIT nicht bestanden wurde (Abbildung 39b). In der Region mit den größten Zählern befindet sich höchstwahrscheinlich der Sensorknoten. Ist eine explizite Positionsangabe gefordert, kann der Zählerwert auch als Gewicht in einer Schwerpunktbestimmung benutzt werden (vgl. Kap. 5).

3.6.3 Analyseverfahren

Diese Klasse von Lokalisierungsverfahren ermittelt die Position der Sensorknoten aus der Analyse aktuell verfügbarer Messdaten und bereits gewonnener Daten [Hig01b]. Die Position kann durch statische und differentielle Analyse ermittelt werden. Die statische Analyse basiert auf dem Vergleich bereits bekannter bzw. vordefinierter Daten mit den aktuellen Messdaten. Die differentielle Analyse betrachtet dagegen die Messdatenänderungen und berechnet daraus Bewegungsvektoren und Positionsschätzungen.

Ein typischer Vertreter der statischen Analyse ist das von Bahl et al. vorgestellte zweistufige Verfahren RADAR zur Lokalisierung in Gebäuden [Bah00]. Alle Räume werden dazu mit WLAN-Basisstationen, die ihre Position kennen, ausgestattet.

In der ersten, initialen Phase des Algorithmus (Off-Line Phase) senden mobile Geräte Nachrichten inkl. ihrer aktueller Position (User-Position) aus, die von den Basisstationen detektiert werden. Zusätzlich messen die Basisstationen die Empfangsfeldstärke sowie das Signal-Rausch-Verhältnis und speichern diese in einer Datenbank. Somit entsteht für jede User-Position ein einzigartiges Profil mit gemessenen Kennwerten, das die Nachteile der problematischen Sende- und Empfangscharakteristik bei der RSSI-Ermittlung nahezu eliminiert (vgl. Abbildung 24).

In der anschließenden zweiten Phase senden die zu lokalisierenden Sensorknoten ebenfalls eine Nachricht. Die Beacons messen erneut SNR sowie RSSI und ermitteln durch Vergleich mit den bereits gespeicherten User-Positionen aus der ersten Phase die wahrscheinlichste Position des Sensorknotens. Das Verfahren erreicht lediglich eine Genauigkeit von ca. 50% des Beaconabstandes. Im Vergleich zu anderen Algorithmen benötigt RADAR durch die umfangreiche Kommunikation und Datenbankspeicherung in der Offline-Phase sehr viele Ressourcen.

Ein weiteres Analyseverfahren ist das Signal-Pattern-Matching [Bha03]. Es nutzt die Nachteile der schwer bestimmbareren Ausbreitungscharakteristik der Funkwellen in realen Systemen verursacht durch Mehrwegeausbreitung, Beugung und Reflexionen aus. Das Einsatzgebiet des Sensornetzwerkes wird dazu einmalig vor der Ausbringung der Sensorknoten in Teilgebiete gegliedert. Für jede dieser Teilflächen wird aus den empfangenen Signalen der Referenzknoten ein charakteristischer Identifier (Fingerprint) zu jedem Sender ermittelt und in einer zentralen Datenbank gespeichert. Die Lokalisierung der Sensorknoten erfolgt durch Vergleich der gespeicherten Signaturen mit der berechneten Signatur aus den aktuellen Umgebungsdaten. Der Nachteil des Verfahrens besteht jedoch in der zwingenden Reorganisation der Datenbank bei Änderungen in der Umgebung.

3.7 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden die grundlegenden mathematischen Verfahren der Lokalisierung hergeleitet und klassifiziert. Die nachfolgende Analyse ergab, dass aufgrund der zahlreichen Randbedingungen (Ressourcenknappheit, Skalierungsverhalten, ungenaue Distanzmessungen usw.) zumeist eine Adaptierung der Verfahren auf die spezifischen Eigenschaften in Sensornetzwerken erforderlich ist.

Dies führte zur Entwicklung zahlreicher spezialisierter Lokalisierungsverfahren für Sensornetzwerke, von denen die wichtigsten Vertreter vorgestellt wurden. Der Fokus der meisten Verfahren liegt vielfach bei der Erhöhung der Positionsgenauigkeit und führt dadurch oft zu einem relativ hohen Ressourcenbedarf durch z. B. erhöhten Kommunikationsaufwand, Speicherbedarf oder Rechenaufwand.

4 Schwerpunktbestimmung

In Systemen, in denen die Ressourceneffizienz gegenüber anderen Designkriterien im Vordergrund steht, kann die Schwerpunktbestimmung als Schätzung der Position eines Sensorknotens eingesetzt werden. Die Positionsbestimmung basierend auf einer Schwerpunktbestimmung wurde im Kontext mit Sensoren erstmals 1989 im Active Badge System eingesetzt [Wan92]. Die Anwendung zielte auf die Lokalisierung von mobilen Mitarbeitern innerhalb eines Gebäudes mit der Absicht, die telefonische Erreichbarkeit der Mitarbeiter zu erhöhen.

Das Active Badge System ist ein zentralisiertes System, d. h. die Positionsbestimmung erfolgt aus allen gesammelten Informationen in einer zentralen Station bs des Netzwerkes. Diese Informationen, die für die Positionsbestimmung benötigt werden, müssen alle an eine zentrale Einheit im Netzwerk übertragen werden. Wenn die Position auf dem einzelnen Sensorknoten zusätzlich benötigt wird, ist eine Übertragung der berechneten Position von der Basisstation zum Sensorknoten erforderlich. Diese Übertragung ist aus energetischer Sicht sehr problematisch, da bei genauer Betrachtung

- die Koordinaten der involvierten Sensorknoten und Basisstationen unbekannt sind und demzufolge ein geografisches Routing nicht in Betracht kommt,
- ein Fluten von n Positionen in segmentierten Nachrichten erfolgen müsste, da für sehr große n ein Paket nicht alle Positionsdaten aufnehmen kann,
- die zufällige Verteilung der Knoten ein angepasstes Routingprotokoll erfordert, um ein Fluten des Netzes zu verhindern und
- die Knoten in der Nähe der Basisstation bs durch das Weiterleiten der Daten benachbarter Sensorknoten erhöhtem Energieverbrauch ausgesetzt sind und folglich früher als entfernte mangels verfügbarer Energiereserven ausfallen.

4.1 Algorithmus

Für die Schwerpunktbestimmung wurde ein dezentraler Ansatz (Centroid Localization, CL) durch Bulusu et al. vorgestellt [Bul00]. Das Verfahren zeichnet sich durch den Verzicht auf bidirektionale Verbindungen und die damit verbundene Energieeinsparung aus.

Beide Verfahren, Active Badge und CL, setzen zur Positionsbestimmung das Vorhandensein von b Beacons B_i ($0 < i \leq b$) und n Sensorknoten P_j ($0 < j \leq n$) voraus. Ein Sensornetzwerk SNW besteht somit aus $n + b$ Netzwerkteilnehmern ($B_i, P_j \in \text{SNW}$). Die Positionen der einfachen Sensorknoten P_j sind unbekannt und können aus den Positionen der Beacons und den ermittelten Nachbarschaftsbeziehungen genähert bestimmt werden.

Algorithmus 2: Positionsermittlung im Schwerpunkt, Ablaufprotokoll auf Beacons

```

Positionsbestimmung
    Ermittle, falls erforderlich, die exakte Position (z. B. per GPS)
Endlosschleife
    Warte bis zu zufälligem Startpunkt  $t_0$  innerhalb der Periode  $T_B$ 
    Sende Nachrichten mit eigenem Identifier und eigener Beaconposition  $B_i$ 
    Warte Zeit  $T_B - t_0$ , sodass gesamter Zyklus  $T_B$  dauert

```

Der durch Bulusu et al. vorgeschlagene Algorithmus unterscheidet für Sensorknoten und Beacons unterschiedliche Ablaufprotokolle. Die Beacons, deren Position als bekannt definiert ist, senden innerhalb einer Periode T_B ihre Position und ihren Identifier in einer Broadcastnachricht. Um Kollisionen bei der Übertragung vieler Beaconpositionen zu reduzieren, wird der Sendezeitpunkt t_0 innerhalb der Periode T_B zufällig bestimmt (Algorithmus 2). Die Sensorknoten sammeln alle empfangenen Beaconpositionen B_i (Algorithmus 3).

Die Sensorknoten verbleiben in der Phase des Beaconempfangs bis die Periode t_{st} (sampling time) abgelaufen ist. Sie ergibt sich aus $t_{st} = (S+1)T_B$, wobei S die Anzahl der erwarteten Nachrichten definiert. Die in diesem Zeitraum empfangenen Nachrichten werden für jeden Beacon einzeln gezählt und ergeben $n_{i,received}$.

Über die Anzahl $n_{i,received}$ der empfangenen Informationen eines Beacons kann die Konnektivitätsmetrik cm_i (connectivity metric) bestimmt werden [Bul02]. Sie gibt an, wie gut der Sensorknoten zu diesem Beacon verbunden ist und berechnet sich aus den gesendeten $n_{i,sent}$ und den empfangenen $n_{i,received}$ Nachrichten eines Beacons. Die Konnektivitätsmetrik kann zusammen mit der Schwelle $cm_{threshold}$ benutzt werden, um die Lokalisierung zu stabilisieren, indem nur Beaconpositionen in die nachfolgende Berechnung einbezogen werden, zu denen in der aktuellen Periode eine sehr gute Verbindung besteht.

Algorithmus 3: Positionsermittlung im Schwerpunkt, Ablauf auf Sensorknoten

```

Datensammlung
    Warte Zeit  $T_B$ 
    o Empfange Nachrichten mit Beaconpositionen  $B_i$ 
    o Merke Beaconposition  $B_i$ 
    o Zähle pro Beacon die Anzahl der Nachrichten  $n_{i,received}$ 
    Berechne  $cm_i$  aller empfangenen Beaconinformationen
    Entferne alle Beaconinformationen für die nicht gilt  $cm_{threshold} \leq cm_i$ 
    Berechne Zwischensumme  $S_x$  und  $S_y$  aus den Koordinaten der gültigen Beaconpositionen
    Zähle Anzahl der gültigen Beaconpositionen  $n$ 
Positionsbestimmung
    Ermittle  $\underline{P}_x$  durch Dividieren von  $S_x$  mit  $n$  (Gleichung 61)
    Ermittle  $\underline{P}_y$  durch Dividieren von  $S_y$  mit  $n$  (Gleichung 61)

```

$$cm_i = \frac{n_{i,received}}{n_{i,sent}} \quad (60)$$

Nach Ablauf der Periode t_{st} wird die Konnektivitätsmetrik cm_i jedes Beacons berechnet. Alle Beaconpositionen, für die der Schwellwert $cm_{threshold}$ nicht eingehalten wird, werden verworfen. Bulusu et al. ermittelten für ihr beispielhaftes Netzwerk einen Schwellwert von $cm_{threshold}$ 0,9 [Bul00].

Der Lokalisierungsansatz besteht darin, die Koordinaten (x,y) aller n verbliebenen, nicht verworfenen, Beaconpositionen B_i getrennt voneinander zu addieren und die Zwischensummen durch die Anzahl n der Beaconpositionen zu teilen (Gleichung 61). In der Mathematik wird dieses Verfahren zur Ermittlung des Schwerpunktes einer Fläche angewandt.

$$\underline{P}_{CL} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \frac{1}{n} \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n B_{i,x} \\ \sum_{i=1}^n B_{i,y} \end{pmatrix} \quad \forall B_i (cm_{threshold} \leq cm_i) \quad (61)$$

Dem Algorithmus liegt ein kreisförmiges Ausbreitungsmodell zugrunde (vgl. Kap. 2.9), das den Übertragungsbereich eines Netzwerkteilnehmers durch einen Kreis in der Ebene mit dem Radius tr (Übertragungreichweite) nähert. Die Beacons bilden mit ihren Übertragungsbereichen A_i charakteristische Überlappungsbereiche. Für die gesuchte Position \underline{P}_j gilt, dass sie innerhalb eines Überlappungsbereiches A_S liegen muss, der einer Teilmenge aller Übertragungsbereiche A_i ($i = 1..n$) der bekannten Beacons entspricht.

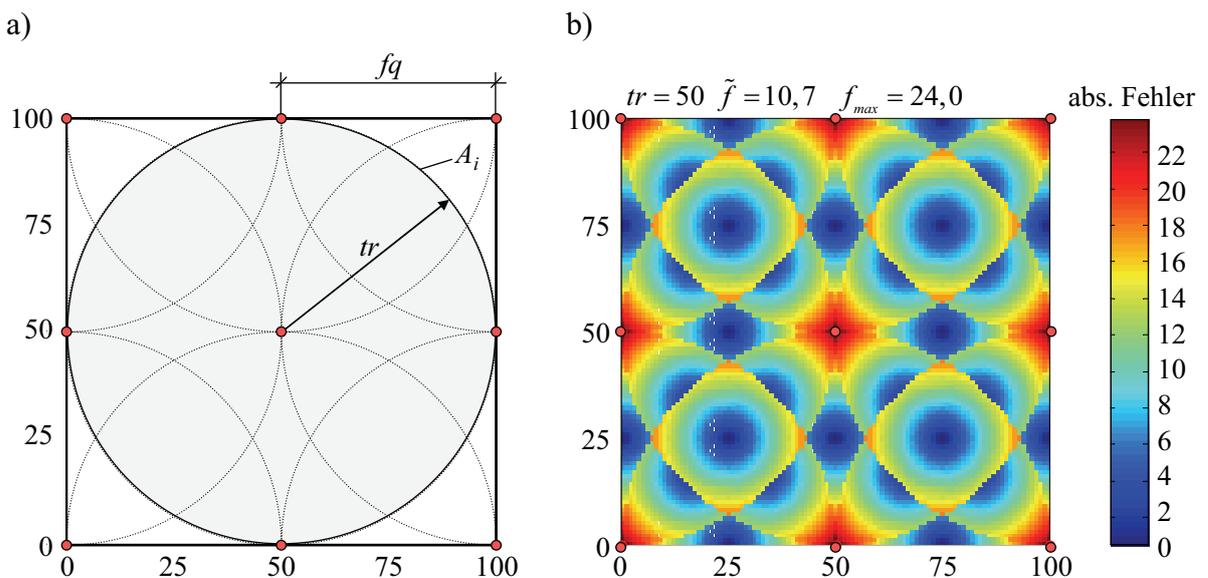


Abbildung 40: a) Überlagerungsflächen bei 3x3-Gitteranordnung der Beacons, $tr=fq=50$ b) Lokalisierungsfehler der Schwerpunktbestimmung (3x3 Beacons, $fq=50$)

In einem gitterbasierten Netzwerk aus 3×3 Beacons mit der Übertragungreichweite $tr = 50$ setzen sich die Überlagerungsbereiche wie in Abbildung 40a dargestellt zusammen. Der Abstand zwischen zwei Beacons entlang einer Gitterlinie wird mit f_q bezeichnet.

Der Fehler der Positionsbestimmung f berechnet sich aus dem Abstand zwischen ermittelter Position $\underline{P}(x;y)$ und wahrer Position $P(x;y)$. Für ein voll besetztes Sensornetzwerk kann der Lokalisierungsfehler für jede Position im Netzwerk ermittelt werden.

$$f = \sqrt{(\underline{x} - x)^2 + (\underline{y} - y)^2} \quad (62)$$

Abbildung 40b zeigt den Fehler für ein typisches Einsatzszenario (3×3 Beacons im Gitter bei Übertragungreichweite $tr = f_q = 50$). Die unterschiedlichen Farben symbolisieren die Höhe des absoluten Fehlers, der durchschnittlich $f_{mean} = 10,7$ beträgt und im Maximum $f_{max} = 24$ ist. Bezogen auf den Beaconabstand beträgt der relative Lokalisierungsfehler $f_{mean}/f_q = 0,21$.

Es wird deutlich, dass in jedem Überlappungsbereich der Fehler konzentrisch vom Schwerpunkt zur Außenkante der Überlappungsfläche zunimmt und an der Grenze zum benachbarten Überlappungsbereich eine Unstetigkeitsstelle im Fehlerverlauf auftritt.

Die genaue Analyse der Abbildung 40a zeigt, dass sich bei doppelter Übertragungreichweite und doppeltem Beaconabstand ähnliche Überlappungsflächen bilden müssen. Der Fehlerverlauf ist für diesen Fall vergleichbar und der relative Lokalisierungsfehler f/f_q identisch. Der relative Lokalisierungsfehler ist demnach nur vom Verhältnis v aus Übertragungreichweite tr und Beaconabstand f_q abhängig, da nur dieses Verhältnis maßgeblich den Verlauf der Überlappungsflächen verändert.

$$v = \frac{tr}{f_q} \quad (63)$$

4.2 Zwischenfazit

Nachteilig bei dem Verfahren ist, dass Informationen von schlecht verbundenen Beacons durch den Einsatz der Schranke $cm_{threshold}$ einfach verworfen werden anstatt sie in angemessener Weise auszuwerten. Ebenso sind keine Korrekturverfahren oder Verfahren zur Synchronisation zwischen den Beacons definiert (vgl. Kap. 6). Zudem zwingt diese Methode zu einem nicht zu vernachlässigendem Speicherverbrauch, da für jeden der b empfangbaren Beacons eine Zählung der Positionsinformationen erfolgen muss.

$$speicherbedarf = b(\text{sizeof}(B_{i,x}) + \text{sizeof}(B_{i,y})) + \text{sizeof}(cm_i) \quad (64)$$

In einem mobilen Netzwerk oder in Netzwerken mit einer unbekanntem bzw. einer ungleichmäßigen Beaconverteilung erzwingt dieses Verfahren dynamische Speicherstrukturen, die es aufgrund der extremen Ressourcenlimitierungen auf Sensorknoten eher zu vermeiden gilt. Aus diesem Grund wurde in einem vereinfachten Verfahren auf die Konnektivitätsmetrik vollständig verzichtet (Algorithmus 4). Dies ist zulässig, wenn Ausbreitungscharakteristik aller Netzwerkteilnehmer dem zugrunde liegenden Modell entspricht.

Die Implementierung dieses Verfahrens ist wesentlich einfacher und speichersparender. Besonders hervorzuheben ist, dass der Algorithmus jetzt jederzeit in der Lage ist, eine Position zu ermitteln, auch wenn noch nicht alle Beaconinformationen empfangen wurden. Er konvergiert somit mit der Zeit zu $\underline{P}(x;y)$. Es muss lediglich sichergestellt werden, dass die Beaconinformationen nur einmal verrechnet werden. Dies kann erreicht werden, indem

- a) alle Beacons nur einmal bzw. periodisch in Runden senden oder
- b) in einer Bitmaske die bereits registrierten Beacons mitprotokolliert werden.

In dem bisherigen Verfahren (Algorithmus 3) wurde die Lokalisierung mobiler Knoten automatisch über den Filter der Konnektivitätsmetrik garantiert. Im vereinfachten Verfahren muss die Positionsbestimmung zur Korrektur der Koordinaten P_x und P_y periodisch neu durchgeführt werden, um sich ändernde Nachbarbeacons in der Berechnung zu berücksichtigen. Die vereinfachte Lokalisierung basierend auf der Schwerpunktbestimmung (Algorithmus 4) besitzt eine Reihe von Vorteilen gegenüber anderen Algorithmen wie

- sehr einfache und schnelle Berechnung,
- ohne FPU ausführbar,
- statischer Speicherverbrauch,
- unidirektionale, verbindungslose Kommunikation von Beacons zu Sensorknoten,
- skalierbar,
- pipelinefähig und
- keine explizite Distanzmessung nötig.

Algorithmus 4: Vereinfachte Lokalisierung auf Sensorknoten

Datensammlung
Empfange Nachrichten mit Beaconidentifizier und -positionen B_i
Wenn B_i unbekannt, dann
o Speichere Koordinaten des Beacons B_i
o Inkrementiere n
o Berechne Zwischensumme S_x und S_y aus Koordinaten der Beaconpositionen
Positionsbestimmung
Ermittle \underline{P}_x durch Dividieren von S_x mit n (Gleichung 61)
Ermittle \underline{P}_y durch Dividieren von S_y mit n (Gleichung 61)

Gerade die Kombination mehrerer dieser Vorteile prädestiniert die Schwerpunktbestimmung für den Einsatz auf ressourcenarmen Systemen mit geringen Ansprüchen an die Lokalisierungsgenauigkeit. Da das Verfahren keine Kompensation der durch Hindernisse, Materialeigenschaften veränderten Ausbreitungscharakteristik vorsieht, verschlechtert sich die Positionsgenauigkeit mit der Abweichung zum idealen Modell (vgl. Abbildung 12).

4.3 Grenzen der Schwerpunktbestimmung

Im Gegensatz zu weithin üblichen Aussagen, bei dem von Bulusu et al. vorgestellten Verfahren werde der Mittelpunkt der Schnittfläche A_S bestimmt, handelt es sich tatsächlich um eine Schwerpunktbestimmung, wie Abbildung 41 zeigt. In Teilbild a) wird die Position des Sensorknotens P_1 der resultierenden Schnittfläche A_S aus der Menge der bekannten Beaconpositionen $B_i \in B$ ($i = 1,2,3$) im Punkt $\underline{P}_1(x;y)$ bestimmt.

Wenn jedoch ein weiterer Beacon B_4 hinzukommt und dieser sich in unmittelbarer Umgebung ($\Delta d \rightarrow 0$) zu einem anderen Beacon B_2 befindet, bildet sich eine Untermenge C von dicht beieinander liegenden Beacons ($C \subseteq B$). Abbildung 41b zeigt diese Konstellation für B_4 ($B_4 \in C$). In diesem Fall ist die resultierende Schnittfläche A'_S nahezu dieselbe wie im Fall a). Die ermittelte Position $\underline{P}'_1(x;y)$ ist jedoch trotz gleicher Schnittfläche A_S nicht mit $\underline{P}_1(x;y)$ identisch. Vielmehr wird die ermittelte Position $\underline{P}'_1(x;y)$ zu den Beacons, in diesem Fall B_2 und B_4 , verschoben, also in Gebiete, die eine überdurchschnittlich hohe Beacondichte aufweisen. Es wird deutlich, dass die Berechnungsvorschrift einer Schwerpunktbestimmung gleichkommt, da alle Beacons in die Kalkulation miteinbezogen werden und die Koordinaten von B_2 und B_4 doppelt vertreten sind.

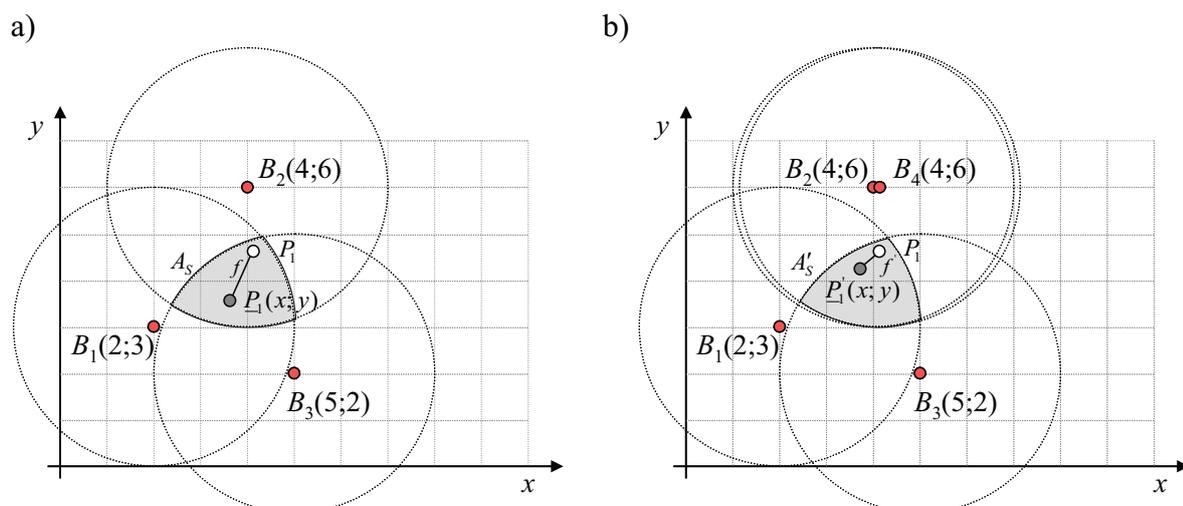


Abbildung 41: a) Bestimmung der Position $\underline{P}_1(x;y) = \{3,7;3,7\}$ durch Schwerpunktbestimmung aus den empfangenen Beaconpositionen $B_1(2;3)$, $B_2(4;6)$ und $B_3(5;2)$ b) Bestimmung der Position $\underline{P}'_1(x;y) = \{3,75;4,25\}$ aus den Beaconpositionen $B_1..B_4$

Für den Fall, dass in der unmittelbaren Umgebung von B_2 weitere Beacons (B_5 und B_6) liegen, tritt das Phänomen auf, dass die berechnete Position $\underline{P}_1''(x; y)$ außerhalb der Schnittfläche A_S liegt ($\underline{P}_1'' \notin A_S$). Die ermittelte Position liegt demnach nicht grundsätzlich in der Schnittfläche. Die Berechnungsvorschrift ist somit lediglich eine Näherung für die Positionsbestimmung innerhalb der Schnittfläche A_S , die nur in Grenzfällen die akzeptable Genauigkeit liefert. Lediglich für den Spezialfall, dass die Beacondichte μ_B konstant ist, garantiert die Berechnungsvorschrift einer Schwerpunktbestimmung eine ermittelte Position innerhalb der resultierenden Schnittfläche.

Alle Sensorknoten innerhalb der Schnittfläche A_S bestimmen dieselbe Position $\underline{P}(x; y)$. Folglich steigt der Fehler der Lokalisierung für diese Knoten konzentrisch mit dem Abstand zwischen der wahren Position $P(x; y)$ und $\underline{P}(x; y)$. Die Position $\underline{P}(x; y)$ wird bei ungleichmäßiger Beaconverteilung im Extremfall im Schwerpunkt des Gebietes C bestimmt. In Abbildung 41a entspricht der Maximalfehler für alle Sensorknoten $P_i \in A_S$ jedoch nicht dem Extremfall \overline{PB}_2 , da die Beacondichte sehr ausgeglichen ist. Im Fall b) ist die Tendenz erkennbar, dass die Strecke $\overline{P'B}_2$ den Maximalfehler darstellen wird. Folglich steigt der Maximalfehler bei der Schwerpunktbestimmung für alle Knoten in Regionen mit geringer Beacondichte massiv an.

Aus den dargelegten Überlegungen empfiehlt es sich daher, die Verteilung der Beacons der Verteilung der Sensorknoten anzupassen, wenn eine differenzierte Positionsgenauigkeit erwünscht ist und die Folgen auf den Lokalisierungsfehler überschaubar sind. Andererseits ist es nahe liegend, eine Gleichverteilung von Beacons anzustreben, wenn alle Knoten ihre Position mit einem geringeren Maximalfehler bestimmen sollen.

Ein weiterer entscheidender Nachteil der Schwerpunktbestimmung bei ungleichmäßig verteilten Beacons ist die wesentlich aufwändigere mathematische Bestimmung des Lokalisierungsfehlers. Für den Extremfall, dass die Untermenge C sehr groß wird ($n_C \rightarrow \infty$), wird die Position P_i immer an der Stelle $B_j \in C$ bestimmt. Die bestimmte Position aller Sensorknoten in A_S befindet sich demnach nicht mehr in der Schnittfläche. Der durchschnittliche und der maximale Fehler wachsen stark. Der maximale Fehler steigt auf den Wert der Strecke $\overline{P_i B_j}$, wenn B_j im Schwerpunkt der Fläche C liegt.

Bei einer Gleichverteilung der Beacons befindet sich \underline{P}_i immer in der resultierenden Schnittfläche A_S . Die Grenzen dieser Fläche können somit als Randbedingungen zur Fehleranalyse herangezogen werden und der durchschnittliche Lokalisierungsfehler kann mathematisch ermittelt werden (vgl. Kap. 4.6).

In der Praxis gestaltet sich die Gleichverteilung, hervorgerufen durch die Verteilung in unebenen Gebieten, Hindernisse und Ausfälle, sehr schwierig. Daher wurden vielfach

Richtlinien und Vorschläge zur Korrektur der Beaconverteilung entwickelt [Pri00]. Doherty et al. stellten fest, dass das Platzieren der Beacons am Außenbereich besonders in den Ecken des Netzwerkes die Lokalisierungsfehler nachhaltig reduziert. In [Sal05] wird die Aussage weiter präzisiert, indem die optimale Beaconplatzierung nicht auf dem Netzwerkrand, sondern in der Nähe des Netzwerkrandes erfolgen muss.

Um die Beaconverteilung zur Laufzeit zu verbessern, haben Bulusu et al. eine inkrementelle Beaconplatzierung (beacon placement) vorgeschlagen [Bul01]. Die zwei präsentierten Algorithmen, MAX und GRID, bestimmen die Lokalisierungsfehler der Sensorknoten aus den empfangenen Positionsdaten der bekannten Beacons mit Hilfe eines mobilen Agenten (mobile agents). Im Anschluss werden aus den empirisch gewonnenen Messdaten Gebiete mit hohen Lokalisierungsfehlern eingegrenzt, in die neue Beacons manuell hinzugefügt werden. Eine Weiterentwicklung der Verfahren wird in [Bul01b] beschrieben. HEAP-MAX und HEAP-Grid erfahren Erweiterungen für hohe Netzwerkdichten. Das manuelle Hinzufügen von Beacons ist jedoch weiterhin notwendig.

4.4 Optimale Kalibrierung

Der Fehler der Lokalisierung ist abhängig von der Übertragungsreichweite tr der Beacons. Dies wird schnell durch die Betrachtung des Fehlerverlaufs im Grenzwertfall deutlich. Für den Fall, dass die Übertragungsreichweite $\lim tr \rightarrow 0$ strebt, kann kein Sensorknoten Nachrichten eines Beacons empfangen. Eine Positionsbestimmung ist demnach nicht möglich (Abbildung 42a) und die Anzahl der Sensorknoten mit unbekannter Position (Unbekannte) ist maximal $u \rightarrow \max$ [Blu04a].

Im anderen Extremfall $\lim tr \rightarrow \infty$ muss eine zusätzliche Fallunterscheidung anhand der

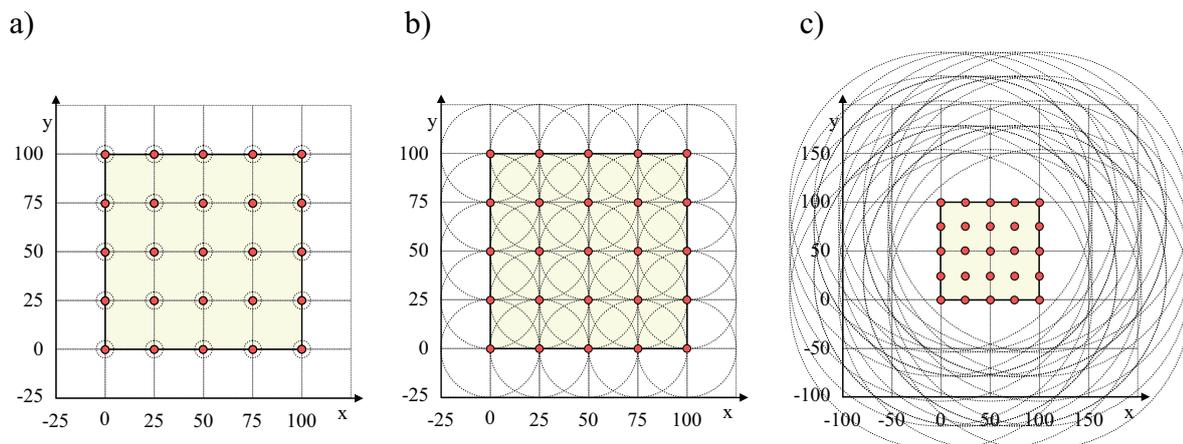


Abbildung 42: Überlappungsbereiche bei der Schwerpunktbestimmung in einem endlichen Netzwerk aus Beacons in Abhängigkeit von der Übertragungsreichweite für a) $\lim tr \rightarrow 0$, d. h. keine Positionsbestimmung möglich b) $tr = fq$ mit mittlerem Lokalisierungsfehler c) $\lim tr \rightarrow \infty$, bestimmte Position für alle Sensorknoten im Zentrum des Beaconnetzwerkes

Größe des Sensornetzwerkes vorgenommen werden. In einem endlichen Netzwerk führt eine riesige Übertragungsbereichweite zum Empfang aller Beaconpositionen auf allen Sensor-knoten. Folglich bestimmen aufgrund der identischen Positionsinformationen alle Knoten dieselbe Position und zwar exakt im Schwerpunkt des gesamten Beaconnetzwerkes (Abbildung 42c). Das führt letztlich zu einem sehr hohen durchschnittlichen und maximalen Lokalisierungsfehler, der sich aus der maximalen Länge der Strecke vom Schwerpunkt zu den Ecken ergibt (65).

$$f_{\max} = \frac{fq(\sqrt{b}-1)}{\sqrt{2}} \quad (65)$$

In unendlich großen Sensornetzwerken mit unendlich vielen Beacons (unendliches Netzwerk) hingegen verhält sich der Lokalisierungsfehler deutlich verschieden. Betrachten wir nun eine aus 3×3 Beacons bestehende Teilfläche A_T mit unterschiedlichen Übertragungsbereichweiten tr genauer. Es wird schnell deutlich, dass mit steigender Übertragungsbereichweite die Anzahl der Überlappungsflächen zunimmt (Abbildung 43). Da für alle Knoten in einer Fläche die Position gleich dem Schwerpunkt ist, muss mit zunehmender Flächenanzahl und folglich kleineren Flächen der Lokalisierungsfehler sinken. Weiterhin wird deutlich, dass die Zunahme der Überlappungsflächen keine stetige Funktion ist, sondern von dem Verhältnis der Übertragungsbereichweite zum Beaconabstand fq abhängig ist.

Aus den vorangegangenen Betrachtungen wird deutlich, dass der Lokalisierungsfehler maßgeblich von der Übertragungsbereichweite abhängt. Ohne Betrachtung des Energieverbrauchs lässt sich konstatieren, dass die Übertragungsbereichweite der Beacons so kalibriert werden muss, dass sich der Lokalisierungsfehler im praktischen Einsatz (endliches Sensornetzwerk) dem Grenzfall für $\lim tr \rightarrow \infty$ im unendlich großen Beaconnetzwerk nähern sollte. Es

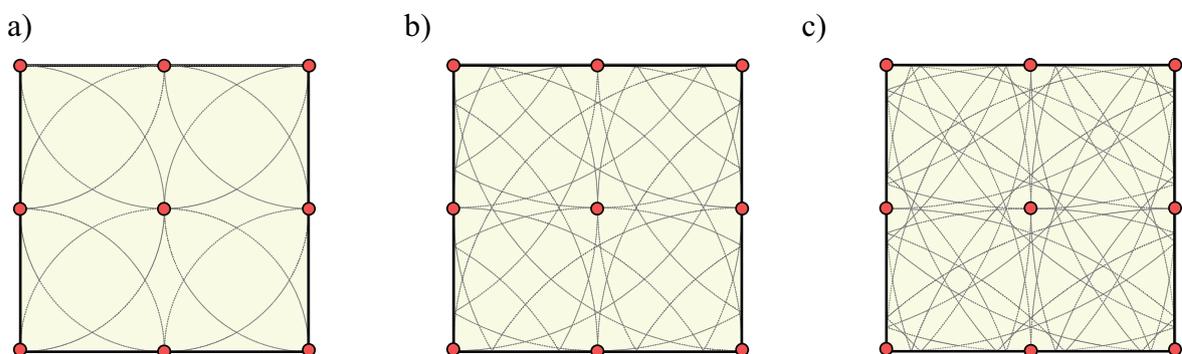


Abbildung 43: Überlappungsbereiche einer Teilfläche A_T in einem unendlich großen Netzwerk aus Beacons in Abhängigkeit der Übertragungsbereichweite für a) $tr=fq$ b) $tr=2fq$ c) $tr=3fq$. Die Anzahl der Überlappungsbereiche nimmt zu, wobei gleichzeitig die mittlere Flächengröße abnimmt

gilt daher, eine geeignete Übertragungsreichweite für ein endliches Sensornetzwerk zu ermitteln, um den Lokalisierungsfehler zu minimieren. Jedoch darf diese Übertragungsreichweite tr nicht zum in Abbildung 42c dargestellten Verhalten führen, da in diesem Fall der Lokalisierungsfehler wieder steigt.

Die beiden Fallunterscheidungen $\lim tr \rightarrow 0$ und $\lim tr \rightarrow \infty$ aus Abbildung 42 machen deutlich, dass es ein Minimum der Übertragungsreichweite tr_{min} geben muss, bei dem die Anzahl der Sensorknoten mit unbekannter Position null ist. Um seine Position bestimmen zu können, muss jeder Sensorknoten mindestens eine Nachricht eines Beacons erhalten. Diese Bedingung ist erfüllt, wenn sich alle Übertragungsreichweiten eines von vier Beacons eingeschlossenen Gebietes im Mittelpunkt treffen (Abbildung 44a). Sie entspricht der halben Diagonalen zwischen zwei gegenüberliegenden Beacons, z. B. $\overline{B_2 B_4}$.

$$tr_{min} = \left\lceil \frac{fq}{\sqrt{2}} \right\rceil \quad (66)$$

Bei kleineren Übertragungsreichweiten $tr < tr_{min}$ können nicht alle Sensorknoten ihre Position bestimmen. Diese Knoten werden als Unbekannte bezeichnet. Die Anzahl der Unbekannten u steigt mit abnehmender Übertragungsreichweite (Abbildung 44b). Weiterhin ist ersichtlich, dass bei tr_{min} die Anzahl Überlagerungsflächen $n = 8$ ist. Für $tr_{min} < tr < fq$ ist die Anzahl jedoch $n = 9$. Das bedeutet, der Lokalisierungsfehler $f(tr)$ ist bei tr_{min} nicht minimal, da bei $tr > tr_{min}$ kleinere Flächen entstehen.

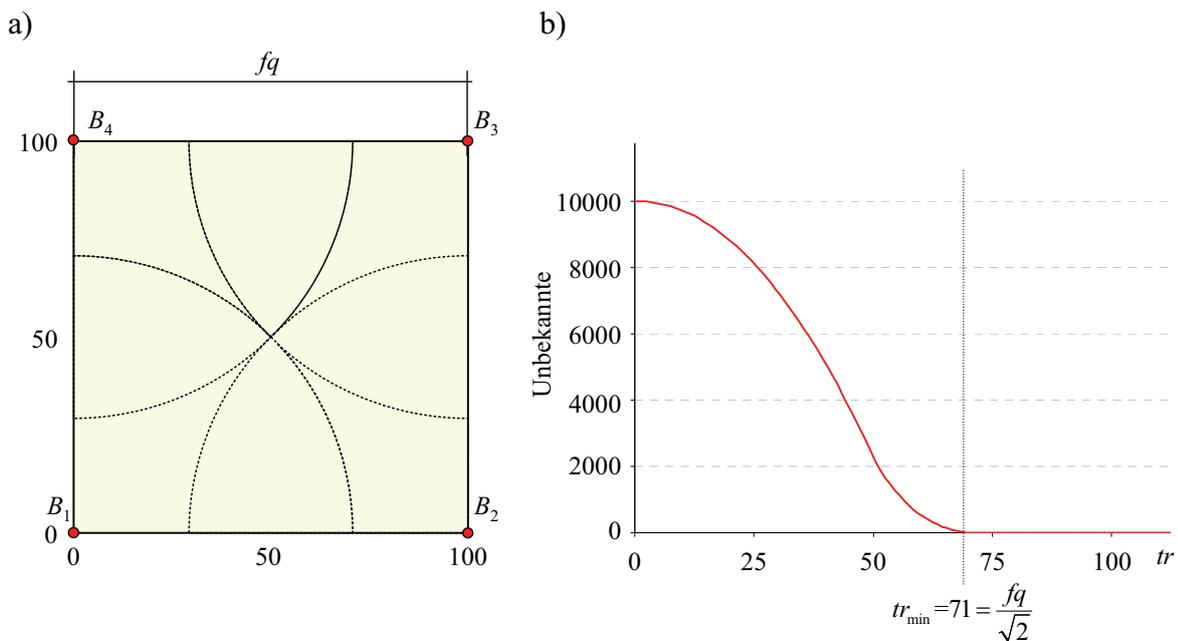


Abbildung 44: a) Überlagerungsflächen bei minimaler Übertragungsreichweite tr_{min} b) Anzahl der Sensorknoten mit unbestimmter Position (Unbekannte) in Abhängigkeit der Übertragungsreichweite

Die in Abbildung 42a-c dargestellten Fallunterscheidungen machen ebenfalls deutlich, dass es mindestens eine Übertragungreichweite tr_{opt} geben muss, bei der der durchschnittliche Lokalisierungsfehler $f(tr/fq)$ ein Minimum besitzt. Dies ergibt sich aus den Überlegungen, dass der Lokalisierungsfehler

- im endlichen Feld mit wachsendem tr ebenfalls zunimmt (Abbildung 42c),
- im endlichen Feld bei $tr = tr_{min}$ nicht minimal sein kann (Abbildung 44a) und
- im unendlichen Feld mit wachsendem tr sinkt.

Es gibt folglich in der Funktion $f_i(tr/fq)$ gegenläufige Tendenzen, die einerseits den Fehler minimieren und andererseits den Fehler wieder erhöhen. Die nachfolgende Simulation zeigt dies sehr anschaulich. Sie ermittelt die optimale Übertragungreichweite tr_{opt} für verschiedene Konfigurationen von endlichen und unendlichen Beaconnetzwerken.

Die Simulation der endlichen Sensornetzwerke erfolgt, indem für jede gegebene Netzwerkkonfiguration k und jede Übertragungreichweite im Intervall $0 \leq tr \leq tr_{max,k}$ der Lokalisierungsfehler f_i jedes Sensorknotens bestimmt wird. Anschließend erfolgt die Berechnung des durchschnittlichen Fehlers $f_{tr,k}$ gefolgt von der Ermittlung des minimalen durchschnittlichen Lokalisierungsfehlers $f_{min,tr,k}$. Die Simulation mit dem geringsten Lokalisierungsfehler $f_{min,tr,k}$ ergibt die optimale Übertragungreichweite $tr_{opt,k}$.

Die maximale Übertragungreichweite $tr_{max,k}$ ist definiert als Übertragungreichweite, bei der der durchschnittliche Lokalisierungsfehler gegen $f_{max,tr,k}$ und der maximale Lokalisierungsfehler gegen $f_{max,tr,k}$ konvergieren.

$$tr_{max} = \sqrt{2}fq(\sqrt{b} - 1) \quad (67)$$

Die Ermittlung der optimalen Übertragungreichweite im unendlichen Netzwerk erfolgt über eine repräsentative Teilfläche A_T . Der durchschnittliche Lokalisierungsfehler einer repräsentativen Teilfläche A_T ist gleich dem Lokalisierungsfehler ihrer Nachbarflächen wie auch aller anderen Teilflächen im Netzwerk (Abbildung 45a).

Für die Teilfläche A_T wird wie im endlichen Netzwerk die optimale Übertragungreichweite tr_{opt} bestimmt. Entscheidend für die erfolgreiche Simulation ist nur, dass sie repräsentativ für ein unendliches Netzwerk ist, d. h. für alle tr muss gelten, dass die Überlagerungsbereiche der Teilfläche A_T auch in den Nachbarflächen des unendlich großen Netzwerkes entstehen würden. Dies wird sichergestellt, indem Randeffekte durch Begrenzung der maximalen Übertragungreichweite $tr_{max,T}$ in der Simulation verhindert werden.

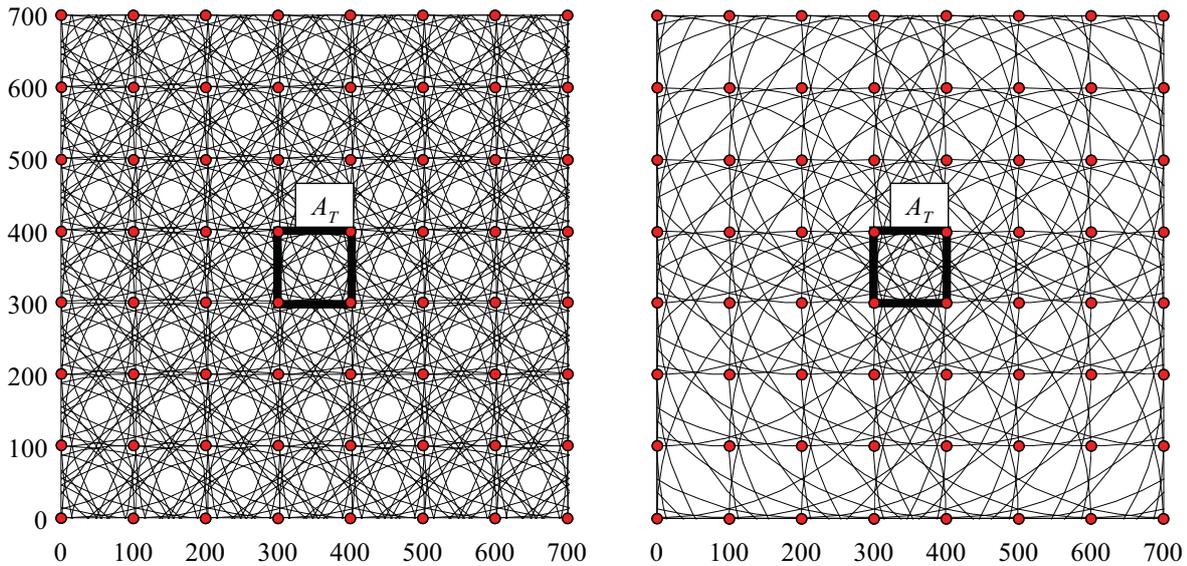


Abbildung 45: Ansatz zur Ermittlung der optimalen Übertragungsrreichweiten $tr_{opt,i}$ im unendlichen Netzwerk durch Simulation eines endlichen Netzwerkes ($7fq \times 7fq$) a) Überlagerungsflächen in der Simulation des unendlichen Netzwerkes bei $tr_{max,T} < 4fq$ b) repräsentative Teilfläche A_T des unendlichen Netzwerkes im endlichen Netzwerk bei $tr_{max,T} < 4fq$

Für die Ermittlung des Fehlerverlaufs im Intervall $0 \leq tr < 4fq$ eines unendlich großen Netzwerkes wird die Teilfläche A_T eines endlichen 700×700 Netzwerkes betrachtet. Die Abbildung 45b zeigt sehr anschaulich die Überlagerungsflächen im endlichen Netzwerk und in der Teilfläche A_T für $tr < tr_{max}$. Durch die maximale Übertragungsrreichweite $tr_{max} = 700/2 + fq/2$ ist sichergestellt, dass alle Sensorknoten in A_T einen maximalen Empfangsbereich im endlichen Feld mit $tr_{max} < 400$ besitzen. Dadurch entspricht die Anzahl der maximal empfangenen Beaconnachrichten (endliches Feld) gleich den maximal empfangbaren Nachrichten des unendlichen Feldes. Folglich müssen die ermittelten Lokalisierungsfehler $f_{tr,T}$ und $f_{min,tr,T}$ sowohl für A_T als auch für das gesamte unendliche Netzwerk repräsentativ sein ($0 \leq tr < tr_{max,T}$).

