

Funkbasierte Personendetektierung im Untertagebau

Andreas Fink und Helmut Beikirch

Zusammenfassung

In für den Menschen partiell gefährlichen Umgebungen ist eine grobe, dabei aber hochverfügbare Personenortung notwendig. So ist beispielsweise die Positionsbestimmung von Personen im Untertagebau, insbesondere in direkter Umgebung zu automatisch gesteuerten elektrohydraulischen Strebausbauten, für den Personenschutz von zunehmender Bedeutung.

Die Auswertung von Empfangssignalstärken mittels Distanzapproximationen stellt hierfür eine einfache und mehrfach erprobte Möglichkeit der funkbasierten Ortung in geschlossenen Räumen dar. Als problematisch erweisen sich dabei Signalinterferenzen durch Mehrwegeausbreitung, welche in Form von »Small Scale Fading« in wenigen Fällen zum Signalausfall, in jedem Fall aber zu einer Signalverformung führen. Schwerpunkt des Artikels ist ein redundantes Transceiverkonzept, welches entscheidend zur Verfügbarkeit und Genauigkeit der funkbasierten Ortung beiträgt. Um die Bedeutung der Diversität auf die Systemeigenschaften aufzuzeigen, ist eine dynamische Tracking-Messung geeignet, wobei sich das Detektionssystem als robust und zuverlässig bei gleichzeitig geringem Aufwand für Installation und Wartung der Infrastrukturkomponenten erweist.

Summary

In partially hazardous environments a rough but high available tracking of humans is of interest. For example, the monitoring of maintenance staff in the underground longwall mining – in particular close to heavy weight self-advancing hydraulic shields – is crucial to safe human lives. A distance approximation based on received signal strength (RSS) readings offers a well known and low-cost tracking solution in obstructed indoor environments.

The main issue with RSS readings is the multi path propagation and the resulting fading in indoor environments. The small-scale fading leads to deformations of the RSS or even to signal loss in case of heavy signal dropouts.

The paper focuses on a redundant RF communication concept using spatial and frequency diversity to compensate the influence of multipath fading and reach a more precise and high available tracking. The experimental results on a motion test track show that an improved tracking performance can be reached with low infrastructural costs.

Schlüsselwörter: Indoor Lokalisierung, Personenortung, Empfangssignalstärke, Funkwellenausbreitung, Kanal-redundanz

1 Einleitung

Lokale Ortungssysteme sind heutzutage allgegenwärtig und in nahezu jedem Bereich des modernen Lebens anzutreffen. Sie ermöglichen beispielsweise die Navigation für Fußgänger und Autos in Bereichen von Gebäuden oder Straßenschluchten, bei denen die Verfügbarkeit des globalen Ortungssystems GPS stark eingeschränkt ist (Inoue 2009).



Abb. 1: Systeminfrastruktur für lokale Personendetektierung im Untertagebau zur Kohlegewinnung (BS – Basisstation, MS – Mobile Station)

Eine weitere Anwendung für lokale Systeme ist die Detektierung von Personen im Bergbau unter Tage. Ein Beispieldaten für eine lokale funkbasierte Ortung einer mobilen Station (MS) in Bezug zu fest installierten Basisstationen (BS) in der Abbauregion ist in Abb. 1 dargestellt. Der Kohleabbau unter Tage erfolgt im sogenannten Strebbau. Das freigelegte Gebirge wird dabei temporär durch hydraulisch bewegte »Schilder« gestützt. Während des Abbaus bewegt sich die gesamte Systeminfrastruktur durch Vorschreiten der Schilder, was zu Gefahren für dort befindliches Personal führen kann. Daher sollten nach Möglichkeit die automatisch gesteuerten Schilder der Infrastruktur gestoppt werden, wenn sich eine Gefährdung für Personen in direkter Umgebung zeigt. Die gegenseitlichen Forderungen nach möglichst hoher Sicherheit und möglichst geringem Maschinenstillstand bedingen ein zuverlässiges Ortungssystem, wobei Genauigkeit und Verfügbarkeit die entscheidenden Kriterien sind.

Eine grundlegende Einordnung der unterschiedlichen Methoden zur Lokalisierung ist in Abb. 2 dargestellt. Die Systeme können nach dem zugrunde liegenden physikalischen Sensorprinzip unterteilt werden. Die Nutzung von gerichteten Sensoren wie Infrarot (IR), Ultraschall sowie optischen und magnetischen Systemen ist auf Szenarien mit Sichtlinienverbindung (line of sight, LOS) beschränkt.

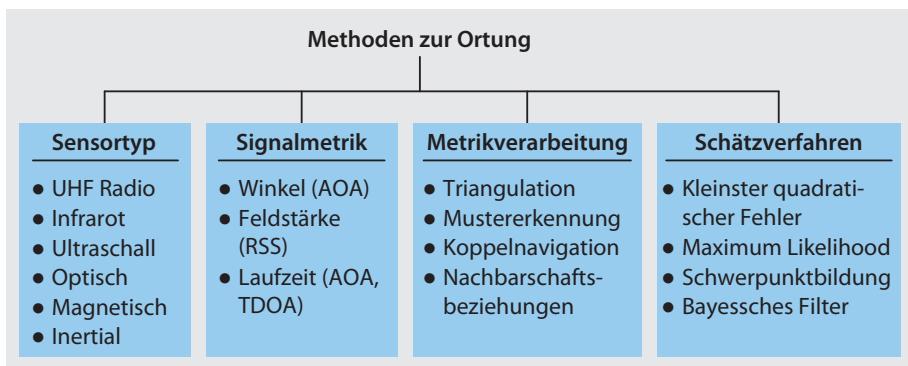


Abb. 2: Klassifizierung von Ortungssystemen

Typische Umgebungen in Gebäuden sind durch Abschattungen und Nichtsichtlinienverbindungen (non line of sight, NLOS) gekennzeichnet und erschweren somit die zuverlässige Positionsbestimmung. Ein Trägheitsnavigationssystem (inertial navigation system, INS) arbeitet unabhängig von Sichtbehinderungen und kann für einen kurzen Zeitraum eine genaue Ortsinformation liefern (Wang 2007). Als miniaturisierte und kostengünstige Sensoren kommen oft moderne Mikro-Elektro-Mechanische Systeme (MEMS) – in der Regel ein triaxialer Beschleunigungssensor und ein triaxialer Drehratensor, meist unterstützt von einem 3D-Magnetfeldsensor – zum Einsatz. Problematisch für die Positionsbestimmung ist hierbei die eingeschränkte Langzeitstabilität durch die Fehlerfortpflanzung bei der mathematischen Integration der Sensorwerte.

