

T. Strang, F. Schubert, S. Thölert, R. Oberweis, et al.

Lokalisierungsverfahren



T. Strang, F. Schubert, S. Thölert, R. Oberweis, et al.

Lokalisierungsverfahren



DLR

**Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.**
in der Helmholtz-Gemeinschaft

Impressum

Herausgeber Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)
Institut für Kommunikation und Navigation
Adresse Münchner Straße 20
82234 Oberpfaffenhofen-Wessling
Verantwortlich Prof. Dr. Thomas Strang
Tel.: +49 8153 28-1354
Email: thomas.strang@dlr.de
Druck DLR

Oberpfaffenhofen, Juni 2008

Abdruck (auch von Teilen) oder sonstige Verwendung nur nach vorheriger Absprache mit dem Herausgeber gestattet.

Die vorliegende Studie wurde im Auftrag und in Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik in Kooperation vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für Kommunikation und Navigation (IKN) erstellt.

Autoren

An der Erstellung dieser Studie haben mitgewirkt:

Michael Angermann

Boubeker Belabbas

Armin Dammann

Thomas Jost

Susanna Kaiser

Harald Kelter

Mohammed Khider

Bernhard Krach

Andreas Lehner

Thoralf Noack

Rainer Oberweis

Patrick Remi

Markus Rippl

Patrick Robertson

Frank Schubert

Thomas Strang

Steffen Thölert

Hans-Peter Wagner

Christian Weber

Kai Wendlandt

Inhaltsverzeichnis

1.	Einführung und Übersicht verschiedener Sensoreigenschaften	1
1.1	Einleitung	1
1.2	Klassifikation der Sensoreigenschaften	1
1.2.1	Zeitliche Stabilität	1
1.2.2	Auswirkungen auf die Zweidimensionale und Dreidimensionale Positionierung	3
1.2.3	Unabhängigkeit der Sensorfehler	4
1.2.4	Sensorkombinationen am Beispiel „Positionierung für Fußgänger“	4
1.3	Auswirkungen auf Verfügbarkeit, Genauigkeit und Integrität	4
1.4	Klassifikationseigenschaften	6
1.5	Kritische Umgebungen	7
2.	GNSS Basierte Systeme und Systemkomponenten	10
2.1	GNSS allgemein	10
2.1.1	GPS	10
2.1.2	Galileo	17
2.1.3	GLONASS	20
2.2	GNSS-Ergänzungssysteme	22
2.2.1	SBAS (Space Based Augmentation System)	22
2.2.2	GBAS (Ground Based Augmentation System)	24
2.2.3	ABAS (Airborne Augmentation System)	25
2.3	GNSS Pseudolites	25
2.3.1	Unterscheidungsmerkmale bei Pseudolites	26
2.4	GNSS RAIM und das Integritätskonzept	28
2.4.1	Snapshot RAIM und Sequential RAIM	29
2.5	Assisted GNSS (A-GNSS)	29
2.5.1	Positionsbestimmung mit Assistenzinformationen aus dem GSM-Netz	30
2.6	Robustheit von GNSS gegen Störungen	31
2.7	GNSS Signalempfang in Gebäuden	34
2.8	Zusammenfassung der Nachteile und Einschränkungen von GNSS Systemen	39
3.	Nicht-GNSS basierte Systeme	40
3.1	Übersicht nicht-GNSS-basierter Sensoren und Systeme zur Fußgängernavigation	40
3.2	Ortung mittels Mobilfunk	40
3.2.1	Prinzipien	41
3.2.2	Ortung in existierenden Mobilfunkstandards	46
3.3	Ortung mittels RFID-Technologie	47
3.3.1	Kurzeinführung RFID-Technik	47
3.3.2	Lokalisierung mit RFID	49
3.3.3	Zusammenfassung RFID	51
3.4	Trägheitsnavigation	51

3.4.1	Plattform- und Sensor-Technologie	51
3.4.2	Berechnungsverfahren	54
3.4.3	Drift von Trägheitsnavigationssystemen	57
3.4.4	Integration von Trägheitsnavigationssystemen mit anderen Sensoren	57
3.4.5	Spezielle Anwendung für Fußgänger	58
3.5	Barometrische Sensoren	60
3.6	Magnetometer	60
3.7	Optische Systeme mittels digitaler Bildverarbeitung	61
3.7.1	Gesichts-Erkennung/Verifikation	61
3.7.2	Personen-Erkennung und deren Bewegungen in Video-Sequenzen	63
3.7.3	Schätzung der Kopfstellung	64
3.8	Dedizierte Systeme für die Indoor-Navigation	65
3.8.1	Clientbasierte Systeme	66
3.8.2	Infrastrukturbasierte Systeme	67
3.9	Sensoren für die Unterstützung der Navigation in Fahrzeugen (Straße und Schiene)	69
3.9.1	Lokalisierung von Schienenfahrzeugen	69
3.9.2	Lokalisierung von Straßenfahrzeugen	79
3.10	Sensoren und Prozessierung zur Unterstützung der Navigation in Flugzeugen (Lande-anflug)	80
3.10.1	Integrierte INS/GNSS Navigationssysteme	80
3.10.2	Terrestrische Radionavigationssysteme für den Flugverkehr	81
3.10.3	Landesysteme	81
4.	Weitergehende technologische Aspekte	83
4.1	Grundlagen der Sensordatenfusion für hochgenaue und zuverlässige Positionierungssysteme	83
4.1.1	Einleitung	83
4.1.2	Vorbereitung der Mathematischen Betrachtungsweise	84
4.1.3	Mathematische Formulierung als Schätzproblem	85
4.2	Bewegungsmodelle für die Fußgängernavigation	93
4.2.1	Makroskopische Ebene	95
4.2.2	Mesoskopische Ebene	95
4.2.3	Mikroskopische Ebene	96
4.2.4	Diskussion von Modellen der mikroskopische Ebene	97
4.2.5	Diskussion und Ausblick	100
4.3	Integration von Map Matching und Bewegungsmodellen	100
5.	Sinnvolle Kombinationen und Roadmaps	103
6.	Literaturreferenzen	105

Abkürzungen

3GPP	3 rd Generation Partnership Project
AAIM	Aircraft Autonomous Integrity Monitoring
ABAS	Airborne Based Augmentation System
AoA	Angle of Arrival-Verfahren
AOR-E	Atlantic Ocean Region East
AP	Access Point
APL	Airport Pseudo-Satelliten
BAP	Bluetooth Access Points
BPSK	Binary Phase Shift Keying
BS	Basisstation
C/A-Code	Coarse/Aquisition-Code
CBIR	Content Based Image Retrieval
CDMA	Code Division Multiple Access
Cell-ID	Cell Identification
CLC	Closed Loop Correlators
CS	Commercial Service
CTA	Container Terminal in Hamburg Altenwerder
DGPS	Differential GPS
DLL	Delay-Lock-Loop
DME	Distance Measuring Equipment
DME/P	Präzisions-DME
DOP	Dilution Of Precision
ECEF	Earth-Centered Earth-Fixed
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service
EKF	Extended Kalman-Filter
E-OTD	Enhance observed Time Difference
ESA	European Space Agency
ETCS	European Train Control System
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FDD	Frequency-Division Duplex
FIFO	First-In, First-Out
FLD	Fisher Linear Discriminant
GBAS	Ground Based Augmentation Systems
GIOVE	Galileo In Orbit Validation Equipment
GLONASS	Global Navigation Satellite System
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile communications
HOG	Histogram of Oriented Gradients
HPL	Horizontal Protection Level
IESM	Individual Eigenface Subspace Method

ILS	Instrument Landing System
IMU	Inertial Measurement Unit
INS	Integrated Navigation System
IOR-W	Indian Ocean Region West
IPDL	Idle Period Downlink
ISM	Industrial/Science/Medical-Bändern
ITU	International Telecommunication Union
KFZ	Kraftfahrzeug
LDA	Linear Discriminant Analysis
LEE	Location Estimation Engine,
LMU	Local Measurement Units
LORAN	Long Range Navigation
LOS	Line-of-Sight
LPR	Local Positioning Radar
LZB	Linienförmige Zugbeeinflussung
MACE	Minimum Average Correlation Energy Filter
MAP	Maximum A-Posteriori
MEMS	Mikro-Elektro-Mechanische Systeme
MEO	Medium Earth Orbi
MLS	Microwave Landing System
MS	Mobilstation
MSAS	Multi-Functional Satellite Augmentation System
NAVSTAR	Navigation System with Time and Ranging
OS	Open Service
OTDoA	Observed TDoA
P(Y)-Code	Precision-Code
PCA	Principal Component Analysis
PDA	Personal Digital Assistants
PDF	Probability Density Function
PRN	Pseudo Random Noise
PRS	Public Regulated Service
RFID	Radio Frequency Identification
RIMS	Ranging and Integrity Monitoring Stations
RSS	Received Signal Strength
RTT	Round Trip Time
SAR	Search And Rescue
SBAS	Satellite Based Augmentation Systems
SIL	Safety Integrity Level
SoL	Safety-of-Life-Service
SVM	Support Vector Machine
TA	Timing Advance
TACAN	Tactical Air Navigation
TBT	Threshold Balanced Transformation
TDD	Time-Division Duplex

TDMA	Time Domain Multiple Access
TD _o A	Time Difference of Arrival
ToA	Time of Arrival
TTA	Time-to-Alarm
TTF	Time to First Fix
UE	User Equipment,
UKF	Unscented Kalman-Filter
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UT	Unscented Transform
UTRAN	Universal Terrestrial Radio Access Network
UWB	Ultra Wide Band
VDB	Very High Frequency Data Broadcast
VOR	Very High Frequency Omnidirectional Range
VPL	Vertical Protection Level
WAAS	Wide Area Augmentation System
WDF	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion
WLAN	Wireless Local Area Network
WSN	Wireless Sensor Networks

1. Einführung und Übersicht verschiedener Sensoreigenschaften

1.1 Einleitung

Es ist eine allgemein akzeptierte Tatsache, dass hochgenaue und vor allem zuverlässige Positionierung in vielen kritischen Umgebungen nur mithilfe einer sinnvollen Kombination unterschiedlicher Positionierungssensoren erreicht werden kann. Einfache Beispiele sind Fahrzeuge und die bekannten und populären Anwendung der Straßennavigation und Zielführung. Sehr einfache Systeme – vor Allem tragbare Geräte - verwenden beispielsweise nur Empfänger für das *Global Positioning System* (GPS), das zur Klasse der globalen Satellitennavigationssysteme (*Global Navigation Satellite Systems*, GNSS) gehört. Diese Positionierungsquelle ist in vielen Situationen ausreichend. Allerdings wird spätestens beim Abbiegen im Tunnel, oder beim Suchen einer Adresse im Inneren einer Großstadt im Schatten vieler nahegelegenen Hochhäuser (sogenannten *Urban Canyons*) deutlich, dass integrierte Positionierungssysteme, welche auf weitere Sensoren zurückgreifen, in ihrer Genauigkeit und Verfügbarkeit überlegen sind. So verwenden fest installierte, integrierte KFZ-Navigationssysteme auch Radsensoren, die die gefahrene Strecke messen, und so zum Einen die Genauigkeit der Positionierung verbessern, zum Anderen aber auch unabhängig von GNSS (z.B. bei einem kurzzeitigen Ausfall) eine Positionsschätzung erlauben. Unter Integration versteht man in diesem Zusammenhang grundsätzlich das Verwenden von mehreren Positionierungsquellen [Rob07a].

In diesem Bericht wird der Begriff Sensor für alle Informationsquellen verwendet, die zur Bestimmung der Position herangezogen werden können. Es ist wichtig hier anzumerken, dass ein Sensor nicht unbedingt die Position selbst messen muss; es kann sich auch um eine Information handeln, die es einem integrierten Positionssystem ermöglicht, die Positionsgenauigkeit zu verbessern. So ist im einführenden Beispiel der Radsensor kein Positionssensor sondern ein Wegstreckensensor (bzw. auch ein Richtungsänderungssensor). Ferner wird der Begriff Sensor sowohl für messtechnische Sensoren wie Magnetkompass, Radsensoren oder Höhenmesser, aber auch für Empfänger wie z.B. GPS-Empfänger, Mobilfunkempfänger oder RFID-Scanner/-Empfänger und auch z.B. für optische Kameras oder optische Entfernungsmesser verwendet. So ist ein Sensor in diesem Sinne eine Quelle für (meist noch unprozessierte oder gering vorprozessierte) Informationen, die für die Positionierung verwendet werden kann.

1.2 Klassifikation der Sensoreigenschaften

In diesem Abschnitt wird eine grundlegende Klassifizierung der Sensoreigenschaften eingeführt (z.B. zeitliche Stabilität, 2D-Fähigkeit gegenüber 3D-Fähigkeit sowie individueller Verfügbarkeit und Genauigkeit) und somit die Auswirkungen auf Verfügbarkeit, Genauigkeit und Integrität von integrierten Positionierungssystemen qualitativ abschätzen.

1.2.1 Zeitliche Stabilität

In der Positionierung ist die Klassifikation nach zeitlicher Stabilität das wohl wichtigste allgemeine Unterscheidungsmerkmal der Positionierungssensoren. Unter der zeitlichen Stabilität versteht man zwei Aspekte:

1. Zum Einen das Verhalten des unverarbeiteten, rohen Sensorfehlers über der Zeit: „grundsätzliche Sensorstabilität“.
2. Zum Anderen das zeitliche Verhalten des Einflusses des Sensorfehlers auf die spätere Positionsschätzung: „positionsbezogene Stabilität“.

Diese Unterscheidung ist notwendig, denn ein Sensor kann eine hohe grundsätzliche Stabilität aufweisen, aber eine schlechte positionsbezogene Stabilität (z.B. aufgrund von Integrationsfehlern

wenn man die Positionsbestimmung durchführt). Bei beiden Stabilitätskriterien unterscheidet man ferner zwischen dem kurzfristigen und dem langfristigen Verhalten. Somit ergeben sich vier grobe Beurteilungskategorien. Es ist noch anzumerken, dass aufgrund der physikalischen Einwirkungen die Stabilität auch abhängig von der Umgebung und von der Bewegung des zu ortenden Nutzers sein kann.

Ein GNSS-Empfänger ist im Wesentlichen grundsätzlich und positionsbezogen langfristig stabil, denn seine Fehler nehmen mit der Zeit normalerweise grundsätzlich nicht zu. Allerdings ist er kurzfristig weniger stabil, wegen kürzer andauernden Abschattungen oder Störungen des Signals. Anders verhält sich ein Magnetkompass: dieser ist zwar grundsätzlich langfristig stabil, rechnet man aber dessen Messungen auf die Position um, dann summieren sich langfristig viele Richtungsfehler zu einem anwachsenden Positionsfehler. Kurzfristig ist ein Magnetkompass je nach Einsatzzweck weniger stabil, aufgrund störender magnetischer Einflüsse in der Umgebung. Wird ein barometrischer Höhenmesser zur Bestimmung der absoluten Höhe verwendet, weist dieser nur eine kurz- oder mittelfristige grundsätzliche und positionsbezogene Stabilität auf (auf keinen Fall über mehrere Stunden hinaus) denn ein sich mit der Witterung ändernder Luftdruck wirkt sich auf die gemessene Höhe aus.

Ein Inertialmesssystem (*Inertial Measurement Unit*, IMU) besteht aus Beschleunigungssensoren und Drehratensensoren und ist ein wichtiger Baustein in vielen integrierten Positionierungssystemen (z.B. in der Luftfahrt). Diese Sensoren an sich sind grundsätzlich kurzfristig und langfristig stabil. Verwendet man aber diese Sensorsignale zur Bestimmung der Position, so ist leider eine sehr schlechte langfristige zeitliche Stabilität die Folge der sogenannten Fehlerfortpflanzung. Fusioniert man die Messungen einer IMU mit GNSS-Messungen, so ergibt sich ein integriertes Navigationssystem (*Integrated Navigation System*, INS), bei dem sich die beiden Systeme aufgrund ihrer unterschiedlichen Fehlereigenschaften sehr gut ergänzen.

In Tabelle 1 sind die Stabilitätseigenschaften der eben beschriebenen Sensoren zusammengefasst.

GNSS-Sensor	Grundsätzliche Stabilität	Positionsbezogene Stabilität
Kurzfristige Stabilität	Oft niedrig (aufgrund von Abschattungen)	Oft niedrig (aufgrund von Abschattungen)
Langfristige Stabilität	Hoch (außer bei systematischen Fehlern aufgrund von Systemfehlern)	Hoch (außer bei systematischen Fehlern aufgrund von Systemfehlern)

Magnetkompass-Sensor	Grundsätzliche Stabilität	Positionsbezogene Stabilität
Kurzfristige Stabilität	Oft niedrig (aufgrund von Magnetfeldstörungen)	Mittel (begrenzt durch die kurzfristige Störungen des Magnetfeldes). Grad der Stabilität hängt jedoch von der Bewegung des Subjektes ab
Langfristige Stabilität	Hoch (außer bei nicht kompensierten, systematischen Fehlern; schlechter bei sich langsam bewegenden Subjekten)	Niedrig. Selbst kleine Richtungs-Fehler addieren sich bei der Positionsbestimmung auf

Barometrischer-Höhenmesser-Sensor	Grundsätzliche Stabilität	Positionsbezogene Stabilität
Kurzfristige Stabilität	In vielen Anwendungsbereichen sehr hoch	In vielen Anwendungsbereichen sehr hoch
Langfristige Stabilität	Niedrig (Witterungsbedingte Luftdruckschwankungen)	Niedrig

Inertialmesssystem (IMU)	Grundsätzliche Stabilität	Positionsbezogene Stabilität
Kurzfristige Stabilität	Sehr hoch	Hoch
Langfristige Stabilität	Sehr hoch	Sehr niedrig (Fehlerfortpflanzung durch doppelte Integration und Winkelfehler)

Radsensor	Grundsätzliche Stabilität	Positionsbezogene Stabilität
Kurzfristige Stabilität	Sehr hoch	Hoch
Langfristige Stabilität	Sehr hoch	Mittel (Fehler im Radumfang integrieren sich zu ansteigenden Positionsfehlern)

Tabelle 1: Einstufung der zeitlichen Stabilität unterschiedlicher Sensoren.

Die Sensorfusion (siehe Abschnitt 4.1) spielt vor allem dann ihre besonderen Stärken aus, wenn Sensoren mit kurzfristiger zeitlicher Stabilität mit Systemen mit langfristiger Stabilität verbunden werden. Im einführenden Beispiel der KFZ-Navigation ist der GPS-Empfänger langfristig stabil.

1.2.2 Auswirkungen auf die Zweidimensionale und Dreidimensionale Positionierung

Es ist nicht schwierig die Sensoren in Bezug auf ihre Fähigkeit, die dreidimensionale Positionierung verbessern zu können, zu bewerten. Streng genommen gibt es neben der 2D- und 3D-Positionierung noch den eindimensionalen Fall, z.B. die Positionierung eines Schienenfahrzeuges. Die Betrachtungsweise gilt für diesen Fall analog.

Die Unterscheidung zwischen der horizontalen und vertikalen Positionsgenauigkeit ist aus zwei Gründen wichtig:

1. In vielen Anwendungen ist die erreichbare vertikale Genauigkeit mindestens so bedeutsam wie die horizontale. Als Beispiel sei ein automatischer Notruf eines kranken Menschen genannt, dessen EKG-Sensor ein Herzkreislaufproblem feststellt und einen entsprechenden Alarm bei einer Leitstelle auslöst. Eine horizontale Abweichung von beispielsweise 10 m könnte bedeuten, dass man den Kranken im benachbarten Raum vermutet. Eine gleichgroße Höhenabweichung kann einen Unterschied zum übernächsten Stockwerk darstellen. Im ersten Fall ist es viel einfacher zur notleidenden Person zu gelangen, im zweiten Fall suchen die Hilfskräfte in der falschen Wohnung oder im falschen Unternehmen. Beim Landevorgang eines Flugzeuges werden ebenfalls hohe Anforderungen an die vertikale Positionsgenauigkeit gestellt. Bei der Fahrzeugnavigation ist in der Regel die horizontale Genauigkeit – manchmal nur die eindimensionale – entscheidend.
2. Manche Sensoren tragen gar nicht oder nur eingeschränkt zur horizontalen Genauigkeit (z.B. Höhenmesser) oder vertikalen Genauigkeit (z.B. Magnetkompass, Schrittzähler) bei. Eine sinnvolle Kombination verschiedener Sensoren für einen Anwendungsfall muss also den Sensoreigenschaften angepasst sein.

Ein Höhenmesser trägt natürlich hauptsächlich zur Verbesserung der Höhengenaugigkeit bei. Es ist jedoch zunächst überraschend, dass auch ein Höhenmesser unter Umständen die zweidimensionale (also horizontale) Genauigkeit auch in Maßen verbessern kann – dies ist eine Folge der Sensorfusion. Ein GNSS-Empfänger unterliegt geometriebedingt in der Regel größeren Höhenfehlern als horizontalen Positionsabweichungen und profitiert somit von der Ergänzung durch weitere – die Höhebestimmung verbessernde – Sensoren.

1.2.3 Unabhängigkeit der Sensorfehler

Schließlich sei erwähnt, dass die Verwendung von Kartenmaterial in einer Sensorfusion (*Map Matching*) die horizontale Genauigkeit und Höhengenaugigkeit weiter verbessern kann. Da Map Matching korrekterweise nicht als Sensor aufgefasst wird, wird in Kapitel 4.2 auf dieses Thema eingegangen.

1.2.4 Sensorkombinationen am Beispiel „Positionierung für Fußgänger“

In Abbildung 1 ist eine Zusammenfassung unterschiedlicher Sensoren für den beispielhaften Anwendungsfall der Fußgängerortung dargestellt. Im äußeren Bereich sind die grundsätzlichen Sensoreigenschaften genannt: so trägt ein barometrischer Sensor zur Höheninformation bei, und eine am Fuß oder am Körper getragene IMU erlaubt die Schrittmessung eines Menschen. Als Ausblick auf den Abschnitt 4.1 sehen wir die Bedeutung der Sensorfusion als wichtiges Verbindungsglied, sowie die Rolle des auf den Menschen angepassten Bewegungsmodells.

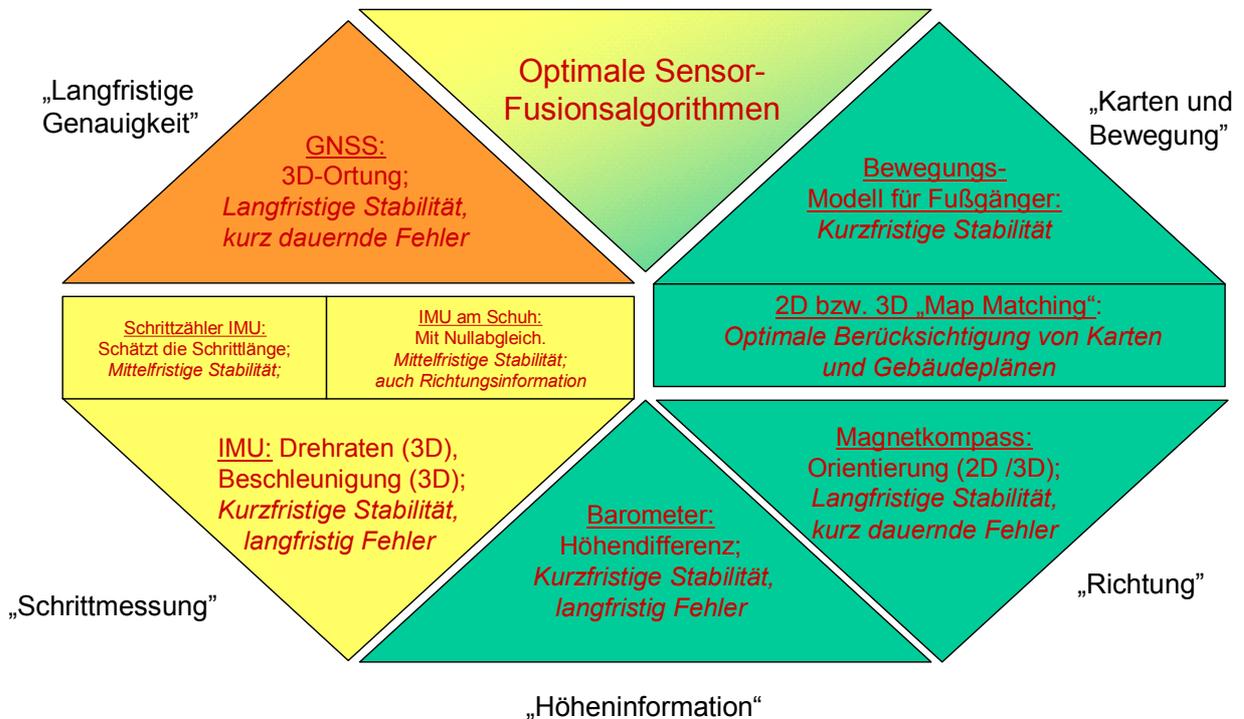


Abbildung 1: Kombination verschiedener Sensoreigenschaften um die Anwendung „Fußgängerpositionierung“ im Indoor- und Outdoor-Bereich zuverlässig abzudecken [Rob07a].

1.3 Auswirkungen auf Verfügbarkeit, Genauigkeit und Integrität

Die Auswahl von geeigneten Sensorkombinationen ist entscheidend für die Robustheit der Positionierung für einen gegebenen Anwendungsfall. Wie in den obigen Abschnitten beschrieben, werden neben der GNSS-Technologie solche Sensoren verwendet, die Informationen über die Lage oder Bewegung des Subjektes ermitteln können. Die geeignete Sensorfusion (siehe Abschnitt 4.1) verbindet diese unterschiedlichen Informationen zu einer optimalen Schätzung der Position (und Geschwindigkeit bzw. Richtung). Somit stellt die Verwendung von Sensoren mit unterschiedlichen Eigenschaften eine Möglichkeit dar, die Qualität des Positionierungssystems zu erhöhen:

- Die Verfügbarkeit wird dadurch verbessert, dass auch dann eine Positionierung erzielt werden kann, wenn einer der Sensoren keine Informationen liefert. Zum Beispiel ist für eine gewisse Zeit eine mehr oder weniger genaue Fahrzeugpositionierung im Tunnel möglich, unter Verwendung von geeigneten Sensoren zusätzlich zu einem GNSS-Empfänger.
- Die Genauigkeit wird durch die Verwendung mehrerer Sensoren in der Regel erhöht. So verbessert die Verwendung eines barometrischen Höhenmessers die Höhengenaugigkeit eines integrierten Systems welches als weiteren Sensor GNSS benutzt.
- Wichtig ist auch, dass die Integrität der Positionslösung durch die Verwendung unterschiedlicher Sensoren verbessert wird. Ein einfaches Beispiel verdeutlicht dies: Die Kombination eines GNSS-Empfängers und eines Beschleunigungsmesser bestimmt die Position eines stillstehenden Subjekts. Erleidet das GNSS System nun eine Störung, die sich in einer raschen Positionsänderung des GNSS-Empfängers äußert, dann stünde dies in Widerspruch zu dem erwarteten Signal des Beschleunigungsmessers. Das Positionierungssystem könnte ein entsprechendes Signal an den Nutzer oder an übergeordnete Systemkomponenten geben, dass die GNSS-Positionslösung derzeit nicht korrekt ist.

Abgrenzung des Begriffs Integrität

Im Kontext der Satellitennavigation wird unter Integrität im Allgemeinen die Korrektheit der durch die Ortungskomponente bereitgestellten Positionsinformation verstanden. Diese wird durch zwei Größen beschrieben: Fehlergrenzwert und Alarmzeit.

Der Fehlergrenzwert (*Threshold Value*) spezifiziert den noch tolerierbaren Positionsfehler für eine bestimmte Anwendung. Er heißt auch *Protection Level* und wird üblicherweise in der horizontalen Ebene (*Horizontal Protection Level*, HPL) und in der vertikalen Achse (*Vertical Protection Level*, VPL) getrennt angegeben.

Die Alarmzeit (*Time-to-alarm*, ToA) beschreibt die erlaubte Zeitspanne zwischen Auftreten des den Alarm auslösenden Ereignisses und seiner Erfassung am Ausgang der Ortungskomponente.

Unter Integritätsrisiko versteht man den Zustand, bei dem die Ortsbestimmung außerhalb des Toleranzbereiches auch nach der ToA liegt, ohne dass eine Alarmmeldung vorliegt und die Ortungskomponente weiterhin Positionswerte liefert. Das Integritätsrisiko wird als statistischer Wert für eine vorgegebene Zeiteinheit angegeben und spezifiziert prozentual die Anzahl von Messpunkten, bei denen dieser Fehlerzustand nicht auftreten darf.

Für einen Landeanflug nach CAT II beträgt das Integritätsrisiko beispielsweise 2×10^{-9} . In diesem Risikobudget ist auch die Fehlerkennung von Fehlern (*False Positives*) zu berücksichtigen sowie die Detektion von Fehlern außerhalb der Alarmzeit.

Erläuterung der Gemeinsamkeiten und Abgrenzungsmerkmale gegenüber der Begriffsverwendung im Kontext der IT-Sicherheit

Die Gemeinsamkeit der Begriffsverwendungen besteht darin, dass Integrität eine Garantie für die Richtigkeit eines Datums darstellt. Während in der IT-Sicherheit die Richtigkeit des Datums im Allgemeinen absolut angegeben wird (Datum verfälscht oder richtig, also ein Wahrheitswert), ist für eine Positionslösung eine obere Fehlerschranke als maximaler Fall der Verfälschung in Form des Protection Levels vorgesehen. Es handelt sich also um einen „analogen“ Wert für die Richtigkeit des Datums. Integrität gibt an, „wie korrekt“ die Position ist.

In beiden Fällen besteht jedoch eine zahlenmäßig angegebene Wahrscheinlichkeit für die Korrektheit des Datums innerhalb des angegebenen Bereichs.

1.4 Klassifikationseigenschaften

Aus praktischer Sicht ist es sinnvoll die Sensoren dahingehend zu bewerten, wie sie sich in unterschiedlichen Umgebungen verhalten. Da es zahlreiche mögliche Umgebungen gibt wird hier beispielhaft die Unterscheidung zwischen dem Verhalten in Gebäuden und außerhalb von Gebäuden benannt. In Tabelle 2 sind diese Eigenschaften von häufiger verwendeten Sensoren zusammengefasst. Die dritte Spalte ist eine Zusammenfassung der Art der Sensordaten.

Sensor	Eigenschaft in Gebäuden	Eigenschaft im Freien	Art der Information
GNSS-Empfänger	Meist hohe Ungenauigkeiten (bis einige hundert Meter trotz hoher Empfindlichkeit moderner Empfänger) und große Schwierigkeiten bei der Akquisition (<i>Time to First Fix</i>)	Bei freier Sicht zum Himmel i.d.R. hohe Genauigkeit. Probleme vor allem durch Mehrwegeempfang und Abschattungen in Häuserschluchten oder in ähnlichen Umgebungen	I.d.R. Position in drei Dimensionen (bzw. zwei unter manchen Empfangsumständen). Bei Bewegung auch Geschwindigkeit und Bewegungsrichtung. Ohne weitere Prozessierung keine symbolische Positionsinformation
Magnetkompass	Je nach Einrichtung, Baumaterialien, stromführenden Leitungen und Metallgegenstände sowie magnetische Gegenstände mehr oder weniger starke Störungen	Sofern die Ortsmissweisung (Abweichung zwischen magnetischer und geographischer Nordrichtung) bekannt ist, ist meist eine höhere Genauigkeit als in Gebäuden erreichbar	Richtung des Sensors. Bei bekannter Einbauausrichtung auch die Bewegungsrichtung (z.B. im KFZ oder in Schiffen)
Inertialmesssystem (IMU)	Meist unabhängig von der Umgebung. Problematisch bei sich bewegenden Referenzsystemen (z.B. bei Benutzung zur Personenortung an Bord eines schwankenden Schiffs oder im Zug)		Beschleunigungswerte und Drehraten. Meist sechs Sensorwerte (zwei mal drei Dimensionen). Siehe Abschnitt 3.4
Barometrischer Höhenmesser	Meist unabhängig von der Umgebung. Je nach Umfeld jedoch Einfluss durch Klimatisierung oder Druckanpassung möglich		Luftdruckänderung die als Höhenänderung umgerechnet werden kann
Positionierungssensor mittels <i>Radio Frequency Identification</i> (RFID)	Innerhalb von Gebäuden sind RFID-Tags bzw. -Lesegeräte leicht zu installieren. Oftmals natürliche Beschränkung des Empfangs auf einen Raum oder beschränkten Bereich (was in einigen Fällen jedoch von Vorteil sein kann)	Außerhalb von Gebäuden nicht immer wirtschaftlich (aufgrund der kurzen Reichweite). Ausnahmen: Orte an denen viele Menschen vorbeikommen, z.B. Bushaltestellen	Index der empfangenen RFIDs, somit auch symbolische Positionsinformation. GGfs. auch Funkfeldstärke (siehe Abschnitt 3.3)

Positionierungssensor mittels Mobilfunk	Aufgrund der höheren Leistung von Mobilfunksignalen meist bessere Empfangsbedingungen als GNSS	Je nach Dichte der Basisstationen und verwendeter Ortungstechnologie (siehe Abschnitt 3.2) gute Positionierung. Im ländlichen Bereich bei geringer Dichte von Basisstationen weniger genau	Sowohl symbolische Positions-Information durch Cell-ID als auch geographische Position, je nach Technologie; siehe Abschnitt 3.2
---	--	--	--

Tabelle 2: Klassifikation unterschiedlicher Sensoren nach ihrem Verhalten in zwei unterschiedlichen Szenarien sowie die von ihnen gelieferte Sensorinformation.

1.5 Kritische Umgebungen

Stellt bereits die kontinuierliche und genaue Bestimmung der Position eines „normalen“ Fußgängers außerhalb und innerhalb von Gebäuden eine technische Herausforderung dar, so besteht darüber hinaus ein besonderer Innovationsbedarf, um zukünftig eine Positionsbestimmung auch in kritischen Umgebungen zu ermöglichen. So existieren besondere Anforderungen an technische Lösungen zur Positionsbestimmung bei Rettungs- und Hilfskräften der Feuerwehren und im Katastrophenschutz.

Die Analyse der Ursachen bisheriger, häufig tödlich verlaufener Unfälle bei Einsätzen der Feuerwehren zeigt, dass eine Möglichkeit zur Positionsbestimmung die Sicherheit dieser Kräfte erheblich erhöhen würde. Besonders kritisch ist die Tätigkeit sogenannter Atemschutztrupps, die mit schwerem Atemschutzgerät in Gebäude vordringen, um Personen zu retten oder Brände zu bekämpfen. Hierbei ist die Sicht sehr häufig durch Rauchgase extrem eingeschränkt. Tritt in diesem Zusammenhang ein Verlust der Orientierung auf, so führt dies aufgrund der kurzen Standzeit der Atemschutzgeräte (die typische theoretische Verweildauer beträgt 30 Minuten) häufig zu schweren Unfällen (Erstickung, Rauchgasvergiftung, Verbrennungen).

Zwar erfolgt gegenwärtig eine sogenannte Atemschutzüberwachung, bei der die Verweildauer aller Atemschutzträger eines Einsatzes überprüft wird und gegebenenfalls Rettungsmaßnahmen eingeleitet werden, doch ist der genaue Aufenthaltsort des betroffenen Atemschutzträgers oft nicht bekannt. Wertvolle Zeit geht verloren und die zur Suche eingesetzten Kräfte werden ebenfalls einem erheblichen Risiko ausgesetzt.

Innovative Lokalisierungsverfahren könnten die Unfallgefahr in zweifacher Weise reduzieren: Wäre für den Atemschutzträger ein Navigationsgerät verfügbar, das es ihm erlaubt auch bei stark eingeschränkter Sicht in eine sichere Region zu navigieren, so würde sich die Wahrscheinlichkeit einer Desorientierung erheblich vermindern. Träte dennoch ein Unfall (z.B. durch herabstürzende Gegenstände) auf, so kann ein Rettungsteam gezielt zum Unfallort geführt werden. Auch die Suche nach den eigentlich zu rettenden Personen könnte effizienter gestaltet werden wenn man das Einsatzpersonal genau positionieren und darauf aufbauend im Gebäude leiten kann.

Die Realisierung eines derartigen Navigationssystems beinhaltet jedoch eine Vielzahl erheblicher technischer Herausforderungen: Die alleinige Positionierung mittels Satellitennavigationssignalen (GPS, Galileo) kann aufgrund der erheblichen Signaldämpfung und des Mehrwegeeffektes in Gebäuden aus Stahlbeton, in Tunnel oder U-Bahnhöfen als unrealistisch eingestuft werden. Eine Kombination mit diesen Verfahren erscheint jedoch u.a. zur Erlangung einer initialen Positionsbestimmung noch außerhalb eines Gebäudes sinnvoll.

Die alleinige Anwendung von Trägheitsnavigation mittels Beschleunigungssensoren ist aufgrund der Anforderungen an die Verweildauer (z.B. 30 Minuten) schwierig. Die Übertragung der Positionsinformation von einem Navigationsgerät zur Einsatzleitung bzw. Atemschutzüberwachung ist

aufgrund der erheblichen Signaldämpfung ebenfalls schwierig. Eine Ausstattung von Gebäuden mit RFID-Tags ist auf absehbare Zeit nur für öffentliche Gebäude wahrscheinlich.

Informationen bzgl. der Geometrie eines Gebäudes (z.B. Gebäudeplan) kann durch Baumassnahmen oder durch Effekte wie brandbedingte Einstürze veraltet sein.

Die Bewegung von Rettungskräften erfolgt – anders als beim Fußgänger – auch kriechend oder auf den Knien rutschend. Dies stellt besondere Anforderungen an zu verwendende Bewegungsmodelle bzw. erweitert den Zustandsraum erheblich.

Trotz der genannten Herausforderungen erscheint die Entwicklung eines operationell verfügbaren Systems langfristig machbar und aufgrund des erheblichen Sicherheitsgewinnes der Einsatzkräfte sinnvoll.

Aber nicht nur der Indoor-Bereich ist als kritische Umgebung für Positionierungsanwendungen einzustufen. Auch im Outdoor-Bereich, also in grundsätzlich „GNSS-freundlichen“ Umgebungen, kommt es unter bestimmten Voraussetzungen zu Einschränkungen und Störungen. Diese sind insbesondere für sicherheitskritische Anwendungen nicht tolerabel.

Ein Beispiel hierfür ist der Schienenverkehr. Im Bereich von Bahnhöfen, bei Parallelgleisen und Strecken mit erhöhter Verkehrsdichte werden horizontale Genauigkeiten von einem Meter gefordert [GRUF05]. Bei Navigationsprozeduren, deren korrekte Durchführung direkte Auswirkung auf das Leben und die Unversehrtheit von Personen hat, spricht man von sogenannten *Safety-of-Life*-Anwendungen (SoL). Zugeordnete Integritätsparameter sind ein ToA von weniger als 1s für einen tolerierten Fehlergrenzwert von 2,5 m. Bereits hier wird deutlich, dass auch der zukünftige Galileo SoL-Service diese Ortungsqualität nicht erfüllen wird. Bei Streckenabschnitten mit geringeren Sicherheitsrisiken sinken zwar die geforderten und die tolerierbaren Genauigkeitsforderungen, jedoch wird weiterhin an ToA-Werten von weniger als 1s festgehalten. Die daraus direkt ableitbare Konsequenz ist, dass eine alleinige Nutzung von GNSS als Ortungssensor nahezu unmöglich ist, wenn man bereits bekannte Leistungsparameter des zukünftigen Galileo-Systems (*Open Service*, SoL-Service, *Public Regulated Service*) dafür als Maßstab nimmt. Ob diese Anforderungen durch den noch nicht endgültig spezifizierten *Commercial Service* erreicht werden könnten, ist eine noch offene Frage. Viel eher ist zu erwarten, dass diese Leistungsparameter durch Sensorfusion (siehe Abschnitt 4.1) oder durch Nutzung von lokalen Ergänzungssystemen z.B. infrastrukturbasierten Systemen (*Ground Based Augmentation Systems*, GBAS) erreicht werden (siehe Abschnitt 2.2.2).

Auch der Deutsche Funknavigationsplan [DFNP] behandelt das Thema „Anforderungen an die Ortungsgenauigkeit von Schienenfahrzeugen“, hier allerdings bereits mit speziellem Fokus auf die GNSS-Ortung. Konkret heißt es in [DFNP]:

„Im Schienenverkehr wird derzeit GPS für einige nicht-sicherheitskritische Anwendungen eingesetzt. Die sicherheitsrelevanten Ortungsaufgaben im Bahnbetrieb werden derzeit durch den kombinierten Einsatz von fahrzeugseitigen Elementen wie z. B. Odometer (Wegmesseinheit) sowie streckenseitigen Infrastruktureinrichtungen (z. B. Balisen, Linienleiterkreuzungsstellen, Achszähler) bewältigt. Um die Kosten, die die Infrastruktur entlang der Strecke verursacht, möglichst auf ein Minimum zu beschränken, ist man derzeit bestrebt, so genannte „Intelligente Systeme“ in die Fahrzeuge zu integrieren. Ein Ansatz in diese Richtung ist die Integration von satellitengestützten Ortungskomponenten in innovative Leitsysteme. Voraussetzung für eine erfolgreiche Integration ist jedoch der Nachweis der betrieblich/technischen Sicherheit, der technischen Umsetzbarkeit sowie des wirtschaftlichen Erfolgs.“

Im weiteren Verlauf wird dann spezifischer auf die Anforderungen für sicherheitsrelevante Anwendungen durch Spezifikation von verschiedenen *Safety Integrity Level* (SIL) eingegangen. Die höchste Stufe ist Level 4 und fordert, dass die Wahrscheinlichkeit für ein Nichterkennen von kritischen Fehlern unter 1×10^{-10} liegen muss. Level 0 gilt für nicht-sicherheitsrelevante Anwendungen.

Weitere kritische Bereiche finden sich in der zivilen Luftfahrt. Ein besonders wichtiger Punkt ist der Präzisionslandeanflug, der bei schlechten Wetterbedingungen nur unter Zuhilfenahme der Landeinstrumente ausgeführt werden muss. Diese Präzisionsanflüge sind der kritischste Teil der gesamten Flugphase. Der Pilot braucht eine hohe Aufmerksamkeit und ein hundertprozentiges

Vertrauen in die Lotsen und in sein Flugzeug, vor allem wenn die Wetterbedingungen sehr schlecht sind. Abbildung 2 zeigt die Gefährdung einzelner Flugphasen aufgrund vergangener Totalverluste.

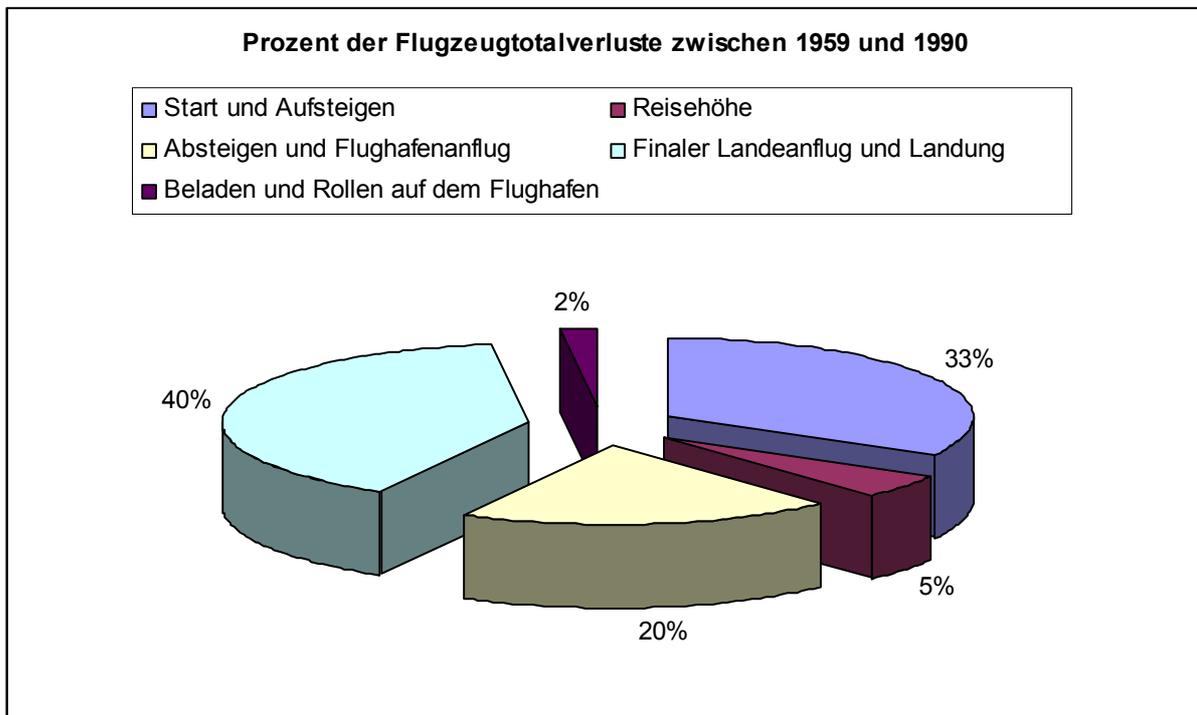


Abbildung 2: Flugzeugtotalverluste zwischen 1959 und 1990 in unterschiedlichen Flugphasen [ADAP411].

Die starke Abschirmung ziviler Flughäfen und deren stetige Überwachung durch das Flughafenpersonal lassen einen gezielten Angriff durch elektromagnetische Strahlung nur bedingt zu. Auch ungewollte Störungen durch am Flughafen betriebene elektrische Geräte sind zwar denkbar, könnten aber durch ihre stetige Präsenz auf dem Gelände per Funkpeilung gefunden werden. Obwohl prinzipiell auch ungewollte Störungen von Seiten des Flughafengeländes möglich, ja sogar zu erwarten sind, sind diese durch die sorgfältige Spektraladministration und regelmäßige Messungen vor Ort vermeidbar und werden im Folgenden nicht weiter betrachtet. Störungen, die nicht von der Flughafeninfrastruktur herrühren, sondern durch mobile Geräte der Passagiere hervorgerufen werden, können durch eingehende Kontrollen bei Betreten des gesicherten Bereichs vermieden werden.

SoL-Anwendungen sind besonders vor Störeinwirkungen zu schützen, sei es durch Unterdrückung der Störung oder lediglich durch Signalisierung bei detektierter Anomalie, so dass die Durchführung der Prozedur unterbrochen oder nicht eingeleitet wird. Neben der Gefahr durch ungewollte Störungen, wie etwa fehlerhafte TV-Stationen, wird hier ebenfalls die Möglichkeit eines gezielten Angriffs mit Ziel der Serviceunterbrechung (*Jamming*) oder der Serviceübernahme bzw. Fehlleitung des Flugzeugs (*Spoofing*, *Meaconing*) betrachtet. Die Unterbrechung des Services Präzisionslandung hätte zur Folge, dass bei schlechtem Wetter Landeanflüge abgebrochen werden müssen und Landungen nicht durchgeführt werden können. Der Flughafen wird somit temporär geschlossen und alle Flugzeuge auf benachbarte Landemöglichkeiten verwiesen. Ein gezielter Angriff auf mehr als einen Flughafen gleichzeitig hätte katastrophale Folgen, da umgeleitete Flugzeuge weite Strecken zurücklegen müssten, für die sie möglicherweise nicht mehr genug Treibstoff zur Verfügung haben.

2. GNSS Basierte Systeme und Systemkomponenten

2.1 GNSS allgemein

Globale Satelliten-Navigationssysteme (GNSS) dienen der weltweiten Positionsbestimmung und Zeitübermittlung. Sie werden in kommerziellen Bereichen in der Luft- und Schifffahrt aber auch im Auto- und Schienenverkehr eingesetzt. Sie werden von der Polizei, dem Grenzschutz, Zoll und dem Militär eingesetzt, ebenso wie von Such- und Rettungsdiensten.

Weltweit gibt es das US-amerikanische *Global Positioning System* (GPS), das primär für Militäraufgaben konzipiert wurde und in den letzten Jahren auch zunehmend für zivile Zwecke genutzt wird. Daneben platzieren sich das von der Europäischen Union geplante und im Aufbau befindliche Satelliten-Navigationssystem Galileo, das russische Navigationssystem GLONASS und das chinesische COMPASS System. Diese Satelliten-Navigationssysteme stehen voraussichtlich in einigen Jahren zur Verfügung.

Nachfolgend wird die Funktionsweise eines solchen Satellitensystems vereinfacht beschrieben. GNSS-Satelliten teilen über Funk ihre genaue Position und Uhrzeit mit. Ein Empfänger am Boden oder in der Luft kann so aus der Laufzeit der Signale seine Position bestimmen. Hierfür muss der Beobachter die Signale von mindestens vier unabhängigen Satelliten gleichzeitig empfangen. Werden im Empfangsgerät die vier Empfangszeiten der Satellitensignale möglichst genau gemessen, so kann die aktuelle Position und Uhrzeit des Beobachters rechnerisch abgeleitet werden.

Um die Signale mit mobilen und möglichst kleinen Empfangsgeräten empfangen zu können, sind die Satelliten in erdnahen Orbits stationiert. Aus physikalischen Gründen ist mit der geringen Höhe über der Erdoberfläche eine Bahngeschwindigkeit verbunden, die erheblich über der Rotationsgeschwindigkeit der Erde liegt. Deshalb wird, um mindestens drei, besser vier Satelliten an jedem beliebigen Ort jederzeit zur Verfügung zu haben, eine sogenannte Konstellation von 24, besser 32 Satelliten benötigt. So lässt sich sicherstellen, dass der sich auf den Beobachter zubewegende Satellit am Horizont für das Auge unsichtbar „aufgeht“, bevor der vorangegangene Satellit, vom Beobachter sich entfernend, am Horizont „untergeht“.

In den folgenden Abschnitten werden die wichtigsten Satellitensysteme für die Navigation beschrieben und Methoden und Systeme erläutert, die eine Positionsbestimmung noch weiter verbessern können. Dies sind zum Beispiel stationäre Empfangsstationen, die die Positionsgenauigkeit erhöhen, indem sie Korrektursignale (*Differential GPS*, DGPS) an die Nutzer übermitteln. Satellitengestützte Zusatzsysteme, sogenannte *Satellite Based Augmentation Systems* (SBAS), sind das europäische EGNOS, das US-amerikanische WAAS, das japanische MSAS und das indische GAGAN, die Korrektursignale für GPS über geostationäre Satelliten abstrahlen. Alternativ dazu gibt es boden- und luftgestützte Zusatzsysteme wie z.B. *Ground Based Augmentation Systems* (GBAS), *Aircraft Based Augmentation Systems* (ABAS) und Pseudolites. Diese Systeme und Methoden wie z.B. *Assisted GNSS* (A-GNSS) und *Receiver Autonomous Integrity Monitoring* (RAIM) werden in den folgenden Abschnitten beschrieben.

2.1.1 GPS

Aufgabe des Global Positioning Systems (GPS) ist die satellitengestützte Positionsermittlung auf oder in der Nähe der Erde. Bei bewegten Objekten lässt sich darüber hinaus auch ihre Geschwindigkeit und die Bewegungsrichtung feststellen.

GPS, auch *Navigation System with Time and Ranging* (NAVSTAR) genannt, ist ein militärisches Projekt, das heute aber auch in zivilen Bereichen eingesetzt wird, z. B. bei der Navigation von Schiffen, Flugzeugen und Autos. Es ist die Weiterführung des Systems Transit, das die USA in den 60er Jahren als erstes Navigationssystem auf Basis von Satellitenortung entwickelten. Seit 1995 ist das System voll einsatzfähig.

2.1.1.1 Aufbau des Systems

GPS besteht aus einem Verbund von 24 Satelliten, die die Erde auf elliptischen (nahezu kreisförmigen) Bahnen in ca. 20200 km Höhe umrunden. Dabei bewegen sich je vier Satelliten auf sechs unterschiedlichen Bahnebenen, die um 55° gegen die Äquatorebene geneigt und gegeneinander um 60° versetzt sind. Nach dem dritten Keplerschen Gesetz (die Quadrate der Umlaufzeiten verhalten sich wie die Kuben der mittleren Entfernungen) ergibt sich – z. B. mit dem Erdmond als Referenzsatellit – für die GPS-Satelliten eine Umlaufzeit von nahezu 12 Stunden. Aus dieser Anordnung folgt einerseits, dass sich zu jedem Zeitpunkt an jedem Ort der Erde mindestens vier Satelliten in brauchbarer Höhe über dem Horizont befinden (dies ist für das Funktionieren des Systems notwendig) und dass andererseits die Satelliten in unseren Breiten vorwiegend in südlicher Richtung stehen.

Funktional wird das System in drei sogenannte Segmente untergliedert.

- Raumsegment
- Kontrollsegment
- Nutzersegment

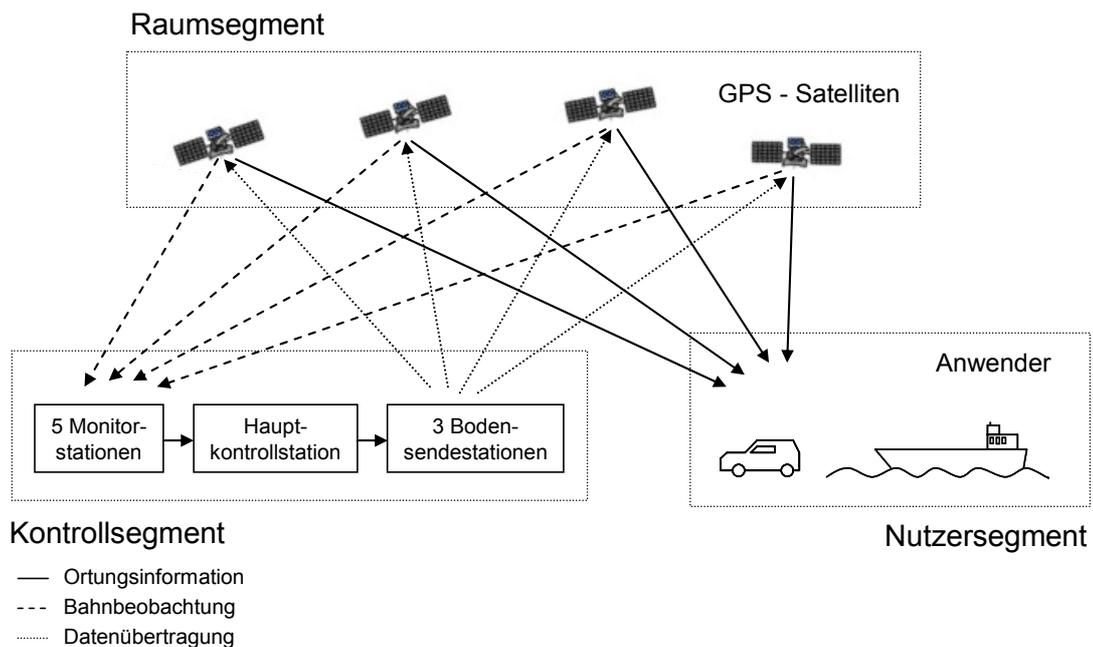


Abbildung 3: Segmente des GPS-Systems.