Ebenfalls deutlich zu erkennen sind die unterschiedlichen Überlagerungsflächen aller anderen Teilflächen des Netzwerkes hervorgerufen durch Randeffekte. Für A_T jedoch gilt, dass die entstandenen Überlagerungsflächen in den definierten Grenzen $0 \leq tr < tr_{max,T}$ gleich allen anderen Teilflächen A_i eines unendlich großen Netzwerkes sind. Wenn das unendliche Netzwerk für $tr_{max,T}$ korrekt simuliert werden kann, dann folgt daraus zwangsläufig, dass es auch für alle $tr < tr_{max,T}$ simuliert werden kann. Demnach können durch die nachfolgenden Simulationen alle optimalen Übertragungsrreichweiten $tr_{opt,i} < tr_{max,T}$ ermittelt werden.

Zur Ermittlung der optimalen Übertragungsrreichweite wurden endliche Sensornetzwerke der Ausdehnungen $fq \times fq$, $7fq \times 7fq$ und ein Teilstück eines unendlichen Sensornetzwerkes ($fq \times fq$) betrachtet. Für alle Konfigurationen ist der Beaconabstand mit fq festgelegt.

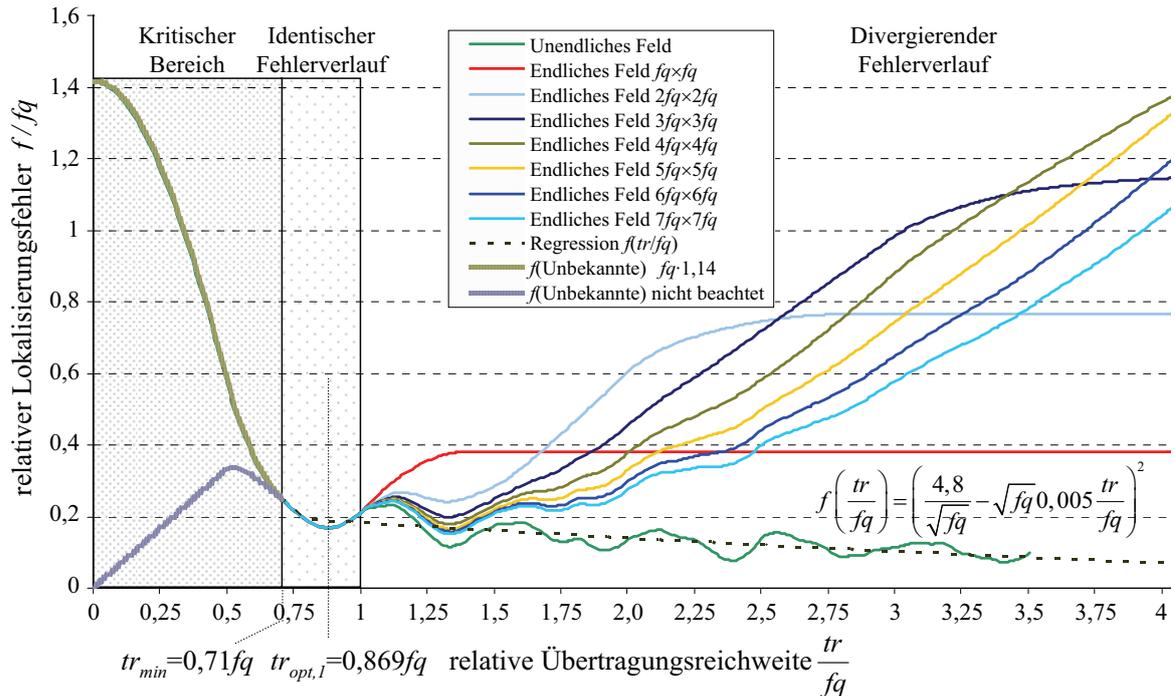


Abbildung 46: Gegenüberstellung des Fehlerverlaufs im endlichen und unendlichen Sensor-Netzwerk von im Gitter angeordneten Beacons im Abstand f_q

Der Verlauf des ermittelten Lokalisierungsfehlers teilt sich in drei Bereiche: den kritischen Bereich, den Bereich mit identischem Lokalisierungsfehler und dem Abschnitt mit divergierendem Fehlerverlauf (Abbildung 46). Im kritischen Bereich ($tr < tr_{min}$) können nicht alle Sensorknoten des Netzwerkes ihre Position bestimmen (vgl. Abbildung 44b). Die Nichtbeachtung der Unbekannten bei der Analyse der Lokalisierungsfehler führt zu einem nahezu linear steigenden Lokalisierungsfehler. Dies suggeriert, dass es einen minimalen Lokalisierungsfehler bei $tr = 0$ gibt. Diese triviale Lösung entfällt, da in dem Fall kein Knoten seine Position bestimmen kann. Aussagekräftige durchschnittliche Fehler und damit die Vergleichbarkeit können nur hergestellt werden, wenn für alle Unbekannten ein Maximalfehler von $f_i = \sqrt{2} f_q$ angenommen wird. Erst dann wird ersichtlich, dass der Lokalisierungsfehler mit steigendem tr ($0 \leq tr < tr_{min}$) fällt.

Für die Übertragungsreichweiten $tr_{min} \leq tr < f_q$ gilt, dass Sensorknoten einer beliebigen Teilfläche A_i nur Nachrichten von Beacons empfangen können, die diese Teilfläche A_i einrahmen. Es entstehen somit in allen Netzwerkkonfigurationen $n - 9$ ähnliche Überlagerungsbereiche innerhalb einer Teilfläche A_i , die sich lediglich in der Größe unterscheiden. Charakteristisch für den Fehlerverlauf in diesem Bereich ist, dass es ein Minimum des Lokalisierungsfehlers $f_{min,1}$ bei $tr_{opt,1} = 0,869 f_q$ unabhängig von der Größe des Netzwerkes gibt. Anschließend steigt der Lokalisierungsfehler wieder und divergiert ab $tr > f_q$. Der Grund für die Divergenz liegt in dem zunehmenden Einfluss der Randeffekte. Je stärker

sich die Übertragungsreichweite dem in Abbildung 42c gezeigten Verhalten nähert, desto höher ist der Lokalisierungsfehler, bis er sich ab $tr > tr_{max,1}$ ($k > 1$) asymptotisch $f_{max,1}$ nähert. Besonders deutlich wird dies beim Fehlerverlauf des $f_q \times f_q$ Netzwerkes. Da bei einer Übertragungsreichweite von $tr \geq 1,41f_q$ alle Sensorknoten alle Beaconnachrichten erhalten, kann der durchschnittliche Fehler nur konstant sein. Für alle größeren Netzwerke tritt dieser Effekt erst bei entsprechend höheren Übertragungsreichweiten auf, sodass die Steigerung des Lokalisierungsfehlers zunächst flacher erfolgt.

In größeren Netzwerken treten mit zunehmender Ausdehnung weitere optimale Übertragungsreichweiten auf, bei denen sich ein Minimum im Lokalisierungsfehler einstellt. Diese Übertragungsreichweiten erzeugen unter gewissen Bedingungen geringere Positionsfehler als bei $tr_{opt,1}$. Nur wenn die Übertragungsreichweite im Verhältnis zur Netzwerkausdehnung w gering ist, kann ein geringerer Positionsfehler als bei $tr_{opt,1}$ erreicht werden. So ist etwa das 2. Minimum des Lokalisierungsfehler $f_{min,2}$ im endlichen Feld ($4f_q \times 4f_q$) geringer als $f_{min,1}$. Im dritten Minimum jedoch dominieren die Randeffekte die Lokalisierung wieder, sodass gilt $f_{min,1} < f_{min,3}$. Letztlich konvergiert der Lokalisierungsfehler im endlichen Netzwerk an das Maximum $f_{max,k}$ (vgl. Abbildung 42c).

Beachtenswert ist zudem, dass die asymptotischen Fehler $f_{max,k}$ der endlichen Netzwerke einen wesentlich höheren Wert als $f_{max,1}$ haben (Abbildung 46). Es ist daher absolut kontraproduktiv, dieses Lokalisierungsverfahren in größeren endlichen Sensornetzwerken mit sehr großen Übertragungsreichweiten einzusetzen. Folglich kann der Lokalisierungsfehler nur in Netzwerken ohne bzw. mit geringen Randeffekten effizient verringert werden (Abbildung 46). In unendlich großen Netzwerken existieren keine Randeffekte. Die Lokalisierungsfehler sinken daher asymptotisch mit näherungsweise

$$f\left(\frac{tr}{f_q}\right) = \left(\frac{4,8}{\sqrt{f_q}} - \sqrt{f_q} 0,005 \frac{tr}{f_q}\right)^2 \quad (68)$$

gegen $f \rightarrow 0$. Leicht nachvollziehbar ist zudem, dass sich die Kurven der Lokalisierungsfehler im endlichen Feld für $tr \rightarrow w$ der Kurve des unendlichen Feldes nähern.

4.5 Power-Error-Product

Aus Gleichung 20 geht hervor, dass die bei der Übertragung eingesetzte Energie quadratisch ($P_{TX} \sim d^2$) mit der zu überbrückenden Entfernung steigt. Es gilt daher bei der Kalibrierung der Beacons darauf zu achten, dass die Sendereichweite so klein wie möglich eingestellt wird, damit

- alle Sensorknoten ihre Position bestimmen können,
- der Lokalisierungsfehler $f \rightarrow \min.$ ist und
- die eingesetzte Energie $P_T \rightarrow \min.$ ist.

Die drei Bedingungen beeinflussen sich gegenseitig und widersprechen sich z. T. massiv. Wenn z.B. der Energieverbrauch minimal ist, werden entweder nicht alle Sensorknoten ihre Position bestimmen können oder der Fehler wird relativ groß sein. Das heißt, es kann nur einen Kompromiss aus den drei Bedingungen geben. Bei der Kalibrierung muss folglich festgelegt werden, welches Kriterium, Energieverbrauch oder Positionsgenauigkeit, ausschlaggebend ist.

Die Simulation des Lokalisierungsfehlers in Abhängigkeit der Übertragungsreichweite (Abbildung 46) zeigte, dass es eine optimale Übertragungsreichweite $tr_{opt,1} = 0,869fq$ gibt und zudem weitere $tr_{opt,k} (k > 1)$ existieren können. Diese können für $tr_{opt,k}$ einen geringeren durchschnittlichen Lokalisierungsfehler als bei $tr_{opt,1} = 0,869fq$ garantieren.

Für die wirtschaftliche Betrachtung des Netzwerkes ist jedoch die Lokalisierungsgenauigkeit ebenso wichtig wie der Energieverbrauch des Netzwerkes. Die Verwendung der vorgenannten $tr_{opt,k} (k > 1)$ führt zu einem im Vergleich zu $tr_{opt,1}$ sehr langsam sinkenden Fehler, bewirkt aber, basierend auf Gleichung 20, einen wesentlich höheren Energieverbrauch.

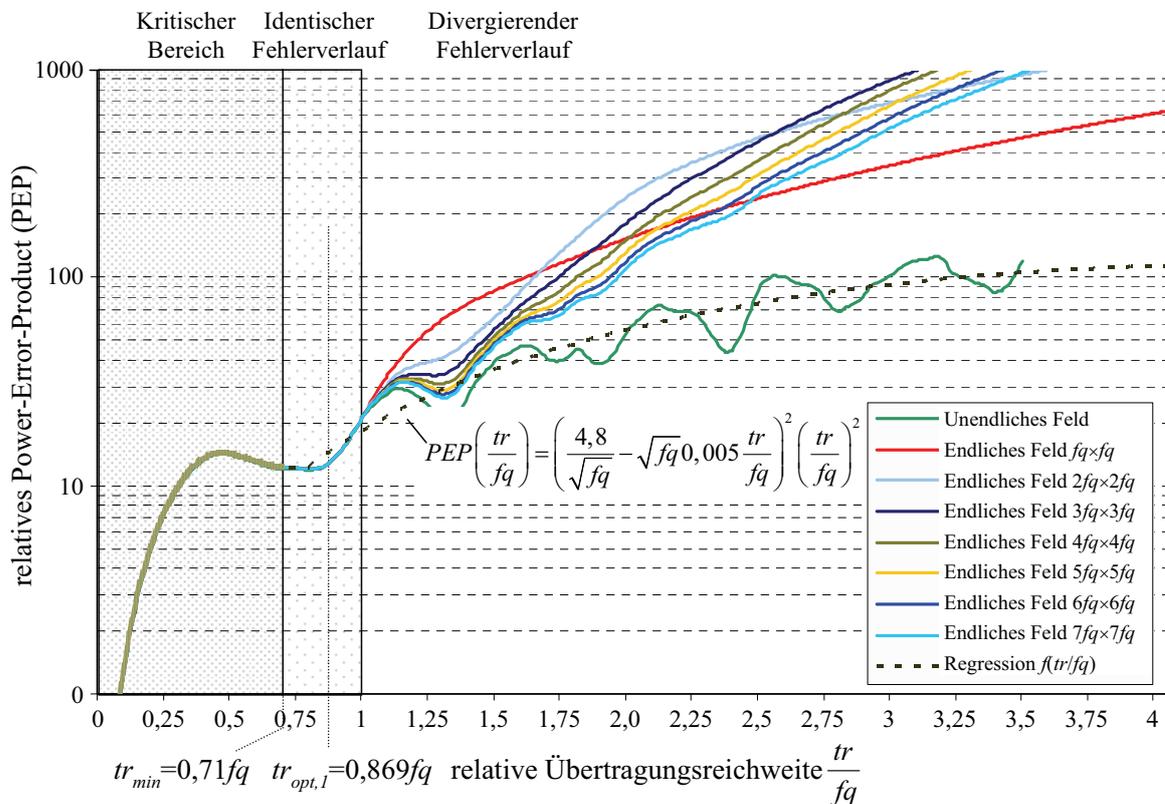


Abbildung 47: Power-Error-Product (PEP) im endlichen und unendlichen Sensornetzwerk

Für Netzwerke, in denen die Lokalisierungsgenauigkeit und der Energieverbrauch gleichermaßen wichtig sind, kann das Power-Error-Product (PEP) als Leistungsindikator benutzt werden [Blu04b]. Es wird aus der eingestellten Sendeleistung P_{TX} , die sich quadratisch zur Übertragungsreichweite tr verhält, und dem durchschnittlichen Fehler der Lokalisierung im gesamten Sensornetzwerk ermittelt.

$$\begin{aligned} PEP(tr) &= P_{TX}(tr) \cdot \tilde{f}_i(tr) \\ &= tr^2 \cdot \frac{\sum_{i=1}^n f_i(tr)}{n} \end{aligned} \quad (69)$$

Das Power-Error-Product der Simulation ist in Abbildung 47 dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass bei Beachtung der Sendeleistung nur $tr_{opt,1}$ als zu verwendende Übertragungsreichweite wirtschaft sinnvoll eingesetzt werden kann.

4.6 Optimale Übertragungsreichweite

Für den Fall, dass der Energieverbrauch und die Positionsgenauigkeit gleichermaßen minimiert werden, wird nachfolgend die bereits in der Simulation ermittelte optimale Übertragungsreichweite $tr_{opt,1}$ theoretisch ermittelt.

Die Bedingungen für die Bestimmung von tr_{opt} werden erfüllt, wenn alle Sensorknoten ihre Position bestimmen können und die Summe aller Lokalisierungsfehler F_A des Netzwerkes in A_{ges} minimal ist (70).

$$\begin{aligned} tr_{opt,1} &= \frac{d}{dtr} F_{A_{ges}} \\ &= \frac{d}{dtr} \iint_{A_{ges}} f(x, y) dA \end{aligned} \quad \forall f f(x, y) \geq 0 \quad (70)$$

Die nachfolgende Berechnung einer optimalen Übertragungsreichweite basiert auf der Annahme, dass eine Fläche A als Teil eines unendlich großen Netzwerkes A_{ges} ($A \subset A_{ges}$) existiert und dass die optimale Übertragungsreichweite $tr_{opt,1}$, die sich für diese Fläche ergibt, in den anderen Flächen ebenfalls gültig ist [Rei06]. Die Fläche sei repräsentativ für das gesamte Netzwerk, d. h. das Gesamtnetzwerk lässt sich aus A zusammensetzen. Gleichung 70 wird somit nahezu unverändert in Gleichung 71 überführt.

$$tr_{opt,1} = \frac{d}{dtr} \iint_A \sqrt{(\underline{x} - x)^2 + (\underline{y} - y)^2} dA \quad \forall f f(x, y) \geq 0 \quad (71)$$

Für die weitere Berechnung wird angenommen, dass die Grenzen der Fläche A auf dem Gitter der Beacons liegen (Abbildung 48). Der Abstand zwischen den Beacons sei f_q und alle Beacons senden mit der gleichen Übertragungsreichweite tr .

Die Beacons der Teilfläche A senden ihre Positionsdaten gemäß der Vorschrift des Algorithmus zur Schwerpunktbestimmung periodisch aus. Durch die Übertragung wird eine kreisförmige Fläche (Übertragungsbereich) um die Beacons herum abgedeckt.

Es bilden sich demnach innerhalb der Teilfläche m charakteristische Überlagerungsbereiche mit unterschiedlicher Häufigkeit $h_1..h_m$ aus den Übertragungsbereichen der Beacons heraus.

In Abbildung 48 entstehen bei $tr \approx 0,9f_q$ beispielsweise 16 Überlagerungsbereiche mit $m = 4$ unterschiedlichen Flächenformen ($4 \cdot A_1, 4 \cdot A_2, 8 \cdot A_3, 4 \cdot A_4$).

Die minimale Übertragungsreichweite der Beacons lässt sich einfach ermitteln. Aus Abbildung 48 geht hervor, dass für den Fall, dass tr kleiner als die Hälfte der Diagonalen ist, Sensorknoten im Mittelpunkt der Teilfläche A ihre Position mangels Beaconinformationen nicht bestimmen können (vgl. Gleichung 66).

Die Anzahl der entstehenden Überlagerungsbereiche ist maßgeblich von der eingestellten Übertragungsreichweite abhängig (Abbildung 43). Für den minimalen Energieeinsatz werden daher zunächst nur die Flächen für $tr < f_q$ betrachtet. Somit ist die obere Grenze der Übertragungsreichweite $tr = f_q$.

Die Sensorknoten innerhalb der Teilfläche A empfangen in Abhängigkeit ihrer Lage in einer der Überlagerungsflächen $A_1..A_4$ maximal 1..4 Beaconnachrichten. Alle Sensorknoten P_j innerhalb einer Überlagerungsfläche A_i bestimmen ihre Position in deren Schwerpunkt S_i . Folglich steigt der Lokalisierungsfehler $f_{i,j}$ konzentrisch mit dem Abstand zum Schwer-

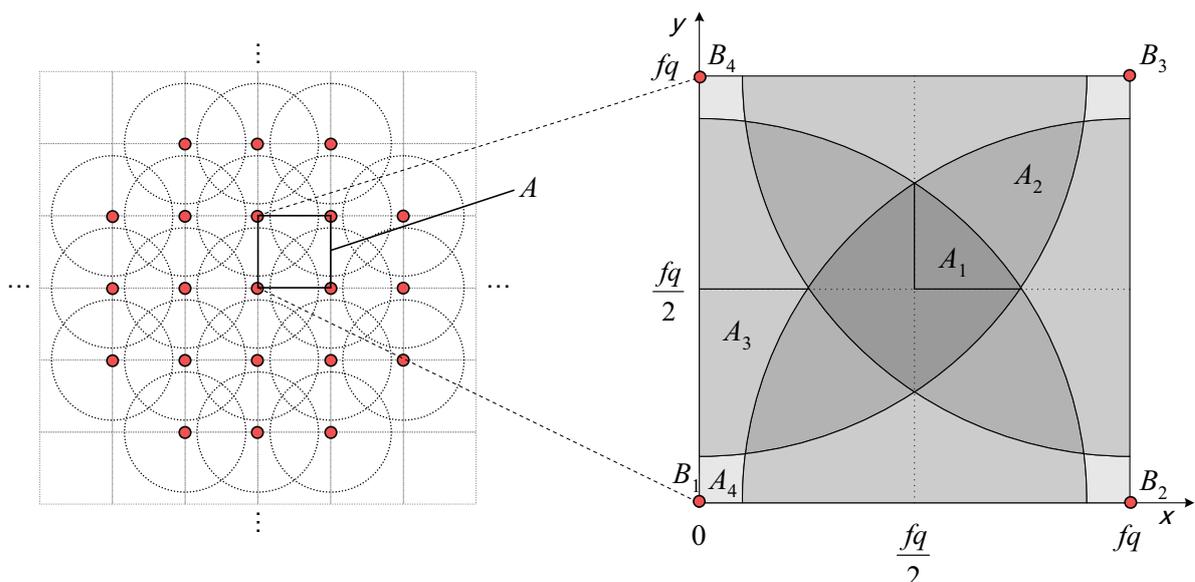


Abbildung 48: Repräsentative Teilfläche eines unendlich großen Sensornetzwerkes bestehend aus 4 Beacons in Gitteranordnung

punkt S_i an. Er ist aber nur in den Grenzen der Überlagerungsfläche A_i gültig. Folglich muss die Berechnung des summierten Lokalisierungsfehler F_A aufgeteilt und für jede Überlagerungsfläche einzeln durchgeführt werden (72).

$$F_A = h_1 \iint_{A_1} f(x, y) dA + h_2 \iint_{A_2} f(x, y) dA + \dots + h_m \iint_{A_m} f(x, y) dA \quad (72)$$

Nachfolgend wird der Berechnung für den akkumulierten Lokalisierungsfehler F_{A_2} fortgeführt. Sensorknoten innerhalb der Fläche A_2 empfangen Positionsdaten der Beacons $B_2(fq;0)$, $B_3(fq;fq)$ und $B_4(0;fq)$. Aus den empfangenen Beaconpositionen wird der Schwerpunkt S_2 berechnet.

$$S_2 = \begin{pmatrix} \frac{x_{B_2} + x_{B_3} + x_{B_4}}{3} \\ \frac{y_{B_2} + y_{B_3} + y_{B_4}}{3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{fq + fq + 0}{3} \\ \frac{0 + fq + fq}{3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{2}{3} fq \\ \frac{2}{3} fq \end{pmatrix} \quad (73)$$

Für Sensorknoten im Schwerpunkt S_2 ist der Lokalisierungsfehler null. Mit zunehmendem Abstand der Sensorknoten von S_2 nimmt auch der Fehler f_2 zu. Daher kann für alle Fehler in A_2 folgende Fehlergleichung aufgestellt werden:

$$f_2(x, y) = \sqrt{\left(x - \frac{2}{3} fq\right)^2 + \left(y - \frac{2}{3} fq\right)^2} \quad (74)$$

Für die Berechnung des akkumulierten Positionsfehlers müssen die Integrationsgrenzen der Teilfläche A_2 bestimmt werden. Da die Integrationsgrenzen nicht monoton sind, ist eine Aufteilung der Fläche A_2 in zwei weitere Teilflächen, A_{21} und A_{22} , erforderlich, um eine geeignete Integration durchführen zu können (Abbildung 49).

Anschließend wird das Flächenintegral in eine Flächenberechnung überführt. Das innere Integral wird dabei durch die oberen und unteren Kurven $y_{2,1}(x)$, $y_{2,2}(x)$ und $y_{2,3}(x)$ beschrieben, die ihrerseits durch die Punkte $x_{2,1}$, $x_{2,2}$ und $x_{2,3}$ begrenzt sind und damit gleichzeitig die Integrationsgrenzen des äußeren Integrals bilden.

$$\begin{aligned} F_{A_2} &= \iint_A f_2(x, y) dA = \iint_{A_{21}} f_2(x, y) dA + \iint_{A_{22}} f_2(x, y) dA \\ &= \int_{x_{2,1}}^{x_{2,2}} \int_{y_{2,1}(x)}^{y_{2,2}(x)} f_2(x, y) dy dx + \int_{x_{2,2}}^{x_{2,3}} \int_{y_{2,2}(x)}^{y_{2,3}(x)} f_2(x, y) dy dx \end{aligned} \quad (75)$$

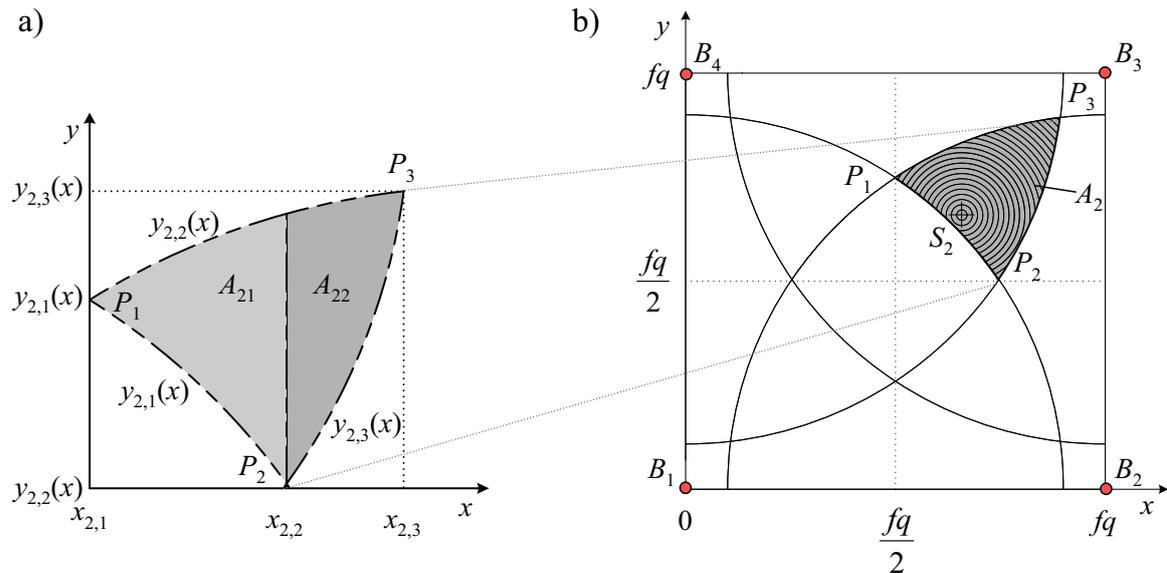


Abbildung 49: a) Überlagerungsfläche A_2 mit Integrationsgrenzen b) Schwerpunkt der Fläche A_2 mit Kennzeichnung des Fehlerverlaufs $f_2(r)$

Die genaue Bestimmung der Integrationsgrenzen erfolgt anhand der geometrischen Eigenschaften der Flächen A_{21} und A_{22} . Zunächst werden die Fixpunkte $P_1(x_{2,1};y_{2,1})$, $P_2(x_{2,2};y_{2,2})$ und $P_3(x_{2,3};y_{2,3})$ bei gegebenem tr und fq bestimmt. Die Lösungen für $y_{2,2}$ und $x_{2,1}$ sind trivial. Sie liegen grundsätzlich bei $fq/2$.

$$\begin{aligned} x_{2,1} &= \frac{fq}{2} \\ y_{2,2} &= \frac{fq}{2} \end{aligned} \quad (76)$$

Die Bestimmung von $x_{2,2}$ erfolgt durch Einsetzen von $y_2(x) = fq/2$ in die Kreisgleichung mit dem Mittelpunkt $B_0(0;0)$.

$$\begin{aligned} B_0(0,0): \quad tr^2 &= x^2 + y^2 \\ x_{2,2} &= +\sqrt{tr^2 - \frac{fq^2}{4}} \end{aligned} \quad (77)$$

Für die Berechnung des Punktes $P_3(x_{2,3};y_{2,3})$ sind die zwei Kreisgleichungen der Beacons $B_2(fq;0)$ und $B_4(0;fq)$ aufzustellen. Der Schnittpunkt beider Kreisgleichungen liegt an der Stelle $P_3(x_{2,3};y_{2,3})$.

$$\begin{aligned} B_2(fq,0): \quad tr^2 &= (x - fq)^2 + y^2 \\ B_4(0, fq): \quad tr^2 &= x^2 + (y - fq)^2 \end{aligned} \quad (78)$$

Durch Umstellen der Kreisgleichungen nach $y(x)$ und nachfolgendem Gleichsetzen kann die rechte Integrationsgrenze $x_{2,3}$ bestimmt werden. Da $x_{2,3}$ im Bereich $fq/2 \leq x_{2,3} \leq fq$ liegen muss, kann bei der Lösung der quadratischen Gleichung nur die positive Wurzel berücksichtigt werden.

$$\begin{aligned}
 \sqrt{tr^2 - (x - fq)^2} &= \sqrt{tr^2 - x^2} + fq \\
 tr^2 - (x - fq)^2 &= tr^2 - x^2 + 2\sqrt{tr^2 - x^2} + fq^2 \\
 2x - 2fq &= 2\sqrt{tr^2 - x^2} \\
 x^2 - 2xfq + fq^2 &= tr^2 - x^2 \\
 0 &= x^2 - xfq - \frac{tr^2 - fq^2}{2} \\
 x_{2,3} &= \frac{fq}{2} + \sqrt{\frac{2tr^2 - fq^2}{4}}
 \end{aligned} \tag{79}$$

Die inneren Integrationsgrenzen des Flächenintegrals werden aus den Kreisgleichungen der Beacons $B_1(x;y)$, $B_2(x;y)$ und $B_3(x;y)$ durch Umstellen nach $y_i(x)$ gewonnen.

$$\begin{aligned}
 B_1(0,0): \quad tr^2 &= x^2 + y^2 & \rightarrow y_{2,1}(x) &= +\sqrt{tr^2 - x^2} \\
 B_2(fq,0): \quad tr^2 &= (x - fq)^2 + y^2 & \rightarrow y_{2,2}(x) &= +\sqrt{tr^2 - (x - fq)^2} \\
 B_4(0,fq): \quad tr^2 &= x^2 + (y - fq)^2 & \rightarrow y_{2,3}(x) &= -\sqrt{tr^2 - x^2} + fq
 \end{aligned} \tag{80}$$

Somit lautet das endgültige Flächenintegral der Teilfläche A_2 :

$$\begin{aligned}
 F_{A_2} &= \left| \int_{\frac{fq}{2}}^{+\sqrt{tr^2 - \frac{fq^2}{4}} + \sqrt{tr^2 - (x - fq)^2}} \int_{+\sqrt{tr^2 - x^2}}^{\sqrt{\left(x - \frac{2}{3}fq\right)^2 + \left(y - \frac{2}{3}fq\right)^2}} dy dx \right| + \\
 &\left| \int_{+\sqrt{tr^2 - \frac{fq^2}{4}}}^{\frac{fq}{2} + \sqrt{\frac{2tr^2 - fq^2}{4}} + \sqrt{tr^2 - (x - fq)^2}} \int_{-\sqrt{tr^2 - x^2} + fq}^{\sqrt{\left(x - \frac{2}{3}fq\right)^2 + \left(y - \frac{2}{3}fq\right)^2}} dy dx \right|
 \end{aligned} \tag{81}$$

In Teilfläche A bilden sich neben A_2 noch drei weitere Flächen A_1 , A_3 und A_4 heraus, für die ebenfalls der akkumulierte Positionsfehler bestimmt werden muss. Die Geometrie verlangt für A_3 und A_4 erneut eine Aufteilung der Integration (Abbildung 50b-c).

Die Ermittlung der Schwerpunkte der Einzelflächen (S_1 , S_3 und S_4) und den darauf basierenden Fehlerfunktionen f_i erfolgt analog zur Vorgehensweise bei Teilfläche A_2 .

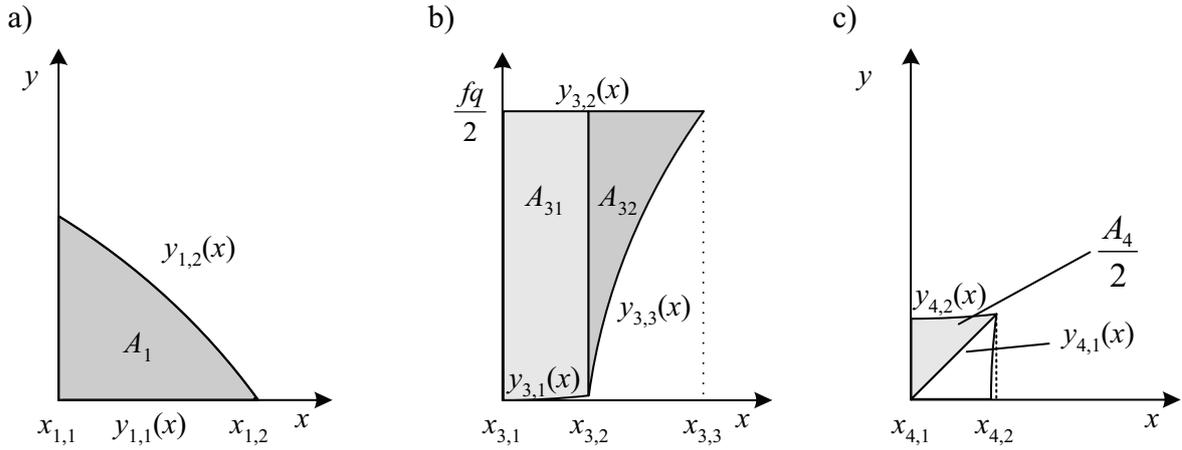


Abbildung 50: Überlagerungsflächen A_1 , A_3 und A_4 mit Angabe der Integrationsgrenzen

$$\begin{aligned}
 S_1 &= \begin{pmatrix} \frac{fq}{2} \\ \frac{fq}{2} \end{pmatrix} & f_1 &= \sqrt{\left(x - \frac{fq}{2}\right)^2 + \left(y - \frac{fq}{2}\right)^2} \\
 S_3 &= \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{fq}{2} \end{pmatrix} & f_3 &= \sqrt{x^2 + \left(y - \frac{fq}{2}\right)^2} \\
 S_4 &= \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} & f_4 &= \sqrt{x^2 + y^2}
 \end{aligned} \tag{82}$$

Die Integrationsgrenzen ergeben sich ebenfalls aus den die Teilflächen umgebenden Kurven ($x_{i,j}$ und $y_{i,j}(x)$), die durch das Ausnutzen von Nebenbedingungen, z. B. Schnittpunkten von Übertragungsreichweiten, bestimmt werden können (Tabelle 2).

Die Integrationsgrenzen der Teilflächen A_1 , A_3 und A_4 sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Die endgültigen Gleichungen zur Berechnung des akkumulierten Lokalisierungsfehlers lauten somit:

$$\begin{aligned}
 F_{A_1}(tr, fq) &= \left| \int_{\frac{fq}{2}}^{+\sqrt{\frac{tr^2 - fq^2}{4}}} \int_{\frac{fq}{2}}^{+\sqrt{tr^2 - x^2}} \sqrt{\left(x - \frac{fq}{2}\right)^2 + \left(y - \frac{fq}{2}\right)^2} dy dx \right| \\
 F_{A_3}(tr, fq) &= \left| \int_0^{\frac{fq - \sqrt{2tr^2 - fq^2}}{2}} \int_{fq - \sqrt{tr^2 - x^2}}^{\frac{fq}{2}} \sqrt{x^2 + \left(y - \frac{fq}{2}\right)^2} dy dx \right| + \\
 &\quad \left| \int_{\frac{fq - \sqrt{2tr^2 - fq^2}}{2}}^{\frac{fq - \sqrt{tr^2 - fq^2}}{4}} \int_{+\sqrt{tr^2 - (x - fq)^2}}^{\frac{fq}{2}} \sqrt{x^2 + \left(y - \frac{fq}{2}\right)^2} dy dx \right|
 \end{aligned} \tag{83}$$

Tabelle 2: Integrationsgrenzen der Teilflächen A_1 , A_3 und A_4

Integrationsgrenze	$A_1 (i=1)$	$A_3 (i=3)$	$A_4 (i=1)$
$x_{i,1} =$	$\frac{fq}{2}$	0	0
$x_{i,2} =$	$+\sqrt{tr^2 - \frac{fq^2}{4}}$	$\frac{fq}{2} - \frac{\sqrt{2tr^2 - fq^2}}{2}$	$\frac{fq}{2} - \frac{\sqrt{2tr^2 - fq^2}}{2}$
$x_{i,3} =$	-	$fq - \sqrt{tr^2 - \frac{fq^2}{4}}$	-
$y_{i,1}(x) =$	$\frac{fq}{2}$	$fq - \sqrt{tr^2 - x^2}$	x
$y_{i,2}(x) =$	$+\sqrt{tr^2 - x^2}$	$\frac{fq}{2}$	$fq - \sqrt{tr^2 - x^2}$
$y_{i,3}(x) =$	-	$+\sqrt{tr^2 - (x - fq)^2}$	-

und

$$F_{A_4}(tr, fq) = 2 \left| \int_0^{\frac{fq}{2}} \int_{\frac{fq}{2} - \frac{\sqrt{2tr^2 - fq^2}}{2}}^{\frac{fq}{2} - \sqrt{tr^2 - x^2}} \sqrt{x^2 + y^2} dy dx \right| \quad (84)$$

Aus den aufsummierten Fehlern der Einzelflächen wird der akkumulierte Gesamtfehler F_A bestimmt.

$$F_A(tr, fq) = 4 \cdot F_{A_1}(tr, fq) + 4 \cdot F_{A_2}(tr, fq) + 8 \cdot F_{A_3}(tr, fq) + 4 \cdot F_{A_4}(tr, fq) \quad (85)$$

Ausgehend von den Überlegungen, dass der relative Lokalisierungsfehler ausschließlich vom Verhältnis v (Gleichung 40) der beiden Größen tr und fq abhängig ist, muss dies auch für den minimalen relativen Fehler gelten. Folglich existiert ein optimales Verhältnis $v_{opt,1}$, bei dem der relative Fehler immer minimal ist und eine Skalierung der Geometrie keine Auswirkungen auf den Fehler hat.

$$v_{opt,1} = \frac{tr_{opt,1}}{fq} = konst. \quad (86)$$

Die gesuchte optimale Übertragungsreichweite $tr_{opt,1}$ ergibt sich aus dem Minimum des akkumulierten Gesamtfehlers (Gleichung 70). Da die Integration nicht analytisch gelöst werden konnte, wurde die optimale Übertragungsreichweite durch numerische Integration ermittelt. Aus dem ermittelten Minimalwert wurde die Übertragungsreichweite im Ver-

hältnis zum Beaconabstand mit $v_{opt,1} = 0,869$ ermittelt, sodass eine allgemein gültige Beziehung für $tr_{opt,1}$ hergestellt werden kann:

$$\begin{aligned} tr_{opt,1} &= v_{opt,1} \cdot fq \\ &= 0,869 \cdot fq \end{aligned} \quad (87)$$

Da $F_A(tr, fq)$ die Summation bzw. Stammfunktion aller Lokalisierungsfehler darstellt (Gleichung 72), können durch Ableitung nach der Fläche die Einzelfehler $f_i(x, y)$ bestimmt bzw. durch Division mit der Gesamtfläche A der durchschnittliche Lokalisierungsfehler der Sensorknoten $f_i(tr, fq)$ berechnet werden (Gleichung 88).

$$\begin{aligned} f_i(x, y) &= \frac{dFA}{dA} \\ f_i(tr, fq) &= \frac{\iint_A f_i(x, y) dA}{\iint_A 1 dA} = \frac{F_A(tr, fq)}{fq^2} \end{aligned} \quad (88)$$

Die dargelegte Berechnung belegt die Existenz einer optimalen Übertragungreichweite $tr_{opt,1}$ für $(tr_{min} \leq tr \leq fq)$. Für Übertragungreichweiten $tr > fq$ existieren ebenfalls optimale Übertragungreichweiten $tr_{opt,k}$ ($k > 1$), bei denen der durchschnittliche Lokalisierungsfehler ein Minimum erfährt. Einen Hinweis darauf geben die Simulationsergebnisse in Abbildung 46. Eine äquivalente Berechnung der optimalen Übertragungreichweiten für $tr > fq$ ist ebenso denkbar, jedoch durch die viel komplexeren Überlagerungsflächen deutlich aufwändiger und mit wenig Erkenntnisgewinn verbunden, da die optimalen Reichweiten auch in der Simulation hinreichend genau bestimmt werden können.

Neben der gitterbasierten Anordnung der Beacons können auch variierte, symmetrische Anordnungen den Lokalisierungsfehler entscheidend beeinflussen. Das zu lösende Überdeckungsproblem (Coverage) wurde durch Poduri et al. eingehend untersucht [Pod04]. Poduri zeigt, dass durch geeignete Anordnung der Beacons zueinander, z. B. im Dreieck, Quadrat oder Sechseck, ebenfalls eine optimale Abdeckung erreicht wird. Diese führt letztlich auch auf eine optimale Übertragungreichweite und einem minimalen durchschnittlichen Lokalisierungsfehler für jede diese Anordnungen (vgl. Kap. 5.6) [Chu05].

4.7 Randfehlerkorrektur

Das Gebiet des Sensornetzwerkes, in dem alle Knoten gleichmäßig von Nachbarbeacons umgeben sind, wird als Kernzone des Netzwerkes bezeichnet. Abbildung 51a zeigt einen Sensorknoten $P_l(55;55)$ in der Kernzone eines Netzwerkes. Die für diesen Fall bestimmte Position des Knotens $\underline{P}_l(50;50)$ liegt im Schwerpunkt der Schnittfläche A_l .

Gesetzt den Fall, ein Sensorknoten befindet sich im Randbereich eines Netzwerkes, d. h. ihm fehlen im Gegensatz zu Knoten der Kernzone entscheidende Nachbarbeacons, wirkt sich dies auf die Lokalisierung aus. Die durch fehlende Beacons größer werdenden Überlappungsbereiche resultieren in größeren Lokalisierungsfehlern im Randbereich.

Abbildung 51b zeigt am Beispiel des Knotens $P_2(5;5)$ den steigenden Lokalisierungsfehler im Randbereich. Im Gegensatz zu $P_1(55;55)$, ist der Überlappungsbereich A_2 wesentlich größer als A_1 , obwohl die Topologie deutliche Ähnlichkeiten aufweist. Die geschätzte Position liegt bei $\underline{P}_2(12,5;12,5)$. Der Fehler vergrößert sich von $f_1 = 7,07$ auf $f_2 = 10,60$. Diese Fehlervergrößerung wird durch fehlende Nachbarinformationen verursacht und betrifft alle Sensorknoten im Randbereich eines Netzwerkes.

Nachfolgend wird ein neues Verfahren vorgestellt, das den durch die Lage am Rand bedingten zusätzlichen Fehler der Schwerpunktbestimmung reduziert (CLwEC: Centroid Localization with Edge Correction). Es stellt sich sofort die Frage, ab wann ein Sensorknoten im Randbereich ist und wie das Netzwerk optimiert werden kann, damit die durch die Randeffekte erhöhten Lokalisierungsfehler reduziert werden können. Eine Möglichkeit, die Lage im Netzwerk festzustellen, erfolgt über die Analyse der empfangenen Beaconinformationen. In einem Sensornetzwerk mit gleichverteilten Beacons basiert die Unterscheidung auf dem Ansatz, dass in der Kernzone theoretisch die Anzahl der empfangenen Beacons gleich der Anzahl der im Übertragungsbereich des Sensorknotens empfangbaren Beacons $n_{Beacons}$ entsprechen muss.

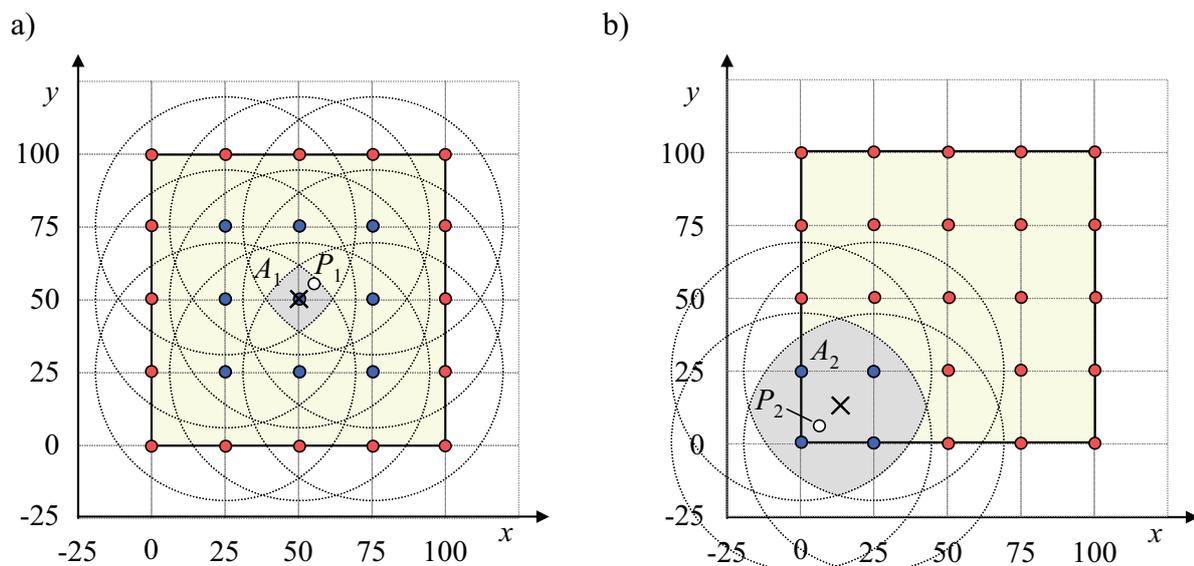


Abbildung 51: a) Positionsbestimmung eines Sensorknotens P_1 (weißer Punkt) in der Kernzone eines Sensornetzwerkes aus 9 bekannten Beaconpositionen (blaue Kreise) im Schwerpunkt von A_1 b) Positionsbestimmung eines Sensorknotens P_2 in der Randzone eines Netzwerkes aus lediglich vier bekannten Beaconpositionen im Schwerpunkt von A_2 .

Bei näherer Betrachtung fällt auf, dass selbst innerhalb der Kernzone die Anzahl der empfangbaren Beacons stark von der Lage des Sensorknotens abhängig ist (Abbildung 52). Der Sensorknoten P_1 besitzt innerhalb seiner Übertragungsreichweite 9 Beacons. Bei dieser Anordnung (direkt auf einem Beacon) ist dies die maximale Anzahl der empfangbaren Beacons. Sensorknoten P_2 hingegen kennt 12 Nachbarbeacons, da seine Lage hinsichtlich des Empfangs von Beaconnachrichten günstiger ist.

Beide Sensorknoten befinden sich in der Kernzone des Netzwerkes. Aus den Überlegungen ergibt sich, dass die maximale Anzahl von Nachbarbeacons innerhalb der Übertragungsreichweite von der Lage abhängt. Ein Test auf Lage in einer Randzone kann demnach nur begrenzt auf Basis der Anzahl der Nachbarbeacons durchgeführt werden, da die Lage des Sensorknotens und damit seine maximale Anzahl von Beaconinformationen unbekannt sind.