Die Triangulation auf Basis von Distanzschätzungen mit funkbasierten Sensoren im UHF-Bereich ist durch die Mehrwegeausbreitung in Gebäuden besonders fehleranfällig. Auf der anderen Seite zeigen die Schätzungen eine gute Langzeitstabilität und benötigen nur einen geringen Aufwand für die Hardware- und Softwareinfrastruktur, weshalb sie weit verbreitet Anwendung finden – beispielsweise beim WLAN-basierten Horus System (Rehim 2004), RADAR (Bahl 2000) oder der kommerziell verfügbaren Ekahau Standortbestimmung.

Dieser Artikel behandelt Probleme und Lösungen beim Einsatz von Empfangssignalstärken zur Distanzschätzung am Beispiel eines proprietären Funksystems für Detektierung und Tracking von Personen in besonders stark gestörten dynamischen Umgebungen. Nach einer Einführung in die Funkwellenausbreitung in Gebäuden und die funkbasierte Distanzschätzung wird ein redundantes Übertragungskonzept zur Erhöhung von Genauigkeit und Verfügbarkeit der Detektierung vorgestellt, welches anhand einer eindimensionalen Trackingmessung näher untersucht wird.

2 Distanzapproximation

Neben einer Auswertung der Empfangssignalstärke (received signal strength, RSS) werden Verfahren mit Laufzeitmessungen (time of arrival, TOA; time difference of

arrival, TDOA) und Winkelmesungen (angle of arrival, AOA) zur funkbasierten Distanzschätzung verwendet. Die Verfahren zur Laufzeit- und Winkelmessung benötigen dabei zusätzlichen Hardware- und Softwareaufwand – beispielsweise Zähler mit einer Auflösung im Nanosekundenbereich für eine präzise Synchronisation der Empfänger bei TDOA beziehungsweise einer zusätzlichen Synchronisation des Senders bei TOA (Jang 2008).

Die RSS-basierte Distanzapproximation bedient sich eines physikalischen Prinzips, nachdem die von einem Sender abgestrahlte Energie mit der Entfernung logarithmisch abklingt. Das theoretische »Log-Distance-Modell« wird durch den Zusammenhang

$$\overline{PL}(d) = \overline{PL}(d_0) + 10 \cdot n \cdot \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (1)$$

beschrieben, wobei $\overline{PL}(d)$ die mittlere Signaldämpfung im Abstand d , $\overline{PL}(d_0)$ die Referenzdämpfung im Abstand d_0 und n der umgebungsspezifische Ausbreitungskoeffizient ist, (Rappaport 2002).

Der reale Verlauf der entfernungsabhängigen Dämpfung $\overline{PL}(d)$ ist in Abb. 3 für eine 2,4GHz Pfadverlustmessung über 11 m dargestellt. Die Referenzdämpfung von 67 dBm wurde hierbei in einem Abstand von einem Meter aufgenommen. Der theoretische Verlauf nach (1) ist zwei unterschiedlichen Schwankungen unterworfen. Das »Large Scale Fading« ist auf Abschattungen durch Objekte zurückzuführen. Das »Small Scale Fading« tritt mit der durch physikalische Phänomene der Reflexion, Beugung und Streuung verbundenen Mehrwegeausbreitung

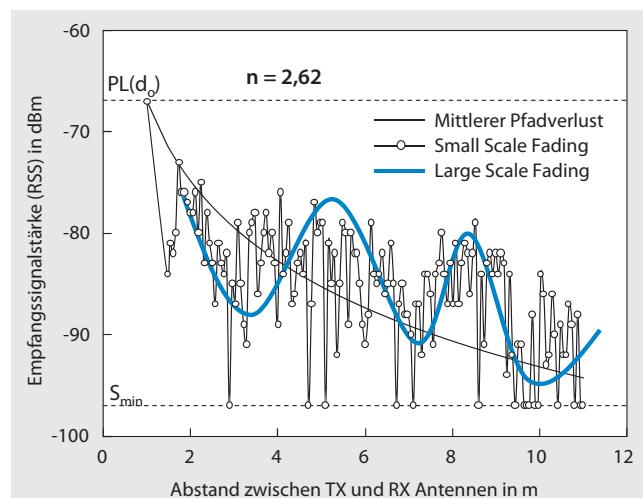


Abb. 3: Distanzabhängiger Pfadverlust in einer Indoor Fading Umgebung (Sendefrequenz: 2,420 GHz; Wiederholrate: 4 Hz; Geschwindigkeit des mobilen Senders: 0,27 m/s)

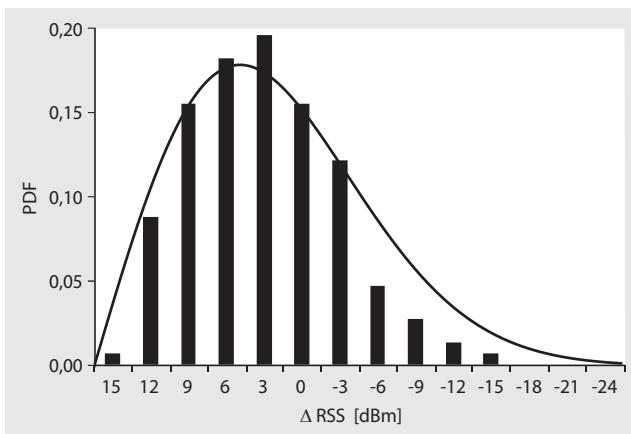


Abb. 4: Rayleigh-Verteilung der Signalstärke am Empfänger für Pfadverlustmessung (Betrachtung über 11 m, bezogen auf mittleren Pfadverlust)

in Erscheinung. Das am Empfänger eintreffende Signal ist als Interferenz mehrerer Signalanteile zu verstehen. Durch die Signalverformungen geht der eindeutige Zusammenhang zwischen Entfernung und Signaldämpfung verloren, wodurch die Genauigkeit des Detektionssystems begrenzt wird. Weiterhin kann es zur völligen Auslösung des Signals und somit zum teilweisen Ausfall des Detektionssystems kommen. In Abb. 3 sind die Signalausfälle durch ein Unterschreiten der Empfindlichkeitschwelle S_{min} gekennzeichnet.