Das Raumsegment umfasst ausschließlich die GPS-Satelliten (siehe Abbildung 4). Die Satelliten senden mit zwei hochfrequenten Trägern die Ortungssignale und die Daten der Navigationsmitteilung aus, die vom Nutzer empfangen und ausgewertet werden. Aktuell stehen dem Nutzer 30 Satelliten zur Verfügung [TSD], wobei davon meistens ein bis zwei Satelliten im Wartungsmodus sind z.B. zur erneuten Ausrichtung.

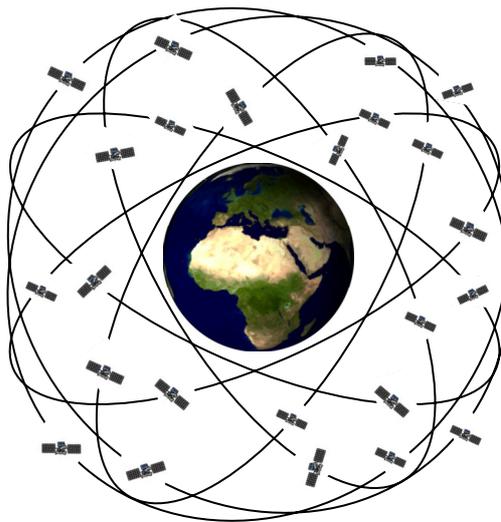


Abbildung 4: Das GPS Raumsegment.

Das Kontrollsegment umfasst die Hauptkontrollstation, fünf sogenannte Monitorstationen und drei Bodensendestationen. Die wichtigsten Aufgaben sind die Kontrolle der Funktion des gesamten Systems, die Beobachtung der Satellitenbewegungen und der Satellitenuhrenfehler. Weiterhin sind die Vorausberechnung der Satelliten-Ephemeriden und der Satellitenuhrenfehler wesentliche Funktionen des Kontrollsegments.

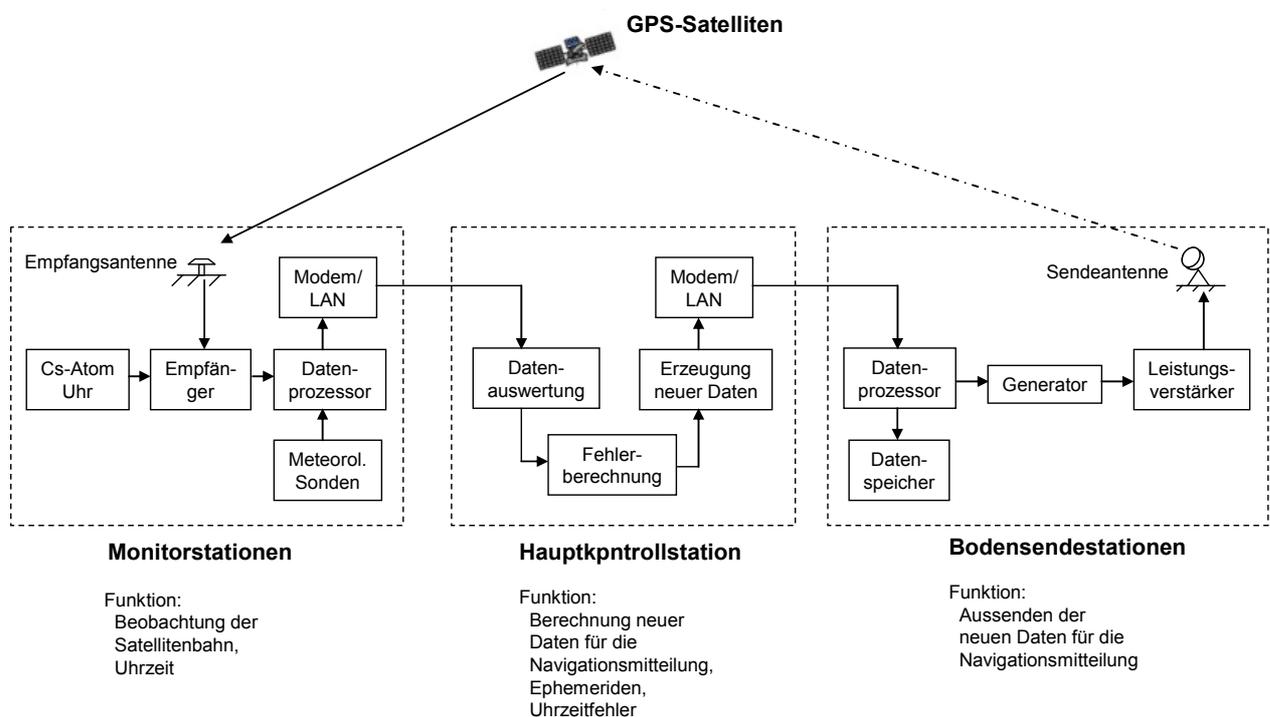


Abbildung 5: Überblick über das GPS Kontrollsegment.

Das Nutzersegment setzt sich aus der großen Anzahl der mit GPS-Empfängern ausgestatteten Nutzern zusammen, die aus den verschiedensten Bereichen (z.B. Verkehrs-, Bau-, Vermessungswesen) kommen und daher auch unterschiedliche Zielstellungen (z.B. Position, Geschwindigkeit, hochgenaue Uhrzeit) bei der Nutzung haben.

2.1.1.2 Geometrisches Grundprinzip der Positionsbestimmung

Die Positionsbestimmung basiert auf der Bestimmung und Verarbeitung von Laufzeiten und daraus abgeleiteten räumlichen Distanzen zwischen den GPS-Satelliten und der Empfangsantenne. Zur eindeutigen Festlegung einer Position unter Verwendung des GPS werden vier unabhängige Beobachtungen benötigt. Dies können bspw. vier zeitgleich empfangene GPS-Signale verschiedener Satelliten oder Pseudolites sein (siehe Abschnitt 2.3). Diese vier Beobachtungen sind notwendig, um die vier Unbekannten (zusammengesetzt aus x-, y- und z-Komponente des dreidimensionalen Raumvektors vom Zentrum eines kartesischen Bezugssystems zur gesuchten Position und des Empfängeruhrfehlers) ermitteln zu können.

Abbildung 6 verdeutlicht die Standortbestimmung im Raum mit Hilfe der Navigationssatelliten. Die zum jeweiligen Satelliten ermittelte Laufzeit ergibt eine Kugelschale mit der Entfernung um den Satelliten. Bei der Verwendung von drei Satelliten ergeben sich zwei Schnittpunkte, wobei einer als „scheinbarer Standort“ meistens leicht ausgeschlossen werden kann, da er sich nicht auf der Erde befindet. Der verbleibende Schnittpunkt repräsentiert die Position des Empfängers. Ein vierter Satellit wird benötigt, um die Zeitsynchronisation zwischen der GPS-Systemzeit und der Empfängeruhr durchzuführen und somit die Laufzeiten korrekt auswerten zu können.

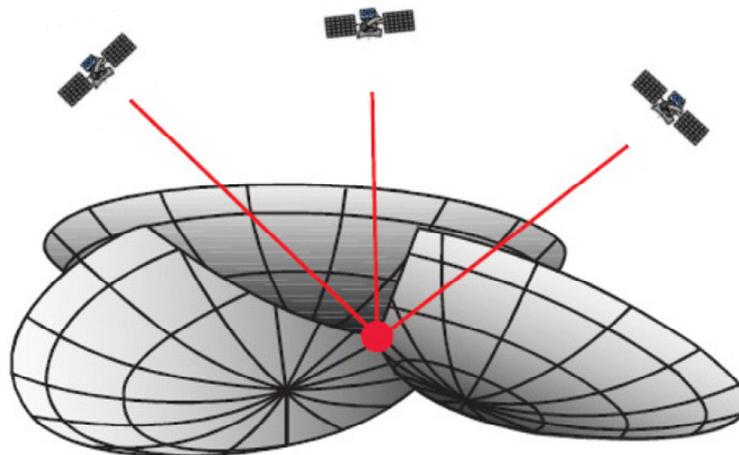


Abbildung 6: Standortbestimmung im Raum mit Hilfe von drei Satelliten.

2.1.1.3 Grundprinzipien der Entfernungsbestimmung

Durch die Art, wie die Distanzen zwischen GPS-Satellit und Beobachtungsstandpunkt bestimmt werden, kann eine Klassifizierung der Positionierungstechniken erfolgen.

- **Codemessung**
Basierend auf dem Prinzip der Laufzeitmessung zwischen Satellit und Empfänger kann bei Kenntnis der Ausbreitungsgeschwindigkeit und des Uhrfehlers von Satellit und Empfänger die gesamte gesuchte Distanz berechnet werden. Die resultierenden Positionsgenauigkeiten liegen im Bereich weniger Meter.
- **Phasenmessung**
Bei der Phasenmessung wird das Phasenreststück der Trägerphase (Längenwellen der von GPS genutzten Frequenzen L1 und L2 sind 19 cm bzw. 24 cm) gemessen. Im Vergleich zur Codemessung (die Codelänge beträgt 293 m) ist dieses Verfahren wesentlich genauer. Es lassen sich Genauigkeiten im Bereich von Dezimetern bis Millimetern erreichen. Zur Bestimmung der kompletten Distanz ist die korrekte Bestimmung der sog. Phasenmehrdeutigkeiten (Anzahl ganzer Wellenlängen) notwendig.

2.1.1.4 Sichtbarkeit von Satelliten

Für die Positionierung mittels GPS ist die sog. Sichtbarkeit hinreichend vieler (mindestens vier!) Satelliten von großer Bedeutung. Als Grundregel gilt immer: Je günstiger die geographischen, topographischen und morphologischen Rahmenbedingungen des Beobachtungsortes in Bezug zum Strahlungskegel der Satelliten sind, desto besser ist der Empfang und die Qualität des zur Berechnung der Position notwendigen Signals. Maßgeblich ist die 'quasioptische' Sichtverbindung zu den Trabanten.

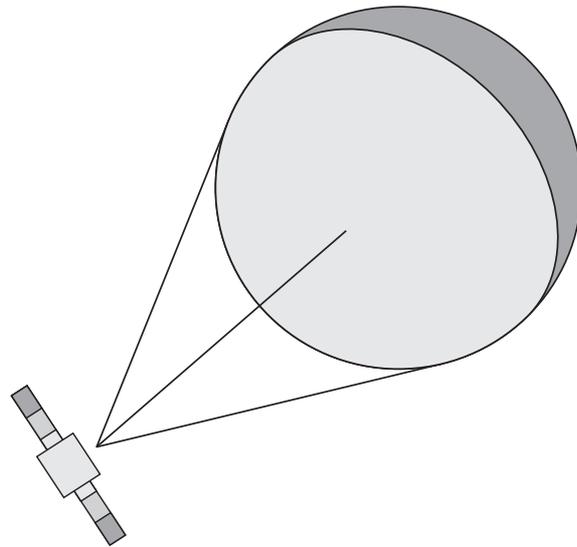


Abbildung 7: Theoretische Sichtbarkeit eines GPS Satelliten.

Für die Beobachter am Rande der Signalsphäre stünde der Satellit genau am Horizont (das entspricht 0° Elevationshöhe). Für einen ausreichenden Empfang sollte jedoch eine Elevation von mindestens 10° - 15° über dem Horizont angepeilt werden, da meist kein ideal flaches Gelände bis zum Horizont vorhanden ist, wie Abbildung 8 verdeutlicht.

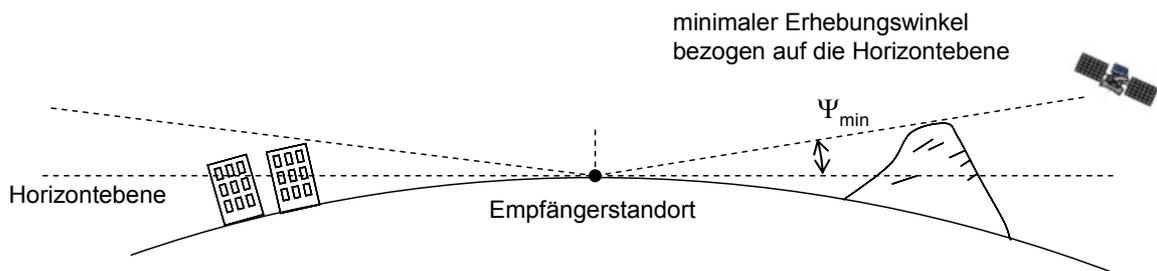


Abbildung 8: Minimaler Erhebungswinkel eines Satelliten unter Berücksichtigung der Topographie und in Bezug zur Horizontalebene eines Beobachtungspunktes. I.d.R. gelten 10° oder mehr als ausreichend.

2.1.1.5 Fehlerquellen bei GPS

Bei einem so komplexen System wie GPS gibt es eine Vielzahl von Beeinflussungen die zu Fehlern bei der Positionsermittlung führen. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die auftretenden Fehler und deren Größenordnung aufgeteilt in die für zivile Nutzer verfügbare GPS-Standardbetriebsweise mit der Nutzung des *Coarse/Aquisition-Codes* (C/A-Codes) und die nur für das US-amerikanische und dessen Verbündete verfügbare Präzisionsbetriebsweise mit Nutzung des verschlüsselten *Precision-Codes* (P(Y)-Codes).

Segment	Fehlerquelle	Standardbetriebsweise mit C/A-Code	Präzisionsbetriebsweise mit P(Y)-Code
		Fehler σ in m	Fehler σ in m
Raumsegment	Satelliten-Instabilität	3,0	3,0
	Satellitenbahn-Störung	1,0	1,0
	Sonstige Ursachen z.B. Sonnenstrahlungsdruck und Sonnenwind	0,5	0,5
Kontrollsegment	Fehler in vorausgesagten Ephemeriden	4,2	4,2
	Sonstige Ursachen z.B. Monitormessfehler	0,9	0,9
Nutzersegment	Laufzeitverzögerungen		
	- Ionosphäre	5,0	2,3
	- Troposphäre	1,5	1,5
	Empfängerrauschen, Messauflösung	1,5	1,5
	Mehrwegausbreitung	2,5	1,2
Sonstige Ursachen, z.B. Interferenzen	0,5	0,5	
Gesamtsystem	Quadratischer Mittelwert	8,0	6,6

Tabelle 3: Fehlerbilanz für die Messung der Pseudoentfernung in der Standardbetriebsweise SPS und in der Präzisionsbetriebsweise PPS [Mans98], aktuelle Informationen bezüglich des Gesamtfehlers gibt es in einem monatlich erscheinenden Report unter [WTT].

Eine nicht unerhebliche Fehlerquelle ergibt sich zusätzlich zu den oben aufgelisteten Beeinflussungen aus der Geometrie zwischen den sichtbaren und verwendeten Satelliten und dem Empfänger. Ein Maß für den geometrisch bedingten Positionsfehler ist der so genannte *Dilution Of Precision*-Wert (DOP). Detaillierte Informationen zu diesem Thema findet man z.B. in [Mans98].

Die zukünftige GPS-Satellitengeneration sowie modernere Empfänger und Komponenten im Kontrollsegment werden die Fehler bei der Positionsermittlung in den nächsten Jahren weiter reduzieren. Ebenso wird das bei GPS geplante zusätzliche Frequenzband L5 mit C/A-Code zu einer Verringerung des Ionosphärenfehlers bei der Standardbetriebsweise führen.

2.1.1.6 Differential GPS (DGPS)

GPS mit Ausnutzung von differentiellen Signalen (*Differential GPS*, DGPS) ist eine Bezeichnung für Verfahren, die durch das Ausstrahlen von Korrekturdaten (Bahn- und Zeitsystem) die Genauigkeit der GPS-Navigation steigern können.

Beim DGPS wird eine ortsfeste Referenzstation benutzt, die das Signal der GPS-Satelliten empfängt. Da die geografische Position der Referenzstation mit sehr hoher Genauigkeit bekannt ist, kann der Fehler der momentanen GPS-Ortsbestimmung festgestellt werden. Der gemessene Entfernungsfehler zum Satelliten und dessen zeitliche Änderung werden für jeden empfangenen GPS-Satelliten bestimmt und durch die Referenzstation mittels Funk an alle DGPS-Empfänger der Region übermittelt.

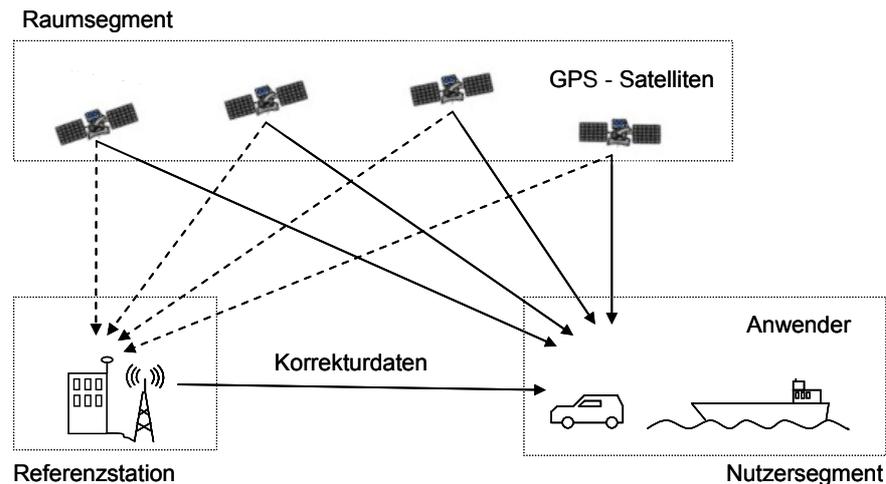


Abbildung 9: Das DGPS-Prinzip.

Jeder einzelne DGPS-Empfänger dekodiert die GPS-Satellitensignale und zusätzlich die Korrektursignale der Referenzstation. Mit letzteren kann der DGPS-Empfänger die Fehler der GPS-Signale, unter anderem verursacht durch atmosphärische Einflüsse und Ephemeridenfehler, korrigieren und so eine sehr viel bessere Positionsbestimmung durchführen.

Je nach Art und Umfang der verwendeten Daten können die folgenden vier Vorgehensweisen unterschieden werden

1. Nutzung der Daten der Referenzstation für nachträgliche Berechnungen (*Postprocessing*)
2. Nutzung von Streckenkorrekturen der Referenzstation in Echtzeit (normales DGPS)
3. Nutzung von Streckenkorrekturen der Referenzstation in Echtzeit und Trägerphasenglättung auf der bewegten Station (*Carrier Smoothed DGPS*)
4. Nutzung der Trägerphasendaten der Referenzstation in Echtzeit (präzises DGPS).

Die Referenzstationen können vom Nutzer selbst temporär eingerichtet werden oder durch den Betreiber eines DGPS Dienstes bereitgestellt werden.

Im ersten Fall bezieht der Nutzer nach der eigentlichen GPS Messung die Korrekturdaten von der Referenzstation und wertet die Daten nachträglich aus.

Im den Fällen zwei und drei werden in den Referenzstationen, deren Koordinaten exakt bekannt sind, alle sichtbaren GPS-Satelliten gemessen, und aus dem Vergleich von gemessenen Koordinaten und aus den übertragenen Bahndaten berechneten Pseudoentfernungen für jeden Satelliten Entfernungskorrekturen berechnet und als Korrektursignale abgestrahlt. Der Nutzer verwendet die Korrekturen bei den von ihm sichtbaren bzw. gemessenen Satelliten.

Bei dem dritten Verfahren wird die Positionsbestimmung aus Codemessungen noch durch die Verwendung der Trägerphaseninformationen ohne Mehrdeutigkeitslösung geglättet. Dadurch lässt sich die Genauigkeit noch bis in die Größenordnung von 0,5 m bis 1 m steigern, wenn die Entfernung zur Referenzstation nicht zu groß wird (etwa bis 50 km).

Bei höheren Genauigkeitsanforderungen im Dezimeter- und Subdezimeterbereich ist es erforderlich, auf der Nutzerseite die Trägerphasenmehrdeutigkeiten zu lösen. Dazu müssen die Trägerphasenbeobachtungen oder Trägerphasenkorrekturen von den Referenzstationen zum Nutzer übertragen werden und in Echtzeit zur gemeinsamen Auswertung mit den Nutzerdaten zur Verfügung stehen (vierter Fall).

Die erreichbare Genauigkeit liegt je nach Qualität des Empfängers und der Korrekturdaten für die Verfahren 2. und 3. zwischen 0,3 m und 2,5 m für die horizontale Position (x, y) und bei 0,6 m bis 5 m für die Höhe. Hochqualitative Systeme (4. Verfahren) werten zusätzlich die Trägerphase aus (wie z.B. bei geodätischen Empfängern üblich) und erreichen Genauigkeiten von nur wenigen Millimetern ($\pm 1\text{mm}$ bis $\pm 10\text{mm}$ pro km Abstand zur Referenzanlage [Mans98]).

Die für die Korrektursignale notwendige Empfangsantenne ist oft schon in die GPS-Antennen integriert. Fällt die (Funk-)Verbindung zur DGPS-Sendeanlage aus, schaltet der Empfänger in den normalen GPS-Modus ohne Korrektur um, verliert aber dann den Genauigkeitsvorteil.

2.1.2 Galileo

Das von der Europäischen Union (EU) initiierte Satelliten-Navigationssystem Galileo ist das Pendant zum US-amerikanischen GPS. Es wird von der europäischen Raumfahrtagentur *European Space Agency* (ESA) geleitet.

Die Galileo-Konstellation wird aus 30 Satelliten bestehen, welche die Erde in einer Höhe von rund 23616 km umrunden. Der Empfänger bestimmt seine Position auf dem Globus, indem er die Entfernung zu mindestens vier Navigationssatelliten ermittelt. Diese Entfernung wird mithilfe eines hochgenauen Zeitsignals gemessen. Die Satelliten senden dieses Zeitsignal, der Empfänger misst die Zeit, die bis zum Empfang des Signals verstreicht. Überwacht und gesteuert werden die Satelliten voraussichtlich von zwei Kontrollzentren in München und Rom. Ein globales Netzwerk von Bodenstationen sorgt für den Datentransfer zu und von den Satelliten. Sensor-Stationen rund um den Erdball überwachen und korrigieren ständig die Qualität des Signals. Über so genannte Uplink-Stationen wird dann ein Korrektursignal an die Satelliten gesendet, welches dann in die Navigationsnachricht integriert wird.

Galileo arbeitet mit 30 Satelliten in mittlerer Höhe (*Medium Earth Orbit*, MEO), von denen drei als Reserve-Satelliten dienen, die auf drei kreisförmigen Satellitenbahnen in einer Höhe von 23616 km die Erde umkreisen.

- Die Umlaufzeit beträgt 14:05 Stunden
- Galileo sendet zehn Navigationssignale in drei Frequenzbändern.
- Band 1 liegt zwischen 1164 MHz und 1215 MHz,
- Band 2 liegt zwischen 1260 MHz und 1300 MHz und
- Band 3 liegt zwischen 1559 MHz und 1593 MHz.

Die Frequenzbänder wurden von der *International Telecommunication Union* (ITU) festgelegt. Die Datenraten sind dienst- und modulationsabhängig und liegen zwischen 50 bit/s und maximal 1.000 bit/s beim kommerziellen Dienst mit dem *Binary Phase Shift Keying*-Modulationsverfahren (BPSK).

Ein sehr wichtiger Aspekt bei der Entwicklung von Galileo ist, dass Galileo interoperabel und kompatibel zum GPS-System sein wird. Dadurch können auch bei ungünstigsten Galileo-Empfangsbedingungen wahrscheinlich immer noch genügend Navigationssignale vom GPS-System empfangen werden, um dem Empfänger eine Positionsbestimmung zu ermöglichen.

2.1.2.1 Das Galileo Signal

Galileo benutzt gemeinsam mit GPS das Frequenzband L1 bei 1575,42 MHz und L5 bei 1176 MHz. Das Band L2 bei 1227,6 MHz steht GPS allein zur Verfügung, ein nur für Galileo genutztes Band ist E6 bei 1278,75 MHz. Abbildung 10 stellt die für Galileo geplanten Frequenzbereiche als Übersicht dar.

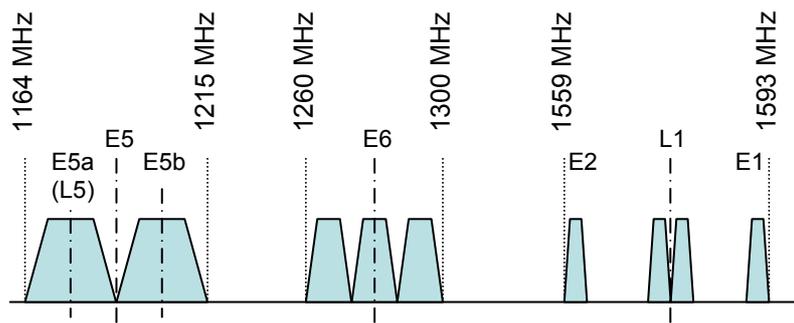


Abbildung 10: Übersicht der geplanten Frequenzbänder für Galileo.

Das Spektrum in Abbildung 11 zeigt ein Testsignal des Galileo Testsatelliten GIOVE-A, das eine Hochgewinn-Antenne im Januar 2006 empfangen hat. GIOVE steht für *Galileo In Orbit Validation Equipment* und das Kürzel „A“ weist ihn als ersten Galileo-Testsatelliten aus.

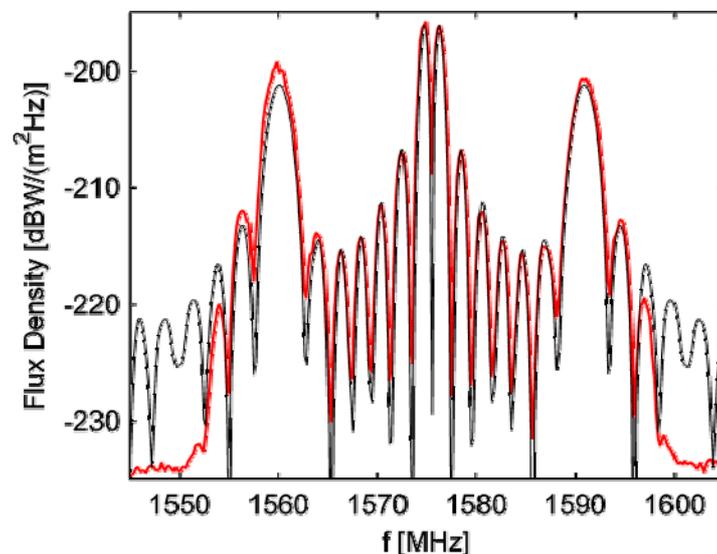


Abbildung 11: Gemessenes Spektrum der Bänder E2, L1 und E1 abgestrahlt von GIOVE-A, 2006 [Graf06].

Die Sendeleistung der Satelliten in weit über 20.000 km Entfernung ist so gering, dass ein Navigationsempfänger, ausgestattet mit einer einfachen Antenne, fast nur Rauschen sieht. Er empfängt nicht nur das Signal eines Satelliten, sondern von mindestens vier, deren Signale dopplerverschoben sind. Hinzu kommen die Ausstrahlungen von GPS-Satelliten oder Störquellen auf den gleichen Frequenzen.

Die Rückgewinnung der Navigationsdaten gelingt, da die Signale über einen großen Frequenzbereich gespreizt sind. Auf einer Frequenzbreite von 1 MHz, auf der sich rauschfrei 15 Mbps übertragen ließen und die Platz böte für mehr als 5 Radiostationen, sendet Galileo mit einer Bitrate von 50 bps, das sind 5-10 Buchstaben pro Sekunde. Dieses gespreizte Signal wird im Empfänger mittels einer sogenannten Pulskompression aus dem Rauschen geholt und kann dann weiter verarbeitet und ausgewertet werden. Die Pulskompression erfolgt durch Korrelation des empfangenen Signals mit dem vom Empfänger erzeugten Signal-Code. Die genaue Funktionsweise kann in der einschlägigen Literatur nachgelesen werden, wie z.B. [Kumm97] oder [Mans98].

2.1.2.2 Geplant Dienste für Galileo

- Der offene Dienst (*Open Service, OS*) steht in direkter Konkurrenz oder als Ergänzung zum GPS-System. Er soll ebenfalls frei und kostenlos empfangbar sein. Der offene Dienst ermöglicht die Ermittlung der eigenen Position auf wenige Meter genau. Zudem liefert er die Uhrzeit entsprechend einer Atomuhr (besser als 1×10^{-13}). Auch kann dadurch die Geschwindigkeit, mit der sich der Empfänger (z.B. in einem KFZ) fortbewegt, errechnet werden. Er soll zwei Sendefrequenzen zur Verfügung stellen. Damit wird es mit Zweifrequenzempfängern möglich sein, Ionosphärenstörungen korrigieren zu können und die Position auf ca. vier Meter genau zu bestimmen. GPS benutzt aus dem gleichen Grund ebenfalls zwei Sendefrequenzen (1227,60 MHz und 1575,42 MHz). Die höhere Anzahl der Satelliten, 27 gegenüber 24 bei GPS, soll die Empfangsabdeckung in Städten steigern. Durch die Kombination beider Satellitensysteme ergibt sich jedoch noch eine deutlich bessere Abdeckung von bis zu 15 sichtbaren Satelliten an einem beliebigen Standort. Garantien für die ständige Verfügbarkeit dieses Dienstes wird es aber voraussichtlich nicht geben.
- Der kommerzielle Dienst (*Commercial Service, CS*) ist kostenpflichtig und soll verschlüsselt zusätzliche Sendefrequenzen und damit höhere Übertragungsraten von ca. 500 Bit/s zur Verfügung stellen. So sind dann beispielsweise Korrekturdaten zur Steigerung der Positionsgenauigkeit um ein bis zwei Größenordnungen empfangbar. Er ist unter anderem auch für sicherheitskritische Anwendungen ausgelegt (z. B. Flugsicherung). Auch sind Garantien zur ständigen Verfügbarkeit dieses Dienstes geplant.
- Der sichere Dienst (*Safety-of-Life, SoL*) steht sicherheitskritischen Bereichen zur Verfügung, z. B. dem Luft- und dem Schienenverkehr. Er ist das Korrektiv zu den Risiken, die sich aus den kommerziellen Anwendungen (s.o.) ergeben können. Er bietet eine Warnung (innerhalb weniger Sekunden) wenn das System z. B. wegen ausgefallenen Satelliten oder bei Positionierungsfehlern nicht mehr genutzt werden sollte. Auch für diesen Dienst sind Garantien für die ständige Verfügbarkeit geplant.
- Der regulierte Dienst oder staatliche Dienst (*Public Regulated Service, PRS*) steht ausschließlich hoheitlichen Diensten zur Verfügung, also Polizei, Küstenwache oder Geheimdienst. Das ebenfalls verschlüsselte Signal ist weitgehend gegen Störungen und Verfälschungen gesichert und soll eine hohe Genauigkeit und Zuverlässigkeit bieten.
- Der Such- und Rettungsdienst (*Search And Rescue, SAR*) arbeitet mit COSPAS-SARSAT und MEOSAR zusammen und erlaubt eine schnelle und weltweite Ortung von Notsendern von Schiffen oder Flugzeugen. Auch soll eine Rückantwort von der Rettungsstelle an den Notrufsender erstmalig möglich sein.

Abbildung 12 zeigt eine Zuordnung der geplanten Dienste zu den genutzten Frequenzen bei Galileo.

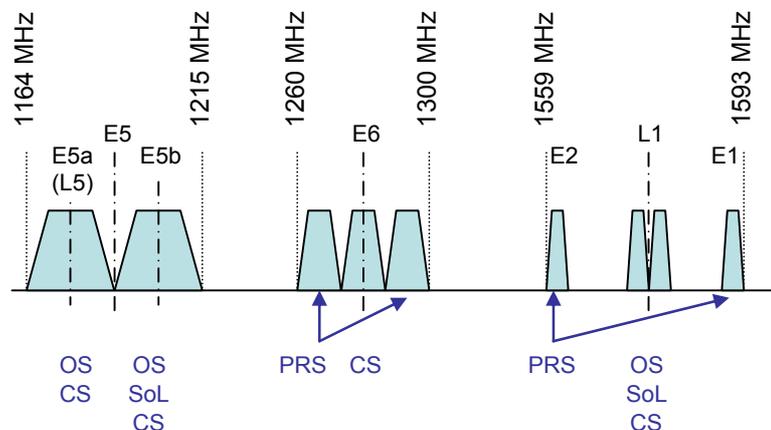


Abbildung 12: Zukünftig bei Galileo verwendete Frequenzen und deren Zuordnung zu den Diensten [ESA].

2.1.3 GLONASS

Das russische Satelliten-Navigationssystem *Global Navigation Satellite System* (GLONASS) ist das Pendant zu Galileo und dem Global Positioning System (GPS). Mit der Installation im Weltraum wurde bereits 1982 begonnen. Die Konstellation ist ähnlich wie GPS mit 24 Satelliten ausgelegt, die in drei Orbitalbahnen die Erde umkreisen. Aktuell arbeitet GLONASS nur mit 12 Satelliten [IAC].

Im Unterschied zu GPS wo jeder Satellit die gleichen Frequenzen benutzt und mit unterschiedlichen Codes seine Signale versendet, benutzt bei GLONASS jeder Satellit den gleichen Code, sendet jedoch auf unterschiedlichen Sendefrequenzen. Als Dienste werden wie beim GPS-System ein allgemein nutzbarer Dienst mit geringer Auflösung und C/A-Code angeboten, aber auch ein hochauflösender Dienst mit P-Code.

Die wichtigsten Daten des Systems sind:

- Vollausbau mit 24 Satelliten (21 Standard + 3 Reservesatelliten)
- angeordnet in drei Bahnebenen mit $64,8^\circ$ Neigung gegen den Äquator
- Bahnhöhe 19.100 km
- Umlaufzeit 11:15 Stunden
- Sämtliche Satelliten senden mit gleichem Code (*Pseudo Random Noise*, PRN), aber auf unterschiedlichen Frequenzen von 1598,06 MHz – 1605,38 MHz (für L1) bzw. 1242,94 MHz - 1248,62 MHz (für L2).

Aktuell gibt es bereits Navigationsgeräte, die Informationen von den Satelliten sowohl von GLONASS als auch von GPS auswerten und so im Fall eines Ausfalls auf das andere System ausweichen oder aber durch Kombination der Ergebnisse beider Systeme eine erhöhte Genauigkeit und einen größeren Schutz gegen Manipulation (siehe GPS-Jammer) erreichen. In der Praxis kann diese Interoperabilität jedoch noch nicht voll ausgenutzt werden, da nur eine geringe Anzahl von GLONASS-Satelliten zur Verfügung stehen.

GLONASS / GPS / Galileo-Vergleich

In dieser Tabelle werden die wichtigsten Systemparameter und allgemeine Informationen der Navigationssysteme GLONASS, GPS und Galileo gegenüber gestellt, wobei anzumerken ist, dass sich GLONASS im Aufbau und Galileo noch in der Aufbau-/Entwicklungsphase befindet und die Spalte für Galileo demzufolge einige Lücken aufweist.

		GLONASS	GPS	Galileo
Anzahl der Satelliten (nominal)		24 (zukünftig)	24 (akt. 30, Aug./07)	30 (zukünftig)
Satelliten-Startbasis		Baikonur Kosmodrom, Kasachstan	Cape Canaveral, USA	Baikonur Kosmodrom, Kasachstan
Anzahl der Orbits		3	6	3
Orbitale Neigung		64.8°	55°	56°
Bahnhöhe (Höhe über der Erdoberfläche)		19.130 km	20.180 km	23.616 km
Umlaufzeit		11h15m40s	11h58m00s	14h5min
Ephemeriden-Repräsentation		Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung in <i>Earth-Centered, Earth-Fixed</i> -Koordinaten (ECEF)	Keplerparameter	
Datum		PZ-90	WGS-84	GTRF
Zeitreferenz		UTC (Russia)	UTC(USNO)	
Almanach	Länge	152 bits	120 bits	
	Dauer	12m30s	2m30s	
Übertragungsverfahren		FDMA	CDMA	CDMA
Trägerfrequenzen	L1	1602,0 MHz – 1614,94 MHz	1575,42 MHz	1575,42 MHz
	L2	7/9 L1	60/77 L1	
	zusätzlich geplante Frequenzen		1176,45 MHz	1278,75 MHz 1191,795 MHz
Code-Typ (PRN)		ML	GOLD	Tiered
Anzahl der Code-Elemente	C/A	511	1023	4092-10230
	P	5110000	2.35×10^{14}	
Code-Rate	C/A	0,511 Mbit/s	1,023 Mbit/s	1,023 Mbit/s-10,230 Mbit/s
	P	5,11 Mbit/s	10,23 Mbit/s	
Kreuzkorrelationsinterferenz		-48 dB	-21.6 dB	
Navigationsnachricht	Datenrate	50 Bit/s	50 Bit/s	50-1000 Bit/s je nach Signal
	Modulation	BPSK Manchester	BPSK NRZ	BPSK, BOC
	Länge	2m30s	12m30s	10-12m; kann aber durch Parallelisierung verkürzt werden
	Abschnittslänge	30s	6s	1-10s

2.2 GNSS-Ergänzungssysteme

2.2.1 SBAS (Space Based Augmentation System)

Ein *Space Based Augmentation System* (SBAS) stellt ein satellitenbasiertes System zur Verbesserung der Genauigkeit und Zuverlässigkeit von Navigationssystemen dar. Die wichtigsten Vertreter sind das amerikanische *Wide Area Augmentation System* (WAAS), das europäische *European Geostationary Navigation Overlay Service* (EGNOS) und das japanische *Multi-Functional Satellite Augmentation System* (MSAS).

2.2.1.1 Zweck des Systems

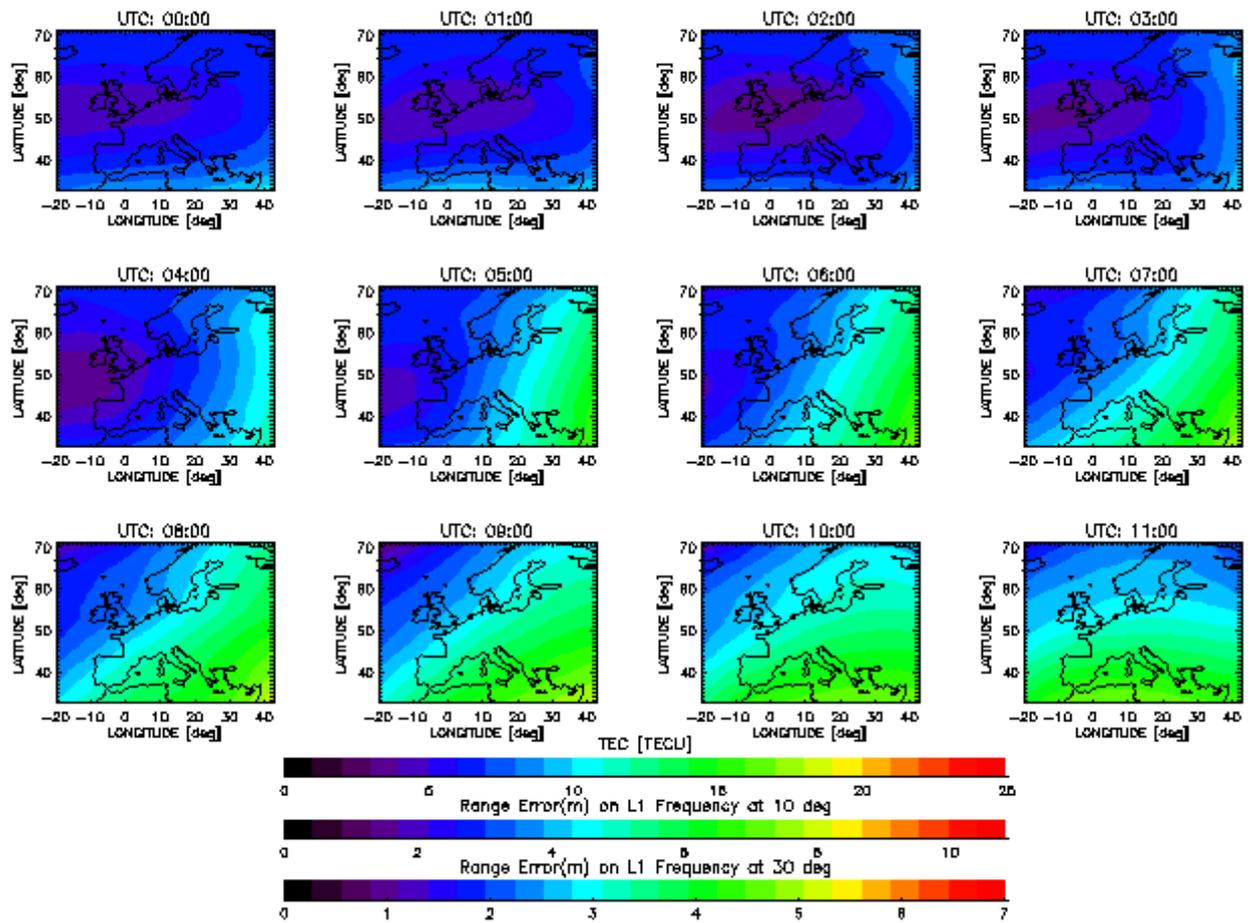
Für bestimmte Anwendungen ist die Zuverlässigkeit und Genauigkeit, die von GPS erzielt wird nicht ausreichend. Insbesondere die Luftfahrt hat hier hohe Anforderungen und benötigt z. B. Informationen über den aktuellen Status des Navigationssystems oder eine schnelle Benachrichtigung über eventuelle Fehlfunktionen. Um als primäres Navigationsmittel zulässig zu sein, ist das GPS-System nicht ausreichend. Speziell beim Landeanflug ohne oder mit schlechter Sicht sind Flugzeuge heute auf *Instrument Landing-Systeme* (ILS) angewiesen, deren Installation und Wartung an jedem einzelnen Flughafen jedoch mit einem hohen finanziellen Aufwand verbunden ist. Hier sollen die SBAS-Systeme in naher Zukunft eine Ergänzung sein und CAT I Anflüge (eingeschränkte Sicht, aber mindestens 550 m) ohne ILS zu ermöglichen. CAT II-III Anflüge (ganz ohne Sicht) werden allein mit den SBAS jedoch nicht möglich sein.

2.2.1.2 Infrastruktur und Funktionsweise

Mit einem Netzwerk von 34 sog. *Ranging and Integrity Monitoring Stations* (RIMS), also Referenzempfängern mit bekannter Position, ist es möglich, die Ranging-Fehler der GNSS-Satelliten zu bestimmen und in ihre einzelnen Fehlerkomponenten zu zerlegen, d. h. Fehler der Satellitenposition, der Satellitenuhr und die Signalverzögerung durch die Ionosphäre. Diese Informationen werden in einem von vier *Master Control Centern* gesammelt und weiterverarbeitet und anschließend über einen geostationären Satelliten an die Nutzer ausgestrahlt.

Aufgrund der Fehlerzerlegung kann der Nutzer im Unterschied zu normalem DGPS Fehlerkorrekturen in Abhängigkeit von seiner mit GPS bestimmten Position ermitteln. Insbesondere Nutzer mit Einfrequenzempfängern profitieren von diesen Korrekturen, da sie zur Korrektur der Ionosphärenverzögerung ansonsten ein ungenaues Modell verwenden müssten. Das SBAS übermittelt jedoch ein Gitter, welches die Ionosphärenverzögerung an den Gitterpunkten beschreibt, was es ermöglicht, die Verzögerung an anderen Punkten zu interpolieren. Außerdem sendet das SBAS Integritätsinformationen, die angeben ob das GNSS ordnungsgemäß funktioniert, was vor allem für die Luftfahrt wichtig ist. Die Signale, die von den geostationären Satelliten ausgesendet werden, ähneln den GPS-Signalen sowohl im Hinblick auf die verwendete Frequenz als auch im Hinblick auf die verwendete Signalstruktur. Daher sind nur geringe Änderungen an den Empfängern nötig [ESAEGNOS2][Remi07].

IONOSPHERIC PROPAGATION ERROR (EUROPE) on 01/07/07



Copyright 2004, DLR/IKN-NL Neustrelitz

Abbildung 13: Beispiel stündlich erzeugter Ionosphären-Karten für Europa [DLR-IKN].

2.2.1.3 Abdeckungsbereich der geostationären Satelliten

Der Bereich, in dem WAAS, EGNOS und MSAS verfügbar sind, hängt zum einen davon ab, wo überall RIMS stehen, deren Informationen zur Berechnung verwendet werden, und zum anderen davon, wo die Signale der geostationären Satelliten empfangen werden können. EGNOS verwendet dabei die beiden Inmarsat-Satelliten IOR-W und AOR-E sowie den Satelliten Artemis, siehe Tabelle 4.

Satellitenbezeichnung	Satellitenposition	GPS PRN Nr.
INMARSAT 3-F2 <i>Atlantic Ocean Region East</i> (AOR-E)	15.5° W	120
INMARSAT 3-F5 <i>Indian Ocean Region West</i> (IOR-W)	25° E	126
Artemis	21,5° E	124

Tabelle 4: Von EGNOS genutzte Satelliten [ESSP]

Die Grafik in Abbildung 14 zeigt die zur Ausstrahlung verwendeten Satelliten und deren *Footprint*, also den Bereich, in dem die Signale empfangen werden können.

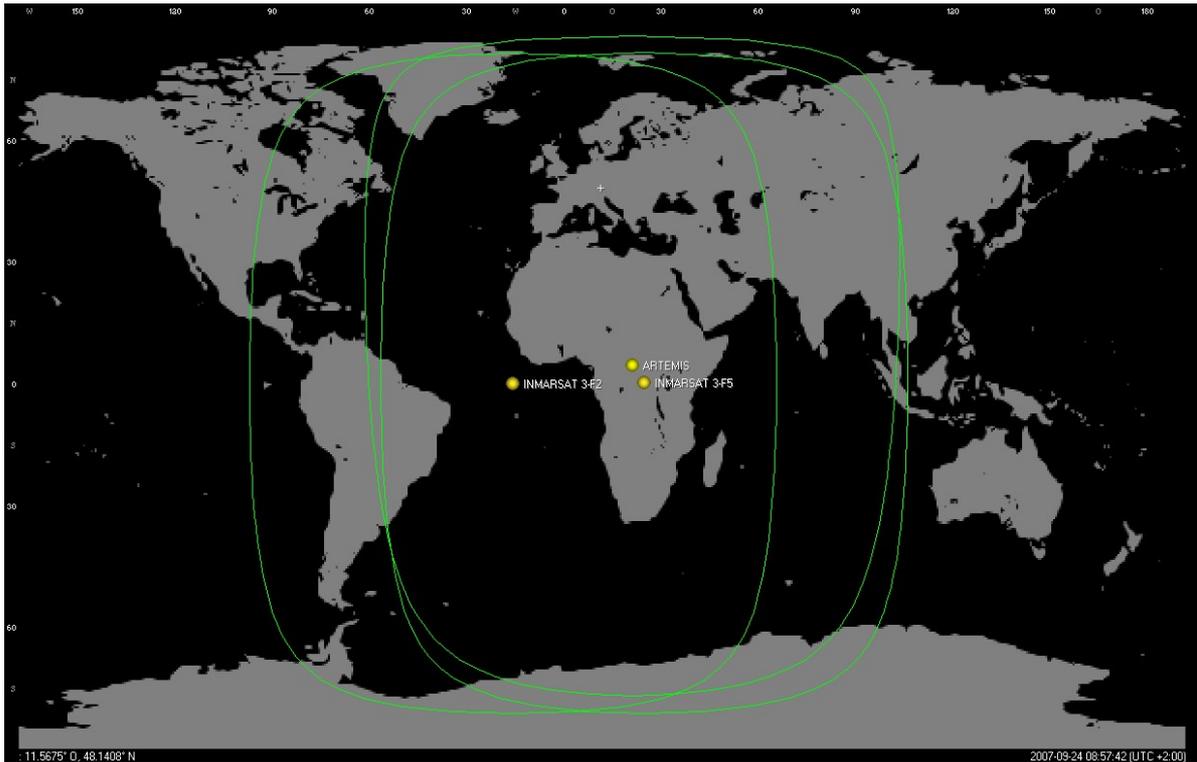


Abbildung 14: Position und Abdeckungsbereich der EGNOS-Satelliten [Orbitron].

2.2.1.4 Aktueller Status von EGNOS (August 2007)

EGNOS befindet sich momentan in einer prä-operativen Phase. Zur Nutzung des Systems können die Signale der EGNOS Satelliten IOR-W und AOR-E verwendet werden. Mit dem Satellit Artemis führt die Industrie zurzeit noch verschiedene Systemtests durch. Das System ist jedoch bisher noch nicht validiert, daher können die später angestrebten Leistungsdaten noch nicht garantiert werden [ESAEGNOS].

2.2.2 GBAS (Ground Based Augmentation System)

Ein bodengestütztes, ergänzendes Satellitennavigationssystem, genannt *Ground Based Augmentation System* (GBAS) wurde entwickelt, um satellitengestützte Präzisionsanflüge zu ermöglichen. Es besteht aus den drei folgenden Subsystemen:

- **Satellitensubsystem**
Das Satellitensubsystem dient zur Ermittlung der Positionsdaten. Es besteht aus den GPS- und gegebenenfalls zusätzlichen SBAS-Satelliten. Auch GLONASS-Satelliten können gegebenenfalls mit einbezogen werden.
- **Bodensubsystem**
Das Bodensubsystem stellt mittels eines *Very High Frequency Data Broadcast* (VDB) differentielle Korrekturen und andere Flugführungsinformationen bereit. Auch die Verwendung von zusätzlichen Airport Pseudo-Satelliten (APL) ist angedacht.
- **Bordsubsystem**
Das Bordsubsystem umfasst alle Geräte des Luftfahrzeuges, die genutzt werden, um die Satelliten- und Korrektursignale zu empfangen, zu verarbeiten und zur Anzeige zu bringen.

GBAS bedient sich des Prinzips des DGPS. Die in einer Referenzstation am Boden ermittelten Fehlerkorrekturen werden über eine Funkverbindung, den VDB-Link, an Luftfahrzeuge in der Umgebung ausgestrahlt. Diese können die so empfangenen Informationen verwenden, um die Genauigkeit der selbst bestimmten GPS-Position durch die entsprechenden Korrekturen zu erhöhen.

Die von der Referenzstation ermittelten Korrekturwerte gelten exakt für den Ort dieser Station, jedoch sinkt die Genauigkeit der Korrekturen mit zunehmender Entfernung des Nutzers von der Referenzstation.

Neben Korrekturdaten und Integritätsinformation werden mittels VDB auch Informationen über den *Final Approach Path*, also den Sollflugweg während des Anfluges, übermittelt. Im Bordsubsystem werden die mittels DGPS ermittelten Positionsdaten mit dem *Final Approach Path* verglichen, um daraus die aktuellen Ablagen zu ermitteln. Die Ausgabe der Informationen erfolgt so, dass sie von den anderen Bordsystemen weiterverwendet werden können, also beispielsweise als Daten, die denen von ILS-Daten ähnlich sind [Dör04].

2.2.3 ABAS (Airborne Augmentation System)

Unter dem Begriff ABAS werden alle Ergänzungsverfahren zusammengefasst, die sich bordseitig verfügbarer Informationen bedienen. Dabei kann sowohl nur die Information aus dem GNSS gemeint sein (z.B. *Receiver Autonomous Integrity Monitoring* (RAIM), siehe 2.4), als auch Information aus zusätzlicher Sensorik (*Aircraft Autonomous Integrity Monitoring*, AAIM).

2.2.3.1 AAIM (Aircraft Autonomous Integrity Monitoring)

Wenn zusätzlich zu GNSS noch weitere Navigationssensorik zur Verfügung steht, kann diese auch zur Überprüfung der aus dem GNSS gewonnenen Positionslösung herangezogen werden. Als typische Sensorik ist hier in erster Linie barometrische Sensorik zur Messung der Höhe zu nennen. Aber auch Trägheitssensorik, die in *Dead-Reckoning*-Navigationshilfen eingesetzt wird, kann verwendet werden. Weniger häufig werden andere funkbasierte Systeme, z.B. *Long Range Navigation* (LORAN), eingesetzt, da deren Genauigkeit nicht ausreicht, um eine Fehlfunktion des GNSS im geforderten Genauigkeitsbereich anzeigen zu können.

Im Allgemeinen kann die Verwendung verschiedener Sensorik dazu geeignet sein, spezifische Schwachpunkte der einzelnen verwendeten Systeme durch sinnvolle Kombination zu verringern. Beispielsweise stellt GNSS-Navigation eine fehlerbehaftete Navigationslösung bereit. Der Fehler ist aber im Allgemeinen mittelwertsfrei. Im Gegensatz dazu ist das Fehlerrauschen eines trägheitsbasierten Systems viel geringer. Der Nachteil der Trägheitsnavigation liegt vielmehr in der Drift des Fehlers, da die Position durch Integration gewonnen wird und daher eine Fehlerfortpflanzung stattfindet. Kombiniert man die Positionslösungen beider Systeme über geeignete Filter, können die Vorteile beider Systeme genutzt werden (mittelwertsfreier und kleiner Fehler), wobei die Nachteile entfallen. Dieses Anwendungsgebiet wird als Sensorfusion, oder GPS/INS-Hybridisierung bezeichnet. Man unterscheidet zwischen fester und loser Kopplung (*tight/loose coupling*) je nachdem, ob bereits unabhängig errechnete Positionslösungen von GNSS und INS über ein Filter miteinander kombiniert werden, oder die Kombination bereits früher, beispielsweise auf der Ebene der gemessenen Satellitenentfernungen stattfindet. Im Allgemeinen wird zur Kombination der Daten ein Kalman-Filter verwendet.

Außer zur Verbesserung der Genauigkeit kann diese zweite Sensorik auch zur Gewinnung von Integritätsinformationen eingesetzt werden. Da die Sensoren in einer festgelegten Raumbeziehung zueinander stehen (im Allgemeinen am Flugzeug an bekannten Positionen montiert), muss sich jede Positions- oder Lageänderung in beiden Sensoriken widerspiegeln.

2.3 GNSS Pseudolites

Pseudo-Satelliten, oder auch *Pseudolites* genannt, sind am Boden installierte unbewegte Signalsender, siehe Abbildung 15, die zusätzliche Navigationssatelliten simulieren und so selbständig oder gemeinsam mit dem eigentlichen Satellitennavigationssystem, wie zu Beispiel GPS, in einem lokal eng begrenzten Bereich von wenigen Kilometern eine hochgenaue und extrem sichere Navigation erlauben [DLR98].