Die weiterführende Analyse der Sensorknoten P_3 und P_4 in Abbildung 52 zeigt, dass selbst in Randbereichen eine sehr hohe Anzahl von Beaconinformationen vorliegen kann. Sensorknoten P_3 besitzt trotz seiner offensichtlichen Randlage 10 Nachbarbeacons und damit mehr als Sensorknoten P_1 , der in der Kernzone liegt. Sensorknoten P_4 hat lediglich 7 Nachbarbeacons und erfüllt als einziger Sensorknoten in diesem Beispiel die Bedingung, dass Sensorknoten im Randbereich weniger Nachbarknoten als Sensorknoten in der Kernzone des Netzwerkes besitzen. Als Basis des Zugehörigkeitstests zur Kern- bzw. Randzone ist

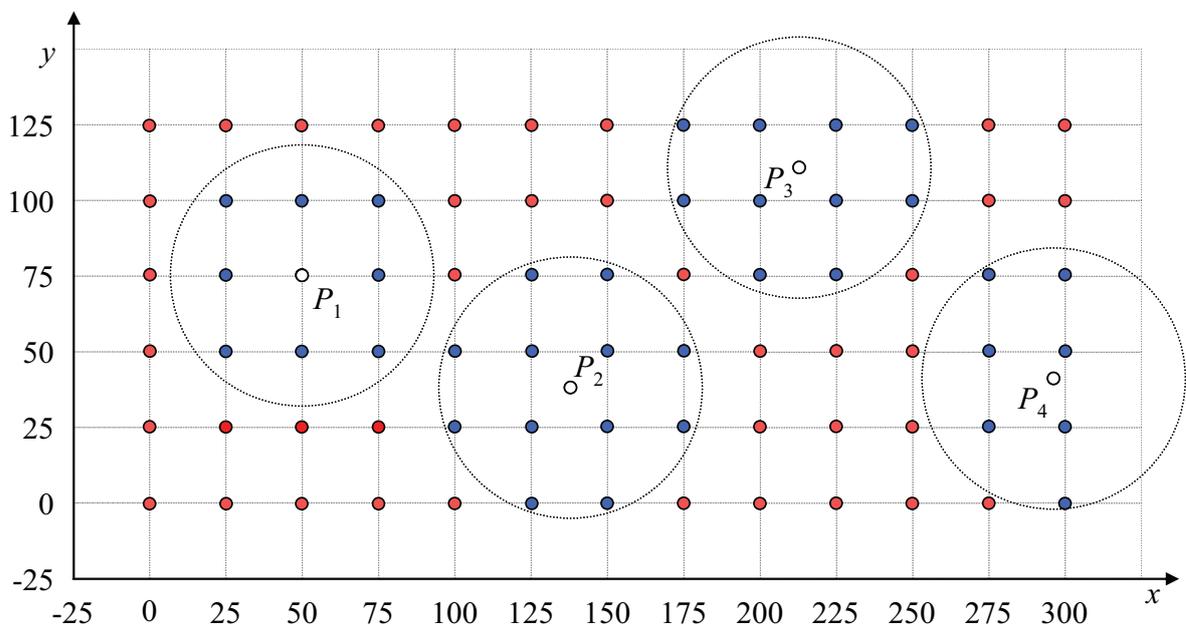


Abbildung 52: Anzahl der Nachbarbeacons der Sensorknoten $P_1..P_4$ in Abhängigkeit ihrer Lage im Netzwerk, wobei deutlich wird, dass einige Randknoten, z.B. P_3 , mehr Nachbarbeacons besitzen als Beacons der Kernzone, z. B. P_1 .

folglich nur die minimale Anzahl von empfangbaren Beaconinformationen in der Kernzone anwendbar.

In Abhängigkeit des Verhältnisses des Beaconabstandes f_q zur Übertragungreichweite der Beacons tr ergeben sich drei Extremfälle, in denen die minimale Anzahl von Nachbarbeacons mindestens einmal auftritt. Die drei Extremfälle sind durch Symmetrieeigenschaften des Beacongitters gekennzeichnet, bei denen Spiegelachsen jeweils durch die Sensorknoten verlaufen. Bei allen weiteren Anordnungen ist keine Symmetrie vorhanden und die Anzahl der Nachbarbeacons ist folglich nicht minimal.

Die drei Extremfälle zur Berechnung der minimalen Anzahl von Nachbarbeacons sind gekennzeichnet durch ihre Verschiebung im Gitter der Beacons, d. h. der Sensorknoten liegt:

- Fall 1: direkt auf einem Beacon
- Fall 2: auf einer Gitterlinie zwischen zwei Beacons
- Fall 3: in der Mitte zwischen vier Beacons

In Abhängigkeit der Übertragungreichweite tr liefert einer der drei Fälle die minimale Beaconanzahl. Abbildung 53 verdeutlicht dies an drei Beispielen mit den Übertragungreichweiten $tr_1 = 20$, $tr_2 = 26$ und $tr_3 = 28$. Für die Übertragungreichweite $tr_1 = 20$ wird nur im Fall 1 die minimale Beaconanzahl mit $n_{\min. Beacons} = 1$ bestimmt im Gegensatz zu $n_{\min. Beacons} = 2$ (Fall 2) und $n_{\min. Beacons} = 4$ (Fall 3). Bei Übertragungreichweite $tr_2 = 26$ hingegen bestimmt nur die Anordnung auf einer Gitterlinie mit $n_{\min. Beacons} = 2$ (Fall 2) die korrekte minimale Anzahl der Nachbarbeacons (Fall 1: 5 Beacons, Fall 3: 4 Beacons). Fall 1 schneidet hier besonders schlecht ab. Der Grund liegt schlicht in der Größe der Übertragungreichweite und deren Auswirkungen auf die im Empfangsbereich liegenden Beacons. Eine Möglichkeit, die minimale Anzahl von Nachbarbeacons $n_{\min. Beacons}$ innerhalb der Kernzone zu berechnen, zeigt Algorithmus 5. Er berechnet für jeden der vorgenannten drei Extremfälle die Anzahl der Nachbarbeacons. Dazu wird ein Sensorknoten in einem Sensornetzwerk der Dimension ($tr \leq x \leq tr$; $tr \leq y \leq tr$) im Koordinatenursprung positioniert. Die Lokalisierung unterliegt zusätzlich einer Verschiebung in Abhängigkeit der drei postulierten Fälle:

- Fall 1: $\Delta x = 0, \Delta y = 0$
- Fall 2: $\Delta x = f_q/2, \Delta y = 0$
- Fall 3: $\Delta x = f_q/2, \Delta y = f_q/2$

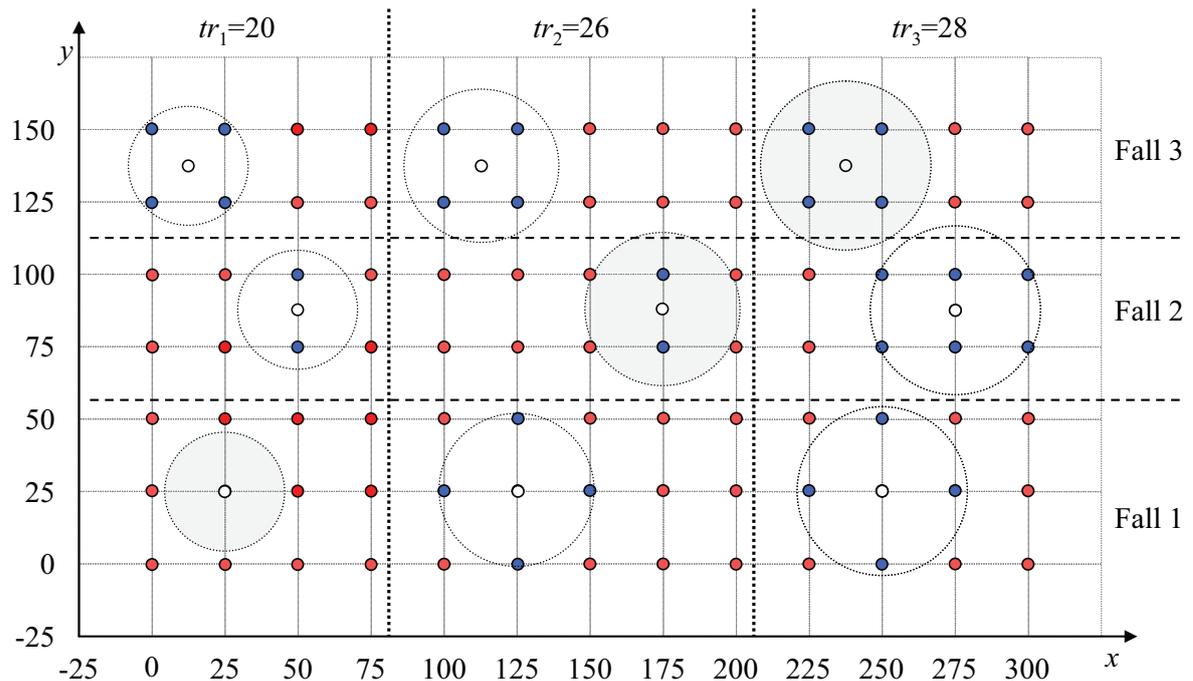


Abbildung 53: Minimale Anzahl von Nachbarbeacons (grau eingefärbte Kreise) eines Sensor-knotens P innerhalb der Kernzone eines Sensornetzwerkes bei a) P liegt direkt auf einem Beacon, b) P liegt auf einer Gitterlinie zwischen zwei Beacons, c) P liegt in der Mitte eines Gitterfeldes

In der Funktion `calculateMinBeaconsInRange()` wird für die drei Fälle, basierend auf der Verschiebung des Sensorknotens innerhalb des Sensornetzwerkes, die Anzahl der Nachbarbeacons ermittelt, die innerhalb der Übertragungsradiusweite tr des Sensorknotens liegen.

Algorithmus 5: Berechnung der minimalen Beaconanzahl in Reichweite (Matlab)

```
function count    calculateMinBeaconsInRange(fq,transmissionRange)
    count1 calcBeacons(0      , 0      , fq, transmissionRange)
    count2 calcBeacons(fq/2, 0      , fq, transmissionRange)
    count3 calcBeacons(fq/2, fq/2 , fq, transmissionRange)
    count min([count1 count2 count3]);
end

function count    calcBeacons(nodex, nodey, fq, transmissionRange)
    count 0;
    f floor(transmissionRange/fq)*fq;
    for x  -f+2*nodex:fq:f+2*nodex
        for y  -f+2*nodey:fq:f+2*nodey
            if ( GetDistance([x y], [nodex nodey])< transmissionRange )
                count count+1;
            end
        end
    end
end

end
```

Im Anschluss wird der minimale Wert der drei Berechnungen ermittelt und als Ergebnis (*Variable count*) an die aufrufende Funktion zurückübergeben.

Der vorgestellte Algorithmus zur Berechnung der minimalen Beaconanzahl in Reichweite ist eine exakte Lösung. Die berechnete minimale Beaconanzahl $n_{min. Beacons}$ stellt jedoch einen Extremwert dar (minimale Anzahl) und tritt daher in der Praxis kaum auf. Wenn jedoch diese minimale Beaconanzahl für den Zugehörigkeitstest der Randzone herangezogen wird, vermindert dies automatisch auch die Zahl der detektierten Randzonenknoten, da Sensorknoten als im Kern befindlich markiert werden, die sich zwar in der Randzone befinden, aber mehr Nachbarn als $n_{min. Beacons}$ besitzen.

Aus diesem Grund ist es sinnvoll, den Zugehörigkeitstest auf Basis der mittleren Beaconanzahl $\tilde{n}_{Beacons}$ zu gründen. Der dadurch entstehende Fehler bei einer überschaubaren Menge von Sensorknoten des Kernbereiches, die als Randknoten erkannt werden, muss entsprechend korrigiert bzw. auf andere Weise abgefangen werden (vgl. Kap. 4.7).

Die mittlere Beaconanzahl berechnet sich aus der Beacondichte μ_B des Netzwerkes pro Fläche bzw. Teilfläche.

$$\mu_B = \frac{\tilde{n}_{Beacons}}{A_n} \quad (89)$$

In einem gitterbasierten Netzwerk errechnet sich die Beacondichte aus der Summe der eingeschlossenen Beacons sowie den gewichteten Beacons auf den Außenkanten des Netzwerkes pro Teilfläche. Die Wichtung ist abhängig vom Anteil der Teilfläche an der Umgebung des Außenbeacons. Das ergibt sich aus der Notwendigkeit, dass die Beacondichte bei gleichverteilten Beacons in jedem Teilbereich des Netzwerkes gleich sein muss. Folglich müssen auch die Zugehörigkeiten zu diesen Teilbereichen in die Berechnung miteinfließen. Für einen Randknoten bedeutet das, dass er mit halber Wichtung in die Summation miteingeht, da nur die Hälfte der den Sensorknoten umgebenden Fläche zum Sensornetzwerk gehört. Die andere Hälfte wird dem Außenbereich zugeordnet. Die umgebende Fläche eines Eckknotens gehört nur zu einem Viertel dem Sensornetzwerk an und wird folglich nur mit $w = 1/4$ gewichtet.

Die durchschnittliche Anzahl von Beacons in einem Sensornetzwerk lässt sich für rechteckige Flächen einfach berechnen, wenn die Anzahl der Beacons im Randbereich n_{Rand} , die Anzahl der Eckknoten n_{Ecke} und die Anzahl der im Kernbereich liegenden Beacons n_{Kern} bekannt sind (Abbildung 54).

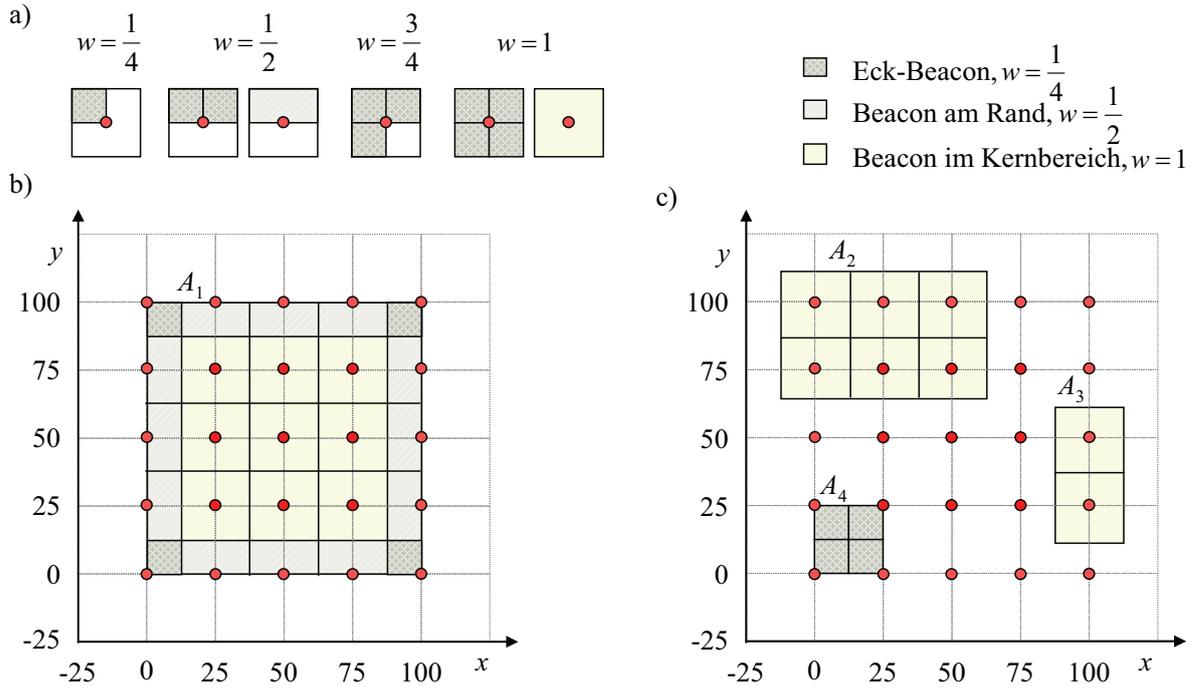


Abbildung 54: Betrachtungen zur Berechnung der Beacondichte a) Wichtung der Beacons durch Zählen der zum Sensornetzwerk gehörenden Teilflächen, b, c) Beispiele zur Wichtung der Beacons in Teilflächen A_i bei $\mu_B = 0,0016$.

$$\tilde{n}_{Beacons} = n_{Kern} + \frac{n_{Rand}}{2} + \frac{n_{Ecke}}{4} \quad (90)$$

Die Berechnung der Beaconanzahl erfolgt über die Beacondichte. Diese wird zunächst für das Netzwerk bestimmt und im Anschluss auf den Übertragungsbereich des Sensorknotens übertragen. In einem gitterbasierten Netzwerk mit $n_{Zeile} \times n_{Spalte}$ Beacons im Abstand fq kann die Beacondichte $\mu_{B,Rechteck}$ somit vereinfacht nach (91) berechnet werden.

$$\mu_{B,Rechteck} = \frac{\tilde{n}_{Beacons}}{A_{\tilde{n}}} = \frac{(n_{Zeile} - 2)(n_{Spalte} - 2) + (n_{Zeile} - 2) + (n_{Spalte} - 2) + 1}{(n_{Zeile} - 1)(n_{Spalte} - 1)fq^2} \quad (91)$$

$$\mu_{B,Quadrat} = \frac{(n - 2)^2 + 2(n - 2) + 1}{(n - 1)^2 fq^2}$$

Die Berechnung der Beacondichte lässt sich zudem einfach nachvollziehen, wenn verschiedene Feldgrößen bzw. Topologien betrachtet werden (Abbildung 54c). So ergibt sich in Abbildung 54c für alle betrachteten Teilflächen $A_1 \dots A_4$ eine Beacondichte $\mu_B = 0,0016$. Aus der Beacondichte μ_B kann nun die mittlere Anzahl der Nachbarbeacons $\tilde{n}_{Beacons}$ eines

Sensorknotens bestimmt werden. Für die weitere Betrachtung wird die Zahl auf ganze Werte abgerundet.

$$\tilde{n}_{Beacons} = \left\lfloor \mu_B \pi tr^2 \right\rfloor \quad (92)$$

Die in Gleichung 92 berechnete Anzahl an Beacons stellt somit die durchschnittliche Anzahl von Beacons dar, die ein Sensorknoten im Kernbereich empfängt. Sensorknoten im Randbereich empfangen im Durchschnitt weniger als $\tilde{n}_{Beacons}$ Beacons. Aus den vorangegangenen Darlegungen wird deutlich, dass die Anzahl empfangbarer Nachbarknoten

- a) einiger Randknoten höher als $\tilde{n}_{Beacons}$ und
- b) weniger Kernzonenknoten geringer als $\tilde{n}_{Beacons}$

ist. Die Schranke $\tilde{n}_{Beacons}$ bildet somit einen ausgewogenen Kompromiss zur Trennung zwischen Kern- und Randzone.

In Abbildung 55 sind die beiden Methoden zur Randzonen detektion gegenübergestellt. Teilbild a) zeigt sehr anschaulich, dass die detektierten Randbereiche (grün) basierend auf der minimalen Beaconanzahl $n_{min. Beacons}$ zwar korrekt sind, jedoch keinesfalls alle Flächen erfassen, die Randbereichscharakteristik besitzen.

In Teilbild Abbildung 55b) ist die Randzonen erkennung bei Anwendung der mittleren

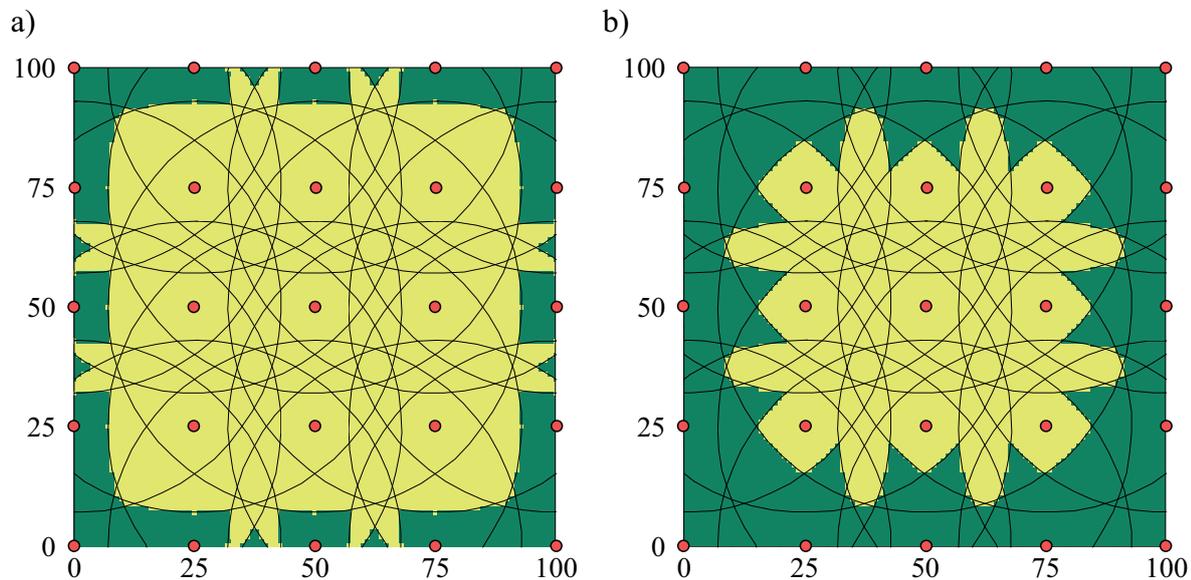


Abbildung 55: Randzonen erkennung in einem 100×100 Sensornetzwerk mit Übertragungsbereich $tr=43$ basierend auf a) minimaler Anzahl von Nachbarbeacons $n_{min. Beacons} = 7$ b) mittlerer Anzahl von Nachbarbeacons $\tilde{n}_{Beacons} = 9$

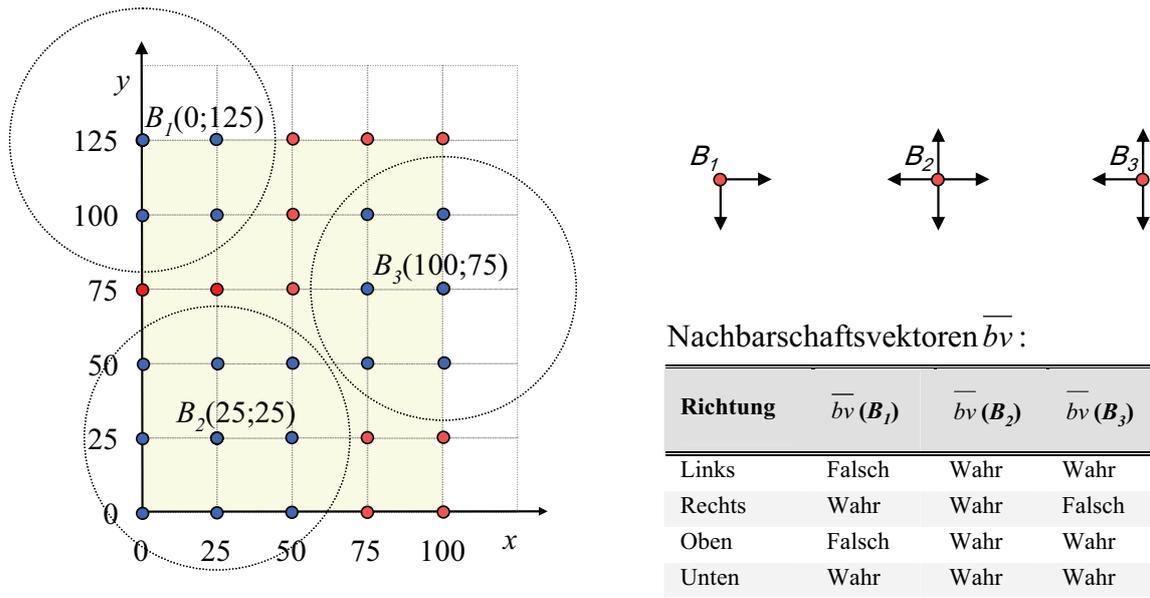


Abbildung 56: Bildung von Nachbarschaftsvektoren in Beacons

Beaconanzahl dargestellt. Die Detektion ist wesentlich genauer und die Nichterkennungsrate der Randbereiche ist geringer.

Für die Korrektur der Positionsbestimmung ist es zusätzlich erforderlich, die Lage innerhalb des Außenbereiches zu bestimmen, d. h. ob sich der Knoten z. B. am linken oder rechten Rand befindet. Diese Information kann aus empfangenen Beaconinformationen ermittelt werden, wenn neben der Position geeignete Zusatzinformationen zur Verfügung stehen. Eine Detektion des Außenbereiches ist möglich, wenn ein Beacon übermittelt,

- ob er Nachbarbeacons in seiner unmittelbaren Umgebung kennt oder
- wie seine genaue Lage im Netzwerk ist, z. B. ob er Rand-, Eck- oder Kernbereichsknoten ist.

Die Detektion auf Basis der genauen Lage ist die scheinbar einfachere Lösung, da sie deterministisch erscheint. Allerdings setzt dieser Ansatz auf jedem Beacon die Kenntnis der eigenen Position und Einordnung im Netzwerk voraus. Dazu ist zusätzlicher Kommunikationsaufwand mit den anderen Beacons und damit erhöhter Energieaufwand verbunden. Zudem wird die Außenbereichserkennung erschwert, wenn sich das Beaconnetzwerk dynamisch ändert oder Nachrichten von Randbeacons verloren gehen.

Ein wesentlich robusteres Verfahren mit deutlich geringerem Energieaufwand basiert auf der Veröffentlichung der eigenen Nachbarbeacons. Dabei teilt jeder Beacon mit, zu welcher Seite er Nachbarn hat (Abbildung 56). Diese Zustandsinformationen können einfach ermittelt und in einem 4-Bit-Vektor \overline{bv} zusammen mit den Positionsdaten der Beacons über-

tragen werden. Die Korrelation aus den Nachbarn aller dem Sensorknoten bekannten Beacons ermöglicht auf dem Knoten die Ermittlung des Randbereichs, da er nun neben den Positionsdaten auch Lagedaten der Beacons $\overline{bv_{i,j}}$ besitzt.

Beacons im Kernbereich besitzen immer zu allen Seiten Nachbarn. Somit enthält ihr Nachbarschaftsvektor \overline{bv} 4 *wahr*-Werte (siehe $\overline{bv}(B_2)$ in Abbildung 56). Für einen Sensorknoten im Kernbereich bedeutet dies, dass er im Idealfall Nachrichten von n im Kernbereich liegenden Beacons mit jeweils voll besetzten Nachbarschaftsvektoren $\overline{bv_{i,j}}$ ($i = 1..n, j = 1..4$) empfängt. Folglich gilt $\sum \overline{bv_{i,j}} = 4n$ und aus Gleichung 92 folgt, dass diese Summe annähernd der mittleren Beaconanzahl $\tilde{n}_{Beacons}$ entspricht.

$$\sum \overline{bv_{i,j}} \approx 4\tilde{n}_{Beacons} \quad (93)$$

Die Einzelsumationen der Zeilen können zu einem Nachbarschaftsvektor \overline{bn} mit den Zeilen bn_l, bn_r, bn_t und bn_b aus den akkumulierten Nachbarschaftsinformationen $\overline{bv_{i,j}}$ aller n empfangenen Beaconnachrichten zusammengefasst werden (94).

$$\overline{bn} = \begin{pmatrix} bn_l \\ bn_r \\ bn_t \\ bn_b \end{pmatrix} = \sum_{i=1}^n \begin{pmatrix} \{1: bv_{i,1}\} \\ \{1: bv_{i,2}\} \\ \{1: bv_{i,3}\} \\ \{1: bv_{i,4}\} \end{pmatrix} \quad (94)$$

Liegt einer der Nachbarbeacons B_i eines Sensorknotens in der Nähe eines oder zweier nebeneinander liegender Außenkanten, werden die korrespondierenden Einträge in $\overline{bv_{i,j}}$ ($i = 1..n$) aufgrund fehlender Nachbarbeacons auf *falsch* gesetzt. Folglich ist Gleichung 93 für Knoten im Randbereich nicht erfüllt, denn $bn_i \neq \tilde{n}_{Beacons}$.

Aus dem ermittelten Nachbarschaftsvektor \overline{bn} kann die Differenz aus den linken und rechten Nachbarbeacons Δb_{lr} sowie den oberen und unteren Nachbarbeacons Δb_{tb} bestimmt werden (Richtungsdifferenz).

$$\begin{aligned} \Delta b_{lr} &= |bn_l - bn_r| \\ \Delta b_{tb} &= |bn_t - bn_b| \end{aligned} \quad (95)$$

Wenn die Richtungsdifferenzen annähernd gleich groß sind, befindet sich der Sensorknoten entweder im Kernbereich oder in einer Ecke des Netzwerkes (Abbildung 57). In diesem Fall muss geprüft werden, ob es zwei im Lot aufeinander stehende Nachbarschaftsvektoren

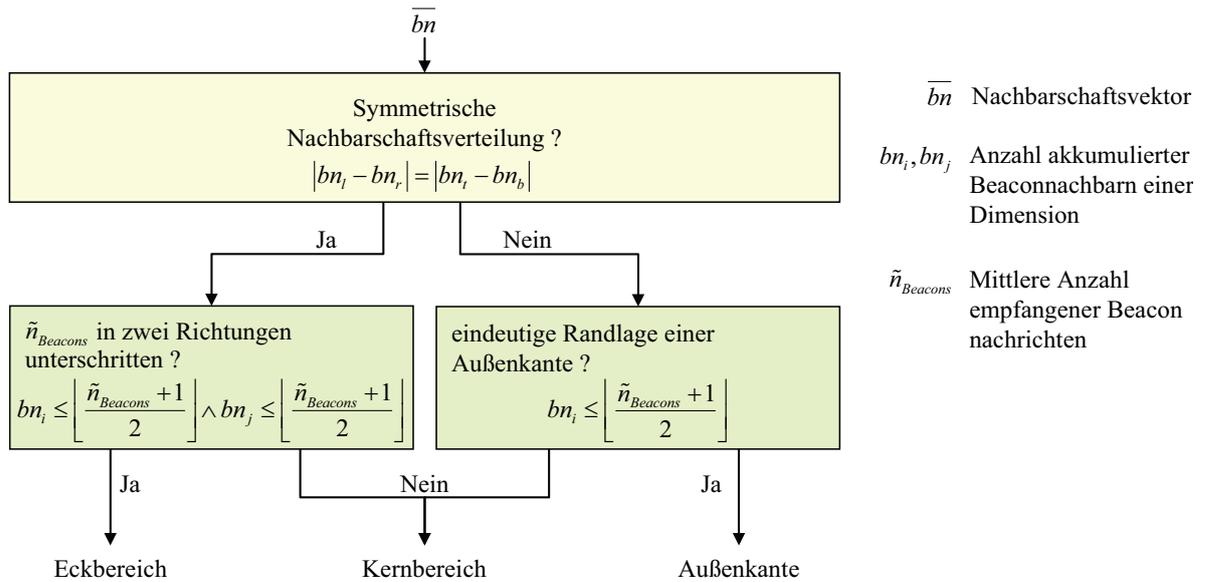


Abbildung 57: Detektion der Lage eines Sensorknotens im Randbereich anhand des akkumulierten Nachbarschaftsvektors \overline{bn} der Beacons

bn_i und bn_j gibt, deren Beträge die Bedingungen $bn_i \leq \left\lfloor (\tilde{n}_{Beacons} + 1) / 2 \right\rfloor$ und $bn_j \leq \left\lfloor (\tilde{n}_{Beacons} + 1) / 2 \right\rfloor$ erfüllen. Ist dies der Fall, liegt der Sensorknoten in einem Eckbereich mit den Außenkanten i und j , anderenfalls im Kernbereich.

Sind die Richtungsunterschiede Δb_{lr} und Δb_{lb} unterschiedlich groß und erfüllt zusätzlich ein Element des Nachbarschaftsvektors \overline{bn} die Bedingung $bn_i \leq \left\lfloor (\tilde{n}_{Beacons} + 1) / 2 \right\rfloor$, liegt der Sensorknoten an der Außenkante i . Alle anderen Sensorknoten werden im Kernbereich positioniert und sind von einer Korrektur der Position ausgeschlossen.

Die Lage des Randbereiches im Beaconnetzwerk kann durch Vergleich der Elemente des Nachbarschaftsvektors \overline{bn} ermittelt werden. Abbildung 58 veranschaulicht die Detektion des Randbereiches am Beispiel des Sensorknotens $P_1(62;70)$. Für diesen Knoten P_1 am rechten Rand des Beaconnetzwerkes besteht der Nachbarschaftsvektor aus den Zeilen $bn_l = 8$ (Abbildung 58a), $bn_r = 5$ (Abbildung 58b), $bn_i = 8$ sowie $bn_b = 8$ (Abbildung 58c). Aus $bn_r < bn_l \wedge (bn_i = bn_b) \wedge bn_r \leq \left\lfloor 0,5(\tilde{n}_{Beacons} + 1) \right\rfloor$ folgt, dass P_1 am rechten Rand eines Beaconnetzwerkes liegt. Die Korrektur der Position ist somit möglich.

Die akkumulierten Nachbarschaftsinformationen $\overline{bv_{i,j}}$ entsprechen der Anzahl der Beacons in einem um f_q verschobenen Übertragungsbereich des Sensorknotens. Dies lässt sich leicht am Beispiel der rechten Nachbarn $bn_r = 5$ zeigen (Abbildung 58b). Im Übertragungsbereich des Knotens P_1 liegen 8 Beacons, von denen nur 5 rechtsseitige Nachbarn besitzen. Da Beacons und damit die rechtsseitigen Nachbarn der Beacons ebenso nur im Gitterabstand f_q zueinander auftreten können, können die rechtsseitigen Nachbarn der bekannten

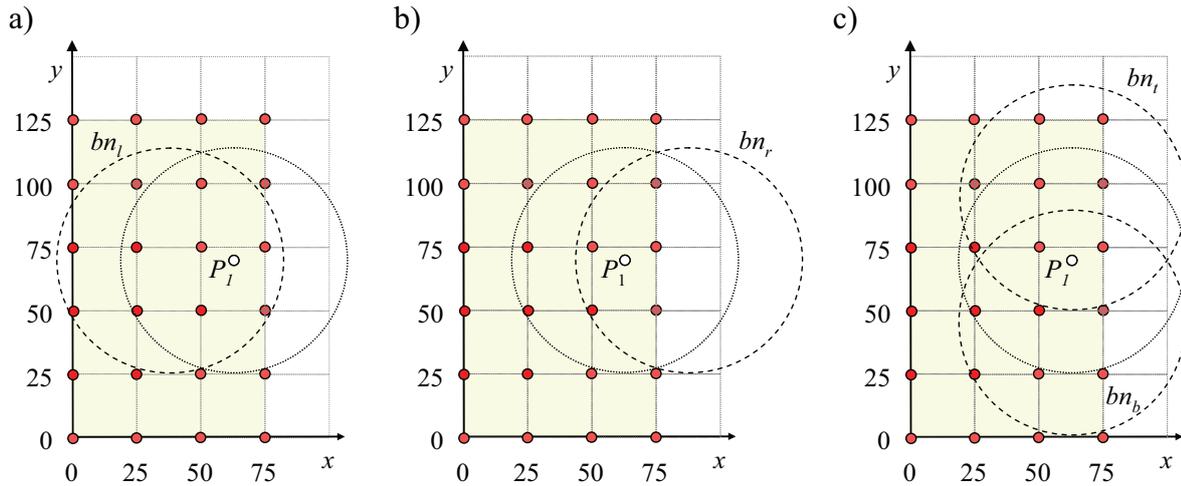


Abbildung 58: Bestimmung der Anzahl der Nachbarbeacons am Beispiel des Punktes $P_1(62,70)$ mit Übertragungsbereich $tr=43$ (punktiertem Kreis). Die gestrichelten Kreise zeigen die a) linksseitigen Nachbarbeacons $bn_l=10$ b) rechtsseitigen Nachbarbeacons $bn_r=5$ c) oberen und unteren Nachbarbeacons $bn_o=8$ und $bn_u=8$

Beacons nur in einem zum Sensorknoten verschobenen Übertragungsbereich auftreten (gestrichelter Kreis in Abbildung 58b). Die Anzahl der Beacons in diesem Kreis entspricht

$$\text{somit gleichzeitig } bn_r = \sum_{i=1}^8 \overline{bv_{i,2}}.$$

Die Kenntnis der Lage im Randbereich ermöglicht die Korrektur der Positionsbestimmung. Ausgangspunkt der nachfolgenden Überlegungen ist die Positionsbestimmung des Sensorknotens $P_2(5;5)$ aus Abbildung 51b. Durch die Randlage des Knotens ist die Lokalisierung mit teilweise erheblichen Genauigkeitseinbußen verbunden. Der Grund liegt in der größeren resultierenden Schnittfläche A_2 verglichen mit der Schnittfläche A_1 aus Abbildung 51a, die durch fehlende Nachbarschaftsinformationen im Randbereich verursacht ist.

Abbildung 59 zeigt nun beispielhaft die Positionsbestimmung des Sensorknotens $P_2(5;5)$ im Randbereich durch einfache Schwerpunktbestimmung mit Korrektur. Um auch im Randbereich dieselben Lokalisierungsfehler wie im Kernbereich zu erreichen, müssen die fehlenden Beaconinformationen rekonstruiert bzw. erzeugt werden. Aus der Kenntnis heraus, in welchem Randbereich sich ein Sensorknoten befindet, wird für die individuelle Berechnung der Knotenposition das Netzwerk aus Beacons um *virtuelle* Beacons erweitert.

Abbildung 59b zeigt die Erweiterung des Beaconnetzwerkes für den Sensorknoten $P_3(5;5)$. Durch das Hinzufügen der virtuellen Beacons $B(-25;25)$, $B(-25;0)$, $B(-25;-25)$, $B(0;-25)$ und $B(0;25)$ entsteht die Überlappungsfläche A_3 , die im Vergleich zu A_2 wesentlich kleiner ist. Die ermittelte Position liegt bei $\underline{P}_3(0;0)$ und hat einen Fehler von $f_3 = 0,707$ im Gegensatz zu $f_2 = 10,60$ (vgl. Abbildung 51b). Der Fehler ist somit auf den äquivalenten Wert zur Lokalisierung im Kernbereich von $f_1 = 0,707$ (vgl. Abbildung 51a) gesunken.

Das Hinzufügen der Beacons muss definitionsgemäß mit derselben Beacondichte erfolgen wie im realen Netzwerk, damit der Fehler nicht wieder erhöht wird (vgl. Kap. 4.3). In einem gitterbasierten Netzwerk bedeutet dies, dass die virtuellen Beacons ebenfalls auf dem Gitter liegen, das außerhalb des realen Netzwerkes fortgeführt wird (Abbildung 59b).

Die Ermittlung der Richtung und des Umfanges der Netzwerkerweiterung ist die eigentliche Herausforderung bei der Korrektur der Randknotenpositionen. Diese Informationen müssen aus den vorhandenen Daten der empfangenen Beaconnachrichten extrahiert werden. Wie weit die Erweiterung eines ebenen und gitterbasierten Sensornetzwerkes mit kreisförmiger Übertragungreichweite tr zu erfolgen hat, kann auf Basis des maximalen Beaconabstandes d_B des gesamten Übertragungsbereiches bestimmt werden.

$$d_B = \left\lfloor \frac{2tr}{fq} \right\rfloor fq \quad (96)$$

Abbildung 59b zeigt dies an einem Beispiel. Der Sensorknoten empfängt die Positionsdaten der vier Beacons $B_1(0;0)$, $B_2(0;25)$, $B_3(25;25)$ und $B_4(25;0)$. Die maximale Ausdehnung beträgt $\Delta x = 25$ und $\Delta y = 25$. Da nach Gleichung 96 die durchschnittliche Ausdehnung $d_B = 75$ beträgt, kann die maximale Erweiterung des Netzwerkes nur $x_e = d_B/2 = 37,5$ betragen. An diesem Beispiel zeigt sich gleichzeitig ein Spezialfall für Netzwerke, in denen garantiert werden kann, dass Sensorknoten immer innerhalb eines Beacongitters liegen. In diesem Fall kann eine Fehlerreduzierung vorgenommen werden, indem die Erweiterung auf $x_e = \Delta x = 25$ begrenzt wird. Somit ist sichergestellt, dass der Sensorknoten durch das Hinzufügen virtueller Beacons nicht außerhalb des Beacongitters lokalisiert wird.

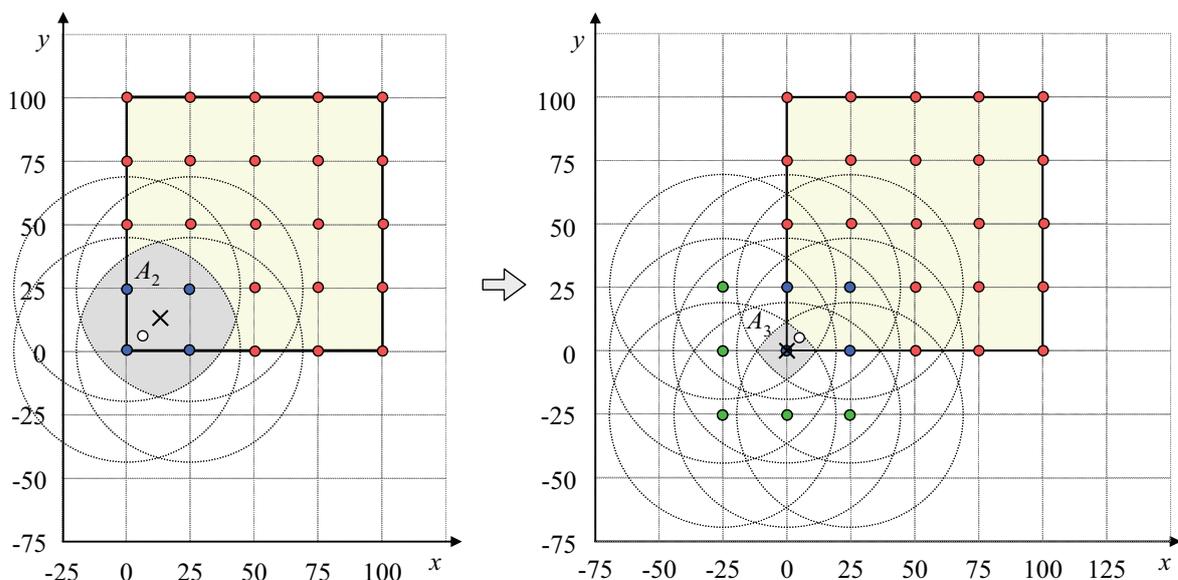


Abbildung 59: Positionsbestimmung im Randbereich am Beispiel des Knotens $P_3(5;5)$ mit Korrektur der Überlappungsfläche A_3 durch Hinzufügen virtueller Beacons, $tr=43$

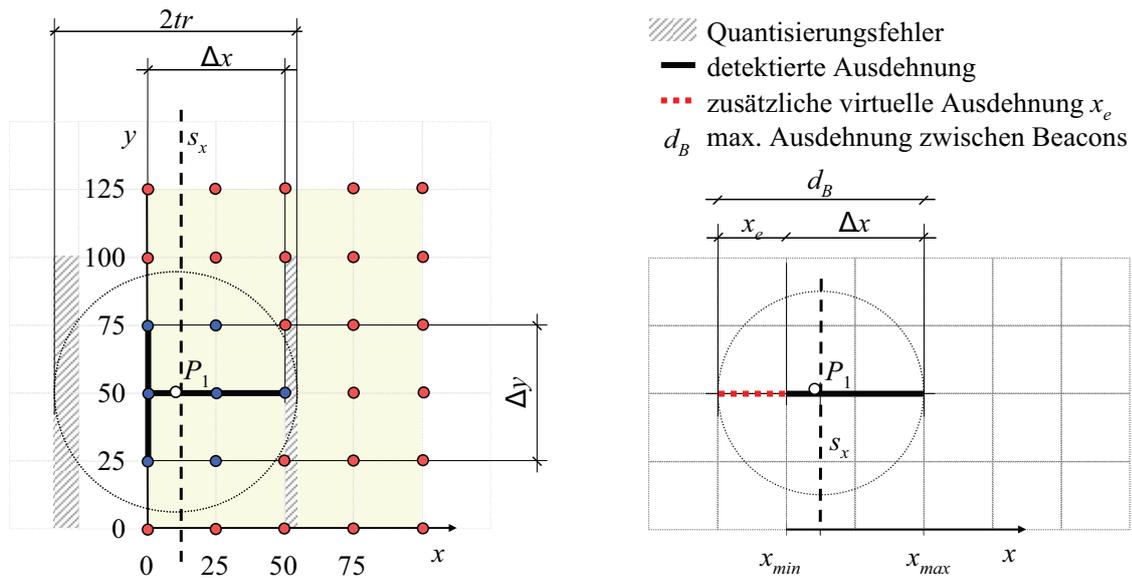


Abbildung 60: Bestimmung der Symmetrieachsen im Randbereich eines Netzwerkes zur Spiegelung existierender Beacons

Die Erweiterung des gitterbasierten Netzes erfordert für jeden hinzugefügten virtuellen Beacon einen Test, ob er sich im Sendebereich des Sensorknotens befindet. Die Durchführung des Tests basiert jedoch auf hyperbolischen Funktionen (Wurzel) zur Berechnung des Abstandes, die auf einem Sensorknoten einen nicht unbedeutenden Aufwand darstellen. Erschwerend kommt hinzu, dass die Position des Sensorknotens erst bestimmt werden soll und nicht direkt zur Verfügung steht.

Mit wesentlich geringerem Aufwand lassen sich virtuelle Beacons erzeugen, in dem die Symmetrieeigenschaften des gitterbasierten Netzwerkes ausgenutzt werden. Dazu werden für jede Koordinate die Spiegelachsen s_i ermittelt. Die Position der Spiegelachse kann aus den empfangenen Beaconinformationen ermittelt werden.