Die Verteilung der bei der Pfadverlustmessung aus Abb. 3 aufgenommenen Empfangssignalstärken um den mittleren Pfadverlust ist in Abb. 4 dargestellt. Die Abweichungen umfassen dabei einen Pegelbereich von 30 dBm, wobei die Verteilung einer Rayleigh-Funktion entspricht.

3 System und Infrastruktur

Der Aufbau des Ortungssystems sieht neben der zu ortenden mobilen Station (MS) eine fest installierte Infrastruktur aus mehreren untereinander vernetzten Basisstationen (BS) mit bekanntem Ortsbezug vor. Die Erkennung der MS kann sowohl in zweidimensionalen Anordnungen (z.B. Lagerhalle, Büro) als auch in eindimensionalen Ausdehnungen (z.B. Strebau im Bergbau) erfolgen. Für die zweidimensionale Anordnung sind in Fink (2009 und

2010) Ergebnisse für die Verfügbarkeit und Genauigkeit der Lokalisierung in stark strukturierten Umgebungen zu finden. In diesem Artikel steht die eindimensionale Positionsbestimmung im Vordergrund. In Abb. 1 ist eine beispielhafte Anordnung der einzelnen Systeminfrastrukturkomponenten in einem möglichen Einsatzszenario dargestellt.

Das Personal eines automatischen elektrohydraulischen Strebausbaus in einem Kohlebergwerk trägt die MS am Gürtel und soll durch die Auswertung der von der MS ausgesendeten und von den einzelnen BS empfangenen Signale erkannt werden. Durch die Ortsinformation werden zum Schutz der Person alle hydraulischen Systeme in direkter Umgebung gesperrt. Die Applikation stellt hohe Anforderungen an die Verfügbarkeit des Systems. Die Genauigkeit gibt die Größe der zu definierenden Schutzzone vor. Die BS sind über einen CAN-Bus an einen Monitor-PC angeschlossen, auf dem eine Java-Applikation (Mine-Loc Monitor) mit grafischer Benutzeroberfläche installiert ist. Der PC dient als Datenkonzentrator für die RSS-Werte aller BS. Hier erfolgt die Berechnung und Anzeige der aktuellen MS-Position. Der Ablauf der Positionsbestimmung ist in Abb. 5 zusammengefasst.

Die Distanzapproximation erfolgt nach dem zuvor beschriebenen »Log-Distance-Modell« mit (1) nach d umgestellt

$$d = 10^{\left(\frac{RSSI_{dBm} - A}{10n} \right)}, \quad (2)$$

wobei der mittlere Pfadverlust $\overline{PL}(d)$ durch die Empfangssignalstärke in dBm ($RSSI_{dBm}$) und die Referendämpfung $\overline{PL}(d_0)$ durch die Empfangssignalstärke in einem Abstand von einem Meter (A) substituiert werden. Die Ausbreitungsparameter A und n werden bei der Installation des Systems über den Austausch von Trainingsdaten zwischen den BS ermittelt. Die eigentliche Positionsbestimmung sieht eine gewichtete Schwerpunktbildung (selective adaptive weighted centroid localization, kurz: SAWCL) der bekannten BS-Positionen mittels der aufgenommenen RSS-Werte vor, deren Ergebnis der MS-Position entspricht. Ein Kalman-Filter mit einem eindimensionalen Bewegungsmodell und der Annahme einer begrenzten Geschwindigkeit der MS liefert neben der redundanten Kanalauslegung einen entscheidenden

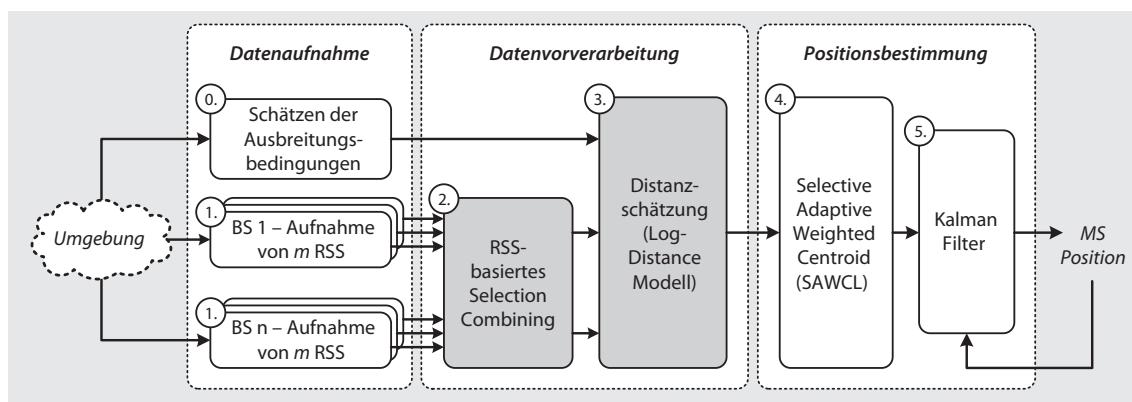


Abb. 5:
Ablauf und
Funktionen
zur lokalen
Positions-
bestimmung
einer mobilen
Station (MS)
bezüglich fest
installierter
Basisstatio-
nen (BS)

Beitrag zur Minimierung des Positionsfehlers. Detaillierte Informationen zum SAWCL Algorithmus sind in Fink (2010) beschrieben, ein Vergleich mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate wird in Fink (2011a) betrachtet. Die Funktionsweise des Kalman-Filters wird in Fink (2011b) erläutert.

4 Fading-Kompensation durch Redundanz

In diesem Abschnitt werden Methoden und Prinzipien aufgezeigt, um aus den Empfangssignalstärken trotz der Einschränkungen durch die Mehrwegeausbreitung eine plausible Positionsinformation ableiten zu können.