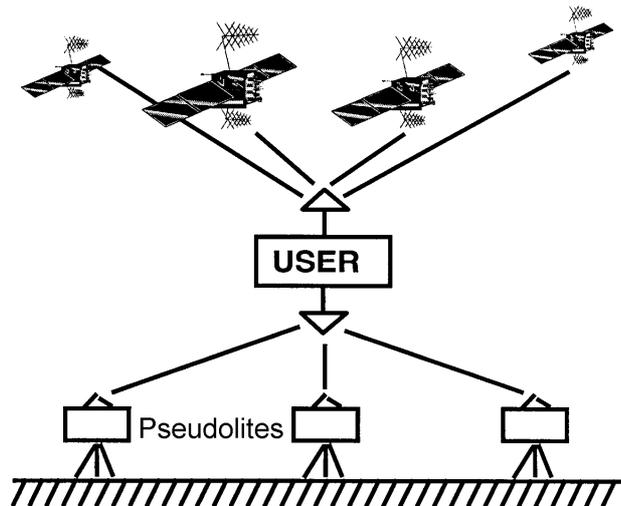


Abbildung 15: Das Pseudolite-Prinzip.

Es gibt viele Anwendungen, die mit Hilfe von Pseudolites verwirklicht werden können. In Bereichen, in denen die elektromagnetischen Signale von den Navigationssatelliten nicht oder nur ungenügend empfangen werden können, wie z.B. in einem Tal, siehe Abbildung 16, oder einem Tunnel, kann durch geeignete Standortwahl der Pseudolites die Ortung und Navigation ermöglicht werden.

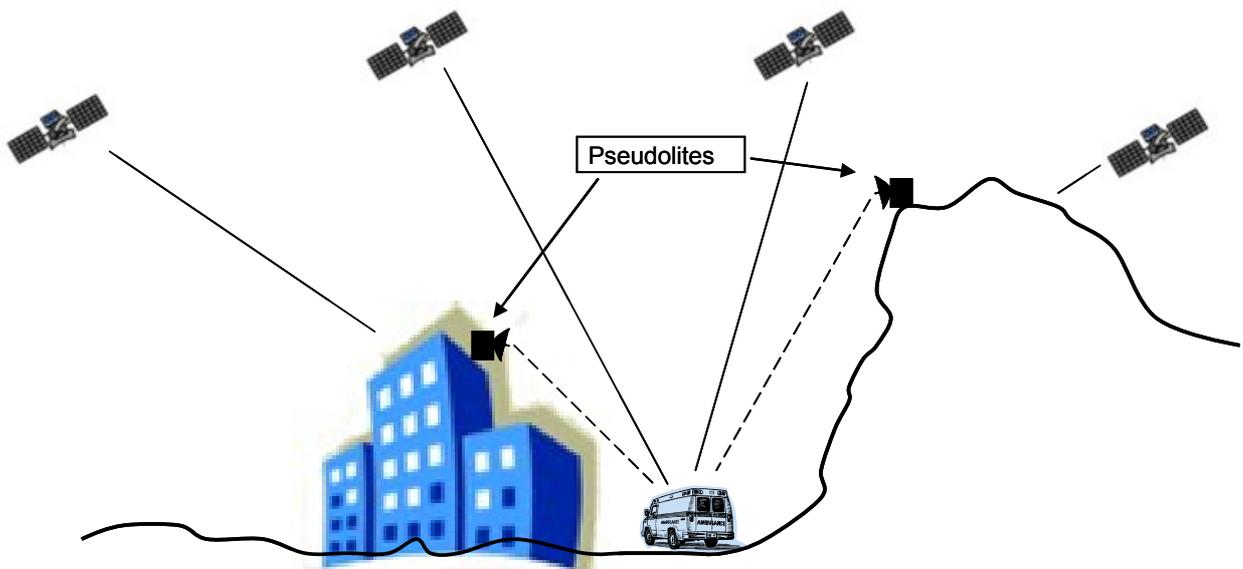


Abbildung 16: Pseudolites als Unterstützung in urbanen oder bergigen Regionen.

In Gebieten, die erhöhte Genauigkeitsanforderungen und Zuverlässigkeit an das Satellitennavigationssystem stellen, kann das Navigationssystem mit Pseudolites ergänzt werden. Auch für große Verkehrsflughäfen sind Pseudolites von großer Bedeutung. Die Flughäfen sind heute schon zu Spitzenzeiten regelmäßig überlastet und in Zukunft wird eine weitere Flugverkehrssteigerung erwartet. Bei schlechten Sichtbedingungen muss man bisher auf andere Zielflughäfen ausweichen. Mit Hilfe von Pseudolites und in Kombination mit anderen Ergänzungssystemen wird es zukünftig möglich sein, Flugzeuge auch bei sehr schlechter Sicht sicher zu landen.

2.3.1 Unterscheidungsmerkmale bei Pseudolites

Es gibt verschieden Arten von Pseudolites. Die Unterscheidungsmerkmale liegen hauptsächlich bei den in den folgenden Abschnitten genannten Eigenschaften.

2.3.1.1 Referenzzeit bei Pseudolites

Ein Unterscheidungskriterium bei Pseudolite-Systemen zeigt sich in der Referenzzeit der Pseudolites. Man kann für die Pseudolites eine eigene Systemzeit entwickeln, die zu der vom GPS verwendeten einen Zeitversatz hat. Es ist jedoch auch vorstellbar, dass die GPS-Zeit, die mit dem Empfang des Satellitensignals bestimmt werden kann, als Zeitbezug des Pseudolite-Systems verwendet wird. Bei dieser Methode ist das Berücksichtigen der Zeitdifferenz im Empfänger nicht nötig. Da man anstrebt, möglichst wenige Veränderungen in der herkömmlichen GPS-Empfängerarchitektur vornehmen zu müssen, ist es sinnvoll, die GPS-Zeit zu benutzen.

2.3.1.2 Signalprozessierung/-verarbeitung bei Pseudolites

Ein weiteres Unterscheidungskriterium bei Pseudolites liegt in der Signalprozessierung/-verarbeitung. Eine Möglichkeit der Signalübertragung besteht darin, Trägerfrequenzen zu benutzen, die zu denen von GPS verschieden sind. Wählte man die Frequenzen deutlich abweichend von den GPS Frequenzen, so müsste man die eingesetzten GPS-Empfänger mit zusätzlichen Frontends zum Signalempfang ausstatten. Um eine wirtschaftliche Nutzung der vorhandenen Ressourcen zu gewährleisten legt man die Trägerfrequenzen der Pseudolites so aus, dass sie mit der vorhandenen Hardware empfangen werden können. Man verwendet also ähnliche Frequenzbereiche, aber nicht exakt die gleichen.

Bei der Verwendung von gleichen oder ähnlichen Trägerfrequenzen ergibt sich das in der Literatur als *Near Far Problem* bezeichnete signaltechnische Problem, siehe Abbildung 17.

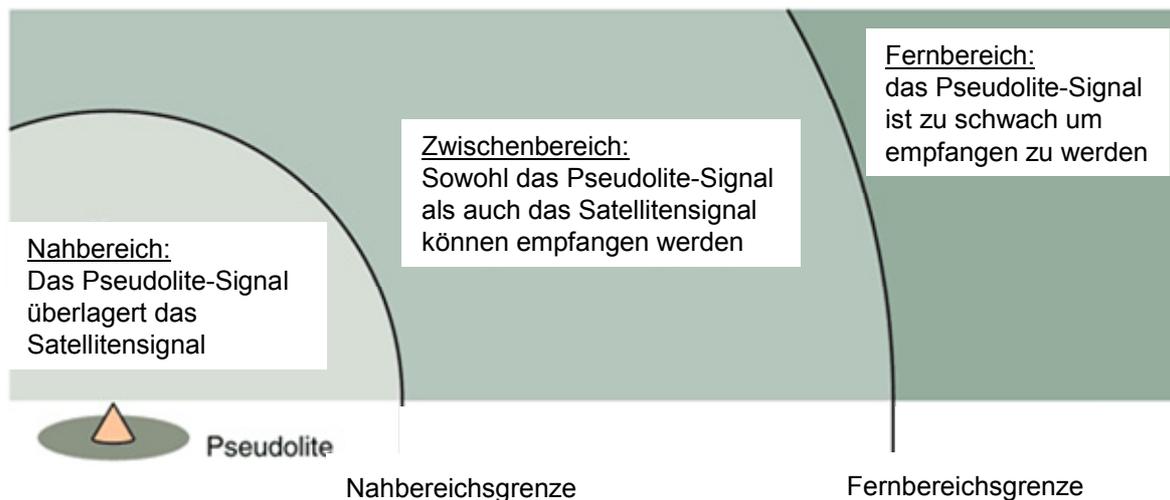


Abbildung 17: Das Nah-Fern-Problem bei der Benutzung von Pseudolites.

Um Signale im Empfänger verarbeiten zu können, müssen alle annähernd gleich stark und konstant sein. Die von Satelliten ausgestrahlten Signale haben auf der Erdoberfläche etwa die gleiche Signalstärke, da sie alle sehr weite, relativ konstante Wege zurücklegen. Die Streckenänderung, die sich durch die Bewegung des Empfängers ergibt, ist im Verhältnis zu den Strecken, welche die von den Satelliten abgegebenen Signale zurücklegen, klein. Aus diesem Grund bleibt die Signalstärke immer annähernd gleich. Verwendet man hingegen Pseudolites, so sind die Sender nahe beim Empfänger. Die vom Sender abgestrahlte Signalstärke hängt von dem Bereich ab, in dem mit Pseudolites navigiert werden soll. Ist dieser Bereich klein, so genügt es, mit geringer Leistung zu senden. Ist der Bereich jedoch groß, so dass die Signale weite Strecken zurücklegen müssen und somit stärker abgeschwächt werden, muss die Sendeleistung entsprechend erhöht werden, um die Signale im Empfänger verarbeiten zu können. Die Signalstärke ist demnach stark von der Entfernung zwischen der Sender und Empfänger abhängig. Befindet sich der Empfänger in der in Abbildung 17 dargestellten Nah-Zone sehr nahe beim Sender, so werden die GPS-Signale von den Pseudolite-Signalen, die eine verhältnismäßig starke Signalstärke haben, so überlagert, dass die GPS-Signale im Rauschen untergehen. Im Fernbereich kann der Empfänger die Signale der Pseudolites nicht mehr

verarbeiten, da sie zu schwach sind. Nur in der sogenannten Zwischen-Zone (*Intermediate Zone*), in der die Signalstärken der Pseudolites und der Satellitensignale annähernd gleich sind, ist es möglich, beide Signale zu verwenden.

Eine weitere Methode zur Trennung von Signalüberlagerungen bringt das gepulste Senden der Pseudolites. Nur in bestimmten Zeitschlitzen werden die Pseudolites abgestrahlt, welche die GPS-Signale überlagern. Bei genügend großer Leistung werden vom Empfänger nur noch die Pseudolites detektiert. Die GPS-Signale hingegen können zu den Zeiten empfangen werden, während der keine Signale von Pseudolites gesendet werden. Somit wird dem Empfänger ermöglicht, beide Signale zu trennen und auszuwerten. Dieses Verfahren beschränkt jedoch die Anzahl der zu verwendenden Pseudolites, da die Zeitschlitze wegen der Empfängertechnik nicht beliebig klein gewählt werden

können. Im Stanford Telekom Pseudolite wird z.B. eine Pulsrate von $\frac{1}{11}$ verwendet. Jede

Millisekunde wird in 11 Partitionen aufgeteilt und in nur einer bestimmten Partition wird das Signal der Pseudolites gesendet [Hei99].

Zur Trennung (bzw. Unterscheidung) der verschiedenen Pseudolites, verwendet man wie auch beim GPS-Signal unterschiedliche Gold-Codes. Jedes Signal kann damit dem richtigen Sender zugeordnet werden.

2.4 GNSS RAIM und das Integritätskonzept

Receiver Autonomous Integrity Monitoring (RAIM) ist eine Technologie zur Überprüfung der Integrität von GPS. Es spielt vor allem bei sicherheitskritischen Applikationen wie Luft- und Seefahrt eine wichtige Rolle. RAIM wird eingesetzt, um ohne Zuhilfenahme zusätzlicher externer Informationen, beispielsweise von SBAS oder GBAS, die Richtigkeit der Positionslösung abzuschätzen. Dies geschieht durch Vergleich der Residuen verschiedener Positionslösungen, die aus Untermengen der sichtbaren Satelliten gewonnen werden. Dieser Vergleich liefert einen Rückschluss auf die Qualität der Beiträge zur Positionslösung, die von einem einzelnen Satelliten erbracht werden. Ist das Signal eines Satelliten fehlerbehaftet, so ergeben alle Positionslösungen unter Einbeziehung dieses Satelliten ein wesentlich höheres Residuum als diejenigen Lösungen, die ohne Beitrag des fehlerhaften Satelliten errechnet wurden.

Damit diese Methode funktioniert, müssen mehrere überbestimmte Gleichungssysteme miteinander verglichen werden. Daraus ergibt sich die Mindestanzahl von sechs Satelliten für die Bestimmung und Zuordnung eines Fehlers zu einem Satelliten: vier Satelliten sind für eine bestimmte Positionslösung notwendig (drei Raum- und eine Zeitdimension als Unbekannte); fünf Satelliten sind daher als Eingangsparemeter einer Untermenge von Satelliten notwendig, wenn ein Residuum in der Lösung existieren soll. Damit ein Ausschluss eines Satelliten möglich ist, muss die Gesamtmenge der Satelliten daher mindestens sechs sein.

Sind nur fünf Satelliten verfügbar, so kann nur eine Überprüfung des Ergebnisses ohne Isolierung des fehlerhaften Satelliten stattfinden. Das Residuum wird in diesem Fall mit einem festen Schwellwert verglichen, und das Ergebnis des Vergleichs bezeichnet die Richtigkeit der Positionslösung. Auf der anderen Seite erlaubt die Verwendung von mehr als sechs Satelliten die Erkennung von entsprechend mehreren unabhängigen Fehlern auf verschiedenen Satelliten.

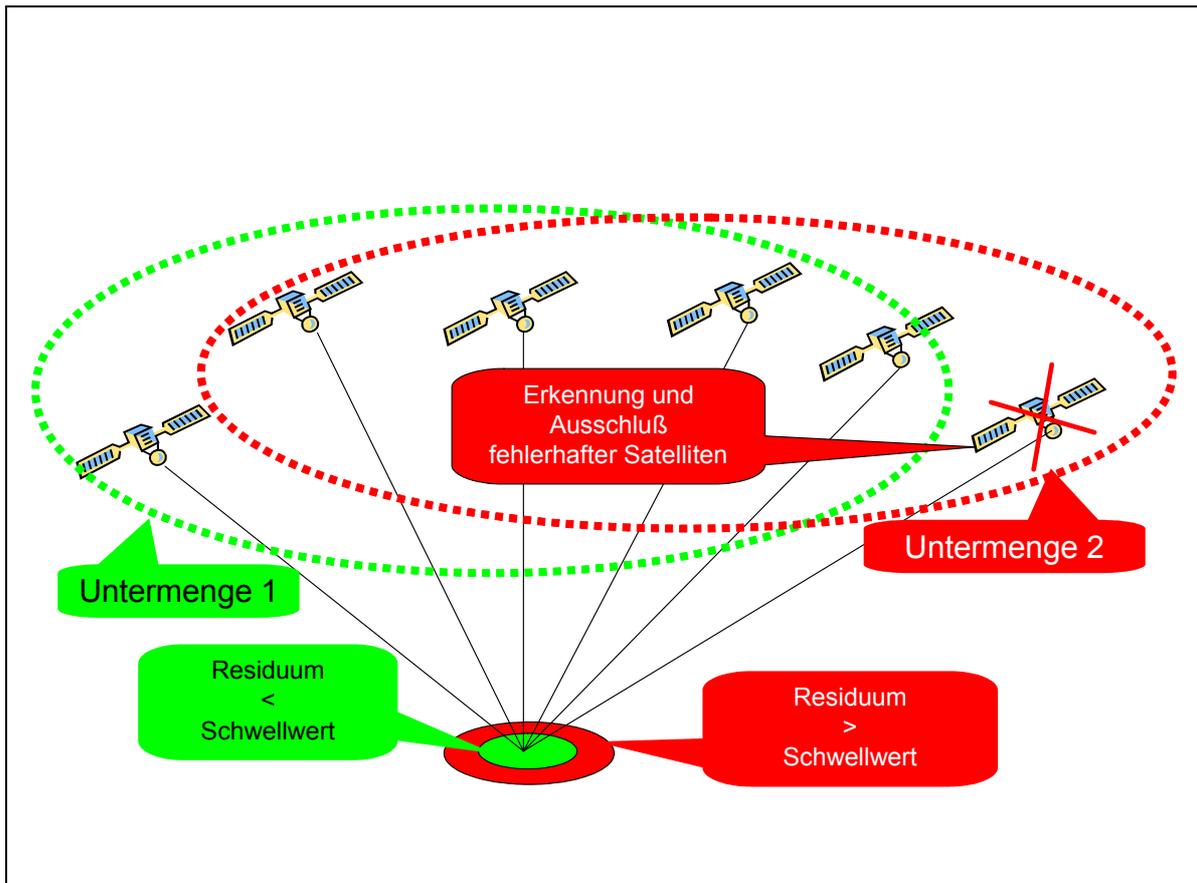


Abbildung 18: RAIM erkennt fehlerhafte Satelliten durch Vergleich der Positionslösungen von Untergruppen von Satelliten.

2.4.1 Snapshot RAIM und Sequential RAIM

Die beschriebene Technik kann bereits mit einer einzigen Messung genug sichtbarer Satellitensignale einen oder mehrere Messfehler in den Satellitenentfernungen erkennen, und bei genügend sichtbaren Satelliten auch aus der Positionslösung ausschließen. Wird diese Überprüfung nur auf der Basis der Messungen einer Epoche durchgeführt, spricht man von *Snapshot RAIM*. Werden die Messungen nicht nur verschiedener Satelliten, sondern auch eines einzelnen Satelliten entlang der Zeitachse bezüglich des verursachten Residuums in der Positionslösung beobachtet, so spricht man von *Sequential RAIM*. Diese Technik bringt den Vorteil, dass mehr Information zur Verfügung steht, aufgrund derer die Satellitensignale evaluiert, und eine Überprüfung der Positionslösung statt finden kann.

2.5 Assisted GNSS (A-GNSS)

Das globale Satelliten Navigationssystem GPS wurde primär dafür entwickelt, die Position eines Empfängers im Freien kontinuierlich zu ermitteln. Für die Nutzung in unwegsamem Gelände, Häuserschluchten, Unterführungen oder öffentlichen Verkehrsmitteln bei denen es häufig zu Unterbrechungen im Signalempfang kommt, verbunden mit zwischenzeitlichen Ortswechseln, ist GPS nicht konzipiert. Daher dauert die Neuberechnung der aktuellen geografischen Position nach solchen sprunghaften Ortswechseln recht lange.

Folgende Nachteile besitzt das GPS-System bezogen auf eine urbane Region:

-
- die Zeit, die bis zu einer ersten Positionsbestimmung vergeht, ist relativ lang (30 bis 60 Sekunden, im schlimmsten Fall mehrere Minuten; max. 12,5 min),
 - in städtischer Umgebung ist die freie Sicht zu den GPS-Satelliten oft stark eingeschränkt, in geschlossenen Räumen sogar unmöglich,
 - der Stromverbrauch des Satellitenempfängers ist hoch, da normale Empfänger für eine kontinuierliche Positionsermittlung ausgelegt sind.

Um eine Positionsbestimmung gerade in dichten urbanen Regionen dennoch möglich zu machen, wurde *assisted GPS* (A-GPS) entwickelt. Ausgenutzt wird bei diesem Verfahren, dass gerade in stark bebauten und dicht besiedelten Regionen ein gut ausgebautes Mobilfunknetz vorhanden ist.

A-GPS kombiniert die Nutzung des satellitenbasierten GPS-Systems mit dem Empfang sogenannter Assistenzinformationen aus zellularen Mobilfunknetzen.

2.5.1 Positionsbestimmung mit Assistenzinformationen aus dem GSM-Netz

Als Assistenzinformationen benutzt AGPS zum einen die Position die durch die genutzte Funkzelle gegeben ist. Diese Positionsinformation kann durch Kreuzpeilung mit anderen erreichbaren Mobilfunkstationen noch präzisiert werden. Diese Informationen können verwendet werden, um den Suchbereich für die Satellitensignale (Identität der sichtbaren Satelliten, ungefähre Laufzeit, Dopplerverschiebung) einzuschränken und somit die Messung deutlich zu beschleunigen.

Des Weiteren unterstützt AGPS den Empfänger beim Empfang der Satellitendaten (wie Bahnparameter, Korrekturdaten, etc.) indem die Navigationsinformation über das Mobilfunknetz geladen wird, was nur einen Bruchteil an Zeit benötigt wie über den normalen GPS Empfang. Diese Satellitendaten werden durch Referenzempfänger bereitgestellt, die stationär an Orten mit guter Sichtbarkeit zum Himmel aufgestellt sind und deren exakte Position vermessen wurde. Diese GPS Daten werden auf einem Server abgelegt und stehen dem Mobilfunkgerät permanent zur Verfügung. Der AGPS-Empfänger muss demnach nur die Ankunftszeit der Satellitendaten messen wozu eine viel kürzere Zeit nötig ist, als beim Lesen der gesamten Navigationsnachricht.

Die Unterstützung beim GPS Empfang führt also zu einer wesentlich schnelleren Bestimmung der Erstposition, welche bei herkömmlicher Nutzung des GPS Systems bis zu 12 min und 30 s dauern kann. Diese Zeitdauer nennt man auch *Time to First Fix* (TTFF) und beträgt bei AGPS nur wenige Sekunden und ist in Notfallsituationen besonders wichtig, um Hilfsdienste schneller zum Ziel zu leiten.

Zusätzlich können durch die GPS-Referenzstationen noch differenzielle GPS Informationen übertragen werden, womit sich die Positionsgenauigkeit im Gegensatz zu reinem GPS Empfang in den Bereich unterhalb von 1m verbessern lässt.

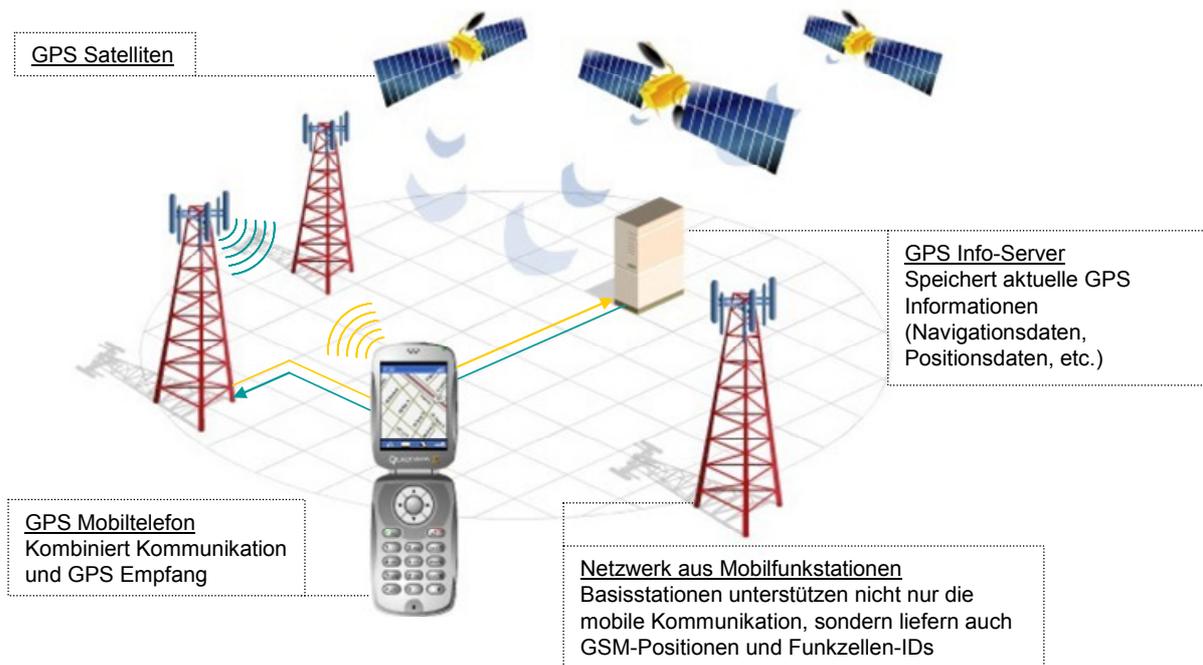


Abbildung 19: Funktionale Komponenten eines A-GPS Systems.

Die Entwicklung von AGPS ist an dieser Stelle aber noch nicht beendet. Aktuell wird versucht mit weiteren Unterstützungsprozessen und Ideen den GPS Empfang innerhalb von Gebäuden zu ermöglichen. Generell ist dies nicht möglich, da das GPS-Signal meist zu stark abgeschwächt wird. A-GPS alleine kann dieses Problem nicht lösen. Hierfür werden Techniken untersucht, die über Korrelationen und Aufsummierung von Signalen versuchen, den Signalpegel soweit anzuheben, dass eine Verarbeitung der GPS-Signale auch innerhalb von Gebäuden möglich wird. Erste Geräte mit dieser Option sind in der Entwicklungsphase

2.6 Robustheit von GNSS gegen Störungen

Die Navigation über Satelliten wird durch ein von ihnen aus ca. 25.000 km Höhe abgestrahltes elektromagnetisches Signal ermöglicht. Die Satelliten strahlen ein im Vergleich mit Kommunikationssatelliten schwaches Signal ab, das nach der Überbrückung dieser enormen Distanz am Boden mit ca. 1×10^{-16} W kaum noch detektierbar ist und sich unterhalb des Rauschens eines üblichen Empfängers befindet. Nur durch spezielle Signalverarbeitungsverfahren kann dieses Satellitennavigationssignal für die weitere Nutzung zurückgewonnen werden.

Aufgrund der schwachen Signalleistung, die für die Navigation am Boden zur Verfügung steht, können Empfänger zur Satellitennavigation leicht Opfer von elektromagnetischen Störungen werden. Zwar ist die Nutzung von Sendefrequenzen in Deutschland einem strengen Reglement durch die Bundesnetzagentur unterworfen, doch können selbst Sendeanlagen, die sich für andere Systeme als harmlos erwiesen haben, Satellitennavigationsempfänger durch ihre hohe Empfindlichkeit stören. Erschwerend kommt hinzu, dass viele potentielle Störer nicht mit Standard-Equipment entdeckt werden können, da die zur Störung nötige Leistung nur knapp über dem üblichen Empfängerrauschen liegen kann. Wie in Abbildung 20 gezeigt, können viele schwache Störungsquellen, wie es das zukünftige *Ultra Wide Band*-System (UWB) sein könnte, durch ihre akkumulierte Leistung GNSS-Empfänger beeinträchtigen, aber auch Radaranlagen und Rundfunkstationen sind potentielle Störquellen. Bei gezielten Angriffen auf den GNSS-Empfänger muss man natürlich auch mit nachgeahmten GNSS-Signalen und Hochleistungsstörern rechnen.

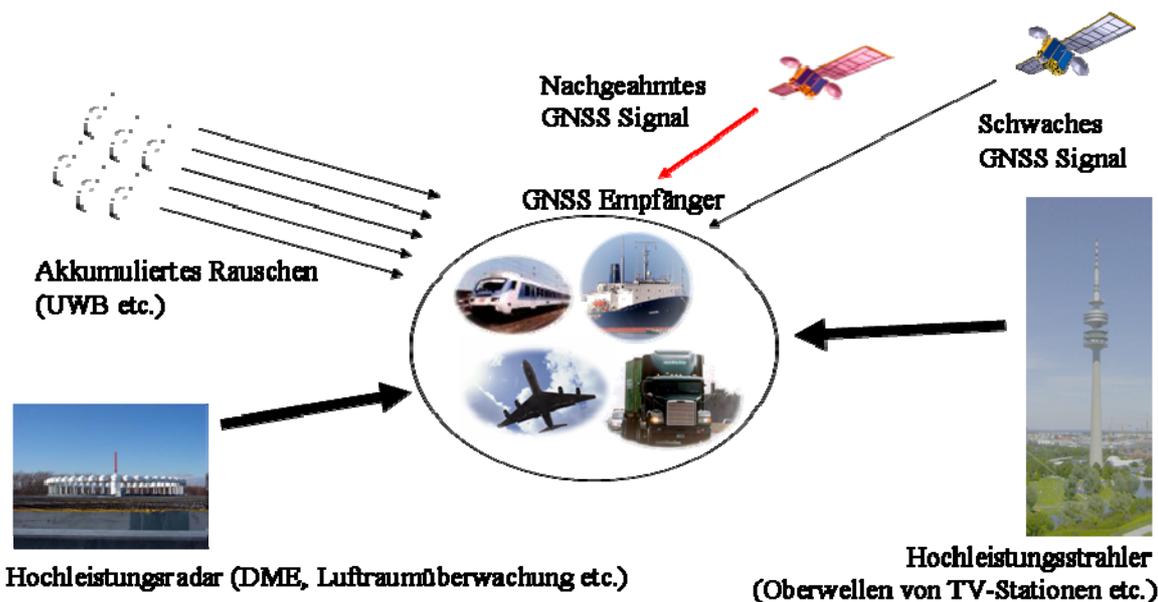


Abbildung 20: Das schwache Navigationssignal muss mit starker Konkurrenz durch Störungen von Radar-, Rundfunk-, Mobilfunkquellen und auch gewollten Störungen zu Recht kommen [ADAP411].

In Abbildung 21 ist beispielhaft die Architektur eines GNSS-Empfängers dargestellt. Das Signal wird über die Antenne (1) empfangen und im HF-Bereich (2) vorverstärkt und analog vorverarbeitet, um anschließend auf niedrigere Frequenzen gemischt und digitalisiert (3) zu werden. In der digitalen Signalverarbeitung (4) kommen Algorithmen zur Aufbereitung und Bereinigung des Signals zum Einsatz. Nach der Korrelierung (5) wird die Navigationslösung (6) berechnet, die Basis für die Positionsausgabe des Empfängers ist. An dieser Stelle wird heutzutage mit externen Sensoren wie etwa Inertialsystemen gekoppelt.

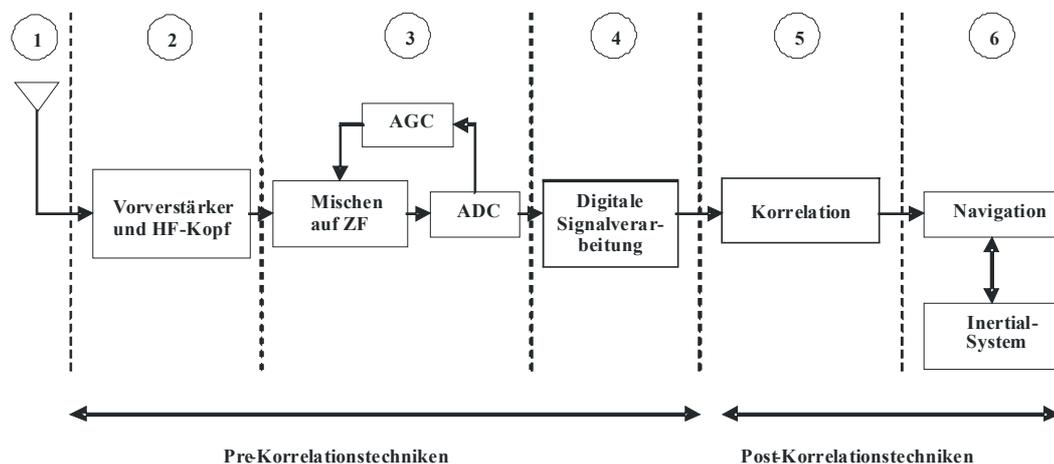


Abbildung 21: Architektur eines Satellitennavigationsempfängers nach [ADAP411].

In jeder der einzelnen Empfängerstufen ist ein besonderes Augenmerk auf saubere Filterung und die Reduktion von Störeinflüssen zu legen. Prinzipiell gilt: Je näher an der Antenne die Störung abgefangen wird, desto effektiver ist die Unterdrückung.

In derzeitigen GNSS-Empfängern wird das Signal erst in mehreren analogen Mischerstufen auf eine niedrigere und damit einfacher zu verarbeitende Frequenz transferiert. Falls diese Stufen in niedrigerer Qualität geplant und integriert wurden, kann hier enormes Störpotential entstehen, das an späterer Stelle nur mit hohem Aufwand abgefangen werden kann.

	Satellit bei niedrige Elevation	Satellit bei mittlerer Elevation	Satellit im Zenit
Abgestrahlte Leistung	14,3 dBW (= 27 Watt)		
Gewinn der Satellitenantenne	12,1 dB	12,9 dB	10,2 dB
Entfernung	25.240 km	22.020 km	20.190 km
Signaldämpfung durch Entfernung	-159,0 dB	-157,8 dB	-157,1 dB
Atmosphärische Verluste	0,5 dB	0,5 dB	0,5 dB
Gewinn der Empfangsantenne (typische Patch-Antenne)	-4 dBic	2 dBic	4 dBic
Verfügbare Signalleistung im Empfänger	-162,5 dBW	-154,5 dBW	-154,5 dBW

Tabelle 5: Leistungsberechnung für GPS nach [EnMi06].

In zukünftigen Systemen wird durch die neuen technischen Möglichkeiten und die Verfügbarkeit von Komponenten mit höherer Leistung die Digitalisierung allerdings noch näher an die Antenne rücken und Unterstützungssysteme wie externe Sensoren können bereits in früheren Empfangsstufen eingesetzt werden. Auch die digitale Signalverarbeitung wird dann als starkes Hilfsmittel gegen etwaige Störer nahe an der Antenne einsetzbar sein.

Wie aus Abbildung 20 ersichtlich, wird das Signal auf dem Weg vom Satelliten zum Empfänger am Erdboden enorm geschwächt. Um das Signal zu stören reichen hierfür relativ geringe Leistungen aus. Nimmt man beispielsweise die für die europäische Luftfahrt gültigen Grenzwerte von -102,5 dBm Störleistung an, würde eine geringe Störleistung von 1 mW bereits im Umkreis von 2 km diesen Grenzwert verletzen. Ein 1 W-Strahler würde dies im Umkreis von ca. 65 km schaffen. Hierbei muss man sich allerdings im klaren sein, dass 1 W die ungefähre Strahlungsleistung eines Handys sein kann, allerdings ebenso die Oberwelle einer Rundfunkstation, welche mit 1 MW sendet, aber um 60 dB durch die sendeseitigen Filter gedämpft ist.

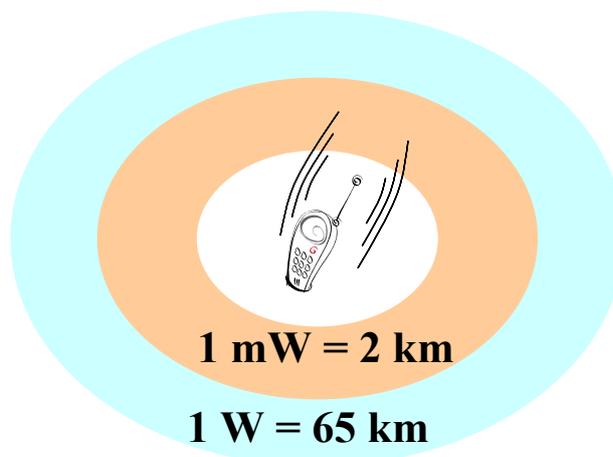


Abbildung 22: Reichweite eines potentiellen Störers unter bestimmten Rahmenbedingungen (Freiraumausbreitung, -102,5 dBm Grenzwert) [ADAP411].

Glücklicherweise ist man elektromagnetischen Störungen, seien sie gewollt oder ungewollt, nicht hilflos ausgeliefert. Obwohl die große Mehrheit der aktuellen GNSS-Empfänger anfällig auf schwache Störsignale sind, so wird es doch im Zuge der Miniaturisierung und steten Erhöhung der Leistung bei gleicher Chipfläche rechenintensivere Algorithmen geben, die Einzug in GNSS-Empfänger halten. Strahlformungsantennen können weiterhin mehrere Störer ausblenden und die Ungestörte Nutzung von Satellitennavigation sicherstellen. Auch neue Sensoren und Kopplungsmechanismen tragen zukünftig zur sicheren Satellitennavigation bei.

Durch das neue GNSS-System Galileo und das modernisierte GPS stehen in naher Zukunft zusätzliche unterschiedliche Frequenzen zur Verfügung. Die Wahrscheinlichkeit, dass durch ungewollte Störung alle diese Frequenzen in Mitleidenschaft gezogen werden ist deutlich geringer als dies bei einer einzelnen Frequenz der Fall wäre. Selbst bei gewollten Störungen wird es schon schwieriger, die Leistung aufzubringen, um alle Frequenzbänder in der ausreichenden Bandbreite zu beeinflussen. Daher leisten neue redundante Frequenzen einen wichtigen Beitrag zur Störsicherheit der Satellitennavigation.

2.7 GNSS Signalempfang in Gebäuden

GNSS basiert auf Entfernungsmessungen, die über die Laufzeit des Signals zwischen einem Empfänger und mehreren Satelliten im Orbit berechnet werden. Für eine möglichst genaue Positionierung ist eine Sichtverbindung zwischen der Empfängerantenne und den Satelliten notwendig. Zwar könnte das Signal auch über eine Reflexion empfangen und die Navigationsdaten dekodiert werden, dies würde allerdings eine Verfälschung der Entfernungsmessung zur Folge haben, da die Wegstrecke vom Satelliten zum Nutzer über einen Reflexionspunkt in jedem Falle länger ist als der direkte Weg. Entsprechend sind Multipfad-Umgebungen entweder zu meiden oder eine Unterdrückung muss im Empfänger durchgeführt werden. Generell verursacht eine Mehrwege-Umgebung einen systematischen Messfehler im Empfänger [ADAP01].

Abhängig von der Signal- zu Rauschleistung (thermisches Rauschen im Empfänger) wird zusätzlich ein zufälliger Fehler verursacht. Nach [IS-GPS-200] beträgt die minimale Empfangsleistung im Außenbereich für das öffentlich verfügbare GPS L1 C/A Signal -128,5 dBm.

Die Navigation in Innenräumen umfasst viele verschiedene Arten von Gebäudestrukturen wie z.B. Bürogebäude, Wohnhäuser, aber auch großflächige Innenräume wie man sie in Flughäfen, Messe- oder Sporthallen findet. Ebenso gehören U-Bahn-Stationen oder Tunnels dazu, in denen durch Abschattung so gut wie kein messbares Signal von außen zu empfangen ist. Die Variabilität von Innenräumen sowie auch die Ausstattung und Gebäudestruktur ist besonders groß, wenn man z.B. Flughäfen und Wartehallen mit ihrer enormen Größen und vielen Fenstern gegenüber U-Bahn-Stationen vergleicht, die keine Sichtverbindung nach außen haben. Wohnhäuser dagegen besitzen meist wesentlich kleinere Räume. Wiederum eine sehr unterschiedliche Signalausbreitung findet man in Fabriken, die meist sehr großflächig sind und eine große Anzahl von Maschinen, also viele metallische Gegenstände beinhalten, die gute Reflektoren für elektromagnetische Wellen darstellen. Aber nicht nur die Innenraumumgebungen ist für die Wellenausbreitung entscheidend, sondern auch die äußere Umgebung, da gerade für GNSS Außenreflexionen eine wichtige Rolle spielen. [Mol91] kategorisiert die bestehende Literatur für Wellenausbreitung in Gebäude in acht verschiedene Kategorien wie in Tabelle 6 dargestellt.

Kategorie	Beschreibung
1	Wohnhaus in einer Vorstadt
2	Wohnhaus in einer städtischen Umgebung
3	Bürogebäude in einer Vorstadt
4	Bürogebäude in einer städtischen Umgebung
5	Fabrik mit schweren Maschinen

6	Andere Fabriken, Sporthallen, Messehallen
7	Offenes Gelände, z.B. Bahnhöfe, Flughäfen, etc.
8	Untergrund, U-Bahn-Stationen, Tunnels, etc.

Tabelle 6: Gebäudekategorien wie in [Mol91] definiert.

Die Schwierigkeit für die GNSS Positionierung innerhalb von Gebäuden besteht hauptsächlich darin, dass die direkte Sichtverbindung des Empfängers zum Satelliten meistens blockiert ist. Dies bedeutet, dass die Mindestanzahl von vier sichtbaren Satelliten durch ein Fenster meist nicht gewährleistet werden kann, da durch ein Fenster nur ein Teil des Himmels überschaubar ist. Versucht man mithilfe von GNSS, Positionen in Tunnels oder U-Bahn-Stationen zu bestimmen, ist die Situation meist aussichtslos, da die Signalstärke zu schwach ist. Tabelle 7 gibt einen Eindruck über die Dämpfung von Baumaterialien bei 1,5 GHz (L-Band) und damit auch die Ausbreitungsdämpfung von elektromagnetischen Wellen in Gebäuden.

Material	Dicke (mm)	Dämpfung bei 1.5 GHz (dB)
Backstein	89	4,5
	178	6,5
	267	8,5
Backstein mit Betonwand	90 Back., 102 Beton	17
	90 Back., 203 Beton	31
Backstein - Mauerblock	90 Back., 194 Mauerblock	10,5
Beton (verschiedene Sorten)	102	14 - 16,5
	203	26 - 32,5
	305	34 - 44
Mauerblock	203	11
	406	18
	610	29
Trockenwand	6	0,35
	13	0,5
	16	0,65
Glas	6	1,2
	13	2,8
	19	3,6
Holz (trocken)	38	3,4
	76	4,4
	114	5,8
	152	7,4
Holz (nass)	38	2
	76	5,5
	114	7
	152	9
Sperrholz (trocken)	6	0,75
	13	0,8
	19	1,1
	32	1,8

Sperrholz (nass)	6	2,5
	13	2,5
	19	2,5
	32	3,2
Stahlbeton	203, 0% Stahl	32
	203, 1% Stahl, 140 mm Maschen	29
	203, 2% Stahl, 70 mm Maschen	32,5
Betonrippenstahl	140 mm Maschengröße	1,5
	70 mm Maschengröße	11

Tabelle 7: Materialdämpfung von Baustoffen bei 1,5 GHz. Quelle [Sto97].

Moderne hochsensible GPS-Empfänger wie der SiRF III können Signale bis zu -160 dBm verfolgen. Vergleicht man die nominelle Empfangsleistung im Außenbereich und berücksichtigt Tabelle 7 wird klar, dass auch moderne Empfänger GPS Signale nur sehr schwer durch eine Betonwand von 20 cm empfangen können. Somit werden Signale im Innenbereich meist über Fenster empfangen, da diese im Vergleich zu Beton eine sehr geringe Dämpfung aufweisen (siehe Tabelle 7).

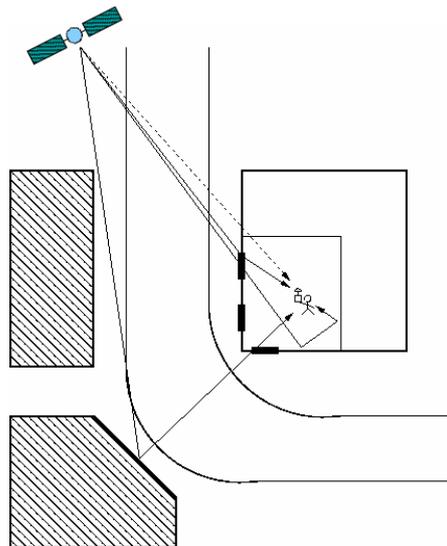


Abbildung 23: Signalausbreitungswege von einem Satelliten zu einem Nutzer innerhalb eines Gebäudes. Die gestrichelte Linie ist die direkte Sichtverbindung. [ADAP01]

Abbildung 22 gibt eine qualitative Einsicht in den Ausbreitungskanal zwischen einem Satelliten und einem Nutzer innerhalb eines Gebäudes. Mögliche Effekte beinhalten [ADAP01]:

- die direkte Sichtverbindung ist stark gedämpft
- Beugungseffekte am Fensterrahmen
- Signalempfang durch ein Fenster mit mehreren Reflexionen innerhalb des Raumes
- Reflexionen außerhalb des Gebäudes
- Kombination der beschriebenen Effekte

[BHB99] beschreibt schmalbandige Messungen der Wellenausbreitung von einer Helikopterplattform aus in ein Bürogebäude. Die gemessene Signaldämpfung wurde mit 12 - 31,8 dB angegeben. Nimmt man diese Werte als Basis, würde ein GPS Signal mit einer Stärke zwischen -140,5 bis -159,5 dBm gemessen werden. Ähnliche Werte werden für ein Bürogebäude in [MNR06] angegeben. Signalstärkemessungen von GPS Signalen ergaben Werte zwischen -141 dBm und -157,8 dBm mit

Einbrüchen von bis zu -164 dBm. Beide Messungen wurden in Gebäuden mit Beton-Außenwänden und normalem Fensterglas durchgeführt. Nach Aussage in [DeD05] werden, für eine effektive Positionierung innerhalb eines Gebäudes mit Hilfe von GPS, Signalverarbeitungs-Algorithmen benötigt, die mit einer Signalstärke zwischen -150 dBm und -170 dBm auskommen. Einen quantitativen Einblick in das Fehlerverhalten gibt Abbildung 24. Die Abbildung zeigt die Standardabweichung einer Entfernungsschätzung mit einer *Delay-Lock-Loop* (DLL) beeinträchtigt durch thermisches Rauschen bei geringer werdendem Signal zu Rauschabstand (C/N_0).

In einem Navigationsempfänger wird zumeist eine *Delay-Lock-Loop* (DLL) [EnMi06] zur Schätzung der Distanz zwischen Satelliten und Empfänger verwendet. Während sich Mehrwegeausbreitung des Signals als ein systematischer Fehler in der Schätzung einer DLL bemerkbar macht, wirkt sich eine Abschwächung der Signalleistung als ein zufälliger Fehler aus, da das Verhältnis von Signal zu Rauschabstand (C/N_0) geringer wird. Die Standardabweichung σ_{iDLL} (in Meter) wird in [EnMi06] für eine kohärente DLL mit

$$\sigma_{iDLL} = \lambda_c \sqrt{\frac{2d^2 B}{C/N_0} \left[2(1-d) + \frac{4d}{T \cdot C/N_0} \right]}$$

angegeben, wobei λ_c die Länge eines Chips in Meter bezeichnet, B die Bandbreite der DLL, d den zeitlichen Abstand zwischen *early* und *late* Korrelator in Chips und T die Integrationszeit. Chips sind dabei die Bits der Spreizcodes, die bei dem von GPS verwendeten CDMA-Vielfachzugriffsverfahren verwendet werden.

Nimmt man die Werte von [BHB99] bezüglich der Dämpfung als Maßstab, so erhöht sich für 12 dB Dämpfung des Signals die Standardabweichung um 3 m und für 31 dB um 123 m gegenüber der Standardabweichung bei einem C/N_0 von 45 dB-Hz, wobei 45 dB-Hz als ein Standardmaß im Außenbereich angesehen werden kann.

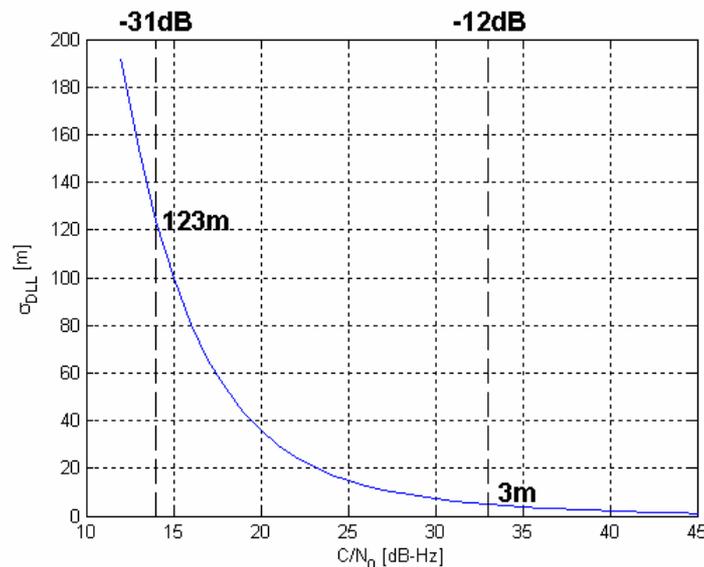


Abbildung 24: Standardabweichung der Entfernungsschätzung einer kohärenten DLL (nur thermisches Rauschen) mit einem Korrelatorabstand von 0,5 Chips, 10 ms Integrationszeit und 1 Hz Bandbreite. Alle Werte relativ zu $C/N_0 = 45$ dB-Hz [ADAP01].

Zusammenhängend mit unterschiedlicher Signaldämpfung kann ein weiteres Problem auftreten. Wird das Signal eines GPS Satelliten z.B. direkt durch ein Fenster empfangen und somit sehr wenig gedämpft, so kann es passieren, dass der Empfänger mehrere Satelliten anstelle von nur einem sieht, da er Kreuzkorrelationsspitzen (24 dB unter den Autokorrelationsspitzen), die aus ein und demselben Satellitensignal durch Mehrwegeausbreitung entstanden sind, für Signale von unterschiedlichen Satelliten hält. Um diese Fehler zu unterdrücken, müssen geeignete Signalverarbeitungsverfahren zur Interferenzunterdrückung, wie in [DeD05] beschrieben, angewendet werden.

Unter der Annahme, dass der Raum in dem sich der Nutzer befindet eine normale Größe (Bürogebäude, Wohnhaus) besitzt, können Umweglängen durch Reflexionen innerhalb des Raumes gegenüber dem zufälligen Fehler durch die Gebäudedämpfung oder der Umweglänge durch Außenreflexionen vernachlässigt werden. Dies wird besonders klar, wenn man bedenkt, dass jede Reflexion einen Energieverlust bedeutet, so dass Signale, die mehrfach reflektiert wurden nur noch eine sehr geringe Leistung haben und somit vernachlässigt werden können. Ein Beispiel für Außenreflexionen ist in Abbildung 25 zu sehen. Die Reflexionen, die mit A bezeichnet sind, haben eine Umweglänge von ungefähr 40 m und die mit B gekennzeichneten Reflexionen von ungefähr 100 m. Sollte in solch einem Fall der direkte Pfad (Verzögerung 0 in Abbildung 25) stark gedämpft sein, so kann man sich leicht vorstellen, dass die Schätzung für die Entfernungsmessung zwischen Satellit und Nutzer um die Umweglänge falsch sein wird und somit die Positionslösung des Nutzers fehlerhaft. Eine genaue Navigation wird damit unmöglich.

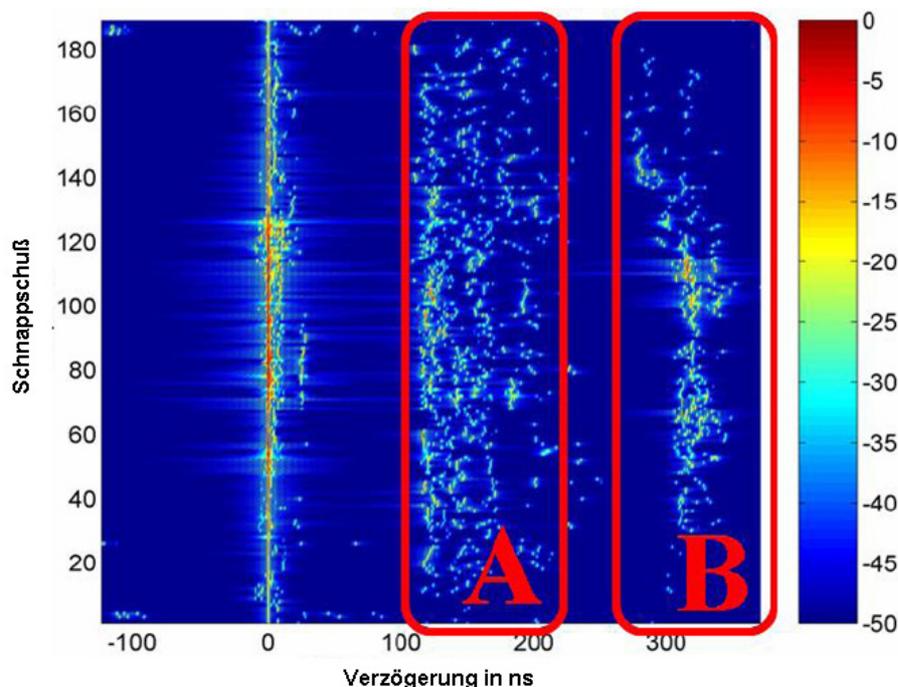


Abbildung 25: Gemessene Impulsantworten innerhalb eines Gebäudes mit einem Helikopter als Sendestation. Reflexionen A und B wurden als Außenreflexionen klassifiziert. Reflexionen A haben eine Umweglänge zwischen 33 bis 54m. Reflexionen B eine Umweglänge von ungefähr 100m [PSS04].

Auftrittswahrscheinlichkeit und statistische Parameter für solche Außenreflexionen sind bislang in der Literatur nur unvollständig zu finden, insbesondere deshalb, da für reine Kommunikationsaufgaben Umweglängen nebensächlich sind und diese nur in der Positionierung eine Rolle spielen.

2.8 Zusammenfassung der Nachteile und Einschränkungen von GNSS Systemen

Globale Navigationssysteme wie GPS oder GLONASS wurden ursprünglich für den Einsatz in offenem Gelände und für eine kontinuierliche Positionsermittlung konzipiert. Eine der bedeutendsten Einschränkung bei globalen Satelliten Navigationssystemen ergibt sich aus der Tatsache, dass man eine quasi-optische Sichtverbindung auf die Satelliten haben muss. Jede noch so kurze Abschattung der Signale verursacht also Probleme bei der Datenauswertung, da bei einem Empfang von weniger als vier verschiedenen Satellitensignalen die Positionsermittlung nicht möglich ist. Abschattungen treten vor allem in bergigen oder stark bewaldeten Gebieten und in urbanen Regionen auf.

Der GNSS Signalempfang innerhalb von Gebäuden wird hauptsächlich durch die Struktur des Gebäudes, wie Wände und Fenster bestimmt. Während Wände das Signal beinahe komplett abschatten, dämpfen Fenster das Signal nur geringfügig. Dadurch variiert die Signaldämpfung stark in Abhängigkeit zur Position des Nutzers und der Position des Satelliten. Gleichfalls wirken sich durch die zumeist hohe Abschwächung der direkten Sichtverbindung Reflexionen außerhalb des Gebäudes und Beugungseffekte an Fensterrahmen wesentlich mehr aus, als dies bei einem Empfang mit direkter Sichtverbindung der Fall wäre. Situationen mit Fehlern zwischen 5 m und 100 m können leicht vorkommen. Gleichfalls kann ein zufälliger Fehler durch die geringe Signalleistung in ähnlicher Größenordnung beobachtet werden.