In Abbildung 60 ist beispielhaft die Bestimmung der Symmetrieachse s_x am linken Rand eines nach rechts unbegrenzten Sensornetzwerkes dargestellt. Aus dieser Bedingung folgt, dass der Übertragungsbereich des Sensorknotens ($tr = 43$) an der Stelle x_{max} endet, anderenfalls würde er weiter rechts liegende Beacons empfangen. Da der rechte Rand des Übertragungsbereiches korrekt bestimmt werden kann, kann aus der Kenntnis der maximalen Distanz zwischen gegenüberliegenden Beacons d_B auch die Mitte des Übertragungsbereiches ermittelt werden. Für das angegebene Beispiel liegt folglich die günstigste Symmetrieachse bei $s_x = x_{max} - d_B/2$ (Gleichung 97). Eine Symmetrieachse s_y wird nicht bestimmt, da sich der Sensorknoten nicht am oberen oder unteren Rand befindet.

$$s_x = x_{\max} - \frac{d_B}{2} \quad (97)$$

Die Bestimmung der Symmetrieachsen s_x bzw. s_y anderer Sensorknoten erfolgt für die rechten, die oberen und die unteren Randbereiche analog. Es wird jeweils nur eine Symmetrieachse s_i in Abhängigkeit der Randlage bestimmt. Lediglich in den Eckbereichen, in denen sich Randbereiche überlagern, werden beide Symmetrieachsen ermittelt. Somit ergibt sich für die Berechnung der Symmetrieachsen folgendes Rechenschema:

Eckbereich:

$$\begin{pmatrix} s_x \\ s_y \end{pmatrix} = \begin{cases} \begin{pmatrix} f_x(\overline{bn}) \\ f_y(\overline{bn}) \end{pmatrix} & \text{wenn } \Delta bn_{lr} = \Delta bn_{tb} \\ \begin{pmatrix} n.a. \\ n.a. \end{pmatrix} & \text{sonst} \end{cases} \quad (98)$$

Außenkante:

$$\begin{aligned} s_x &= \begin{cases} f_x(\overline{bn}) & \text{wenn } \Delta bn_{lr} > \Delta bn_{tb} \\ n.a. & \text{sonst} \end{cases} \\ s_y &= \begin{cases} f_y(\overline{bn}) & \text{wenn } \Delta bn_{lr} < \Delta bn_{tb} \\ n.a. & \text{sonst} \end{cases} \end{aligned} \quad (99)$$

wobei für $f_i(\overline{bn})$ gilt:

$$\begin{aligned} f_x(\overline{bn}) &= \begin{cases} x_{\max} - \frac{d_B}{2} & \Delta x > r_B \wedge bn_l < bn_r \\ x_{\min} & \Delta x < r_B \wedge bn_l < bn_r \\ x_{\min} + \frac{d_B}{2} & \Delta x > r_B \wedge bn_l > bn_r \\ x_{\max} & \Delta x < r_B \wedge bn_l > bn_r \\ n.a. & \text{sonst} \end{cases} \\ f_y(\overline{bn}) &= \begin{cases} y_{\max} - \frac{d_B}{2} & \Delta y > r_B \wedge bn_b < bn_t \\ y_{\min} & \Delta y < r_B \wedge bn_b < bn_t \\ y_{\min} + \frac{d_B}{2} & \Delta y > r_B \wedge bn_b > bn_t \\ y_{\max} & \Delta y < r_B \wedge bn_b > bn_t \\ n.a. & \text{sonst} \end{cases} \end{aligned} \quad (100)$$

Da es sich bei s_x und s_y um Symmetrieachsen aller empfangenen Beaconpositionen B_i handelt, entsprechen bei der nachfolgenden Positionsbestimmung aus empfangenen und virtuellen Beaconpositionen (Gleichung 60) die Koordinaten der ermittelten Position \underline{P} den Symmetrieachsen s_i . Folglich kann die Position \underline{P} auch durch Verzicht auf virtuelle Beacons eindeutig bestimmt werden, indem die Koordinate einer Symmetrieachse i direkt der Koordinate i der Position \underline{P} zugewiesen wird, sodass letztlich ausgehend von den Gleichungen 98-100 die Gleichung 101 gilt.

$$\underline{P}_{CLwEC} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \left\{ \begin{array}{ll} s_x & s_x \text{ gültig} \\ \frac{1}{n} \sum_i^n B_{i,x} & s_x \text{ ungültig} \end{array} \right. \\ \left\{ \begin{array}{ll} s_y & s_y \text{ gültig} \\ \frac{1}{n} \sum_i^n B_{i,y} & s_y \text{ ungültig} \end{array} \right. \end{pmatrix} \quad (101)$$

Die Randbereichskorrektur kann gegenüber der einfachen Schwerpunktbestimmung die Korrektur einer ermittelten Position nur durchführen, wenn tatsächlich Randeffekte auftreten. Dies trifft zu, wenn die Übertragungreichweite größer als der Beaconabstand ist ($tr > fq$). Zusätzlich muss die Randbereichserkennung sicher durchführbar sein, d. h. der Kernbereich muss eindeutig vom Eckbereich bzw. einer Außenkante unterscheidbar sein.

Die Charakteristik der Bereichserkennung auf Basis der Anzahl der Nachbarbeacons der bekannten Beacons führt dazu, dass selbst für $tr > fq$ nicht zwangsläufig eine korrekte Randbereichserkennung durchgeführt werden kann. Abbildung 61 zeigt dies am Beispiel des Sensorknotens P_1 , der bei eingestellter Übertragungreichweite $tr = 25$ von vier Beacons ($B_1..B_4$) Positionsinformationen empfängt, daraus seinen Nachbarschaftsvektor $\overline{bn} = \{2;4;2;4\}$ erstellt und seine Position zunächst bei ($\underline{P}_1 = \{87,5;87,5\}$) bestimmt. Wegen der Symmetrie des Nachbarschaftsvektors \overline{bn} vermutet sich der Knoten im Eckbereich und korrigiert folglich seine Position mit der Konsequenz, dass der Fehler wächst ($\underline{P}'_1 = \{100;100\}$).

Der Grund für diese Fehlentscheidung liegt in der Funktion der Randbereichserkennung durch den Vergleich der einfachen Summation über die Nachbarbeacons der vier möglichen Richtungen bn_i . Es wird jedoch nicht überprüft, ob überhaupt ein weiterer Empfang eines Beacons möglich gewesen wäre. Dies kann nur erfolgen, wenn der maximale Beaconabstand d_b (Gleichung 96) größer als der doppelte Gitterabstand fq ist, denn erst für diesen Fall können mehr als zwei Beacons auf einer Gitterlinie liegen. Insofern kann auch nur dann ein virtueller Beacon außerhalb des Beaconnetzwerkes „fehlen“ und korrigiert werden.

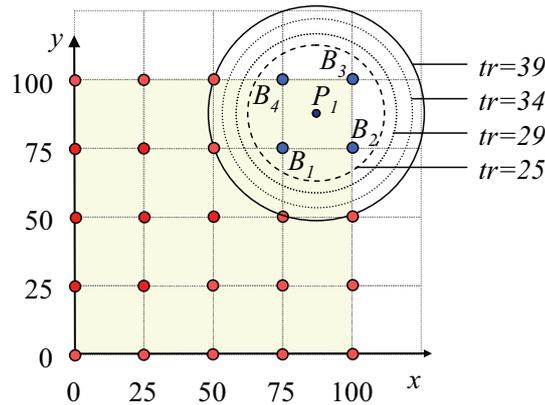


Abbildung 61: Randerkennung bei Übertragungsradien $f_q < tr \leq 1,5f_q$

$$d_{Beacons} \Big|_{CLwEC, \min} > 2f_q \quad (102)$$

Da der maximale Beaconabstand grundsätzlich ein Vielfaches von f_q ist, kann die minimale Übertragungsradiusweite für das Korrekturverfahren aus dem Beaconabstand $d_{Beacons} = 3f_q$ bestimmt werden.

$$tr_{CLwEC, \min} = \frac{d_{Beacons}}{2} = \frac{3f_q}{2} = 1,5f_q \quad (103)$$

Das Verfahren konvergiert für Übertragungsradien, bei denen die Randeckeffekte auf zwei Außenkanten beschränkt bleiben, sehr gut. Mit zunehmender Übertragungsradiusweite tr befinden sich in einem quadratischen Beaconnetzwerk jedoch immer mehr Sensorknoten an drei Außenkanten ($tr > b \cdot f_q$). Die Randbereichserkennung wird für diese Sensorknoten ungenauer, wodurch die nachfolgende Fehlerkorrektur ebenfalls ungenauer wird und zunehmend den durchschnittlichen Fehler bestimmt. Dieser Effekt setzt sich fort, bis tr_{max} (vgl. Gleichung 67) erreicht ist und das Korrekturverfahren dieselben Positionen und Fehler wie die einfache Schwerpunktbestimmung ermittelt. Der Konvergenzbereich des Korrekturverfahrens CLwEC ist demnach auf folgendes Intervall beschränkt.

$$1,5f_q < tr < \sqrt{2}f_q(\sqrt{b}-1) \quad (104)$$

Die vorangegangenen theoretischen Überlegungen sind sehr umfangreich und lassen eine praktikable Umsetzung aufwändig erscheinen. Tatsächlich verhält es sich jedoch so, dass sich das vorgeschlagene Verfahren wie eine nachgeschaltete Korrektur zum originalen Schwerpunktverfahren verhält (Algorithmus 6).

Algorithmus 6: Positionsermittlung durch Schwerpunktbestimmung mit Korrektur der ermittelten Position im Randbereich, CLwEC (Ablauf auf Sensorknoten)

<p>Datensammlung</p> <p>Empfange Nachrichten mit Beaconpositionen B_i und Lageinformationen bv_i</p> <p>Wenn B_i bisher unbekannt, dann</p> <ul style="list-style-type: none"> o Berechne Summe S_x und S_y aus Koordinaten der Beaconpositionen o Zähle Anzahl der Nachrichten n o Bestimme minimale und maximale Koordinaten (x_{\min}, x_{\max}, y_{\min}, y_{\max}) o Inkrementiere in Abhängigkeit der Nachbarschaftszustände der Beacons bv_i die Elemente des Nachbarschaftsvektors \overline{bn} <p>Positionsbestimmung</p> <p>Ermittle P_x durch Dividieren von S_x mit n (Gleichung 61)</p> <p>Ermittle P_y durch Dividieren von S_y mit n (Gleichung 61)</p> <p>Vorbetrachtungen zur Korrektur</p> <p>Berechne maximale Beaconausdehnung d_B im Übertragungsbereich</p> <p>Ermittle mittlere Beaconanzahl $\tilde{n}_{Beacons}$</p> <p>Berechne Schwelle für Randbereich $\tilde{n}_{Außen}$ aus $\tilde{n}_{Beacons}$</p> <p>Korrektur, wenn $1,5fq < tr < \sqrt{2}fq(\sqrt{b}-1)$</p> <p>Wenn symmetrische Nachbarschaftsverteilung bn_l-bn_r, bn_t-bn_b vorliegt, dann</p> <ul style="list-style-type: none"> o Wenn $bn_l \leq \tilde{n}_{Außen}$ und $bn_r \leq \tilde{n}_{Außen}$, dann <ul style="list-style-type: none"> ▪ Knoten liegt im Eckbereich, Position wird korrigiert ▪ Wenn $bn_l < bn_r$, dann P_x $x_{\max}-d_B/2 < x_{\min}$? x_{\min} : $x_{\max}-d_B/2$ ▪ Wenn $bn_l > bn_r$, dann P_x $x_{\min}+d_B/2 > x_{\max}$? x_{\max} : $x_{\min}+d_B/2$ ▪ Wenn $bn_t < bn_b$, dann P_y $y_{\max}-d_B/2 < y_{\min}$? y_{\min} : $y_{\max}-d_B/2$ ▪ Wenn $bn_t > bn_b$, dann P_y $y_{\min}+d_B/2 > y_{\max}$? y_{\max} : $y_{\min}+d_B/2$ o Sonst <ul style="list-style-type: none"> ▪ Keine Korrektur, da Knoten im Kernbereich <p>Sonst</p> <ul style="list-style-type: none"> o Wenn ein Minimum bn_i in \overline{bn} existiert und $bn_i \leq \tilde{n}_{Außen}$ erfüllt ist, dann <ul style="list-style-type: none"> o Knoten liegt an einer Außenkante, Position wird korrigiert o Wenn $\min(\overline{bn}) = bn_l$, dann P_x $x_{\max}-d_B/2 < x_{\min}$? x_{\min} : $x_{\max}-d_B/2$ o Wenn $\min(\overline{bn}) = bn_r$, dann P_x $x_{\min}+d_B/2 > x_{\max}$? x_{\max} : $x_{\min}+d_B/2$ o Wenn $\min(\overline{bn}) = bn_t$, dann P_y $y_{\max}-d_B/2 < y_{\min}$? y_{\min} : $y_{\max}-d_B/2$ o Wenn $\min(\overline{bn}) = bn_b$, dann P_y $y_{\min}+d_B/2 > y_{\max}$? y_{\max} : $y_{\min}+d_B/2$ o Sonst <ul style="list-style-type: none"> ▪ Keine Korrektur, da Knoten im Kernbereich

Die Änderungen des Lokalisierungsverfahrens auf den Beacons sind ebenfalls minimal. Sie beschränken sich auf das Erzeugen des Nachbarschaftsvektors bv_i , der durch die Auswertung empfangener Nachrichten benachbarter Beacons ermittelt wird (Algorithmus 7). Der dargelegte Ablauf ist somit ideal für statische Beaconnetzwerke.

Algorithmus 7: Positionsermittlung durch Schwerpunktbestimmung mit Korrektur der ermittelten Position im Randbereich, CLwEC (Ablauf auf Beacons)

Positionsbestimmung Ermittle, falls erforderlich, exakte Position (z. B. per GPS)
Endlosschleife Wenn Empfang von Nachrichten B_j benachbarter Beacons
o Aktualisiere lokalen Zustand im Nachbarschaftsvektor bv_i
Warte bis zu zufälligen Startpunkt t_0 innerhalb der Periode T_B
Sende Nachrichten mit eigenem Identifier, eigener Beaconpositionen B_i und eigenem Nachbarschaftsvektor bv_i
Warte Zeit $T_B - t_0$, sodass gesamter Zyklus T_B beträgt

In dynamischen Beaconnetzwerken empfiehlt sich eine Erweiterung um einen Watchdog-Timer, um veraltete und ungültige Zustandsinformationen im Nachbarschaftsvektor bv_i bei längerem Nichtempfang von Beaconpositionen einer Richtung wieder auf *false* setzen zu können (vgl. Abbildung 56).

Der Einfluss der Korrektur auf den durchschnittlichen Lokalisierungsfehler ist von zwei entscheidenden Faktoren abhängig:

- 1.) dem Verhältnis aus Übertragungreichweite zu Beaconabstand $v_1 = \frac{tr}{fq}$ und
- 2.) dem Verhältnis der Randbereichsfläche zur Kernbereichsfläche $v_2 = \frac{A_{Rand}}{A_{Kern}}$

In Sensornetzwerken mit vielen Beacons und sehr geringen Übertragungreichweiten ($b \cdot fq \cong tr > tr_{CLwEC, min.}$) beeinflusst v_1 das Korrekturverhalten maßgeblich. Für diese Konfigurationen ist die Größe des Randbereiches begrenzt. Im Randbereich liegende Sensorknoten werden korrigiert, wodurch der durchschnittliche Fehler des gesamten Netzwerkes sinkt und sich langsam mit steigenden v_1 erhöht (Abbildung 62). Die Korrektur der Positionen im Randbereich verringert den durchschnittlichen Lokalisierungsfehler deutlich, hat jedoch aufgrund des geringeren Anteils am Gesamtnetzwerk einen geringen Einfluss auf die Gesamtbilanz des Netzwerkes.

Der sprunghafte Fehlerverlauf in Abbildung 62 des CLwEC-Verfahrens wird durch identische Überlappungsbereiche von räumlich begrenzten Sensorknoten verursacht. Bei geringen Änderungen der Übertragungreichweite ändern sich diese kaum. Größere Änderungen bewirken jedoch, dass neue Beacons in die Empfangsreichweite der Sensorknoten gelangen und bei der nachfolgenden Positionsbestimmung (Gleichung 101) die Genauigkeit sprunghaft ändern.

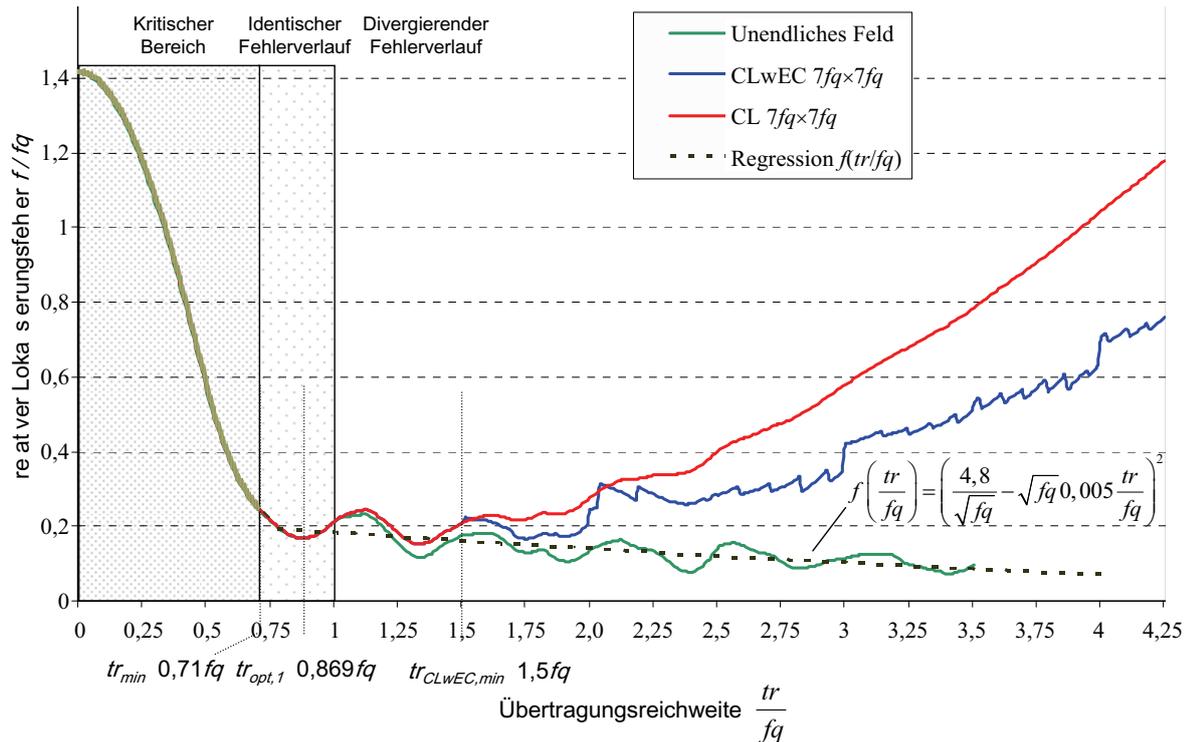


Abbildung 62: Vergleich der Schwerpunktbestimmung (CL) und des Korrekturverfahrens (CLwEC) am Beispiel des durchschnittlichen relativen Lokalisierungsfehlers in Abhängigkeit der Übertragungsreichweite (Netzwerkausdehnung: $7fq \times 7fq$, Beaconabstand fq)

Den typischen Fehlerverlauf der einfachen Schwerpunktbestimmung aller Sensorknoten eines Netzwerkes ($fq = 25$, $tr = 43$) zeigt Abbildung 63. Im Teilbild a) ist im Randbereich (rötliche Färbung) der gegenüber dem Kernbereich (bläuliche Färbung) deutlich höhere Lokalisierungsfehler der Schwerpunktbestimmung zu erkennen.

Abbildung 63b zeigt für dieselbe Konfiguration den Lokalisierungsfehler bei Einsatz des Korrekturverfahrens CLwEC. Die randbedingten Fehler sind fast vollständig eliminiert worden und entsprechen annähernd denen des Kernbereiches.

Wenn das Verhältnis v_2 der Randbereichs- zur Kernbereichsfläche größer wird, d. h. die Fläche des Kernbereiches tendiert gegen null ($A_{Kern} \rightarrow 0$ bzw. $tr_{CLwEC,min} \rightarrow 0,5b \cdot fq$), erreicht das CLwEC die beste Fehlerminimierung. Abbildung 63c zeigt sehr anschaulich am Beispiel eines 100×100 Sensornetzwerkes mit 25 Beacons und eingestellter Übertragungsreichweite $tr = 86$.

Der Randbereich und damit der Randbereichsfehler der Schwerpunktbestimmung (CL) dominieren. Der durchschnittliche Lokalisierungsfehler ist extrem hoch ($f_{mean} = 27,9$) und der Maximalfehler mit $f_{max} = 45,3$ inakzeptabel. Die Randbereichskorrektur halbiert den durchschnittlichen Fehler auf $f_{CLwEC,mean} = 13,9$ und reduziert den maximalen Fehler von 45,3 auf $f_{CLwEC,max} = 31,7$ (Abbildung 63d).

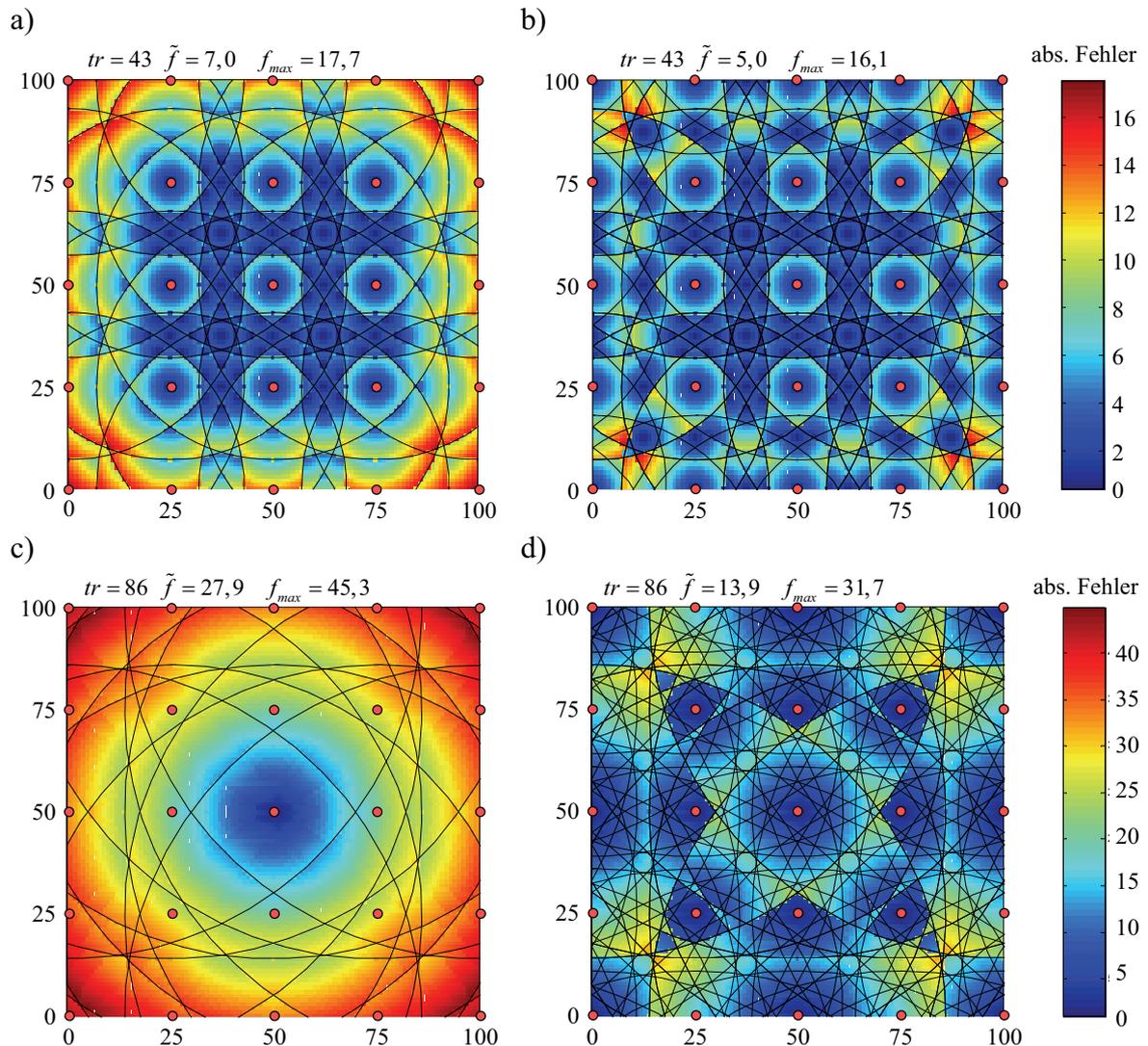


Abbildung 63: Lokalisierungsfehler der Sensorknoten in einem 100x100 Netzwerk bei Übertragungsreichweite $tr=43$ mit a) einfacher Schwerpunktbestimmung b) Schwerpunktbestimmung mit Randzonenkorrektur (CLwEC) und Übertragungsreichweite $tr=86$ c) einfacher Schwerpunktbestimmung d) Schwerpunktbestimmung mit Randzonenkorrektur (CLwEC)

4.8 Zusammenfassung

Der vorgeschlagene Algorithmus zur Reduzierung des Lokalisierungsfehlers bei der Schwerpunktbestimmung ist verglichen mit dem originalen Verfahren (CL) nach Bulusu [Bul02] eine zusätzliche Korrektur (CLwEC). Der Vorteil des Verfahrens besteht in der ebenso einfachen Implementierung und dem kaum geänderten Kommunikationsverhalten des Protokolls bei einer deutlich verbesserten Lokalisierungsgenauigkeit. Diese basiert im Wesentlichen auf der gegenseitigen Kenntnis vorhandener bzw. nicht vorhandener Nachbarbeacons.

Die Laufzeit und der Speicherverbrauch des CLwEC nehmen im Vergleich zu CL leicht zu. Der geringfügig höhere Speicherverbrauch resultiert aus der Verarbeitung der Nachbarschaftsvektoren. Da die Größe des Vektors durch die vier verwendeten Richtungsangaben statisch ist und nicht mit der Größe des Netzwerkes skaliert, ist die Speicherkomplexität wie bei CL mit $O(1)$ konstant. Für die Zeitkomplexität zur Berechnung der Position ist die Betrachtung analog. Die zusätzliche Verarbeitung der Nachbarschaftsvektoren und die Korrektur der Position erhöhen zwar die Latenz um eine konstante Zeiteinheit t_L , sie beeinflussen aber die Komplexität des Verfahrens nicht. Der einzige nennenswerte Unterschied zwischen CLwEC und CL besteht in der zwingenden Kenntnis der eingestellten Übertragungreichweite, die zur Ermittlung der Symmetrieachsen s_i benötigt wird.

Abschließend kann festgestellt werden, dass alle in Kap. 4.2 genannten Vorteile des Lokalisierungsverfahrens CL ebenso uneingeschränkt für das vorgestellte Korrekturverfahren CLwEC gelten:

- geringer Lokalisierungsfehler,
- einfachste Berechnung,
- konstante Speicherkomplexität $O(1)$,
- lineare Zeitkomplexität $O(n)$,
- den Verzicht auf hyperbolische Funktionen,
- pipelinefähig und
- skalierbar.

Aus den in diesem Kapitel dargelegten Überlegungen ergeben sich viele Einsatzmöglichkeiten der Lokalisierungsverfahren CL und CLwEC. Der Einsatz bietet sich vor allem für ressourcenarme Systeme mit folgenden Eigenschaften an:

- schnelle Berechnung,
- geringer bzw. statischer Speicherverbrauch,
- Distanzmessung nicht möglich,
- eingeschränkte Berechnungsmöglichkeiten (z. B. keine FPU),
- gute Lokalisierungsgenauigkeit und
- direkte Implementierung der Algorithmen in Hardware.

5 Gewichtete Schwerpunktbestimmung

Im vorangegangenen Kapitel wurde eingehend die Schwerpunktbestimmung als einfaches Verfahren der Positionsermittlung beschrieben. Ein wesentliches Kennzeichen dieses Algorithmus ist der Verzicht auf explizite Distanzmessungen. Somit sind CL und CLwEC besonders für Systeme geeignet, die keinerlei Distanzinformationen zur Verfügung stellen. In der Realität kann eine genäherte Distanz jedoch durch eine Vielzahl von Verfahren geschätzt werden (vgl. Kap. 2), z. B. durch das Hop-Count-Verfahren. Der Informationsgehalt dieser Distanzen ist zwar gegenüber einer exakten Distanz gering, ist jedoch für eine geringe Lokalisierungsgenauigkeit ausreichend.

5.1 Algorithmus

In diesem Kapitel wird der neue Algorithmus „Weighted Centroid Localization“ (WCL) vorgestellt. Dieser basiert auf der Schwerpunktbestimmung (vgl. Kap. 4) und erweitert das Verfahren um eine zusätzliche Distanzbeachtung. In WCL wird die Distanz nicht als gleichberechtigte Eingangsgröße der Lokalisierung, sondern lediglich als Gewicht w in die Berechnung miteinbezogen.

Die Positionsbestimmung wird von einer einfachen Schwerpunktbestimmung (Gleichung 61) in eine gewichtete Schwerpunktbestimmung überführt [Blu05a]. Mathematisch betrachtet handelt es sich in der vorgestellten Gleichung 105 um eine Bestimmung des Massenschwerpunktes [Bro95, S. 161]. In der Geodäsie wird dieses Verfahren auch als Inverse Distance Weighting (IDW) bezeichnet [She68].

$$\underline{P}_{WCL} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \frac{1}{\sum_i w_i} \begin{pmatrix} \sum_i w_i B_{i,x} \\ \sum_i w_i B_{i,y} \end{pmatrix} \quad (105)$$

Für die Positionsermittlung bedeutet die Einbeziehung einer gemessenen Distanz zwischen Sensorknoten und Nachbarbeacons eine höhere Wichtung der Position eines unmittelbar benachbarten Beacons gegenüber einem entfernteren Beacon. Das Gewicht w_i bestimmt, wie viel Einfluss die Position des Beacons B_i in der Berechnung der Position $\underline{P}_{WCL}(x;y)$ hat. Ein nahe liegender Beacon ($d_i \rightarrow 0$) erhält eine hohe Wichtung ($w_i \rightarrow \infty$) und ein entfernter Beacon ($d_j \rightarrow \infty$) eine geringere Wichtung ($w_j \rightarrow 0$). Die höhere Wichtung kurzer Distanzen führt dazu, dass die ermittelte Position $\underline{P}_{WCL}(x;y)$ im Gegensatz zur Position $\underline{P}_{CL}(x;y)$ näher

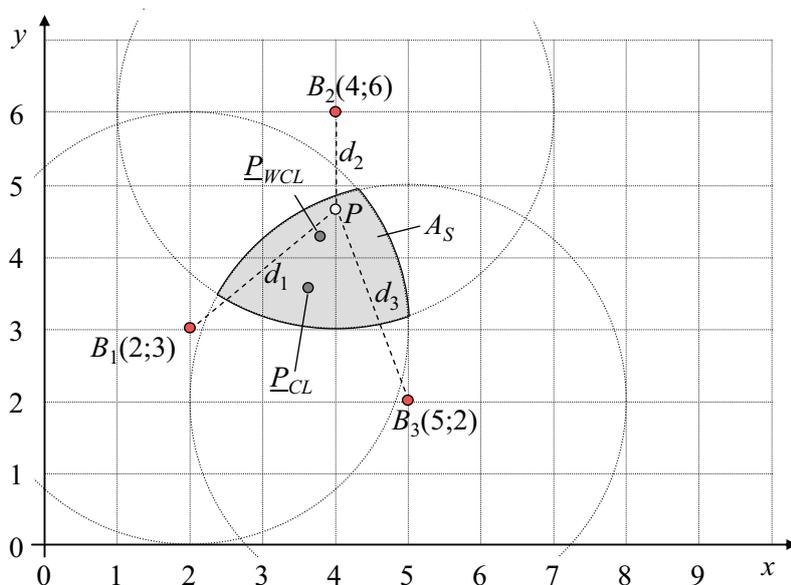
an den Beacon mit der kleinsten Distanz rückt. Das Gewicht w verhält sich folglich umgekehrt proportional zur Distanz (Gleichung 106).

$$w \propto \frac{1}{d} \quad (106)$$

Abbildung 64 verdeutlicht den Unterschied zwischen der einfachen (CL) und der gewichteten Schwerpunktbestimmung (WCL). In dem gezeigten Beispiel empfängt der Knoten $P(4;4,7)$ die Positionen der Beacons $B_1(2;3)$, $B_2(4;6)$ und $B_3(5;2)$. Für die weiteren Betrachtungen wird die Distanz zu den Beacons zunächst als fehlerfrei bestimmt vorausgesetzt.

Die einfache Schwerpunktbestimmung ohne Beachtung gemessener Distanzen ermittelt die Position des Sensorknotens bei $P_{CL}(3,66;3,66)$ mit dem Fehler $f_{CL} = 1,1$. Die Berücksichtigung der Distanzen bei der gewichteten Schwerpunktbestimmung erlaubt eine genauere Positionsbestimmung bei $P_{WCL}(3,73;4,31)$ mit einem mehr als halbierten Fehler $f_{WCL} = 0,47$.

Die Analyse der Positionsbestimmung in Abbildung 64 legt die Vermutung nahe, dass in diesem konkreten Beispiel eine höhere Wichtung der Distanz d_2 die Position P_{WCL} mit einem noch kleineren Fehler und damit näher an der wahren Position $P(4;4,7)$ ermitteln könnte. Eine zu hohe Wichtung w_2 würde jedoch die Position P_{WCL} in unmittelbarer Nähe des Beacons $B_2(4;6)$ bestimmen und damit den Fehler wieder deutlich vergrößern. Es ist demnach davon auszugehen, dass für den Sensorknoten ein Minimum des Lokalisierungsfehlers in Abhängigkeit der Distanzwichtung existiert.



Distanzen und Gewichte

B_i	d_i	w_i
1	2,62	0,38
2	1,30	0,77
3	2,88	0,35

Ermittelte Positionen

Verfahren	Position	f
P	4,00;4,70	0
P_{CL}	3,66;3,66	1,10
P_{WCL}	3,73;4,31	0,47

Abbildung 64: Gewichtete Schwerpunktbestimmung (WCL) im Vergleich zur einfachen Schwerpunktbestimmung (CL) am Beispiel des Sensorknotens $P(4;4,7)$

Aus der singulären Betrachtung des Sensorknotens $P(4;4,7)$ folgt jedoch nicht, dass eine höhere Wichtung kurzer Distanzen tatsächlich eine Reduzierung des durchschnittlichen Lokalisierungsfehlers aller Sensorknoten hervorruft. Die Analyse der Gleichung 105 lässt sogar den Schluss zu, dass eine höhere Wichtung kurzer Distanzen zu größeren Fehlern führt, da es unsinnig ist, einzelne Massepunkte zu bevorzugen. Der Ansatz erscheint daher nur sinnvoll, wenn ein begründeter Verdacht besteht, dass kürzere Distanzen eine höhere Wertigkeit bzw. Entropie aufweisen als längere Distanzen (vgl. Kap. 5.2).

Der Ansatz, kürzere Distanzen höher zu wichten als größere, kann durch den Einsatz nicht-linearer Gewichtsfunktionen erreicht werden, wie sie auch ansatzweise durch Sprott untersucht wurden [Spr03]. Der reziproke Zusammenhang zwischen Gewicht und Distanz (Gleichung 106) soll daher für die weitere Betrachtung um einen zusätzlichen Freiheitsgrad, dem Grad g , erweitert werden.

$$w_i = \frac{1}{(d_i)^g} \quad (107)$$

Der Grad dient der Stärkung bzw. Schwächung des Gewichts. Die einfache Schwerpunktbestimmung (CL) stellt folglich einen Sonderfall der gewichteten Schwerpunktbestimmung für den Fall dar, dass das Gewicht $g = 0$ ist, wodurch sich Gleichung 105 wieder auf die einfache Gleichung 61 reduziert. Durch die Nichtlinearität der Exponentialfunktion d^g ($g > 1$) werden kürzere Distanzen mit steigendem g höher gewichtet als entferntere Distanzen.

Die vorangegangenen Analysen wurden in einer Simulation eines unendlich großen Sensornetzwerkes für $0 \leq tr < 4fq$ näher untersucht (Vorgehensweise analog zu Simulation in Kap. 4.4). Dazu wurde der Lokalisierungsfehler f in Abhängigkeit der Übertragungsreichweite tr für verschiedene Gewichtsfunktionen $w = d^{-g}$ simulativ bestimmt. Abbildung 65 verdeutlicht, dass der Lokalisierungsfehler bei allen Gewichtsfunktionen ($0 \leq g \leq 5$) mit zunehmender Übertragungsreichweite $tr \rightarrow \infty$ gegen $f \rightarrow 0$ konvergiert. Es zeigt sich jedoch auch, dass die Gewichtsfunktion einen maßgeblichen Einfluss hat und nur bei einer reziproken Wichtung aller Distanzen ($w = d^{-1}; g = 1$) den kleinsten durchschnittlichen Lokalisierungsfehler für nahezu alle Übertragungsreichweiten ermöglicht [Gro07].

Somit ist zunächst ermittelt worden, dass eine unbegründete Überbewertung ($g > 1$) kleinerer Distanzen in unendlich großen, idealen Sensornetzwerken mit gleichverteilten Beacons, in denen eine fehlerfreie Distanzmessung möglich ist, nicht fehlerreduzierend wirkt. Vielmehr führen höhere Grade ($g > 1$) zur Überbewertung nahe liegender Beacons, sodass größere durchschnittliche Lokalisierungsfehler die Folge sind.

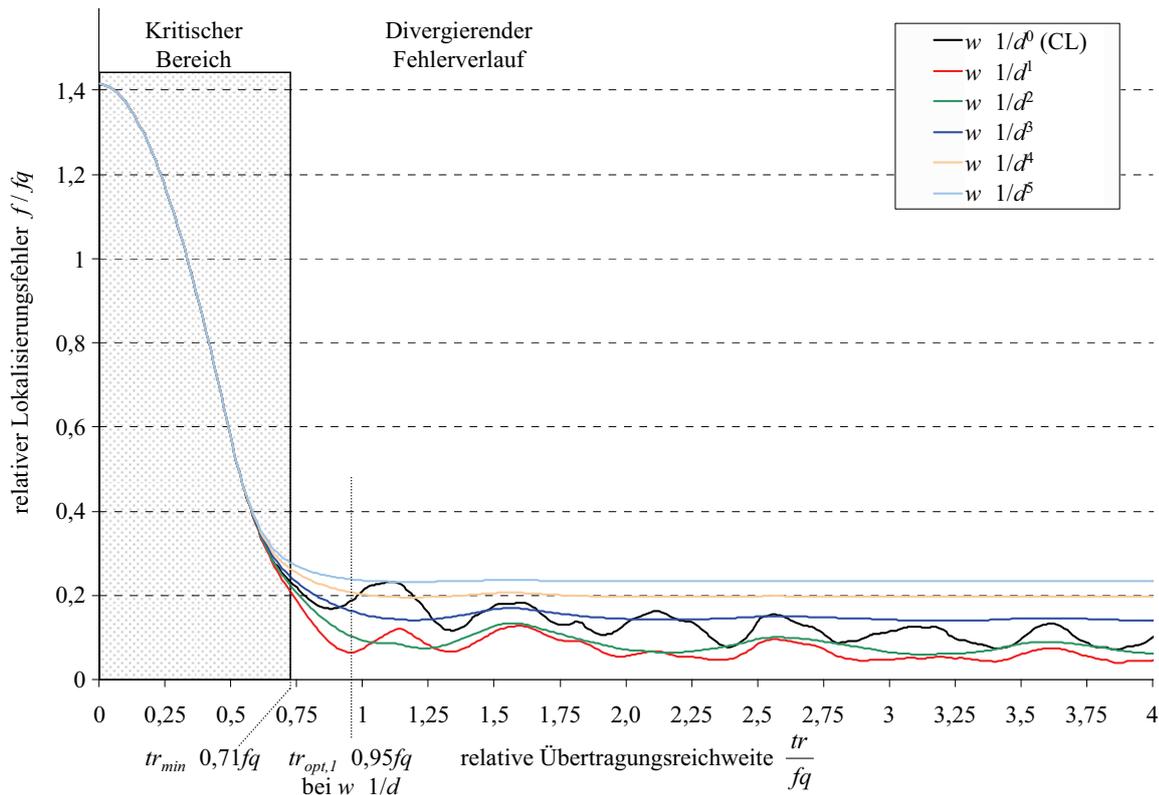


Abbildung 65: Durchschnittlicher Lokalisierungsfehler der gewichteten Schwerpunktbestimmung bei verschiedenen Gewichtsfunktionen $w = 1/d^g$ in Abhängigkeit der Übertragungsreichweite der Beacons (unendlich großes Sensornetzwerk, Beaconabstand im Gitter fq , exakte Distanzen ohne Messfehler)

Ebenso wie bei der einfachen Schwerpunktbestimmung (vgl. Kap. 4.4) erzeugt jede Exponentialfunktion $w = d^{-g}$ bei der gewichteten Schwerpunktbestimmung mehrere Minima des Lokalisierungsfehlers in Abhängigkeit der Übertragungsreichweite der Beacons. Bei Anwendung des Gewichts $g = 1$ beträgt die optimale Übertragungsreichweite zur Ermittlung des minimalen Lokalisierungsfehlers $tr_{opt,1} = 0,95fq$. Da der Beaconabstand fq größer als $tr_{opt,1}$ ist, können keine Unterschiede zwischen den Überlagerungsbereichen an den Rändern und in der Mitte sowohl endlicher als auch unendlich großer Sensornetze entstehen (vgl. Abbildung 46). Folglich gilt $tr_{opt,1}$ auch für endliche Netzwerke.

$$tr_{opt,1} = 0,95fq \quad (108)$$

Besonders beachtenswert in Abbildung 65 ist der gegenüber der einfachen Schwerpunktbestimmung (CL, $g = 0$) wesentlich geringere Lokalisierungsfehler des WCL-Algorithmus ($g \geq 1$). Aus der Simulation kann der geringste durchschnittliche Lokalisierungsfehler für unendlich große Sensornetze bei $tr_{opt,1}$ ermittelt werden.

$$\tilde{f}\Big|_{tr=0,95fq} = 0,0645fq \quad (109)$$

Der maximale Lokalisierungsfehler, der bei einer Übertragungreichweite von $tr = 0,95fq$ auftritt, beträgt:

$$\hat{f}\Big|_{tr=0,95fq} = 0,19fq \quad (110)$$

Die Übertragungreichweite $tr_{opt,1}$ hat gegenüber $tr_{opt,k}$ ($k > 1$) den entscheidenden Vorteil, dass sie wesentlich kleiner ist. So benötigt das Senden der Beaconinformationen bei $tr_{opt,1}$, begründet durch den quadratischen Zusammenhang zwischen Distanz und Sendeleistung (Gleichung 20), wesentlich weniger Energie als bei $tr_{opt,k}$ ($k > 1$). Der Lokalisierungsfehler ist zwar bei $tr_{opt,k}$ ($k > 1$) geringfügig kleiner als bei $tr_{opt,1}$, jedoch stehen der Aufwand durch höhere Sendeleistung und der Nutzen in Form geringerer Fehler durch die sehr langsame asymptotische Näherung an $f_{min}(tr \rightarrow \infty) = 0$ in keinem Verhältnis zueinander.

Im unendlich großen Sensornetzwerk erreicht der durchschnittliche Lokalisierungsfehler erst bei $tr = 1,95fq$ denselben Fehlerwert $f = 0,0645fq$ der Übertragungreichweite $tr_{opt,1}$, allerdings bei bereits 4-facher Sendeleistung. Ein unendlich großes Sensornetzwerk ist in der Praxis jedoch unrealistisch. Es ist wahrscheinlicher, dass begrenzte (endliche) Sensornetzwerke zum Einsatz kommen, in denen bei $tr > fq$ erneut Randeffekte wie bei der Schwerpunktbestimmung auftreten.

Die in endlichen Sensornetzwerken zu erwartenden Randeffekte wurden in einer weiteren Simulation untersucht. Dazu wurde der durchschnittliche Lokalisierungsfehler in einem Netzwerk der Größe $3fq \times 3fq$ mit insgesamt 4×4 im Gitter angeordneten Beacons mit verschiedenen Gewichtsfunktionen ($w = f(g)$; $0 \leq g \leq 5$) ermittelt (Abbildung 66). Für Übertragungreichweiten im Bereich $0 \leq tr < tr_{min}$ (kritischer Bereich) ist ein Vergleich der Lokalisierungsfehler wenig sinnvoll, da etliche Sensorknoten ihre Position aufgrund fehlender Beaconpositionen nicht bestimmen können. Für Übertragungreichweiten $tr \geq tr_{min}$ ist ein zunächst sehr divergentes Fehlerverhalten festzustellen, wobei sich jedoch der Fehler mit steigendem tr in Abhängigkeit des Gewichts einem charakteristischen Maximalwert asymptotisch nähert. Für das Gewicht $g = 0$, das den WCL-Algorithmus auf den CL-Algorithmus reduziert und folglich gemessene Distanzen ignoriert, ergibt sich, wie bereits in Abbildung 46 nachgewiesen, ein maximaler Fehler $f_{max} = 114,78$. Im Vergleich dazu sind die maximalen Fehler der anderen betrachteten Gewichtsfunktionen ($1 \leq g \leq 5$) deutlich geringer.

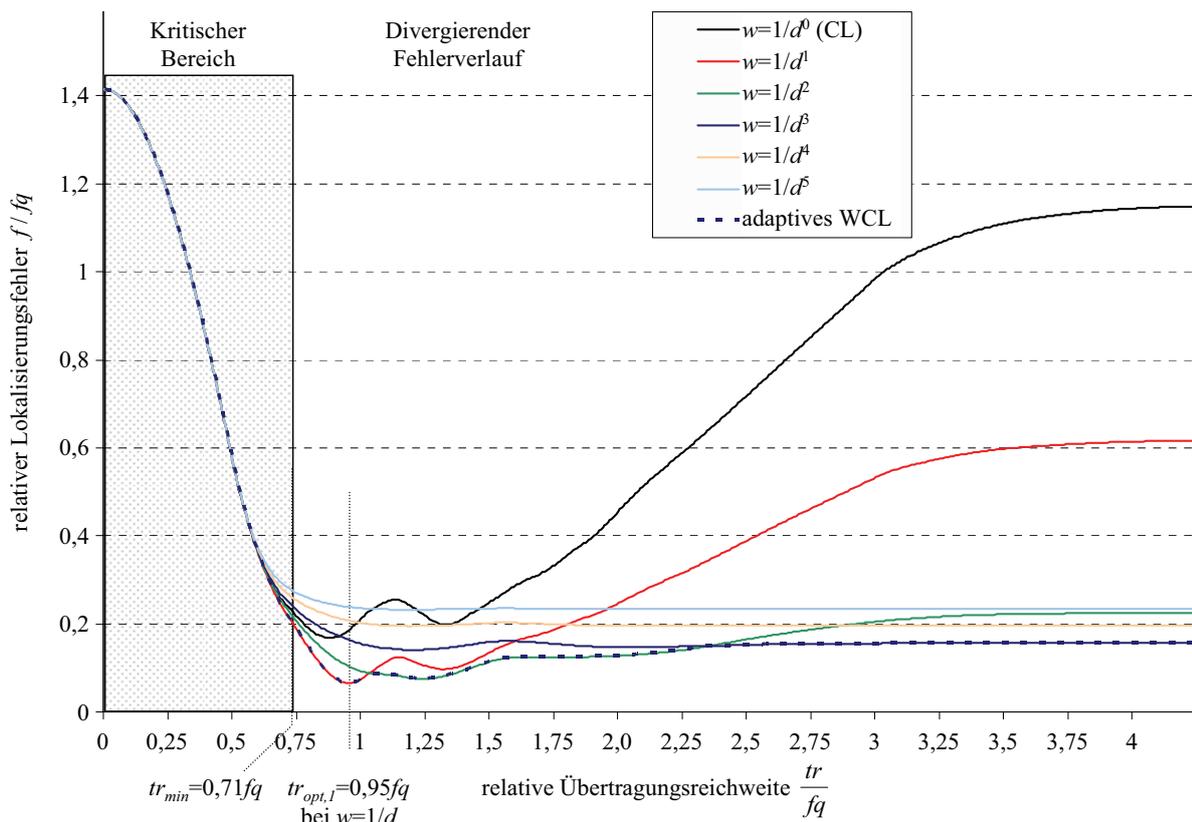


Abbildung 66: Durchschnittlicher Lokalisierungsfehler der gewichteten Schwerpunktbestimmung verschiedener Gewichtsfunktionen in Abhängigkeit der Übertragungsreichweite (endliches Sensornetzwerk, Abmessung: $3fq \times 3fq$, Beaconabstand im Gitter fq)

Besonders bemerkenswert jedoch ist, dass sich der minimale Fehler der gesamten Simulation mit $f_{min} = 0,065fq$ wie im unendlich großen Sensornetzwerk bei $tr_{opt,l} = 0,95fq$ einstellt ($w = d^8$) und auch bei steigenden Übertragungsreichweiten nicht mehr erreicht wird - vielmehr steigt er deutlich an. Der Grund liegt in dem zunehmenden Einfluss der Randbereichseffekte bei steigenden Übertragungsreichweiten. Diese fehlererhöhenden Effekte entstehen, wenn die Menge der empfangenen Beaconpositionen nicht gleichverteilt im Übertragungsbereich tr des Sensorknotens ist und wenn im Gegensatz zur Netzwerkmittle (Kernbereich) Informationen fehlen, die die Positionsgenauigkeit erhöhen könnten (vgl. Kap. 4.7).