4.1 Kanalkorrelation von Diversity-Anordnungen

Die Mikro-Diversity-Anordnungen zur Fading Kompensation werden nach Molisch (2005) entsprechend der für die Redundanz genutzten physikalischen Parameter in die folgenden Techniken unterteilt:

- Raum-Diversity (räumlich unterschiedlich angeordnete Antennen/Transceiver)
- Zeit-Diversity (Mehrfachübertragung zu unterschiedlichen Zeitpunkten)
- Frequenz-Diversity (Nutzung verschiedener Frequenzkanäle/-bänder)
- Winkel-Diversity (mehrere Antennen mit unterschiedlicher Richtcharakteristik)
- Polarisations-Diversity (mehrere Antennen in unterschiedlichen Polarisationsebenen)

Die statistische Beschreibung der Korrelation der redundanten Kanäle erfolgt im Allgemeinen nach dem Jakes-Modell (Jakes 1994). Die Hüllkurve ρ des Korrelationskoeffizienten kann mit

$$\rho = \frac{J_0^2(k_0 v \tau)}{1 + (2\pi)^2 S_\tau^2 (f_2 - f_1)^2} \quad (3)$$

berechnet werden, wobei J_0 die Bessel-Funktion nullter Ordnung, k_0 die Wellenzahl, v die Geschwindigkeit, τ die zeitliche Differenz der Kanäle, S_τ^2 der Effektivwert der Kanalverzögerungen und $(f_2 - f_1)$ der Frequenzabstand der betrachteten Kanäle ist. Jede Korrelation zwischen den redundanten Kanälen der Diversity-Anordnung reduziert den Gewinn des Gesamtsignals am Ausgang des Combining-Blocks. Liegt ρ unterhalb einer definierten Schwelle, werden die Kanäle als »effektiv« unkorreliert angenommen.

4.2 Optimaler Antennen- und Frequenzabstand

Die Voraussetzungen für einen kleinen Korrelationsfaktor zwischen zwei Kanälen sind ein möglichst großer

Frequenzabstand beziehungsweise ein möglichst großer Antennenabstand (bei RX und/oder TX). Ein großer Antennenabstand ist mit einer miniaturisierten Hardwarearchitektur nur bedingt realisierbar. Da die Bessel-Funktion mehrere lokale Minima aufweist, ist es Ziel, einen möglichst kleinen Korrelationskoeffizienten unter dem Aspekt einer begrenzten räumlichen Ausdehnung der Hardware zu erreichen.

Für bewegte Kommunikationsteilnehmer ist räumliche Diversity mathematisch gleichbedeutend mit zeitlicher Diversity. Die Distanz d , die ein bewegter Empfänger zwischen der ersten Aussendung und der ersten Wiederholung eines Senders zurücklegt, entspricht in diesem Zusammenhang dem Abstand d zweier Antennen eines unbewegten Empfängers. Für Raum-Diversity mit $\Delta f = f_2 - f_1 = 0$ kann (3) vereinfacht werden. Die Einhüllende ρ des Korrelationskoeffizienten ergibt sich zu

$$\rho\left(\frac{d}{\lambda}\right) = J_0^2\left(2\pi\frac{d}{\lambda}\right). \quad (4)$$

Neben der Einhüllenden für die Korrelation der beschriebenen Raum-Diversity-Anordnung ist in Abb. 6 die Einhüllende des Korrelationskoeffizienten für eine Diversity-Anordnung mit unterschiedlichen Frequenzen dargestellt.

Für Frequenz-Diversity wird der Korrelationskoeffizient mit zunehmendem Frequenzabstand kleiner. Demnach ist eine Konfiguration mit Nutzung zweier weit entfernter Frequenzbänder einer Konfiguration vorzuziehen, welche zwei unterschiedliche Frequenzkanäle in ein und demselben Frequenzband nutzt.

Der minimale optimale Antennenabstand für Raum-Diversity kann nach (4) berechnet werden. Die erste Nullstelle der Funktion $\rho(d/\lambda)$ bei $d/\lambda \approx 0,38$ entspricht dem frequenzabhängigen minimalen Antennenabstand. Für eine Trägerfrequenz von 2440,2 MHz ergibt sich somit ein Abstand $d \approx 4,67$ cm.

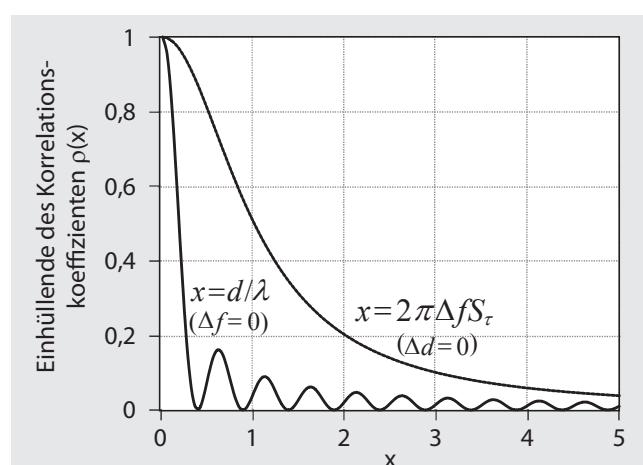


Abb. 6: Einhüllende des Korrelationskoeffizienten als Funktion des Antennen- bzw. Frequenzabstandes für Diversity-Anordnungen (Normierung auf d/λ bzw. $2\pi\Delta f_\tau$), (vgl. Molisch, 2005)