Eine weitere Einschränkung ergibt sich aus dem niedrigen Energielevel mit der die Satellitensignale am Empfänger ankommen. Durch elektromagnetische Sender in der Umgebung des Anwenders kann es relativ leicht zu einer Überlagerung der Navigationssignale kommen, sodass eine Positionsermittlung nicht oder nur eingeschränkt möglich ist.

3. Nicht-GNSS basierte Systeme

3.1 Übersicht nicht-GNSS-basierter Sensoren und Systeme zur Fußgängernavigation

Es gibt eine Vielzahl von Möglichkeiten, die Positionierung von Fußgängern durch die Verwendung verschiedener Sensoren und Systeme zu unterstützen. Einige solcher Systeme sind als *stand alone* Systeme konzipiert, d.h. sie arbeiten autark und benötigen keine weiteren Sensoren wie GNSS-Empfänger. Die meisten dieser Verfahren benötigen jedoch eine mehr oder weniger aufwändig installierte Infrastruktur, zum Beispiel Funksender und Empfänger oder Funk- und Ultraschall-Baken. Ganz allgemein lässt sich sagen, dass mittlerweile dedizierte, autonom arbeitende Systeme am Markt sind, welche bei ausreichender Infrastrukturdichte eine hohe Positionsgenauigkeit (oft besser als 1 m) erreichen können. Für Anwendungen in eng begrenzten Gebieten ist dies eine gute Lösung. Möchte man jedoch der Vision der ubiquitären Fußgängerpositionierung näher kommen, so wird man wohl von der Installation solcher Systeme Abstand nehmen müssen, es sei denn, sie werden so kostengünstig in der Installation, dass sich weltweit (oder zumindest in großen Regionen, z.B. europaweit) ein System durchsetzt. Auch RFID-basierte Systeme oder solche auf Basis von Drucksensoren müssen installiert werden.

Eine besondere Rolle spielen mobilfunkbasierte Lösungen, da sie zwar eine Mobilfunkinfrastruktur benötigen, diese jedoch in sehr vielen Umgebungen vorhanden ist. Leider leidet auch die Mobilfunkortung innerhalb von Gebäuden unter hohen Genauigkeitseinbußen. Ferner existieren wichtige Anwendungsfelder bei denen nicht immer mit einer Mobilfunkinfrastruktur gerechnet werden kann – z.B. die Navigation von Hilfskräften im Katastrophenschutz oder bei vergleichbaren Einsätzen. Trotzdem sorgt die immer größer werdende Frequenz-Bandbreite von Mobilfunksignalen dafür, dass diese Systeme eine immer größere Rolle in der Fußgängerortung spielen werden.

Es existieren jedoch auch Sensoren in Ergänzung zu GNSS, speziell zur Unterstützung der Fußgängernavigation in Gebäuden. So ist beispielsweise ein barometrischer Höhenmesser eine wertvolle Ergänzung für die 3D-Positionierung. Inertialsensoren und Schrittzähler können speziell an die Bewegungsprofile des Menschen angepasst werden und bei dessen Bewegung die Positionsgenauigkeit von GNSS verbessern.

Schließlich muss betont werden, dass die Verwendung von qualitativ hochwertigen Karteninformationen (z.B. Gebäudeplänen) die Positionierungsgenauigkeit von Fußgängernavigationssystemen deutlich verbessern kann.

3.2 Ortung mittels Mobilfunk

Die Ausbreitung von Signalen im Mobilfunk wird sehr stark von den örtlichen Eigenschaften, d.h. insbesondere auch von der Position des mobilen Endgerätes (Mobilstation, MS) bestimmt. Es ist daher auch in Mobilfunksystemen möglich Ortsparameter aus einem empfangenen Signal zu schätzen. Ortsabhängige Messgrößen eines empfangenen Mobilfunksignals sind insbesondere

- Laufzeit
- Empfangsfeldstärke
- Ausbreitungsrichtung bzw. Einfallrichtung
- Kanalimpulsantwort (als Relation der empfangenen Echos zueinander)

3.2.1 Prinzipien

Die Messung von Signallaufzeiten gehört zu den wichtigsten Methoden zur Positionsbestimmung. Man unterscheidet dabei zwei wesentliche Ansätze. Zum einen ist dies die Messung der Signallaufzeit eines Mobilfunksignals von der Basisstation (BS) zur MS. Ein weiteres Prinzip beruht auf der Messung von Laufzeitdifferenzen zwischen zwei Signalen unterschiedlicher Basisstationen.

3.2.1.1 Time of Arrival

Time of Arrival (ToA) beruht auf der Messung der absoluten Signallaufzeit $t = t_i - t_0$ von der BS zur MS. Dazu muss sowohl der Sendezeitpunkt t_i an BS i als auch der Empfangszeitpunkt t_0 bekannt sein. Unter Kenntnis der Lichtgeschwindigkeit c lässt sich die Distanz $r = c \cdot t$ der MS zur BS ermitteln. Die Messung der Signallaufzeit zu einer BS bestimmt damit einen Kreis (2D) bzw. eine Kugel (3D) auf dem/der sich die MS befinden muss und dessen Mittelpunkt die BS darstellt. Mehrere ToA-Messungen liefern ein nichtlineares Gleichungssystem, dessen Lösung letztlich die eindeutige Bestimmung der Position der MS erlaubt. Abbildung 26 zeigt beispielhaft die Distanzmessung zu 3 Basisstationen in 2-dimensionaler Darstellung. Die Kreise mit den entsprechenden Radien schneiden sich in einem eindeutigen Punkt (x, y) , der die Position der MS darstellt. Das ToA-Verfahren setzt die Kenntnis der Zeitbasen in den BS und somit deren Differenz zu lokalen (MS) Zeitbasis voraus. Diese Information kann an der MS auf verschiedene Weise verfügbar gemacht werden:

1. Alle BS sind synchronisiert, d.h. verwenden dieselben Zeitbasen. Es muss daher an der MS nur die Differenz der Zeitbasen der BS und der MS ermittelt werden. Dies führt zu einer zusätzlichen unbekanntem im o.g. nichtlinearen Gleichungssystem. Für eine eindeutige Lösung ist dann die Hinzunahme einer weiteren Gleichung, d.h. einer zusätzlichen ToA-Messung zu einer weiteren BS, notwendig. Dieses Verfahren wird auch in Satellitennavigationssystemen (z.B. GPS) verwendet.
2. Die Zeitdifferenz zu einer Referenzzeit wird für jede BS gemessen und im Netzwerk übertragen. Die Messung dieser Zeitdifferenzen können mit *Local Measurement Units* (LMU) durchgeführt werden. Kennt die MS die Referenzzeit (z.B. die GPS-Zeit), so sind damit auch die Zeitbasen der BS bekannt.

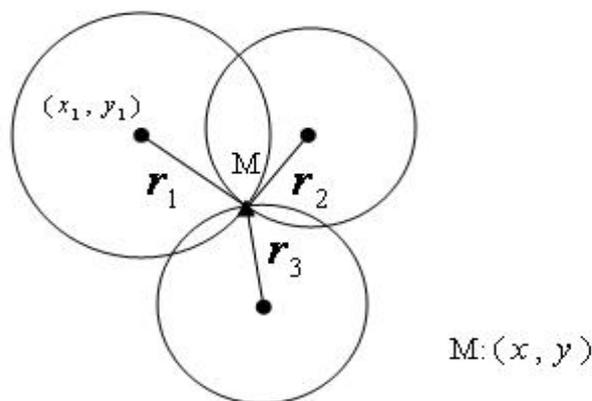


Abbildung 26: 2D Positionierung mit ToA [ADAPWiCom].

Die Schätzung der Empfangszeit eines Mobilfunksignals ist in Mobilfunksystemen inhärent zur Synchronisation von Abtastzeitpunkten notwendig. Dazu werden Korrelationsverfahren eingesetzt. Dies kann z.B. durch sog. *Delay Lock Loops* (DLL) (siehe z.B. [Caffery02]) implementiert werden. Die Anforderung an die Genauigkeit der Synchronisation hängt dabei stark vom verwendeten Übertragungsverfahren ab und ist z.T. weitaus geringer als für eine hinreichend genaue Positionierung erforderlich ist [SMD07].

3.2.1.2 Time Difference of Arrival

Anstelle der absoluten Signallaufzeiten von BS zu MS können auch die Laufzeitdifferenzen von Signalen zweier BS an der MS gemessen werden. Das *Time Difference of Arrival* (TDoA) Verfahren setzt keine synchronisierten Zeitbasen in BS und MS voraus. Laufzeitdifferenzen zwischen den Signalen zweier BS entsprechen damit einer Differenz der Distanzen der MS zu den beiden an der Messung beteiligten BS. Orte konstanter Abstandsdifferenzen bilden eine Hyperbel (2D) bzw. einen Hyperboloid (3D), deren/dessen Brennpunkte die Orte der BS sind. Wie beim ToA Verfahren bilden mehrere TDoA Messungen ein nichtlineares Gleichungssystem, dessen Lösung die Position der MS ergibt.

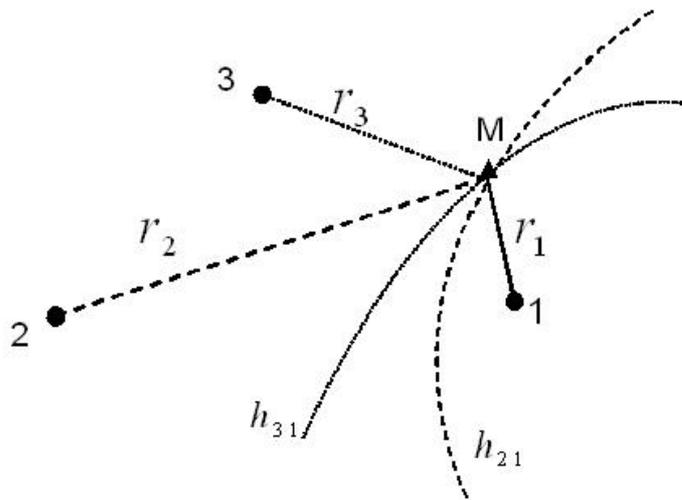


Abbildung 27: 2D Positionsmessung mit TDoA [ADAPWiCom].

Abbildung 27 verdeutlicht das TDoA Verfahren im zweidimensionalen Fall. Das mobile Endgerät (M) misst jeweils die Laufzeitdifferenzen der Signale zwischen den BS 3 und 1 bzw. 2 und 1. Dies ergibt Orte gleicher Abstandsdifferenzen, d.h. die Hyperbeln h_{31} und h_{21} , deren Schnittpunkt die Position des Mobilstation M darstellt. Die Messung der Laufzeitdifferenzen basiert auf Korrelationsverfahren und sind daher in derselben Weise wie beim ToA Verfahren implementierbar.

Verfahren, die auf Laufzeitmessung basieren setzen inhärent eine direkte Wellenausbreitung (*Line-of-Sight*, LOS) voraus. Mehrwegeausbreitung erhöht durch Signalumwege die gemessene Signallaufzeit und führt damit zu einer falschen Messung der örtlichen Distanzen (ToA) bzw. Distanzdifferenzen (TDoA). Da in Mobilfunk Szenarien hauptsächlich Mehrwegeausbreitung ohne direkte Sichtverbindung zu beobachten ist, sind Verfahren, die diesen Fehler reduzieren bzw. eliminieren für die Mobilfunkpositionierung von großem Interesse und Gegenstand derzeitiger Forschung.

3.2.1.3 Received Signal Strength

Ein weiteres bekanntes Verfahren ist *Received Signal Strength* (RSS). Die Grundidee besteht darin, die Empfangsleistung und damit die Dämpfung eines Mobilfunksignals zu messen. Die Signaldämpfung hängt von der Distanz der MS von der BS ab. Unter Kenntnis des mathematischen Zusammenhangs beider Größen, lässt sich somit aus der Signaldämpfung die Distanz BS \rightarrow MS ermitteln. Für viele Szenarien sind Ausbreitungsmodelle bekannt, die diesen Zusammenhang beschreiben. Prinzipiell wird beim RSS Verfahren die Distanz der MS zur BS gemessen. Die Positionierung geschieht damit analog zum ToA Verfahren durch mehrere Messungen und der Lösung eines nichtlinearen Gleichungssystems.

Die Genauigkeit des Modells bestimmt hierbei unmittelbar die Genauigkeit der Positionsbestimmung. Im Mobilfunk typische Effekte wie Mehrwegeausbreitung, Beugung, Streuung, etc., bestimmen die Signaldämpfung signifikant und verringern die Genauigkeit einer RSS basierten Positionierung. In [Son94] werden verschiedene Algorithmen zur Erhöhung der Genauigkeit vorgeschlagen. Die

Messung der Signaldämpfung setzt die Kenntnis der Sendeleistung voraus. Diese kann je nach Modulationsverfahren von den Daten abhängen. Zur Messung der Signaldämpfung eignen sich also insbesondere bekannte Signale, d.h. Pilotsymbole, -träger oder -sequenzen.

3.2.1.4 Cell-ID

Eine sehr einfache Möglichkeit der Ortung ist das *Cell Identification*-Verfahren (Cell-ID). Um Ortungsverfahren generell zu ermöglichen, müssen sich Empfangssignale eindeutig einer Basisstation zuordnen lassen. Dies kann beispielsweise durch die Verwendung verschiedener Frequenzen oder Spreizcodes mit der Struktur des Signals geschehen oder aber auch durch die Übertragung einer Identifikationsnummer als Bestandteil der Rahmendefinition (Rahmenstruktur) eines Mobilfunksignals. Die Grundidee besteht darin, ein Signal zu detektieren und dieses einer Basisstation zuzuordnen. Allein aus dieser Kenntnis lässt sich schließen, dass sich die MS im Empfangsbereich (Zelle) einer BS, d.h. innerhalb eines bestimmten Gebietes, befindet. Cell-ID ist in heutigen Mobilfunkstandards enthalten, z.B. im 3rd *Generation Partnership Project* (3GPP) für das *Universal Terrestrial Radio Access Network* (UTRAN) [3GPP123], [3GPP133], [3GPP215], and [3GPP225]. Mobilfunksysteme (z.B. *Global System for Mobile communications*, GSM und *Universal Mobile Telecommunications System*, UMTS) bestehen aus sog. Zellen um eine flächendeckende Versorgung großer Gebiete zu gewährleisten. Eine Mobilfunkzelle wird dabei von einer BS versorgt. Die Zellradien variieren dabei von 1 km bis 3 km in städtischen Gebieten bis hin zu 20 km in ländlichen Umgebungen.

Das Cell-ID Verfahren ist sehr einfach, jedoch in seiner Genauigkeit im Wesentlichen durch die Größe der Mobilfunkzelle bestimmt. Zur Erhöhung der Genauigkeit kann das Cell-ID Verfahren mit lauffzeitbasierten Verfahren verknüpft werden. Beispielsweise wird in [Bokows04] eine Kombination von Cell-ID und *Round Trip Time* (RTT) vorgeschlagen. Das in GSM verwendete Verfahren *Timing Advance* (TA) zur Synchronisierung der Uplink *Time Domain Multiple Access*-Rahmen (TDMA) der MS kann beispielsweise als RTT-Verfahren betrachtet werden. Viele Mobilfunkzellen sind in drei Gebiete sektoriert. Durch eine zusätzliche Identifikation des Zellsektors führt damit ebenfalls zur Erhöhung der Genauigkeit.

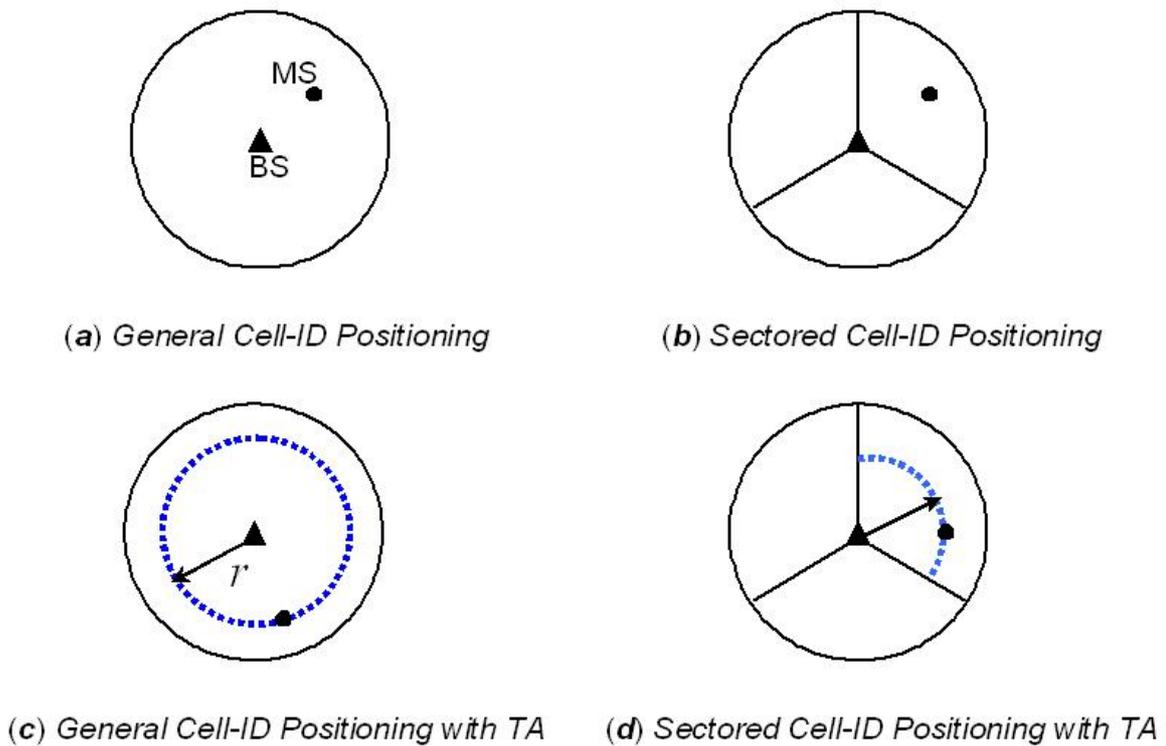


Abbildung 28: 2D Positionierung mit Cell-ID [ADAPWiCom].

Abbildung 28 verdeutlicht das Cell-ID Verfahren und dessen Kombination mit RTT bzw. Sektorisierung. (a) zeigt pures Cell-ID. Eine MS detektiert das Signal einer BS und schließt daraus, dass sie sich innerhalb des Zellgebiets der BS befindet. (b): Ist die Mobilfunkzelle sektorisiert und gelingt zusätzlich die Identifikation des Sektors, so kann die mögliche Position der MS weiter eingeschränkt werden. (c) benutzt die RTT (TA) als Maß für die Distanz $MS \rightarrow BS$ (ähnlich zu ToA und RSS). Die mögliche Position der MS reduziert sich somit auf einen Kreis innerhalb einer Mobilfunkzelle. (d) kombiniert Cell-ID, RTT und Sektorisierung. Die MS befindet sich somit auf einem Kreissektor in einer Mobilfunkzelle.

3.2.1.5 Angle of Arrival

Das *Angle of Arrival*-Verfahren (AoA) berechnet die Empfangsrichtung eines Mobilfunksignals. Die Mobilstation befindet sich somit auf einer Geraden, die durch die Position der BS und der Kenntnis des Einfallswinkels eindeutig bestimmt ist. Mehrere Messungen führen somit auf ein lineares Gleichungssystem durch dessen Lösung sich die Position von der MS M bestimmen lässt. Dieses Verfahren wird auch als Triangulation bezeichnet.

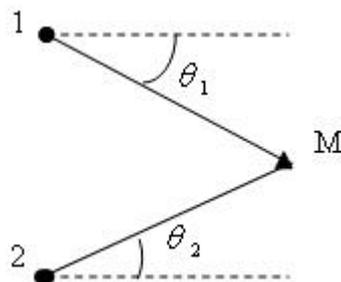


Abbildung 29: 2D Positionierung mit AoA [ADAPWiCom].

Abbildung 29 zeigt das AoA Prinzip. Durch die Bestimmung der Winkel θ_1 und θ_2 liegt die MS M sowohl auf der Geraden 1-M als auch auf 2-M. Der Schnittpunkt repräsentiert die Position der Mobilstation. Die Genauigkeit der Positionsschätzung hängt im Wesentlichen von der Schätzgenauigkeit der Empfangsrichtung ab. Zur Messung bzw. Schätzung der Empfangsrichtung können mehrere Empfangsantennen verwendet werden, die nach dem *Beamforming*-Prinzip einen richtungsabhängigen Empfang erlauben. Aus Platz- und Kostengründen ist die Verwendung mehrerer Antennen an mobilen Endgeräten häufig nicht möglich, so dass das AoA-Verfahren mit mehreren Antennen vorrangig für die Implementierung an der BS geeignet ist. Für die Schätzung der Empfangsrichtung können neben richtungsabhängigen Antennen aber auch richtungsabhängige Effekte wie der Doppler-Effekt ausgenutzt werden. Die Dopplerverschiebung des Empfangssignals hängt u.a. von der Empfangsrichtung ab und kann daher unter Kenntnis der Geschwindigkeit der MS zur Schätzung der Signalrichtung verwendet werden. Es ist sehr leicht nachvollziehbar, dass das AoA-Verfahren LOS Ausbreitungsbedingungen voraussetzt, da Mehrwegeausbreitung – insbesondere durch Reflexionen – die Ausbreitungsrichtung einzelner Pfade signifikant verändert.

3.2.1.6 Fingerprinting

In den letzten Jahren sind sog. *Fingerprinting*-Ansätze zur Positionierung zunehmend ins Interesse gerückt, speziell in *Wireless Local Area Networks* (WLANs) [Hilse00]. In solchen *Hot-Spot*-Szenarien sind meist nicht genügend BS empfangbar um mit laufzeitbasierten Messungen wie z.B. TDoA eine eindeutige Positionierung zu erzielen. In solchen Szenarien kann jedoch Mehrwegeausbreitung dadurch ausgenutzt werden, dass für jeden Empfangsort ein charakteristisches Parametermuster (z.B. die Kanalimpulsantwort) existiert.

Das Fingerprinting-Verfahren gliedert sich in zwei Phasen:

- Die *Offline*-Phase
Für das gegebene Gebiet werden passende ortsabhängige Parameter bestimmt, die eine eindeutige Identifikation eines Ortes im betrachteten Gebiet erlauben. Diese Parameter werden für jeden Ort (d.h. für ein mehr oder minder feinmaschiges Netz an Orten) gemessen und zusammen mit der Ortsinformation in einer Datenbank gespeichert. Da die ortsabhängigen Parameter im Allgemeinen sehr stark von der Umgebung abhängen, wirken sich Änderungen in der Umgebung unmittelbar auf die Fingerprints aus. Die Datenbank welche die Fingerprints mit dem jeweiligen Ort verknüpft muss deshalb aktuell gehalten werden.
- Die *Online*-Phase
Die MS misst einen Fingerprint (z.B. eine Kanalimpulsantwort) und überträgt diesen an die BS. An der BS wird der gemessene Fingerprint mit den in der o.g. Datenbank gespeicherten Fingerprints verglichen. Hierbei kommen Mustererkennungsalgorithmen zum Einsatz, welche aus der Datenbank den wahrscheinlichsten Fingerprint und somit auch die wahrscheinlichsten Ort ermitteln.

Ein entscheidender Schritt ist die Wahl der Parameter, deren Messwerte die ortscharakteristischen Fingerprints bilden. Solche Parameter können beispielsweise Amplitude (Leistung), Phase, Verzögerung, Richtung, Polarisation, Anzahl der Ausbreitungspfade, etc. sein. Je mehr Parameter verwendet werden und je stärker diese vom Ort abhängen, desto genauer kann der Ort bestimmt werden. Bereits die Verwendung der Empfangsleistung als Fingerprint liefert eine relativ hohe Genauigkeit [Kamol04] [Laitinen01]. In [Triki06] wird das Verzögerungs-Leistungsdichte-Profil verwendet.

Da Fingerprinting nicht auf eine zellulare BS Struktur angewiesen ist, lässt sich dieses Verfahren auch in isolierten Zellen (z.B. WLAN) anwenden. Probleme treten dabei in sich schnell verändernden Umgebungen auf, da die Aktualität der Fingerprint-Datenbank als wesentliches Element des Verfahrens von entscheidender Bedeutung für die erzielbare Genauigkeit ist.

3.2.1.7 Cooperative Positioning

Cooperative positioning, auch bekannt als *Distributed Positioning*, bezeichnet Verfahren, die die Position von Knotenpunkten in einem ad-hoc Netzwerk durch Unterstützung (Kooperation) von

benachbarten Knoten ermittelt. *Cooperative Positioning* wurde hauptsächlich im Zusammenhang mit *Wireless Sensor Networks* (WSN) untersucht.

Verschiedene Algorithmen (z.B. [BHE00], [Lar04], [SRB01]) wurden dazu in den letzten Jahren vorgeschlagen. In einem Verfahren nach [BHE00] sind einige regelmäßig verteilte Ankerknoten, deren Positionen (z.B. durch GPS) bekannt sind, gegeben. Diese Knoten senden ein Signal aus, das ihre Position enthält. Ein variabler Knoten in diesem Netzwerk bestimmt nun anhand einer Empfangsmetrik, zu welchen der fixen Ankerknoten eine Verbindung besteht, d.h. deren Signal insbesondere auch detektierbar ist. Der arithmetische Mittelwert der Positionen dieser empfangbaren Ankerknoten ist die geschätzte Position.

3.2.2 Ortung in existierenden Mobilfunkstandards

Auch in bereits operationellen Mobilfunksystemen sind bereits Verfahren zur Ortsbestimmung der MS vorgesehen. Diese basieren im Wesentlichen auf Messungen der Signallaufzeit oder Empfangsfeldstärke.

3.2.2.1 Global System for Mobile Communication

Im GSM-Standard des *European Telecommunications Standards Institute* (ETSI) sind folgende Positionierungstechniken verwendet [Zhao00]:

- *Cell Identification* (Cell-ID)
- *Enhance observed Time Difference* (E-OTD)
- A-GPS
- Netzwerkseitiges ToA (Uplink-ToA)

Cell-ID ist die grundlegendste und einfachste Positionierungsmethode in GSM. Das Verfahren wurde bereits in Abschnitt 3.2.1.4 vorgestellt.

E-OTD in GSM wurde vom GSM Standardisierungsgremium in LCS Release 98 und 99 festgeschrieben. Prinzipiell basiert dieses Verfahren auf TDoA, d.h. auf der Laufzeitmessung zwischen Signalen zweier Basisstationen an der MS wie in Abschnitt 3.2.1.2 erläutert. Die Synchronisationsdifferenz zwischen den beteiligten BS wird durch eine LMU gemessen und an die MS übertragen.

A-GPS (A-GNSS) ist ebenfalls in GSM standardisiert und wird in Abschnitt 2.5 erläutert.

Eine weitere Ortungsmethode in GSM ist netzwerkseitiges ToA, welches eigentlich ein hybrides ToA/TDoA Verfahren darstellt. Ein bekanntes Signal wird von der MS gesendet. In drei oder mehr LMUs wird eine ToA-Messung durchgeführt. Aus mindestens zwei ToA Messwertepaaren werden TDoAs berechnet, woraus durch hyperbolische Trilateration die Position der MS berechnet wird.

3.2.2.2 Universal Mobile Telecommunications System

UMTS definiert zwei Duplexmodes: *Frequency-Division Duplex* (FDD) und *Time-Division Duplex* (TDD). Die spezifizierten Ortungsstandards beziehen sich auf den weiter verbreiteten FDD Mode. Signalmessungen zur Ortung werden dabei am *User Equipment* (UE), der Basisstation (Node B), oder an einer *Location Measurement Unit* (LMU) vorgenommen. Das UMTS *User Equipment* entspricht dabei der aus GSM bekannten Mobilstation (MS) und der UMTS Begriff *Node B* findet seine Entsprechung in der von GSM bekannten Basisstation (BS).

Grundsätzlich werden zwei verschiedene Strategien zur Ortung in UMTS unterschieden:

- *UE-based*: Die Position des UE wird ausschließlich am UE selbst bestimmt.
- *UE-assisted*: Die Position des UE wird an der Basisstation (Node B) bestimmt.

UMTS unterstützt vier Positionierungsmethoden [ETSI06]:

- Cell-ID (siehe Abschnitt 3.2.1.4)

- *Observed TDoA* (OTDoA) mit *Idle Period Downlink* (IPDL)
- *Network-assisted* GNSS
- U-TDoA (äquivalent zu Uplink ToA in GSM, siehe Abschnitt 3.2.2.1)

Observed TDoA (OTDoA) ist prinzipiell ein TDoA-Verfahren. Im FDD Mode sind die Basisstationen nicht synchronisiert. Zur Messung der Synchronisationsdifferenzen kommen LMUs zum Einsatz, die die Synchronisationsdifferenzen messen und im Netzwerk zur Verfügung stellen. In UMTS existiert – bedingt durch das Vielfachzugriffsverfahren *Code Division Multiple Access* (CDMA) – das Problem, dass weiter entfernte Basisstationen nicht empfangen werden können, insbesondere wenn sich das UE sehr nahe an einer Basisstation befindet. Dieses Problem wird dadurch gelöst, dass benachbarte Basisstationen abwechselnd in einen *Idle-Mode* wechseln. Während der Idle-Zeit der nahen Basisstation können somit auch die entfernten Basisstationen empfangen werden. Dieses Verfahren wird als *Idle Period Downlink* (IPDL) bezeichnet.

3.3 Ortung mittels RFID-Technologie

3.3.1 Kurzeinführung RFID-Technik

Das Akronym RFID steht allgemein für *Radio Frequency Identification*. Bei dem damit im Allgemeinen verbundene Verfahren handelt es sich um die Übertragung einer (eindeutigen) Identifikationsnummer über eine Luftschnittstelle. Die zu überbrückende Distanz auf diesem Medium ist mit der Weiterentwicklung der Technik in den Jahren kontinuierlich gesteigert worden, so dass aktuell eine sehr große Spanne von Applikationen durch unterschiedliche Reichweiten abgedeckt wird. Neben dem eigentlichen physikalischen Verfahren der Datenübertragung gehören vornehmlich auch *Middleware* zur Verarbeitung der gelesenen Informationen sowie umfangreiche Server, Netzwerkschichten und Anwendungen zu einem kompletten RFID-System.

3.3.1.1 Technologie

Zu bei der RFID-Technologie eingesetzten Datenübermittlung per Kurzreichweitenfunk ist ein *Transponder* (i.Allg. als *Tag* bezeichnet) sowie ein Lesegerät notwendig. Dieses sendet ein elektromagnetisches Signal aus, welches vom Transponder aufgenommen wird. Dieser antwortet dann unmittelbar auf derselben Frequenz mit seiner im geschlossenen System eindeutigen Nummer (Identifikation), welche vom Lesegerät wieder empfangen werden muss.

Man unterscheidet passive, semi-aktive und aktive Tags. Letztere nutzen Batterien für die Datenübertragung und weitere internen Funktionen, bei den semi-aktiven wird nur die interne Signalverarbeitung von Batterien unterstützt. Die Energie für die Datenübertragung wird bei den semi-aktiven Tags – ebenso wie bei den passiven – ausschließlich aus dem Sendesignal des Lesegerätes gewonnen.

Wie jedes funkbasierte Verfahren unterliegt auch dieses einer abstandsabhängigen Abschwächung der Signale. Diese ist ohne spezielle Antennen meist kreisförmig und nimmt quadratisch mit der Entfernung ab. Ebenfalls durch Objekte und menschliche Körper können die Funkwellen weiter abgeschwächt werden, was die Reichweite zusätzlich reduziert. Zusätzlich sind die maximal zulässigen Sendeleistungen noch regulatorisch festgelegt. Unterschreitet am Transponder die Signalstärke einen bestimmten Pegel, so reicht entweder die gesendete Energie nicht mehr zum Rücksenden aus oder die gesendeten Befehle können gar nicht erst fehlerfrei ausgewertet werden. Dadurch schlägt die Kommunikation fehl und der Transponder ist in diesem Falle nicht sichtbar für das Lesegerät.

Die verwendeten Frequenzbereiche bewegen sich vornehmlich in den international standardisierten lizenzfreien *Industrial/Science/Medical*-Bändern (ISM), aber es gibt auch dedizierte Frequenzbänder für die Nutzung mit dieser Technik (125 kHz, 868 MHz).

Viele Systeme können neben der Übertragung der reinen ID auch zusätzlich weitere Daten auf dem Tag speichern und auf Anfrage an das Lesegerät übertragen. Dies können z.B. aufgezeichnete Temperaturdaten sein, aber auch Echtzeitdaten wie z.B. Empfangspegel oder Luftdruckwerte sind möglich.

Weitere umfangreiche Informationen zu Technologie und Bauformen finden sich in „Risiken und Chancen des Einsatzes von RFID-Systemen“ [BSI04] und dem „RFID-Handbuch“ von Klaus Finkenzeller [Fink06].

3.3.1.2 Reichweiten

Abhängig von der verwendeten Frequenz, den Antennen des Systems sowie Batterieunterstützung im Transponder können Reichweiten von wenigen cm bis zu 100 m erzielt werden.

Die einfachsten Tags bestehen aus Spulen, durch die über eine Lastmodulation des Senderfeldes (= Änderung der Impedanz durch das Datensignal) eine Datenfolge übertragen wird. Sie sind häufig im Scheckkartenformat vorhanden, haben aber nur eine geringe Reichweite von bis zu 10 cm. Durch die hohe Verbreitung dieser Systeme sind die Kosten für einzelne Tags quasi vernachlässigbar gegenüber den restlichen Systemkomponenten.

Die Distanzen, die man gerade noch mit passiven Tags überbrücken kann, liegen bei 8-10 m. Dazu müssen aber auf der Senderseite beispielsweise im Frequenzbereich von 868 MHz bereits unhandliche Richtantennen verwendet werden.

Im Allgemeinen steigt mit der Reichweite auch der Preis für die Transponder erheblich, da hierzu aufwändigere Elektronik (anderer Frequenzbereich), Gehäuse und Stromversorgung (Batterien) notwendig werden. Entfernungen von mehr als 20 m sind bei aktiven Tags im 868 MHz-Bereich z.B. schon mit einfachen Dipolantennen möglich, entsprechend mehr mit gerichteten Antennen.

3.3.1.3 Anwendungen

RFID-Systeme wurden zunächst vornehmlich zur Zugangskontrolle und Markierung von Pfandbehältern eingesetzt, wobei die Transponder sehr nah an einer Leseantenne vorbeigeführt werden müssen. Auch auf Messen, Fußballstadien und in öffentlichen Verkehrsmitteln sind bereits Ticketsysteme auf RFID-Basis im Einsatz (125 kHz und 13,56 MHz).

Ein großes Einsatzgebiet von RFID Technologie liegt in der Wareninventur und -verfolgung. Als Ersatz für Barcode-Lesegeräte ist hier der Vorteil einer lageunabhängigen und schnelleren Erfassung der Produkte hervorzuheben. Insbesondere große Handelsketten wie z.B. Metro [Metro] markieren und lokalisieren derzeit zumindest auf Palettenebene ihre Waren mit passiven Transpondern aus dem 868 MHz Bereich, die eine größere Reichweite und höhere Lesegeschwindigkeit haben als die zuerst genannten. Dazu sind in den Lagerräumen und Warenhäusern alle wichtigen Durchgänge mit speziellen Toren ausgestattet, an denen RFID-Lesegeräte montiert sind. Somit kann festgestellt werden, wann welche Palette z.B. auf einen LKW verladen wurde. Die Transponder können dabei in Form von Aufklebern direkt auf die Umverpackungen aufgeklebt werden. Zur Erfassung jedes einzelnen Produktes auf einer Palette gibt es zurzeit erst Prototypen, da hier insbesondere Probleme mit großen Signalabschwächungen und mit Vielfachzugriffen zu lösen sind.

Systeme mit aktiven Transpondern werden bei VW eingesetzt, um die geparkten Neuwagen schneller zur Auslieferung bereitstellen zu können. Es handelt sich dabei um *Long-Range* RFID-Systeme mit speziellen Antennen auf der Seite des Lesegerätes. Die batteriebetriebenen Transponder werden hinter den Innenspiegel gehängt und haben eine Lebensdauer von mehreren Jahren. Der starke Antennengewinn und die aktiven Transponder sind notwendig, um selbst bei beschichteten Frontscheiben eine Reichweite von über 20 m zu erreichen. Zusätzlich befinden sich in den Tags auch wiederbeschreibbare Speicher, um die abgearbeiteten Schritte bei der Auslieferung in der Autostadt Wolfsburg zu erfassen. Dieses System ist entsprechend teuer, liefert aber z.B. auch noch Werte über die Empfangsfeldstärke, wodurch sogar eine grobe Entfernungsangabe zum Tag möglich ist und damit eine gewisse Lokalisierung möglich ist.

Durch die große Anzahl an verschiedenen Systemen mit unterschiedlichsten Anwendungsbereichen ist es unmöglich, einen umfassenden Überblick zu geben. Vielmehr soll beispielhaft gezeigt werden, welche technologischen Einschränkungen generell zu beachten sind und welcher Aufwand notwendig ist, um eine gewünschte Genauigkeit in der Positionierung zu erreichen.

3.3.2 Lokalisierung mit RFID

Grundsätzlich wurde die RFID-Technologie nicht zum Orten bzw. Lokalisieren entworfen, sondern die Tags dienen rein einer berührungslosen, robusten Identifikation von Objekten. Der hohe Kostendruck für die elektronischen Labels in der Logistik (wenige Cent) erfordert eine sehr einfache Elektronik, die nicht auf Parameter wie Feldstärkemessung oder Laufzeitmessungen ausgelegt ist. Gerade diese Parameter sind aber für eine präzise Lokalisierung notwendig, wenn die Entfernung von Objekten zum Lesegerät bestimmt werden muss und sie innerhalb eines Raumes unterschieden werden sollen.

Mit steigendem Hardware- und Kostenaufwand sowohl auf Senderseite als auch am Transponder lassen sich jedoch diese fehlenden Funktionen schrittweise implementieren und für eine Lokalisierung nutzen. Der Übergang zu echten funkbasierten Positionierungssystemen auf der Basis von Laufzeitmessungen (Mikrowellenradar) ist dabei fast fließend.

Eine Lokalisierung muss immer in Abhängigkeit von der möglichen Transponderreichweite betrachtet werden. RFID-Tags, die nur wenige Zentimeter Reichweite haben (Chipkartensysteme, Werkzeugidentifikation), besitzen zwar keine signaltechnische Lokalisierungsmechanismen, können aber zum Zeitpunkt der Erfassung wenigstens mit einer Genauigkeit in der Größenordnung der Transponderreichweite lokalisiert werden, sofern der Standort des Lesegerätes bekannt ist. So kann z.B. in automatischen Sortieranlagen durch die fest montierten Lesegeräte eine genaue Aussage getroffen werden, in welchem Abschnitt einer Anlage sich ein bestimmtes Objekt gerade befindet. Sind außerdem Fördergeschwindigkeiten bekannt oder messbar, dann können auch Zwischenpositionen der Objekte berechnet werden. Hier handelt es sich aber nicht mehr um eine direkte RFID-Lokalisierung, sondern dem Zusammenspiel mehrerer Komponenten in einem Gesamtsystem – eine Kombination unterschiedlicher Sensoren zu einer Gesamtpositionsangabe.

Bei der eigentlichen Lokalisierung des Tags im oben genannten Fall spricht man von inhärenter Lokalisierung durch die Nähe zwischen Lesegerät und Tag in Zusammenhang mit der maximal möglichen Reichweite. Verwendet man dabei aber mobile RFID-Handlesegeräte wie z.B. in der Lagerhaltung, ist dessen Position innerhalb der Halle wiederum meistens nicht bekannt. Hier könnten aber andere Systeme wie z.B. WLAN-Positionierung [MM][Eka] den Standort des mobilen Lesegerätes im Rahmen ihrer Genauigkeit bestimmen, und somit kann ein Positionsbezug zum eigentlichen RFID-Objekt hergestellt werden.

Dreht man nun das System um (d.h. das Lesegerät ist mobil und die RFID-Tags werden in der Infrastruktur verbaut), dann kann man – vorausgesetzt die Positionen aller Tags sind bekannt und deren Dichte ist groß genug – eine unmittelbare Lokalisierung des Lesegerätes vornehmen. Dadurch, dass das Lesegerät nur einen oder wenige Tags in seiner Umgebung sieht, ist die inhärente Lokalisierung des Gerätes gegeben. Es handelt sich also auch hier nicht um eine direkte Lokalisierung der RFID-Tags sondern sie werden als feste Infrastruktur wie Baken genutzt. Eine entsprechende Installation von über 10.000 RFID Tags aus dem 125 kHz Bereich gibt es beim Container Terminal in Hamburg Altenwerder (CTA). Die Tags sind im Asphalt eingelassen und ermöglichen es den automatischen Transportfahrzeugen, selbständig ihre Position zu ermitteln, diese an die Zentrale zu übertragen und sich damit autonom auf vorgegebenen Pfaden auf dem Gelände zu bewegen und Transportaufträge zwischen Schiff und Lager auszuführen.

Die bisherigen Szenarien betreffen allgemein RFID Systeme im Bereich 125 kHz und 13,56 MHz. Betrachtet man die nächst höheren genutzten Frequenzen bei 868 MHz, so sind hier häufig passive RFID Systeme im Logistikmanagement angesiedelt. An definierten Durch- oder Übergängen sind gerichtete Antennen angebracht, die sämtliche markierte Objekte erfassen, welche durch die Tore bewegt werden [Metro]. Mit Durchgangsbreiten von ca. 3 m ist die Ungenauigkeit zum

Erfassungszeitpunkt also bereits im Bereich mehrerer Meter angelangt – eine exakte Lokalisierung innerhalb des Beobachtungsbereiches der Antennen ist derzeit nicht implementiert, da dies u.a. keinen Mehrwert für die Logistikkette bringt.

Technisch hat man es also immer noch mit inhärenter Lokalisierung beim Passieren vorbestimmter Bereiche zu tun. Damit ist zu einem bestimmten Zeitpunkt eine Position auf ca. 3 m genau bekannt. Eine weitere Verfolgung der Objekte ist innerhalb der geschlossenen Logistikkette aber nicht möglich und auch nicht notwendig. Hier wird nur eine Art Routenkontrolle durchgeführt, ob eine Palette letztendlich beim Empfänger ankommt und wo sie zuletzt registriert war.

Eine deutliche Ausweitung der Reichweiten passiver RFID-Systeme ist mit speziellen Richtantennen machbar. Mit sehr empfindlichen Empfängern wäre dann auch eine Detektion des zurückgesendeten Signals möglich. Die Positionsbestimmung wird dadurch jedoch nicht verbessert, sondern der Unsicherheitsbereich bezüglich der Entfernung eher noch vergrößert. Bedingt durch die Richtantenne kann aber immerhin eine Eingrenzung des Raumsektors erreicht werden, in dem sich der Transponder befindet.

Als nächste Steigerung der Reichweite können die aktiven RFID-Systeme bei 868 MHz betrachtet werden. Hier sind Entfernungen von 5 m bis über 50 m möglich – je nach verwendeten Antennen und Transpondertechnologie. IdentecSolutions bietet hier entsprechende Hardware an [IdSol], bei denen die Transponderkosten jedoch schon deutlich im zweistelligen Euro Bereich liegen. Dafür bietet die Empfängerhardware die Möglichkeit, auch Empfangsfeldstärken der von den RFID-Tags ausgesendeten Signale auszulesen. Da die aktiven Tags immer mit derselben Leistung ihr Signal ausstrahlen, lässt die Analyse der Empfangsfeldstärke einen gewissen Rückschluss auf den Abstand zwischen Empfänger und Transponder zu. Allerdings sind diese Werte mit Vorsicht zu genießen, denn innerhalb von Gebäuden schwanken die Messwerte bedingt durch starke Abschattungen und Mehrwegeausbreitungen erheblich. Mit speziellen Algorithmen und einer Anordnung, bei der die Tags ca. alle 3-5 m im Gebäude verteilt werden, sind hier Positionierungsgenauigkeiten des mobilen Senders/Empfängers von rund 2-3 m möglich [WSR+07]. Verwendet man das System im Freifeld außerhalb von Gebäuden, so sind bei einzelnen Tags Rückschlüsse aus der Feldstärke auf die Entfernung (kreisförmig um den Empfänger bei Verwendung der Standardantenne) im Genauigkeitsbereich von etwa 5 m möglich. Dies ist bedingt durch die nur beschränkte Auflösung der RSS-Werte (Empfangsfeldstärke) und eine gewisse Streuung um den Mittelwert.

Der nächst höhere Frequenzbereich bei 2,4 GHz wird bereits durch WLAN und Bluetooth so stark genutzt, dass es hier nur wenige RFID-Systeme gibt. Vorhandene Systeme erreichen bis zu 10 m Leseabstand, aber Informationen zu möglichen Positionierungsverfahren sind nicht bekannt.

Im letzten betrachteten Frequenzbereich bei 5,8 GHz gibt es noch nicht sehr viele technische Plattformen mit hohen Stückzahlen. Einige Systeme zur Mauterfassung sind bekannt. Diese dienen aber wiederum nicht der Lokalisierung, sondern nur der Erfassung der Fahrzeuge auf allen Spuren der Strasse. In diesem Frequenzbereich findet man aber auch ein aktives RFID-Baken-System, das ausschließlich für die Lokalisierung entwickelt wurde, und welches aufgrund seiner speziellen Entwicklung der Transponder eine entsprechend hohe Genauigkeit der Abstandsmessung erreicht [Voss03]. Bei diesen hohen Frequenzen und der speziell entwickelten Hardware ist es überhaupt erst möglich, Laufzeitmessungen zu mehreren Transpondern durchführen zu können und damit am Empfänger Triangulationsberechnungen zur Positionsbestimmung durchführen zu können. Dieses *Local Positioning Radar* (LPR) von Siemens erreicht Genauigkeiten im Bereich 10 cm auf Entfernungen von über 100 m mit typischerweise mehr als 10 referenzierten Transpondern. Bei Kombination einer entsprechend größeren Anzahl der aktiven Transponder, für die jeweils ein 230 V Anschluss benötigt wird, ist auch ein größerer Bereich bis zu 3 km möglich. Ein Nachteil ist, dass die mobile Basisstation, die ihre Position durch Aussenden der Signale an die Transponder selbst bestimmt, etwa 5 kg wiegt und idealerweise eine 230 V-Stromversorgung benötigt.

Insgesamt fällt auf, dass für dedizierte Lokalisierungssysteme auf RFID-Basis meistens Transponder an bekannten Positionen verbaut werden, und das Lesegerät aus diesen Bakeninformationen seine eigene Position berechnen kann. Die umgekehrte Methode (ein Transponder wird von mehreren fest installierten Lesegeräten getriggert und diese Informationen im Netzwerk weiterverarbeitet) ist in der

echten Positionierung eher selten anzutreffen (wohl aber in der oben beschriebenen Logistik-Lokalisierung), weil dies protokoll- und netzwerktechnisch aufwändiger ist.

Die Gültigkeit einer wie auch immer gearteten Positionsangabe ist außerdem immer nur während einer kurzen Zeitspanne gegeben. Um eine hohe Genauigkeit über die Zeit zu erhalten (Dynamik), muss einerseits eine entsprechende Wiederholungsgeschwindigkeit der Abfragen und außerdem eine hohe Dichte der Transponder vorliegen.

3.3.3 Zusammenfassung RFID

Nach Analyse der verfügbaren Techniken wird deutlich, dass eine unmittelbare Lokalisierung einzelner RFIDs nur im Nahbereich möglich ist. Bei größeren Entfernungen ab 1 m steigt der Aufwand deutlich und es ist immer der Einsatz mehrerer Sensoren und kombinierter Verfahren notwendig. Dabei spielt die sogenannte Middleware als verarbeitende Komponente nach den Sensoren eine entscheidende Rolle neben dem zusätzlichen Technikaufwand durch z.B. Netzwerkinfrastruktur oder Antennen. Ein optimiertes Zusammenspiel mehrerer zusätzlicher Sensoren kann die Mängel der nicht vorhandenen Laufzeitmessung zwischen Lesegerät und Transponder ausgleichen, um trotzdem eine Ortung zu ermöglichen.

Die erreichbaren Genauigkeiten liegen je nach Gesamtsystem bei bis zu wenigen Zentimetern, im Allgemeinen aber im Bereich um mehrere Meter. Eine komplette Abdeckung ganzer Hallen oder Betriebsgelände ist nur mit erheblichem Kostenaufwand zu erreichen – entweder durch hohe technische Spezialisierung der Sender/Transponder oder durch eine enorme Dichte der Kurzreichweiten RFID Transponder.

3.4 Trägheitsnavigation

Die Grundlage der Trägheitsnavigation bildet die Messung der auf ein Objekt einwirkenden dreidimensionalen Drehraten- und Beschleunigungsvektoren. Sind dazu die anfängliche Lage, die anfängliche Geschwindigkeit und die anfängliche Position bekannt, kann aus den Messungen mittels geeigneter Integrationsverfahren der zeitliche Verlauf der Position, der Geschwindigkeit und der Lage berechnet werden. Um die Messwerte aufnehmen zu können muss eine Plattform mit entsprechenden Drehraten- und Beschleunigungssensoren am oder im Objekt, z.B. in einem Flugzeug, angebracht werden. Ein entscheidendes Merkmal der trägheitsbasierten Navigation ist die Möglichkeit, dass unabhängig von außen her einwirkenden Einflüssen die relevanten Größen Position, Geschwindigkeit und Lage bestimmen werden können. Trägheitsnavigationssysteme- und Plattformen haben seit den 60er Jahren vor allem getrieben durch die Entwicklung im militärischen Bereich mehr und mehr den Weg in eine Vielzahl von Anwendungen gefunden und sind heute in Fahrzeugen, Schiffen, Flugzeugen und Flugkörpern zu finden.

3.4.1 Plattform- und Sensor-Technologie

Eine konventionelle Trägheitsplattform besteht aus drei Beschleunigungssensoren und drei Drehratensensoren, deren sensitive Achsen jeweils zueinander orthogonal angeordnet sind, um sowohl den dreidimensionalen Beschleunigungsvektor und den dreidimensionalen Drehratenvektor erfassen zu können. Zu Beginn der technologischen Entwicklung von Sensor- und Plattformtechnologie waren die Plattformen in Kardanrahmen gelagert, welche die Plattform ausgerichtet zum verwendeten Navigationskoordinatensystem hielten. Der Fortschritt bei der Digitalrechenstechnik bei der Technologie der Drehratensensoren dazu geführt, dass heutzutage die Plattformen in den meisten Anwendungen fest montiert werden und das Ausrichten der Plattform virtuell im Digitalrechner erfolgt. Der Vorteil bei der fest montierten Plattform ist der Wegfall der mechanisch aufwendigen Lagerung, wodurch sich der Preis der Gesamtplattform deutlich verringert. Das Prinzip der Kardanrahmen-gelagerten Plattform und der fest montierten Plattform ist in Abbildung 30 illustriert.

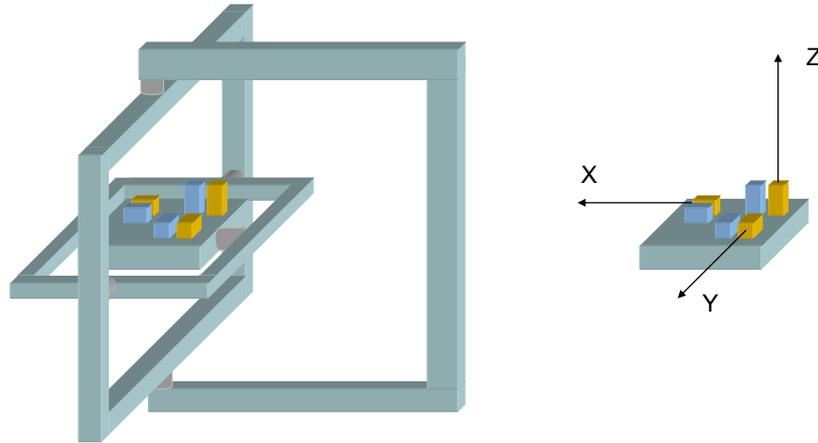


Abbildung 30: Kardanrahmengelagerte Plattform (links) und fest montierte Plattform (rechts) [ADAP61].

Die Entwicklung möglicher Anwendungen war und ist maßgeblich durch die verfügbare Sensortechnologie und deren Leistungsfähigkeit bestimmt. Zu Beginn der technologischen Entwicklung von Sensor- und Plattformtechnologie waren Drehratensensoren und Beschleunigungsmesser mechanisch ausgeführt. Als Drehratensensoren kamen vornehmlich Kreiselgeräte zum Einsatz. Im mechanischen Kreisel wird ein rotierendes Schwungrad, der sogenannte Läufer, angetrieben. Dieser wird bei einer Rotation der Plattform entsprechend dem Erhaltungssatz des Drehimpulses ausgelenkt, wodurch sich die einwirkende Drehrate bestimmen lässt [Fab80][TitWes04]. Beschleunigungssensoren basieren im Allgemeinen auf dem Masse-Feder-Prinzip, d.h. die Auslenkung einer Prüfmasse dient zur Bestimmung der einwirkenden Beschleunigung. [TitWes04]. Auch heute noch finden sich mechanische Sensoren im Bereich der hochpräzisen Anwendungen. [NATO04]. Ein wesentlicher Fortschritt bei der Technologie der Drehratensensoren war die Entwicklung der optischen Kreisel. Bei dieser Art von Drehratensensoren wird basierend auf dem Sagnac-Effekt [TitWes04] mit Hilfe zweier entgegengesetzt im Kreis laufender Laserstrahlen die Drehrate anhand eines Interferenzmusters optisch erfasst. Es existieren dort im Wesentlichen zwei Familien, zum einen die Ring-Laser-Kreisel und die weniger genauen faseroptischen Kreisel. Ein weiterer großer Fortschritt in der inertialen Sensortechnologie war die Etablierung der Mikro-Elektro-Mechanische Systeme (MEMS), welche die Integration von Inertialsensoren auf Mikrochip-Ebene erlauben [TitWes04]. Die Miniaturisierung öffnet ein weites Anwendungsgebiet für den Einsatz von Inertialsensorik, insbesondere in Bereichen in denen die Verwendung bisher aufgrund der Größe, dem Stromverbrauch und den Kosten der konventionellen Inertialsensorik nicht möglich war. Die Leistungsfähigkeit der MEMS-Sensoren liegt heute um wenige Größenordnungen unter der der konventionellen Sensorik, wobei die Sensorkosten aufgrund hoher Stückzahlen getrieben durch den Automobilmarkt, deutlich niedriger sind (siehe Abbildung 31 und Tabelle 8)

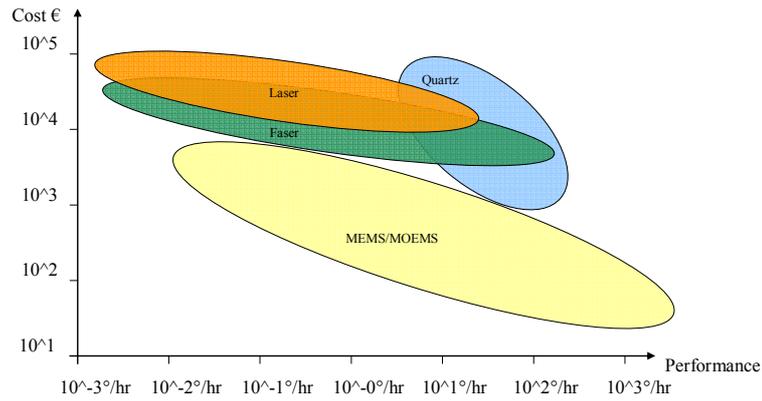


Abbildung 31: Sensortechnologie, Kosten und Leistungsfähigkeit [ADAP61].