Aus der Simulation ist deutlich zu erkennen, dass für $tr > fq$ die Fehler tendenziell steigen und dass der Grad g einen deutlichen Einfluss bei hohen Übertragungsreichweiten besitzt. Bereits bei $tr > 1,03fq$ ist der ermittelte Lokalisierungsfehler bei $g = 2$ kleiner als bei $g = 1$ und für $tr \geq 2,36fq$ wird der geringste Fehlerwert mit $g = 3$ erreicht. Demnach hat, trotz der scheinbar gegensätzlichen theoretischen Aussagen zu Abbildung 65, der Grad einen sehr starken Einfluss auf den Lokalisierungsfehler.

Aus der Simulation in Abbildung 65 ist deutlich geworden, dass höhere Grade ($g > 1$) im unendlich großen Sensornetzwerk und somit auch Kernbereich eines endlichen Sensornetzwerkes höhere Fehler bewirken als $g = 1$. Aus Abbildung 66 geht jedoch hervor, dass im endlichen Sensornetzwerk der geringste Lokalisierungsfehler für $tr > fq$ nur bei Graden $g > 1$ ermittelt werden kann. Da diese relative Verbesserung gegenüber $g = 1$ nicht im Kernbereich erfolgen kann, muss demnach ein höherer Grad im Randbereich fehlerkorrigierend wirken. Das wird erreicht, indem kürzere Distanzen höher gewichtet werden, denn für diese Distanzen d_i erhöht sich die Wahrscheinlichkeit, dass im Umkreis $tr = d_i$ des Sensorknotens die Beacons gleichverteilt sind und damit erhöht sich ebenfalls die Genauigkeit der Positionsbestimmung.

5.2 Adaptive Schwerpunktbestimmung

In einem ideal konfigurierbaren Sensornetzwerk wird, ausgehend von vorangegangenen Betrachtungen, die Übertragungreichweite auf $tr = 0,95fq$ eingestellt. In der Praxis ist diese Reichweite jedoch nicht immer einstellbar, sei es durch Kalibrierungsprobleme bzw. minimale Reichweiten der Transmitter oder einfach in der Geographie des untersuchten Gebietes begründet. In diesen Anwendungsfällen bleibt nur die Adaption des Algorithmus an die eingestellte Übertragungreichweite (Adaptive Weighted Centroid Localization, AWCL).

In endlichen quadratischen Netzwerken erhöht sich mit steigender Übertragungreichweite $tr \rightarrow \sqrt{n_{Beacons}} \cdot tr$ der Einfluss des Randbereiches enorm, sodass bei großen tr eine Änderung des Grades vorgenommen werden muss, um den Lokalisierungsfehler zu reduzieren.

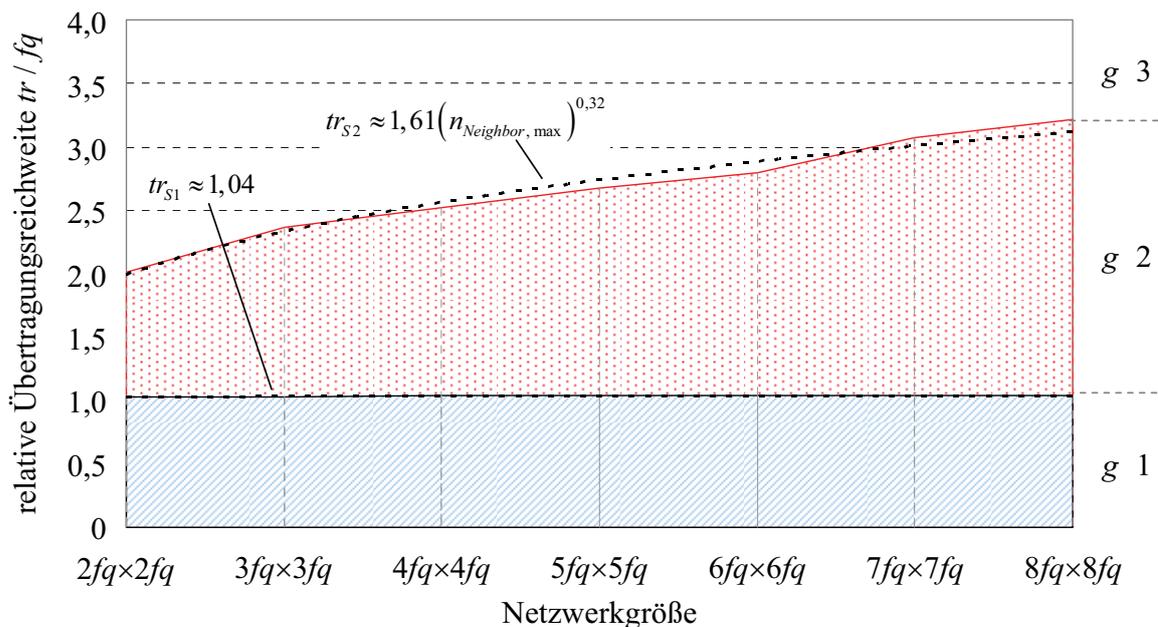


Abbildung 67: Optimaler Grad g des Gewichts in Abhängigkeit der Übertragungreichweite tr und der Größe des endlichen Sensornetzwerkes ($2fq \times 2fq - 8fq \times 8fq$)

Dies kann durch eine Adaption des Grades g in der Gewichtsfunktion $w = f(g)$ in Abhängigkeit der relativen Übertragungreichweite tr/fq und der maximalen Anzahl der nebeneinander liegenden Beacons $n_{Neighbor,max}$ erreicht werden. Der optimale Grad eines beispielhaften Sensornetzwerkes aus $3fq \times 3fq$ Beacons ($n_{Neighbor,max} = 4$) zeigt sich in Abbildung 66 am jeweils geringsten Lokalisierungsfehler in Abhängigkeit der Übertragungreichweite.

Die Optimierung des WCL-Algorithmus durch Anpassung des Grades g (adaptive WCL) kann für endlich große Netzwerke simulativ genauer bestimmt werden. Abbildung 67 veranschaulicht den Zusammenhang für Sensornetzwerke der Größe $2fq \times 2fq$ bis $8fq \times 8fq$. Die (blau) schraffierten Flächen ($0 \leq tr < tr_{S1}$) kennzeichnen, dass der geringste Lokalisierungsfehler des WCL-Verfahrens nur mit einem Grad $g = 1$ erreicht werden kann. Der Grund liegt in dem verschwindend geringen Einfluss der fehlererhöhenden Randbereiche gegenüber den Kernbereichen, da die Übertragungreichweite tr in fast allen Konfigurationen geringer ist als der Beaconabstand fq . Für Übertragungreichweiten $tr < tr_{S1}$ nähert sich demzufolge der Lokalisierungsfehler dem minimalen Fehler des unendlich großen Sensornetzwerkes (vgl. Abbildung 65).

$$\begin{aligned} TR_{S1} &= \{tr : 0 \leq tr < tr_{S1} = 1,04\} \\ \forall tr \in TR_{S1} \quad g(tr) &= 1 \end{aligned} \quad (111)$$

Ist jedoch eine größere Übertragungreichweite eingestellt, ist der optimaler Grad g in Abhängigkeit der maximal nebeneinander liegenden Beacons $n_{Neighbor,max}$ dem Diagramm aus Abbildung 67 zu entnehmen. Bei Übertragungreichweiten, für die $tr \in TR_{S2}$ gilt (Gleichung 112), beträgt der optimale Grad $g = 2$, wie Abbildung 66 beispielhaft für die Übertragungreichweiten $1,04 \leq tr/fq < 2,36$ in einem $3fq \times 3fq$ Beaconnetzwerk darstellt.

$$\begin{aligned} TR_{S2} &= \{tr : tr_{S1} \leq tr < tr_{S2}(n_{Neighbor,max}) = 1,61n_{Neighbor,max}^{0,32}\} \\ \forall tr \in TR_{S2} \quad g(tr) &= 2 \end{aligned} \quad (112)$$

In Konfigurationen mit noch größeren Übertragungreichweiten ($tr \in TR_{S3}$) wird der geringste Lokalisierungsfehler mit $g = 3$ bestimmt (Gleichung 113). Der Grund liegt im massiven Einfluss, den die Randbereichseffekte auf den durchschnittlichen Fehler besitzen. So ermittelt der optimale Grad $g = 3$ in der simulierten Beispielkonfiguration (vgl. Abbildung 66) bei großen Übertragungreichweiten $tr/fq > 2,36$ den geringsten Lokalisierungsfehler.

$$\begin{aligned} TR_{S3} &= \{tr : tr_{S2}(n_{Neighbor,max}) \leq tr\} \\ \forall tr \in TR_{S3} \quad g(tr) &= 3 \end{aligned} \quad (113)$$

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass das optimale Gewicht $w_{AWCL,i}(d_i)$ der Distanzen d_i zur Berechnung der Position eines Sensorknotens innerhalb eines endlichen Sensornetzwerkes näherungsweise nach Gleichung 114 bestimmt wird.

$$w_{AWCL,i}(d_i) = \begin{cases} \frac{1}{d_i} & 0 \leq tr < tr_{S1} = 1,04 \\ \frac{1}{d_i^2} & tr_{S1} \leq tr < tr_{S2}(n_{Neighbor,max}) = 1,61n_{Neighbor,max}^{0,31} \\ \frac{1}{d_i^3} & tr_{S2}(n_{Neighbor,max}) = 1,61n_{Neighbor,max}^{0,31} \leq tr \end{cases} \quad (114)$$

5.3 Enhanced Weighted Centroid Localization

Nachfolgend soll nun untersucht werden, ob der Grad g einen Einfluss auf den Lokalisierungsfehler der einzelnen Überlappungsflächen besitzt. In Abbildung 66 wurde der geringste Lokalisierungsfehler des WCL-Algorithmus für endliche Sensornetzwerke mit einer optimalen Übertragungsreichweite $tr_{opt,l} = 0,95fq$ bestimmt. Für dieselbe Konfiguration sind die Fehlervektoren und der Fehlerverlauf in Abbildung 68a für das Gewicht $w = g^{-1}$ dargestellt. Aus der Simulation geht hervor, dass die Fehlervektoren tendenziell in Richtung des Schwerpunktes der Überlappungsfläche zeigen und sich im Betrag ähneln. Der Fehlerverlauf ist relativ ausgewogen und zeigt nur geringe Unstetigkeitsstellen.

Im Vergleich dazu ändert sich das Fehlerverhalten bei höheren Graden und sonst konstanten Bedingungen drastisch (Abbildung 68b-c). Der durchschnittliche Fehler erhöht sich von $f_a = 6,4$ auf $f_b = 10,2$ und $f_c = 16,2$. In den Überlappungsflächen $A_2..A_4$ (vgl. Abbildung 69) steigt der Lokalisierungsfehler deutlich an. Jedoch zeigt die Simulation auch, dass in einigen Gebieten (A_1) der Fehler kräftig sinkt ($g = 2$). Zusätzlich verändert sich der Fehlerverlauf deutlich und zeigt starke Unstetigkeiten zwischen den Flächen A_1 und $A_2..A_4$.

Es wird deutlich, dass der geringste Lokalisierungsfehler der einzelnen Überlappungsflächen vom Grad g abhängig ist. So kann der geringste Fehler eines quadratischen Sensornetzwerkes ($tr = 0,95fq$) in der Fläche A_1 nur mit $g = 2$ bestimmt werden (Abbildung 68a). Für die anderen Überlappungsflächen sinkt der Fehler nur für $g = 1$ auf den kleinsten Wert. Die Genauigkeitsverbesserung innerhalb der Fläche A_1 bei $g = 2$ lässt sich nur mit einem Effekt erklären, der in der Mitte eines quadratischen Feldes bei $tr < fq$ und nahezu gleichen Distanzen $d_1..d_4$ auftritt. Denn nur die etwas höhere Gewichtung geringfügig kleinerer Distanzen bei $g = 2$ führt zum günstigeren Fehlerverhalten der Fläche A_1 mit kleineren Fehlervektoren im Vergleich zu $g = 1$, bei dem größere Fehlervektoren zum Schwerpunkt der Überlappungsfläche zeigen.

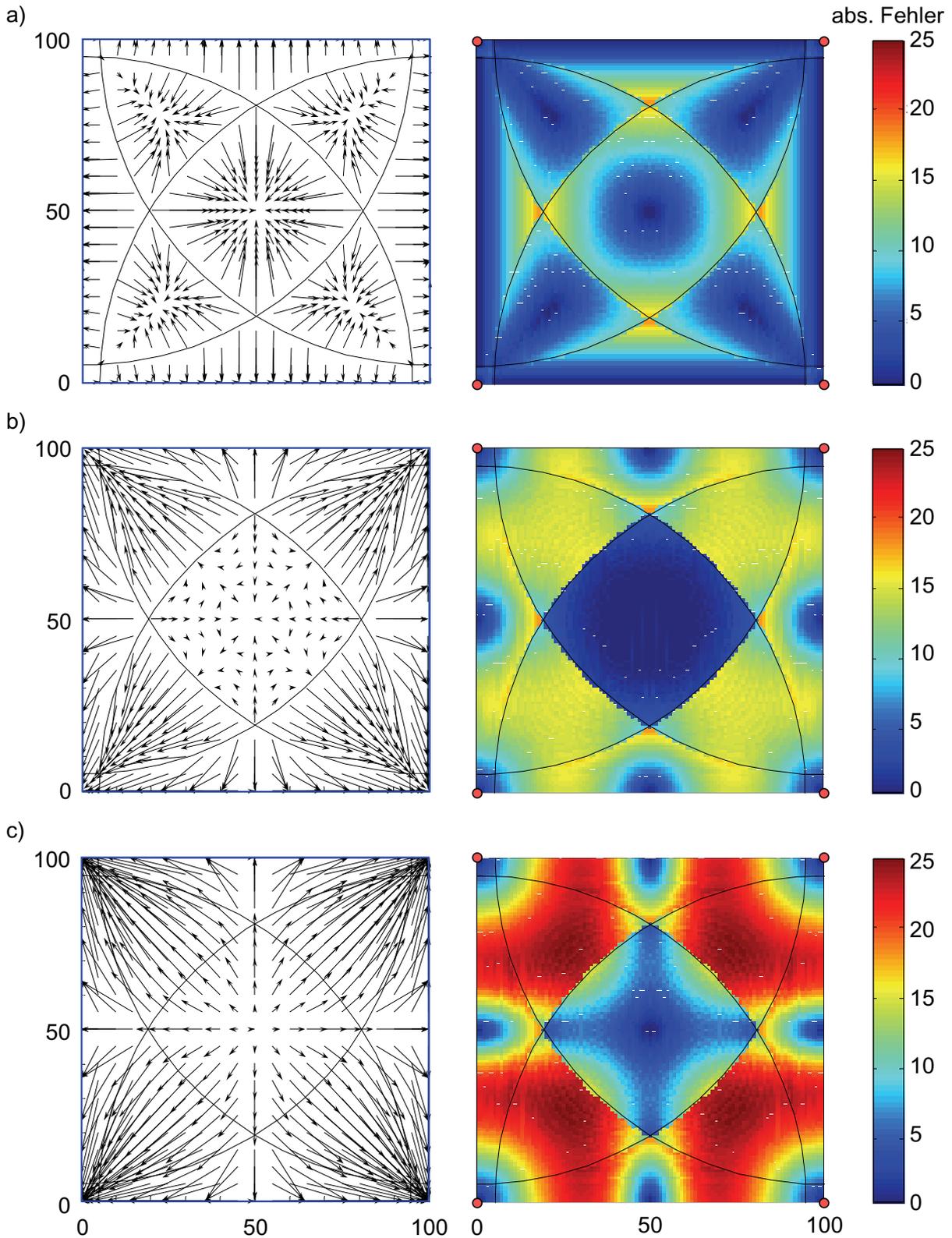


Abbildung 68: Durchschnittlicher Lokalisierungsfehler der gewichteten Schwerpunktbestimmung (endliches Netzwerk, Abmessung: 100×100 , Beaconabstand im Gitter $f_q=100$, $tr=0,95f_q$) verschiedener Gewichtsfunktionen a) $w=1/d, f_a=6,4$ b) $w=1/d^2, f_b=10,2$ c) $w=1/d^3, f_c=16,2$

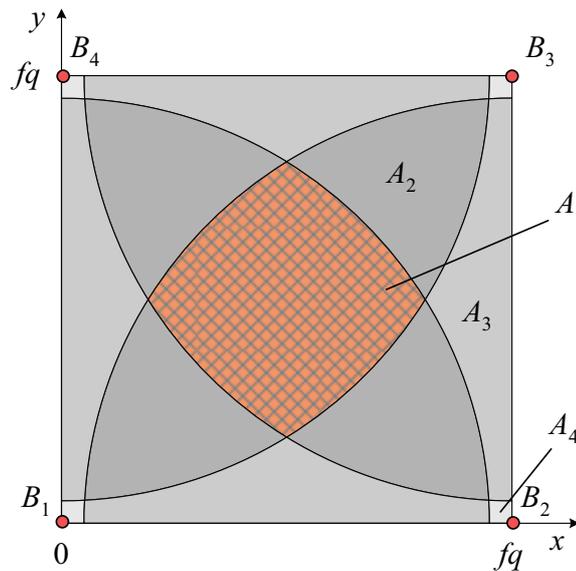


Abbildung 69: Überlappungsflächen bei der gewichteten Schwerpunktbestimmung ($tr=0,95fq$)

Das vorgestellte Phänomen scheint zunächst im Widerspruch zur Abbildung 66 (Fall A) zu stehen, da dort Positionen in Randgebieten mit größeren g genauer bestimmt werden können, während in Abbildung 68 (Fall B) behauptet wird, dass Randbereiche mit höheren Graden $g > 1$ den Fehler erhöhen. Der Unterschied besteht jedoch darin, dass es sich im Fall B nicht um fehlererhöhende Randeffekte handelt, da die Übertragungreichweite $tr < fq$ ist und die Anzahl der empfangenen Beacons in den Randbereichen maximal $n - 3$ beträgt. Im Fall A ist die Anzahl der Beacons jedoch höher ($n > 3$). Da aus Sicht eines Sensorknotens im Randbereich die empfangenen Beaconpositionen ($tr > fq$, $n > 3$) nicht gleichverteilt um ihn herum sind, führt in diesem Fall A nur eine Korrektur durch $g > 1$ zur Fehlerreduzierung. Im Fall B sind die Beacons jedoch gleichverteilt. Somit ist eine Korrektur in Randbereichen für $tr < fq$ durch höhere Grade $g > 1$ unbegründet und wirkt daher fehlererhöhend, wie die Simulationen zeigen (Abbildung 68b-c).

Die zu Abbildung 68 vorgenommenen Ausführungen lassen eine Optimierung des WCL-Algorithmus zu. Aus den Beobachtungen ($tr < fq$) wird deutlich, dass für die Fläche A_1 der optimale Grad $g = 2$ beträgt, für die anderen Flächen $A_2..A_4$ ist $g = 1$. Der Sensorknoten benötigt lediglich die Information, ob er sich in A_1 oder in $A_2..A_4$ befindet. Diese Unterscheidung kann im idealen Sensornetzwerk anhand der Anzahl der empfangenen Nachbarbeacons vorgenommen werden, denn nur für $n = 4$ befindet sich ein Knoten in der Fläche A_1 (Tabelle 3) und bildet die Grundlage der erweiterten gewichteten Schwerpunktbestimmung (Enhanced Weighted Centroid Localization, EWCL).

Tabelle 3: Optimaler Grad g des EWCL-Verfahrens für die Überlappungsbereiche $A_1..A_4$

Fläche	Nachbarbeacons	optimaler Grad g
A_1	4	2
A_2	3	1
A_3	2	1
A_4	1	1

Die erweiterte Gewichtsfunktion $w_{EWCL,i}(d_i)$ besteht infolgedessen aus einer Fallunterscheidung, die auf der Anzahl der empfangenen Nachbarbeacons basiert (114).

$$w_{EWCL,i}(d_i) = \begin{cases} \frac{1}{d_i} & n \neq 4 \\ \frac{1}{d_i^2} & n = 4 \end{cases} \quad (115)$$

Der durchschnittliche Lokalisierungsfehler sinkt bei Anwendung der erweiterten Gewichtsfunktion $w_{EWCL,i}(d_i)$ von $f_{WCL} = 0,065fq$ auf $f_{EWCL} = 0,0474fq$ für $tr = 0,95fq$ (Abbildung 70). Da die beiden verwendeten Grade mit $tr_{opt,1}(g=1) = 0,95fq$ und $tr_{opt,1}(g=2) = 1,23fq$ unterschiedliche optimale Übertragungreichweiten besitzen (vgl. Abbildung 66), ist zur weiteren Senkung des Fehlers die simulative Bestimmung der resultierenden optimalen Übertragungreichweite notwendig. Da fehlererhöhende Randbereichseffekte vermieden werden sollen, muss gelten $tr_{opt,1} \leq tr_{EWCL,opt} < fq$.

$$tr_{EWCL,opt} = 0,97fq \quad (116)$$

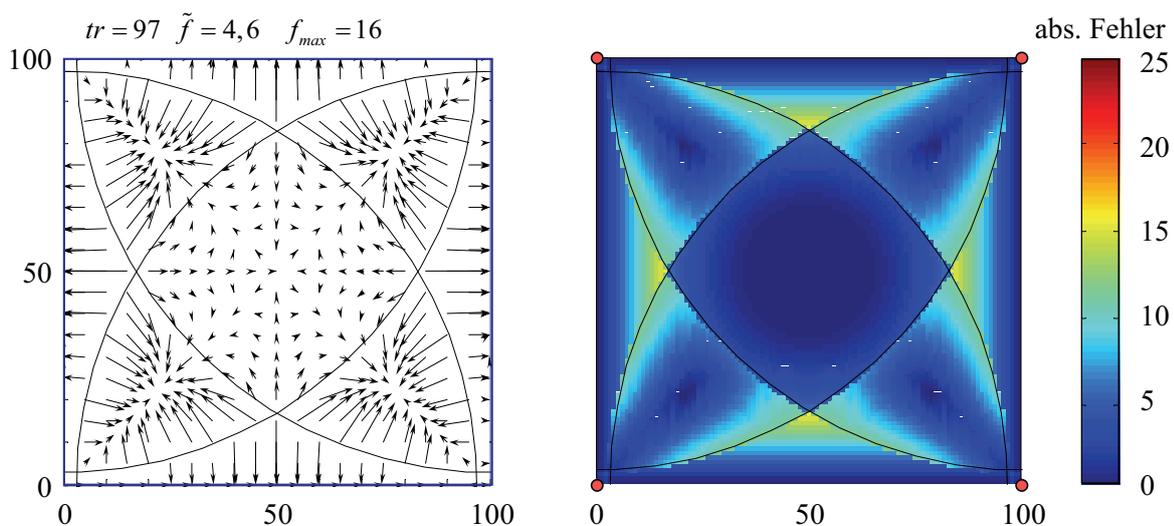


Abbildung 70: Fehlerverhalten eines endlichen Sensornetzwerkes bei Anwendung des EWCL-Algorithmus mit Gradanpassung ($fq = 100$, $tr = 0,97fq$)

Für die ermittelte optimale Übertragungsreichweite $tr_{EWCL,opt}$ ergeben sich erneut leicht reduzierte durchschnittliche und maximale Fehler wie Abbildung 70 anschaulich zeigt.

$$\begin{aligned}\tilde{f}\Big|_{tr=0,97fq} &= 0,0461fq \\ \hat{f}\Big|_{tr=0,97fq} &= 0,16fq\end{aligned}\tag{117}$$

5.4 Auswirkungen von Distanzungenauigkeiten

Die Lokalisierung von Sensorknoten erfordert Eingangswerte wie Positionen von Referenzknoten und bekannte Distanzen zwischen den zu bestimmenden Knoten und Referenzknoten. In den vorangegangenen Ausführungen wurden diese Distanzen als exakt bestimmt ($f = 0$) vorausgesetzt, um genauigkeitsrelevante Optimierungsstrategien der Lokalisierungsalgorithmen hervorzuheben und zu untersuchen. In der Praxis kann eine Distanz jedoch nur näherungsweise bestimmt werden, da

- systematische Fehler im Messverfahren begründet sind,
- jede Messung einem zufälligen Fehler unterliegt und
- die Speicherung in Rechnersystemen eine Quantisierung erfordert.

Alle drei Fehlerquellen sind unabhängig voneinander und treten in jedem Sensorknoten auf. Für eine hochgenaue Lokalisierung der Sensorknoten sind folglich die Analyse der örtlichen Fehlerquellen und die Auswirkungen auf den Lokalisierungsfehler von entscheidender Bedeutung.

In Sensorknoten wird die Distanz häufig über die empfangene Signalstärke bestimmt, indem das Signal durch einen Analog/Digital-Umsetzer in einen RSSI umgewandelt wird (vgl. Kap. 2.9). Die Auflösung des RSSI ist abhängig von der Bitgenauigkeit b_{AD} des A/D-Wandlers, die bei den meisten Sensorknoten $b_{AD} = 10$ Bit beträgt. Bei einer Referenzspannung von $U_{Ref} = 3,6V$ führt eine 10Bit-Wandlung zu einem maximalen Quantisierungsfehler $q_{AD} = 3,6V / 2^{10} = 0,0035V$.

$$q_{AD} = \frac{U_{Ref}}{2^{b_{AD}}}\tag{118}$$

Das analoge Signal wird folglich durch den Näherungswert d_f fehlerbehaftet abgebildet.

$$d_f = \left\lfloor \frac{U_{Messung}}{q} \right\rfloor\tag{119}$$

Die Bitgenauigkeit ist mit 10Bit zwar relativ hoch (2^{10} 1024 Quantisierungsstufen), doch enthält diese nominelle Genauigkeit keine Aussage über die Entropie des Messsignals. Es definiert lediglich die höchste Auflösung der A/D-Wandlung. Wenn jedoch durch Filter-, Verstärker- und andere Verarbeitungsstufen im System ein Signal verfälscht, übersteuert bzw. in kleinere Datentypen konvertiert wird, verringert sich die Entropie der Information deutlich. In diesen fehlerbehafteten Systemen ist es unsinnig, die unteren Bits, falls vorhanden, zu berücksichtigen, da sie keinen Informationsgehalt besitzen. Folglich verringert sich die Anzahl der Quantisierungsstufen und damit die resultierende Bitgenauigkeit $b_r \leq b_{AD}$ der Messkette.

In Geräten, die die empfangene Signalstärke im A/D-Umsetzer mit einem 10Bit-Wert digitalisieren können ($b_{AD} = 10$), der wahre Informationsgehalt jedoch nur 4 Bits entspricht, können nur noch $2^4 = 16$ Quantisierungsstufen ($b_r = 4$) unterschieden werden. Im Grenzfall kann ein Distanzsignal sogar nur binärer Struktur sein, d. h. es besitzt lediglich die Information *true* oder *false*. Diese 1-Bit Information ($b_r = 1$) zeigt z. B. bei der einfachen Schwerpunktbestimmung (CL) an, ob sich ein Beacon in Empfangsreichweite befindet oder nicht. Die Positionsberechnung der Lokalisierungsalgorithmen ist stark von der Genauigkeit der gemessenen Distanzwerte abhängig. Folglich muss eine systembedingte Reduzierung der Quantisierungsstufen und damit der Bitgenauigkeit b_r einen maßgeblichen Einfluss auf den Lokalisierungsfehler ausüben. Abbildung 71 zeigt den durchschnittlichen und maximalen Lokalisierungsfehler der optimalen mathematischen Verfahren LS (Methode der kleinsten Quadrate, Kap. 3.5.3) und QR (QR-Zerlegung des LS-Verfahrens) sowie der vorgestellten Lokalisierungsalgorithmen WCL und EWCL in Abhängigkeit der resultierenden Bitgenauigkeit b_r .

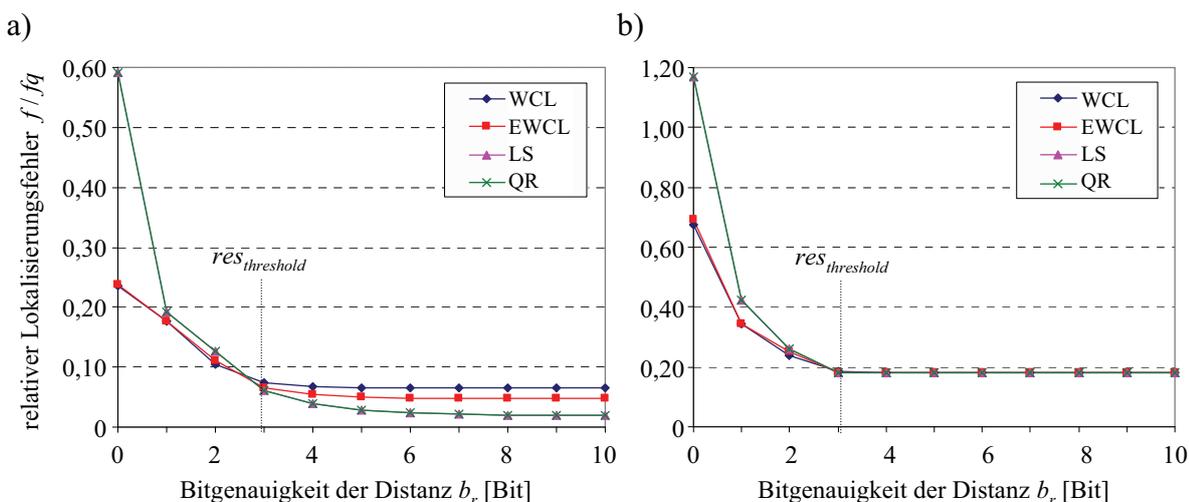


Abbildung 71: a) Durchschnittlicher und b) maximaler Lokalisierungsfehler in Abhängigkeit der Bitauflösung der exakten Distanz im endlichen Sensornetzwerk, Abmessung: $f_q \times f_q$, 2×2 Beacons, Übertragungreichweite $tr = 0,95f_q$, $w = 1/d$

Die Simulation basiert auf exakten Distanzen (Standardabweichung der Messung $\sigma_d = 0$), die in den Wertebereich der angegebenen Bitgenauigkeit b_r umgerechnet werden und dadurch mit einem durch die Quantisierung verursachten Distanzfehler in die Lokalisierung eingehen. Für sehr hohe Bitgenauigkeiten, die einer sehr genauen Distanz entsprechen, ist der Fehler der optimalen mathematischen Verfahren mit $f_{LS,QR} \approx 3$ geringfügig kleiner als der der WCL-Verfahren mit $f_{WCL} = 6,4$ und $f_{EWCL} = 4,6$. Bei kleineren Bitgenauigkeiten jedoch konvergieren die Verfahren LS und QR deutlich schlechter [Bro95], wodurch die WCL-Verfahren für $b_r \leq 3$ ein besseres Fehlerverhalten zeigen ($res_{threshold}$ in Abbildung 71). Exakte Distanzen zwischen den Beacons und den Sensorknoten entsprechen in normal verteilten Systemen dem Erwartungswert d_e einer Wahrscheinlichkeitsfunktion $P(d_e, \sigma_e)$. Der Erwartungswert ist jedoch unbekannt, da Distanzen nicht exakt ($\sigma = 0$), sondern nur fehlerbehaftet ($\sigma > 0$) gemessen werden können. Er kann somit nur bei unendlich vielen Messungen genau bestimmt werden. In Sensorknoten ist die Menge der Messungen jedoch eher gering, um zeitnah eine Lokalisierung durchführen zu können. Die in die Berechnung einfließende Distanz d_f ist daher stark fehlerbehaftet.

$$P(d_f | d_e, \sigma_e) = \frac{1}{\sigma_e \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(d_f - d_e)^2}{2\sigma_e^2}} \quad (120)$$

In der Realität wird die Distanz in der Regel nicht direkt gemessen, sondern über Hilfsgrößen bestimmt. Eine typische Hilfsgröße ist die am Empfänger detektierte Signalstärke P_{RX} (vgl. Kap. 2.9). Da die Signalstärke P_{RX} quadratisch mit der Entfernung abnimmt (vgl. Gleichung 20), hat auch die Standardabweichung σ_{RX} der ebenfalls fehlerhaften Signalstärkemessung nichtlinearen Einfluss auf die resultierende Standardabweichung der Distanz σ_d (Abbildung 72).

Eine Nachricht mit einer geringen Empfangsstärke $P_{RX,1}$ kennzeichnet einen weit entfernten Sender mit der Distanz d_1 . Da die Messung jedoch mit σ_{RX} fehlerbehaftet ist, schwankt die ermittelte Distanz $d_{f,1}$ in 68,3% der Messungen im Bereich $2\sigma_{d_1}$. Die ermittelten Distanzen sehr nahe gelegener Sender ($P_{RX,2}$) besitzen im Gegensatz zu entfernten Sendern wesentlich kleinere Standardabweichungen σ_d wie Abbildung 72 am Beispiel der Distanzermittlung aus zwei Empfangsleistungen $P_{RX,1}$ und $P_{RX,2}$ und ihren Standardabweichungen illustriert. Die realitätsnahe Simulation erfordert daher eine in Abhängigkeit der Empfangsleistung P_{RX} steigende Standardabweichung σ_d , um das Verhalten des Lokalisierungsfehlers beurteilen zu können. Dazu muss zunächst aus den, nur der Simulationsumgebung bekannten, exakten Distanzen d_e eine Empfangsleistung P_{RX} berechnet werden, die zusätzlich mit einem Fehler Δp_{RX} verfälscht wird (vgl. Gleichung 20).

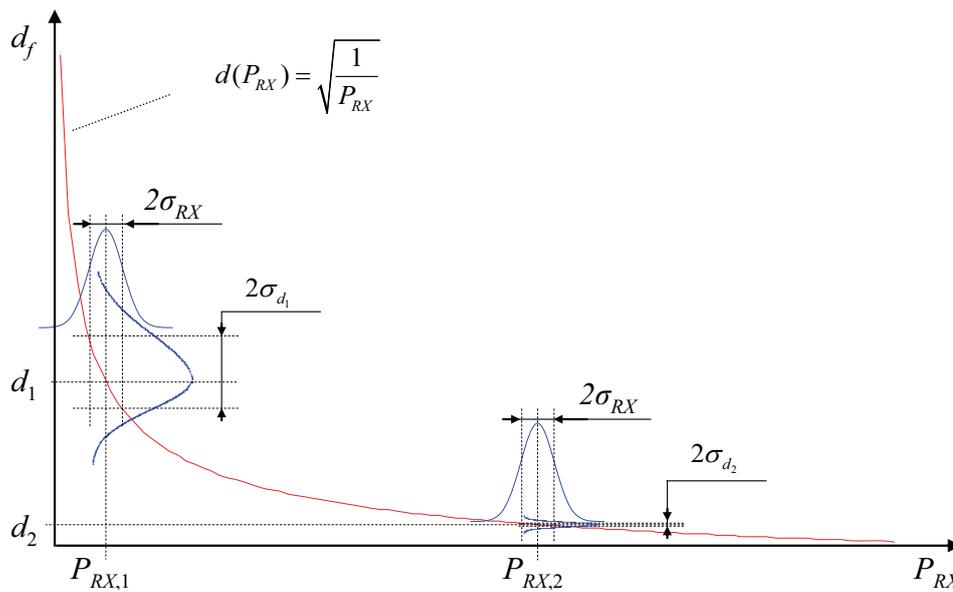


Abbildung 72: Distanz d und Standardabweichung σ_d in Abhängigkeit der empfangenen Signalstärke

$$P_{RX}(d) = \frac{K}{d_e^2} \quad K = \frac{G_{RX} G_{TX} P_{TX}}{L} \left(\frac{\lambda_0}{4\pi} \right)^2 \quad (121)$$

Die in Matlab programmierte Simulationsumgebung verwendet zur Fehlergenerierung die Funktion *normrnd()*, die normalverteilte Zufallswerte im Wertebereich $W \{ \infty \leq w \leq \infty \}$ mit σ_{rand} und dem Erwartungswert $\mu = d_e$ liefert. Die maximale Abweichung der Signalstärkemessung δ stellt die Laufvariable der Simulation dar und definiert somit die Standardabweichung der Signalstärkemessung σ_{RX} im Intervall $(0 \leq \sigma_{RX} \leq 0,2P_{RX,Max})$.

$$\sigma_{RX} = \sigma_{rand} \cdot \delta \quad (122)$$

Für die weitere Betrachtung werden die generierten Zufallswerte der *normrnd()*-Funktion auf den gewünschten zu simulierenden Fehlerbereich $F \{ \delta \leq \Delta p_{RX} \leq \delta \}$ abgebildet. In der Simulation kann somit die Abweichung der Empfangsleistung Δp_{RX} bestimmt werden.

$$\Delta p_{RX} = K (\text{normrnd}(1) \cdot 2\delta - \delta) \quad (123)$$

Durch Umformen der Gleichung 121 und Hinzufügen der Fehlerfunktion (Gleichung 123) entsteht die Formel zur Berechnung einer fehlerbehafteten Distanz d_f bei vorausgesetzter konstanter Standardabweichung σ_{RX} in der zugrunde liegenden simulierten Signalstärkemessung.

$$d_f = \sqrt{\frac{K}{P_{RX} \pm \Delta p_{RX}}} = \sqrt{\frac{1}{\frac{1}{d_e^2} + \text{normrnd}(1) \cdot \delta - \frac{\delta}{2}}} \quad (124)$$

Alle in einem Sensorknoten ermittelten Distanzen zu bekannten Beacons besitzen verschiedene Erwartungswerte $d_{e,i}$. Folglich gilt trotz konstanter maximaler Abweichung der Distanzmessung δ für jede exakte Distanz $d_{e,i}$ eine andere Standardabweichung $\sigma_{e,i}$. (Gleichung 122). Aufgrund der veränderlichen Standardabweichung $\sigma_{e,i}$ erfolgt der Vergleich der simulierten Lokalisierungsfehler über die normierte Standardabweichung $\sigma_{RX}(\delta)/P_{RX}(d_{e,i})$.

Abbildung 73 zeigt den Verlauf des durchschnittlichen und des maximalen Lokalisierungsfehlers in Abhängigkeit der Bitgenauigkeit bei einer relativen Standardabweichung von $\sigma_{RX}/P_{RX}(d_{e,i}) = 0,2$ in 10 Durchläufen. Die Kurve zeigt deutlich, dass unabhängig von der Bitgenauigkeit der verwendeten Datentypen die LS-Verfahren höhere Lokalisierungsfehler produzieren.

Noch deutlicher wird die Divergenz der Lokalisierungsfehler bei steigenden Standardabweichungen der Signalstärkemessung. Abbildung 74 zeigt deutlich, dass lediglich für relative Standardabweichungen $\sigma_{Rel} = \sigma_{RX}(\delta)/P_{RX}(d_{e,i}) < 0,15$ der Lokalisierungsfehler der LS-Verfahren geringer ist als der der WCL-Verfahren. Bei großen Standardabweichungen $\sigma_{Rel} \cong 0,15$ vergrößern sich jedoch die Lokalisierungsfehler so stark, dass der Einsatz unveränderter LS-Verfahren in Sensornetzwerken unsinnig ist. Der Grund liegt schlicht darin, dass die LS-Verfahren nur für exakte Distanzen korrekt konvergieren [Bro95]. Die fehlererhöhenden Effekte der LS-Verfahren bei hohen Standardabweichungen sind keinesfalls auf die exponentielle Abhängigkeit der Distanz vom Messwert zurückzuführen, denn sie sind ebenfalls bei linearen Abhängigkeiten nachweisbar.

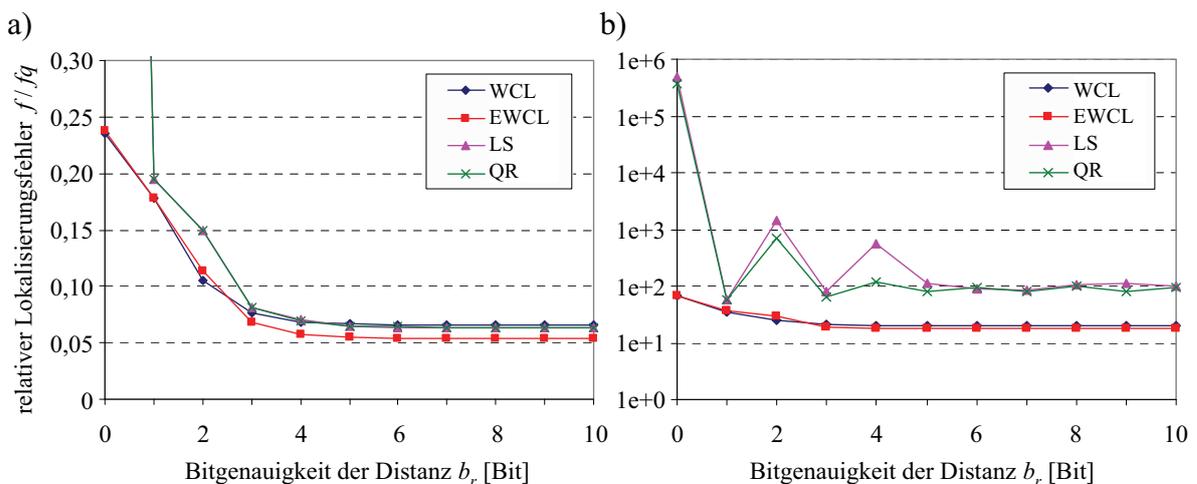


Abbildung 73: a) Durchschnittlicher und b) maximaler Lokalisierungsfehler in Abhängigkeit der Bitauflösung der gemessenen Distanz (Normalverteilung, $\sigma_{RX}=0,2P_{RX}(d_{e,i})$, $\sigma_{rand}(\delta)=0,2$ bzw. 20%) im endlichen Sensornetzwerk ($f_q \times f_q$) bei $tr=0,95f_q$, $w=1/d$, 10 Durchläufe

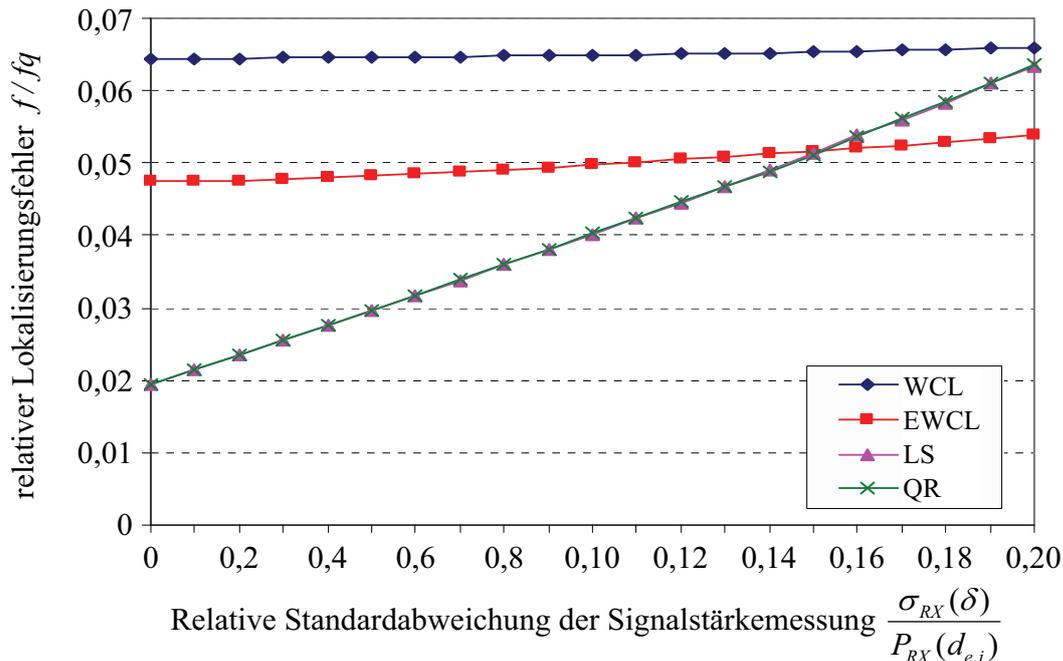


Abbildung 74: Durchschnittlicher Lokalisierungsfehler in Abhängigkeit der relativen Standardabweichung der Distanz $\sigma_{RX}(\delta)/P_{RX}(d_{e,i})$ im endlichen Sensornetzwerk ($f_q \times f_q$), 2×2 Beacons im Gitter angeordnet, Übertragungsreichweite $tr = 0,95f_q$, $w = 1/d$, 10 Durchläufe

Im Gegensatz zu den LS-Verfahren zeigen sich die WCL-Verfahren sehr robust gegenüber hohen Standardabweichungen. Dies ist begründet in der maßgeblichen Abhängigkeit der Lokalisierung von den empfangenen Beaconpositionen und den lediglich als entfernungsabhängiges Korrektiv in die Berechnung miteingehenden gemessenen Distanzen.

5.5 Kalibrierungsfehler

Messungen in realen Systemen sind grundsätzlich fehlerbehaftet. Sie unterliegen zufälligen und systematischen Fehlern. Zu den systematischen Fehlern zählen Fehler im Meßsystem, aber auch immanente Einflüsse der Umgebung auf die Messung, z. B. schwankende Signalstärkeabschwächungen durch inhomogene bzw. veränderte Übertragungsmedien. Diese Einflüsse können durch eine geeignete Kalibrierung abgemildert werden.

Die Lokalisierung der Sensorknoten benötigt immer zusätzliche über Messungen gewonnene Eingangsdaten. Da die Messung meistens nicht direkt, sondern über Hilfsgrößen (z. B. Signalstärkeabschwächung, Hop-Count) erfolgt, ist zusätzlich zur Kalibrierung des Messsystems eine geeignete Übertragungsfunktion in die Zielgröße erforderlich.

Für eine auf RSSI basierende Distanzmessung ist somit eine kontinuierliche Adaptierung der Übertragungsfunktion $d = f(P_{RX})$ erforderlich, denn durch die vielfältigen Umwelteinflüsse kann weder garantiert werden, dass der theoretisch quadratische Zusammenhang zwischen Leistung und Entfernung in der Praxis überhaupt detektiert werden kann, noch,

dass die Kennwerte der Medien den idealen Materialkonstanten entsprechen. Ebenso sind Einflüsse durch Hindernisse, Reflexionen und Interferenzen unvermeidlich. In der Praxis kann durch eine Kalibrierung lediglich eine Verringerung der Auswirkungen dieser Einflüsse erreicht werden, da eine Eliminierung ein perfektes Kalibrierungsmodell voraussetzen würde (vgl. Kap. 2.12). Eine Kalibrierung in Sensornetzwerken ist zudem neben fehlenden Modellparametern und aufgrund mangelhafter bzw. eingeschränkter Möglichkeiten der verwendeten Hardware in vielen Fällen oft nicht anwendbar bzw. wegen der großen Knotenmenge wirtschaftlich schlicht untragbar.