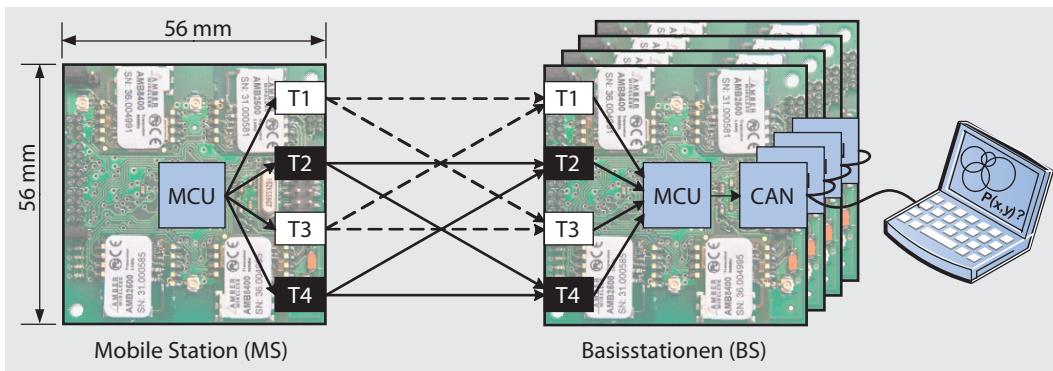
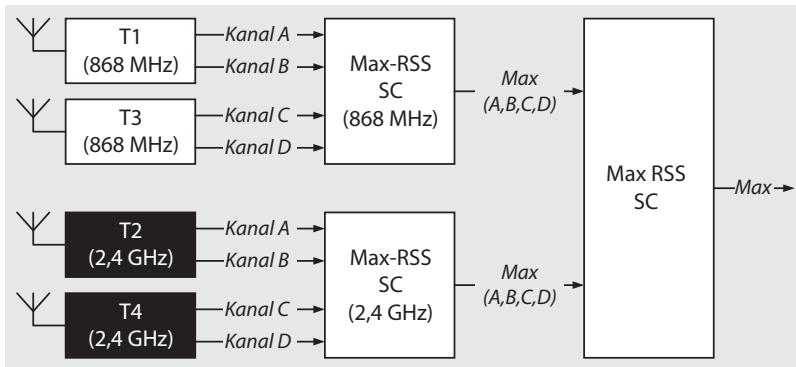


Abb. 7:
Redundanzkonzept
mit bis zu acht Ka-
nälen zur Steigerung
von Verfügbarkeit
und Genauigkeit
des Ortungssystems
durch die Kompen-
sation von Signalfading



4.3 Aufbau des redundanten Funktransceivers

Ein am Institut für Gerätesysteme und Schaltungstechnik der Universität Rostock entwickeltes proprietäres System setzt mit einer gleichzeitigen Raum- und Frequenzdiver-
sität auf die Verbesserung der Verfügbarkeit und Genauig-
keit der Positionsbestimmung durch Redundanz. Der aktuelle Transceiverprototyp nutzt hierfür zwei 2,4 GHz ISM-Module (basierend auf dem CC2500 RF Chip) und zwei 868 MHz ISM-Module (basierend auf dem CC1101 RF Chip) – jeweils mit integrierten Chip-Antennen. Das Prin-
zip ist in Abb. 7 dargestellt. Die Sendeleistung der Module beträgt +1 dBm, bei einer Datenrate von 250 kbaud und MSK Modulation (Texas Instruments, 2008a und 2008b). Als Systemcontroller kommt ein auf low-power ausge-
richteter MSP430 von TI zum Einsatz.

Die MS sendet über die Transceiver T1 bis T4 insge-
sammt vier Nachrichten aus. Die BS erreichen im Ideal-
fall acht Nachrichten, aus denen ein RSS-Wert abgeleitet und zur weiteren Verarbeitung über den CAN-Bus an den Monitor-PC weitergeleitet wird. Das dabei angewandte zweistufige Selection Combining auf den BS ist in dem Blockschaltbild in Abb. 8 dargestellt. Zunächst folgt eine getrennte Betrachtung für die beiden verwendeten Frequenzbänder. Die jeweiligen maximalen RSS-Werte werden in einem zusätzlichen Combining verarbeitet, sodass am Ausgang des gesamten Blocks der maximale RSS-Wert aller verfügbaren Kanäle anliegt.

Der Einfluss der redundanten Auslegung der Funk-
schnittstelle zur Aufnahme der RSS-Werte auf die Genauig-
keit und Verfügbarkeit der Lokalisierung wird anhand von experimentell ermittelten Ergebnissen im nächsten Abschnitt betrachtet.

5 Experimentelle Ergebnisse

Die Testumgebung für die Messungen ist in Abb. 9 dar-
gestellt. Die MS beschreibt zyklische Bewegungen auf dem dargestellten eindimensionalen Track. Die Dauer einer Bewegung von Endlage A zu B und zurück zu A entspricht etwa 65 Sekunden. Für die Betrachtung von Mehrwegeausbreitung mit resultierendem Signalfading sind neben dem Track Reflektoren aus Metall ange-
bracht.

Der Sender bewegt sich mit einer maximalen Ge-
schwindigkeit $v_{max} = 0,54 \text{ m/s}$. Das Senden über die Tran-
sceiver mit gleicher Trägerfrequenz wird als zeitgleich

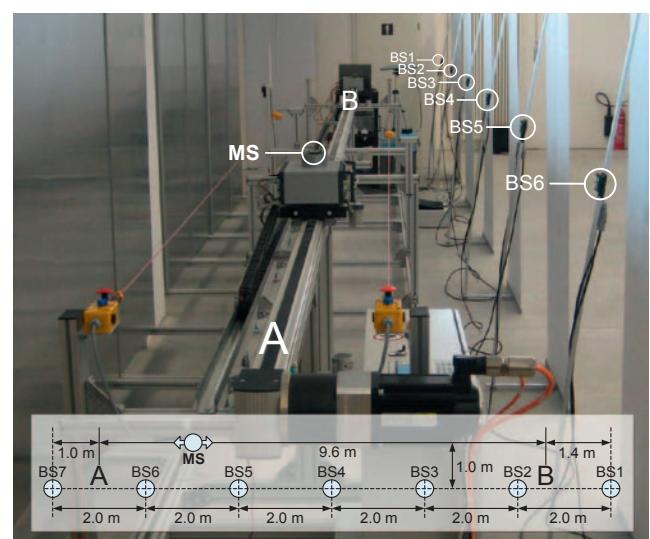


Abb. 9: Aufbau der Referenzumgebung für Pfadverlust-
und Trackingmessung auf einem Bewegungsmessplatz
(MS – Mobile Station, BS – Basisstation)