IMU Class	Gyroscope				Accelerometer			
	Bias	North error after 1 hour	North error after 1 minute	North error after 1 sec.	Bias	North error max.	North error after 1 min.	North error after 1 second
1	0.00001 °/h	1,35 m	< 1 mm	< 1 mm				
2	0.0001 °/h	13,5 m	< 1 mm	< 1 mm	0,1 µg	1,27 m	1,7mm	< 1 mm
3	0.001 °/h	135 m	1,7 mm	< 1 mm	1 µg	12,7 m	1,7 cm	< 1 mm
4	0.01 °/h	1,35 km	1,7 cm	< 1 mm	10 µg	127 m	17 cm	< 1 mm
5	0.1 °/h	13,5 km	17 cm	< 1 mm	100 µg	1,27 km	1,7 m	< 1 mm
6	1 °/h	135 km	1,7 m	< 1 mm	1 mg	12,7 km	17 m	5 mm
7	10 °/h	1350 km	17 m	< 1 mm	10 mg	127 km	170 m	5 cm
8	100 °/h	13500 km	170 m	< 1 mm	100 mg	1270 km	1,7 km	50 cm
	Mechanical	RLG	IFOG	MEMS	Mechanical	Quartz/Silicon/MEMS		

Tabelle 8: Positionsfehler durch systematische Sensorfehler [ADAP61].

Drift und Einfluss systematischer Sensorfehler:

Die Nichtidealitäten der Sensoren bewirken eine Verschlechterung der Positionsgenauigkeit über die Zeit. Dieser Effekt wird als Drift bezeichnet, wobei die Stärke der Drift von der Genauigkeit der Sensoren abhängt. Wird die Drift durch systematische Fehler in den Eingang-Ausgangs-Kennlinien der Sensoren verursacht, kann der zeitliche Verlauf des Fehlers approximativ berechnet werden. Im Folgenden sind die Berechnungsformeln für den Fehler in Nordrichtung jeweils für einen Bias im Drehratensensor und im Beschleunigungssensor angegeben:

Drehraten-Bias (Ost-Achse)

Langzeit	Kurzzeit
$\delta x_N = R_0 \left(t - \frac{\sin \omega_s t}{\omega_s} \right) \delta B_{gE}$	$\delta x_N = g \frac{t^3}{6} \delta B_{gE}$

Mit dem Erdradius R_0 , der Schuler-Kreisfrequenz ω_s und der Schulerperiode T_s :

$$\omega_s = \sqrt{\frac{g}{R_0}}, \quad T_s = \frac{2\pi}{\omega_s} \approx 84,4 \text{ min}$$

Beschleunigungs-Bias (Nord-Achse)

Langzeit	Kurzzeit
$\delta x_N = \left(\frac{1 - \cos \omega_s t}{\omega_s^2} \right) \delta B_{aN}$	$\delta x_N = \frac{t^2}{2} \delta B_{aN}$

Der durch den Beschleunigungs-Bias verursachte Fehler ist begrenzt durch

$$\delta x_{N,\max} = \frac{2}{\omega_s^2} \delta B_{aN}$$

3.4.2 Berechnungsverfahren

Bei der Navigation mit Inertialsensoren müssen die Vektorgrößen jeweils in verschiedene Koordinatensysteme umgerechnet werden. Diese Koordinatensysteme sind

- Inertialkoordinaten, fest im Bezug auf die Fixsterne
- Erdkoordinaten, fest in Bezug zur Erde und bezogen auf den Greenwich-Null-Meridian
- Navigationskoordinaten, lokal eben zur Erdoberfläche, Ausrichtung Nord-Ost-Vertikal
- Körperkoordinaten, fest im Bezug zum Körper des Objekts

Die verschiedenen Koordinatensysteme sind in Abbildung 32 und Abbildung 33 veranschaulicht. Charakteristisch ist jeweils die Rotation der verschiedenen Koordinatensysteme gegeneinander, die einerseits durch die Rotation der Erde und andererseits durch Lage- und Positionsänderung des Objektes verursacht wird. Das Erdkoordinatensystem rotiert aufgrund der Erddrehung mit der festen Winkelgeschwindigkeit von 360° pro 24 h um die Polachse/Z-Achse gegenüber dem Inertialkoordinatensystem. Das Navigationskoordinatensystem wiederum muss bei der Bewegung des Objektes über die Erde abhängig von der Position entsprechend gegenüber dem Erdkoordinatensystem gedreht werden, so dass das Navigationskoordinatensystem lokal tangential an der Erdoberfläche anliegend und in Nordrichtung zeigend gehalten wird. Schließlich ist noch entsprechend der Lage des Objektes das Körperkoordinatensystem gegenüber dem Navigationskoordinatensystem gedreht.

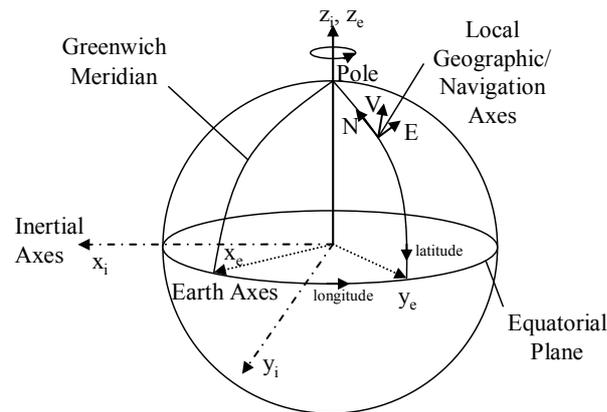


Abbildung 32: Referenz-Koordinatensysteme [AD3222].

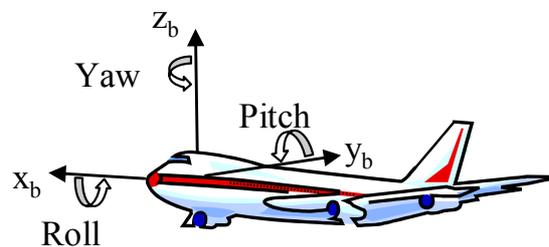


Abbildung 33: Körperkoordinaten und Drehachsen [AD3222].

Neben der gegenseitigen Lage und Rotation der Koordinatensysteme zueinander muss bei der Navigation mit Inertialsensoren der Einfluss der Gewichtskraft kompensiert werden, die von den Beschleunigungssensoren nicht von der durch die Bewegung des Objektes verursachten dynamischen Beschleunigung separiert werden kann. Weiterhin wirkt bei der Bewegung auf der Erde, da das Erdkoordinatensystem rotiert, die Coriolis-Kraft, welche ebenso wie die Gewichtskraft kompensiert werden muss. All dies geschieht bei einem Inertialnavigationssystem im Navigationscomputer. In Abbildung 34 ist das Prinzip eines Navigationscomputer dargestellt, dessen Teile im Folgenden näher erläutert werden sollen:

1. Lagecomputer: Zur Berechnung der Lage benötigt man neben den von den Drehratensensoren gemessenen Winkelgeschwindigkeiten eine Initillage, die beim Ausrichten der Plattform bestimmt wird. (Details hierzu finden sich z.B. in [TitWes04] oder [KayFr97]). Die Initillage dient als Startwert bei der numerischen Integration der Drehraten zu den Lagewinkeln. Die rohen Sensorwerte werden dabei in der Regel vorkompensiert, wodurch im Voraus bekannte Nichtidealitäten der Sensoren wie Temperaturabhängigkeiten oder Kreuzkopplungen beseitigt werden können.
2. Mit Hilfe der Lagewinkel können die von den Beschleunigungssensoren gemessenen Werte in das Navigationskoordinatensystem aufgelöst werden. Dabei werden die rohen Sensorwerte wie bei den Drehratensensoren in der Regel vorkompensiert. Die Beschleunigungswerte werden nach der Auflösung in das Navigationskoordinatensystem mit der Gewichtskraft und der Coriolis-Kraft kompensiert, so dass man die rein dynamisch bedingte Beschleunigung erhält.
3. Navigationscomputer: Der Navigationscomputer integriert ausgehend von Startwerten für Position und Geschwindigkeit die Beschleunigungswerte numerisch auf, so dass man nach einmaliger Integration die Geschwindigkeit und nach weiterer Integration die Position erhält.

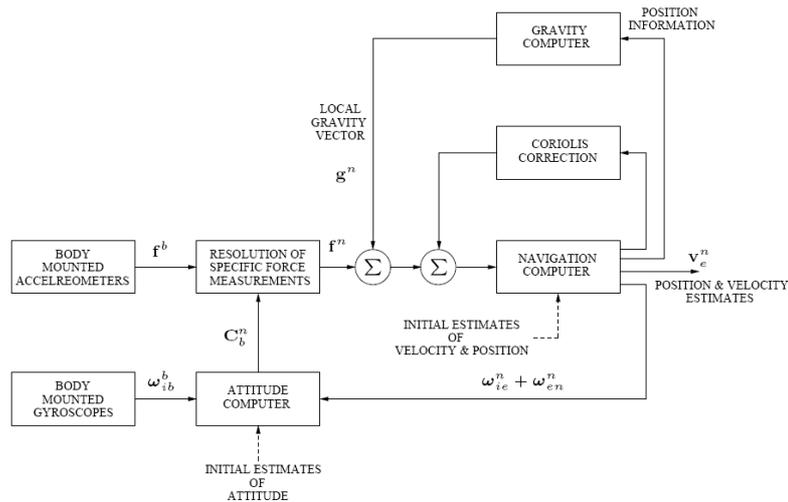


Abbildung 34: Prinzip des Navigationscomputers [AD3222].

Inertiale Navigationsgleichung:

Ein inertialer Navigationscomputer implementiert die numerische Lösung einer Vektor-Differentialgleichung [TitWes04]. Diese lautet

$$\frac{dv_e^n}{dt} = C_b^n f^b - [2\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n] \times v_e^n + g_l^n$$

wobei

- v_e^n Geschwindigkeit des Objekts gegenüber der Erde
- f^b Gemessene Beschleunigungswerte
- C_b^n Rotationsmatrix von Körper- zu Navigationskoordinaten
- ω_{ie}^n Drehrate der Erde in Bezug zum Inertialraum
- ω_{en}^n Drehrate des Navigationskoordinatensystems in Bezug zur Erde
- g_l^n Lokale Erdbeschleunigung

Die Superskripte geben dabei das Koordinatensystem an in Bezug auf welches die Vektoren definiert sind (Körperkoordinaten b , Navigationskoordinaten n). Die Rotationsmatrix C_b^n , die auch die Lage bestimmt, folgt der Differentialgleichung

$$\frac{d}{dt} C_b^n = C_b^n \Omega_{nb}^b$$

mit der schiefsymmetrischen Form Ω_{nb}^b von ω_{nb}^b

$$\Omega_{nb}^b : \quad \omega_{nb}^b = \omega_{ib}^b - C_n^b [\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n]$$

die aus dem von den Drehratensensoren gemessenen Vektor ω_{ib}^b bestimmt wird.

3.4.3 Drift von Trägheitsnavigationssystemen

Die Positionsgenauigkeit von Trägheitsplattformen verschlechtert sich im Allgemeinen mit der Zeit. Der Grad der Verschlechterung hängt dabei von der Güte der verwendeten Sensoren ab (vgl. Tabelle 8). Insgesamt liegen der Abnahme der Genauigkeit hauptsächlich die folgenden Ursachen zu Grunde:

- Nichtidealitäten der Sensoren: Sensor-Biase, Skalierungsfehler in den Sensorkennlinien, Nichtlinearitäten, Fehlausrichtungen und Kreuzkopplungen durch Montage, Temperatursensitivität und statistisches Rauschen. Während der Einfluss der systematischen Fehler, der Biase, exakt analysiert werden kann (vgl. Tabelle 8), führt das Rauschen der Sensoren nach der Integration zu einem *Random-Walk*-Verhalten, das nur statistisch beschrieben werden kann.
- Fehler bei der Ausrichtung der Plattform, die wiederum auch von den Nichtidealitäten der Sensoren beeinflusst werden.
- Fehler durch die numerische Integration
- Fehler im Erdmodell

Durch die Drift erhöht sich die Varianz der Positionsschätzung entsprechend mit der Zeit. Da das Driftverhalten einer Trägheitsplattform wie auch das inertielle Navigationsproblem einer Vektor-Differentialgleichung genügt [TitWes04], kann über ein linearisiertes Modell die Kovarianzmatrix der inertialen Zustandgrößen Position, Geschwindigkeit und Lage bestimmt werden. In Abbildung 35 ist dies beispielhaft für die Positionsschätzung eines Flugzeugs illustriert.

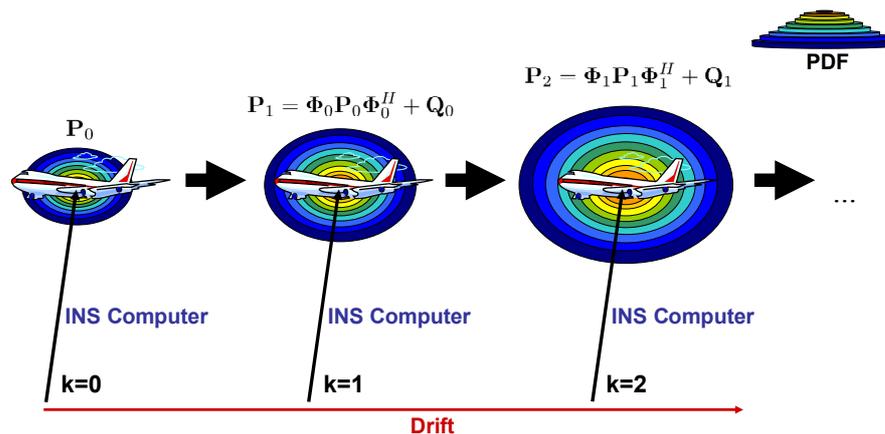


Abbildung 35: Drift eines Trägheitsnavigationssystems [AD3222].

3.4.4 Integration von Trägheitsnavigationssystemen mit anderen Sensoren

In der Regel ist die erzielbare Performanz bei alleiniger Verwendung von Trägheitsnavigationssystemen für viele Anwendungen im Rahmen der Kosten und Möglichkeiten unzureichend, so dass Trägheitsplattformen sehr oft in Kombination mit anderen Navigationssensoren und -systemen betrieben werden. In diesen kombinierten Navigationssystemen ergänzen sich die Eigenschaften der einzelnen Subsysteme synergetisch, d.h. das Gesamtsystem behält alle positiven Eigenschaften der Subsysteme. Sehr weit verbreitet ist die Fusion von Trägheitsnavigationssystemen mit der Satellitennavigation (INS/GNSS). Durch die gegenteiligen Eigenschaften der kurzzeitstabilen Trägheitsnavigation und der langzeitstabilen Satellitennavigationssysteme ist die Synergie in einem derartigen System besonders hoch. Das fusionierte INS/GNSS Gesamtsystem ist aufgrund der komplementären Eigenschaften der Subsysteme sowohl kurz- als auch langzeitstabil.

Realisiert wird die Integration mit einem Bayesschen Filter, wobei das Kalman-Filter und seine Varianten aus Komplexitäts- und Effizienzgründen dabei am weitesten verbreitet sind. Beim Standard-

Integrationsansatz wird das Bayessche Filter als indirekter rückgekoppelter Schätzer betrieben, d.h. das Inertialsystem dient als Referenznavigationssystem, dessen Fehler mit Hilfe der Stützsensoren, z.B. GNSS, geschätzt und kalibriert werden (siehe Abschnitt 2.1).

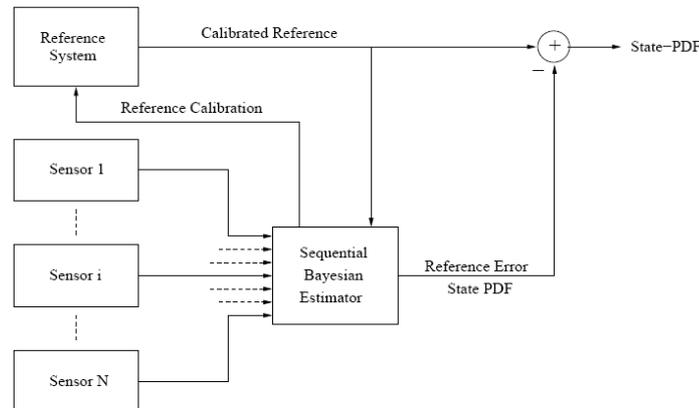


Abbildung 36: Integration verschiedener Sensoren mit einer Trägheitsplattform als Referenznavigationssystem [AD3222].

In Abbildung 37 ist diese Art der Fusion am Beispiel der Integration von Trägheitsnavigation und GNSS anhand der Positionsbestimmung bei einem Flugzeug illustriert. Zur Implementierung des illustrierten Konzeptes kann z.B. ein Kalman-Filter zum Einsatz kommen.

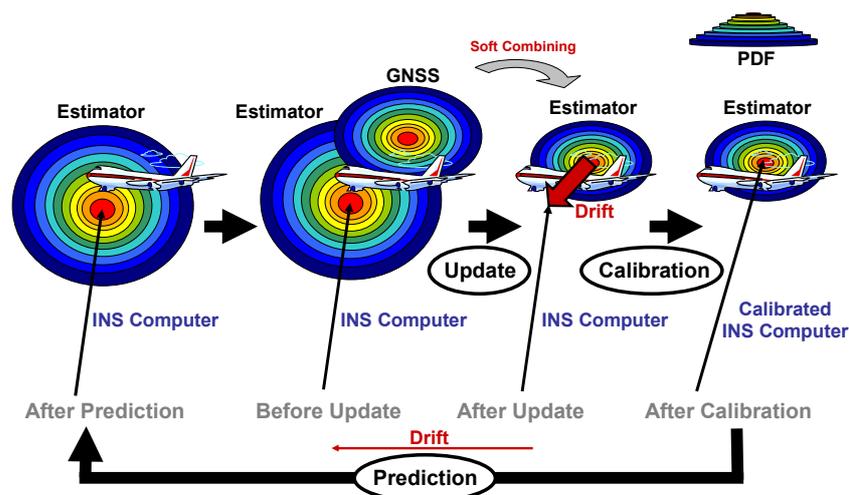


Abbildung 37: Integration von INS/GNSS [AD3222].

3.4.5 Spezielle Anwendung für Fußgänger

Wird eine Trägheitsplattform zur Positionsbestimmung bei Fußgängern eingesetzt, ergibt sich bei der Montage am Fuß eine besondere Möglichkeit, den Drift-Effekt zu kompensieren. Da sich der menschliche Fuß beim Gehen in jedem Schritt stets für einen gewissen Prozentsatz in Ruhe befindet (Abbildung 38), kann diese A-priori-Information über die Fußbewegung genutzt werden, um die Drift zu reduzieren.

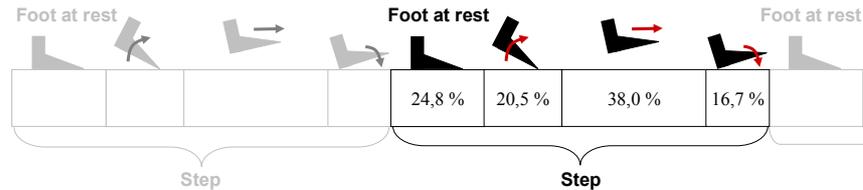


Abbildung 38: Fuß und Phasen während des Gehens [AD3222].

Hierzu wird eine Architektur gemäß Abbildung 36 benutzt [Fox05][God06]. Als Stützsensordient die Information über den Zustand des Fußes. Der Zustand des Fußes kann dabei leicht aus den Signaturen der Beschleunigungs- und Drehratensensoren ermittelt werden, die bei der Fußmontage der Plattform einen charakteristischen Verlauf entsprechend Abbildung 39 haben. Wird eine Ruhephase detektiert, so wird eine sogenannte Pseudomessung ausgelöst, die dem Bayesschen Filter mitteilt, dass die Momentan-Geschwindigkeit der Plattform gleich Null ist. Über die Kovarianz von Geschwindigkeit und Position wird im Filter auch auf die Positionsdrift zurückgeschlossen werden, so dass die Positionsschätzung des Inertialsystems mit Hilfe der Pseudomessung analog zu Abbildung 37 kalibriert werden kann. Die Pseudomessung lässt sich dabei als Messwert eines abstrakten „Null-Geschwindigkeit“-detektierenden Sensors interpretieren.

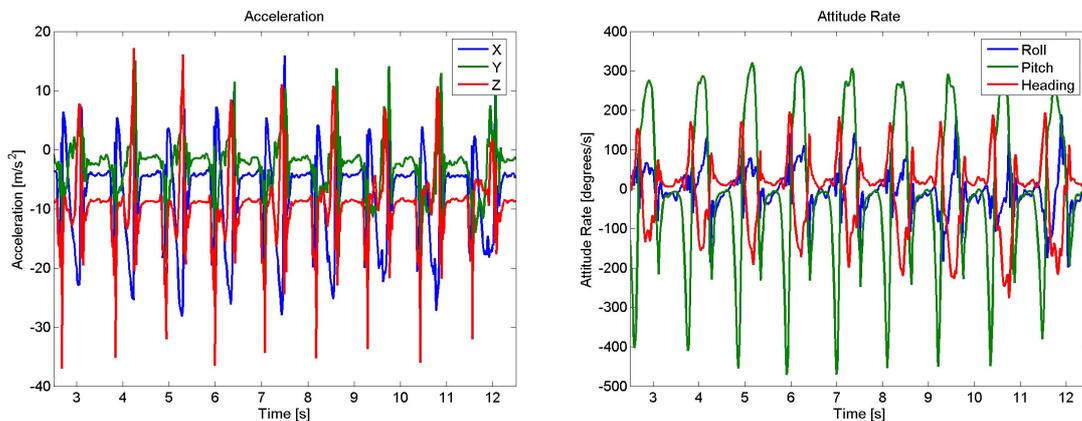


Abbildung 39: Beim Gehen einer Person aufgezeichnete Beschleunigungen (links) und Drehraten (rechts) einer am Fuß montierten Trägheitsplattform [ADAP61].

Durch diese Methode kann beim Fußgänger bereits mit Inertialsensoren von vergleichsweise geringer Leistungsfähigkeit, z.B. den heute am Massenmarkt verfügbaren MEMS, eine relativ hohe Genauigkeit in der Relativpositionierung erreicht werden. Die Drift des Systems wird durch das Einbeziehen der Pseudomessungen linear, im Gegensatz zur Drift im freilaufenden System, die quadratisch bzw. kubisch mit der Zeit ansteigt. Der sich linear akkumulierende Positionsfehler kann dabei in der Größenordnung von nur bis zu 1% der zurückgelegten Wegstrecke liegen [Fox05]. In Abbildung 40 ist der mit der beschriebenen Methode rekonstruierte Weg einer Person in einem Gebäude gezeigt.

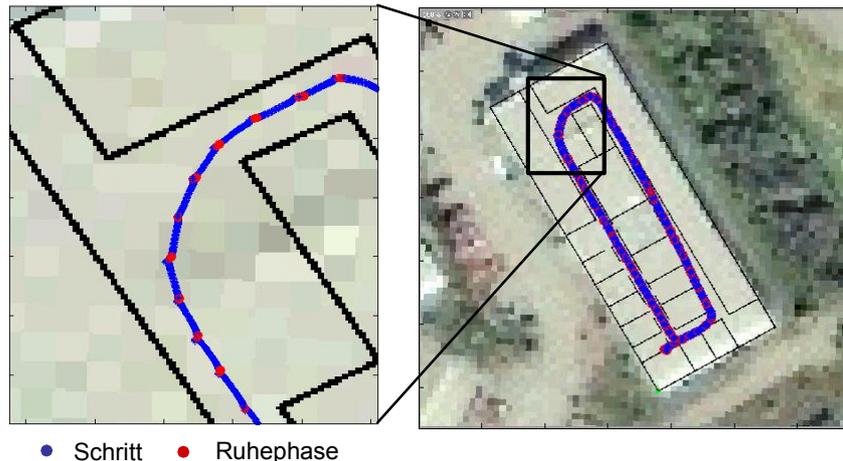


Abbildung 40: Aus den Beschleunigungen und Drehraten einer am Fuß montierten Trägheitsplattform berechnete Bewegung einer Person [ADAP61].

3.5 Barometrische Sensoren

Barometrische Sensoren können als Altimeter zur langzeitstabilen Höhenbestimmung dienen. Das Baro-Altimeter beruht auf der Messung des Luftdrucks, der mit dem allgemein bekannten Zusammenhang zwischen Luftdruck und Höhe in einen Höhenwert umgerechnet werden kann. Zwar ist eine absolute Bestimmung der Höhe ohne die Initialisierung der Anfangshöhe durch weitere Hilfsmittel nicht möglich, jedoch ist die barometrische Abweichung in Bezug zur absoluten Höhe sehr stark örtlich und zeitlich korreliert, so dass ein Baro-Altimeter als zuverlässiger und genauer Höhensensor verwendet werden kann. Die Genauigkeit liegt dabei je nach Sensorgüte im Bereich von bis zu 1 m, so dass beispielsweise für einen Fußgänger der Wechsel des Stockwerks in einem Gebäude gut mit Hilfe eines Baro-Altimeters erkannt werden kann. Entsprechende Luftdruck-Sensoren sind miniaturisiert und zu geringen Kosten verfügbar. Baro-Altimeter sind in einer Vielzahl von Anwendungen zu finden, so z.B. zur Navigation in Flugzeugen, beim Fallschirmspringen und als Höhenmesser in Sport und Freizeit, beispielsweise beim Radfahren, Wandern und Bergsteigen.

3.6 Magnetometer

Magnetometer und insbesondere der klassische Kompass haben als Richtungssensoren eine lange Historie. Mit Hilfe des Erdmagnetfelds lässt sich mit den magnetischen Sensoren die magnetische Nordrichtung absolut bestimmen. Ein Nachteil der Richtungsbestimmung mit magnetisch sensitiven Sensoren ist die Störanfälligkeit gegen äußere dem Erdmagnetfeld überlagerte Störfelder. Insbesondere in Gebäuden können die magnetischen Störfelder besonders stark sein. Eine besondere Schwierigkeit ist dabei, dass sich die Störgrößen in ihrer zeitlichen und örtlichen Korrelation nur recht schwierig und damit oft unzureichend modellieren lassen. Zwar lassen sich die Magnetometer für die jeweilige charakteristische Montageumgebung, in der Sie dann eingebettet bleiben, kalibrieren, jedoch hilft diese Art der Kalibration nicht gegen die Störfelder, die von der sich wechselnden Umgebung ausgehen. In Abbildung 41 ist das Problem der Anfälligkeit gegenüber Störfeldern anhand eines in einer Büroumgebung aufgezeichneten Magnetometer-Signals als Histogramm dargestellt. Die erfasste Komponente des Erdmagnetfelds wird im Beispiel signifikant von umgebungsbedingten zeitveränderlichen Störfeldern überlagert. In der praktischen Anwendung können solche Störfelder zu großen Fehlern in der Richtungsschätzung führen, die auch von entsprechenden Schätzverfahren nur sehr schwer unterdrückt werden können, da in der Regel wie oben erwähnt keine Information über die zeitliche und örtliche Korrelation der Störfelder vorhanden ist.

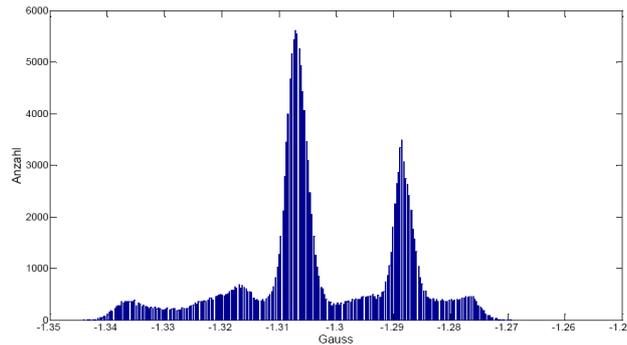


Abbildung 41: Magnetometer-Histogramm in einer Büroumgebung [ADAP61].

3.7 Optische Systeme mittels digitaler Bildverarbeitung

Optische Systeme wie digitale Video-Kameras oder digitale Photo-Apparate können auch als Sensoren für die Fußgängernavigation und Positionierung eingesetzt werden. Mittels digitaler Algorithmen werden hier Personen innerhalb einer Videosequenz erkannt und die Bewegungen der Personen kann verfolgt werden (*Human Tracking*). Es ist möglich anhand von Bildern oder Videos die Personen mit Hilfe von Vergleichsbildern oder Eigenschaften zu verifizieren bzw. identifizieren.

Die verschiedenen Verfahren für die Erkennung von Personen in Videos und Bildern kann man in folgende verschiedene Teilgebiete aufteilen:

- Gesichts-Erkennung/Verifikation (*Face Recognition/Face Verification*)
- Verfolgung/Erkennung von Personen und deren Bewegung in Videos (*Human Tracking/Detection*)
- Schätzung der Kopfstellung (*Head Pose Estimation*)

3.7.1 Gesichts-Erkennung/Verifikation

Abhängig von der jeweiligen Applikation existieren verschiedene Techniken auf dem Gebiet der Gesichts-Erkennung/Verifikation. Das allgemeine Gesichts-Erkennungs-System besteht aus verschiedenen Schritten, die in Abbildung 42 dargestellt sind.

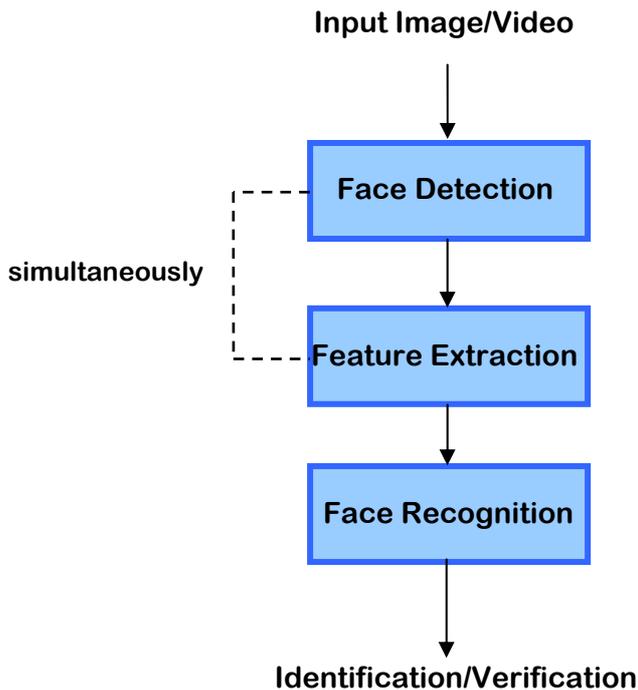


Abbildung 42: Allgemeiner Aufbau eines Gesichtserkennungssystems nach [ZCP+03].

Signifikante Fortschritte wurden in den letzten Jahren auf dem Gebiet der Gesichtserkennung unter den verschiedensten Bedingungen gemacht [ZCP+03]. Erscheinungsbild basierte Methoden, bei denen ein automatisches System mit Hilfe einer großen Anzahl von Abtastwerten trainiert wird, erzielten hierbei die besten Ergebnisse. Weiterhin wurden in der letzten Zeit *Multiview*-basierte Methoden auf Gesichts-Detektion und Erkennung untersucht, um auf die Rotation des Gesichts einzugehen. [ZCP+03] enthält einen umfassenden Literatur-Überblick auf diesem Gebiet.

Folgende verschiedene Techniken gibt es auf dem Gebiet der Merkmals-Extrahierung und Gesichtserkennung:

- Für die inhalts-basierte Bildsuche (*Content Based Image Retrieval*, CBIR) verwendet man Techniken, die bild-basierte Merkmale wie Farbe, Textur, Form, etc. extrahieren, um damit die Bilder zu kennzeichnen. Diese Techniken sollen das Problem der bisher manuell erfolgten Indizierung lösen [BBC06].
- Für die Gesichtserkennung werden meist Unterraum (*Subspace*) Lerntechniken verwendet:
 - Die sogenannte *Principal Component Analysis* (PCA) wird verwendet, um den original Muster-basierten Vektorraum hoher Dimension auf einen Merkmals-Vektorraum niedriger Dimension zu reduzieren (z.B. *Eigenspace*-Techniken).
 - Bei der sogenannten *Linear Discriminant Analysis* (LDA), darunter fällt z.B. die Methode *Fisher Linear Discriminant* (FLD) für die Klassifizierung von Mustern, werden Merkmale extrahiert, die am effizientesten für die Diskriminanz-Analyse sind.

Die ganzheitlichen Ansätze *Eigenfaces* wurden von Turk und Pentland 1991 [TuPe91] eingeführt. Sechs Jahre später führten Belhumeur et al. 1997 [BHK97] die *Fisherfaces* zur Gesichts-Erkennung ein. Beide Systeme wurden in [MaKa01] verglichen und es wurde gezeigt, dass der generelle Glaube, dass LDA-Systeme PDA-Systeme überbieten, nicht immer der Fall ist; insbesondere, wenn das Training-Datenset klein ist, sind PDA-Systeme besser. Beide Methoden brauchen nicht nur das gesamte Bild mit dem Gesicht, sondern auch das Wissen über die genaue Lage der Schlüssel-Gesichtsmerkmale wie Augen, Nase und Mund [Mart02]. Deshalb wird in den meisten Gesichtserkennungs-Verfahren das Wissen über Gesichtsmerkmale zusätzlich zum gesamten Gesicht gebraucht.

Nach der Gesichtserkennung wird meistens noch eine Gesichts-Identifikation oder eine Gesichts-Verifikation durchgeführt. In [YXT07] wird der Unterschied zwischen Identifikation und Verifikation anhand der Begriffsbildung in der Biometrie erläutert. Bei der Identifikation wird eine Probe mit allen Galerie-Proben aus der Datenbank verglichen. Im Gegensatz dazu wird bei der Verifikation die Probe, die zu einem Subjekt gehören soll, nur mit den Galerie-Proben verglichen, die auch zu diesem Subjekt gehören.

3.7.1.1 Anwendungen

In [WLS03] werden menschliche Gesichter in Farbbildern detektiert. Dabei werden hautfarbene Regionen unter Berücksichtigung verschiedener Beleuchtungen segmentiert. Nach der Detektion der Gesichtsregionen werden sie zu Gruppen zusammengefasst und als Gesichtsregion verifiziert. Für die Verifikation werden die möglichen Regionen für die Augen in einer zweiten Stufe detektiert. Zum Schluss wird eine *Eigenmask*, die einen großen Betrag bei den wichtigen Gesichtsmerkmalen hat und die vom ersten eigenface der Trainings-Gesichtsbilder generiert wurde, verwendet, um die Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Methode zu verbessern.

Zur Authentifizierung von Individuen werden in [SKK02] für die Gesichtsverifikation Korrelationsfilter vorgeschlagen. Nach einer FFT, die auf das Bild angewendet wird, wird hier ein Korrelationsfilter angewendet, das Trainingsbilder verwendet. Das vorgeschlagene Filter ist ein *Minimum Average Correlation Energy Filter* (MACE), das von Mahalanobis et al [MKC87] entwickelt wurde. MACE-Filter minimieren die durchschnittliche Korrelations-Energie der Korrelations-Outputs, wobei die resultierenden Korrelations-Ebenen Werte nahe bei Null überall außer an den Lagen der Trainings-Objekten enthalten. In [SKK02] wird die MACE-Filter Lösung mit der sogenannten *Individual Eigenface Subspace Method* (IESM) [LCK01] verglichen. Statt der Nutzung von Trainingsbildern von allen Personen für die Gesichtserkennung werden bei IESM für jede Person individuelle Trainingsbilder verwendet, um einen individuellen Eigenface-Unterraum zu bilden. Die Ergebnisse zeigen, dass Korrelationsfilter eine Alternativ-Lösung für die Gesichtserkennung darstellen. Die Vorteile der Korrelationsmethode sind die *Shift*-Invarianz und die Möglichkeit mit Hilfe einer universellen Schwelle Fehlinterpretationen zu unterdrücken.

Bei der Verifizierung von Gesichtern werden generell vorher gelernte globale Schwellwerte verwendet. In [YXT07] wird dieses Problem angeleuchtet und eine ausgeglichene kundenspezifische Schwelle vorgeschlagen. Zusätzlich dazu wird eine affine Transformations-Matrix anstelle der konventionellen Projektions-Matrix (wie in Eigenfaces/Fisherfaces) zur Reduktion der Dimensionen vorgeschlagen. Experimente mit drei Vergleichs-Datenbanken für Gesichtsbilder demonstrieren, dass diese vorgeschlagene Methode mit dem Namen *Threshold Balanced Transformation* (TBT) signifikant die aktuellen Subspace-Techniken überbietet.

In [RaCh06] wird Gesichtserkennung/Verifikation bei älter werdenden Personen untersucht, wobei ein sogenannter *Bayesian Age Classifier* verwendet wird, um die Gesichtsbilder von Personen-basierend auf altersbedingten Differenzen zu klassifizieren. Zusätzlich dazu werden hier Methoden vorher angewandt, die die Variationen in Beleuchtung und Kopfstellung berücksichtigen.

Schließlich gibt es noch verschiedene Algorithmen für die Erkennung von Gesichtsausdrücken [KoPi07] und das Extrahieren von Gesichtsmerkmalen [XiHu06].

3.7.2 Personen-Erkennung und deren Bewegungen in Video-Sequenzen

Die Personenerkennung und die Nachverfolgung der Bewegungen dieser Personen in Video-Sequenzen werden in der Literatur als *Human Tracking* bezeichnet. Hierbei werden mit Hilfe von verschiedenen Algorithmen die Personen (ganzer Körper) in den Bildern der Sequenz detektiert und weiterverfolgt, um die Bewegungen zu erhalten. In einer Video-Sequenz können ein oder mehrere Personen vorkommen, die entweder stehen bleiben, weitergehen, aus dem Sichtfeld verschwinden oder hinzukommen. Es gibt hierbei verschiedene Techniken zur Erkennung von Personen auf die im Folgenden näher eingegangen wird.

In [ZhHo05] wird zunächst der Hintergrund subtrahiert und ein Code-Buch generiert, um Personen von anderen Objekten zu unterscheiden. Bei der Subtraktion des Hintergrunds werden oft Schatten-Regionen als Vordergrund erkannt. Deshalb wird in [ZhHo05] ein Algorithmus zur Schattenerkennung vorab angewandt, um schattierte Hintergrundsregionen auszufiltern. Um die Individuen zu verfolgen wird ein menschliches Modell für jedes Individuum erzeugt. Das menschliche Modell, das hier verwendet wird, speichert die folgenden Informationen: Farb-Histogramm, Richtung, Geschwindigkeit, Anzahl der Pixel und Größe des Menschen. Zuletzt wird noch ein Algorithmus angewandt, der falsche Objekte erkennt. In den folgenden Fällen werden Objekte falsch oder nicht erkannt: plötzliche Lichtveränderungen, Personen, die im Hintergrund verschwinden und Zittern von Bäumen.

Für die Erkennung von Personen in einer Datenbank von Testbildern wird ein robustes Merkmalsset gebraucht, um die menschlichen Formen sauber zu unterscheiden. In [DaTr] wird dies berücksichtigt und es wird gezeigt, dass sogenannte lokal normalisierte *Histogram of Oriented Gradients* (HOG) Deskriptoren exzellente Ergebnisse im Vergleich zu anderen existierenden Merkmalssets liefern. Bei dieser Methode wird das Bild in Zellen eingeteilt und ein lokales 1D-Histogramm von Richtungsgradienten und Kantenorientierungen über die Pixel einer Zelle berechnet. Die 1D-Histogramme werden dann miteinander kombiniert und bilden die endgültige Darstellung. Zusätzlich dazu wird eine Normalisierung des Kontrasts über größere, sich überlappende örtliche Blöcke durchgeführt, um die Probleme mit Beleuchtung und Schattierungen zu bewältigen. Die normalisierten Deskriptor-Blöcke – diese werden auch HOG-Deskriptoren genannt – werden für das gesamte Detektionsfenster (oder Bild) gesammelt. Hiermit ist dann das Detektionsfenster (oder Bild) in ein Raster von sich überlappenden Blöcken eingeteilt, in welchen HOG-Merkmalsvektoren extrahiert wurden. Die Blöcke können hierbei rechteckig (*rectangular-HOG*, R-HOG) oder rund (*circular-HOG*, C-HOG) sein. Die Vektoren werden dann zur Personen-/Objektklassifizierung an eine sogenannte lineare *Support Vector Machine* (SVM) übergeben. Die SVM enthält einen Lern-Algorithmus, der zur Klassifikation von Objekten dient. In [DaTr] werden die Ergebnisse mit den folgenden Verfahren verglichen: Haar-Wavelets, PCA-SIFT und *Shape Context*. Es wird in dem Artikel gezeigt, dass HOG Deskriptoren die anderen Techniken überbieten. In [DTS06] wird dieser Algorithmus auf die Erkennung von Personen in Video-Sequenzen erweitert, wobei bewegungsbasierte Deskriptoren mit den HOG-Deskriptoren kombiniert werden.

3.7.3 Schätzung der Kopfstellung

Die Schätzung der Kopfstellung wird in der Literatur hauptsächlich dazu verwendet, um die derzeitige Beschäftigung, die Absicht bzw. den Schwerpunkt der Aufmerksamkeit einer Person festzustellen. Die Information über die Absicht einer Person wie z.B. das anvisierte Ziel kann als Zusatzinformation für die Fußgängernavigation eingesetzt werden. Für die Ermittlung der Kopfstellung werden neurale Netzwerke bzw. Partikel-Filter eingesetzt. In [VNS06] wird die horizontale Kopfstellung von Seminar-Videos geringer Auflösung (ca. 20x25 Pixel für den Kopfbereich) mit Hilfe von neuronalen Netzwerken ermittelt. Hierbei werden mehrfache Kameras (an den vier Ecken eines Seminarraumes) verwendet. Für jedes Video einer einzelnen Kamera wird die Kopfstellung mit Hilfe eines neuronalen Netzwerks ermittelt, wohingegen die Einzelergebnisse mit Hilfe eines Bayes-Filter-Systems zu einem gemeinsamen Ergebnis kombiniert werden. Hierbei wurde die Position des Kopfes als bekannt angenommen. In [LaBr06] wird die Position als nicht bekannt angenommen und gemeinsam mit der Kopfstellung in einem Partikel-Filter ermittelt. Auch hier werden mehrfache Kameras eingesetzt. Für die Lokalisierung des Kopfbereichs wird ein 3D-Modell verwendet, das den Kopf- und den oberen Rumpfbereich beinhaltet. Ein visuelles *Likelihood*-Maß wird hier für das Partikel-Filter vorgeschlagen, bei dem das RGB-Histogramm für den ermittelten, interessierenden (Kopf/Rumpf-) Bereich mit einem Modell-Histogramm verglichen wird. Die Likelihoods der einzelnen Videos einer Kamera werden kombiniert in einem *Multi-View* Partikel-Filter.

3.8 Dedizierte Systeme für die Indoor-Navigation

Eine Lösung, um die in den vorigen Abschnitten genannte Einschränkung von bestehenden Outdoor-Lokalisierungsverfahren für die Navigation innerhalb Gebäuden (Indoor-Navigation) zu umgehen, ist die Nutzung von speziell für diesen Anwendungsfall entwickelten Systemen. Diese Systeme setzen allerdings eine zu installierende Infrastruktur im jeweiligen Gebäude voraus. Den sich daraus ergebenden Kosten für die Installation, Kalibrierung, Aktualisierung und Wartung stehen eine je nach System hohe Präzision und Verfügbarkeit gegenüber.

Prinzipiell kann man infrastrukturbasierte und clientbasierte Systeme unterscheiden [KKJ+04]. Bei erstgenannten Systemen wird die Positionsbestimmung von einer zentralen Instanz durchgeführt. Daher stehen die Positionsdaten aller aktiven Nutzer einer Lokalität zentral zur Verfügung. Clientbasierte Systeme nutzen die installierte Infrastruktur nur zur Bestimmung der eigenen Position. Diesen Systemen ist daher ein Schutz persönlicher Daten inhärent.

Die eingesetzten Technologien umfassen u.a. die Messung der unterschiedlichen Laufzeiten von Ultraschall- und Funkwellen, Infrarotsender und -detektoren, *Ultra Wide Band* (UWB)-Systemen und Powerline-Verfahren. Ebenfalls möglich ist die Mitbenutzung von bereits installierter Hardware als Infrastruktur zur Positionsbestimmung, die ursprünglich anderen Zwecken dient, wie z.B. WLAN-Basisstationen oder Bluetooth-Endgeräte.

Die ausgenutzten physikalischen Effekte umfassen die Distanzmessung zu bestimmten Fixpunkten über die unterschiedliche Laufzeit von Signalen (*Time Difference Of Arrival*, TDoA), die Bestimmung der Einfallswinkel (*Angle Of Arrival*, AoA), die gemessene Signalstärke von versch. Basisstationen (*Received Signal Strength*, RSS) oder eine Kombination dieser Techniken.

Bei manchen Systemen muss während sogenannter Offline-Phasen vor dem operativen Einsatz eine Kartographisierung der jeweiligen Lokalität durchgeführt werden. Die Online-Phase bezeichnet dann den Zustand der tatsächlichen Einsatzmöglichkeit des Systems. Wurde eine Änderung oder Erweiterung der Gebäudeparameter wie z.B. das Umstellen von Möbeln vorgenommen ist meist eine erneute Offline-Phase von Nöten, die mit weiteren Kosten zu Buche schlägt. Manche Systeme lösen die Aufgabe der Kartographisierung automatisch (s. LEASE oder das in [ZPR07] vorgestellte System).

Im folgenden werden die jeweiligen zum Einsatz kommenden Technologien anhand von kommerziell verfügbaren Systemen und Systemen aus der Forschung anhand der Einteilung in die beiden oben genannten Gruppen der client- und der infrastrukturbasierten Indoor-Lokalisierungssysteme diskutiert. Tabelle 9 gibt einen Überblick über diese Systeme und die jeweils zum Einsatz kommende Technologie.

Systemname	Eingesetzte Technologie	Systemart
Cricket	Ultraschall und Funkwellen	clientbasiert
Powerline Positioning	Powerline	
Active Badge	Infrarotsignale	infrastrukturbasiert
LEASE	IEEE 802.11 WLAN	
Ubisense	UWB	
Topaz	Bluetooth	
Thinking Carpet	Drucksensoren/Sensornetz	

Tabelle 9: Dedizierte Indoor-Lokalisierungssysteme und die eingesetzte Technologie

3.8.1 Clientbasierte Systeme

3.8.1.1 Cricket

Das am Massachusetts Institute of Technology (MIT) entwickelte Indoor-Lokalisierungssystem Cricket ermöglicht die clientbasierte Bestimmung der Position auf 1cm bis 3cm genau [CSA05]. Dazu nutzt es die weitaus höhere Ausbreitungsgeschwindigkeiten von Funkwellen gegenüber Ultraschall aus [PCB00]. Die Sender (sog. *Beacons*), die in den Räumlichkeiten angebracht werden müssen und die Positionsbestimmungsmodule (sog. *Listeners*), die das zu lokalisierende Objekt trägt, nutzen die gleiche Form von Hardwaremodul. Die Listeners sind mit Hosts (z.B. ein Laptop) verbunden, die die eigentliche Trilateration vornehmen. Die Infrastruktur besteht aus Beacons, die üblicherweise an den Decken des auszustattenden Gebäudes angebracht werden. Diese Beacons senden wiederholt zwei Signale aus: Ein Funksignal bei 433 Mhz, das Daten über die Position des Beacons enthält, und gleichzeitig ein Ultraschallimpuls. Listeners, die sich in Sichtweite befinden, empfangen beide Signale und über den Laufzeitunterschied (TDoA) zwischen Eingang der Funkdatenübermittlung und Ankunft des Ultraschallimpulses kann die Entfernung zu den Beacons bestimmt werden. Daraus bestimmt das mit dem Listener verbundene Handheld-Gerät die eigenen Position [CSA06].

Vorteile von Cricket sind

- die Skalierbarkeit in Anzahl der gleichzeitig aktiven Nutzer
- die dezentrale Verwaltungsstruktur
- die Erweiterbarkeit

Die Firma Crossbow vertreibt Cricket-Module und eine Entwicklungsumgebung [CWS].

3.8.1.2 Powerline Positioning

[PTA06] beschreibt Untersuchungen zu einem System, das die Stromleitungen in einem Gebäude zur Indoor-Lokalisierung nutzt. Dabei werden an zwei Punkten in einem Gebäude, die möglichst weit auseinanderliegen, zwei Funkwellentransmitter in die Steckdose gesteckt. Einer der Sender generiert ein 447 kHz Signal, der andere ein 33 kHz Signal. Für einen Prototyp dieses Systems wurden handelsübliche Signalgeneratoren verwendet, die Elektriker einsetzen, um in der Wand verlegte Kabel verfolgen zu können. Die Stromleitungen der Hauselektrik fungieren nun als Antennen, die Wechselfelder an die Umgebung abgeben. Ein kommerzieller Empfänger zur Detektierung für diese Frequenzen wurde modifiziert, um beide Signale empfangen zu können und mit einem Computer verbunden. Durch Referenzbildung der unterschiedlichen Empfangsstärke der beiden Funksignale an verschiedenen Positionen in den Räumen des Gebäudes wird eine Karte erstellt, die eine Navigation erlaubt. Voraussetzung hierfür ist, dass die verschiedenen Phasen der Gebäudeelektrik miteinander kapazitiv gekoppelt werden, um eine Ausbreitung der Funkwellen im gesamten Haus zu

gewährleisten. Das Abgleichen der ca. 100 bis 200 Referenzpunkte pro Gebäude ist ein aufwändiger Prozess. Die erreichbare Genauigkeit liegt für die reine Erkennung des Raums in einem Gebäude bei 78%-100% der Versuche, für Messungen von Positionen innerhalb Räumen geben die Autoren 87%-95% an. Es wurden Messungen in acht verschiedenen älteren und modernen amerikanischen Häusern durchgeführt. Eine Auflösung von 4m kann demnach in 94% aller Fälle erreicht werden, bei 0,5 m sind es nur noch 42%.

3.8.2 Infrastrukturbasierte Systeme

3.8.2.1 Active Badge

Active Badge wurde zwischen 1989 und 1992 in den AT&T Laboren in Cambridge, England, entwickelt und ist eines der ältesten Indoor-Lokalisierungssysteme [Act02]. Das Active Badge selbst, das eine Person sichtbar am Körper trägt, sendet alle 10 Sekunden einen eindeutig identifizierbaren Infrarotimpuls aus. In einem Netzwerk verbundene Infrarotdetektoren, die in den einzelnen Räumen eines Gebäudes angebracht wurden, empfangen und erkennen diese Signale. Pro Raum wird ein Empfänger benötigt, was die Kosten für die zu installierende Infrastruktur niedrig hält. Damit lässt sich zentral feststellen, welche Personen sich in den jeweiligen Räumen aufhalten. Nachteile des Systems sind der Zwang einer Sichtverbindung des Active Badges zum empfangenden Sensor die geringe Reichweite von Infrarotsignalen und der hohe Energieverbrauch der Badges.

3.8.2.2 The Bat System

Das Bat System wurde an der University of Cambridge in England entwickelt und nimmt die Positionsmessung durch Aussenden einer Ultraschallwelle und anschließender Multilateration vor [DTG05].

Sender mit einer eindeutigen Identifikationsnummer, genannt *Bats*, werden an den Objekten installiert, deren Position bestimmt werden soll. Eine Basisstation fordert über ein 433 MHz Funksignal einen Sender über die Identifikationsnummer auf, einen Ultraschallimpuls auszusenden. Die Ultraschallimpulse werden von Empfängern, die an den Decken des Gebäudes angebracht sind, empfangen. Der Sender nutzt zwei Ultraschallmitter, die in unterschiedliche Richtungen weisen und einen Ausbreitungskegel formen, wodurch sogar eine grobe Schätzung der Lage möglich ist. Die Basisstation kann bei Eingang der Messungen der Empfänger durch Multilateration die Position des Objektes bestimmen. Die Geschwindigkeit der Ultraschallausbreitung in Luft, die als Parameter zur Positionsbestimmung benötigt wird, kann über die Raumtemperatur geschätzt werden [HHS+02]. Eine Genauigkeit von 3 cm während 95% der Zeit wird erreicht [DTG05]. Diese Genauigkeit wird durch ein dichtes Netz der Empfänger erreicht, maximal 15 Empfänger tragen zu einer Positionsbestimmung bei.

Sich schnell bewegende Objekte können häufiger abgefragt werden, als langsamere Objekte. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Ultraschallimpulses führt zu einer maximalen Aktualisierungsrate pro Bat von 15 Hz [DTG05]. Die Basisstationen haben zur Ultraschallimpulsanforderung 50 Zeitschlitze pro Sekunde zur Verfügung [HHS+02].

Das Bat System skaliert gut mit größer werdender Anzahl der Nutzer und größerem abzudeckenden Gebiet [HHS+02].

3.8.2.3 LEASE

Das LEASE System nutzt die IEEE 802.11-Technologie für drahtlose Netzwerkverbindungen (WLAN) um Positionsschätzungen innerhalb Gebäuden durchführen zu können [KKJ+04]. Dabei können bereits installierte WLAN-Basisstationen (*Access Points*, APs) mitbenutzt werden. Zusätzlich zu den APs werden stationäre Sender installiert, die keine WLAN-Verbindung bereitstellen, sondern nur der Verbesserung des Ergebnisses der Lokalisierung dienen.