In fehlerhaft- bzw. nicht-kalibrierten Systemen stimmen die gemessenen Eingangsdaten nicht mit den tatsächlichen Gegebenheiten überein. Für die Lokalisierungsalgorithmen äußert sich dies meist in steigenden Lokalisierungsfehlern begründet durch

- Offsetfehler,
- Skalierungsfehler und
- nichtlineare bzw. nicht quadratische Zusammenhänge.

Offsetfehler entstehen in Systemen, in denen Messergebnisse auf der Ordinate um einen absoluten Betrag (Offset) verschoben und nicht korrigiert werden. Im Falle der Distanzbestimmung durch Signalstärkemessung (RSSI) kann dies durch eine nicht-kalibrierte Schaltung zur A/D-Wandlung der Empfangsleistung hervorgerufen werden.

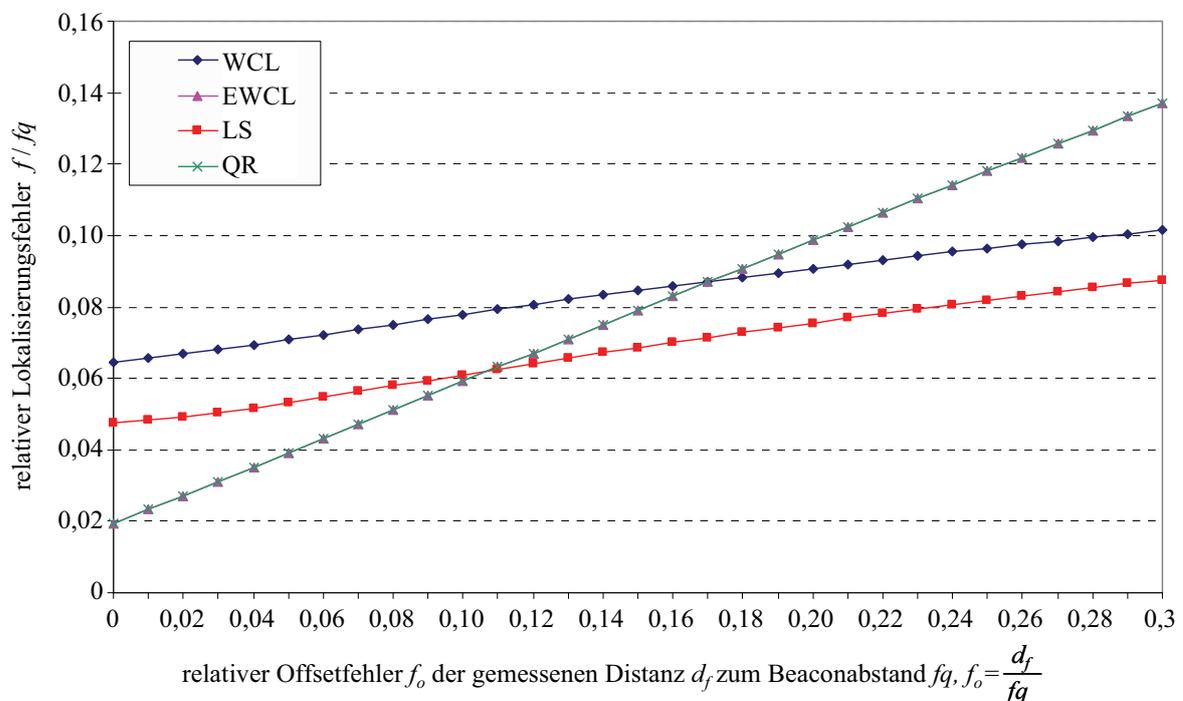


Abbildung 75: Abhängigkeit des Lokalisierungsfehlers vom Offsetfehler f_o (endliches Sensornetzwerk, Abmessung: $f_q \times f_q$, 2×2 Beacons, $tr = 0,95f_q$)

Die Lokalisierungsverfahren reagieren erwartungsgemäß empfindlich auf Offsetfehler. Abbildung 75 zeigt den durchschnittlichen relativen Lokalisierungsfehler ausgewählter Algorithmen in Abhängigkeit des Offsetfehlers. Für exakt gemessene Distanzen mit einem Offset $f_o = 0$ entspricht der Lokalisierungsfehler den minimalen Fehlern der Algorithmen (vgl. Gleichung 109 und Abbildung 74). Bei steigendem Offset zeigt sich die Anfälligkeit aller Algorithmen durch einen zunehmenden Lokalisierungsfehler. Die Zunahme ist jedoch unterschiedlich stark ausgeprägt. Bereits bei einem Offsetfehler $f_o = 11\%$ im Verhältnis zum Beaconabstand f_q ermittelt EWCL geringere Fehlerwerte als die LS-Verfahren (WCL: $f_o = 18\%$).

Die mathematischen Verfahren zur Lösung überbestimmter Systeme (LS- und QR-Verfahren) ermitteln die kleinsten Lokalisierungsfehler, wenn ermittelte und wahre Distanz im Verhältnis $s = d_f : d_e = 1:1$ stehen. Ändert sich das Verhältnis, tritt ein Skalierungsfehler auf. Eine falsche Skalierung gemessener bzw. ermittelter Distanzwerte zeigt deutliche Auswirkungen auf den resultierenden Lokalisierungsfehler. So steigt der Fehler der LS- bzw. QR-Verfahren bereits bei einer Änderung des Skalierungsverhältnisses von $\Delta s = 0,1$ und den dadurch ermittelten Distanzen $d_{f,1} = 0,9d_e$ bzw. $d_{f,2} = 1,1d_e$ (exakte Distanz $d_e = 1\text{m}$, $d_f = d_e \pm \Delta s \cdot d_e$) über den Fehler der Schwerpunktverfahren (WCL/EWCL) an [Blu07]. In nicht-kalibrierten Systemen mit hohen Skalierungsfehlern sind nicht-modifizierte LS-Verfahren folglich schwer einsetzbar.

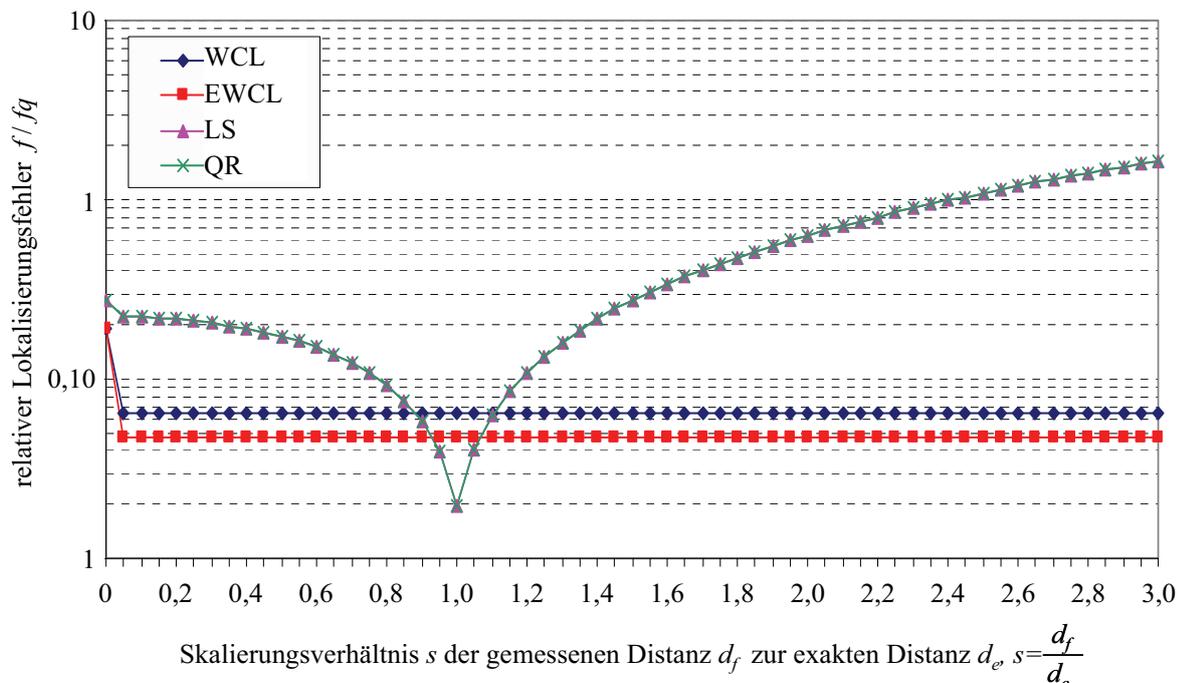


Abbildung 76: Abhängigkeit des Lokalisierungsfehlers vom Skalierungsverhältnis s (endliches Sensornetzwerk, Abmessung: $f_q \times f_q$, 2×2 Beacons, $tr = 0,95f_q$)

5.6 Einfluss unterschiedlicher Beaconanordnungen

In den bisherigen Betrachtungen wurden die Lokalisierungsfehler der Sensorknoten für Netzwerke mit im Gitter angeordneten Beacons bestimmt. Diese Anordnung ist jedoch für viele Anwendungsfälle aufgrund diverser Umgebungsbedingungen nicht immer angemessen, noch ist mit einer quadratischen Beaconanordnung der Nachweis einer hinreichend genauen Lokalisierung bzw. optimalen Anordnung erbracht worden.

Aus den in Kap. 4.3 dargelegten Überlegungen folgt, dass Beacons zur Minimierung des Lokalisierungsfehlers einer Gleichverteilung unterliegen sollten. Im eindimensionalen Fall entspricht dies auf einer Linie im Abstand fq angeordneten Beacons. In zweidimensionalen Anwendungen kann eine Gleichverteilung durch die regelmäßige Anordnung der Beacons im gleichseitigen Dreieck, im Quadrat oder im regelmäßigen Sechseck erfolgen (Abbildung 77a-c). Eine ebenfalls nahe liegende Anordnung besteht in dem zufälligen Verteilen der Beacons ($A_{\text{Zufällig}}$) wie in Abbildung 77d skizziert ist. Die Analyse der Teilfläche A_d lässt bereits die Vermutung zu, dass der Lokalisierungsfehler deutlich über dem der regelmäßig angeordneten Beacons liegen wird, da mehrere Bereiche im Netzwerk existieren, in denen Sensorknoten sehr wenige bis gar keine Nachbarbeacons besitzen.

Die in Abbildung 77 dargestellten Beaconverteilungen besitzen die gleiche Beacondichte μ_B , wenn die gekennzeichneten Abstände entsprechend beachtet werden. Für die quadratische Anordnung ergibt sich die Beacondichte gemäß Gleichung 90 aus vier Eckbeacons mit der Wichtung $w_{\text{Ecke}} = 0,25$ (vgl. Abbildung 54) pro Flächeneinheit.

$$\mu_{\text{Quadrat}} = \frac{\tilde{n}_{\text{Beacons,Quadrat}}}{A_{\text{Quadrat}}} = \frac{4 \frac{1}{4}}{fq^2} = \frac{1}{fq^2} \quad (125)$$

Für Anordnungen im Dreieck bzw. im Sechseck gilt analog:

$$\begin{aligned} \mu_{\text{Dreieck}} &= \frac{\tilde{n}_{\text{Beacons,Dreieck}}}{A_{\text{Dreieck}}} = \frac{3 \frac{1}{6}}{\frac{a \cdot 0,866h}{2}} = \frac{1}{0,866a^2} & A_{\text{Dreieck}} &= \frac{a \cdot h}{2}; h = 0,866a \\ \mu_{\text{Sechseck}} &= \frac{\tilde{n}_{\text{Beacons,Sechseck}}}{A_{\text{Sechseck}}} = \frac{6 \frac{1}{3}}{\frac{3}{2}b^2\sqrt{3}} = \frac{4}{3b^2\sqrt{3}} & A_{\text{Sechseck}} &= \frac{3}{2}b^2\sqrt{3} \end{aligned} \quad (126)$$

Das Gleichsetzen der Gleichungen μ_{Quadrat} mit μ_{Dreieck} sowie μ_{Quadrat} mit μ_{Sechseck} führt folglich zu den gesuchten Seitenlängen a und b .

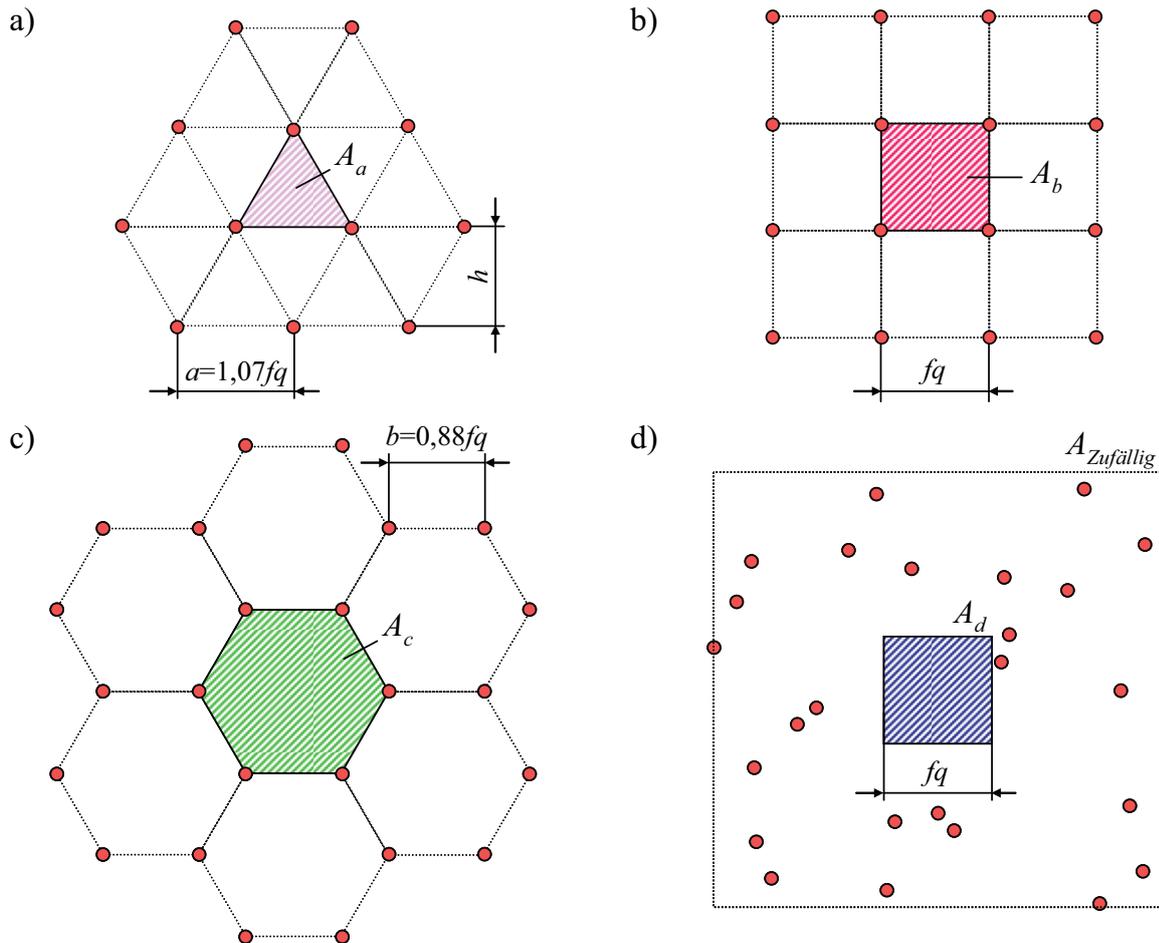


Abbildung 77: Gleichverteilte Beaconanordnungen bei identischer Beacondichte $\mu_B=1$ Beacon/ A_i im unendlich großen Netzwerk mit repräsentativem Netzwerkausschnitt (gefüllte Flächen)

$$a = \sqrt{\frac{fq^2}{0,866}} = 1,0745fq$$

$$b = \sqrt{\frac{4fq^2}{3\sqrt{3}}} = 0,8773fq$$
(127)

Die durchschnittliche Beacondichte der zufälligen Verteilung der Beacons (Abbildung 77d) entspricht im gezeigten Sensornetzwerkausschnitt dem eines Quadrates ($5fq \times 5fq$). Sie beträgt $\mu_{Zufällig} = 1$ Beacon/ fq^2 . Bei näherer Betrachtung der schraffierten Teilfläche A_d wird deutlich, dass sich für dieses exemplarische Teilgebiet eine äußerst geringe Beacondichte $\mu_{Zufällig} \approx 0$ ergibt, die einen sehr hohen Lokalisierungsfehler in dem Gebiet vermuten lässt. Im Folgenden soll untersucht werden, wie die Anordnung der Beacons bei gleicher Beacondichte den durchschnittlichen Lokalisierungsfehler in Abhängigkeit der Übertragungreichweite beeinflusst. Die Beacons wurden dazu in vier verschiedenen regelmäßigen

Strukturen (eindimensional: Linie; zweidimensional: Dreieck, Quadrat, Sechseck) angeordnet sowie zufällig positioniert. Da die zufällige Positionierung der Beacons jeweils nur einen Einzelfall darstellt und nicht reproduzierbar bzw. repräsentativ ist, ist ein einfacher Vergleich mit dem Lokalisierungsfehler der regelmäßigen Strukturen nicht zielführend. Die Simulation wurde daher für $n_{max} = 50$ zufällig erzeugte Konfigurationen durchgeführt. Die Mittelwerte dieser Simulationsreihe entsprechen dadurch aussagekräftigen Vergleichsgrößen, die eine Gegenüberstellung mit den regelmäßigen Strukturen ermöglichen.

Die ermittelten durchschnittlichen Lokalisierungsfehler verschiedener Beaconverteilungen sind für unendlich große Netzwerke in Abbildung 78 visualisiert. Es zeigt sich der bereits aus Abbildung 46 und Abbildung 65 charakteristische Verlauf des Lokalisierungsfehlers mit mehreren Minima und Maxima sowie tendenziell sinkendem Lokalisierungsfehler.

Bemerkenswert ist ebenfalls, dass im zweidimensionalen Anwendungsfall die quadratische Anordnung den besten Kompromiss aus kleinem Lokalisierungsfehler $f_{opt,1} = 0,064fq$ und geringer Übertragungsreichweite $tr_{opt,1} = 0,95fq$ darstellt. Das erste Minimum des Lokalisierungsfehlers der dreieckigen Anordnung liegt zwar bei $tr_{opt,2} = 0,82fq$ und ist damit kleiner als $tr_{opt,1}$, jedoch beträgt der Fehler $f_{opt,2}(tr_{opt,2}) = 0,0818fq$. Wesentlich ungünstiger im Vergleich zu den Anordnungen im Dreieck bzw. Quadrat zeigt sich die sechseckige Anord-

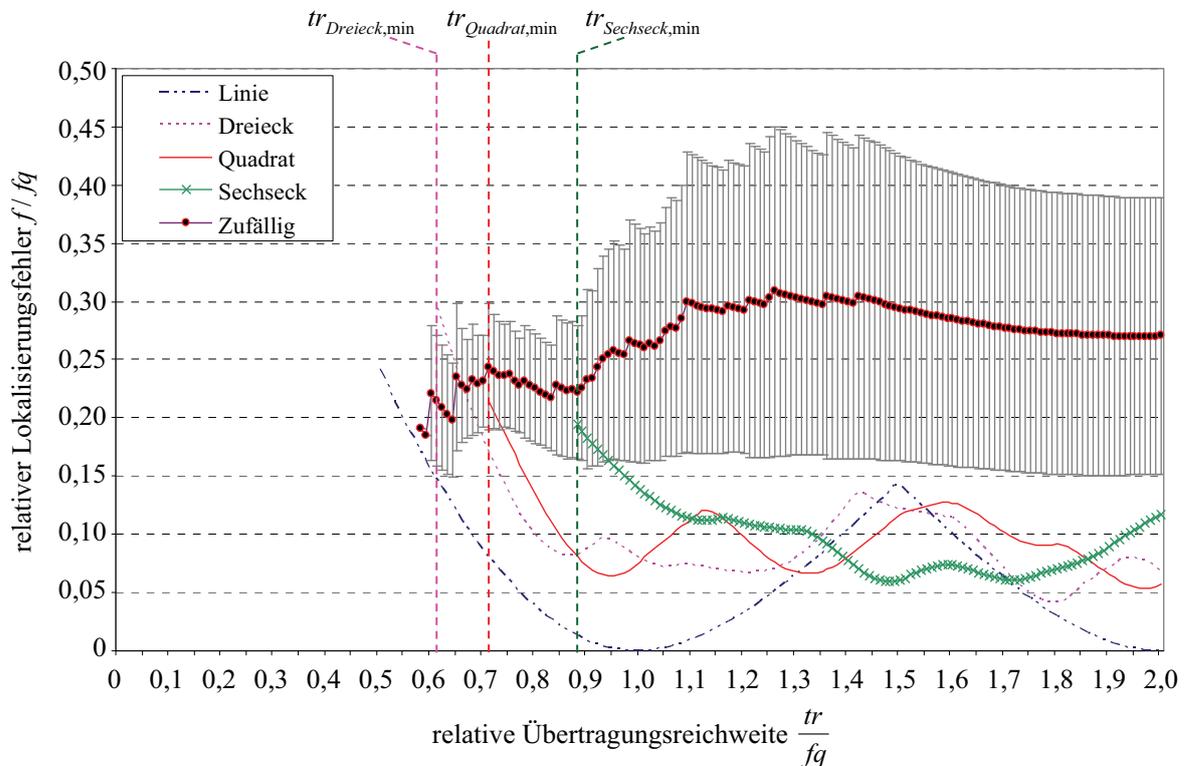


Abbildung 78: Lokalisierungsfehler verschiedener Beaconverteilungen in Abhängigkeit der relativen Übertragungsreichweite tr/fq bei konstanter Beacondichte $\mu = 1$ Beacon/ fq^2 (WCL-Algorithmus mit $g = 1$, unendliches Netzwerk), zufällige Beaconverteilung mit Varianzangabe

nung. Sie erreicht erst mit 1,5facher Übertragungreichweite den Fehler der quadratischen Beaconanordnung. Der Fehler steigt jedoch mit zunehmendem tr/fq wieder an. Besonders nachteilig bei der Anordnung im Sechseck ist zudem, dass nicht-lokalisierbare Sensorknoten erst mit $tr/fq > 0,88fq$ (vgl. Abbildung 77) ausgeschlossen werden können, die anderen Verteilungen jedoch für deutlich geringere minimale Übertragungreichweiten (vgl. Kap. 4.4) eine Lokalisierung garantieren (Tabelle 4).

Eine Ausnahme bildet die zufällige Anordnung der Beacons, da eine minimale Schwelle $tr_{d,min}$ von der Anordnung im Einzelfall abhängt und folglich stark um einen unbekanntem Erwartungswert schwankt. Eine deterministische Angabe einer minimalen Übertragungreichweite $tr_{d,min}$ ist daher nicht möglich. Die Simulation der 50 zufällig gleichverteilten Beaconanordnungen zeigt jedoch einen Zusammenhang zwischen der Anzahl der Konfigurationen und der Übertragungreichweite, um alle Sensorknoten im Netzwerk zu lokalisieren, und erlaubt somit implizit statistische Rückschlüsse auf die minimale Übertragungreichweite zufällig verteilter Beacons.

Tabelle 4: Minimale Übertragungreichweiten unterschiedlicher Beaconanordnungen zur Vermeidung nicht-lokalisierbarer Sensorknoten

Anordnung	$\frac{tr_{min}}{fq}$
Linie	0,5
Dreieck	0,61
Quadrat	0,71
Sechseck	0,88
Zufällig	(1,41)

Abbildung 79 zeigt für $0 < tr/fq < 0,58fq$, dass in keiner einzigen zufälligen Beaconanordnung alle Sensorknoten lokalisiert werden konnten. Selbst für $tr = tr_2 = fq$ konnten lediglich in $n_2 = 34$ 68% aller Konfigurationen alle Netzwerkteilnehmer vollständig lokalisiert werden. Erst bei $tr_3 = \sqrt{2}fq$ konvergiert der Zusammenhang gegen $n_{max} = 50$. Das heißt, dass sich in zufällig verteilten Systemen erst bei Übertragungreichweiten $tr \geq tr_3$ alle Sensorknoten mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit lokalisieren können. Eine deterministische Schwelle stellt dieser Grenzwert allerdings nicht dar.

Die unterschiedlichen Anordnungsvarianten der Beacons bewirken durch ihre charakteristische Geometrie bei gegebener konstanter Beacondichte sowie dem daraus resultierenden unterschiedlichen Beaconabstand (Dreieck: $a = 1,07fq$, Sechseck: $b = 0,88fq$, vgl. Abbildung 77a-c) eine teilweise deutliche Verschlechterung des Lokalisierungsfehlers im Randbereich endlicher Sensornetzwerke.

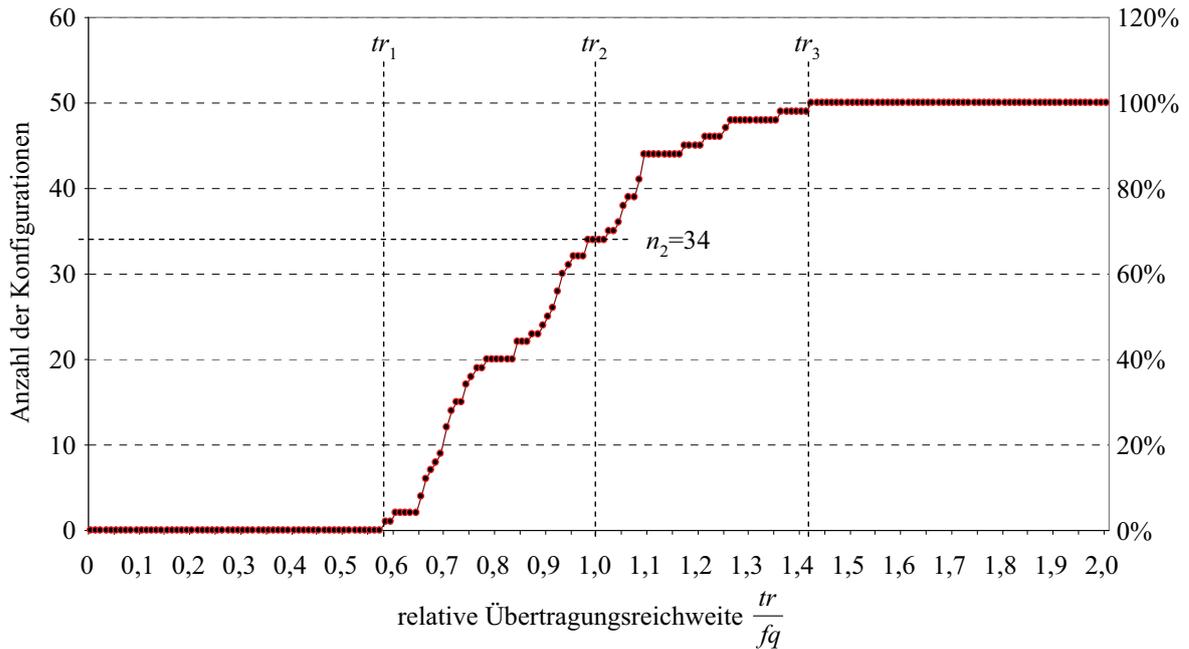
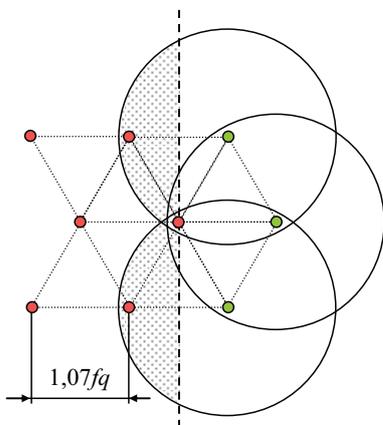


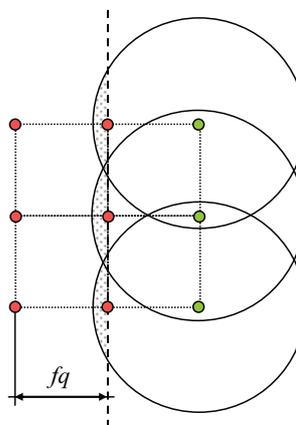
Abbildung 79: Anzahl zufälliger Beaconanordnungen ohne nicht-lokalisierte Sensorknoten (Unbekannte) in Abhängigkeit der Übertragungsreichweite tr/fq (WCL-Algorithmus mit $g=1$, unendliches Netzwerk, 2×2 Beacons im Abstand fq , $\mu_B = 1$ Beacons/ fq^2)

Für die Anordnung der Beacons im Dreieck treten im ungünstigsten Fall, d. h. der Randbereich beginnt unmittelbar an einem Beacon, bereits Randeffekte bei Übertragungsreichweiten $tr_{Dreieck,Rand} > 0,53fq$ auf (vgl. Abbildung 80a) und das, obwohl die minimale Übertragungsreichweite mit $tr_{Dreieck,min} = 0,61fq$ größer ist (Tabelle 4). Folglich treten bei der dreieckigen Beaconanordnung in endlichen Netzwerken grundsätzlich Randbereichsfehler auf. In der quadratischen Anordnung treten Randeffekte erst mit $tr_{Quadrat,min.} \geq fq$ auf.

a) Dreieck, $tr_{Dreieck,Rand} > 0,53fq$



b) Quadrat, $tr_{Quadrat,Rand} > 1,0fq$



c) Sechseck, $tr_{Sechseck,Rand} > 0,88fq$

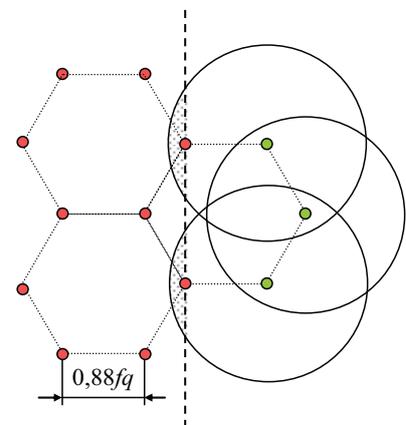


Abbildung 80: Gebiete (punktiert) eines endlichen Netzwerkes mit erhöhtem Lokalisierungsfehler verursacht durch die Lage am rechten Rand, bei Anordnung der Beacons a) im Dreieck b) im Quadrat c) im Sechseck

5.7 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde der Lokalisierungsalgorithmus Weighted Centroid Localization (WCL) vorgestellt. Dieser Algorithmus basiert auf der einfachen Schwerpunktbestimmung (CL), erhöht jedoch die ermittelte Positionsgenauigkeit gegenüber CL durch zusätzliche Einbeziehung gemessener Distanzen deutlich. Im realen Einsatz nähert sich die erreichte Genauigkeit in vielen Szenarien der Qualität mathematisch optimaler Verfahren wie der Methode der kleinsten Quadrate (LS) an und übertrifft diese bei extremen Randbedingungen sogar noch.

Die vorangegangenen Betrachtungen zeigen, dass sich vor allem für kleine Übertragungreichweiten, die im Sinne eines energiesparenden Einsatzes erwünscht sind, der Einsatz der LS-Verfahren nur in wenigen Fällen lohnt. Sie können aus der dann vorliegenden geringen Redundanz nur mäßig genaue Positionen bestimmen und divergieren unter Umständen. Somit empfiehlt sich ein Einsatz der WCL-Verfahren vor allem in Konfigurationen, in denen

- die resultierende Bitauflösung $b_r \leq 3\text{Bit}$ (Abbildung 71),
- die Standardabweichung der Distanzmessung $\sigma_{Rel} \geq 14\%$ (Abbildung 74),
- der Offsetfehler der Distanzmessung $f_o \geq 10\%$ (Abbildung 75),
- wenige Distanzinformationen zur Verfügung stehen $n \leq 4$ oder
- die Skalierung der Distanz $s \neq 1$ ist (Abbildung 76).

Die WCL-Verfahren sind zudem für Sensornetzwerke prädestiniert, weil sie einen wesentlich geringeren Rechenaufwand $O(n)$, einen konstanten Speicherverbrauch bei beliebig vielen Nachbarbeacons $O(1)$ haben und Eingangsdaten unterschiedlicher Bezugssysteme (Positionen sowie Hop-Counts) auswerten können. Sie zeichnen sich weiterhin dadurch aus, dass die Lokalisierung zu jeder Zeit abgebrochen werden oder durch Hinzufügen neuer Beacons sukzessive verfeinert werden kann.

6 Lokalisierung in der Praxis

In den theoretischen Betrachtungen der vorangegangenen Kapitel wurde eingehend die Lokalisierung von Sensorknoten unter zumeist idealen Bedingungen untersucht. Zusätzlich wurden die Auswirkungen unter praxisnahen Eingangswerten simuliert. Um die Effekte und teilweise massiven Auswirkungen dieser realitätsnahen Eingangsdaten zu verdeutlichen, wurden andere Simulationsparameter nicht verändert bzw. in einen idealen Zustand gesetzt.

In der Realität treten die untersuchten Phänomene (z. B. Bitgenauigkeit, Skalierungsfehler) jedoch vorwiegend gleichzeitig auf, was oft zu einer deutlichen Verschlechterung der Positionsgenauigkeit führt. Zudem lässt die Überlagerung der Einzelfehler kaum Rückschlüsse auf die Ursachen der Phänomene zu. Ein weiterer Grund liegt in der Abstraktion der Realität durch Bildung von Modellen, die zwar die Umwelt möglichst genau modellieren, jedoch grundsätzlich auch fehlerbehaftet sind. Ein typisches Beispiel dafür ist die theoretisch kreisrunde Ausbreitung eines Funksignals (vgl. Kap. 2.9), die in der Realität jedoch, bedingt durch zahlreiche Einflüsse, nicht erreicht werden kann. Erschwert wird die Lokalisierung zusätzlich durch die nicht vorhersehbare Dynamik der Systeme, z. B.

- der Mobilität einzelner Knoten, Bereiche oder des gesamten Netzwerkes,
- der Dynamik des untersuchten Gebietes,
- dem Ausfall von Sensorknoten oder
- Störungen (Interferenzen, extreme Temperaturschwankungen, Wassereinbruch).

Die zahlreichen Umgebungseinflüsse erschweren die Lokalisierung, aber sie machen die Positionsbestimmung nicht keinesfalls undurchführbar. Die in dieser Arbeit vorgestellten Distanz- und Lokalisierungsverfahren wurden deshalb auf ihre Einsatzfähigkeit in realen Umgebungen untersucht. Die dazu entwickelte Beispielanwendung enthält das Distanzermittlungsverfahren der minimalen Übertragungsleistung (MTP) und das Lokalisierungsverfahren der gewichteten Schwerpunktbestimmung (WCL).

6.1 Scatterweb-Plattform

Zur Durchführung des empirischen Nachweises wurden die zur Scatterweb-Plattform gehörenden Embedded Systems Boards (ESB) verwendet [Sch04]. Das ESB zeichnet sich vor allem durch seine zahlreichen integrierten Sensoren für Licht, Vibration, Bewegung und Temperatur aus (Abbildung 81).

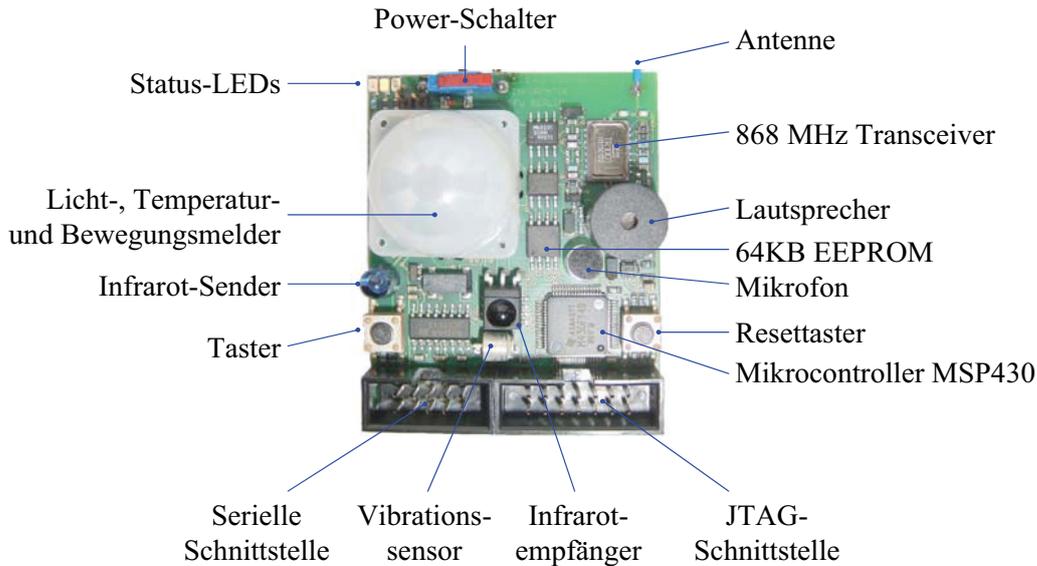


Abbildung 81: Embedded Sensor Board (ESB) der Firma Scatterweb [Sch04, Jer05]

Die Sensorknoten bestehen aus einem Mikrocontroller MSP430 von Texas Instruments [TI04]. Die Programmierung der Sensorknoten erfolgt durch kommerzielle Compiler [IAR00] oder aber über die frei verfügbare unter der GNU Public License (GPL) stehende Portierung des GNU-C-Compilers *mspgcc* [Und03]. Mit 2KB Datenspeicher und 60KB Programmspeicher steht ausreichend Kapazität für einfache Anwendungen, z. B. der Lokalisierung, zur Verfügung.

Die Lokalisierung einzelner Sensorknoten benötigt zusätzliche Eingangsdaten aus der Umgebung des Knotens, die er empfangen bzw. ermitteln muss. Valide Größen sind in Abhängigkeit des Algorithmus und der verwendeten Hardware z. B. Distanzmessungen, implizite Ortsangaben oder die Kenntnis zusätzlicher Referenzpunkte.

Tabelle 5: Technische Daten des Embedded Sensor Boards (ESB)

Eigenschaft	Kennwert
Prozessor	MSP430 [TI04]
Takt	bis 8MHz
Energiezufuhr	3x1,5V AA-Batterien externe Spannungsversorgung
Programmspeicher	60KB Flash, 64KB EEPROM (optional)
Arbeitsspeicher	2KB
Funkschnittstelle	868 MHz (lizenzfreies Band)
Integrierte Sensoren	Temperatur, Vibration, Bewegung, Lichtstärke
Preis/Stück	ca. 130,- EUR

Das eingesetzte Verfahren Weighted Centroid Localization (WCL) stellt per Protokoll sicher, dass bei geeigneter Konfiguration alle Sensorknoten die Position weiterer Referenzknoten (Beacons) empfangen können. Die Genauigkeit des Verfahrens erhöht sich zusätzlich, wenn eine Distanzmessung zum sendenden Beacon durchgeführt werden kann. Diese Distanzmessung erfolgt auf Basis der minimalen Übertragungsleistung (vgl. Kap. 2.10).

6.2 Lokalisierungssystem

Die Beispielanwendung besteht aus einem Sensornetzwerk basierend auf ESB-Sensorknoten mit vier unbeweglichen Beacons ($B_1..B_4$) und einem mobilen Sensorknoten (Sk_1). Die vier Beacons sind an den Ecken eines Quadrates der Seitenlänge $f_q = 3\text{m}$ positioniert (Abbildung 82). Ihre Position wurde im Vorfeld des Versuchs ausgemessen, fest einprogrammiert und ist somit unveränderlich.

Die Beacons nutzen 3 AA-Batterien als Energiequelle und arbeiten vollständig autark. Der mobile Sensorknoten wird ebenfalls über Batterien mit Energie versorgt. Er überträgt jedoch seine Position über die serielle Schnittstelle drahtgebunden an eine Basisstation. Diese Basisstation wertet die Pakete aus und leitet sie an die Evaluierungssoftware EnviSense [Blu05b] bzw. SpyGlass [Bus05] weiter. Diese Programme dienen der grafischen Darstellung und Auswertung des Netzwerkes.

Alle Sensorknoten befinden sich in einer Ebene auf Holztischen in 80cm Höhe über dem Fußboden eines Gebäudes (Abbildung 83). Auf diese Weise können störende Einflüsse bei der Funkübertragung durch Flächen gleichen Potentials und Reflexionen der Funksignale in unmittelbarer Nähe der Beacons reduziert aber nicht eliminiert werden.

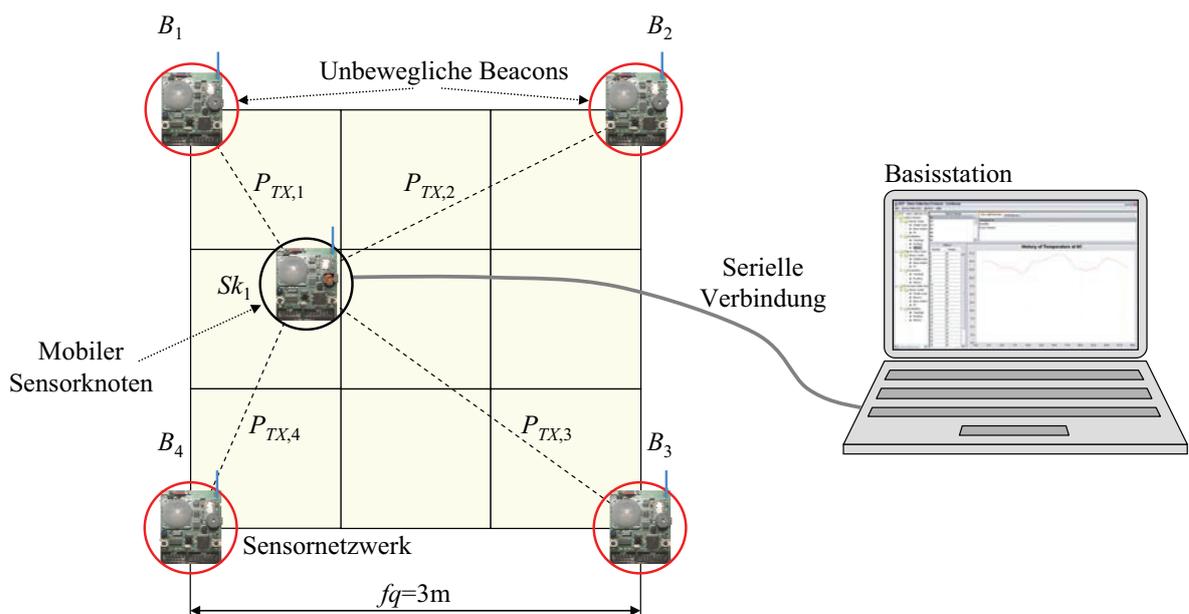


Abbildung 82: Versuchsaufbau des Lokalisierungssystems bestehend aus vier unbeweglichen Beacons $B_1..B_4$ und einem beweglichen Sensorknoten Sk_1

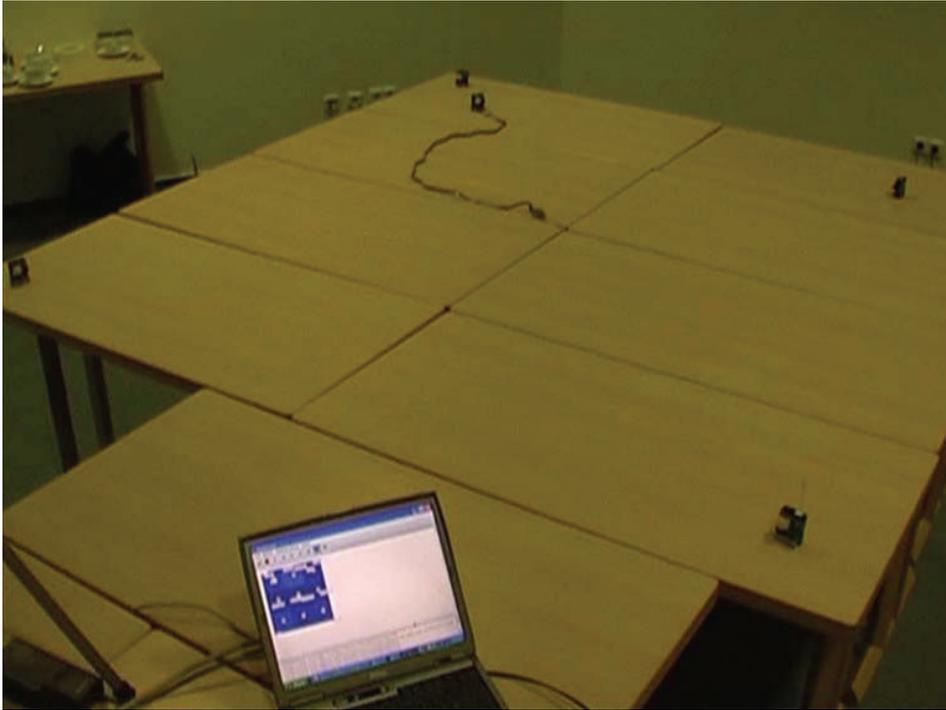


Abbildung 83: Versuchsaufbau des Lokalisierungssystems

6.3 Beaconsoftware

Die Lokalisierung, basierend auf der gewichteten Schwerpunktbestimmung, erfordert für Beacons und Sensorknoten unterschiedliche Software. Die Hauptaufgabe der Beacons besteht primär in der Übertragung der eigenen Position (vgl. Algorithmus 2). Da jedoch als Verfahren der Distanzermittlung zwischen einem Sensorknoten i und einem Beacon j die für den korrekten Empfang einer Nachricht minimal erforderliche Übertragungsleistung $P_{TX,min,i,j}$ verwendet werden soll, muss der ursprüngliche Programmablauf ergänzt werden. Damit alle Sensorknoten im Netzwerk die Nachricht eines Beacons empfangen können und gleichzeitig die Distanz anhand der minimalen Übertragungsleistung bestimmen können, müssen folglich alle Beacons ihre Positionsnachrichten, wie eingangs in Kap.2.10 beschrieben, mit sukzessiv steigenden Übertragungsreichweiten senden bis tr_{max} (Gleichung 67) erreicht ist. Gegenüber der auf RSSI basierenden Distanzbestimmung erhöht sich folglich die Anzahl der Positionsnachrichten $n_{min,tr}$ in einem Netzwerk aus b Beacons deutlich.

$$\begin{aligned}
 n_{RSSI} &= b \\
 n_{min,tr} &= \frac{P_{TX,max} - P_{TX,min}}{P_{TX,Schritt}} b
 \end{aligned}
 \tag{128}$$

Die hohe Anzahl an Übertragungen $n_{min,tr}$ erfordert zusätzlich effiziente Kanalzugriffsverfahren, um Kollisionen wirksam zu vermeiden. Wenn der Zugriff auf die MAC-Schicht

nicht möglich ist, kann die Kollisionsvermeidung auch durch geeignete Protokolle der Anwendungsschicht kompensiert werden. Eine Möglichkeit besteht darin, ein dem Token-Ring-Verfahren [IEEE98] nachempfundenen Verfahren zu implementieren, bei dem sichergestellt ist, dass nur Beacons senden dürfen, die ein gültiges Token besitzen.

Die Software der Beacons unterteilt sich in drei große Abschnitte: die Initialisierung und die zwei Interrupthandler, die bei Timerüberlauf und bei eingehenden Nachrichten ausgelöst werden. In der Initialisierungsphase wird aus dem gespeicherten Identifier (ID) die Position ermittelt. Zusätzlich wird dem Beacon mit dem kleinsten Identifier der aktuell gültige Token zugewiesen. Seine Zustandsmaschine wird in den Status "Token erhalten" gesetzt. Alle anderen Beacons erhalten zunächst den Zustand "Kein Token". Diese Zustandsmaschine wird im Timerinterrupt verwaltet und stellt sicher, dass das Token zwischen den Beacons zirkuliert und die Synchronisation bei Verlust bzw. mehrfach auftretenden Tokens (Abbildung 84) reguliert wird.