angenommen, wobei tatsächlich eine Zeitdifferenz $\Delta t = 2,5\text{ms}$ besteht. Dieses Schutzintervall ist notwendig, da eine gleichzeitige Aussendung auf der gleichen Trägerfrequenz eine Kanalbeeinträchtigung durch Signalinterferenzen zur Folge hätte. Mit der gegebenen maximalen Geschwindigkeit v_{\max} des Senders kann sich dieser innerhalb der Zeitdifferenz Δt um eine maximale Strecke $\Delta d = 1,35\text{mm}$ bewegen. Da diese Strecke im Vergleich zur Wellenlänge ($\lambda_{2,4\text{GHz}} \approx 12,3\text{ cm} / \lambda_{868\text{GHz}} \approx 34,6\text{ cm}$) sehr klein ist, kann die Annahme einer simultanen Aussendung als gerechtfertigt angesehen werden. Unter dieser Voraussetzung kommt kein Zeit-Diversity zum Einsatz und die Fading-Kompensation kann allein durch die Anwendung von Raum- und Frequenz-Diversity erklärt werden.

5.1 Pfadverlustmessung

Die Verbesserung der Distanzschätzung kann mit Hilfe einer Pfadverlustmessung für verschiedene Diversity-Konfigurationen mit unterschiedlicher Anzahl an redundanten Kanälen erfolgen. Anhand des Ausbreitungskoeffizienten n , der Standardabweichung σ der aufgenommenen RSS-Werte und der Anzahl der auftretenden Paketverluste kann eine qualitative Bewertung stattfinden.

Der feste Empfänger befindet sich während der Messung bei $x=0,0\text{m}$ in der Nähe von B. Der Sender startet bei der Endlage B ($x=1,4\text{m}$) und bewegt sich nach einer kurzen Beschleunigungsphase mit einer konstanten Geschwindigkeit von $0,27\text{ m/s}$ zur Endlage A ($x=11,0\text{m}$).

In Abb. 10 ist der Pfadverlust anhand der RSS eines 868MHz -Kanals und eines $2,4\text{GHz}$ -Kanals für eine Bewegung des Senders von Position B zu Position A auf

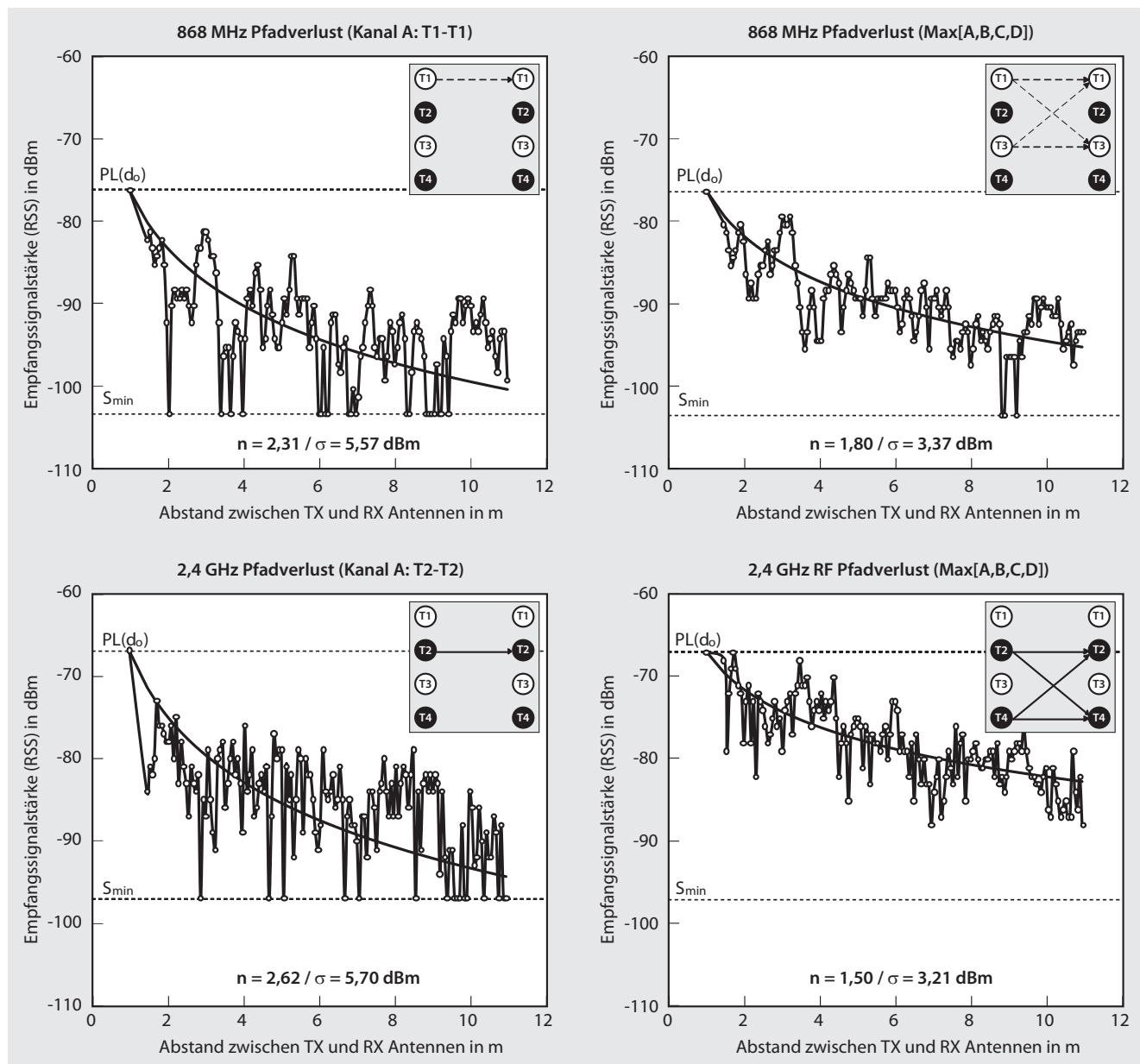


Abb. 10: Pfadverlustmessung für 868MHz und $2,4\text{GHz}$ über eine Distanz von 11m
(150 RSS-Werte, $v_{TX}=0,27\text{ m/s}$, 5 Hz Senderate).

der linken Seite dargestellt. Im Vergleich dazu ist auf der rechten Seite der jeweilige Pfadverlust anhand der RSS am Ausgang der ersten Stufe des Combining-Blocks (s. Abb. 8) nach Auswertung der vier einzelnen Kanäle einer Frequenz dargestellt. Die umgebungsspezifische Referenzdämpfung $\overline{PL}(d_0)$ wurde in einem vorherigen Experiment für 868 MHz / 2,4 GHz mit -76 dBm / -67 dBm bestimmt.