Eine Positionsbestimmung mit dieser Infrastruktur alleine würde zwingend eine Offline-Vermessung des gegebenen Gebäudes erfordern, bei der die Signalstärken an mehreren Positionen im Gebäude von den jeweiligen APs und stationären Sender gemessen werden und eine Karte erstellt wird. Mithilfe dieser Karte bestimmt ein Empfänger später durch Vergleich die eigene Position. Bei jeder Änderung der Umgebung muss eine erneute Offline-Vermessung durchgeführt werden, wie dies bei anderen auf WLAN basierenden Systemen, z.B. dem Projekt RADAR von Nöten ist [BahP00].

Daher führt LEASE noch sogenannte *Sniffer* ein, die in der Nähe der APs installiert sind um die Signalstärken der anderen APs, der stationären Sender und der Clients zu messen. Da die Position der APs und der stationären Sender bekannt ist, kann daraus automatisch eine Karte des Gebäudes erstellt werden, ohne eine aufwändige Offline-Vermessung durchführen zu müssen. Auch bei Änderungen in der Umgebungsbeschaffenheit (Umbau, Umstellen von Möbeln) kann auf eine erneute Offline-Vermessung verzichtet werden.

Eine Zentralstation (*Location Estimation Engine*, LEE) sammelt über die Sniffer die Daten aller Signalstärken der stationären Empfänger und der Clients und bestimmt daraus eine Positionsschätzung.

3.8.2.4 Ubisense

Das Ubisense-System baut auf der *Ultra Wide Band*-Technologie (UWB) auf, bei der die Probleme, die durch die Mehrwegeausbreitung von Funksignalen innerhalb von Gebäuden entstehen, durch das Aussenden extrem kurzer Pulse mit Pulsdauern im Nanosekundenbereich umgangen werden. Diese sehr kurzen Pulse werden zwar auch an Wänden und Objekten in Gebäuden reflektiert und treffen am Empfänger verzögert zum direkten Signal an, jedoch ist die Pulsdauer so kurz, dass beim Eintreffen der Reflektionen das direkte Signal bereits abgeklungen ist und sich alle nachfolgend eintreffenden Reflektionen klar vom direkten Signal trennen lassen.

Die in den Räumen zu installierende Infrastruktur besteht beim Ubisense-System aus sogenannten Ubisensors von denen typischerweise vier bis sieben Stück pro Raum angebracht werden, die dann eine sogenannte Zelle bilden [StG05]. Die zu lokalisierenden Personen oder Objekte werden mit Ubitags ausgestattet. Alle Komponenten kommunizieren untereinander über einen herkömmlichen Funkkanal. So können auch Pagerfunktionen im Ubitag implementiert werden. Die eigentliche Positionsbestimmung findet dabei durch Aussenden eines UWB-Impulses seitens eines Ubitags statt. Die Ubisensors nutzen dabei zur Positionsbestimmung sowohl TDoA als auch AoA was die Bestimmung von dreidimensionalen Ortskoordinaten bereits mit zwei empfangenden Ubisensors ermöglicht. Pro Ubitag ist eine maximale Abtastrate von 10 Hz möglich. Dabei kann in 95% aller Fälle eine Genauigkeit von unter 30 cm erreicht werden [Ubi06].

[ZPR07] beschreibt ein System, das gegensätzlich zur oben beschriebenen ursprünglichen Verwendung des Ubisense-Systems die Verwendung von Ubisensors und Ubitags umkehrt: Ubitags werden dabei als Infrastruktur fest mit den Wänden in einem Raum verbunden und durch zwei Ubisensors, die mobil auf einem Wagen befestigt sind, abgefragt. Dabei wird ein Algorithmus aufgezeigt, der automatisch im Referenzsystem der Ubisensors die Position der Ubitags bestimmt. Dadurch ergibt sich ein Lokalisierungssystem, das ohne vorherige Vermessung der Infrastrukturelemente auskommt.

3.8.2.5 Topaz

Der große Vorteil einer Indoor-Lokalisierungslösung, die auf der Bluetooth-Technologie aufsetzt ist die weite Verbreitung dieser Nahfunktechnik. Viele Mobiltelefonmodelle und *Personal Digital Assistants* (PDA) werden mit diesem Kommunikationsverfahren ausgeliefert.

Bei dem von Tadly's vertriebenen Topaz-System werden als Infrastruktur ein Lokalisierungsserver und eine Reihe von *Bluetooth Access Points* (BAP) pro Gebäude installiert [Wei04]. Jeder BAP kann dabei in einem von drei verschiedenen Modi betrieben werden, welche sich in der erreichbaren Genauigkeit bei der Lokalisierung unterscheiden. In der höchsten Genauigkeitsstufe kann eine Positionsbestimmung auf ca. 2 m erzielt werden, bei 85% aller Versuche. Für das System kann jedes Bluetooth-Gerät zur Anwendung kommen, Tadly's bietet aber speziell für Topaz entwickelte

Bluetooth-Tags an, die zusätzlich mit einem Infrarotsender ausgestattet sind, um eine höhere Genauigkeit zu erreichen.

3.8.2.6 Thinking Carpet

Die Deutschen Firmen Vorwerk und Infineon haben gemeinsam einen Teppich unter dem Namen Thinking Carpet [Vorwerk] entwickelt, der mit einem Netz aus Sensoren für verschiedene Zwecke ausgestattet ist.

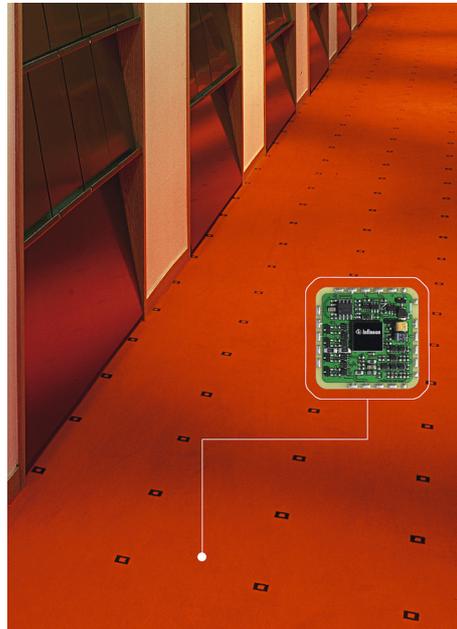


Abbildung 43: Thinking Carpet mit großflächigem Sensornetz [Vorwerk].

Das selbstorganisierende Netzwerk bestehend aus in den Teppich integrierten Microchips kann verschiedenartige Sensorwerte registrieren und selbstständig auswerten. Dazu zählt auch der Anpressdruck, der sich lokal dort ändert, wo eine Person auf dem verlegten Teppich steht oder sich über diesen bewegt. Im einfachsten Fall wird diese Druckänderung z.B. im Rahmen einer Zutrittskontrollfunktion zur Auslösung eines Alarms genutzt, wenn die Änderung an einem dafür nicht zulässigen Bereich erkannt wird. [SaLu07] zeigt wie aus den Druckänderungen Trajektorien der sich darauf bewegenden Personen abgeleitet werden können, was unter anderem auch die Identifikation und damit Zuordnung zu bestimmten Personen ermöglicht.

3.9 Sensoren für die Unterstützung der Navigation in Fahrzeugen (Straße und Schiene)

3.9.1 Lokalisierung von Schienenfahrzeugen

Zur Analyse des Standes der Technik der Zuglokalisierung ist das gesamte Kombinationsspektrum von Messprinzipien und -Systemen inklusive genutzter on-board-Sensoren und notwendiger Infrastrukturmaßnahmen sowohl strecken- als auch flächenbezogen in die Betrachtung einzubeziehen [NEG+07]. Der Bedarf an Ortung von Schienenfahrzeugen ist historisch gewachsen und resultiert primär aus der notwendigen Regelung von Zugfolgen und der Gewährleistung von Abständen, um Kollisionen zu vermeiden. Die höchste Effizienz bei der Betriebsabwicklung des Schienenverkehrs wird erreicht, wenn ein Fahren im wandernden Raumabstand unter Einbeziehung des absoluten Bremswegabstandes erfolgt. Dafür ist es erforderlich, dass kontinuierlich die Positionen der Züge bestimmt und der zugeordneten Betriebszentrale bereitgestellt werden, um rückwirkend auch eine

situationsbezogene Beeinflussung der Fahrweise der Züge und Schienenfahrzeuge zu gewährleisten. Die erreichbare Genauigkeit und Zuverlässigkeit des Gesamtsystems bestimmt dabei den Mindestabstand zweier Züge, der sich als Summe des absoluten Bremsabstands und des doppelten Positionsfehlers ergibt.

Als Grundlage für die folgende Klassifikation wird ein kurzer Überblick über gängige Ortungsbegriffe und Ortungssensoren im Kontext der Zuglokalisierung gegeben.

3.9.1.1 Klassifikation von Ortungsmethoden

1. Eigen- und Fremdortung

Eine Eigenortung (auch als bordautonome Ortung bezeichnet) liegt vor, wenn die Positionsbestimmung fahrzeugeitig vorgenommen wird. Von einer Fremdortung wird gesprochen, wenn die Position des Schienenfahrzeuges streckenseitig bestimmt wird.

2. Nah- und Fernortung

Wenn für die Positionsbestimmung fahrweggebundene Infrastruktur mitgenutzt wird, wird das Prinzip der Nahortung angewendet. Wird fahrwegunabhängige Infrastruktur genutzt, spricht man von der Fernortung.

3. Abschnitts- und Punktortung

Bei der Abschnittsortung ist es ausreichend, dass der Streckenabschnitt, auf dem ein Schienenfahrzeug sich befindet, bestimmt wird. Bei der Punktortung ist eine eindeutige Zuordnung eines Fahrzeugpunktes zu einer streckenseitigen Position gefordert.

4. Kontinuierliche und diskrete Ortung

Ist die Positionsbestimmung eines Schienenfahrzeuges jederzeit und überall im gesamten Streckennetz gefordert, so wird von kontinuierlicher Ortung gesprochen. Erfolgt sie nur an bestimmten Wegpunkten des Streckennetzes, liegt eine diskrete Ortung vor.

5. Absolute und relative Ortung

Eine absolute Ortung entspricht der eindeutigen Zuordnung eines Fahrzeugpunktes zu einer streckenseitigen Position. Bei der relativen Ortung wird die Position des Schienenfahrzeuges aus einer diskreten Ortung und einer relativen Wegmessung abgeleitet.

6. Topologische und geographische Ortung

Bei der topologischen Ortung wird die Zugposition in Bezug zu existierenden Streckenatlanten verwaltet. Eine geographische Positionsangabe liefert die Koordinaten in einem spezifizierten Koordinatensystem.

3.9.1.2 Ortungssensoren

Eine restriktive Handhabung des Begriffes Ortungssensor impliziert, dass der genutzte Sensor die Position des Schienenfahrzeuges möglichst jederzeit und überall bestimmen kann. Dies ist jedoch bei den meisten Sensoren nicht gegeben. Entsprechend der spezifischen Funktionalität ist eher eine kombinierte Nutzung verschiedener Sensoren notwendig, um die absolute Position eines Zuges kontinuierlich bestimmen zu können. Ein Lösungsansatz betrifft die Kombination von streckenbezogener Punktortung (absolut, diskret) und fahrzeugeitiger Relativortung (relativ, kontinuierlich). Dafür geeignete Sensoren sind in Tabelle 10 und Tabelle 11 aufgelistet. In den Kapiteln 3.9.1.3 bis 3.9.1.8 erfolgen Detailbeschreibungen ausgewählter Sensoren. Tabelle 12 auf Seite 79 listet abschließend die Eigenschaften diverser Ortungssensoren in Form einer Übersichtsmatrix auf.

Sensor	Messverfahren / Messgröße	Abgeleitete Größe
Radumdrehungszähler (Odometer)	Anzahl der Radumdrehungen pro Zeiteinheit → siehe auch 3.9.1.3	Zurückgelegter Weg pro Zeiteinheit
Doppler-Radar	Frequenzverschiebung nach Doppler-Verfahren → siehe auch 3.9.1.4	Geschwindigkeit aus Frequenzverschiebung
Kamera (Optische Sensorik)	Bildsequenzen und ihre Korrelation	Geschwindigkeit aus Bildkorrelationen pro Zeiteinheit
Wirbelstromsensor	Magnetfeldbasierte Messungen von Werkstoffinhomogenitäten → siehe auch 3.9.1.10	Geschwindigkeitsbestimmung aus der Korrelation von Inhomogenitäten im Gleisbett
Beschleunigungsaufnehmer (Accelerometer) → Inertial-sensorik	Richtungsabhängige Beschleunigung	Geschwindigkeit aus integrierten Beschleunigungskomponenten

Tabelle 10: Sensoren zur relativen Positionierung zur Weg- oder Geschwindigkeitsbestimmung

Sensor	Messverfahren / Messgröße	Abgeleitete Größe
Gleiskontakte / Achszähler	Spannungsabfall (Induktionsverfahren) durch passierende Räder (Achsen) → siehe auch 3.9.1.5	Bestimmung von Zeitpunkten des Passierens als Form der punktuellen Ortung; mittels Doppelmessung auch zur Bestimmung der Streckenbelegung und –Freigabe genutzt; Doppelmessung ermöglicht auch Bestimmung der Zugvollständigkeit
Gleisstromkreise	Unterbrechung eines Ruhestromkreises, der mittels beider Gleise zwischen Einspeisungs- und Relaisstelle aufgebaut wird → führt zum Abfallen des Gleisrelais als Indikation für befahrenen Gleisabschnitt → siehe auch 3.9.1.7	Bestimmung, ob Gleisabschnitt frei oder besetzt ist.
Gleismagnete	durch Spannungsinduktion wird dem Fahrzeugmagneten Energie entzogen	Erkennung von Referenzpunkten, wie Vorsignal bzw. Überwachungssignal eines Bahnübergangs bzw. von Hauptsignalen
Balisen	Induktive Transponder zur Bereitstellung absoluter Ortungsinformationen → siehe auch 3.9.1.6	Ortskoordinaten der Balise wird an Schienenfahrzeug übertragen; bei schaltbaren Balisen zusätzliche Übertragung von veränderlichen Daten wie z.B. Signalisierungen; Universalbalisen ermöglichen auch den Empfang von Daten des Schienenfahrzeuges
Infrarot-gestützte Bakensysteme	Infrarotsender zur Bereitstellung absoluter Ortungsinformationen (optional auch Empfänger)	Ortskoordinaten der Bake wird an Schienenfahrzeug übertragen; auch Auslegung als Infrarot-sender und –Empfänger zum bidirektionalen Datenaustausch

Linienleiterschleifen	Zählen von Kreuzungspunkten anhand detektierter Phasensprünge der empfangenen Signale → siehe auch 3.9.1.9	Ortsinformationen und Geschwindigkeitsinformationen in Kombination mit Relativsensoren
GNSS Empfänger	Triangulationsverfahren zur absoluten Positionsbestimmung → siehe auch 3.9.1.11	permanente Ortskoordinaten, Richtung sowie Geschwindigkeit

Tabelle 11: Sensoren und Streckeninfrastrukturkomponenten zur absoluten, punktuellen Ortung oder zur Abschnittsortung

3.9.1.3 Odometer

Ein Radumdrehungszähler ist die einfachste Realisierung eines Odometers. Durch die Zählung der Umdrehungen eines Rades, multipliziert mit dem Radumfang erhält man den durch das Fahrzeug zurückgelegten Weg. Radumdrehungszähler sind auf Grund der Bauweise sehr robust und sind auf allen Triebfahrzeugen vorhanden.

Die Messgenauigkeit von Radumdrehungssensoren ist stark begrenzt, da durch die geringe Haftreibung zwischen Rad und Schiene die Räder einem ständigem Schlupf unterliegen. Außerdem nimmt der Raddurchmesser durch Abrieb mit der Betriebszeit ab. Da die Messung auf der Multiplikation des Radumfangs mit der Anzahl der Umdrehungen beruht, wird mit zunehmender Anzahl der Drehungen der Messfehler immer größer (bis zu 3 m Messfehler je 100 m gefahrene Strecke), was durch eine Kalibrierung an Referenzpunkten ausgeglichen werden muss. Hohe Genauigkeits- und Zuverlässigkeitsanforderungen an die Ortung implizieren damit einen erhöhten Bedarf an Referenzpunkten, der im Widerspruch zur angestrebten Reduzierung notwendiger Streckeninfrastruktur steht. Odometer sind darüber hinaus zu einer kontinuierlichen jedoch relativen Ortsbestimmung geeignet.

3.9.1.4 VSB-Radar (Doppler-Radar)

Das VSB-Radar ist ein radunabhängiger Geschwindigkeits- und Wegmess-Sensor in Schienenfahrzeugen, der nach dem Dopplerverfahren bei einer Sendefrequenz von circa 24 GHz arbeitet [Hon].



Abbildung 44: VSB-Radar [Hon].

Durch das Radar wird die momentane Geschwindigkeit des Fahrzeugs gemessen. Aus diesem Wert werden durch Integration die Strecke bzw. Differenzierung die Beschleunigung ermittelt. Diese mathematischen Verfahren führen jedoch zu einer hohen Ungenauigkeit, insbesondere in niedrigen Geschwindigkeitsbereichen. Mit dem VSB-Radar erhält man eine kontinuierliche, relative Ortsinformation, die nur auf dem Fahrzeug vorliegt.

3.9.1.5 Gleiskontakte und Achszähler

Gleiskontakte und Achszähler sind technische Einrichtungen auf der Streckenseite. Diese zumeist an der Gleisaußenseite montierten Schaltmittel arbeiten nach dem Induktionsverfahren.



Abbildung 45: Gleiskontakt (Quelle: DLR/VF)

An der Schiene sind auf beiden Seiten Hochfrequenzschwingkreise montiert, von denen einer als Sender, der andere als Empfänger fungiert. Überfährt ein Rad das Schienenstück über den beiden Schwingkreisen, kann ein momentaner Spannungsabfall registriert werden.

Mit Gleiskontakten und Achszählern können punktförmige, absolute Ortsinformationen auf strecken-seitiger Einrichtung erhalten werden. Eine Zugvollständigkeitsinformation können diese Gleisschaltmittel nicht übermitteln.

3.9.1.6 Balisen / Induktive Transponder

Balisen sind induktive Transponder, die es ermöglichen, eine automatisierte Ortungsinformation auf dem Fahrzeug zu erhalten. An beliebiger diskreter Stelle kann eine absolute Ortsinformation abgerufen werden, allerdings muss hierfür an jeden Ortungspunkt zuvor eine Balise installiert werden. Eine Zugvollständigkeitsprüfung ist nicht möglich.



Abbildung 46: Balise (Quelle: DLR/VF)

Die Ortung per Balise fällt unter die Kategorie der Ortung mittels Bakensystemen. Die Form der Ortung bedingt eine technische Ausstattung auf Fahrzeug- und Streckenseite. Die Ortung mittels Balise stellt eine sehr fehlerarme Ortungsmöglichkeit dar. Allerdings liegt die Ortungsinformation zunächst ausschließlich auf dem Fahrzeug vor. Für eine Weitergabe der Information an eine zentrale Stelle auf der Streckenseite ist eine zusätzliche technische Übermittlung erforderlich.

Ortung per Balisen wird in Deutschland bislang nur auf der *European Train Control System (ETCS)*-Teststrecke Jüterbog-Halle/Leipzig erprobt. Der Einsatz im Regelbetrieb ist nicht vorhanden.

3.9.1.7 Gleisstromkreise

Der Gleisstromkreis ist die einfachste technische Lösung einer Gleisfreimeldung. In einem isolierten Abschnitt eines Gleises wird ein schwacher Strom geleitet und so ein Stromkreis nach dem Ruhestromprinzip aufgebaut. Die Achse eines Eisenbahnfahrzeuges führt bei Einfahrt in diesen isolierten Bereich zu einem Kurzschluss des Stromkreises, wodurch im Stellwerk das Vorhandensein von Fahrzeugen im besagten Abschnitt durch Abfall des Relais erkannt wird.

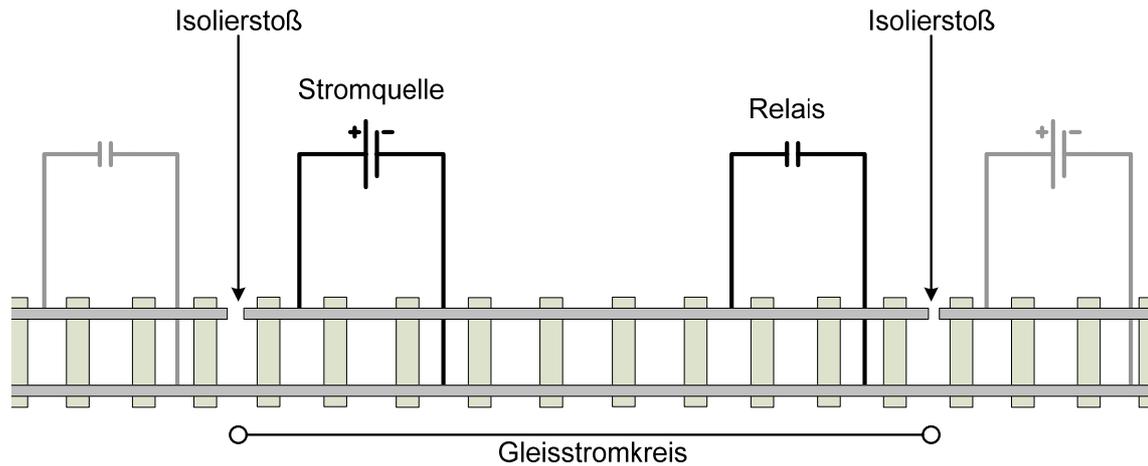


Abbildung 47: Aufbau eines einfachisolierten Gleisstromkreises nach [FNT03].

Beim Verlassen des isolierten Abschnitts wird der Kurzschluss wieder aufgehoben und der Stromkreis geschlossen. Die Besetztmeldung im Stellwerk löst sich auf, was mit einer Zugschlussmeldung gleichgesetzt wird. Diese Zugschlussmeldung beinhaltet indirekt eine Zugintegritätsprüfung. Gleisstromkreise stellen ein Ortungsverfahren dar, das abschnittsweise Ortsinformationen zur Verfügung stellen kann.

3.9.1.8 Achszählkreise

Es werden mehrere punktuelle Sensoren, so genannte Achszählpunkte in das Gleis eingebaut, die das Passieren von Fahrzeugrädern an den eigentlichen Achszählrechner melden. Diese Achszählpunkte sind meist technisch identisch zu den oben genannten Gleiskontakten. Beim Einfahren in eine Blockstrecke werden die Achsen des Zuges eingezählt, beim Ausfahren ausgezählt.

Um Fehlzählungen zu vermeiden, sind üblicherweise zwei solcher Zählansordnungen hintereinander eingebaut; ein zweites Zählerpaar, etwas versetzt auf der anderen Schiene, zählt Züge aus der anderen Richtung.

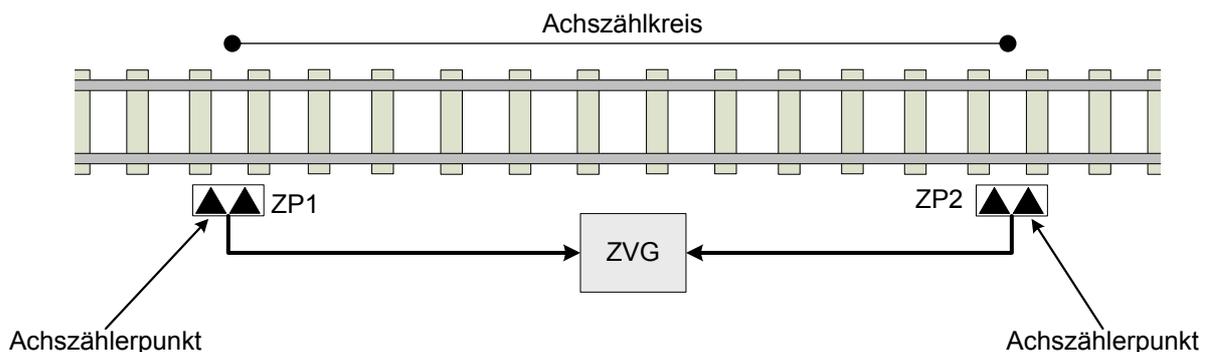
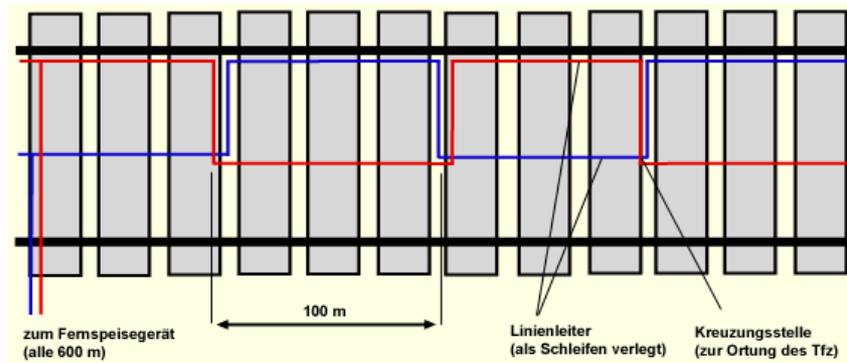


Abbildung 48: Aufbau eines Achszählkreises [FNT03].

Achszähler sind seit einiger Zeit gegenüber Gleiskreisen das bevorzugte Freimeldemittel, da man weder Isolierstöße warten noch die Isolation der Schienen gegeneinander sicherstellen muss. Sie sind zudem weniger störbar. Achszählkreise bieten wie auch die Gleisstromkreise eine Ortsinformation, die abschnittsweise vorliegt. Eine Zugvollständigkeitsüberprüfung kann durch das Ein- und Auszählen von Achsen und den Vergleich der beiden Werte erhalten werden.

3.9.1.9 Linienleiterschleife

Die Linienleiterschleife ist eine infrastrukturelle Voraussetzung für die bei der Deutschen Bahn praktizierte linienförmige Zugbeeinflussung (LZB), die bei Geschwindigkeiten größer 160 km/h durch die EBO gefordert wird. Diese Linienleiter dienen einerseits der Bereitstellung von Streckeninformationen an das Triebfahrzeug und andererseits der Lokalisierung des Zuges. Die Generierung der Informationen erfolgt in der zugeordneten Streckenzentrale, ihre Einspeisung erfolgt mittels Fernspeisegeräten. Aufgenommen werden diese Informationen über eine Fahrzeugantenne unter dem Zug. Neben der Datenübertragung (Sollgeschwindigkeit, Bremskraft, Zielentfernung) wird der Standort des Zuges anhand gezählter Phasensprünge detektiert. An jedem Kreuzungspunkt der Leiterschleifen (alle 100 m) ändert sich die Phasenlage des empfangenen Signals um 180°. Diese Kreuzungspunkte können als diskrete Ortungspunkte aufgefasst werden.

**Abbildung 49: Aufbau Linienleiterschleifen [FNT03].**

Die mit der LZB praktizierte Ortung muss wegen der notwendigen Streckeninfrastruktur als kostenintensiv eingestuft werden. Maximal 126 Kreuzungspunkte können pro Schleifenbereich gelegt werden, so dass die maximale Länge eines Schleifenbereichs 12,7 km beträgt.

3.9.1.10 Wirbelstromsensor

Wirbelstromsensoren sind allgemein dazu geeignet, Inhomogenitäten in den magnetischen Eigenschaften von Bauteilen zu bestimmen. Der Sensor besteht aus einer Erregerspule E, die ein Magnetfeld erzeugt. Entstehende Wirbelströme in metallischen Bauteilen in der Nähe des Sensors (z.B. Schienenbefestigungen) erzeugen ihrerseits ein Magnetfeld, das sich dem Erregerfeld überlagert und damit zu seiner Verzerrung führt. Da die zwei Empfängerspulen P1 und P2 in Differenz geschaltet sind, führen nur Inhomogenitäten in Laufrichtung zu einer Spannungsänderung.

Wirbelstromsensoren können folglich zur bordautonomen Geschwindigkeitsbestimmung eingesetzt werden. Dafür werden zwei Sensoren in einem spezifizierten Abstand an das Triebfahrzeug montiert. Die so entstehenden zwei Messsignale werden einer Kreuzkorrelationsanalyse zugeführt. Anhand des Korrelationsmaximums lassen sich dann der Zeitversatz der als identisch annehmbaren Signale und damit die Geschwindigkeit des Triebfahrzeugs bestimmen. Die Länge des zu korrelierenden Signalausschnitts muss so gewählt werden, dass Signaturen enthalten sind, die zu einer eindeutigen Bestimmung eines Korrelationsmaximums führen. Dies selbst hängt wiederum von der Geschwindigkeit des Triebfahrzeuges und des Abstandes von Inhomogenitäten ab. Zu lange Signalausschnitte implizieren eine zunehmende Dekorrelation beider Signale und damit eine zunehmende Ungenauigkeit durch sinkende Korrelationskoeffizienten.



Abbildung 50: Wirbelstromsensor (Quelle: DLR/VF) .

In der Literatur [Geist06] wird diese Form der Geschwindigkeitsmessung gegenüber Radumdrehungszählern als genauer eingestuft, weil die Messgenauigkeit nicht durch Reibungsverluste an der Schiene oder Rutschen der Antriebsräder mit beeinflusst wird. Die relative Messunsicherheit wird beim Einsatz eines *Closed Loop Correlators* (CLC) mit wenigen Promille angegeben. Aber auch hier ist zur Kompensation von akkumulierten Messunsicherheiten eine Kalibrierung der Ortsinformation ab und zu erforderlich.

Ein zur korrelationsbasierten Laufzeitmessung alternatives Verfahren ist die Frequenzanalyse. Da der mittlere Abstand von Schienenbefestigungen als bekannt vorausgesetzt werden kann, werden dadurch Signale mit einer zur Fahrzeuggeschwindigkeit proportionalen Grundfrequenz erzeugt. Dies impliziert das Entstehen eines Maximums im Spektrum. Die Messunsicherheit des Verfahrens ergibt sich einerseits aus der Diskrepanz zwischen angenommenem und realem Schwellenabstand. Andererseits führen Weichenbauteile zu nicht periodischen Signalanteilen mit erhöhtem Leistungsinhalt. Ein signifikantes Maximum im Spektrum ist nicht mehr sicher detektierbar und Messwerte müssen beim Passieren von Weichen ausgeblendet werden. Demzufolge ist für die Anwendung dieses Verfahrens eine Bestimmung eines Qualitätsfaktors unerlässlich, die die Nutzbarkeit der Messergebnisse bewertet.

Beide Verfahren dienen letztlich zur Geschwindigkeitsbestimmung. Eine kombinierte Nutzung beider Verfahren ermöglicht eine Datenfusion und damit eine gewichtete Bestimmung der Geschwindigkeit [Geist06]. Durch die Fusion der Messwerte mittels eines Kalman-Filters lässt sich insbesondere die Verfügbarkeit der Messungen steigern und ihre Nachteile partiell kompensieren. Dafür notwendige kinematische Fahrzeugmodelle sind ein Optimierungskriterium. Primär ist die Geschwindigkeitsbestimmung mittels Wirbelstromsensoren ein relatives Ortungsverfahren. Sein Potenzial, Weichen und Weichenbauteile zu detektieren, ermöglicht aber auch eine absolute Ortsbestimmung, insofern eine Abbildung von Signaturen und Geschwindigkeiten auf Streckenatlanten gegeben ist. Die Wirbelstrom-Sensorik ist somit ein Kandidat für den Einsatz in sicherheitsrelevanten Anwendungen, bei denen bei ausreichender Qualifizierung des Verfahrens auf Streckeninfrastruktur verzichtet werden könnte.

3.9.1.11 GNSS-Empfänger

Mit den existierenden Satellitennavigationssystemen GPS (USA) und GLONASS (Russland) stehen Navigationssignale zu Verfügung, die es einem GNSS Empfänger auf der Grundlage von Entfernungsmessungen und bereitgestellter Navigationsdaten ermöglichen, eine autarke Ortsbestimmung (absolute, geographische Ortung) vorzunehmen.

Die Positionsbestimmung beruht auf der Messung der Laufzeit der Satellitensignale sowie der daraus resultierenden Entfernungsbestimmung zwischen dem Empfänger und den Satelliten. Für eine 3D-Positionsbestimmung ist der gleichzeitige Empfang von mindestens vier Satelliten notwendig (drei Satelliten werden zur Bestimmung der räumlichen Koordinaten X,Y,Z benötigt, der vierte Satellit dient zur Bestimmung des Uhrenfehlers des Empfängers). Da für die Gleislokalisierung im Bahnbereich die Bestimmung der Höhe nicht erforderlich ist, reichen für die 2D-Positionsbestimmung (horizontal) bereits mindestens drei Satelliten aus, um eine Positionsbestimmung vornehmen zu können.

Hinsichtlich des Genauigkeitspotenzials lassen sich kaum allgemeingültige Aussagen treffen, da die Genauigkeit einerseits vom System selbst und andererseits durch Umgebungsbedingungen sowie die eingesetzten Empfänger und Verfahren der Positionsbestimmung beeinflusst wird. Hinsichtlich Ihrer Systemspezifikation verweisen die bestehenden GNSS-Systeme in ihrer Systemspezifikation auf ein Genauigkeitspotenzial von rund 20 m (horizontale Genauigkeit für rund 95% der Messwerte) bei Einfrequenzmessungen. Durch spezielle Zweifrequenzempfänger lassen sich heutzutage aber bereits Genauigkeiten im *Stand-Alone* Betrieb (d.h. ohne die Nutzung von differentiellen Verfahren oder Zusatzsignalen) von unter 5 m horizontal erreichen. Es muss aufgrund des militärischen Charakters der Systeme jedoch immer damit gerechnet werden, dass Signalverfälschungen bis hin zu Abschaltungen von Satelliten stattfinden können, die dem Nutzer vorher nicht bekannt gegeben werden. Insofern eignen sich diese für den Einsatz unter sicherheitskritischen Bedingungen nur bedingt (insofern Redundanz im System zur Erkennung kritischer Zustände beitragen kann).

GNSS Empfänger werden deshalb zwar bahnseitig eingesetzt, meist aber in Kombination mit Relativsensoren (Odometer, Beschleunigungsaufnehmer, Kreisel) im Rahmen von INS (Inertial Navigation System) bzw. einer IMU (Inertial Measurement Unit) und für nichtsicherheitskritische Aufgaben, wie bspw. die Streckenvermessung.



Abbildung 51: SaturnLight – Beispiel eines Zuglokalisierungssystems der DB-AG in Kombination von GPS mit Inertialsensorik [Rails01].

3.9.1.12 Übersichtsmatrix Ortungssensoren zur Lokalisierung von Zügen

	Odometer	VSB-Radar	Gleiskontakt Achszähler	Balise, induktiver Transponder	Gleisstromkreise	Achszählkreise	Linienleiter- schleife	Wirbelstrom- sensor	GNSS-basierte Systeme
Ortsinformation liegt vor									
Absolut			X	X	X	X	X		X
Relativ	X	X						X	
Punktförmig			X	X			X		
Kontinuierlich	X	X						X	X
Abschnittsweise					X	X			
Störanfälligkeit durch									
Signalabschattung									X
Elektromagnetische Einflüsse		X	X			X		X	
Radform / -größe	X		X			X			
Fahrgeschwindigkeit		X						X	
Witterungseinflüsse					X			X	X
Schlupf	X								
Mechanische Einflüsse			X			X			
Informationsübertragung an das Fahrzeug									
Funksignale				X			X		X
Fahrzeugseitige Signalgewinnung	X	X						X	
Streckenseitige Signalgewinnung ohne Fahrzeugbeteiligung			X		X	X			
Komponenteninstallation									
Streckenseitig			X	X	X	X	X		
Fahrzeugseitig	X	X		X			X	X	X

Tabelle 12: Übersichtsmatrix über die Eigenschaften diverser Ortungssensoren im Schienenverkehr

3.9.2 Lokalisierung von Straßenfahrzeugen

Die im Bereich der Straßenfahrzeuge eingesetzten Ortungssysteme hängen im Wesentlichen von der Art der Anwendung ab, insbesondere ob es sich um sicherheitskritische (z.B. Fahrerassistenzsysteme) oder nicht sicherheitskritische (z.B. Informations- und Mobilitätsdienste) Anwendungen handelt. Primär kommen in Straßenfahrzeugen heute auf GPS basierende Ortungssysteme zum Einsatz. Da diese in Abschnitt 2.1.1 ausführlich beschrieben werden, wird an dieser Stelle auf eine Wiederholung

verzichtet. Zur Verbesserung von Genauigkeit, Verfügbarkeit und Integrität kommen konsequenterweise auch die in Abschnitt 2.2ff genannten GNSS-Ergänzungssysteme zum Einsatz. Die Bauform der Navigationsgeräte bestimmt dabei in wesentlichem Ausmaß die Integrationsfähigkeit mit anderen Ortungssystemen im Fahrzeug. Bei der Bauform lassen sich vier verschiedene Auslegungen unterscheiden [ADAC06]:

- Ab Werk eingebaute Navigationsgeräte
- Nachrüstgeräte für den Festeinbau
- Mobile Navigationsgeräte
- Navigations-Handys.

In der Regel können nur bei den ersten beiden der oben genannten Ortungsinformationen anderer Sensoren in eine verbesserte Positionsgesamtlösung integriert werden. Dabei spielt es keine Rolle, ob es sich um *off-board* oder *on-board*-Navigationsgeräte handelt – die Positionsermittlung erfolgt in beiden Fällen on-board, lediglich für die Zielführungskomponente, d.h. für die Berechnung der Route ergibt sich dadurch ein Unterschied. Fahrzeugseitig vorhandene weitere Sensoren, speziell Drehratensensoren und Tachosignale, sind in der Kraftfahrzeugortung häufig integrierte Technologien. Sie sind insbesondere zur Überbrückung von kurzen GNSS Signalausfällen (z.B. in Tunneln) geeignet, ermöglichen jedoch im Allgemeinen keine eigenständige Ortung.

3.10 Sensoren und Prozessierung zur Unterstützung der Navigation in Flugzeugen (Lande-anflug)

Zur Navigation in Flugzeugen kommt eine Vielzahl von Systemen und Sensoren zum Einsatz [KayFr97]. Dies sind zum einen die bereits in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Systeme wie die satellitenbasierten Systeme GPS/Galileo/etc. (siehe Kapitel 2.1) und deren Ergänzungen SBAS und GBAS (siehe Kapitel 2.2) sowie die Trägheitsnavigationssysteme (siehe Kapitel 3.4) als auch speziell für den Flugverkehr entwickelte Navigations- und Ortungssysteme wie z.B. das Höhenradar, mehrere konventionelle terrestrische Radionavigationssysteme und einige speziell zur Unterstützung des Landeanflugs konzipierte Systeme. Je nach Flugzeugtyp und Einsatzart ist dabei die Ausstattung eines Flugzeuges mit bestimmten Navigationssystemen verpflichtend vorgeschrieben. Zusammenfassend lassen sich die verwendeten Systeme entsprechend [KayFr97] gruppieren:

- GNSS, SBAS, GBAS, RAIM, AAIM
- Inertialnavigation
- Terrestrische Radionavigation: VOR, DME, *Tactical Air Navigation* (TACAN)
- Baro-Altimeter
- Kompass, Magnetometer
- Doppler und Höhenradar
- Landesysteme: ILS, MLS

Einige dieser Komponenten werden im Folgenden genauer betrachtet.

3.10.1 Integrierte INS/GNSS Navigationssysteme

Heutzutage werden in den meisten Flugzeugen standardmäßig die Navigationskomponenten GNSS, Trägheitsplattform und Baro-Altimeter als integriertes INS/GNSS Navigationssystem betrieben (siehe Kapitel 3.4.4). Besonderer Fokus liegt bei diesen fusionierten Systemen insbesondere beim Einsatz im Landeanflug darauf, mögliche Fehlfunktionen der Teilkomponenten mittels geeigneter statistischer Verfahren zu detektieren und gegebenenfalls auszuschließen, um die Integrität der Positionsbestimmung im erforderlichen Rahmen gewährleisten zu können. Im Wesentlichen kommen dabei die in Kapitel 2.4 beschriebenen Integritätskonzepte zum Einsatz. Da die zugrundeliegenden

Technologien und Konzepte bereits in den vorangegangenen Kapiteln ausführlich beschrieben wurden, wird für diese Systeme hier auf eine weiterführende Beschreibung verzichtet und auf die oben genannten entsprechenden Kapitel verwiesen.

3.10.2 Terrestrische Radionavigationssysteme für den Flugverkehr

Des Weiteren existieren noch die konventionellen Radionavigationssysteme für den Flugverkehr, die durch die weitgehende Verbreitung der hybriden INS/GNSS Systeme mehr und mehr obsolet werden. Neben hyperbolischen Systemen wie z.B. LORAN und OMEGA [KayFr97], die heute durch die Verfügbarkeit von GNSS stark an Bedeutung verloren haben sind die wichtigsten terrestrischen Radionavigationssysteme für den Flugverkehr das *Very-High-Frequency Omnidirectional Range* (VOR) und das *Distance-Measuring Equipment* (DME). Durch den kontinuierlich vorangetriebenen Ausbau und die Verbesserung der satellitenbasierten Systeme ist aber abzusehen, dass auch das DME und insbesondere das VOR in Zukunft mehr und mehr an Bedeutung verlieren werden.

3.10.2.1 VHF Omnidirectional Range (VOR)

Das VOR arbeitet im Frequenzbereich von 108 bis 118 MHz und erlaubt die Bestimmung des Richtungswinkels in Bezug zur VOR Bodenstation. Das Funktionsprinzip ist dabei ähnlich zu dem eines Leuchtturmes. Die VOR Bodenstation sendet ein mit 30 Umdrehungen/Sekunde rotierendes gerichtetes Signal aus, das im Empfänger ein mit 30 Hz amplitudenmoduliertes Signal erzeugt. Des weitem strahlt die Bodenstation ein mit 30 Hz frequenzmoduliertes omnidirektionales Signal aus. Der Phasenunterschied aus beiden mit 30 Hz modulierten Signalen wird dazu benutzt, um den Richtungswinkel zu bestimmen.

3.10.2.2 Distance-Measuring Equipment (DME)

Das DME ist ein System, mit dem ein Flugzeug seine Entfernung zu einer DME Bodenstation bestimmen kann. Das DME arbeitet im Frequenzbereich von 960 bis 1215 MHz. Die DME Komponente im Flugzeug sendet dabei wiederholt auf 126 Bändern, die im Abstand von 1 MHz im Bereich von 1025 bis 1150 MHz liegen, jeweils ein Paar von zwei 3,5 μ s dauernden Pulsen im Abstand von 12 μ s. Werden diese Pulse von einer DME Bodenstation empfangen, werden diese nach einer festen Verzögerung von 50 μ s im Abstand von 63 MHz ober- oder unterhalb der vom Flugzeug gesendeten Frequenz zurückübertragen. Der Empfänger vergleicht nun nach Abzug der 50 μ s Verzögerungszeit die Zeit zwischen Senden und Empfangen des Doppelpulses, um die Entfernung zur DME Bodenstation bestimmen.

3.10.3 Landesysteme

Landesysteme sind dedizierte Navigationssysteme zur Durchführung des Landanfluges. Das am weitesten verbreitete Landesystem ist das *Instrument Landing System* (ILS). Weniger weit verbreitet ist eine Weiterentwicklung des ILS, das sogenannte *Microwave Landing System* (MLS). Für die Anwendung im Rahmen des Landanfluges bei Bedingungen, die eine besonders hohe Präzision erfordern, wie z.B. die Landung ohne Sicht, sind die heute verfügbaren hybriden INS/GPS Systeme noch nicht in der Lage die Anforderungen bezüglich Genauigkeit, Integrität, Verfügbarkeit und Kontinuität zu erfüllen. Deshalb werden die Landesysteme ILS/MLS auch in Zukunft noch von Bedeutung sein. Es gibt allerdings Bestrebungen auf längere Sicht hin die konventionellen Landesysteme ILS/MLS durch kombinierte INS/GPS/Galileo Systeme zu ersetzen [ANA05], die dann aufgrund der Kombination der beiden Satellitennavigationssysteme GPS und Galileo und durch den Einsatz entsprechender Augmentierung mittels SBAS/GBAS dann in der Lage sind, die erforderliche Leistung zu erzielen.

3.10.3.1 Instrument Landing System (ILS)

Das ILS System besteht im Wesentlichen aus zwei Bodenkomponten die benutzt werden, um das Flugzeug während des Landeanfluges sowohl vertikal als auch lateral zu leiten. Der sogenannte *Localizer* ist am Ende der Landebahn installiert und leitet das Flugzeug in der lateralen Richtung. Für die vertikale Komponente ist der *Glide Slope* seitlich der Landebahn installiert. Hinzu kommen noch sogenannte *Marker Beacos* bzw. Einflugzeichen entlang des Anflugpfades.

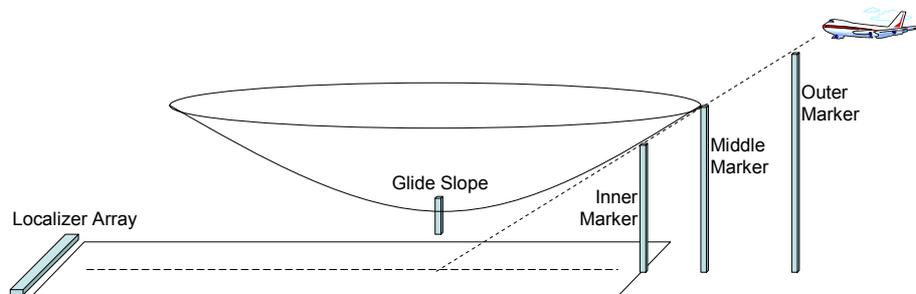


Abbildung 52: Schema eines ILS.

Im Wesentlichen werden dabei aus den empfangenen Signalen die Leitinformationen „rechts“, „links“, „oben“ und „unten“ gewonnen. Der *Localizer* arbeitet im Frequenzbereich von 108,10 MHz bis 111,95 MHz sendet ein mit 90 Hz und 150 Hz ober- und unterhalb des Trägers amplitudenmoduliertes Signal jeweils in einem im Summen- und Differenzmodus aus. Das empfangene Signal wird im Flugzeug zur Gewinnung der lateralen Leitinformation genutzt. Details hierzu sind in [KayFr97] verfügbar. Der *Glide Slope* Sender arbeitet im Frequenzbereich von 328 MHz bis 336 MHz und beruht auf dem selben Funktionsprinzip wie der *Localizer*, ist aber vertikal ausgerichtet.

3.10.3.2 Microwave Landing System (MLS)

Das MLS wurde ursprünglich als Nachfolgesystem zum ILS konzipiert, um dessen Schwächen zu beseitigen. Das MLS wurde zwar 1984 standardisiert, hat aber bis heute keine weitergehende Verbreitung gefunden, da in der Vergangenheit die satellitenbasierten Landesysteme als Nachfolger zum ILS System mehr und mehr fokussiert wurden. Das MLS arbeitet im Frequenzbereich von 5031,0 MHz bis 5190,7 MHz und enthält neben zweier Komponenten zur Bestimmung des Elevations- und Azimutwinkels als weitere Komponente auch ein Präzisions-DME, das sogenannte DME/P zur Entfernungsbestimmung. Details zum MLS finden sich in [KayFr97].

4. Weitergehende technologische Aspekte

4.1 Grundlagen der Sensordatenfusion für hochgenaue und zuverlässige Positionierungssysteme

4.1.1 Einleitung

Wie in Abschnitt 1.2 dargestellt, verwendet man heutzutage unterschiedliche Sensoren und Systeme um die Aufgabe der Positionierung so zuverlässig und genau wie möglich durchzuführen. Bedenkt man, dass Sensoren unterschiedliche Eigenschaften haben, dann wird klar, dass es keine einfache Aufgabe ist, die Sensordaten so zusammenzuführen, um daraus die Position auf optimale Art und Weise zu gewinnen. Mit diesem allgemeinen Problem befasst sich ein Teilgebiet der angewandten Mathematik und Statistik: die statistische Schätztheorie (*Statistical Estimation Theory*). Hat man es wie in der sensorbasierten Positionierung, mit der Schätzung von unbekanntem Größen (der Position) zu tun, die als gemessene, aber fehlerbehaftete Sensordaten vorliegen, dann spricht man von der Sensordatenfusion (kurz Sensorfusion).

Grundsätzlich kann man die Sensordatenfusion zwei Kategorien zuordnen, hinsichtlich der zeitlichen Dynamik des Schätzproblems. Hat man es mit einer statischen Schätzung zu tun, d.h. mit einer einmaligen Schätzung oder wenn sich die Position nicht ändert, dann ist die Schätzung mathematisch meist einfacher zu formulieren und praktisch durchzuführen. Handelt es sich um eine dynamische Schätzung, also beim stetigen Positionieren eines bewegten Subjektes, muss man die mögliche physikalische Bewegung sowie die zeitlichen Eigenschaften der Sensoren berücksichtigen, um die Schätzung möglichst optimal durchzuführen.

Ein Beispiel mag dies verdeutlichen: Es stehen nur ein GPS-Empfänger und ein elektronischer Kompass als Sensoren zur Verfügung. Ist nur eine einzige Messung von GPS-Sensor und Kompass als Schätzgrundlage für die Position verfügbar (statische Sensorfusion), so nützt einerseits die Sensorfusion zwischen Kompass und GPS-Empfänger gar nichts, da die Bewegung des Subjektes nicht ausgenutzt werden kann. Die Situation ist jedoch anders, wenn anzunehmen ist, dass es sich bei dem Subjekt um ein Fahrzeug handelt, dass der Kompass mit der Fahrzeugachse ausgerichtet ist, das Fahrzeug einen gewissen Wendekreis aufweist, und insbesondere wenn eine Sequenz von GPS- und Kompass-Messungen vorliegt. In diesem Fall kommt die dynamische Sensorfusion zur Anwendung und folgendes kann festgestellt werden:

1. Das Fahrzeug unterliegt einer eingeschränkten physikalische Bewegungsmöglichkeit (Dynamik und Kinematik angewandt auf die Bewegung des Fahrzeuges)
2. Daraus kann man schließen, dass sich das Fahrzeug zwischen zwei aufeinanderfolgenden Messungen nur „in bestimmten Bahnen“ bewegen kann, und somit der Kompass, i.d.R nur gewisse maximale Richtungsänderungen pro Messung anzeigen wird.
3. In diesem Fall bringt die Verbindung von Kompass mit dem GPS-Empfänger einen Gewinn. D.h. dass die Verwendung beider Sensoren die Genauigkeit der Position (und der Richtung) verbessern wird. Man stelle sich zunächst vor, dass GPS einige Messungen lang aussetzt. Greift man aber auf den Kompass zurück, so kann man die Bewegungsrichtung des Fahrzeuges abschätzen, und damit auch dessen Position – im Rahmen der möglichen Geschwindigkeitsänderungen bedingt durch physikalisch mögliche Fahrmanöver. Diese Synergie gilt auch dann, wenn beide Sensoren Daten liefern: ein Kompass hilft bei der Schätzung der Position und der GPS-Empfänger hilft bei der Schätzung der Bewegungsrichtung.
4. Insbesondere sei erwähnt, dass die Synergie zwischen Kompass und GPS-Empfänger in diesem Beispiel auch dann gilt, obwohl der Kompass keine Positionsinformation liefert, und eine GPS-Messung keine Richtungsinformation darstellt. Intuitiv ausgedrückt: Kompass und GPS-Sensor „tauschen sich über die Einschränkung der Fahrzeugbewegung aus“.

-
5. Selbst wenn beide Sensoren keine Daten liefern kann die Position zumindest kurzzeitig (statistisch) geschätzt werden.
 6. Es sind die Sensormessungen – zeitlich gesehen – voneinander statistisch abhängig (miteinander verbunden).

Es ist wichtig anzumerken, dass bei der statischen Sensorfusion durchaus Synergien zwischen den Sensoren entstehen können (obwohl dies im obigen Beispiel nicht der Fall war). So sind zwei mehr oder weniger unabhängig gestörte Positionsschätzer (z.B. Mobilfunkortung und Ortung mit GPS) in der Lage sich zu ergänzen. Das Problem der Unabhängigkeit der Störungen und Fehler von Sensoren ist ein zentrales: zwei GPS-Empfänger welche von derselben Antenne gespeist werden sind nur marginal in ihren Fehlern unabhängig. Wenn sie an örtlich getrennten Antennen angeschlossen sind dann können sie sich zum Teil ergänzen (sogenannte „Antennen-Diversität“). Am Beispiel der Kombination von Mobilfunkortung und GPS wird aber klar, dass gerade in kritischen Umgebungen beide Systeme gleichzeitig gestört werden können: In einem Tunnel ist davon auszugehen, dass beide Systeme mit einer hohen Wahrscheinlichkeit keine oder nur sehr ungenaue Positionsinformationen liefern können.

4.1.2 Vorbereitung der Mathematischen Betrachtungsweise

In obiger Einleitung wurde versucht, einige der Vorteile der Sensorfusion für die Positionierung intuitiv darzustellen. Hierbei wurden folgende Eigenschaften des Schätzproblems verdeutlicht:

1. Die Verwendung der Bewegungseinschränkung des Subjektes ist ein integraler Bestandteil der Schätzung und führt zu qualitativen und quantitativen Unterschieden zum statischen Fall.
2. Unterschiedliche Sensoren können sich gegenseitig Ergänzen, auch wenn sie nicht dieselbe Art der Information liefern. Solche Synergien sind manchmal erst nach einigen Überlegungen (oder sogar numerischen/analytischen Untersuchungen) erkenntlich.
3. Sensoren ergänzen sich am besten wenn ihre Fehler möglichst unabhängig (im statistischen Sinne) sind.

Die mathematische Formulierung der Schätztheorie versetzt uns einerseits in die Lage die Voraussetzungen und Randbedingungen des Schätzproblems formal zu erfassen, und zweitens lässt sie uns die bestmöglichen Schätzverfahren herleiten. Oft ist es so, dass die optimalen Verfahren aus Komplexitätsgründen nicht umsetzbar sind, so dass geeignete Näherungen gefunden werden müssen, mit möglichst geringen Abschlägen in der Performance. Es ist wichtig, sich vor Augen zu führen, dass in der Praxis aus zwei Gründen die Performance unter der bestdenkbaren Marke des Möglichen liegen wird:

1. Die angenommenen Randbedingungen und Modellvoraussetzungen gelten für das wirkliche Problem nur näherungsweise.
2. Aufgrund der (numerischen) Komplexität sind nur Näherungen an optimale Algorithmen anwendbar.