Beacons, die ein gültiges Token besitzen, dürfen ihre Positionsnachrichten entsprechend den eingestellten Grenzwerten mit steigenden Übertragungsleistungen senden (Abbildung 85). Nach Beendigung des Übertragungsvorganges (Runde) müssen sie das Token an den nächsten Beacon in der Tokenreihenfolge weiterreichen.

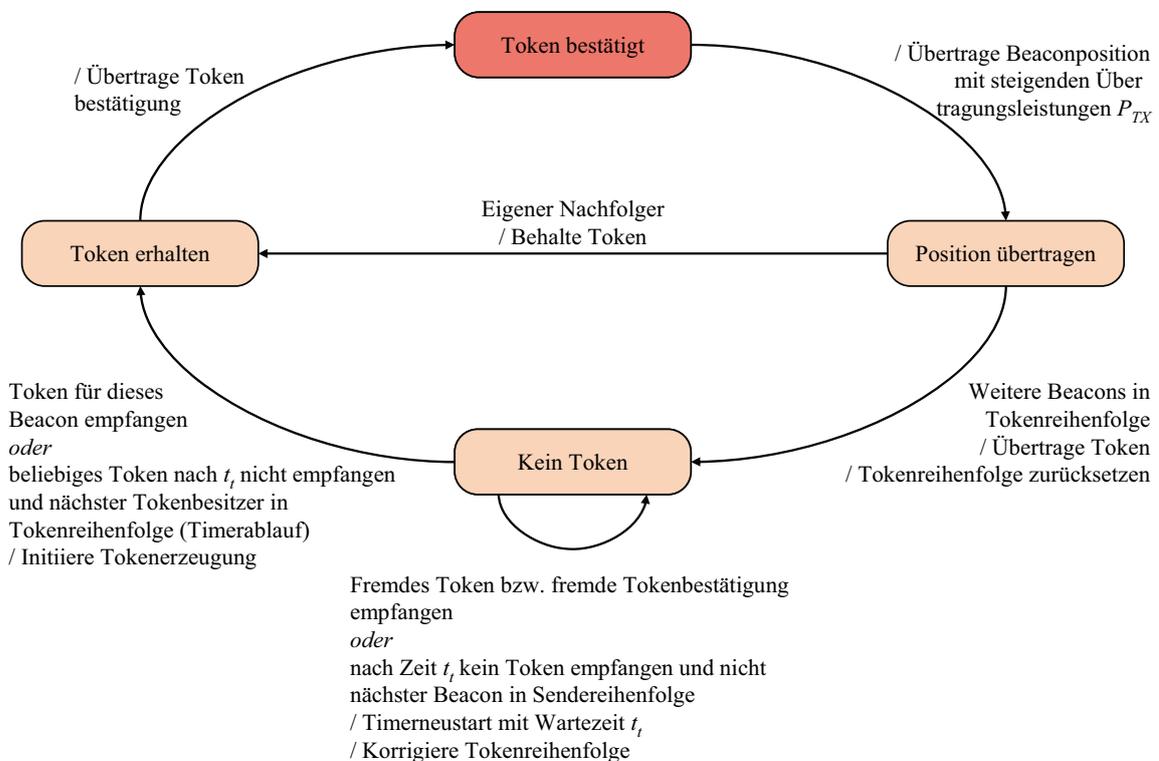


Abbildung 84: Zustandsmaschine der Beacons

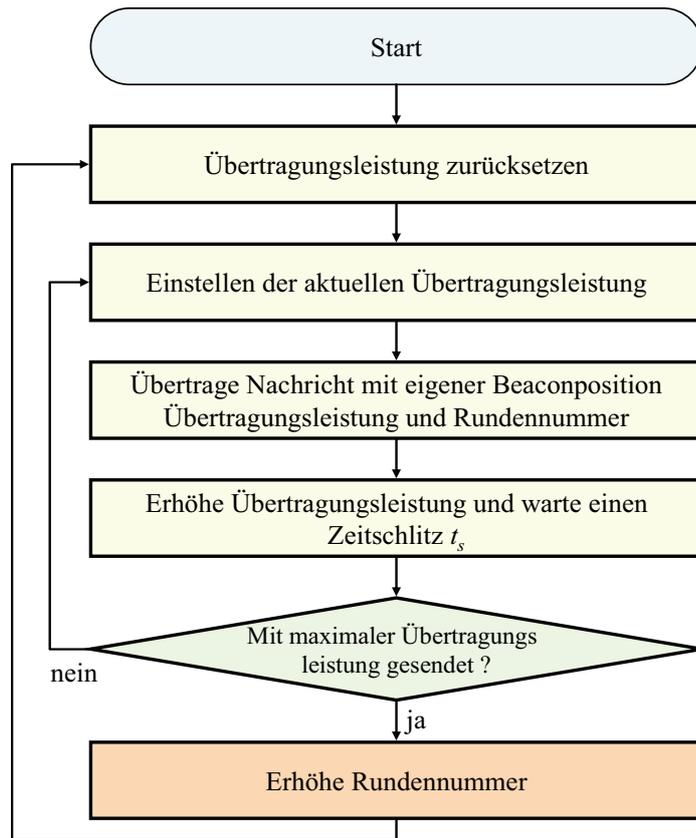


Abbildung 85: Ablaufdiagramm eines Beacons (Hauptprogramm)

Die zweite Interrupt-Service-Routine (ISR) wird aufgerufen, wenn Nachrichten empfangen werden. Sie initiiert ausgehend vom Nachrichteninhalt die Übergänge der Zustandsmaschine in „Token erhalten“ bzw. „Kein Token“. Der Empfang von Nachrichten dient, wenn kein Token und auch keine Tokenbestätigung empfangen wurde, gleichzeitig als Synchronisationsstartpunkt der Timeouts für eine eventuell notwendige Tokengenerierung.

Das Token-Ring-Verfahren bewirkt einen höheren Kommunikationsaufwand verursacht durch die Weitergabe der Tokens. Im Idealfall erhöht sich die minimale Anzahl der Übertragungen dadurch um 2 Nachrichten (Token und Tokenbestätigung) pro Beacon. Geht jedoch ein Token verloren, steigt der Kommunikationsaufwand deutlich.

6.4 Sensorknotensoftware

Eine Positionsnachricht enthält neben der fest definierten Position des Beacons auch einen Rundenzähler RZ und den Wert der Variablen TP_j , der die eingestellte Sendeleistung P_{TXj} des Beacons j symbolisiert. Nach dem Empfang einer Beaconnachricht speichern die Sensorknoten die Position des Beacons, vergleichen, falls vorhanden, eine bereits gespeicherte Sendeleistung $P_{TXj,min}$ dieses Beacons mit der in der Nachricht gespeicherten Sendeleistung P_{TXj} und speichern den kleineren Leistungswert ebenfalls (vgl. Abbildung 87).

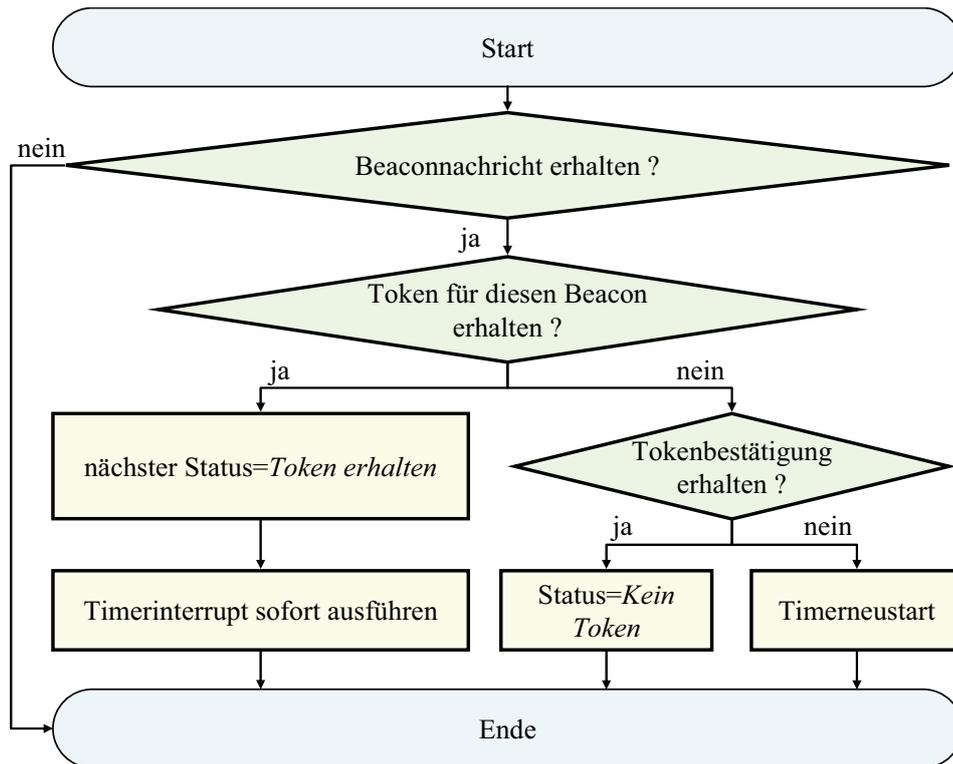
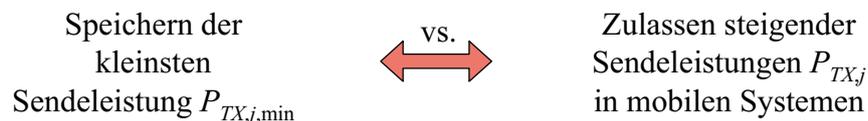


Abbildung 86: Ablaufdiagramm der ISR auf den Beacons bei Empfang einer Nachricht

In dynamischen Systemen muss jedoch, bedingt durch die mögliche Änderung der Sensorknotenpositionen und den dadurch potenziell größeren Distanzen zu den Beacons, auch die Speicherung höherer Leistungswerte zulässig sein. Dieser Widerspruch



wird durch die Einführung des Rundenzählers RZ aufgelöst. Ein Rundenzähler wird auf jedem Beacon instanziiert und mit Erhalt eines Tokens inkrementiert. Auf den Sensorknoten wird er zusammen mit den Positionen der Beacons abgespeichert. Die empfangene Sendeleistung $P_{TX,j}$ darf in solchen Systemen nur noch gespeichert werden, wenn

- a) beide Rundenzähler RZ_j gleich sind und $P_{TX,j}$ kleiner als die gespeicherte Leistung $P_{TX,j,min}$ ist oder
- b) der neue Rundenzähler RZ_j größer als der gespeicherte RZ_j ist.

In mobilen Systemen müssen zudem Positionen von Beacons verworfen werden, wenn sie den Empfangsbereich des Sensorknotens verlassen haben. Erkannt wird das Verlassen des Empfangsbereiches, wenn über eine festgelegte Rundenanzahl ΔRZ keine Positionsnachrichten eines Beacons mehr eintreffen. Dies ist notwendig, da sonst keine korrekte bzw. keine aktualisierende Lokalisierung mehr möglich wäre.

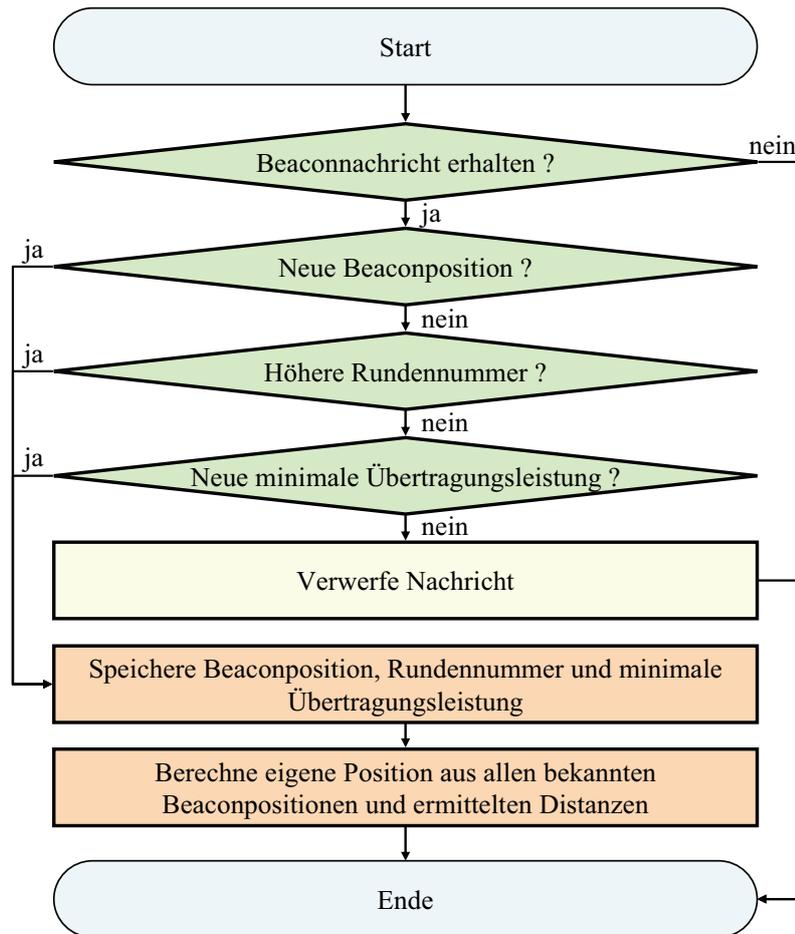


Abbildung 87: Ablaufdiagramm der Interrupt Service Routine eines mobilen Sensorknotens

Die ermittelten minimalen Übertragungsleistungen der einzelnen Runden unterliegen einer unerwünschten Varianz (vgl. Abbildung 21). Da die zu speichernden Leistungswerte kontinuierlich eintreffen, kann über längere Zeit ein gleitender Durchschnitt $aP_{TX,j,RZ}$ aus dem bereits gespeicherten Durchschnitt $aP_{TX,j,RZ-1}$ und dem minimalen Leistungswert einer Runde $P_{TX,j,min}$ gebildet werden (Gleichung 130). Dieser Durchschnitt wirkt gegenüber den Einzelmessungen wie ein Tiefpassfilter, indem er schwankende Leistungswerte glättet.

$$aP_{TX,j,RZ} = (1 - \alpha) aP_{TX,j,RZ-1} + (\alpha) P_{TX,j,min} \quad (129)$$

Das Verhältnis α bestimmt, mit welcher Wichtung neue Leistungswerte in die Filterung eingehen. Tendiert $\alpha \rightarrow 1$, reagiert das System sehr schnell auf Änderungen. Es findet jedoch faktisch keine Filterung statt, da die neuen Leistungswerte sofort durch $aP_{TX,j,RZ}$ übernommen werden. Läuft dagegen $\alpha \rightarrow 0$, stagniert das System. Neue Leistungswerte haben dann kaum noch Einfluss auf den gespeicherten Leistungswert $aP_{TX,j,RZ}$. Ein empirisch ermitteltes Verhältnis von α 0,75 stellt einen ausgewogenen Kompromiss aus beiden Tendenzen dar.

$$aP_{TX,j,RZ} = 0,25 aP_{TX,j,RZ-1} + 0,75P_{TX,j,min} \quad (130)$$

Der Vorteil des Verfahrens besteht in dem Verzicht auf zusätzlichen Datenspeicher und seinem sehr geringen Rechenaufwand bei $\alpha = 0,25$. Der Filter benötigt lediglich zwei Schiebebefehle (Multiplikation mit $1 - \alpha$), eine Multiplikation ($3 \cdot (1 - \alpha)$) und eine Addition. Nachteilig ist jedoch, dass die Lokalisierung durch die zeitverzögerte Korrektur des Leistungswertes $aP_{TX,j,RZ}$ bei mobilen Sensorknoten sehr langsam wird.

Die Umrechnung aus den Leistungswerten in exakte Distanzwerte der SI-Einheit Meter kann vollständig entfallen. Das resultiert aus der Untersuchung des Lokalisierungsfehlers vs. des Skalierungsfehlers aus Kap. 5.5, Abbildung 76, wenn die in die Berechnung einfließenden Distanzwerte d_i linear mit der wahren Distanz $d_{e,i}$ steigen. Die Kalibrierung der Sensorknoten reduziert sich folglich in diesem System auf die Überprüfung des in Gleichung 131 angegebenen Zusammenhanges.

$$d_i = \sqrt{aP_{TX,j,RZ}} \quad (131)$$

Aufgrund der Tiefpassfilterung zur Berechnung des gleitenden Durchschnitts $aP_{TX,i}$ (Gleichung 130) konvergierte die Positionsermittlung erst nach ca. $t = 10s$ [Blu05c]. Der Grund für diese Verzögerung liegt ursächlich in der hohen Anzahl von Nachrichten, die jeder Beacon senden muss, bis sich die berechnete Position nach mehreren Runden der wahren Position nähert. Diese erhebliche Latenz in der Berechnung und der hohe Energieverbrauch durch die Vielzahl an Übertragungen reduzieren die Einsatzmöglichkeiten des Verfahrens der minimalen Übertragungsleistung gegenüber anderen Distanzermittlungsverfahren signifikant. Das Verfahren eignet sich jedoch sehr gut für Systeme, in denen andere Distanzermittlungsverfahren, z. B. Messung der Empfangsleistung, mangels Hardwareunterstützung nicht eingesetzt werden können oder eine sehr hohe Varianz gegenüber MTP aufweisen (vgl. Abbildung 21 und Abbildung 17).

Die Lokalisierung der Sensorknoten basiert auf der in Kapitel 5 vorgestellten gewichteten Schwerpunktbestimmung (WCL) mit einem voreingestellten Gewicht $w = 1/d$ (siehe Kap. A.2). Die Positionsberechnung ermittelt trotz eines eventuell vorhandenen Skalierungsfehlers korrekte Positionen in derselben SI-Einheit, die auch den Beaconpositionen zugrunde liegt, vorausgesetzt das Skalierungsverhältnis s (vgl. Kap. 5.5) ist für alle Beacons gleich. Die Positionsgenauigkeit konnte im Versuch mit einem durchschnittlichen Fehler $f \approx 0,35m$ bei einem Beaconabstand von $f_q = 3m$ ermittelt werden.

6.5 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde der prototypische Aufbau eines einfachen Sensornetzwerkes beschrieben. Die Beispielanwendung demonstriert sehr anschaulich, dass mit sehr geringem Aufwand in der Praxis eine genaue Lokalisierung von Sensorknoten mit der gewichteten Schwerpunktbestimmung (WCL) erreicht werden kann. Die Genauigkeit hängt dabei entscheidend vom eingesetzten Distanzermittlungsverfahren ab. Das in diesem Demonstrator verwendete Verfahren der minimalen Übertragungsleistung ermöglichte einen durchschnittlichen Fehler von ca. $f \approx 0,1fq$, das dem theoretisch berechneten Minimum $f = 0,064fq$ (Gleichung 109) trotz realer Umgebungseinflüsse sehr nahe kommt.

Diese Beispielanwendung verdeutlicht ferner, dass eine dezentrale und robuste Lokalisierung ohne Basisstation und damit ohne kommunikationsbedingte Flaschenhalseffekte umsetzbar ist. Der vorgestellte Versuchsaufbau setzt lediglich für wenige Beacons im Netzwerk bekannte Positionen voraus.

Das in diesem konkreten Fall eingesetzte Distanzermittlungsverfahren der minimalen Übertragungsleistung benötigt zwar ein vorkonfiguriertes Verfahren zur Kollisionskontrolle (Token-Ring), das jedoch dezentral auf den Beacons abgearbeitet wird und durch eine eventuell notwendige Tokengenerierung robust hinsichtlich des Ausfalls einzelner Beacons ist. Bei Einsatz anderer Distanzermittlungsverfahren kann auf dieses Verfahren zur Kollisionskontrolle unter Umständen sogar ganz verzichtet werden.

7.1 Ergebnisse

Sensornetzwerke unterscheiden sich von anderen Netzwerken u. a. durch ihre extreme Ressourcenlimitierung und die hohe Anzahl von Sensorknoten. Eine Teilaufgabe dieser autarken Sensorknoten besteht in dem Ermitteln ihrer eigenen Position. Die dazu notwendigen Lokalisierungsverfahren unterliegen ebenfalls, wie alle anderen Algorithmen und Bauelemente, den starken Einschränkungen durch knappe Datenspeicher, geringe Kapazität der Energiequellen, schmale Bandbreiten und limitierte Übertragungskanäle.

In der vorliegenden Arbeit wurden verschiedene publizierte Distanzermittlungsverfahren als Voraussetzung zur Lokalisierung untersucht. Alle analysierten Verfahren sind durch spezifische Einschränkungen gekennzeichnet, die ihre Einsatzmöglichkeiten deutlich reduzieren. Das neu entwickelte Verfahren auf Basis der minimalen Übertragungsleistung (MTP) eliminiert einige Fehlerquellen der weit verbreiteten Empfangsfeldstärkemessung, denn es verzichtet vollständig auf die A/D-Wandlung und arbeitet somit auch ohne zusätzliche Beschaltung. Ein Nachteil des Verfahrens besteht in dem höheren Energieverbrauch durch die zahlreichen notwendigen Funkübertragungen, wodurch es lediglich für statische Netzwerke geeignet ist.

Den Kern der Arbeit bildet die ressourcenarme Lokalisierung von Sensorknoten. Basierend auf der Analyse etablierter Lokalisierungsverfahren wird anschaulich dargelegt, dass deren Implementierung aufgrund der vielen Randbedingungen (geringer Energievorrat, limitierter Datenspeicher, geringe Bandbreite usw.) vielfach unrealistisch bzw. nicht sinnvoll ist.

In Sensornetzwerken mit geringen Genauigkeitsanforderungen kann auch der Lokalisierungsalgorithmus basierend auf der einfachen Schwerpunktbestimmung (CL) verwendet werden, der aus den Positionen bekannter Referenzknoten die Knotenposition ermittelt. Dieses Verfahren ist sehr einfach zu implementieren, verzichtet auf explizite Distanzmessungen sowie bidirektionalen Nachrichtenaustausch und ermöglicht akzeptable Positionsfehler. Diese können jedoch nur bei der hergeleiteten optimalen Übertragungsreichweite der beteiligten Referenzknoten erreicht werden - anderenfalls divergiert der Fehler sehr stark. Es wurde zudem nachgewiesen, dass der relative Lokalisierungsfehler lediglich vom Verhältnis der Übertragungsreichweite und dem Abstand der Beacons abhängig ist.

Die in sehr großen Netzwerken auftretenden weiteren optimalen Übertragungsreichweiten können den Lokalisierungsfehler weiter verringern, aber nur mit erheblichem Energieaufwand. Zur Bewertung des Lokalisierungsfehlers und des zur Berechnung nötigen Energieaufwandes wurde daher das Power-Error-Product (PEP) vorgestellt. Das PEP zeigte, dass zumeist die erste optimale Übertragungsreichweite den besten Kompromiss darstellt.

Eine deutliche Schwäche des CL-Verfahrens besteht in dem höheren Positionierungsfehler in den Randgebieten eines begrenzten Sensornetzwerkes. Das neu präsentierte Verfahren Centroid Localization with Edge Correction (CLwEC) reduziert diesen randbedingten Fehler erheblich. Die dazu notwendigen Modifikationen am originalen Schwerpunktverfahren führen nur zu geringfügig höheren Ressourcenanforderungen, die sich in minimalem Speichermehrbedarf und längeren Nachrichten äußern. Es ist daher für ressourcenlimitierte Sensornetzwerke prädestiniert.

Eine weitere Verbesserung des CL-Verfahrens wurde durch die Überführung der einfachen in eine gewichtete Schwerpunktbestimmung (Weighted Centroid Localization, WCL) erreicht. Es wurde nachgewiesen, dass unterschiedliche Gewichtsfunktionen den Positionierungsfehler maßgeblich reduzieren und bei für Sensornetzwerke typischen fehlerbehafteten Distanzmessungen mit hoher Varianz die Genauigkeit einer Trilateration erreichen können. Die Betrachtungen bestätigten außerdem, dass auch für den WCL-Algorithmus optimale Übertragungreichweiten der Referenzknoten existieren, die eine Fehlerminimierung in Abhängigkeit der Gewichtsfunktion erlauben. Es wurde gezeigt, dass diese optimalen Übertragungreichweiten abhängig von der Anordnung der Referenzknoten sind. Bei gleicher Beacondichte ergibt die quadratische Anordnung der Beacons die geringsten Fehler.

Ein weiterer Vorteil des WCL-Verfahrens besteht darin, dass die ressourcensparenden Eigenschaften der einfachen Schwerpunktbestimmung trotz höherer Genauigkeit beibehalten werden konnten. Somit ist eine energiesparende Lokalisierung in ressourcenarmen Netzwerken mit hinreichender Genauigkeit gegeben.

Abgerundet wurde die Arbeit mit der Vorstellung einer im Einsatz befindlichen Beispielanwendung, die das Distanzermittlungsverfahren basierend auf der minimalen Übertragungsleistung demonstriert. Die dynamisch ermittelten Distanzwerte bilden trotz sichtbarer Varianz die Voraussetzung für eine beeindruckende Positionsgenauigkeit des WCL-Lokalisierungsverfahrens.

7.2 Ausblick

Das präsentierte Korrekturverfahren für Positionen von Randknoten besitzt durch die Maßgabe der Implementierungskompatibilität zur einfachen Schwerpunktbestimmung derzeit noch Potenzial zu höheren Genauigkeiten, da durch die binären Nachbarschaftsvektoren der Beacons viele Umgebungsinformationen ungenutzt bleiben. Für das WCL-Verfahren existieren bisher keine Verfahren zur Positionskorrektur von Randknoten. Aktuelle Arbeiten an einer analytischen Gradientenmethode lassen einen deutlich geringeren Lokalisierungsfehler der CL- und WCL-Verfahren erwarten. Zukünftige Arbeiten sollten sich zudem auf eine geeignete Adaptierung der Gewichtsfunktion der WCL-Verfahren konzentrieren, da dadurch möglicherweise die Lokalisierungsgenauigkeit nochmals erhöht werden kann.

Literatur

- [Akk03] K. Akkaya, M. Younis: „A Survey on Routing Protocols for Wireless Sensor Networks”, Ad Hoc Networks, Elsevier, 2003.
- [Aky02] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci: „A Survey on Sensor Networks”, IEEE Communications Magazine, pp. 102-114, August 2002.
- [Anj05] F. Anjum, S. Pandey, P. Agrawal: „Secure Localization in Sensor Networks using Transmission Range Variation”, 2nd IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems, MASS’05, pp. 195-203, Washington D.C., USA, November 2005.
- [Bac05] J. Bachrach, C. Taylor: „Handbook of Sensor Networks”, Kapitel Localization in Sensor Networks, John Wiley and Sons Inc., ISBN: 13-978-0-471-68472-5, USA, 2005.
- [Bah00] P. Bahl, V. Padmanabhan: „RADAR: An In-Building RF-based User Location and Tracking System“, Proceedings of IEEE Infocom 2000, IEEE CS Press, Los Alamos, pp. 775-784, USA, 2000.
- [Bal97] C. A. Balanis: „Antenna Theory – Analysis and Design“, 2nd Edition, ISBN 0-471-56268-4, John Wiley & Sons Inc., New York, USA, 1997.
- [Bar02] J. Bardwell: „Converting Signal Strength Percentage to dBm Values“, Wild Packets, http://www.wildpackets.com/elements/whitepapers/Converting_Signal_Strength.pdf, November 2002.
- [Bar04] M. Barbeau, E. Kranakis, D. Krizanc, P. Morin: „Improving Distance-Based Geographic Location Techniques in Sensor Networks“, 3rd International Conference on Ad-Hoc Networks and Wireless, Vancouver, Kanada, Juli 2004.
- [Bha03] A. Bharathidasan, V. A. S. Ponduru: „Sensor Networks: An Overview“, Technical Report, University of California, Davis, Mai 2003.
- [Blu04a] J. Blumenthal, F. Reichenbach, M. Handy, D. Timmermann: „Parameter-optimierung grobkörniger Positionierungsalgorithmen in Sensornetzwerken”, 2. Fachgespräch Sensornetzwerke, Karlsruhe, Deutschland, 2004.

- [Blu04b] J. Blumenthal, F. Reichenbach, D. Timmermann: „Low Power Optimization of the Coarse Grained Localization Algorithm in Wireless Sensor Networks“, 1st Workshop on Positioning, Navigation and Communication, Hannover, Deutschland, 2004.
- [Blu05a] J. Blumenthal, F. Reichenbach, D. Timmermann: „Precise Positioning with a Low Complexity Algorithm in Ad hoc Wireless Sensor Networks“, PIK - Praxis der Informationsverarbeitung und Kommunikation, vol. 28 (2005), Journal-Edition no. 2, pp. 80-85, ISBN: 3-598-01252-7, Saur Verlag, Deutschland, Juni 2005.
- [Blu05b] J. Blumenthal, F. Reichenbach, F. Golatowski, D. Timmermann: „Controlling Wireless Sensor Networks using SeNeTs and EnviSense“, 3rd IEEE International Conference on Industrial Informatics, INDIN 05, ISBN: 0-7803-9095-4, Perth, Australien, August 2005.
- [Blu05c] J. Blumenthal, D. Timmermann, C. Buschmann, S. Fischer, J. Koberstein, N. Luttenberger: „Minimal Transmission Power as Distance Estimation for Precise Localization in Sensor Networks“, <http://rtl.e-technik.uni-rostock.de/~bj/movies/PositionEstimationUsingMinimalTransmissionPower.mpg>“, DFG-Jahreskolloquium SPP 1140 - Basissoftware, Rostock, Deutschland, November 2005.
- [Blu05d] J. Blumenthal, F. Golatowski, M. Haase, M. Handy: „Software Development for Large-Scale Wireless Sensor Networks“, Embedded Systems Handbook, Taylor & Francis, CRC Press, ISBN: 0849328241, San Francisco, USA, August 2005.
- [Blu06a] J. Blumenthal, D. Timmermann, C. Buschmann, S. Fischer, J. Koberstein, N. Luttenberger: „Minimal Transmission Power as Distance Estimation for Precise Localization in Sensor Networks“, International Wireless Communications and Mobile Computing Conference, IWCMC 2006, pp. 1331-1336, ISBN: 1-59593-3 306-9, Vancouver, Kanada, Juli 2006.
- [Blu06b] J. Blumenthal, F. Reichenbach, D. Timmermann: „Minimal Transmission Power vs. Signal Strength as Distance Estimation for Localization in Wireless Sensor Networks“, 3rd IEEE International Workshop on Wireless Ad-hoc and Sensor Networks, IWWAN 2006, New York, USA, Juni 2006.

- [Blu07] J. Blumenthal, R. Großmann, F. Golatowski, D. Timmermann: „Weighted Centroid Localization in Zigbee-based Sensor Networks”, IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing (WISP' 2007), Madrid, Spanien, Oktober, 2007.
- [Bor96] J. Borenstein, H. R. Everett, L. Feng: „Where am I? Sensors and Methods for Mobile Robot Positioning”, University of Michigan, USA, 1996.
- [Bro95] I. Bronstein, A. Semendjajew, G. Musiol, H. Mühlig: „Taschenbuch der Mathematik“, ISBN 3-8171-2002-8, Verlag Harry Deutsch, Frankfurt am Main, Deutschland, 1995.
- [Bul00] N. Bulusu, J. Heidemann, D. Estrin: „GPS-less Low Cost Outdoor Localization for Very Small Devices“, IEEE Personal Communications Magazine, vol 7, pp. 28-34, Oktober 2000.
- [Bul01] N. Bulusu, J. Heidemann, D. Estrin: „Adaptive Beacon Placement“, International Conference on Distributed Systems, pp. 489-498, April 2001.
- [Bul01b] N. Bulusu, J. Heidemann, D. Estrin: „Density Adaptive Algorithms for Beacon Placement in Wireless Sensor Networks“, Technical Report UCLA-CS-010013, University of California, Los Angeles, USA, Mai 2001.
- [Bul02] N. Bulusu: „Self-Configuring Localization Systems“, Dissertation, University of Los Angeles (UCLA), Los Angeles, USA, 2002.
- [Bus05] C. Buschmann, D. Pfisterer, S. Fischer, S. P. Fekete, A. Kröller: „SpyGlass: A Wireless Sensor Network Visualizer”, in ACM SIGBED Review, vol. 2, no. 1, 2005.
- [Bus06] C. Buschmann, D. Pfisterer, S. Fischer: „Estimating Distances using Neighborhood Intersection“, Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Prag, Tschechien, 2006.
- [Bus07] C. Buschmann, C. Werner, H. Hellbrück, S. Fischer: „NIDES: Ein Verfahren zur Multihop-Distanzschätzung mittels Nachbarschaftsanalyse”, Proceedings of the 15. ITG/GI - Fachtagung Kommunikation in Verteilten Systemen (KiVS), 2007.
- [Chi03] Chipcon AS: „Single Chip Very Low Power RF Transceiver with 8051-Compatible Microcontroller“, CC1010 Data Sheet, 2003.

- [Chu05] H. Chu, R.-H. Jan: „A GPS-less Self-Positioning Method for Sensor Networks”, Proceedings of the 11th International Conference on Parallel and Distributed Systems (ICPADS'05), ISBN: 0-7695-2281-5/05, Fukuoka, Japan, 2005.
- [Cup00] P. Gupta, P. R. Kumar: „The Capacity of Wireless Networks,” IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 46, no. 2, pp. 388-404, März 2000.
- [Cze06] R. Czerniak: „Approaches to Obtain Location in Wireless Sensor Networks“, Seminar Technische Informatik, FU Berlin, Deutschland, 2006.
- [Dei06] F. Deinert: „Mathematische Modelle zur Wellenausbreitung für die Simulation drahtloser Netze“, Seminar Technische Informatik, FU Berlin, Deutschland, 2006.
- [Den06] H. Denks: „Galileo – The European Satellite Navigation System“, in FIG-Congress, München, Deutschland, Oktober 2006.
- [Doh01a] L. Doherty, B. A. Warneke, B. Boser, K. S. J. Pister: „Energy and Performance Considerations for Smart Dust”, Journal of Parallel and Distributed Systems and Networks, vol. 4, no. 3, pp. 121-133, Dezember 2001.
- [Doh01b] L. Doherty, K. S. J. Pister, L. E. Ghaoui: „Convex Position Estimation in Wireless Sensor Networks“, Proceedings of IEEE Infocom 2001, Anchorage, USA, April 2001.
- [Far88] G. Farin: „Curves and Surfaces for Computer Aided Geometric Design: A Practical Guide“, Academic Press, 1988.
- [Feu94] M. J. Feuerstein, K. L. Blackard, T. S. Rappaport, S.Y. Seidel, H. H. Yia: „Path Loss Delay Spread, and Outage Models as Functions of Antenne Height for Microcellular System Design“, IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 43, no. 3, pp. 487-498, August 1994.
- [Foldoc] FOLDoc, The free online Dictionary of Computing, <http://foldoc.org/index.cgi?query context&action Search>.
- [Fri46] H. T. Friis: „A Note on a Simple Transmission Formula”, Proceedings of the IRE Wave and Electrons, vol. 41, pp. 254-256, May 1946.
- [Gir06] L. Girod, M. Lukac, V. Trifa, D. Estrin: „The Design and Implementation of a Self-Calibrating Distributed Acoustic Sensing Platform”, ACM SenSys06, Boulder, USA, November 2006.

- [Gro07] R. Großmann, J. Blumenthal, F. Golatowski, D. Timmermann: „Localization in Zigbee-based Wireless Networks“, 1st European ZigBee Developer’s Conference, München-Dornach, Deutschland, Juni 2007.
- [Gro07] R. Grossmann: „Localization in Zigbee-based Wireless Sensor Networks“, Technischer Bericht, Fakultät für Informatik und Elektrotechnik, Universität Rostock, Deutschland, April 2007.
- [Guh05] S. Guha, R. N. Murty, E. G. Sirer: „Sextant: A Unified Node and Event Localization Framework using Non-Convex Constraints“, ACM Mobi-Hoc’05, Urbana-Champaign, USA, Mai 2005.
- [Gus03] F. Gustafsson, F. Gunnarsson: „Positioning using Time-Difference of Arrival Measurements“, in Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP '03), ISBN: 0-7803-7663-3, vol. 6, pp. 553-556, April 2003.
- [Han02] M. Handy, M. Haase, D. Timmermann: „Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy with Deterministic Cluster-Head Selection“, 4th IEEE International Conference on Mobile and Wireless Communications Networks, ISBN: 0-7803-7606-4, pp. 368-372, Stockholm, September 2002.
- [Har97] A. Harter, A. Hooper: „A New Location Technique for the Active Office“, IEEE Personal Communications, vol. 4, no. 5, pp. 42-47, Oktober 1997.
- [Har99] A. Harter, A. Hopper, P. Steggles, A. Ward, P. Webster: „The Anatomy of a Context-aware Application“, In Proceedings of the 5th ACM/IEEE Mobicom 1999, Seattle, USA, 1999.
- [He03] T. He, C. Huang, B. M. Blum, J. A. Stankovic, T. Abdelzaher: „Range-Free Localization Schemes for Large Scale Sensor Networks“, MobiCom 2003, San Diego, USA, 2003.
- [He05] T. He, C. Huang, B. M. Blum, J. A. Stankovic, T. F. Abdelzaher: „Range-Free Localization and its Impact on Large Scale Sensor Networks“, ACM Transactions on Embedded Computing System (TECS), vol. 4 (Issue 4), 2005.
- [Hei02] W. Heinzelman, A. Chandrakasan, H. Balakrishnan: „An Application-specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks“, IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 1-4, pp. 660-670, Oktober 2002.

- [Hig00] J. Hightower, R. Want, G. Borriello: „SpotON: An Indoor 3D Location Sensing Technology Based on RF Signal Strength“, Technical Report, 2000-02-02, University of Washington, USA, Februar 2000.
- [Hig01a] J. Hightower, G. Borriello: „Location Systems for Ubiquitous Computing“, IEEE Computer Magazine 34, pp. 57-66, August 2001.
- [Hig01b] J. Hightower, G. Borriello: „Location Sensing Systems“, Technical Report, <http://www.cs.washington.edu/research/portolano/papers/UW-CSE-01-07-01.pdf>, University of Washington, USA, August 2001.
- [Hu03] Y. C. Hu, A. Perrig, D. Johnson: „Packet Leashes – A Defence against Wormhole Attacks in Wireless Ad Hoc Networks“, IEEE InfoCom 2003, San Francisco, USA, April 2003.
- [Hu04] L. Hu, D. Evans: „Localization for Mobile Sensor Networks“, In 10th International Conference on Mobile Computing and Networking, MobiCom 2004, Philadelphia, USA, September 2004.
- [Hua06] Q. Huang, S. Selvakennedy: „A Range-free Localization Algorithm for Wireless Sensor Networks“, Proceedings of 63rd IEEE Vehicular Technology Conference, Melbourne, Australien, 7-10 Mai 2006.
- [IAR00] IAR Systems: „MSP430 Integrated Development (IAR/Kickstart) Documentation“, <http://www.iar.com>, 2000.
- [IEEE06] IEEE Computer Society: „Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)“, IEEE Standard for Information Technology Telecommunications and Information Exchange Between Systems - Local and Metropolitan Area Networks - Specific requirements, in IEEE Standard 802.15.4, New York, USA, September 2006.
- [IEEE98] IEEE Std 802.5-1998E(R2003): „IEEE Standards for Token Ring Access method and Physical Layer Specifications“, 1998.
- [IEEE99] IEEE Std 802.11: „Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications“, 1999.
- [ISO96] International Organization for Standardization: „Open Systems Interconnect Basic Reference Model“, 2nd Edition, ISO/IEC 7498-1:1994<E>, 1996.
- [Jan02] R. Jansen: „Routingalgorithmen für infrastrukturlose Netze“, Dissertation, Universität Siegen, 2002.

- [Jer05] Y. I. Jerschow: „Routing und Protokolldienste für Kleinstrechner“, Bachelorarbeit, Universität Düsseldorf, Deutschland, 2005.
- [Ka00] B. Karp, H. T. Kung: „Greedy Perimeter Stateless Routing“, in 6th International Conference on Mobile Computing and Networking, MobiCom 2000, Boston, USA, 2000.
- [Kar03] H. Karl, A. Willig: „A short survey of wireless sensor networks“, TKN Technical Report, TKN-03-018, Berlin, Deutschland, Oktober 2003.
- [Kha06] H. M. Khan, S. Olariu, M. Eltoweissy: „Efficient Single-Anchor Localization in Sensor Networks“, Second IEEE Workshop on Dependability and Security in Sensor Networks and Systems, DSSNS 2006, ISBN: 0-7695-2529-6, April 2006.
- [Kro07] A. Krohn: „Überlagerte Funksignale in drahtlosen Sensornetzwerken“, Dissertation, Braunschweig, 2007.
- [Ku03] F. Kuhn, R. Wattenhofer, A. Zollinger: „Worst-case Optimal and Average-case Efficient Geometric Ad Hoc Routing“, in Proceedings of the 4th ACM International Conference on Mobile Ad Hoc and Networking, pp. 267-278, USA, Juni 2003.
- [Kwo05] Y. Kwon, K. Mechitov, S. Sundresh, W. Kim, G. Agha: „Resilient Localization for Sensor Networks in Outdoor Environments“, in 25th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS 2005), Columbus, Ohio, USA, Juni 2005.
- [Lan03] K. Langendoen, N. Reijers: „Distributed Localization in Wireless Sensor Networks – A quantitative Comparison“, Computation Networks, Elsevier, pp. 499-518, 2003.
- [Lan06] S. Lanzisera, D. T. Lin, K. S. J. Pister: „RF Time of Flight Ranging for Wireless Sensor Network Localization“, Workshop on Intelligent Solutions in Embedded Systems (WISES'06), Wien, Österreich, Juni 2006.
- [Lan96] O. Landron, M. J. Feuerstein, T. S. Rappaport: „A Comparison of Theoretical and Empirical Reflection Coefficients for Typical Exterior Wall Surfaces in a Mobile Radio Environment“, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 44, no. 3, pp. 341-351, März 1996.
- [Laz04] L. Lazos, R. Poovendran: „SeRLoc: Secure Range-independent Localization for Wireless Sensor Networks“, Proceedings of the 2004 ACM Workshop on Wireless Security (WiSe), pp. 21-30, ISBN: 1-58113-925-X, Philadelphia, USA, Oktober 2004.

- [Lee85] W. C. Y. Lee: „Mobile Communications Engineering“, McGraw Hill Publications, New York, 1985.
- [Lin96] J.-P. M. G. Linmartz: „Wireless Communication“, http://people.seas.harvard.edu/~jones/es151/prop_models/propagation.html#pel, Baltzer Science Publishers, P.O. Box 37208, 1030 AE Amsterdam, ISSN: 1383 4231, vol. 1, no.1, 1996.
- [Lis04] A. Listyo: „Bereitstellung und Nutzung von Ortsinformationen“, Studienarbeit, ETH Zürich, Schweiz, 2004.
- [Mar05] M. Maroti, B. Kusy, G. Balogh, P. Volgyesi, A. Nadas, K. Molnar, S. Dora, A. Ledeczi: „Radio Interferometric Geolocation“, in Proceedings of the 3rd ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'05), ISBN 1-59593-054-X, pp. 1-12, San Diego, USA, November 2005.
- [Nan07] Nanotron Technologies: „Real Time Location Systems“, White Paper, http://www.nanotron.com/EN/docs/White-Papers/RTLS/Real_Time_Location_Systems_WP_V102_2007-05-30.pdf, Berlin, Deutschland, 2007.
- [Nic01] D. Niculescu, B. Nath: „Ad hoc positioning system (APS)“, in Proceedings of the GLOBECOM 2001, pp. 2926-2931, San Antonio, USA, November 2001.
- [Nor02] P.-J. Nordlund, F. Gunnarsson, F. Gustafsson: „Particle Filters for Positioning in Wireless Networks“, in EUSIPCO, Toulouse, Frankreich, September 2002.
- [Par96] B. Parkinson, J. Spilker Jr.: „Overview of GPS Operation and Design“, in Global Positioning System: Theory and Applications, vol. 1 and vol. 163 of Progress in Astronomics and Aeronautics, ch. 2, pp. 29-56, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Washington, USA, 1996.
- [Pod04] S. Poduri, G. S. Sukhatme: „Constrained Coverage for Mobile Sensor Networks“, in IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 165-172, New Orleans, USA, April 2004.
- [Pri00] N. B. Priyantha, A. Chakraborty, H. Balakrishnan: „The Cricket Location-Support System“, in Proceedings of the 6th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (ACM MobiCom 2000), Boston, USA, August 2000.

- [Pro05] M. Probst, S. Martens: „Mobilfunkbasierte Positionsbestimmung - Zellulare Mobilfunknetze GSM/UMTS“, http://nt.eit.uni-kl.de/lehre/seminar_2005_gps/seminar_2005_gps_gruppe5_folien.pdf, Vorlesungsskript, Technische Universität Kaiserslautern, Deutschland, 2005.
- [Ram03] V. Ramadurai, M. L. Sichitiu: „Localization in Wireless Sensor Networks A Probabilistic Approach“, in Proceedings of the 2003 International Conference on Wireless Networks (ICWN 2003), pp. 275-281, Las Vegas, USA, June 2003.
- [Rap02] T. S. Rappaport: „Wireless Communications - Principles and Practice“, 2. Auflage, Upper Saddle River, Prentice Hall, 2002.
- [Rei06] F. Reichenbach, J. Blumenthal, D. Timmermann: „Improved Precision of Coarse Grained Localization in Wireless Sensor Networks“, 9th Euromicro Conference on Digital System Design (DSD 2006), ISBN: 0-7695-2609-8, pp. 630-637, Dubrovnik, Kroatien, September 2006.
- [Rei06a] F. Reichenbach, A. Bobek, P. Hagen, D. Timmermann: „Increasing Lifetime of Wireless Sensor Networks with Energy-Aware Role-Changing“, In Proceedings of the 2nd IEEE International Workshop on Self-Managed Networks, Systems & Services (SelfMan 2006), LNCS 3996, ISBN: 978-3-540-34739-2, pp. 157-170, Dublin, Irland, Juni 2006.
- [Röm03] K. Römer: „The Lighthouse Location System for Smart Dust“, in ACM/Usenix International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services, MobiSys 2003, San Francisco, USA, 2003.
- [Röm05] K. Römer: „Time Synchronization and Localization in Sensor Networks“, Dissertation, ETH Zürich, Schweiz, 2005.
- [Sal05] R. Salomon, J. Blumenthal: „Coarse-Grained Localization: Extended Analyses and Optimal Beacon Distribution“, Proceedings of the 10th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA 2005), Catania, Italien, September 2005.
- [Sav01] A. Savvides, C. C. Han, M. B. Srivastava: „Dynamic Fine Grained Localization in ad-hoc Networks of Sensors“, Proceedings of the 5th International Conference on Mobile Computing and Networking, MobiCom 2001, pp. 166-179, Rom, Italien, Juli 2001.
- [Sav02] A. Savvides, H. Park, and M. B. Srivastava: „The Bits and Flops of the n-hop Multilateration Primitive for Node Localization Problems“, WSNA'02, Atlanta, USA, September 2002.