Für den einzelnen Kanal A liegen die RSS bei beiden Frequenzen oft unter der Empfindlichkeitsschwelle des Empfängers (s_{min}) und das gesendete Paket geht verloren. Das Signal am Ausgang des SC-Blocks für die vier 2,4 GHz-Kanäle liegt für den betrachteten Pfadverlust stets über s_{min} . Die Paketfehlerrate (packet error ratio, PER) ist dementsprechend gleich Null und die Kanalverfügbarkeit beträgt 100 %. Der mittlere Pfadverlust – gekennzeichnet durch den Pfadverlustkoeffizienten n – ist für das Signal am Ausgang des SC-Blocks bei beiden Frequenzen deutlich geringer als für den jeweils einzelnen Kanal. Der Pfadverlustkoeffizient kann unter Zuhilfenahme von vier redundanten 2,4 GHz-(868 MHz)-Kanälen von $n = 2,62$ ($n = 2,31$) auf $n = 1,50$ ($n = 1,80$) reduziert werden. Die Abweichungen der aufgenommenen RSS vom mittleren Pfadverlust sind für das Combining von vier redundanten Kanälen deutlich geringer. Die Standardabweichung σ konnte dementsprechend für 2,4 GHz (868 MHz) von 5,70 dBm (5,57 dBm) auf 3,21 dBm (3,37 dBm) reduziert werden.

5.2 Trackingmessung

Die Genauigkeit der Positionsbestimmung beim Tracking der MS auf dem Bewegungsmessplatz (Abb. 9) wurde für unterschiedliche Diversitätskonfigurationen untersucht. In Abb. 11 sind die Trajektorien der MS nach Auswertung der RSS mit und ohne Redundanz getrennt nach den beiden verwendeten Frequenzen dargestellt. Der tatsächliche Pfad entspricht hier einem A-B-A-Bewegungszyklus. Der Einfluss von Diversity auf die Genauigkeit der Positionsbestimmung wird in Abb. 11 durch den qualitativen Vergleich der Abweichung der geschätzten Trajektorien mit dem tatsächlichen Pfad deutlich. Das Selection Combining von vier Kanälen reduziert den Fehler bei der Positionsbestimmung für beide Frequenzen signifikant, wobei die Fehlerreduktion für 2,4 GHz geringfügig größer ist.

Für eine detaillierte Fehlerbetrachtung sind in Abb. 12 die kumulierten Fehler der unterschiedlichen Diversity-Konfigurationen dargestellt. Die entsprechenden Werte für den maximalen und mittleren Fehler sind neben dem 95. Perzentil in Tab. 1 aufgeführt. Die mittleren Fehler aller Konfigurationen liegen dicht beieinander und sind kleiner als 0,74 m. Für die Positionsbestimmung von Personen ist die Betrachtung des maximalen Fehlers entscheidend, wobei die Verbesserung der Genauigkeit durch Anwendung von Redundanz deutlich wird. Das 95. Perzentil des Lokalisierungsfehlers kann durch Auswertung

von vier redundanten Kanälen um mehr als 34 % für 868 MHz, und um mehr als 52 % für 2,4 GHz reduziert werden. Die in Tab. 1 ebenfalls angegebenen Paketfehlerraten bei der Funkübertragung zur Aufnahme der RSS geben Aufschluss über die Verfügbarkeit des Systems. Es besteht ein Zusammenhang zwischen der Paketfehlerrate als Maß für die fehlerbehafteten Distanzschätzungen und der Genauigkeit des Lokalisierungssystems.

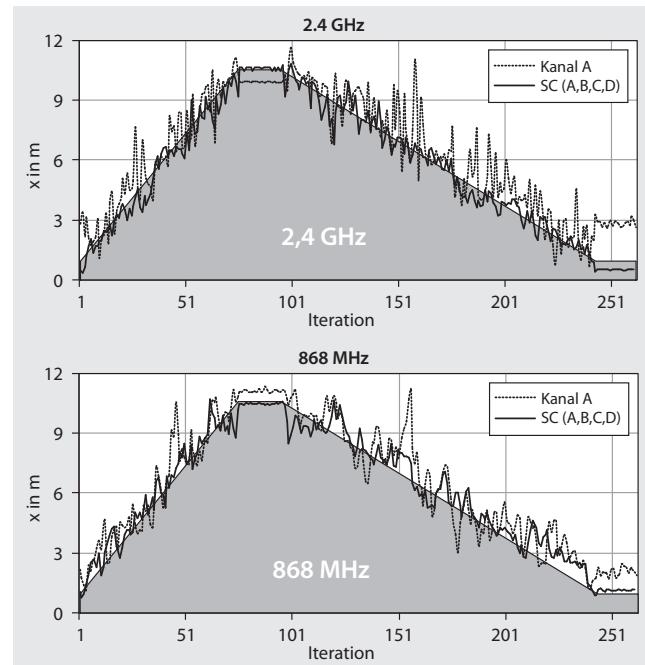


Abb. 11: Positionsschätzungen für 868 MHz und 2,4 GHz Tracking-Messung auf einem Bewegungsmessplatz