In der Regel sind die Fehlerquellen der ersten Kategorie problematischer, im Sinne der Sicherheit und Zuverlässigkeit der Positionierung, da sie weniger gut in ihren Auswirkungen erfassbar sind. Um dies zu verdeutlichen sei das Beispiel des Funksignalempfangs von Mobilfunk und GPS im Tunnel nochmals herangezogen. Wenn man eine „Welt ohne Tunnel“ (oder ähnliches) vorsieht, bei der GPS und Mobilfunk gleichzeitig ausfallen können, dann wird man weitaus bessere Ergebnisse erwarten als in einem realistischen Szenario. Glücklicherweise ist es in der Praxis gerade häufig so, dass sich die Sensoren in ihren Stärken und Schwächen ergänzen, aber eine ehrliche Analyse muss „unglückliche“ Umstände und Szenarien bewerten, vor allem wenn sie die Modellvoraussetzungen verletzen. Zur besseren Modellierung der Zusammenhänge helfen auch Methoden aus dem Bereich der Robustheitsanalyse komplexer Systeme.

In der zweiten Kategorie hilft uns die Tatsache, dass die Leistungsfähigkeit der Datenverarbeitung stetig steigt, und somit viele Algorithmen besser zur Anwendung kommen können. Ferner ist es oft möglich zumindest den praktisch erlittenen Verlust an Performance quantitativ zu erfassen.

4.1.3 Mathematische Formulierung als Schätzproblem

4.1.3.1 Statischer Schätzer (statische Sensorfusion)

Es ist für den statischen Fall relativ leicht den optimalen Schätzer herzuleiten, sofern es sich um unabhängige Positionsquellen handelt. Grundlage für die Herleitung ist die Formulierung der Positionsquellen als Zufallsvariablen gemäß einer Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (WDF) oder *Probability Density Function* (PDF).

Positionsmessungen kann man mithilfe von Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen formulieren:

Ein Positionssensor als Quelle für Positionsinformationen kann man auf zweierlei Art und Weise auffassen:

Die Quelle gibt die von ihr geschätzte Position, in einem definierten Koordinatensystem aus, ohne Angaben von weiteren (Zuverlässigkeits-)Informationen, z.B. als WGS-84 Koordinaten.

Die Quelle berechnet eine bedingte Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (WDF):

$$p(x, y, z | d).$$

Zum zweiten Ansatz: bei x , y und z handelt es sich um die Ortskoordinaten, und d stellt die Messgrundlage des Positionssensors dar. Der Term d ist wichtig, denn er kennzeichnet die Tatsache, dass es sich um den Sensor handelt, der eben die Messgrundlage d verwendet. Beim GNSS-Empfänger beispielsweise könnte es sich bei d um die Signale der gerade empfangbaren Satelliten handeln.

Für die weitere Verarbeitung oder Nutzung dieser Wahrscheinlichkeitsdichte ist aber die genaue Spezifikation von d meist nicht von Bedeutung. Vielmehr verwendet man den Wert oder die „Höhe“ der WDF für verschiedene Werte von x , y und z . So stellt die WDF die (Bayessche) Wahrscheinlichkeit dar, die angibt, dass sich die tatsächliche Position in der unmittelbaren Nähe von x , y und z befindet, mit dem Wissen, dass es sich um den Positionssensor mit der Messgrundlage d handelt. Orts-Gebiete bei der die WDF einen hohen Wert aufweist, stellen also dar, dass die geschätzte Position mit höherer Wahrscheinlichkeit an dieser Stelle ist. Die Position (x, y, z) an der die WDF ihren höchsten Wert hat nennt man die *Maximum a-Posteriori (MAP)* -

Wenn man nun eine gewisse Anzahl an Sensoren zur Verfügung hat, dann kann man die WDF dieser unabhängigen Sensoren zusammenführen, siehe z.B. [HROW07]. Dies ist nur möglich sofern alle WDF über denselben Positionsraum aufgespannt sind. Die Aufgabe lautet verbal ausgedrückt wie folgt:

„Gegeben die Positions-Schätzung vieler unabhängig gestörter Positionsquellen, ist die Position zu schätzen wenn die Informationen von *allen* Positionsquellen bekannt sind.“

Oder etwas präziser ausgedrückt:

„Gegeben die Positions-Schätzung vieler unabhängig gestörter Positionsquellen, in Form von jeweils ihrer bedingten Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (WDF) der Position, ist die resultierende WDF der Position zu bestimmen, wenn die *Messgrundlagen aller* Positionsquellen bekannt sind.“

Man kann zeigen, dass eine einfache Multiplikation der WDF zum optimalen Gesamtschätzung führt, siehe hierzu Abbildung 53: Die beiden hier zu multiplizierenden WDF sind im zweidimensionalen Raum dargestellt, und jeweils auf zwei unterschiedliche Weisen graphisch dargestellt. Beide WDF decken denselben Koordinatenbereich von x und y ab. Das Ergebnis der Multiplikation zeigt deutlich, dass die Position nur an der Stelle eine hohe Wahrscheinlichkeit aufweist, an der beide beitragenden WDFs hohe Werte aufweisen: die Positionsunsicherheit ist in diesem Beispiel somit deutlich eingengt worden.

Kombination verschiedener Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen von mehreren unabhängigen Positionsquellen:

Gegeben sind N unabhängige Positions-Schätzungen von gestörten Positionsquellen, in Form ihrer bedingten Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen (WDF) der Position:

$p(x, y, z | d_i)$ (die WDF für die i -te Positionsquelle; wobei $1 \leq i \leq N$),

Zu bestimmen ist die resultierende WDF der Position mit den bekannten Messgrundlagen d aller Positionsquellen.

Man kann zeigen, dass unter bestimmten Umständen gilt:

$$p(x, y, z | d_1, \dots, d_i, \dots, d_N) = k \cdot \prod_{i=1}^N p(x, y, z | d_i),$$

wobei k eine Proportionalitätskonstante ist, und durch Normalisierung – Integration der WDF über die Ortskoordinaten – bestimmt werden kann. Man erkennt, dass die Multiplikation der einzelnen WDF notwendig ist, um zur optimalen Gesamt-WDF zu gelangen.

Für obige Darstellung wurde die Annahme getroffen, dass die Position a-priori an allen Stellen gleich wahrscheinlich ist. Für den Fall, dass dies nicht gilt, gibt es eine einfache Erweiterung obiger Gleichung.

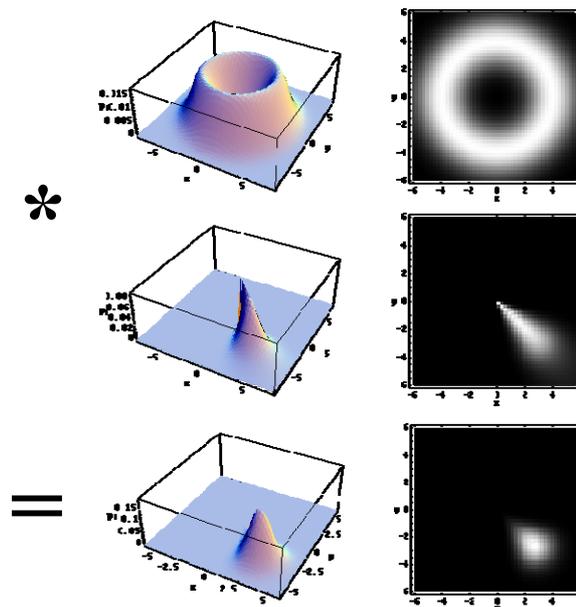


Abbildung 53: Schematisches Beispiel der Verknüpfung zweier unabhängig gestörter, statischer Positionsquellen. Die obere Quelle könnte eine Funkbasierte Abstandsmessung darstellen, die untere eine Sektorantennenauswertung eines Mobilfunkortungssystems. Die multiplikative Verknüpfung der beiden Wahrscheinlichkeitsdichten (mit anschließender Normierung) ergibt eine deutlich kleinere Unschärfe der Position in x und y [AKR+01].

4.1.3.2 Dynamischer Schätzer (dynamische Sensorfusion)

Der dynamische Fall unterscheidet sich deutlich vom oben erläuterten statischen Fall: dies liegt daran, dass die Bewegung des Subjektes berücksichtigt werden muss. Es ist nämlich so, dass die Bewegung und der Ort zu einem Zeitpunkt von der Vergangenheit dieser Parameter abhängt. So kann ein Mensch nicht beliebig schnell laufen oder seine Richtung drehen. Jedes zu ortende Subjekt unterliegt ganz spezifischen Einschränkungen der Bewegung (siehe nächster Abschnitt für eine genaue Betrachtung des Falls für Fußgänger).

Um das vorliegende Problem anzugehen werden folgende Annahmen zur Modellbildung getroffen:

1. Die Zeitachse wird diskretisiert, d.h. in kurze (gleich lange) zeitliche Intervalle unterteilt.
2. Die Zukunft (im Sinne des Ortes bzw. der Bewegung des Subjektes) kann nicht auf die Gegenwart oder Vergangenheit (im Sinne des Ortes bzw. der Bewegung des Subjektes) einwirken (Kausalität).
3. Da die Vergangenheit (im Sinne des Ortes bzw. der Bewegung des Subjektes) jedoch die Gegenwart und Zukunft beeinflusst, muss dies mathematisch im Modell abgebildet werden. Um das zu tun, wird in dem Modell der Teil der Vergangenheit als Teil der Gegenwart betrachtet, der die Zukunft beeinflussen kann. Anders angedrückt: Das Modell bildet zu jedem Zeitpunkt alle vergangenen und gegenwärtige Parameter ab, die auf die Zukunft einwirken können. Formal handelt es sich um ein Markov-Modell erster Ordnung. Diese Parameter bezeichnet man als Zustand (*State*).
4. Alle Sensor-Messungen werden für einen Zeitpunkt zusammengefasst (ohne Einschränkung der Allgemeinheit).

In Abbildung 54 ist ein solches Markov-Modell dargestellt, in dem unbekannte Zustände x_k (in unseren Anwendungen sind dies die Positions- bzw. Bewegungs-Parameter des Subjektes) zu jedem Zeitpunkt geschätzt werden müssen. Als Schätzgrundlagen dienen die Sensor-Messungen aller zur Verfügung stehenden Sensoren, z_k (*Measurements*) zu jedem Zeitpunkt mit dem Zeitindex k . Das Modell ist die Grundlage für die Anwendung verschiedener Schätzverfahren, je nach Eigenschaften der Systemparameter.

Beschreibung des Markov-Modells aus Abbildung 54:

Formal hängen die Sensor-Messungen z_k jeweils nur vom derzeitigen Modell-Zustand x_k ab.

Diese Abhängigkeit der Messung z_k vom Systemzustand x_k wird über das Mess-Modell (*Measurement Model*) dargestellt: $z_k = h_k(x_k, n_k)$. Der Term n_k stellt einen unbekanntem „weißen“ Rauschanteil dar, der die Messunsicherheit abbildet.

Die Kunst in der Beschreibung der zur Verfügung stehenden Sensoren liegt in der akkuraten Bestimmung der oftmals nichtlinearen Funktion $h_k()$ und der statistischen Eigenschaften des Rauschens n_k . Als alternative und äquivalente Repräsentation dient die probabilistische Form $p(z_k | x_k)$. Diese bedingte WDF beschreibt die Wahrscheinlichkeitsdichte der Sensor-Messungen wenn der Systemzustand x_k bekannt ist.

Die Aufgabe des Bewegungsmodells (*Movement Model*) ist es, die Funktion $x_k = f_k(x_{k-1}, v_{k-1})$ bzw. die bedingte WDF $p(x_k | x_{k-1})$ zu bestimmen und zu beschreiben. Das Bewegungsmodell gibt an, wie der neue System-Zustand x_k vom alten Zustand x_{k-1} abhängt; auch hier ist $f_k()$ eine (nichtlineare) Funktion des alten Zustandes und des Rauschwertes v_{k-1} . Die Eigenschaften dieses Prozess-Rauschens v_{k-1} bestimmen wie zufällig die Bewegung des Subjektes ist.

Bis jetzt ist das dargestellte Modell allgemeingültig formuliert. In dem praktischen Einsatz muss genau festgelegt werden, aus was sich der System-Zustand zusammensetzt. Typischerweise wird dieser den Ort und weitere Bewegungsparameter des Subjektes umfassen, sowie notwendige inneren System-Zustände der Sensoren (z.B. Güte der GNSS-Signale). Ebenso müssen die Messungen alle zur Verfügung stehenden Sensoren umfassen. Der Schritt vom allgemeingültig formulierten Modell zum spezifischen ist nicht keinesfalls und erfordert vom Systementwickler genaue Kenntnisse der zugrundeliegenden Zusammenhänge.

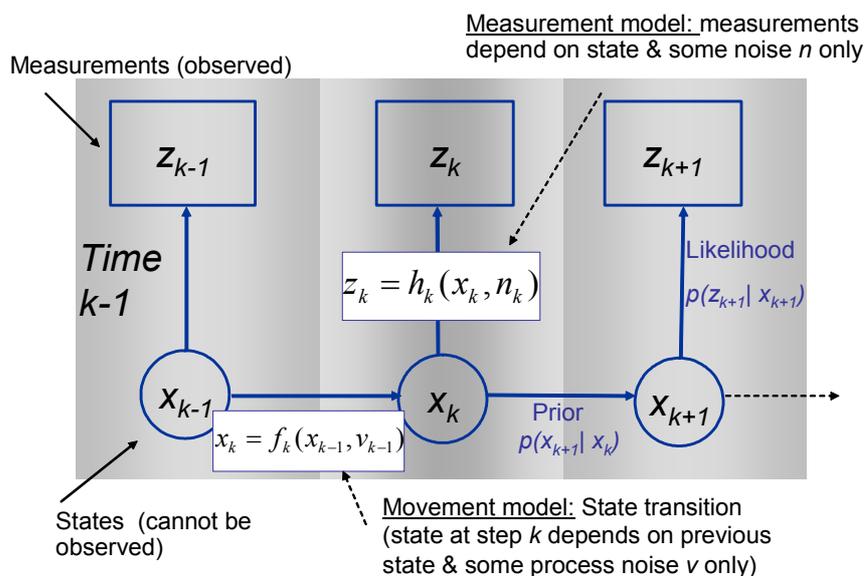


Abbildung 54: Darstellung des Dynamischen Schätzproblems als *Hidden Markov-Modell* erster Ordnung. Die Pfeile stellen kausale Abhängigkeiten dar (Einflussrichtung ist entlang der Pfeilrichtung) [Rob07a].

Zusammenfassung des Bayesschen Schätzers:

Wenn die Systemparameter bekannt sind, also die Funktionen bzw. WDFs $p(x_k | x_{k-1})$, $f_k(x_{k-1}, v_{k-1})$, $h_k(x_k, n_k)$, und $p(z_k | x_k)$ vom Systementwickler festgelegt wurden, dann kann man im Systembetrieb eine automatische Bayessche Schätzung der unbekannt Systemzustände x_k durchführen. Aufgabe ist es, die bedingte Wahrscheinlichkeit

$$p(x_k | z_1, \dots, z_k)$$

zu bestimmen. Mit anderen Worten: Die Wahrscheinlichkeit des Systemzustands (also Position und andere Bewegungs-Parameter) in Abhängigkeit aller zur Verfügung stehenden Messungen von allen Sensoren soll bestimmt werden. Diese bedingte WDF nennt man den Posterior. Im Anschluss daran kann man entweder die Position bestimmen für die $p(x_k | z_1, \dots, z_k)$ den größten Wert aufweist (Maximum a-Posteriori-Schätzung, MAP) oder den Mittelwert des Posteriors (entspricht dem sog. *Minimum Mean Square Error* Schätzwert).

Um $p(x_k | z_1, \dots, z_k)$ zu berechnen müssen vom Bayesschen Schätzer zu jedem Zeitpunkt k folgende zwei Berechnungs-Schritte durchgeführt werden:

$$p(x_k | z_1, \dots, z_{k-1}) = \int p(x_k | x_{k-1}) p(x_{k-1} | z_1, \dots, z_{k-1}) dx_{k-1}$$

$$p(x_k | z_1, \dots, z_k) = \alpha_k p(z_k | x_k) p(x_k | z_1, \dots, z_{k-1})$$

Den ersten Schritt nennt man *Prediction Step*, denn es wird die Schätzung des neuen Systemzustands durchgeführt. Im zweiten Schritt (dem sogenannten *Update Step*) werden die aktuellen Sensormessungen verwendet, um die Schätzung zu korrigieren. Der Algorithmus ist somit ein sequentieller Schätzer, da in jedem Zeitschritt k das „alte“ Ergebnis vom letzten Schritt $k-1$ verwendet wird (hier: $p(x_{k-1} | z_1, \dots, z_{k-1})$).

Da der Bayessche Schätzer ein Integral lösen muss, ist es im Allgemeinen nicht mathematisch geschlossen darstellbar. Es gibt zwei generelle Ansätze um dieses Problem zu lösen, die im nächsten Abschnitt behandelt werden:

1. Durch numerische Integrationsverfahren
2. Durch Annahmen bzw. Näherungen des Modells kann das Integral geschlossen gelöst werden

4.1.3.3 Kalman-Filter und Sequentielle Monte-Carlo-Filter (*Particle-Filter*)

In diesem Abschnitt werden kurz zwei Algorithmen vorgestellt, welche geeignet sind, das im letzten Abschnitt genannte Problem der Integration zu lösen.

4.1.3.3.1 Kalman-Filter und Derivate

Der Kalman-Filter und seine Derivate gehören zur Klasse der Zustandsschätzer (oder dynamische Schätzer), da sie kontinuierlich mit der Zeit einen Parametervektor, den Zustand eines Systems, schätzen. Die Modellbasis stellen zwei zeitvariante Gleichungen dar, die System- und die Messgleichung [Hae01] (bzw. Begegnungsmodell $f_k(\cdot)$ und Messmodell $h_k(\cdot)$), die zusammen ein Hidden Markov-Modell erster Ordnung abbilden (siehe Abbildung 54).

Markov-Modell beim Kalman-Filter

Wie die Bayesschen Schätzer basiert auch der Kalman-Filter und seine Derivate auf zwei Gleichungen, der System- und der Messgleichung. Die Systemgleichung stellt im Wesentlichen eine Vorhersage für den aktuellen Parametervektor x_k zum Zeitpunkt k dar (im Sinne der Positionierung, das Bewegungsmodell), während die Messgleichung die Beobachtung z_k des Parametervektors darstellt. Beide Gleichungen beinhalten Rauschterme um Messrauschen n_k als auch Fehlmodellierungen v_{k-1} einzubeziehen.

	Kalman	EKF / UKF
Systemgleichung	$x_k = Ax_{k-1} + Qv_{k-1}$	$x_k = f_k(x_{k-1}, v_{k-1})$
Messgleichung	$z_k = Hx_k + Rn_k$	$z_k = h_k(x_k, n_k)$

Der Kalman-Filter basiert auf linearen Abbildungen, wie durch die Matrizen A und H veranschaulicht (können gegebenenfalls auch zeitvariant sein). Q und R stellen Matrizen dar, die eine Färbung der Rauschvektoren v_{k-1} und n_k modellieren können.

Beim EKF und UKF werden die System- und Messgleichungen durch die eventuell nichtlinearen Funktionen $f_k(\cdot)$ und $h_k(\cdot)$ dargestellt.

Der wohl bekannteste Zustandschätzer ist der Kalman-Filter entwickelt von Kalman in 1960 [Kal60]. Er basiert auf einem linearem Modell und Normalverteiltem System- und Messrauschen (v_{k-1} und n_k), das zudem mittelwertfrei und weiß (mit konstantem Leistungsdichtespektrum) sein muss. Sind diese Annahmen gewährleistet, stimmt das angenommene Modell also mit der Wirklichkeit überein, stellt das Kalman-Filter einen konsistenten Schätzer dar [Wen07], der die Maximum A-Posteriori (MAP) Schätzung für den Parametervektor des Systems x_k zum Zeitpunkt k liefert.

Der Filteralgorithmus basiert darauf, dass das mittlere Fehlerquadrat des MAP-Schätzwerts minimiert wird. Da dieses als Moment zweiter Ordnung sowohl den systematischen Fehler (Mittelwert des Fehlers) als auch den zufälligen Fehler einschließt, werden sowohl das erste (Mittelwert), als auch das zweite zentrale Moment (Varianz) des Fehlers minimiert. Aufgrund der Annahme eines linearen Systems und normalverteilten Rauschvektoren, wird die Gaußsche Wahrscheinlichkeitsdichte des Fehlers damit auf Null zentriert und die Breite minimiert.

Der Filteralgorithmus propagiert den Mittelwert der MAP-Schätzung (der Wert selbst) und dessen Kovarianzmatrix. Aufgrund der Linearität des Systems und rein Gaußverteilten Störquellen ist auch die Schätzung des Filters normalverteilt.

Die Einschränkung auf ein lineares System beim Kalman-Filter schließt viele in der Praxis existierende Schätzprobleme aus, weshalb meist der *Extended Kalman-Filter* (EKF) [Gel74] anstelle des Kalman-Filters verwendet wird. Hierbei werden nichtlineare Systeme durch eine Taylorreihe bis zur ersten Ordnung approximiert. Im Wesentlichen betrifft dies die Berechnung der Kovarianzmatrix, die mit Hilfe der Jacobi-Matrizen zeitlich propagiert wird.

Durch die Taylorreihen – Approximation ergeben sich verschiedene Nachteile, die zu einer Suboptimalität des EKF führen, soweit das System nichtlinear ist. Zum einen vernachlässigt der EKF Terme höherer Ordnung der Taylorreihenentwicklung, zum anderen bewirkt die Nichtlinearität im System einen nicht normalverteilten Fehler, der innerhalb des Filters allerdings immer noch als gaußverteilt angenommen wird. Der EKF muss somit für sein Haupteinsatzgebiet immer als suboptimaler Schätzer betrachtet werden. Ein weiterer Nachteil des EKF besteht darin, dass sowohl System- als auch Messgleichung stetig sein müssen, da sonst die benötigten Jacobi-Matrizen nicht berechnet werden können.

Der *Unscented Kalman-Filter* (UKF) entwickelt von Julier 1996 [JuU97] ist im Wesentlichen ein weiterer Ansatz das Problem der Nichtlinearität durch Approximation zu lösen. Anstatt allerdings die Gleichung zu approximieren, wie beim EKF, approximiert der UKF die Wahrscheinlichkeitsdichte vor der nichtlinearen Transformation und errechnet eine approximierte Wahrscheinlichkeitsdichte nach der Transformation.

Der Vorgang wird allgemein als *Unscented Transform* (UT) [JuU04] bezeichnet. Bei der Approximation, werden im wesentlichen Punkte im Zustandsraum der Schätzung deterministisch ausgewählt. Zu jedem Punkt (bzw. Zustandsvektor) wird ein Koeffizient errechnet, so dass eine Mittelwert- und eine Kovarianzschätzung über die Punkte gewichtet mit den Koeffizienten dem Mittelwert und der Kovarianz der Ausgangswahrscheinlichkeitsdichte gleicht (die im Wesentlichen nur durch den Mittelwert und Kovarianz bestimmt ist). Nach der nichtlinearen Transformation der Punkte werden ein neuer Mittelwert und eine neue Kovarianz durch die transformierten Zustandsvektoren mit deren Koeffizienten bestimmt. Der UKF verwendet die UT im Wesentlichen bei der Berechnung von Mittelwert und Kovarianz nach der nichtlinearen Transformation durch System- und/oder Messgleichung.

Gleichfalls wie der EKF ist auch der UKF ein suboptimaler Schätzer, der wiederum auf einer Normalverteilung basiert. Zahlreiche Veröffentlichungen haben allerdings gezeigt, dass der UKF eine bessere Schätzung als der EKF für Nichtlinearitäten liefert und somit dem EKF vorzuziehen ist. Ein weiterer Vorteil des UKF ist, dass sowohl System- als auch Messgleichung nicht stetig sein müssen, da einzelne Punkte im Zustandsraum transformiert werden und eine Ableitung der Funktion wie beim EKF nicht benötigt wird.

Algorithmus

Kalman	EKF
$x_k^- = Ax_{k-1}$	$x_k^- = f_k(x_{k-1}, 0)$
$P_{xx,k}^- = AP_{xx,k-1}^- A^H + Q$	$P_{xx,k}^- = A_{\partial} P_{xx,k}^- A_{\partial}^H + WQW^H$
$K_k = P_{xx,k}^- H^H (HP_{xx,k}^- H^H + R)^{-1}$	$K_k = P_{xx,k}^- H_{\partial}^H (H_{\partial} P_{xx,k}^- H_{\partial}^H + VRV^H)^{-1}$
$x_k = x_k^- + K_k (z_k - Hx_k^-)$	$x_k = x_k^- + K_k (z_k - h_k(x_k^-, 0))$
$P_{xx,k} = (I - K_k H) P_{xx,k}^-$	$P_{xx,k} = (I - K_k H_{\partial}) P_{xx,k}^-$
$A_{\partial} = \frac{\partial f_k(x_{k-1}, 0)}{\partial x}; \quad W = \frac{\partial f_k(x_{k-1}, 0)}{\partial v}$	
mit	
$H_{\partial} = \frac{\partial h_k(x_k^-, 0)}{\partial x}; \quad V = \frac{\partial h_k(x_k^-, 0)}{\partial n}$	

Der Algorithmus für den UKF kann in [JuU97] oder [WaM00] gefunden werden.

4.1.3.3.2 Partikel-Filter

Eine Möglichkeit, das oben genannte Integral zu lösen, ist die numerische Integration mittels Monte Carlo-Verfahren. Um die Grundidee dieses Prinzips zu erläutern, sei folgendes Problem gegeben: Die Fläche eines Landes auf einer Karte soll bestimmt werden (Integration der Fläche). Zu diesem Zweck könnte man viele Wurf Pfeile auf die Karte werfen, und dabei versuchen, dabei keine Region der Karte bevorzugt zu treffen. Wenn man nun den Anteil der Pfeile zählt, die das Land getroffen haben, und diesen Anteil mit der Gesamtfläche der Karte multiplizieren, dann erhält man näherungsweise die

Fläche des Landes. Das Verfahren nennt sich Monte Carlo-Integration, denn jeder Wurf unterliegt einer beabsichtigten Streuung.

Beim Partikel-Filter (*Particle Filter*) bezeichnet man die Wurfpeile als Teilchen (*Particle*). Jedes Partikel stellt eine Hypothese des System-Zustandes dar (also Position, Bewegung, usw.). In jedem Zeitschritt des Algorithmus wird jedes Partikel gemäß des Bewegungsmodells des Subjektes zufällig bewegt (sog. *Prediction*-Schritt). Wenn es sich also um eine Fahrzeug-Ortung handelt, dann würde jedes Partikel so bewegt werden, wie es für das eigentliche Fahrzeug zu erwarten wäre: dabei werden wahrscheinliche Bewegungen (z.B. geradeaus weiterfahren) eher durchgeführt als unwahrscheinlichere (z.B. eine Kurvenbewegung). Nach jeder Bewegung werden alle Partikel gemäß der Sensor-Messwerte bewertet (sog. *Update*-Schritt): solche deren System-Zustand besser zu den Sensor-Messwerten passt bekommen eine entsprechend hohe Bewertung. Diese Schritte setzen sich von Zeitschritt zu Zeitschritt fort, so dass eine Wolke von Teilchen (*Particle Cloud*) dem Subjekt folgt. Man kann es sich auch so vorstellen, dass die Partikel als Kandidaten den Zustandsraum (z.B. Position) „absuchen“. Die Kandidaten die besser zu den Messungen passen werden bevorzugt gewichtet. Aus Sicht der Dynamik müssen die Partikel der Bewegungsstatistik (Bewegungsmodell) des Subjektes folgen.

Visualisierung des Partikel-Filters:

In Abbildung 55 ist dargestellt, wie drei Schritte des Partikel-Filter ablaufen. Das Schätzproblem ist ein-dimensional (x -Achse) und die y -Achse stellt die Höhe der Posterior-Verteilung dar. Begonnen wird für $k=0$ mit einer Gleichverteilung über x : alle N_s Partikel (als kleine Kreise dargestellt) sind somit gleichgewichtig und regelmäßig verteilt. Im ersten Schritt wird zunächst das stochastische Bewegungsmodell für jedes Teilchen angewandt (*Prediction*) und anschließend werden die Teilchen gemäß den Messungen z bewertet (*Update*). Jedes Teilchen mit dem Index j repräsentiert den Zustand x^j und hat das Gewicht w^j . Im darauf folgenden Zeitschritt werden wieder alle Teilchen dem Bewegungsmodell unterzogen und wieder neu bewertet. Somit können – genügend Teilchen vorausgesetzt – Partikel Filter die echte Posterior-Verteilung (im Bild die schwarz gezeichnete Kurve) annähern.

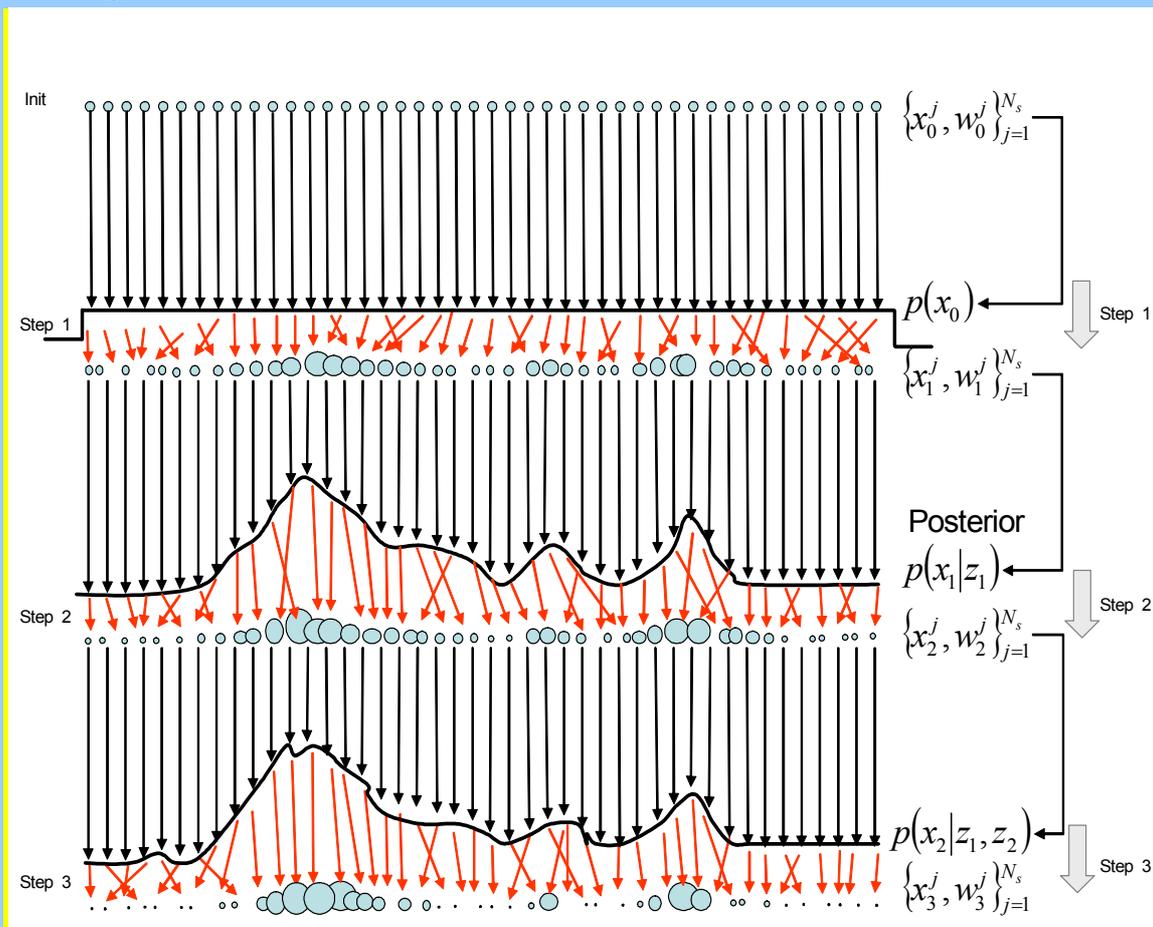


Abbildung 55: Darstellung von drei Berechnungsschritten ($k=1,2,3$) des Partikel-Filters für ein fiktives, ein-dimensionales Schätzproblem [Rob07a].

4.2 Bewegungsmodelle für die Fußgängernavigation

Wenn im Folgenden von ‚die Person‘ oder ‚der Fußgänger‘ die Rede ist, so ist die geschlechtsneutrale Bedeutung des Begriffs gemeint.

Bewegungsmodelle für Fußgänger beinhalten Ansätze und Algorithmen, um das voraussichtliche menschliche Bewegungsverhalten anhand bekannter Parameter und anderer beeinflussender Faktoren vorherzusagen. Das Ziel dieser Untersuchungen ist es, die Bewegungen von Fußgängern so realistisch wie möglich simulieren zu können. Gelingen realistische Nachbildungen der realen Bewegung von Personengruppen können damit Evakuierungspläne, das Design von Gebäuden, menschenähnliche

Roboter und Verfahren zur Indoor- und Outdoor-Navigation evaluiert werden. Wie oben dargestellt, benötigen alle dynamischen Schätzer der Position ein realistisches Bewegungsmodell des Subjektes, um die beste Performance zu erreichen.

Die menschliche Bewegung kann anhand Faktoren wie z.B. Geschwindigkeit, Bewegungsrichtung und der Position als Resultat daraus parametrisiert werden. Aber auch die Aktivität, eventuelle Desorientierung und Gefühle können eine Rolle spielen, wobei einige dieser Faktoren die Bewegung von Fußgänger mehr als andere beeinflussen. Parameter wie das Alter und die Agilität einer Person können auch einen Einfluss auf das Bewegungsmodell haben.

Unstrittig ist die Bedeutung von Gebäuden und Straßen als einer der Haupteinflüsse auf das menschliche Bewegungsmuster, so kann ein Fußgänger unabhängig aller oben erwähnten Parameter keinesfalls eine massive Wand durchqueren.

Einschränkungen dieser Art können in zwei Gruppen eingeteilt werden

1. Die erste Kategorie umfasst Parameter, die das System (auch unter Zuhilfenahme externer Quellen) bestimmen kann, wie z.B. Personenalter, Wetter, Tageszeit, Wochentag, Position und Wegsteigung.
2. Die zweite Kategorie beinhaltet Parameter die sich gemäß dem menschlichen Verhalten ändern, beispielsweise Aktivität, Desorientierung, Wachheit und der allgemeine Gefühlszustand. Diese Parameter entziehen sich einer Bestimmung durch das System.

Die Anwendung von Bayesschen Schätzalgorithmen erfordert ein Bewegungsmodell, das das Verhalten des realen dynamischen Systems nachbildet. Der Propagierungsschritt eines solchen Algorithmus hängt vollständig von dem verwendeten Modell ab um vorherzusagen, wo sich die Person im nächsten Zeitschritt am wahrscheinlichsten befinden wird. Bei guten Vorhersagemodellen gelingt diese Prädiktion sehr genau, was die Abhängigkeit von neuen Messwerten für weitere Propagierungen des Zustandsvektors mit der Zeit verringert. Ein weiterer Vorteil ist die geringere Abweichung der Zustandsschätzung von den neuen Messwerten, was dem System erlaubt, bessere Entscheidungen abhängig von der Personenposition zu treffen.

Je nach Anwendung können unterschiedliche Eigenschaften der verschiedenen Bewegungsmodelle von Interesse sein. Beispielsweise könnten für die Simulation einer Fußgängergruppe nur statistische Werte wie Mittelwerte und Wahrscheinlichkeitsdichten eingehen. Andererseits kann die detaillierte Simulation des Bewegungsverhaltens einzelner Personen bei Anwendungen wie der Fluchtwegoptimierung notwendig sein.

Weiterhin müssen für spezifische Anwendungsfälle bestimmte Bewegungsmuster beachtet werden. So ist etwa durchaus denkbar, dass sich Feuerwehr- und Rettungskräfte robbend, springend oder rollend fortbewegen.

Je nach Anwendungserfordernissen und dem Umfang des jeweiligen Kontextes können Bewegungsmodelle für die Fußgängernavigation auf drei Ebenen betrachtet werden. Abbildung 56 bietet eine Übersicht über die verschiedenen Modellierungsmöglichkeiten. Die Diskussion der Modellsynthese auf der makroskopischen, der mesoskopischen und der mikroskopischen Ebene ist Bestandteil der nächsten Abschnitte.

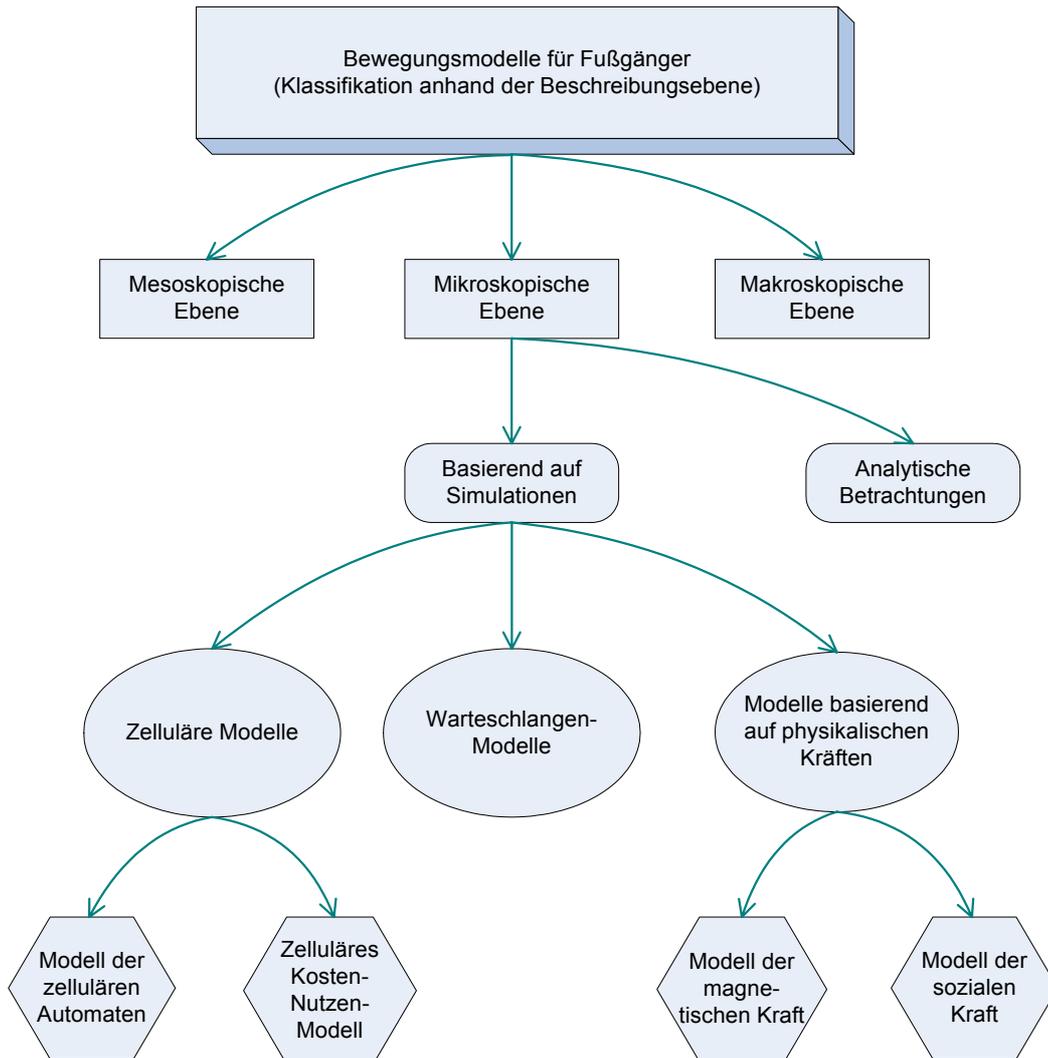


Abbildung 56: Übersicht über Modelle zur Beschreibung der Bewegung von Fußgängern nach [ADAP11].

4.2.1 Makroskopische Ebene

In vielen Fällen sind nur Parameter wie die Personendichte, ihre mittlere Geschwindigkeit und deren Standardabweichung von Interesse. Für solche Bewegungsmodelle reicht die Beschreibung durch Gleichungen aus der Strömungsdynamik aus [Hel92-1]. Diese auf der makroskopischen Ebene angesiedelte Beschreibungsweise stammt von den gaskinematischen Gleichungen und der Betrachtungsweise von Verkehrssystemen ab. Diese Modelle basieren auf den Kontinuum-Modellen [Add05], die Differentialgleichungen des Strömungsflusses berechnen.

Ein Beispiel, bei dem die Bewegungen von Menschen auf der makroskopischen Ebene modelliert werden, liefert [AMH01] anhand der Vorgänge während der Pilgerfahrt Hadsch nach Mekka.

4.2.2 Mesoskopische Ebene

Anstatt Monte Carlo-Simulationen einzusetzen um die Bewegungsmodelle für Personen auszuwerten können auch die angenäherten Gleichungen für den Mittelwert für diese Modelle abgeleitet werden. Diese Betrachtungen finden dann auf der mesoskopischen Ebene statt, die sich zwischen dem Verhalten von Individuen und der Beschreibung von Menschenmassen als ganzes befindet. Oben genannte Gleichungen weisen eine Ähnlichkeit zu den Boltzmann-Gleichungen auf, die somit die

Erfassung der Personenbewegung mittels der gewöhnlichen Gesetze für die Kinematik von Gasen erlaubt [HSBP00]. Allerdings ist das menschliche Verhalten, anders als in den Gleichungen zur Gasausbreitung erfasst, von Wünschen und Interaktionen geprägt.

Die Modellierungsweise auf der mesoskopischen Ebene stammt ursprünglich aus der Welt der Verkehrssimulationen, sie wurde aber später für die Modellierung von Personenbewegungen angepasst.

Beispiele für mesoskopische Bewegungsmodelle sind das Zellübertragungsmodell [Dag94] und die Systeme der zellulären Automaten (TRANSIMS) [Hob05]. Beide wurden ursprünglich für Straßenverkehrs Anwendungen erstellt, man fand jedoch heraus, dass sie ebenfalls gute Modelle für Personen in städtischen Umgebungen darstellen.

Die große Herausforderung in der Implementierung von mesoskopischen Modellen für Personenbewegungsmodelle besteht in der hohen Abhängigkeit der Zellen untereinander im zu analysierenden Gebiet der Fortbewegung. Zur Zeit werden jedoch auf dem Gebiet der Forschung für zelluläre Automaten große Anstrengungen unternommen, um Regeln zu finden, die die menschliche Fortbewegung auf eine natürlichere Art und Weise beschreiben.

4.2.3 Mikroskopische Ebene

Auf der mikroskopischen Ebene wird jede Person als Individuum betrachtet und sein Verhalten gegenüber anderen Fußgängern analysiert. Es existieren verschiedene analytische Modelle, die versuchen, das mikroskopische Verhalten eines Fußgängers mithilfe granularphysikalischer Flusseffekte zu beschreiben. Die mathematische Beschreibung solcher Modelle führt im Allgemeinen auf komplizierte Gleichungen, die sich jeder analytischen Lösungsmöglichkeit entziehen und deren Berechnung mit Computern nur schwierig zu bewerkstelligen ist. Allerdings können Monte Carlo-Simulationen auf sie angewendet werden, was zwar eine einfach zu implementierende aber relativ langwierige Lösungsmethode darstellt. Bei der Analyse dieser Art von mikroskopischen Fußgänger-Simulationsmodellen (*Microscopic Pedestrian Simulation Model*, MPSM), bei der das individuelle Verhalten eines jeden Fußgängers ausgewertet wird, können einige allgemeinen Erkenntnisse bezüglich des Gruppenverhaltens gewonnen werden. Beispielsweise lassen sich daraus Charakteristika des Verhaltens von Individuen in Warteschlangen oder von sich selbständig bildenden Gruppen ableiten. In der Literatur werden diese Modelle auch oft als *Agent Based Models* bezeichnet.

Einige mikroskopische Modelle (etwa [HeM97]) simulieren das Verhalten von Menschenmassen, die sich auf vordefinierten Wegen bewegen. Einfache Regeln für Bewegungsformen beinhalten z.B. die Tendenz, entgegenkommendem Verkehr vorzugsweise entweder nach rechts oder nach links auszuweichen, um die Ausbildung bevorzugter Wege untersuchen zu können. Anwendungen von Simulationen mit festgelegten Wegmöglichkeiten umfassen die Analyse von sich spontan bildenden Gruppen und die Untersuchung von Evakuierungsplänen. Im letztgenannten Fall werden Fußgänger simuliert, die von einer zufälligen Position aus starten, um aus mehreren Fluchtmöglichkeiten diejenige zu finden, die zum nächstgelegenen Ausgang führt. Diese Modelle zur Evakuierungssimulation sind allerdings ungeeignet, um das normale menschliche Verhalten zu simulieren, bei der das Subjekt aus mehreren möglichen Zielen wählen kann. Problematisch sind diese Modelle im Einsatz bei der Lokalisierung eines Menschen, weil in der Regel die aktuellen Positionen der anderen Personen nicht bekannt sind. Beim Einsatz in stochastischen Verfahren wie beim Partikel-Filter kann jedoch die Präsenz anderer Personen als Zufallsprozess eingebunden sein.

Ein anderes Beispiel für ein MPSM ist die Nachbildung der Fußgängerbewegung durch stochastische Modelle, deren statistische Parameter durch die Analyse verhaltensgesteuerter Aspekte gewonnen werden kann [WKAR06].

4.2.4 Diskussion von Modellen der mikroskopische Ebene

Alle drei Modellierungsebenen beachten die Absichten und Interaktionen der simulierten Fußgänger, jedoch ist die mikroskopische Betrachtungsweise für die Fußgängernavigation von höchstem Wert. Sie findet Anwendungen im Anlegen von Evakuierungsplänen, im Design von Fußgängerzonen und als generelles experimentelles Entwicklungswerkzeug zur Optimierung. Daher wird auf Modelle der mikroskopischen Ebene im Folgenden detailliert eingegangen.

In mikroskopischen Modellen der Fußgängerbewegung wird jede Person von zwei Kräften beeinflusst: Die erste Kraft „drückt“ die jeweilige Person in Richtung ihres Ziels und die zweite Kraft lässt den Fußgänger zu anderen Personen und Hindernissen Abstand halten.

Geographische, räumliche und geometrische Eigenschaften müssen unbedingt als Parameter in die Modellierung der Bewegung von Fußgängern mit aufgenommen werden.

Die folgenden Unterabschnitte liefern eine Einführung in fünf gebräuchliche Bewegungsmodelle der mikroskopischen Ebene.

4.2.4.1 Modell der sozialen Kraft

Dieses Modell nimmt an, dass eine Person in allem ihrem Tun und Gehen durch soziale Faktoren motiviert wird [HeM95][LKF05]. Zwei grundsätzliche Kräfte leiten sie dabei: Zum Einen versucht die Person ihr Ziel in einer gewissen Zeit zu erreichen und zum Anderen wird sie durch Interaktionen mit anderen Menschen und Hindernissen beeinflusst.

4.2.4.2 Modell der magnetischen Kraft

Dieses Modell beschreibt die Bewegung von Fußgängern anhand der physikalischen Bewegungsgleichungen und der Auswirkungen virtueller magnetischer Felder [OkM93]. Dabei wird der Zielort eines Fußgängers als magnetisch negativer Pol definiert. Andererseits werden Fußgänger und Hindernisse als magnetisch positive Pole deklariert. Die bekannten Gesetze der Anziehung ungleichartiger magnetischer Pole (negativ-positiv) und die Abstoßung von gleichartigen Polen (negativ-negativ bzw. positiv-positiv) führt zum Beginn der simulierten Bewegung der Fußgänger.

Gemäß diesem Modell können die Personenbewegung durch zwei Gleichungen beschrieben werden: Die erste Gleichung wird dabei durch die Gesetze der Magnetostatik formuliert und beschreibt die auf den Fußgänger einwirkende, gerichtete Gesamtkraft. Diese ist die Summe der Anziehung zum Ziel und der Abstoßung durch die Hindernisse und andere Personen. Für jede Person kann die Stärke des Magnetfeldes angegeben werden, die dann den Abstand zu den anderen Personen beeinflusst.

Durch diese Vorgehensweise kann aber eine Kollision des Fußgängers mit anderen Personen noch nicht ausgeschlossen werden. Daher wird als zweite einwirkende Kraft die Abstoßungskraft durch die anderen Fußgänger und Hindernisse bestimmt. Abbildung 57 zeigt ein Beispiel, bei der das Ziel einer Person (dargestellt mit positivem magnetischem Pol) ein Bett ist (dargestellt durch einen negativen Pol). Die Wand ist ebenfalls als positiv gekennzeichnet, wodurch die Person einen Weg um die Wand einschlägt.

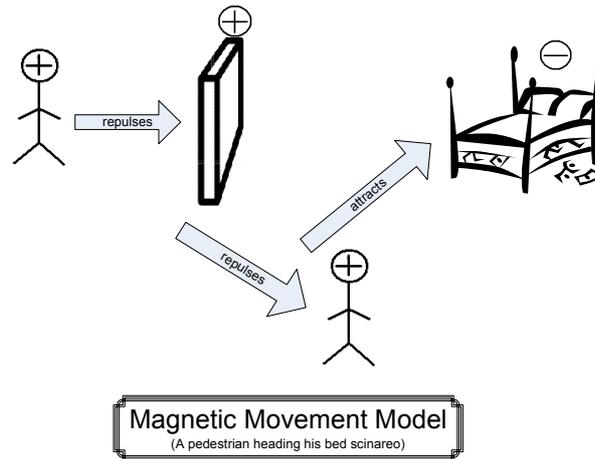


Abbildung 57: Beispiel zum Modell der magnetischen Kraft nach [ADAP11].

Die resultierende Bewegung ist die Summe dieser beiden Kräfte, der Anziehungskraft zum Ziel und der Abstoßung von Hindernissen und anderen Personen. Die Größe der Resultierenden bestimmt dabei die Personengeschwindigkeit an jedem Berechnungsschritt.

4.2.4.3 Zelluläres Kosten-Nutzen-Modell

Das zelluläre Kosten-Nutzen-Modell (*Benefit Cost Cellular Model*) teilt das zu simulierende Gebiet in ein Raster quadratischer Zellen ein [Res04][Tek02]. Jede Zelle kann dabei nur von exakt einer Person besetzt werden. Das Modell fußt auf der aus der Betriebswirtschaft bekannten Formel $Gewinn = Ausgaben - Einnahmen$ und berechnet eine Gewinnfunktion für jede Zelle. Wie in der Geschäftswelt entscheidet der Fußgänger anhand des für ihn höchsten Gewinns, auf welches der acht ihn umgebenden Felder er sich bewegt.

Die Einnahmen sind dabei von der Entfernung der Person von dem Ziel anhängig. Je näher eine Zelle zum Ziel des Fußgängers liegt desto höher ist ihre Einnahmenbewertung.

Die Ausgaben werden dabei durch andere Personen oder Hindernisse bestimmt. Je mehr Personen sich in der Nähe einer Zelle befinden, desto größer werden die Kosten oder Ausgaben für diese Zelle.

Über die Kosten-Nutzen-Rechnung wird nun eine Bewertung für jede Zelle berechnet. Da sich die Berechnungen mancher Felder durch mehrere Personen überlappen können, wird für diese Felder die Summe aus den Berechnungen der Einzelpersonen für dieses Feld angenommen.

Anfangswerte bei der Initialisierung werden durch die Nähe des Ziels zu dem jeweiligen Fußgänger bestimmt.

Durch die beliebige Bewertung der Felder ist es in diesem Modell schwierig, realistisches menschliches Verhalten wie die Bildung von Warteschlangen oder sich plötzlich formierenden Gruppen zu simulieren. Auf der anderen Seite ist der größte Vorteil die Einfachheit des Kosten-Nutzen-Modells.

4.2.4.4 Zelluläre Automaten

Zelluläre Automaten wurden hauptsächlich für die Verkehrssimulation und für die Validierung von Verkehrsflussmodellen anhand gesammelter Daten entwickelt [YFL+03][WLF03][DJT01]. Später wurden sie für die Modellierung von Personen eingesetzt. Im Simulationsverlauf werden bei den Modellen der zellulären Automaten zu jedem Zeitpunkt zwei Berechnungen ausgeführt.

Der erste Schritt entscheidet über den zu wählenden Weg. Der Fußgänger kann sich dabei dafür entscheiden, dem Weg, auf dem er sich befindet, zu folgen, oder auf eine der angrenzenden Routen zum Ziel zu wechseln. Die Entscheidung darüber wird dabei auf der Basis dreier Kriterien getroffen:

- der Weg darf nicht besetzt sein

- der Weg muss zum Ziel führen
- der eingeschlagene Weg muss über den größten Abstand verfügen.

„Abstand“ meint dabei die Anzahl der freien Zellen in Richtung zum Ziel. Weisen zwei Wegmöglichkeiten dieselben Kriterien auf, wird nach einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeitsverteilung zufällig entschieden.

Der zweite Berechnungsschritt verleiht dem simulierten Fußgänger eine gewisse Geschwindigkeit, je nach verfügbaren Abständen in seiner Umgebung. Die kleinste mögliche Geschwindigkeit beträgt hierfür eine Zelle pro Zeitschritt und die maximale Geschwindigkeit ist durch die höchste Fußgängergeschwindigkeit gegeben.

Der größte Vorteil des Modells der zellulären Automaten ist durch seine Einfachheit und die effiziente Möglichkeit zur Implementierung gegeben. Ein Nachteil des Modells ist der analytische Ansatz, der die Personenbewegungen nicht natürlich aussehen lässt. Durch das Zellenkonzept scheinen die Fußgänger von einer Zelle zur nächsten zu springen. [BLA00] demonstriert eine Anpassung des Modells an realistisches Verhalten von Menschen und überprüften es anhand in der Realität gesammelter Daten.

4.2.4.5 Warteschlangennetz-Model

Warteschlangennetze werden in Bewegungsmodell-Simulationen dazu benutzt um Evakuierungspläne für den Brandfall oder sonstige Notfälle zu simulieren [MaS98][OsB07]. Wie die vorhergehenden Modelle gehört auch dieses Modell zu der Kategorie der mikroskopischen Fußgängersimulationsmodelle.