- [Sav03] A. Savvides, H. Park, M. B. Srivastava: „The n-Hop Multilateration Primitive for Node Localization”, *Mobile Networks and Applications* 8, pp. 443-451, Kluwer Academic Publishers, Niederlande, 2003.
- [Sav04a] A. Savvides, L. Girod, M. Srivastava, D. Estrin: „Localization in Sensor Networks”, *Wireless Sensor Networks*, Edited by Znati, Radhavendra and Sivalingam, ISBN 978-1-4020-7883-5, Kluwer Verlag, 2004.
- [Sav05] A. Savvides: „Introduction to Location Discovery”, <http://www.eng.yale.edu/enalab/courses/eeng460a>, Lecture 6, University of Yale, USA, 2005.
- [Sav05b] A. Savvides, W. L. Garber, R. L. Mosesand, M. B. Srivastava: „An Analysis of Error Inducing Parameters in Multihop Sensor Node Localization”, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, ISSN: 1536-1233, pp. 567-577, 2005.
- [Sava02] C. Savarese, J. Rabaey, K. Langendoen: „Robust Positioning Algorithms for Distributed Ad-Hoc Wireless Sensor Networks”, *USENIX Technical Annual Conference*, Monterey, USA Juni 2002.
- [Sch04] J. Schiller: „Scatterweb – A Platform for Teaching & Prototyping Wireless Sensor Networks”, http://www.inf.fu-berlin.de/inst/ag-tech/scatterweb_net/documents/ScatterWeb-16-09-2004.pdf, Computer Systems und Telematics, Freie Universität Berlin, Deutschland, September 2004.
- [Sei05] M. Seifert: „Abstrahlungscharakteristik des CC1010“, *Technischer Bericht*, Universität Rostock, Deutschland, Februar 2005.
- [Sei91] S. Y. Seidel, T. S. Rappaport, S. Jain, M. Lord, R. Singh: „Path Loss, Scattering and Multipath Delay Statistics in Four European Cities for Digital Cellular and Microcellular Radiotelephone“, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 40, no. 4, pp. 721-730, November 1991.
- [Sha49] C. E. Shannon: „Communication in the Presence of Noise“, *Proceedings of the IRE*, vol. 37, no. 1, Januar 1949.
- [She68] D. Shepard: „A Two-dimensional Interpolation Function for Irregularly-Spaced Data”, *Proceedings of the 1968 23rd ACM National Conference*, pp. 517-524, August 1968.
- [Sim02] S. N. Simic, S. Sastry: „Distributed Localization in Wireless Ad Hoc Networks“, *Technischer Report, Memorandum no. UCB/ERL M02/26*, UC Berkeley, USA, 2002.
- [Spr03] M. Spratt: „An Overview of Positioning by Diffusion“, in *Wireless Networks* 9 (2003), ISSN 10220038, pp. 565-574, Kluwer Academic Publishers, 2003.

- [Sri06] K. Srinivasan, P. Levis: „RSSI is Under Appreciated”, in Proceedings of the Third Workshop on Embedded Networked Sensors (EmNets 2006), Harvard University, USA, 2006.
- [Sri07] A. Srinivasan, J. Wu: „Survey on Secure Localization in Wireless Sensor Networks”, Encyclopedia of Wireless and Mobile Communications, B. Furht (ed.), CRC Press, Taylor and Francis Group, USA, 2007.
- [Sto05a] R. Stoleru, T. He, J. Stankovic: „Spotlight: A High Accuracy, Low-Cost Localization System for Wireless Sensor Networks”, ACM Sensys, November 2005.
- [Sto05b] I. Stojmenovic: „Handbook of Sensor Networks Algorithms and Architectures“, Wiley Series on Parallel and Distributed Computing, John Wiley and Sons Inc., ISBN 13-978-0-471-68472-5, USA, 2005.
- [Sto06] R. Stoleru, T. He, J. A. Stankovic: „Range-Free Localization”, Kapitel in „Secure Localization and Time Synchronization for Wireless Sensor and Ad Hoc Networks”, Advances in Information Security Series, vol. 30, Springer Verlag, ISBN: 978-0-387-32721-1, 2006.
- [Stu99] G. L. Stuber, J. J. Gaffery: „Radio Location Techniques”, in Mobile Communications Handbook, CRC Press, ISBN 978-0849385971, USA, 1999.
- [Sub05] S. Subramanian, S. Shakkottai: „Geographic Routing with Limited Information in Sensor Networks”, in Proceedings of the 4th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks, ISBN: 0-7803-9202-7, Los Angeles, USA, 2005.
- [TI04] Texas Instruments: „MSP 430F149 Device Manual”, <http://focus.ti.com/docs/prod/folders/print/msp430f149.html>, Dallas, USA, 2004.
- [TI06] Texas Instruments: „CC2431 Location Engine“, Application Note AN042, Rev. 1.0, <http://focus.ti.com/lit/an/swra095/swra095.pdf>, 2006.
- [TI07] Texas Instruments: „CC2420 - 2.4 GHz IEEE 802.15.4 / ZigBee-Ready RF Transceiver (Rev. B)“, Dallas, USA, 2007.
- [Tur06] V. Turau, C. Renner, M. Venzke, S. Waschnik, C. Weyer, M. Witt: „The Heathland Experiment: Results and Experiences“, Proceedings of the 3rd International Conference on Networked Sensing Systems (INSS'06), Chicago, USA, Juni 2006.
- [Und03] S. Underwood: „mspgcc - A port of the GNU tools to the Texas Instruments MSP430 microcontrollers”, <http://mspgcc.sourceforge.net/manual/>, 2003.

- [Wan92] R. Want, A. Hopper, V. Falcao, J. Gibbons: „The Active Badge Location System”, ACM Transactions on Information Systems (TOIS), ISSN: 1046-8188, pp. 91-102, Januar 1992.
- [War97] A. Ward, A. Jones, A. Hopper: „A new Location Technique for the Active Office“, IEEE Personal Communications, vol. 4, no. 5, Oktober 1997.
- [Whi02] K. Whitehouse, D. Culler: „Calibration as Parameter Estimation in Sensor Networks”, in Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications, WSNA 02, Atlanta, USA, 2002.
- [Whi02] C. D. Whitehouse: „The Design of Calamari: An Ad-hoc Localization System for Sensor Networks“, Masterarbeit, University of Berkeley, USA, 2002.
- [Whi05] K. Whitehouse, C. Karlof, A. Woo, F. Jiang, D. Culler: „The Effects of Ranging Noise on Multihop Localization: An Empirical Study“, in Proceedings of the 4th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks, IPSN 2005, ISBN: 0-7803-9202-7, Los Angeles, USA, 2005.
- [ZA05] ZigBee Alliance: „Zigbee Specification“, v1.0, <http://www.zigbee.org>, San Ramon, USA, Juni 2005.
- [Zho04] G. Zhou, T. He, S. Krishnamurthy, J. A. Stankovic: „Impact of Radio Irregularity on Wireless Sensor Networks“, Proceedings of the 2nd International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services, MobiSys'04, pp. 125-138, ISBN: 1-58113-793-1, Boston, USA, 2004.

A.1 Schwerpunktbestimmung mit Randfehlerkorrektur

Algorithmus 8: Schwerpunktbestimmung mit Randfehlerkorrektur (Auszug aus der Matlab-Implementierung)

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% position(1)    x
% position(2)    y
% position(3)    error
function position CLwEC(knownPositions, sensornode, getDistance, radioModel)
    global fieldwidth;
    global transmissionRange;
    global beaconDensity;
    global maxBeaconsInRange;
    global pos x;
    global pos y;
    global drawMode;
    global fq
    global positionIncorrect;
    global illegalError;

    numberOfKnownPositions GetNumberOfNodes(knownPositions);
    numberOfNeighborPositions 0;
    position(1) 0;
    position(2) 0;
    xmin 999999999;
    ymin 999999999;
    xmax 0;
    ymax 0;
    xr 0;
    xl 0;
    yt 0;
    yb 0;
    korr x false;
    korr y false;
    for i 1:1:numberOfKnownPositions;
        if ( isNeighbor(sensornode, knownPositions(i,1:2), radioModel ) )
            position(1) position(1)+knownPositions(i,1);
            position(2) position(2)+knownPositions(i,2);
            numberOfNeighborPositions numberOfNeighborPositions+1;

            % X/Y MIN/MAX Test
            if ( knownPositions(i,1)< xmin )
                xmin knownPositions(i,1);
            end
            if ( knownPositions(i,1)> xmax )
                xmax knownPositions(i,1);
            end
            if ( knownPositions(i,2)< ymin )
                ymin knownPositions(i,2);
```

```

end
if ( knownPositions(i,2)> ymax )
    ymax knownPositions(i,2);
end

% Nachbarschaftsbeacons zählen
% Hier: Simulationscode
if ( knownPositions(i,1)<fieldwidth )
    xr xr+1;
end
if ( knownPositions(i,1)>0 )
    xl xl+1;
end
if ( knownPositions(i,2)<fieldwidth )
    yt yt+1;
end
if ( knownPositions(i,2)>0 )
    yb yb+1;
end
end
end
if ( numberOfNeighborPositions>0 )
    % Positionsbestimmung nach CL %
    position(1) position(1)/numberOfNeighborPositions;
    position(2) position(2)/numberOfNeighborPositions;

    % Randbereichskorrektur notwendig ? %
    if (round(maxBeaconsInRange) > numberOfNeighborPositions )
        halfbr round(maxBeaconsInRange/2);
        dr floor(2*transmissionRange/fq)/2*fq;
        lr xl xr;
        tb yb yt;
        % Ecke oder Randbereich
        if (abs(lr) abs(tb))
            if ( (halfbr> xl || halfbr> xr) && (halfbr> yt || halfbr> yb ) )
                % ECKE %
                if (xl<xr)
                    korr x 1; % am linken Rand
                    sx xmax dr;
                    if (sx<xmin)
                        sx xmin;
                    end
                end
                if (xl>xr) % rechten Rand
                    korr x 1;
                    sx xmin+dr;
                    if (sx>xmax)
                        sx xmax;
                    end
                end
                if (yb<yt) % unteren Rand
                    korr y 1;
                    sy ymax dr;
                    if (sy<ymin)
                        sy ymin;
                    end
                end
            end
        end
    end
end

```

```

        if (yb>yt) % oberer Rand
            korr y 1;
            sy ymin+dr;
            if (sy>ymax)
                sy ymax;
            end
        end
    end
end
elseif ( (halfbr> xl || halfbr> xr) || (halfbr> yt || halfbr> yb) )
    % RANDBEREICH %
    if ( abs(lr)>abs(tb) ) % linker oder rechter Rand
        if (xl<xr) % linker Rand
            korr x 1;
            sx xmax dr;
            if (sx<xmin)
                sx xmin;
            end
        end
        if (xl>xr) % rechter Rand
            korr x 1;
            sx xmin+dr;
            if (sx>xmax)
                sx xmax;
            end
        end
    end
elseif ( abs(lr)<abs(tb) ) % Oberer oder unterer Rand
    if (yb<yt) % unterer Rand
        korr y 1;
        sy ymax dr;
        if (sy<ymin)
            sy ymin;
        end
    end
    if (yb>yt) % oberer Rand
        korr y 1;
        sy ymin+dr;
        if (sy>ymax)
            sy ymax;
        end
    end
end
end

if (korr x)
    position(1) sx;
end
if (korr y)
    position(2) sy;
end
end
position(3) CalculatePositioningError(position(1:2), sensornode(1:2) );
else
    position(1:3) [NaN NaN NaN];
end
end
end

```

A.2 Gewichtete Schwerpunktbestimmung mit Normierung

Der nachfolgende Quelltextauszug zeigt die C-Funktion *DeterminePositionWCLPower()*, die nach dem Verfahren der gewichteten Schwerpunktbestimmung (WCL, vgl. Kap. 5) aus empfangenen Beaconpositionen und den dazugehörigen minimalen Übertragungsleistungen, die als Distanzmaß dienen, die Position eines Sensorknotens berechnet.

Algorithmus 9: Gewichtete Schwerpunktbestimmung (Auszug aus dem C-Quelltext für das Embedded Sensor Board (ESB) der Firma Scatterweb)

```

////////////////////////////////////
// Output:  0 Position correct determined
//          1 Position could not be determined
int DeterminePositionWCLPower(POSITION *p)
{
    if ( beaconnumber )
    {   BEACON INFO      *info received beacon positions;
        int             i;
        unsigned long   x 0,y 0,weight 0
        long             tmpweight 0, maxpower 0;

        for ( i 0;i<beaconnumber;i++)
        {   if ( maxpower<info >beacon msg.power )
            {   maxpower info >beacon msg.power;
                info++;
            }
            maxpower++;

            info received beacon positions;
            for ( i 0;i<beaconnumber;i++)
            {   // Normalize > power valid for 0...255
                tmpweight maxpower info >beacon msg.power;    // invert to improve
                                                            // convergence
                if ( tmpweight< 0 )                            // tmpweight^0 1 !!!
                    tmpweight 1;                                // < Normalize

                tmpweight WCL WEIGHT( tmpweight );
                x+ ( info >beacon msg.beacon pos.x*tmpweight );
                y+ ( info >beacon msg.beacon pos.y*tmpweight );
                weight+ tmpweight;
                info++;
            }
            if ( weight )
            {   p >x (COORDINATE) ( x/weight );
                p >y (COORDINATE) ( y/weight );
                return 0;                                        //position determined successfully
            }
        }
    }
    return 1;
}

```

A.3 Verzeichnis der Algorithmen

Algorithmus 1:3/2 NA-Algorithmus zur Berechnung der Position bei scheinbar vorliegender Zweideutigkeit der Eingangsdaten.....	22
Algorithmus 2:Positionsermittlung im Schwerpunkt, Ablaufprotokoll auf Beacons.....	66
Algorithmus 3:Positionsermittlung im Schwerpunkt, Ablauf auf Sensorknoten.....	66
Algorithmus 4:Vereinfachte Lokalisierung auf Sensorknoten.....	69
Algorithmus 5:Berechnung der minimalen Beaconanzahl in Reichweite (Matlab).....	91
Algorithmus 6:Positionsermittlung durch Schwerpunktbestimmung mit Korrektur der ermittelten Position im Randbereich, CLwEC (Ablauf auf Sensorknoten).....	104
Algorithmus 7:Positionsermittlung durch Schwerpunktbestimmung mit Korrektur der ermittelten Position im Randbereich, CLwEC (Ablauf auf Beacons).....	105
Algorithmus 8:Schwerpunktbestimmung mit Randfehlerkorrektur (Auszug aus der Matlab-Implementierung).....	159
Algorithmus 9:Gewichtete Schwerpunktbestimmung (Auszug aus dem C-Quelltext für das Embedded Sensor Board (ESB) der Firma Scatterweb).....	162

A.4 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	a) Korrekturfaktor c_i der Referenzknoten $B_1..B_3$ für die gegebene Beispielkonfiguration (vgl. Abbildung 9) b) Distanzbestimmung des Sensorknotens Sk_5 ($c_5 = 17,5m$, $wc_5 = 16,23m$).....	17
Tabelle 2:	Integrationsgrenzen der Teilflächen A_1, A_3 und A_4	86
Tabelle 3:	Optimaler Grad g des EWCL-Verfahrens für die Überlappungsbereiche $A_1..A_4$	120
Tabelle 4:	Minimale Übertragungreichweiten unterschiedlicher Beaconanordnungen zur Vermeidung nicht-lokalisierbarer Sensorknoten.....	132
Tabelle 5:	Technische Daten des Embedded Sensor Boards (ESB).....	136

A.5 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Modell eines Sensorknotens	2
Abbildung 2: Sensornetzwerk in der Praxis	3
Abbildung 3: Klassifizierung von möglichen Kontextinformationen eines Sensorknotens	4
Abbildung 4: Gliederung der Arbeit (Abschnitte mit eigenen Beiträgen in fetter Schrift).....	6
Abbildung 5: Distanzermittlung durch Time-of-Arrival (ToA) bei a) globalem Synchronisationszeitpunkt b) lokalem Synchronisationszeitpunkt	11
Abbildung 6: Implizite Distanzbestimmung durch das Verfahren Time Difference of Arrival (TDoA).....	12
Abbildung 7: Positionsbestimmung im Schnittpunkt zweier durch das TDoA- Verfahren ermittelter Hyperbeln $h(B_1;B_2)$ und $h(B_1;B_3)$	13
Abbildung 8: Distanzbestimmung durch a) Round Trip Time (RTT) b) Symmetric Double Sided Two Way Ranging (SDS-TWR).....	15
Abbildung 9: Bestimmung der Hop-Anzahl zwischen verschiedenen Sensorknoten eines Netzwerkes [Nic01].....	16
Abbildung 10: Lighthouse Localization System [Röm03] a) Winkelbestimmung durch Zeitmessung b) Distanzberechnung aus Winkeln	19
Abbildung 11: Positionsbestimmung des Knotens $Sk_1(x,y)$ bei Kenntnis von drei gemessenen Distanzen d_i zu drei gegebenen Referenzknoten $B_i(x_i,y_i)$ ($1 \leq i \leq 3$).....	20
Abbildung 12: Zweideutige Positionsbestimmung der Knoten Sk_1 und Sk_2 bei Empfang von nur zwei Positionsinformationen (B_1 und B_2).	21
Abbildung 13: Eindeutige Lokalisierung der Knoten Sk_1 und Sk_2 bei Kenntnis eines dritten Referenzknotens $B_3 \in N(Sk_1)$, $B_3 \notin N(Sk_2)$	21
Abbildung 14: Neighborhood Intersection Distance Estimation Schema (nach [Bus06]).....	23
Abbildung 15: Vereinfachtes Blockschaltbild des RF-Transceivers CC1010 [Chi03]	26
Abbildung 16: a) Messschaltung zur Ermittlung der RSS-Spannung b) Typischer Verlauf der RSS-Spannung des CC1010 bei 868 MHz in Abhängigkeit der Empfangsleistung (unter Laborbedingungen) [Chi03].....	27
Abbildung 17: Empfangsleistung P_{RX} im Vergleich (Theorie vs. Praxis). Die Messung erfolgte zwischen zwei CC1010 Transceivern der Firma Chipcon am Strand von Rostock-Warnemünde.	28

Abbildung 18: Übertragungsglieder eines Sensorknotens bei der Nachrichtenübermittlung per Funk	29
Abbildung 19: Path-Loss (PL) eines Signals in Abhängigkeit der Distanz zwischen Sender und Empfänger bei verschiedenen Trägerfrequenzen.....	30
Abbildung 20: Entfernungsermittlung zwischen Sender und Empfänger einer Nachricht durch a) Messen der Empfangsfeldstärke (RSSI) b) Minimale Übertragungsleistung $P_{TX,min}$ (MTP)	31
Abbildung 21: Minimaler Registerwert SW_{TX} des ESB-Transceivers zur Konfiguration der minimalen Sendeleistung $P_{TX,min}$ in Abhängigkeit der Distanz d zwischen zwei Sensorknoten bei 40 Messungen pro Distanz im Labor.....	33
Abbildung 22: Verbindungsqualität (Link Quality) vier verschiedener Zigbee-Sensorknoten (CC2420) der Firma Texas Instruments (TI)	36
Abbildung 23: Typisches Antennendiagramm mit Haupt- und Nebenkeulen senkrecht ausgerichteter Stabantennen [Bal97]	37
Abbildung 24: Ausbreitungscharakteristik eines CC1010 in einer Ebene a) $\theta = 90^\circ$ (Azimuth Plane) b) $\theta = 0^\circ$ (Elevation Plane) nach [Sei05].....	38
Abbildung 25: a) Resultierendes Antennendiagramm (genähert) bei rotierenden Sendern (Elevation Plane) b) Antennenmodell der rotierenden Sensorknoten [Kha06].....	38
Abbildung 26: Klassifikation der Ortsangaben.....	42
Abbildung 27: Klassifikation der Lokalisierungsverfahren [Hig01a].....	43
Abbildung 28: Ursachen der Lokalisierungsfehler (inspiriert durch Savvides [Sav05]).....	45
Abbildung 29: a) Aufteilung eines Netzwerkes in Dreiecke bei einer Triangulation, b) Distanzbestimmung durch Triangulation aus zwei gemessenen Winkeln (α_1, α_2) und einer bekannten Distanz r_{12}	47
Abbildung 30: a) Trilateration aus drei gemessenen Distanzen r_i und bekannten Referenzpositionen $B_i(x_i; y_i)$ b) Zusammenhang zwischen den Distanzen d_{ij} , r_i und r_j und den bekannten Positionen $B_i(x_i; y_i)$ und $B_j(x_j; y_j)$ sowie der gesuchten Position $P(x; y)$	49
Abbildung 31: Trilateration an einem Beispiel.....	51
Abbildung 32: Methode der kleinsten Quadrate an einem Beispiel.....	53
Abbildung 33: Strategien zur Verbesserung der Lokalisierung.....	55
Abbildung 34: Lokalisierung durch a) atomare Multilateration (auch One-Hop Multilateration) b) iterative Multilateration (auch Two-Hop Multilateration) c) kollaborative Multilateration	57
Abbildung 35: Active-Bat-System.....	58

Abbildung 36: a) Bounding Box des Beacons $B_1(x;y)$ b) Bounding Box A_{Sk} des Sensor-knotens $Sk_3(x;y)$ ($Sk_3 \in A_{Sk,Hülle}$) c) Bounding Box A_{Sk} ($Sk_4 \notin A_{Sk,Hülle}$).....	59
Abbildung 37: Positionsermittlung durch die Chipcon Location Engine [TI06]	60
Abbildung 38: a) Beispielhafte Ausbreitungscharakteristik eines Sensor-knotens (Fläche A_{Sk}) b) Prinzip der Positionsermittlung des Sextant- Verfahrens	61
Abbildung 39: a) Dreiecksbildung beim APIT-Algorithmus aus allen bekannten Beaconpositionen b) Ermitteln der wahrscheinlichsten Position durch Zählen der überlagerten Teilflächen c) Point-in-Triangulation-Test (PIT) des Sensor-knotens Sk_i und Sk_r innerhalb und d) außerhalb eines Dreiecks e) Prinzip des PIT	62
Abbildung 40: a) Überlagerungsflächen bei 3×3 -Gitteranordnung der Beacons, $tr \approx fq/50$ b) Lokalisierungsfehler der Schwerpunktbestimmung (3×3 Beacons, $fq/50$).....	67
Abbildung 41: a) Bestimmung der Position $P_1(x;y)$ $\{3,7;3,7\}$ durch Schwerpunktbestimmung aus den empfangenen Beaconpositionen $B_1(2;3)$, $B_2(4;6)$ und $B_3(5;2)$ b) Bestimmung der Position $P_1'(x;y)$ $\{3,75;4,25\}$ aus den Beaconpositionen $B_1..B_4$	70
Abbildung 42: Überlappungsbereiche bei der Schwerpunktbestimmung in einem endlichen Netzwerk aus Beacons in Abhängigkeit von der Übertragungsbereichweite für a) $\lim_{tr \rightarrow 0}$, d. h. keine Positionsbestimmung möglich b) $tr \approx fq$ mit mittlerem Lokalisierungsfehler c) $\lim_{tr \rightarrow \infty}$, bestimmte Position für alle Sensor-knoten im Zentrum des Beaconnetzwerkes	72
Abbildung 43: Überlappungsbereiche einer Teilfläche A_T in einem unendlich großen Netzwerk aus Beacons in Abhängigkeit der Übertragungsbereichweite für a) $tr \approx fq$ b) $tr \approx 2fq$ c) $tr \approx 3fq$. Die Anzahl der Überlappungsbereiche nimmt zu, wobei gleichzeitig die mittlere Flächengröße abnimmt	73
Abbildung 44: a) Überlagerungsflächen bei minimaler Übertragungsbereichweite tr_{min} b) Anzahl der Sensor-knoten mit unbestimmter Position (Unbekannte) in Abhängigkeit der Übertragungsbereichweite.....	74
Abbildung 45: Ansatz zur Ermittlung der optimalen Übertragungsbereichweiten $tr_{opt,i}$ im unendlichen Netzwerk durch Simulation eines endlichen Netzwerkes ($7fq \times 7fq$) a) Überlagerungsflächen in der Simulation des unendlichen Netzwerkes bei $tr_{max,T} < 4fq$ b) repräsentative Teilfläche	

	A_T des unendlichen Netzwerkes im endlichen Netzwerk bei $tr_{\max,T} < 4fq$	76
Abbildung 46:	Gegenüberstellung des Fehlerverlaufs im endlichen und unendlichen Sensornetzwerk von im Gitter angeordneten Beacons im Abstand fq	77
Abbildung 47:	Power-Error-Product (PEP) im endlichen und unendlichen Sensornetzwerk	79
Abbildung 48:	Repräsentative Teilfläche eines unendlich großen Sensornetzwerkes bestehend aus 4 Beacons in Gitteranordnung	81
Abbildung 49:	a) Überlagerungsfläche A_2 mit Integrationsgrenzen b) Schwerpunkt der Fläche A_2 mit Kennzeichnung des Fehlerverlaufs $f_2(r)$	83
Abbildung 50:	Überlagerungsflächen A_1 , A_3 und A_4 mit Angabe der Integrationsgrenzen.....	85
Abbildung 51:	a) Positionsbestimmung eines Sensorknotens P_1 (weißer Punkt) in der Kernzone eines Sensornetzwerkes aus 9 bekannten Beaconpositionen (blaue Kreise) im Schwerpunkt von A_1 b) Positionsbestimmung eines Sensorknotens P_2 in der Randzone eines Netzwerkes aus lediglich vier bekannten Beaconpositionen im Schwerpunkt von A_2	88
Abbildung 52:	Anzahl der Nachbarbeacons der Sensorknoten $P_1..P_4$ in Abhängigkeit ihrer Lage im Netzwerk, wobei deutlich wird, dass einige Randknoten, z. B. P_3 , mehr Nachbarbeacons besitzen als Beacons der Kernzone, z. B. P_1	89
Abbildung 53:	Minimale Anzahl von Nachbarbeacons (grau eingefärbte Kreise) eines Sensorknotens P innerhalb der Kernzone eines Sensornetzwerkes bei a) P liegt direkt auf einem Beacon, b) P liegt auf einer Gitterlinie zwischen zwei Beacons, c) P liegt in der Mitte eines Gitterfeldes.....	91
Abbildung 54:	Betrachtungen zur Berechnung der Beacondichte a) Wichtung der Beacons durch Zählen der zum Sensornetzwerk gehörenden Teilflächen, b, c) Beispiele zur Wichtung der Beacons in Teilflächen A_i bei $\mu_B = 0,0016$	93
Abbildung 55:	Randzonenerkennung in einem 100×100 Sensornetzwerk mit Übertragungsbereich $tr = 43$ basierend auf a) minimaler Anzahl von Nachbarbeacons $n_{\min. Beacons} = 7$ b) mittlerer Anzahl von Nachbarbeacons $\tilde{n}_{Beacons} = 9$	94
Abbildung 56:	Bildung von Nachbarschaftsvektoren in Beacons	95
Abbildung 57:	Detektion der Lage eines Sensorknotens im Randbereich anhand des akkumulierten Nachbarschaftsvektors \overline{bn} der Beacons	97

Abbildung 58: Bestimmung der Anzahl der Nachbarbeacons am Beispiel des Punktes $P_1(62,70)$ mit Übertragungreichweite $tr = 43$ (punktierter Kreis). Die gestrichelten Kreise zeigen die a) linksseitigen Nachbarbeacons $bn_l = 10$ b) rechtsseitigen Nachbarbeacons $bn_r = 5$ c) oberen und unteren Nachbarbeacons $bn_t = 8$ und $bn_b = 8$	98
Abbildung 59: Positionsbestimmung im Randbereich am Beispiel des Knotens $P_3(5;5)$ mit Korrektur der Überlappungsfläche A_3 durch Hinzufügen virtueller Beacons, $tr = 43$	99
Abbildung 60: Bestimmung der Symmetrieachsen im Randbereich eines Netzwerkes zur Spiegelung existierender Beacons.....	100
Abbildung 61: Randerkennung bei Übertragungreichweiten $f_q < tr \leq 1,5f_q$	103
Abbildung 62: Vergleich der Schwerpunktbestimmung (CL) und des Korrekturverfahrens (CLwEC) am Beispiel des durchschnittlichen relativen Lokalisierungsfehlers in Abhängigkeit der Übertragungreichweite (Netzwerkausdehnung: $7f_q \times 7f_q$, Beaconabstand f_q).....	106
Abbildung 63: Lokalisierungsfehler der Sensorknoten in einem 100×100 Netzwerk bei Übertragungreichweite $tr = 43$ mit a) einfacher Schwerpunktbestimmung b) Schwerpunktbestimmung mit Randzonenkorrektur (CLwEC) und Übertragungreichweite $tr = 86$ c) einfacher Schwerpunktbestimmung d) Schwerpunktbestimmung mit Randzonenkorrektur (CLwEC).....	107
Abbildung 64: Gewichtete Schwerpunktbestimmung (WCL) im Vergleich zur einfachen Schwerpunktbestimmung (CL) am Beispiel des Sensorknotens $P(4;4,7)$	110
Abbildung 65: Durchschnittlicher Lokalisierungsfehler der gewichteten Schwerpunktbestimmung bei verschiedenen Gewichtsfunktionen $w = 1/d^g$ in Abhängigkeit der Übertragungreichweite der Beacons (unendlich großes Sensornetzwerk, Beaconabstand im Gitter f_q , exakte Distanzen ohne Messfehler).....	112
Abbildung 66: Durchschnittlicher Lokalisierungsfehler der gewichteten Schwerpunktbestimmung verschiedener Gewichtsfunktionen in Abhängigkeit der Übertragungreichweite (endliches Sensornetzwerk, Abmessung: $3f_q \times 3f_q$, Beaconabstand im Gitter f_q).....	114
Abbildung 67: Optimaler Grad g des Gewichts in Abhängigkeit der Übertragungreichweite tr und der Größe des endlichen Sensornetzwerkes ($2f_q \times 2f_q$ $8f_q \times 8f_q$).....	115

Abbildung 68: Durchschnittlicher Lokalisierungsfehler der gewichteten Schwerpunktbestimmung (endliches Netzwerk, Abmessung: 100×100 , Beaconabstand im Gitter f_q 100, tr $0,95f_q$) verschiedener Gewichtsfunktionen a) w $1/d$, f_a 6,4 b) w $1/d^2$, f_b 10,2 c) w $1/d^3$, f_c 16,2	118
Abbildung 69: Überlappungsflächen bei der gewichteten Schwerpunktbestimmung (tr $0,95f_q$).....	119
Abbildung 70: Fehlerverhalten eines endlichen Sensornetzwerkes bei Anwendung des EWCL-Algorithmus mit Gradanpassung (f_q 100, tr $0,97f_q$).....	120
Abbildung 71: a) Durchschnittlicher und b) maximaler Lokalisierungsfehler in Abhängigkeit der Bitauflösung der exakten Distanz im endlichen Sensornetzwerk, Abmessung: $f_q \times f_q$, 2×2 Beacons, Übertragungsreichweite tr $0,95f_q$, w $1/d$)	122
Abbildung 72: Distanz d und Standardabweichung σ_d in Abhängigkeit der empfangenen Signalstärke	124
Abbildung 73: a) Durchschnittlicher und b) maximaler Lokalisierungsfehler in Abhängigkeit der Bitauflösung der gemessenen Distanz (Normalverteilung, σ_{RX} $0,2P_{RX}(d_{e,i})$, $\sigma_{rand}(\delta)$ 0,2 bzw. 20%) im endlichen Sensornetzwerk ($f_q \times f_q$) bei tr $0,95f_q$, w $1/d$, 10 Durchläufe.....	125
Abbildung 74: Durchschnittlicher Lokalisierungsfehler in Abhängigkeit der relativen Standardabweichung der Distanz $\sigma_{RX}(\delta)/P_{RX}(d_{e,i})$ im endlichen Sensornetzwerk ($f_q \times f_q$), 2×2 Beacons im Gitter angeordnet, Übertragungsreichweite tr $0,95f_q$, w $1/d$, 10 Durchläufe.....	126
Abbildung 75: Abhängigkeit des Lokalisierungsfehlers vom Offsetfehler f_o (endliches Sensornetzwerk, Abmessung: $f_q \times f_q$, 2×2 Beacons, tr $0,95f_q$)	127
Abbildung 76: Abhängigkeit des Lokalisierungsfehlers vom Skalierungsverhältnis s (Endliches Sensornetzwerk, Abmessung: $f_q \times f_q$, 2×2 Beacons, tr $0,95f_q$).....	128
Abbildung 77: Gleichverteilte Beaconanordnungen bei identischer Beacondichte μ_B 1 Beacon/ A_i im unendlich großen Netzwerk mit repräsentativem Netzwerkausschnitt (gefüllte Flächen).....	130
Abbildung 78: Lokalisierungsfehler verschiedener Beaconverteilungen in Abhängigkeit der relativen Übertragungsreichweite tr/f_q bei konstanter Beacondichte μ 1 Beacon/ f_q^2 (WCL-Algorithmus mit g 1, unendliches Netzwerk), zufällige Beaconverteilung mit Varianzangabe.....	131

Abbildung 79: Anzahl zufälliger Beaconanordnungen ohne nicht-lokalisierte Sensorknoten (Unbekannte) in Abhängigkeit der Übertragungsreichweite tr/fq (WCL-Algorithmus mit $g = 1$, unendliches Netzwerk, 2×2 Beacons im Abstand fq , $\mu_B = 1$ Beacons/ fq^2).....	133
Abbildung 80: Gebiete (punktiert) eines endlichen Netzwerkes mit erhöhtem Lokalisierungsfehler verursacht durch die Lage am rechten Rand, bei Anordnung der Beacons a) im Dreieck b) im Quadrat c) im Sechseck	133
Abbildung 81: Embedded Sensor Board (ESB) der Firma Scatterweb [Sch04, Jer05].....	136
Abbildung 82: Versuchsaufbau des Lokalisierungssystems bestehend aus vier unbeweglichen Beacons $B_1..B_4$ und einem beweglichen Sensorknoten Sk_1	137
Abbildung 83: Versuchsaufbau des Lokalisierungssystems.....	138
Abbildung 84: Zustandsmaschine der Beacons	139
Abbildung 85: Ablaufdiagramm eines Beacons (Hauptprogramm)	140
Abbildung 86: Ablaufdiagramm der ISR auf den Beacons bei Empfang einer Nachricht	141
Abbildung 87: Ablaufdiagramm der Interrupt Service Routine eines mobilen Sensorknotens	142

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die eingereichte Dissertation selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Werken wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Ort, Datum: Rostock, 06.01.2008

Jan Blumenthal

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name	Jan Blumenthal
Geburtstag	26.06.1974
Geburtsort	Rostock
Nationalität	Deutsch
Familienstand	verheiratet, 1 Kind

Ausbildung/Berufstätigkeit

09/1981	09/1991	Polytechnische Oberschule, Realschulabschluss
09/1991	02/1995	Berufsausbildung zum Energieelektroniker, Siemens AG, Abschluss zum Energieelektroniker
08/1995	08/1996	Besuch der Fachoberschule, Abschluss: Fachhochschulreife
10/1996	07/2002	Studium der Elektrotechnik, Universität Rostock, Abschluss: Diplom-Ingenieur
05/1999		Aufnahme in das Siemens Students Program (SSP)
08/2000	12/2000	Auslandspraktikum Siemens-Technology-to-Business (TTB), Berkeley / USA
seit 08/2002		Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Angewandte Mikroelektronik und Datentechnik, Universität Rostock DFG-Schwerpunktprogramm: „Basissoftware für selbst- organisierende Infrastrukturen für vernetzte mobile Systeme“

Lehrtätigkeiten

Buchkapitel	2
International	18
National	14

Lehrtätigkeiten

Einzelvorlesungen	Sensornetzwerke Programmierung von Mikrocontrollern Objektorientierte Programmierung in C++
Übungen/Seminare	Echtzeitbetriebssysteme Programmierung von Mikrocontrollern
Praktikabetreuung	Grundlagen der Elektrotechnik RT-Linux
Studentenbetreuung	2 Diplome 5 Studienarbeiten

Rostock, 06.01.2008

Jan Blumenthal

Thesen

Sensornetzwerke

1. Sensornetzwerke bestehen aus einer Vielzahl zufällig verteilter Sensorknoten. Sie unterscheiden sich von anderen Netzwerken u. a. durch ihre extreme Ressourcenlimitierung und ihre Fähigkeit der Selbstorganisation.
2. Sensorknoten sind winzige, autonom arbeitende, ressourcenarme, eingebettete Systeme mit einer Kommunikationsschnittstelle. Sie messen Daten der Umwelt und leiten diese an die Datensinken des Systems weiter.
3. Alle in Sensornetzwerken eingesetzten Bauelemente, Verfahren und Algorithmen unterliegen dem Primat der sparsamen Ressourcennutzung.
4. Die Position eines Sensorknotens ist von immenser Bedeutung, um ein Messdatum dem Ort der Messung zuzuordnen. Sie wird durch geeignete Lokalisierungsverfahren ermittelt.

Distanzbestimmung

5. Die Distanzbestimmung zwischen Sensorknoten ist eine entscheidende Voraussetzung der Lokalisierung.
6. Viele der publizierten Verfahren erreichen theoretisch eine sehr hohe Positionsgenauigkeit, sind jedoch in der Realität aufgrund des erheblichen Ressourcen- bzw. Kostenaufwandes schwer einsetzbar.
7. Eine Distanz zwischen zwei Sensorknoten kann am Empfänger auf Basis der detektierten Empfangsleistung (RSS, Received Signal Strength) bei bekannter Sendeleistung näherungsweise ermittelt werden, wenn ein geeignetes Modell der Funkwellenausbreitung zugrunde gelegt wird.
8. Das neu vorgestellte Distanzermittlungsverfahren basiert ebenfalls auf der Abschwächung eines Funksignals. Im Unterschied zu RSS wird die minimal notwendige Sendeleistung (Minimal Transmission Power, MTP) zur erfolgreichen Übertragung ermittelt.
9. Das MTP-Verfahren vermeidet im Vergleich zu RSS eine Messung und den damit verbundenen Konvertierungsfehler. Es eignet sich jedoch besonders für Systeme ohne A/D-Wandler bzw. ohne erforderliche Beschaltung.

Schwerpunktbestimmung

10. Ausgehend von der Analyse vieler bereits publizierter Lokalisierungsverfahren wird deutlich, dass deren Implementierung aufgrund der zahlreichen Randbedingungen (geringer Energievorrat, limitierter Datenspeicher, geringe Bandbreite, hohe vorauszusetzende Varianz der Distanzwerte usw.) vielfach unrealistisch bzw. nicht sinnvoll ist.
11. In ressourcenlimitierten Sensornetzwerken mit geringen Genauigkeitsanforderungen kann auch der Lokalisierungsalgorithmus basierend auf der einfachen Schwerpunktbestimmung (CL) verwendet werden, der aus den Positionen bekannter Referenzknoten (Beacons) die Knotenposition ermittelt.
12. Das CL-Verfahren ist gekennzeichnet durch ein einfaches unidirektionales Übertragungsprotokoll, geringen Energieverbrauch, schnelle Berechnung und minimalen Speicherverbrauch.
13. Der Lokalisierungsfehler dieses Verfahrens ist bei vorausgesetzter Gleichverteilung und kreisförmiger Ausbreitungscharakteristik der Referenzknoten lediglich vom Verhältnis der Übertragungsreichweite und dem Abstand der Referenzknoten abhängig.
14. Der minimale Lokalisierungsfehler kann nur bei Einstellung einer optimalen Übertragungsreichweite der Referenzknoten erreicht werden.
15. In unendlich großen homogenen Netzwerken mit gleichverteilten Beacons und einer unendlich großen Übertragungsreichweite kann der Positionierungsfehler vollständig eliminiert werden.
16. Der quadratische Zusammenhang von Übertragungsreichweite und Sendeleistung legt den Einsatz kleiner Übertragungsreichweiten nahe, da sie zu einer deutlichen Energieersparnis bei Referenzknoten und Sensorknoten führen.
17. Eine deutliche Einschränkung des Verfahrens besteht in dem höheren Positionierungsfehler in den Randgebieten eines begrenzten Sensornetzwerkes.
18. Diese erhöhten Randfehler treten nur bei hohen Übertragungsreichweiten auf, weil dann für die Sensorknoten im Randbereich die detektierten Beacons nicht mehr einer Gleichverteilung im Empfangsbereich des Knotens entsprechen. Die Berechnungsvorschrift des Schwerpunktverfahrens ermittelt daher die Position im Bereich der höchsten Beacondichte.
19. Diese Randfehler können reduziert bzw. größtenteils korrigiert werden, wenn die Sensorknoten ihre Lage im Randbereich ermitteln können.

20. Eine Möglichkeit der Randbereichsdetektion besteht in dem Aufstellen von Nachbarschaftsvektoren in jedem Referenzknoten. Sie enthalten Informationen, ob ein Beacon seinerseits Nachbarbeacons besitzt oder nicht. Die Kenntnis aller Nachbarschaftsvektoren der detektierten Beacons erlaubt im Sensorknoten Rückschlüsse über die Lage im Randbereich.
21. Das neu präsentierte Verfahren Centroid Localization with Edge Correction (CLwEC) reduziert diesen randbedingten Fehler erheblich. Die dazu notwendigen Modifikationen am originalen Schwerpunktverfahren führen nur zu geringfügig höheren Ressourcenanforderungen, die sich in minimalem Speichermehrbedarf und längeren Nachrichten äußern.

Gewichtete Schwerpunktbestimmung

22. Eine weitere Verbesserung des CL-Verfahrens wurde durch die Überführung der einfachen in eine gewichtete Schwerpunktbestimmung (Weighted Centroid Localization, WCL) erreicht.
23. Das Gewicht wird durch eine für den Einsatzfall optimierte Gewichtsfunktion bestimmt.
24. Unterschiedliche Gewichtsfunktionen können den Positionierungsfehler maßgeblich reduzieren und bei den für Sensornetzwerke typischen fehlerbehafteten Distanzmessungen mit hoher Varianz problemlos die Genauigkeit stabilisieren.
25. Die bisher geringsten Positionierungsfehler ermittelte die Gewichtsfunktion, die einen hyperbolischen Zusammenhang aus gemessener Distanz und Gewicht herstellt. Eine zusätzliche Wichtung geringer Distanzen konnte durch die Einführung eines Grades erreicht werden.
26. Für den WCL-Algorithmus existieren ebenfalls optimale Übertragungsradien der Referenzknoten, die eine Fehlerminimierung in Abhängigkeit der Gewichtsfunktion erlauben.
27. Die optimale Übertragungsradius ist zudem abhängig von der Anordnung der Referenzknoten. Bei gleicher Beacondichte führte die quadratische Anordnung der Beacons zu dem geringsten Lokalisierungsfehler.
28. Sind in der Realität keine bzw. nur ungenaue optimale Übertragungsradien konfigurierbar, kann durch Anpassung des Grades der Gewichtsfunktion eine Reduzierung des Lokalisierungsfehlers erreicht werden.

Zusammenfassung

Sensornetzwerke bestehen aus einer Vielzahl ressourcenarmer und autarker Sensorknoten, die sich selbst organisieren und lokalisieren müssen. Die Positionsermittlung der zufällig verteilten Sensorknoten unterliegt dabei den extremen Einschränkungen durch knappe Datenspeicher, geringe Kapazität der Energiequellen, schmale Bandbreiten u. v. m.

In der vorliegenden Arbeit wurden verschiedene, als Voraussetzung zur Lokalisierung, publizierte Distanzermittlungsverfahren untersucht. Das neu entwickelte Verfahren auf Basis der minimalen Übertragungsleistung (MTP) eliminiert einige Fehlerquellen der weit verbreiteten Empfangsfeldstärkemessung. Ein Nachteil des Verfahrens besteht jedoch in dem höheren Energieverbrauch durch zahlreiche Funkübertragungen, wodurch es lediglich für statische Netzwerke prädestiniert ist.

Den Kern der Arbeit bildet die ressourcenarme Lokalisierung von Sensorknoten. Basierend auf der Analyse vieler Lokalisierungsverfahren wird erläutert, dass deren Implementierung aufgrund der zahlreichen Randbedingungen vielfach unrealistisch bzw. nicht sinnvoll ist.

In Sensornetzwerken mit geringen Genauigkeitsanforderungen kann die einfache Schwerpunktbestimmung (CL) als Lokalisierungsverfahren eingesetzt werden, wenn alle Referenzknoten optimal konfiguriert werden können.

In den Randgebieten eines Netzwerkes erreicht der CL-Algorithmus jedoch nur eine sehr geringe Genauigkeit. Das neu präsentierte Verfahren Centroid Localization with Edge Correction (CLwEC) reduziert diesen randbedingten Lokalisierungsfehler durch einige Modifikationen bei lediglich geringfügig höherem Ressourcenaufwand deutlich. Es ist daher für ressourcenlimitierte Sensornetzwerke als Ersatz des CL-Verfahrens außerordentlich geeignet.

Die Überführung des CL-Verfahrens in die gewichtete Schwerpunktbestimmung (WCL) reduzierte den Positionierungsfehler trotz der für Sensornetzwerke typischen fehlerbehafteten Distanzmessungen hoher Varianz erheblich. Der Fehler ist dabei maßgeblich von der eingestellten Übertragungsreichweite und der Anordnung der Referenzknoten abhängig.

Abgerundet wurde die Arbeit mit der Vorstellung einer im Einsatz befindlichen Beispielanwendung, die das Distanzermittlungsverfahren basierend auf der minimalen Übertragungsleistung (MTP) demonstriert. Die dynamisch ermittelten Distanzwerte bilden trotz sichtbarer Varianz die Voraussetzung für eine beeindruckende Positionsgenauigkeit des WCL-Lokalisierungsverfahrens.

Abstract

Sensor networks consist of a mass of resource-critical and autarchic simple sensor nodes. Initially, these sensor nodes have to organize and localize autonomously. The localization process of these randomly deployed nodes must meet numerous strong conditions of small data memories, limited energy sources, a small bandwidth and others.

In this work, lots of the already published range estimation algorithms are analyzed regarding the compliance to the given constraints. The presented method to determine a distance based on the minimal transmission power eliminates some sources of errors known from the measurement of the received signal strength. As a little drawback, this new technique increases the energy consumption due to more transmissions. Thus, it is predestined to static networks.

The main part of this script aims to the resource-aware localization of sensor nodes. Based on an extensive analysis, it is illustrated that most of available localization algorithms do not consider at all the numerous constraints.

In sensor networks with low accuracy requirements, node's positions can be calculated by the centroid localization algorithm (CL) provided that all reference nodes can be configured optimal regarding the presented method.

In borderlands of a sensor network, the accuracy of the centroid localization decreases enormously. The new presented algorithm centroid localization with edge correction (CLwEC) reduces this positioning error significantly and requires, in comparison the CL, only slightly increased resources. Therefore, it is exceedingly qualified to replace the centroid localization in resource-aware sensor networks.

The positioning error could be decreased drastically by the new introduced weighted centroid localization algorithm (WCL). Its positioning error highly depends on the alignment of the beacons and results in a minimum if an optimal transmission range is adjusted. Additionally, this algorithm features a very robust error behavior despite the expected high variances of the required distance measurements.

Finally, this work concludes with the presentation of a real world application. It demonstrates the distance estimation based on the minimal transmission power and the weighted centroid localization. In spite of noticeable oscillating distances, the localization accuracy is very precise.