Das Warteschlangennetz-Modell trifft dabei folgende Annahmen:

1. Jeder Raum stellt einen Knotenpunkt (*Node*) dar.
2. Die Tür zwischen zwei Zimmer wird als Verbindung (*Link*) bezeichnet.
3. Beim Beginn der Simulation verweilt eine Person einige Zeit am Startpunkt und geht dann in Richtung Zielknotenpunkt los. Dort bleibt die Person stehen.
4. Die Fußgänger versuchen so schnell und so sicher wie möglich zum Ausgang zu gelangen. Der Ausgang, der ihnen am nächsten ist stellt somit den Zielpunkt dar.
5. Jede Person geht dabei von einem Raum in einen anderen über, immer auf der Suche nach dem nächsten Ausgang.
6. In jedem Raum trifft die Person eine gewichtete Zufallsentscheidung, in welchen der ihr zur Verfügung stehenden Räume sie als nächstes geht. Die Gewichtung ist eine Funktion der Personendichte im aktuellen und den umliegenden Räumen.
7. Sollte sich eine Warteschlange vor einem Raum gebildet haben, wartet die Person in der Schlange bis sie in den gewünschten Raum vordringen kann oder sie sucht sich eine andere Route, der sie folgen kann. Die Entscheidung darüber, welcher Weg eingeschlagen wird liegt bei jedem simulierten Individuum selbst und wird anhand einer Wahrscheinlichkeitsverteilung getroffen.
8. Die Route, die der Fußgänger wählt, und die Zeit, die er dafür benötigt, werden bei jedem Knotenpunkt abgespeichert.
9. Die Zeit, die für die vollständige Evakuierung des simulierten Gebäudes benötigt wird gilt als Gütemaß für diese Modellart.

Warteschlangennetz-Modelle werden ebenfalls genutzt, um das Verhalten an Zebrastreifen zu untersuchen. Hierbei versucht der zu simulierende der Fußgänger zwischen Startpunkt auf der einen Seite des Zebrastreifens und Endpunkt auf der anderen Seite den schnellsten und sichersten Weg zu finden.

Dieses Modell birgt im Wesentlichen drei Nachteile: Zum Einen weicht das simulierte Personenbewegungsverhalten recht weit vom Verhalten realer Personen ab. Zweitens liefert die Simulation anhand dieses Modells keine Garantie dafür, dass es nicht doch zu Kollisionen zwischen Fußgängern kommt. Und schließlich liefert der verwendete *First-In, First-Out*-Algorithmus (FIFO), die

Person, die zuerst die Warteschlange betritt, verlässt sie auch als erste wieder) keine repräsentativen Ergebnisse, vor allem bei der Simulation von großen Menschenmassen.

4.2.5 Diskussion und Ausblick

Das Entwickeln von Algorithmen und Technologien, die Bewegungsmodelle von Fußgängern hinsichtlich einer möglichst realistischen Bewegung ermöglichen, ist Gegenstand aktueller Forschung. Von besonderem Interesse ist dabei das Leiten von Menschenmassen, von einem Modell der mikroskopischen Ebene aus gesehen. Es wurden bereits Algorithmen entwickelt, um das menschliche Verhalten beim Suchen von kürzesten Routen, bei der Wegwahl und die von Attraktionen ausgeübte Anziehungskraft abzubilden.

Interessant ist ebenfalls die Untersuchung der menschlichen Raumkognition. Die Forschung auf diesem Gebiet zeigte, dass Menschen oft nicht den kürzesten Weg von einem Startpunkt zum Ziel auswählen, da die jeweilige Umgebung einen erheblichen Einfluss auf die Bewegung von Fußgängern hat.

Das Hauptziel der Forschungsanstrengungen auf diesem Gebiet ist das Streben nach einem Modell, das das menschliche Verhalten von Fußgängern lebensecht wiedergibt. In der Literatur genannte aktuelle Technologien umfassen dabei *Visibility Graph Analysis* (VGA) [DeD00], *Angular Analysis, Q-Learning* [ChN05a], *Discrete Choice Theory* [ABW04] und *Genetic Algorithms* (GA) [ChN05b]. Weiterhin verweist die einschlägige Literatur auf die Anwendungsmöglichkeit der sogenannten verteilten Intelligenz, um der Komplexität der Bewegungsmodelle von Fußgängern Herr zu werden [CGI+05][GCN05]. Die Idee dahinter ist es, die Komplexität einzelner rechenintensiver Operationen in Modulen zu kapseln, die je nach Bedarf miteinander kommunizieren.

Trotz aller Forschungsaktivitäten und Untersuchungen auf dem Gebiet der Personen-Bewegungsmodelle ist das Entwickeln eines Werkzeugs zur Datensammlung von Fußgängerbewegungen, deren Analyse und Abbildung in ein Modell auf mikroskopischer Ebene und die Evaluierung anhand von Daten aus der Realität immer noch eine Herausforderung.

4.3 Integration von Map Matching und Bewegungsmodellen

Im Allgemeinen beschreibt Map Matching ein Verfahren, das Bewegungsdaten und Bewegungsmodelle mit einer Karte in Beziehung setzt. Das Ziel ist dabei, die Genauigkeit der Positionslösung zu steigern mit dem Wissen, dass die Bewegungen des zu lokalisierenden Objekts gemäß der bekannten Karte eingeschränkt sind. Navigationssysteme können mithilfe von Map Matching deutlich verbessert werden.

Es existieren zwei verschiedene Arten des Map Matching: Das klassische Map Matching und das auf Bewegungsmodellen basierende Map Matching.

Ziel des klassischen Map Matching ist es, die Schätzung der Position dadurch zu verbessern, dass die Positionsmessungen an der durch die Karte vorgegebenen Wegstrecke einrasten werden.



Abbildung 58: Beim klassischen Map Matching werden die Messungen rasten die Messungen an der vorher durch die Karte festgelegten möglichen Wegstrecke ein [ADAP12].

Beim Bewegungsmodell-basierten Ansatz wird die Karte dazu genutzt, die vorhergesagte Bewegung des untersuchten Objektes einzuschränken. Daher kann sich das Objekt nur in sinnvollen Bereichen bewegen. Diese Art des Map-Matching stellt im Sinne des sequentiellen Schätzers das Optimum dar.

Je nach Art des zu lokalisierenden Objektes können verschiedene Arten von Karten und unterschiedliche Abstraktionslevel genutzt werden. Beispiele solcher Karten sind Straßenkarten, topographische Karten und Gebäudepläne.

Kann beispielsweise die Lokalisierung einer Person mit dem Vorwissen des Grundrissplans eines Stockwerkes durchgeführt werden, so ist bereits im Vorhinein dem Bewegungsmodell bekannt, dass Wände nicht durchdrungen werden können. Andererseits kann mithilfe von geographischen Karten bestimmt werden, mit welcher Maximalgeschwindigkeit sich ein Fußgänger fortbewegen kann, die z.B. von der vorherrschenden Steilheit des Wegs und vorhandenen Hindernissen in der aktuellen Umgebung abhängt.

Je nach Anwendung kann Map Matching in Echtzeit durchgeführt werden oder offline in der Datenaufbereitungsphase mit zuvor gewonnenen Messdaten. Im Echtzeitszenario sind natürlich nur der aktuelle Messwert und alle vorhergehenden Messdaten bekannt, wohingegen bei der Offline-Untersuchung alle Messdaten der gesamten zurückgelegten Strecke bereits vorliegen.

Das Standardverfahren beim klassischen Map Matching ist die inkrementelle Methode, bei der Stück für Stück die Übereinstimmung der Positionsmessung an die Punkten eines Wege- oder Straßennetzes vorgenommen wird. Ein anderer Ansatz ist durch die globale Methode gegeben, bei der Bewegungsverläufe im Straßennetz gesucht werden, die am Besten zur gemessenen Bewegungstrajektorie passen.

Die folgenden vier Schritte beschreiben die klassische Map Matching Methode:

1. Abfragen der verfügbaren Positionssensoren
2. Auswahl möglicher Kandidaten für Bewegungsverläufe aus einer Gruppe von möglichen Kurven. Die ausgewählten Verläufe sollen sich innerhalb eines gewissen Grenzintervalls um die Positionsmessung befinden.
3. Anwendung eines bestimmten Algorithmus, um eine Kurve aus oben genannter Gruppe auszuwählen.
4. Schätzung der Position des zu untersuchenden Objekts innerhalb der gewählten Kurve.

Es gibt mehrere Parameter, die die Auswahl der optimalen Kurve innerhalb der Karte beeinflussen. Die vier wesentlichen Parameter sind

1. der Abstand des Ergebnisses der Positionsmessung von der Kurve
2. die Ähnlichkeit der Richtung der Kurve aus der Karte und der Richtung des untersuchten Objekts. Wird dieser Parameter mit einbezogen, können diejenigen Kurven verworfen werden, die eine andere Richtung angeben als die Messung liefert.
3. Auswahl einer Kurve, deren Verlängerung eine vorher ausgewählte Kurve schneidet. Einige Orte und Arten des Schnitts könnten dabei gegenüber anderen Möglichkeiten vorgezogen werden.

Ein Ansatz, der eine Gewichtung der verschiedenen Parameter verwendet, kommt ebenfalls in Betracht. Den Parametern können sogar je nach Situation und Art des zu untersuchenden Objektes variable Gewichtungen zugewiesen werden. Eine sinnvolle Kombination der oben aufgeführten Parameter führt offensichtlich auch zur Auswahl der optimalen Trajektorie.

Generell wird das Bewegungsmodell-basierte Map Matching dem klassischen Map Matching vorgezogen.

Abbildung 59 zeigt einen Vergleich des Fortschreitens der Wahrscheinlichkeitsdichten der beiden Methoden. Aus der Abbildung wird klar, dass die auf einem Bewegungsmodell basierende Methode eine bessere Genauigkeit liefert als das klassische Map Matching.



Abbildung 59: Vergleich zwischen einfachen „Map-Snapping“ mit einem ins Bewegungsmodell integrierten optimalen „Map Matching“; letzteres Verfahren weist eine deutlich kleinere Unschärfe nach dem zweiten Abbiegen auf, während „Map Snapping“ nur kurzfristig Gewinn aus der Verwendung der Mauern erzielt [ADAP12].

5. Sinnvolle Kombinationen und Roadmaps

Heute ist man im Bereich der Satellitennavigation in ein Stadium gelangt, in dem es eine breite Anwendergemeinde gibt, die GNSS-Signale für eine große Anzahl verschiedener Applikationen nutzt. Nachdem viele Basisdienste auf GNSS-Positionierung und Zeittransfer aufsetzten, kommt man nun in Bereiche und Anwendungen, die eine höhere Genauigkeit, Zuverlässigkeit oder Robustheit der Satellitennavigation fordern: Präzisionslandeansflüge in der zivilen Luftfahrt, Gefahrgütertransport und Indoornavigation, um nur ein paar Beispiele zu nennen.

Die Positionierung innerhalb von Gebäuden stellt eines der letzten großen Hindernisse der Navigation dar, insbesondere da GNSS Signale nur schwer oder gar nicht empfangen werden können (siehe 2.7). Gleichzeitig wird damit klar, dass die Problematik nur durch eine Kombination von verschiedenen Sensoren gelöst werden kann, da GNSS oder Mobilfunk alleine keine Lösung bieten. Sensorfusion spielt somit eine entscheidende Rolle.

Anwendungsfelder für eine Positionierung innerhalb von Gebäuden sind zahlreich. Zum Beispiel wäre es wünschenswert, wenn eine zentrale Leitstelle Risikopatienten, Wachmänner im Dienst oder Feuerwehrmännern im Einsatz online „verfolgen“ könnte um so im Gefahrenfall helfen zu können. Da sich aber Personen größtenteils innerhalb von Gebäuden aufhalten, ist somit eine Lokalisation innerhalb von Räumen notwendig.

Weitere Anwendungsgebiete beinhalten z.B. die Navigation von Fußgängern in Einkaufszentren, Behörden, Bahnhöfen oder Flughäfen. Wenn auch bei diesen Szenarien keine Positionsverfolgung von außerhalb notwendig ist, so ist eine Lokalisierung besonders innerhalb von Gebäuden unabdingbar.

Auch in der Industrie zur Automatisierung von Fahrzeugen, wie z.B. einem Gabelstapler in Lagerhallen wäre eine Positionierung innerhalb von Räumen wünschenswert. Da dies aber zumeist begrenzte Umgebungen und meist auch nur bestimmte Positionen betrifft, kann das Anwendungsgebiet relativ leicht mit Hilfe von dedizierten Systemen (siehe 3.8) bzw. lokalen Sensoren wie RFID gelöst werden, weshalb hauptsächlich Fußgänger-Navigation als problematisch angesehen werden kann.

„Navigationsfreundliche“ Gebäudekomplexe verfügen über ein lokales Sensorsystem, also Infrastruktur für eine Positionierung, wie beispielsweise dedizierte Systeme oder auch WLAN, Bluetooth oder RFID, aus denen ein Empfangsgerät eine Position ermitteln kann. Mit Hilfe dieser Infrastruktur kann je nach Sensordichte eine fast beliebig hohe Genauigkeit erreicht werden. Um Übergänge von außen nach innen verfolgen zu können muss das Positionierungsgerät trotz allem auch über weiter reichende Systeme wie GNSS oder Mobilfunk verfügen.

Private Wohnräume, die ein Feuerwehrmann im Einsatz betritt, besitzen im Gegensatz dazu im Regelfall keine Infrastruktur zur automatischen Positionierung. Dadurch kommen für diese Einsatzszenarien nur tragbare Sensoren in Betracht. Zusätzlich zu GNSS/Mobilfunk können z.B. barometrische Sensoren, Magnetometer oder Inertialsensoren eingesetzt werden. Gerade Inertialsensoren am Fuß zeigen für Fußgänger eine sehr hohe Genauigkeit (siehe Abbildung 40 als Beispiel), die durchaus als ausreichend bezeichnet werden kann. Als Nachteil ergibt sich, dass einerseits die Person gehen muss, um diese Genauigkeit zu erreichen und andererseits nur relativ positioniert werden kann. Eine absolute Referenzposition ist notwendig, die z.B. durch GNSS/Mobilfunk ermittelt werden kann. Eine Positionierung mit hinreichender Genauigkeit über GNSS/Mobilfunk ist aber momentan innerhalb von Gebäuden noch nicht möglich. Weitere Forschung besonders auf dem Gebiet der elektromagnetischen Wellenausbreitung in Gebäuden ist als Grundlagenforschung notwendig, um Algorithmen zu entwerfen, die durch Abschattung und Beugung auftretende Fehler ausgleichen können.

Bei der Lokalisierung und Zustandsüberwachung von Gütern auf Transportwegen werden mit Hilfe von Sensoren die Position des Transportgutes, dessen Zustand (z.B. Temperatur, Druck, Konzentration, ...) aber auch Umgebungsparameter wie Windgeschwindigkeit und Regen aufgezeichnet. Um auf kritische Zustände oder Gefahrensituationen schnellst möglich reagieren zu können, werden die gesammelten Daten in kurzen Abständen mittels Mobilkommunikationssystemen wie GSM, UMTS, WLAN oder auch via Satellit in abgelegenen Regionen, an eine zentrale

Informationsstelle übermittelt. Die gesammelten Daten können zur Erhöhung der Sicherheit von Gefahrguttransporten, zur Vermeidung von Situationen bei denen Güter nicht in die örtliche Nähe anderer Güter kommen sollen, oder auch zur Überwachung der kritischen Menge von gefährlichen Gütern in einer Region verwendet werden. Diese Daten über die Umgebung und den Transportweg sind aber auch für Verkehrsinformationszwecke, meteorologische Anwendungen, in der Kartographie und in vielen weiteren Bereichen einsetzbar. Es gibt hier also eine ganze Reihe sinnvoller Schnittstellen zu anderen Systemen. Bei zuverlässiger echtzeitnaher Vernetzung der Informationsstellen könnten die verschiedenen Systeme gegenseitig profitieren. In der Regel ist allerdings ein Kompromiss zwischen möglichst umfangreicher und exakter Datensammlung und daraus eventuell ableitbaren Informationen mit Relevanz hinsichtlich der Privatsphäre der betroffenen Personen zu finden.

Bei der Positionsbestimmung von Gütern auf Transportwegen oder in Zwischenlagern ist eine Kombination aus sich ergänzenden Sensoren empfohlen, um in allen Umgebungen eine zuverlässige, den Genauigkeitsanforderungen entsprechende und zugleich möglichst günstige Realisierung zu erhalten. Da die Positionsbestimmung mit Satellitennavigationsempfängern eine hohe Langzeitstabilität aufweist, jedoch nur bei ausreichender Sichtbarkeit der sehr schwachen Satellitensignale, also im allgemeinen nur im Freien, ein Ergebnis liefern, bietet sich hier eine Kombination mit Sensoren an, die kurzzeitige Unterbrechungen überbrücken können. Dazu gehören insbesondere Inertialmesssysteme, welche in kurzen Zeitabschnitten sehr präzise sind, ihrerseits aber aufgrund von Drifterscheinungen nicht für Langzeitmessungen geeignet sind. Diese Sensortypen ergänzen sich also hervorragend mit ihrer Lang- bzw. Kurzzeitstabilität um über längere Zeiträume hinweg eine Position präzise aufzuzeichnen und dabei kleine Fehlerschranken im Bereich von einigen 10 Metern zu gewährleisten.

Eine solche Kombination von Inertial- und GNSS-Sensoren ist ebenfalls für die zivile Luftfahrt eine sinnvolle Realisierung. Dies bringt eine enorme Erhöhung der Verfügbarkeit mit sich und verbessert die Störanfälligkeit gegen ungewollte und gewollte elektromagnetische Störungen.

Bei Gefahrguttransporten auf Schiene oder Straße ist durch die meist gute „Sichtbarkeit“ der Satellitensignale, mit im Allgemeinen kurzen Unterbrechungen in Tunnels, eine sehr hohe Verfügbarkeit und Genauigkeit bei der Positionslösung zu erzielen. Mit dem zukünftigen europäischen Satellitennavigationssystem Galileo kann diese Genauigkeit aufgrund einer mitübertragenen Integritätsmeldung auch garantiert werden. Auch die Schaffung zusätzlicher Redundanz durch Verwendung weiterer Sensoren führt zu einer verbesserten Integrität.

Die zuverlässige Positionsbestimmung bei Zwischenlagerung von Gütern in z.B. Hallen ist jedoch problematisch ohne eine langzeitstabile Navigationslösung. Hier ist es notwendig durch Einbau von Intelligenz in den Sensor die Möglichkeit zu schaffen zwischen Drift des Inertialmesssystemen und langsamen Bewegungen zu unterscheiden. Dies ist allerdings bisher sehr eingeschränkt und oft nur für einen speziellen Anwendungsfall realisierbar.

Bereits heute gibt es erste Systeme mit einem fortgeschrittenen Grad an Integration, mit denen man die Positionsbestimmung kombiniert aus Satellitennavigation und Inertialmesssystem mit brauchbarer Genauigkeit realisieren kann. Die Entwicklung Mikro-Elektrisch-Mechanischer Systeme (MEMS), aber auch die Fortschritte im Bereich integrierter und präziser Navigationsempfänger haben hier entscheidend beigetragen. Durch die stetig steigende Anzahl von Anwendungen und weitere zu erwartende Verbesserungen im Bereich der Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Einzelkomponenten ist hier mit günstigen, hoch integrierten, sehr präzisen Sensoren bereits in wenigen Jahren zu rechnen.

6. Literaturreferenzen

- [3GPP123] 3GPP TS 25.123, Requirements for Support of Radio Resource Management (TDD), Mar 2002
- [3GPP133] 3GPP TS 25.133, Requirements for Support of Radio Resource Management (TDD), Mar 2002
- [3GPP215] 3GPP TS 25.215, Requirements for Support of Radio Resource Management (TDD), Mar 2002
- [3GPP225] 3GPP TS 25.225, Requirements for Support of Radio Resource Management (TDD), Mar 2002
- [ABW04] Gianluca Antonini, Michel Bierlaire and Mats Weber: Simulation of Pedestrian Behavior using a Discrete Choice Model Calibrated on Actual Motion Data, 4th Swiss Transport Research Conference, 2004.
<http://infoscience.epfl.ch/getfile.py?mode=best&recid=87094>
- [Act02] AT&T Laboratories Cambridge: The Active Badge System, 2002.
<http://www.cl.cam.ac.uk/research/dtg/attarchive/ab.html>
- [AD3222] ANASTASIA Report D 3.2.2.2P – ABAS Augmented Navigation Algorithms Critical Study – Public Version, October 2006
- [ADAC06] Durchblick im Navigations-Dschungel. ADAC Motorwelt, Dezember 2006
<http://www.adac.de/Tests/Zubehoertests/Navigationssysteme/default.asp?ComponentID=167071&SourcePageID=9186>
- [ADAP01] GalileoADAP Technical Note GalileoADAP-TN-3100-01, Review of Indoor Propagation and Channel Models, August 2007
- [ADAP11] GalileoADAP Technical Note GalileoADAP-TN-3100-11, Bewegungsmodelle für die Fußgängernavigation, August 2007
- [ADAP12] GalileoADAP Technical Note GalileoADAP-TN-3100-12, Map Matching, August 2007
- [ADAP411] GalileoADAP Technical Note GalileoADAP-TN-4100-01, Messung und Modellierung von Interferenzquellen, May 2007
- [ADAP61] GalileoADAP Technical Note GalileoADAP-TN-3100-61, Review of Inertial Navigation Technology, May 2007
- [ADAPWiCom] GalileoADAP Literature Study on Positioning Techniques in Wireless Communications, May 2007
- [Add05] J. D. Addison: Flow on Links: Yesterday, Today and Tomorrow, IMA 2005.
http://eprints.ucl.ac.uk/archive/00001422/01/Puff_IMA05.pdf
- [AKR+01] M. Angermann, J. Kammann, P. Robertson, A. Steingass, and T. Strang, "Software representation for heterogeneous location data sources within a probabilistic framework", International Symposium on Location Based Services for Cellular Users-Locellus 2001, pp.107-118, February 2001

-
- [AMH01] S. A. H. Al Gadhi, H. S. Mahmassani and R. Herman, "A speed-concentration relation for bi-directional crowd movements with strong interaction", in *Pedestrian and Evacuation Dynamics*, Springer- Heidelberg, Pages 3 - 20, 2001
- [ANA05] ANASTASIA Project-Homepage:
http://www.anastasia-fp6.org/anastasia/anastasia_index.htm
- [BahP00] Paramvir Bahl and Venkata N. Padmanabhan: RADAR: An In-Building RF-based User Location and Tracking System, IEEE Infocom 2000.
- [BBC06] J. Basak, K. Bhattacharya, and S. Chaudhury, "Multiple Exemplar-Based Facial Image Retrieval Using Independent Component Analysis", *IEEE Trans. on Image Processing*, vol. 15, no. 12, December 2006
- [BHB99] Z. Bodnar, Z. Herczku, J. Berces, I. Papp, F. Som, B. Molnar, I. Frigyes, „A Detailed Experimental Study of the LEO Satellite to Indoor Channel Characteristics“, *Int. J. of Wireless Information Networks*, Vol. 6, No. 2, 1999, p. 79-91
- [BHE00] N.Bulusu, J.Heidemann, and D.Estrin, "GPS-less low-cost outdoor localization for very small devices", *IEEE Personal Communications*, vol. 7, October 2000
- [BHK97] P.N. Belhumeur, J.P. Hespanha, and D.J. Kriegman, "Eigenfaces vs. Fisherfaces: Recognition Using Class Specific Linear Projection", in *IEEE Trans. on Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 19, no. 7, pp. 711-720, Jul. 1997
- [BIA00] V. Blue and J. Adler: Cellular Automata Model Of Emergent Collective Bi-Directional Pedestrian Dynamics, In *Artificial Life VII* Bedau, MIT Press, 2000. <http://www.ulster.net/~vjblue/research.htm>
- [Bokows04] J.Borkowski, J.Niemelae, and J.Lempiaainen, "Performance of cell ID+RTT hybrid positioning method for UMTS radio networks", in *Proc. 5th European Wireless Conf. 2004*, February 2004
- [BSI04] BSI: Risiken und Chancen des Einsatzes von RFID-Systemen. ISBN 3-922746-56-X, <http://www.bsi.de/fachthem/rfid/studie.htm>, November 2004
- [Caffery02] James J. Caffery, "Wireless Location in CDMA Cellular Radio Systems", Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [CELLO] <http://www.telecom.ece.ntua.gr/cello/>
- [CGI+05] D. Cavens, C. Gloor, J. Illenberger, E. Lange, K. Nagel, W. A. Schmid: Distributed intelligence in pedestrian simulations, [Pedestrian and Evacuation Dynamics 2005, Part 3](http://www.vsp.tu-berlin.de/publications/ped-wien-05/cavens_pedsim2005.pdf), Pages 201-212 http://www.vsp.tu-berlin.de/publications/ped-wien-05/cavens_pedsim2005.pdf
- [Chen05] C-L.Chen, and K-T.Feng, "Hybrid Location Estimation and Tracking System for Mobile Devices", *IEEE VTC Spring 2005*
- [ChN05a] David Charypar, Kai Nagel, Q-learning for flexible learning of daily activity plans, [Journal of the Transportation Research Board](http://www.vsp.tu-berlin.de/publications/q4acts/01apr05g4acts_trb.pdf), 2005. http://www.vsp.tu-berlin.de/publications/q4acts/01apr05g4acts_trb.pdf
- [ChN05b] David Charypar, Kai Nagel, Generating complete all-day activity plans with genetic algorithms, [Transportation](http://www.vsp.tu-berlin.de/publications/ga-4-acts/30nov04.pdf), Volume 32, Number 4, July 2005. <http://www.vsp.tu-berlin.de/publications/ga-4-acts/30nov04.pdf>

- [CoOC98] S. Cobb and M. O'Connor, "Pseudolites: Enhancing GPS with Ground-based Transmitters", GPS WORLD, März 98
- [CSA05] MIT Computer Science and Artificial Intelligence Laboratory: Cricket v2 User Manual, 2005. <http://cricket.csail.mit.edu/v2man.pdf>
- [CSA06] MIT Computer Science and Artificial Intelligence Laboratory: The Cricket Indoor Location System, 2006. <http://cricket.csail.mit.edu>
- [CWS] Crossbow Wireless Sensor Networks: <http://www.xbow.com>
- [Dag94] [Carlos Daganzo](#), The Cell Transmission Model: Network Traffic, California Partners for Advanced Transit and Highways (PATH), 1994. <http://repositories.cdlib.org/its/path/papers/UCB-ITS-PWP-94-12/>
- [DaTr] N. Dalal and B. Triggs, "Histogram of Oriented Gradients for Human Detection"
- [DeD00] Jake Desyllas and Elspeth Duxbury: Visibility Graph Analysis, (VGA), Royal Institute of Chartered Surveyors conference, 2000. <http://www.intelligent-space.com/download/Planning%20For%20Movement.pdf>
- [DeD05] G. Dedes, A. G. Dempster, „Indoor GPS Positioning – Challenges and Opportunities“, VTC Fall 2005, Vol. 1, p. 412-415
- [DFNP] Deutscher Funknavigationsplan, Schlussbericht, Telematica
- [DJT01] J. Dijkstra, A.J. Jessurun and H.J.P. Timmermans: A Multi-Agent Cellular, Automata Model of Pedestrian Movement, Pedestrian and Evacuation Dynamics. Berlin, D: Springer-Verlag. 173-181, 2001. <http://www.ddss.nl/Eindhoven/publications/193>
- [DLR-01] DLR, Rahmenrichtlinie Projektmanagement, 30.5.01
- [DLR98] Presse- und Öffentlichkeitsarbeit des DLR: Pseudolites perfektionieren die Satellitennavigation. Projekte und Missionen Nr. 8/98
- [DLR-IKN] DLR/IKN Ionosphärenprozessierung im WEB http://www.kn.nz.dlr.de/tec_mon/data
- [Dör04] R. Dörries, "Die Entwicklung von Verfahrenskriterien für Präzisionsanflüge der Betriebsstufe I unter Verwendung bodengestützt augmentierter Satellitensysteme", Institut für Luft- Raumfahrt, Technische Universität Berlin, 2004
- [DTG05] DTG, Computer Laboratory, University of Cambridge: The Bat System - 3D Ultrasonic Positioning for People and Objects, 2005. <http://www.cl.cam.ac.uk/research/dtg/research/wiki/BatSystem>
- [DTS06] N. Dalal, B. Triggs, and C. Schmid, "Human Detection using Oriented Histograms of Flow and Appearance", in A. Leonardis, H. Bischof, and A. Prinz (Eds.): ECCV 2006, Part II, LNCS 3952, pp. 428-441, Springer-Verlag, 2006
- [Eka] Ekahau, <http://www.ekahau.com>
- [EnMi06] P. Enge P. Misra, Global Positioning System - Signals, Measurements, and Performance, Ganga-Jamuna Press, 2nd edition, 2006.
- [ESA] Homepage der europäischen Weltraumagentur ESA: <http://www.esa.int>

-
- [ESAEGNOS] ESA: EGNOS for Professionals, <http://www.egnos-pro.esa.int>
- [ESAEGNOS2] http://www.esa.int/esaNA/GGGQI950NDC_egnos_2.html
- [ESSP] <http://www.essp.be>
- [ETSI06] ETSI TS 125 305 V7.3.0, "Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); User Equipment (UE) positioning in Universal Terrestrial Radio Access Network (UTRAN)", June 2006
- [EU-00] European Commission: Commission Staff Working Paper „Cost benefit analysis results for GALILEO“, November 2000.
- [EU-03] Europäische Kommission: The Galilei Project, Galileo Design Consolidation, 2003.
- [EU-03a] Europäische Kommission und ESA: Europas Beitrag zur globalen Satellitennavigation, Juni 2003 (CD).
- [EU-99] European Commission: Galileo, Involving Europe in a New Generation of Satellite Navigation Services, February ,1999
- [Fab80] Wolf von Fabeck, „Kreiselgeräte“, Vogel-Verlag, Würzburg, 1980
- [Fink06] Klaus Finkenzeller: RFID Handbuch. 4. Auflage, Carl Hanser Verlag München, ISBN 3-446-40398-1, <http://www.rfid-handbook.de>, August 2006
- [FLM+06] M. Falcone, M. Lugert, M. Malik, M. Crisci, European Space Agency, The Netherlands, E. Rooney, C. Jackson, M. Trethewey, Surrey Satellite Technology Limited, United Kingdom, "Giove-A In Orbit Testing Results", Proc. ION GNSS 2006, Fort Worth, TX, September 2006.
- [FNT03] Fenner, W.; Naumann, P.; Trinckauf, J.: Bahnsicherungstechnik. Steuern, Sichern und Überwachen von Fahrwegen und Fahrgeschwindigkeiten im Schienenverkehr. 2. Auflage. Erlangen: Publicis Corporate Publishing 2003
- [Fox05] Eric Foxlin, "Pedestrian Tracking with Shoe-Mounted Inertial Sensors", IEEE Computer Graphics and Applications, vol. 25, no. 6, pp. 38-46, Nov/Dec, 2005
- [Foy76] W.Foy, "Position-Location Solutions by Taylor-Series Estimation", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 12, pp. 187-193, March 1976.
- [GAL-00] <http://www.galileo-pgm.org/>
- [GCN05] Christian Gloor, Duncan Cavens, and Kai Nagel: A Message-Based Framework for Real-World Mobility Simulations, [Applications of Agent Technology in Traffic and Transportation](http://www.vsp.tu-berlin.de/publications/ped-att/06sep04-birk.pdf), 2005. <http://www.vsp.tu-berlin.de/publications/ped-att/06sep04-birk.pdf>
- [Geist06] Geistler, A.: Bordautonome Ortung von Schienenfahrzeugen mit Wirbelstrom-Sensoren, Schriftenreihe Institut für Mess- und Regelungstechnik, Universität Karlsruhe, Band 005, Dissertation, 2006
- [Gel74] A. Gelb, „Applied Optimal Estimation“, MIT Press, Cambridge, 1974

- [GGB02] F. Gustafsson, F. Gunnarsson, N. Bergmann, U. Forssell, J. Jansson, R. Karlsson, and P.-J. Nordlund, "Particle Filters for Positioning, Navigation, and Tracking", IEEE Trans. on Signal Processing, Vol. 50, No. 2, February 2002.
- [GJU-03] http://www.galileoju.com/doc/business_in_satellite_navigation.pdf
- [God06] S. Godha, G. Lachapelle, and M. E. Cannon, "Integrated GPS/INS System for Pedestrian Navigation in a Signal Degraded Environment", ION GNSS 2006, Fort Worth, USA, September 2006
- [Graf06] S. Graf, Ch. Günther, "Analysis of GIOVE-A L1-Signals", ION GNSS 2006, Fort Worth, USA, September 2006
- [Gre01] Grewal, Weill, Andrews, "Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration", John Wiley & Sons, Inc., New York, 2001
- [GRUF05] GNSS Rail User Forum: Requirements of Rail Applications. Final Draft, May 2005 unter <http://etcs.uic.asso.fr/specifications.html>
- [Gust05] F. Gustafsson and F. Gunnarsson, "Mobile Positioning Using Wireless Networks", IEEE Signal Processing Magazine, Vol. 22, No. 4, July 2005.
- [Hae01] E. Hänsler, „Statistische Signale – Grundlagen und Anwendungen“, Springer, 3. Auflage, 2001
- [Hei99] G. Hein, "Präzise differentielle kinematische GPS Positionierung und Navigation", Unterlagen zum Seminar: Die Satellitennavigationssysteme, GPS und GLONASS; Carl-Cranz-; 17.-20. Juni 1997, Oberpfaffenhofen
- [Hel91] Dirk Helbing: A Mathematical Model for the Behavior of Pedestrians, Behavioral Science 36, 298-310, 1991
http://arxiv.org/PS_cache/condmat/pdf/9805/9805202v1.pdf
- [Hel92] Dirk Helbing: Models for Pedestrian Behavior, Natural Structures. Principles, Strategies, and Models in Architecture and Nature, Part II (Sonderforschungsbereich 230, Stuttgart, 1992), http://arxiv.org/PS_cache/condmat/pdf/9805/9805089v2.pdf
- [Hel92-1] Dirk Helbing: A Fluid Dynamic Model for the Movement of Pedestrians, Complex Systems 6, 391-415, 1992. http://arxiv.org/PS_cache/condmat/pdf/9805/9805213v1.pdf
- [HeM95] [Dirk Helbing](#), [Peter Molnar](#): Social Force Model for Pedestrian Dynamics, Physical Review E 51, 4282-4286, 1995. <http://arxiv.org/abs/cond-mat/9805244>
- [HeM97] D. Helbing P. and Molnar: Self-organization phenomena in pedestrian crowds, Self-Organization of Complex Structures: From Individual to Collective Dynamics, ed. Schweitzer (Gordon & Beach: London), 1997.
- [HHS+02] Andy Harter, Andy Hopper, Pete Steggles, Andy Ward and Paul Webster: The Anatomy of a Context-Aware Application, Vol. 8, pp. 187-197, February 2002.
- [Hilse00] O.Hilsenrath, M.Wax, "Radio Transmitter Location Finding for Wireless Communication Network Service and Management", U.S Wireless Corporation, US Patent No. 6026304, assigned February 2000
- [Hob05] Antoine Hobeika, TRANSMIS fundamentals, 2005.
http://tmip.fhwa.dot.gov/transims/transims_fundamentals/

-
- [Hon] Honeywell Regelsysteme GmbH: VSB-Radar SD944A1, 2004, http://content.honeywell.com/dses/assets/datasheets/VSB_d_40702.pdf
- [HROW07] P. Hoehner, P. Robertson, E. Offer, T. Woerz. "[The soft-output principle - reminiscences and new developments](#)". European Transactions on Telecommunications, John Wiley & Sons, Ltd, DOI: [10.1002/ett.1200](https://doi.org/10.1002/ett.1200); March 2007
- [HSBP00] Serge P. [Hoogendoorn](#), Phil [Bovy](#), Gas-Kinematic Modelling and Simulation of Pedestrian Flows, Transportation Research Record No. 1710, Traffic Flow Theory and Highway Capacity, 2000. <http://pubsindex.trb.org/document/view/default.asp?lbid=670620>
- [IAC] GLONASS Information-Analytical Center (IAC): <http://www.glonass-ianc.rsa.ru/>, Stand 08/2007
- [IdSol] IdentecSolutions, <http://www.identecsolutions.com>
- [IS-GPS-200] NAVSTAR GPS, „Navstar GPS Space Segment/Navigation User Interfaces“, IS-GPS-200, Rev. D, 7th December 2004
- [JU97] S. J. Julier and J. K. Uhlmann, „A New Extension of the Kalman-Filter to Nonlinear Systems“, Proceedings of AeroSense: International Symposium on Aerospace/Defense Sensing, Simulation and Controls, Multi Sensor Fusion, Tracking and Resource Management II, SPIE, 1997.
- [JuU04] S. J. Julier, J. K. Uhlmann, „Unscented Filtering and Nonlinear Estimation“, Proceedings of the IEEE, Vol. 92, No. 3, 2004, p. 401-422
- [JuU97] S. J. Julier, J. K. Uhlmann, „A New Extension of the Kalman-Filter to Nonlinear Systems“, Int. Symp. Aerospace/Defense Sensing, Simul. and Controls, 1997
- [Kai02] W.Kai, O.Ahmed, A.Michael, and R. Patrick, „Implementation of Soft Location on Mobile Devices“, International Symposium on Indoor Localization and Position Finding, July 2nd 2002
- [Kal60] R. E. Kalman, „A new approach to linear filtering and prediction problems“, Transaction of the ASME-Journal of Basic Engineering, 82 (Series D), p. 35-56, 1960
- [Kamol04] K.Kamol, and K.Prashant, „Modeling of Indoor Positioning Systems Based on Location Fingerprinting“, IEEE InforCom 2004
- [KayFr97] Kayton, M., Fried, W. R., „Avionics Navigation Systems“, 2nd Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1997
- [KKJ+04] P. Krishnan, A. S. Krishnakumar, Wen-Hua Ju, Colin Mallows, Sachin Ganu: „A System for LEASE: Location Estimation Assisted by Stationary Emitters for Indoor RF Wireless Networks“, IEEE Infocom 2004.
- [KoPi07] I. Kotsia and I. Pitas, „Facial Expression Recognition in Image Sequences Using Geometric Deformation Features and Support Vector Machines“, in IEEE Trans. on Image Processing, vol. 16, no. 1, Jan. 2007
- [Kumm97] Kumm, W., "GPS - Global Positioning System", 1997, Delius Klasing Verlag (Bielefeld); ISBN: 3-87412-143-7
- [Kutl04] D.Kutluyil, and H-S.Ahmad, „Target Tracking by time difference of arrival using recursive smoothing“, Signal Processing, 2004

- [LaBr06] O. Lanz, R. Brunelli, „Dynamic Head Location and Pose from Video“, in IEEE Int. Conf. on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems, Sept 3-6, 2006, Heidelberg, Germany
- [Laitinen01] H.Laitinen, J.Lahteenmaki, T.Nordstrom, „Database correlation method for GSM location“, in Proc. IEEE Conf. on Vehic. Tech. (VTC spring), May 2001
- [Lar04] Larsson, E.G, „Cramer-Rao bound analysis of distributed positioning in sensor networks“, Signal Processing Letters, IEEE Volume 11, Issue 3, March 2004
- [LCK01] X. Liu, T. Chen, B.V.K. Vijaya Kumar, "Face Authentication for Multiple Subjects Using Eigenflow". Accepted for publication, Pattern Recognition, special issue on Biometrics, 2001
- [Le03] B.L.Le, A. Kazi, and T.Hiroyuki, „Mobile Location Estimator with NLOS Mitigation Using Kalman-Filtering“, IEEE Wireless Communications and Networking, vol.3, pp. 1969-1973, Mar 2003
- [Leven44] K. Levenberg, „A Method for the Solution of Certain Problems in Least Squares“, Quarterly Journal of Applied Mathematics, vol. 2, pp. 164-168, 1944.
- [LKF05] Taras I. Lakoba, D. J. Kaup, Neal M. Finkelstein: Modifications of the Helbing-Molnár-Farkas-Vicsek Social Force Model for Pedestrian Evolution, SIMULATION, Vol. 81, No. 5, 339-352, 2005.
<http://sim.sagepub.com/cgi/content/abstract/81/5/339>
- [MaKa01] A.M. Martinez and A.C. Kak, „PCA versus LDA“, in Trans. on Pattern Anal. Mach. Intell., vol. 23, pp. 228-233, 2001
- [Mans98] Mansfeld, W., "Satellitenortung und Navigation: Grundlagen und Anwendung globaler Satellitennavigationssysteme", 1998, Vieweg Verlag, ISBN 3-528-06886-8
- [Marq63] D. Marquardt, „An Algorithm for Least Squares Estimation of Nonlinear Parameters“, SIAM Journal on Applied Mathematics, vol. 11, pp. 431-441, 1963.
- [Mart02] A.M. Martinez, „Recognizing Imprecisely Recognized, Partially Occluded and Expression Variant Faces from a Single Sample per Class“, in Trans. on Pattern Anal. Mach. Intell., vol. 24, pp. 748-763, 2002
- [MaS98] J. MacGregor Smith: Evacuation Networks, Encyclopedia of Optimization, 1998.
<http://citeseer.ist.psu.edu/511694.html>
- [Men06] C. Mensing and S. Plass, „Positioning Algorithms for Cellular Networks Using TDOA“, Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP), May 2006.
- [Metro] Metro eröffnet RFID-Zentrum. Computerwoche vom 08.07.2004,
<http://www.computerwoche.de/index.cfm?pid=254&pk=547790>
- [MKC87] A. Mahalanobis, B.V.K. Vijaya Kumar, and D. Casasent, „Minimum average correlation energy filters,“ Appl. Opt. 26, pp. 3633-3630, 1987
- [MM] MagicMap, <http://www2.informatik.hu-berlin.de/rok/MagicMap/>
- [MNR06] A. Mitelman, P.-L. Normark, M. Reidevall, J. Thor, O. Grönqvist, L. Magnusson, „The Nordnav Indoor GNSS Reference Receiver“, ION GNSS, Sept. 2006, p. 2494-2502

-
- [Mol91] D. Molkdar, "Review on radio propagation into and within buildings", IEE Proceedings-H, Vol. 138, No.1, Feb. 1991
- [NATO04] NATO, RTO-EN-SET-064, AC/323(SET-064)TP/43, Advances in Navigation Sensors and Integration Technology, February 2004
- [Nee94] D.van Nee, "The Multipath Estimating Delay Lock Loop: approaching Theoretical Accuracy Limits", IEEE Position, Location and Navigation Symposium, 1994
- [NEG+07] T. Noack, E. Engler, M. Grimm, M. Meyer zu Hörste: "State of the Art-Analyse Zugortung", Technischer Bericht, Projekt RCAS, WP 3100. Mai 2007.
- [OkM93] Shigeyuki Okazakia and Satoshi Matsushitaa: A Study of Simulation Model For Pedestrian Movement With Evacuation And Queuing, Proceedings of the International Conference on Engineering for crowd safety, 1993. <http://www.anc-d.fukui-u.ac.jp/~sat/ECS93.pdf>
- [Orbitron] Orbitron Satellite Tracking System, <http://www.stoff.pl/>
- [OsB07] Carolina Osorio and Michel Bierlaire: An analytic finite capacity queuing network capturing congestion and spillbacks, TRISTAN VI, EPFL, 2007. <https://documents.epfl.ch/users/b/bi/bierlair/dropbox/TRISTAN/054Osorio.pdf>
- [PCB00] Nissanka B. Priyantha, Anit Chakraborty, and Hari Balakrishnan: The Cricket Location-Support System, Proc. of the Sixth Annual ACM International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM), August 2000.
- [PSS04] F. Perez-Fontan, B. Sanmartin, A. Steingaß, A. Lehner, J. Selva, E. Kubista, B. Arbesser-Rastburg, „Measurements and Modeling of the Satellite-to-Indoor Channel for Galileo“, ION NTM 2004, USA
- [PTA06] Shwetak N. Patel, Khai N. Truong, and Gregory D. Abowd: PowerLine Positioning: A Practical Sub-Room-Level Indoor Location System for Domestic Use, Ubicomp 2006, LNCS 4206, pp. 441 – 458, 2006.
- [RaCh06] N. Ramanathan and R. Chellappa, " Face Verification Across Age Progression", in IEEE Trans. on Image Processing, vol. 15, no. 11, Nov. 2006
- [RailS01] ESA Project Galileo RailSim - Project Proposal to ESA's LET-SME Program, Socratec GmbH, DLR, SOC-Q-20000041, 2001
- [Remi07] P. Rémi, „Error Analysis and Augmentation Signal Generation for GNSS“, Institut für Kommunikation und Navigation, Technische Universität München, 2007
- [Res04] Wolfram Ressel: Modeling and Simulation of Mobility, 1st International Workshop on Intelligent Transportation (WIT 2004); Hamburg, Germany, 2004. ftp://ftp.informatik.uni-stuttgart.de/pub/library/ncstrl.ustuttgart_fi/INPROC-2004-14/INPROC-2004-14.pdf
- [Rob07a] P. Robertson, "Sensorfusion mit unterschiedlichen Sensoren für die Positionierung innerhalb und ausserhalb von Gebäuden", DLR Internal Report, Galileo ADAP, ADAP-TN-3100-41
- [RUI-05] Ruiz, L.: Galileo Status, Presentation on ION 2005, Long Beach.

- [SaLu07] Domnic Savio, Thomas Ludwig, "Smart Carpet: A Footstep Tracking Interface". 21st International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops (AINAW'07), pp. 754-760, 2007
<http://doi.ieeecomputersociety.org/10.1109/AINAW.2007.338>
- [Schw04] A.Schwaighofer, M.Grigoras, V.Tresp, and C. Hoffmann, "GPRS: A Gaussian process positioning system for cellular networks", Advances in Neural Information Processing Systems, 16, 2004
- [Simon02] Simon Haykin, "Adaptive Filter Theory", 4th edition, Prentice Hall
- [SKK02] M. Savvides, B.V.K. V. Kumar, and P. Khosla, „Face Verification Using Correlation Filters”, in Proc. of Third IEEE Automatic Identification Advanced Technologies Tarytown, NY, pp. 56-61, March 2002
- [SMD07] S. Sand, C. Mensing, and A. Dammann. Positioning in wireless communications systems introduction and overview. In *Proceedings 18th Wireless World Research Forum (WWRF) Meeting*, Espoo, Finland, June 2007.
- [Son94] H-L.Song, "Automatic Vehicle Location in Cellular Communications Systems", IEEE Trans. on Vehicle Technology, Vol. 43, pp. 902-908, July, 1994
- [SRB01] C.Savarese, J.M.Rabaey. and J.Beutel, "Locationing in distributed ad hoc wireless sensor networks", Proc. Int. Conf. Acoustics, Speech Signal Processing, Salt Lake City, UT, May 2001
- [StG05] Pete Steggles and Stephan Gschwind: The Ubisense Smart Space Platform, Ubisense, 2005.
http://www.ubisense.net/SITE/UPLOAD/Document/WhitePapers/Ubisense_a_smart_space_platform.pdf
- [Sto97] W. C. Stone, "Electromagnetic Signal Attenuation in Construction Materials", NIST Construction Automation Program, Report No. 3, Oct. 1997
- [Tek02] Kardi Teknomo: Microscopic Pedestrian Flow Characteristics: Development of an Image Processing Data Collection and Simulation Model, PhD Dissertation, 2002.
<http://www.getcited.org/pub/103387849>
- [TitWes04] Titterton, D.H, Weston J.L., "Strapdown inertial navigation technology", 2nd edition, IEE Radar, Navigation and Avionics Series 5, Peter Peregrinus Ltd. on behalf of the Institution of Electrical Engineers, London, 2004
- [Triki06] M.Triki, D.T.M.Slock, V.Rigal, and P.Francois, "Mobile Terminal Positioning via Power Delay Profile Fingerprinting: Reproducible Validation Simulations", in Proc. IEEE Conf. on Vehic. Tech (VTC fall), September 2006
- [TSD] Time Service Department, <http://tycho.usno.navy.mil/>, Aug.2007
- [TuPe91] M. Turk and A. Pentland, "Eigenfaces for Recognition", in Journal of Cognitive Neuroscience, 3(1), pp. 72-86, 1991
- [Ubi06] Ubisense Limited: Ubisense Hardware Datasheet, 2006.
http://www.ubisense.net/SITE/UPLOAD/Document/TechDocs/Ubisense_hardware_datasheet_May_2006.pdf
- [VNS06] M. Voit, K. Nickel, R. Stiefelhagen, „A Bayesian Approach for Multi-view Head Pose Estimation”, in IEEE Int. Conf. on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems, Sept 3-6, 2006, Heidelberg, Germany

-
- [Vorwerk] Vorwerk Carpets: „Future requires Visions“, http://www.vorwerk-teppich.de/sc/vorwerk/thcarper_orgatech_en.html
- [Voss03] Martin Vossiek: „Wireless Local Positioning“, IEEE Microwave Magazine Dezember 2003
- [WaM00] E. A. Wan, R. van der Merwe, “The Unscented Kalman-Filter for Nonlinear Estimation“, AS-SPCC, 2000, p. 153-158
- [Wei04] Zeev Weissman: Indoor Location White paper, Tadlys Ltd., 2004.
- [Wen07] J. Wendel, “Integrierte Navigationssysteme“, Oldenburg Verlag, 2007
- [WH96] M.Wylie, and J.Holtzmann, “The Non-Line of Sight Problem in Mobile Location Estimation“, IEEE International Conference on Universal Personal Communications, pp.827-831, 1993
- [WKAR06] Wendlandt, Khider, Angermann, Robertson, „Continuous location and direction estimation with multiple sensors using particle filtering“, IEEE International Conference on [Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems, 2006](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=4042026). http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=4042026
- [WLF03] Fang Weifeng, Yang Lizhong, W. Fan, „Simulation of bi-direction pedestrian movement using a cellular automata model“, Science Direct, Physica A 321 (2003) 633 – 640, 2003.
- [WLS03] K.-W. Wong, K.-M. Lam, and W.-C. Siu, „A Robust Scheme for Live Detection of Human Faces in Color Images“, Signal Processing: Image Communication, vol. 18, pp. 103-114, 2003
- [WSR+07] Kai Wendlandt, Kosawat Sukchaya, Patrick Robertson, Mohammed Khider und Michael Angermann: „Demonstration of a Realtime Active-Tag RFID, Java Based Indoor Localization System using Particle Filtering“, UbiComp 2007
- [WTT] William J. Hughes Technical Center WAAS Test Team, <http://www.nstb.tc.faa.gov>
- [XiHu06] C. Xiang and D. Huang, „Feature Extraction Using Recursive Cluster Based Linear Discriminant With Application to Face Recognition“, in IEEE Trans. on Image Processing, vol. 15, no. 12, Dec. 2006
- [YFL+03] L. Yang, W. Fang, L. Li, R. Huang, W. Fan: [Cellular automata pedestrian movement model considering human behavior](http://www.scichina.com/getfile?category=article&code=02WW0271&file-name=03ky1695.pdf), CHINESE SCIENCE BULLETIN - ENGLISH EDITION-2003, VOL 48; PART 16, pages 1695-1699. <http://www.scichina.com/getfile?category=article&code=02WW0271&file-name=03ky1695.pdf>
- [YXT07] S. Yan, D. Xu, and X. Tang, „Face Verification With Balanced Thresholds“, in IEEE Trans. on Image Processing, vol. 16, no. 1, Jan. 2007
- [ZCP+03] W. Zhao, R. Chellappa, P.J. Phillips, and A. Rosenfeld, „Face Recognition: A Literature Survey“, in ACM Computing Surveys, Vol. 35, No. 4, December 2003
- [Zhao00] Y.Zhao, „Mobile Phone Location Determination and Its Impact on Intelligent Transportation Systems“, IEEE Trans. Intelligent Transportation Systems, Vol. 1. March 2000.
- [Zhao02] Y.Zhao, „Standardization of Mobile Phone Positioning for 3G Systems“, IEEE Communications Magazine, Vol. 40, No. 7, July 2002.

- [ZhHo05] J. Zhou and J. Hoang, „Real Time Robust Human Detection and Tracking System“, in Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition 2005 (CVPR'05)
- [ZPR07] Ying Zhang, Kurt Partridge, and Jim Reich, "Localizing Tags Using Mobile Infrastructure", LoCA07, Sep. 2007

Das DLR im Überblick

Das DLR ist das nationale Forschungszentrum der Bundesrepublik Deutschland für Luft- und Raumfahrt. Seine umfangreichen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in Luftfahrt, Raumfahrt, Verkehr und Energie sind in nationale und internationale Kooperationen eingebunden. Über die eigene Forschung hinaus ist das DLR als Raumfahrt-Agentur im Auftrag der Bundesregierung für die Planung und Umsetzung der deutschen Raumfahrtaktivitäten sowie für die internationale Interessenswahrnehmung zuständig. Zudem fungiert das DLR als Dachorganisation für den national größten Projektträger.

In 28 Instituten und Einrichtungen an den 13 Standorten Köln (Sitz des Vorstandes), Berlin, Bonn, Braunschweig, Bremen, Göttingen, Hamburg, Lampoldshausen, Neustrelitz, Oberpfaffenhofen, Stuttgart, Trauen und Weilheim beschäftigt das DLR ca. 5.300 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter. Das DLR unterhält Büros in Brüssel, Paris und Washington D.C.

Die Mission des DLR umfasst die Erforschung von Erde und Sonnensystem, Forschung für den Erhalt der Umwelt und umweltverträgliche Technologien, zur Steigerung der Mobilität sowie für Kommunikation und Sicherheit. Das Forschungsportfolio des DLR reicht von der Grundlagenforschung zu innovativen Anwendungen und Produkten von morgen. So trägt das im DLR gewonnene wissenschaftliche und technische Know-how zur Stärkung des Industrie- und Technologiestandortes Deutschland bei. Das DLR betreibt Großforschungsanlagen für eigene Projekte sowie als Dienstleistung für Kunden und Partner. Darüber hinaus fördert das DLR den wissenschaftlichen Nachwuchs, betreibt kompetente Politikberatung und ist eine treibende Kraft in den Regionen seiner Standorte.

<http://www.dlr.de>

Institut für Kommunikation und Navigation

Zentrale Aufgabe des Instituts ist die Entwicklung von Verfahren und Systemen der Funkübertragung und Funkortung. Diese Verfahren sind in der Regel satellitenbasiert. Eingesetzt werden sie zur Fernsehübertragung, für den Internetzugang in dünn besiedelten Gebieten, aber auch und im Besonderen zur Verkehrssteuerung. Hier werden sie die sichere Führung von Zügen, das schnelle Anlegen von Fähren und die Vermeidung von Kollisionen erlauben. In der Luftfahrt werden sie neue Landeverfahren ermöglichen und den Piloten mehr Freiheiten beim Streckenflug geben. Das Institut ist an der Schnittstelle der Programmatiken „Raumfahrt“ (Systeme und Methoden) und „Luftfahrt“ sowie „Verkehr“ (Anwendungen) angesiedelt.

<http://www.dlr.de/kn>



**Deutsches Zentrum
DLR für Luft- und Raumfahrt e.V.**
in der Helmholtz-Gemeinschaft