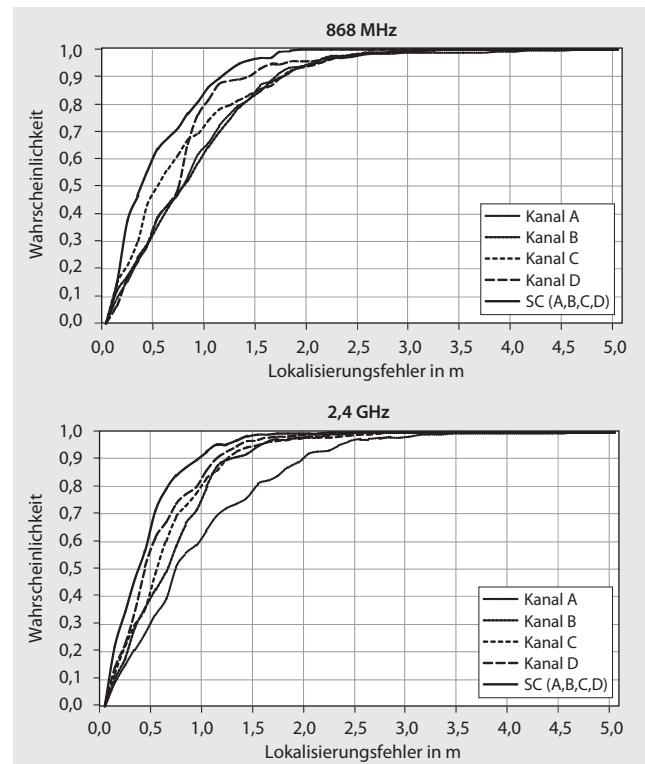


Abb. 12: Kumulierte Wahrscheinlichkeit des Lokalisierungsfehlers für 868 MHz und 2,4 GHz Tracking-Messung

Tab. 1: Vergleich der verschiedenen Diversity-Konfigurationen anhand des Lokalisierungsfehlers (location estimation error, LEE, Angabe in m) und der Paketfehlerrate (packet error ratio, PER) bei der Funkübertragung.

Frequenz	868 MHz					2,4 GHz				
Kanalwahl	A	B	C	D	SC(A,B,C,D)	A	B	C	D	SC(A,B,C,D)
LEEmed	0,74	0,73	0,50	0,71	0,33	0,69	0,62	0,53	0,39	0,33
LEE95%	1,96	2,01	2,08	1,74	1,29	2,29	1,51	1,49	1,30	1,09
LEEmax	4,54	3,25	2,58	3,18	1,85	4,56	2,43	2,78	2,42	2,17
PER	0,11	0,12	0,01	0,07	0,01	0,15	0,08	0,08	0,04	0,00

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die funkbasierte Lokalisierung durch Auswertung von Signalstärkemessungen ist eine einfache Realisierung zur Positionsbestimmung von Personen in gestörten Umgebungen mit Abschattungen und bewegten Objekten. Die experimentellen Ergebnisse einer Trackingmessung auf einem Bewegungsmessplatz zeigen die Chancen und Limitierungen des Systems auf. Distanzschätzungen auf Grundlage der Empfangssignalstärke eines einzelnen Kanals sind für die Positionsbestimmung demnach nicht geeignet, da sich relativ große maximale Fehler von einigen Metern ergeben. Für das Szenario der Detektierung von Personen im Kohlebergbau unter Tage ergibt sich durch den notwendigen großen Sicherheitsbereich eine unzureichende Verfügbarkeit und Produktivität. Die Ergebnisse der Tracking-Messung zeigen, wie dieser Einschränkung durch ein redundantes Übertragungskonzept zur Aufnahme der Empfangssignalstärken begegnet werden kann. Der Fehler bei der Positionsbestimmung kann, insbesondere für das verwendete 2,4 GHz-Frequenzband, signifikant reduziert werden. Die Ergebnisse der Pfadverlustmessung entsprechen den theoretischen Annahmen einer Rayleigh-Verteilung der Empfangssignalstärken. Ohne Redundanz zeigt sich bei 2,4 GHz ein höherer Pfadverlustkoeffizient als bei 868 MHz, was den theoretisch höheren Signaldämpfungen und Mehrwegeeffekten bei zunehmender Frequenz entspricht.

Die mit der Redundanz einhergehende Verbesserung von Verfügbarkeit und Genauigkeit der Positionsbestimmung ist bei 2,4 GHz gegenüber 868 MHz wirksamer, da für den verwendeten räumlichen Aufbau der einzelnen Funktransceiver einer Station (mobile Station und Basisstation) der Antennenabstand für 2,4 GHz eher dem optimalen Wert nach dem Jakes-Modell entspricht. Für 868 MHz sind mit einer veränderten räumlichen Anordnung und einem größeren Antennenabstand weitere Verbesserungen zu erwarten.

Als nächster Schritt bei der Umsetzung des Detektionssystems in der Applikation sind umfangreiche Tests in der realen Umgebung eines Strebabbaus unter Tage vorgesehen, wobei damit eine eigensichere Auslegung der Hardwareinfrastruktur unter besonderer Berücksichtigung der DIN EN 61508 (Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener Systeme) einhergeht.

Literatur

- Inoue, Y., Sashima, A., Kurumatani, K.: Indoor positioning system using beacon devices for practical pedestrian navigation on mobile phone. *Ubiquitous Intelligence and Computing*, Springer Berlin/Heidelberg, Vol. 5585, 2009, S. 251–265.
- Wang, H., Lenz, H., Szabo, A., Bamberger, J., Hanebeck, U.: WLAN-based pedestrian tracking using particle filters and low-cost MEMS sensors. *Proceedings of the 4th IEEE Workshop on Positioning, Navigation and Communication (WPNC)*, 2007, S. 1–7.
- Rehim, M.: Horus: A WLAN-Based Indoor Location Determination System. University of Maryland, 2004.
- Bahl, P., Padmanabhan, V.N.: RADAR: An In-Building RF-Based User Location and Tracking System, 2000, S. 775–784.
- Jang, W.-S., Skibniewski, M.J.: A Wireless Network System for Automated Tracking of Construction Materials on Project Sites *Journal of Civil Engineering and Management*, University of Maryland, 2008.
- Rappaport, T.: *Wireless Communications – Principles and Practice*, Prentice Hall PTR, 2002.
- Fink, A., Beikirch, H., Voss, M.: Radio communication and localization in functional safety applications of industrial automation. *Proceedings of the Embedded World Conference*, WEKA Fachmedien GmbH, 2009, S. 1–6.
- Fink, A., Beikirch, H., Voss, M.: Improved indoor localization with diversity and filtering based on received signal strength measurements. *International Journal of Computing*, Vol. 9, 2010, S. 9–15.
- Fink, A., Beikirch, H.: Analysis of RSS-based location estimation techniques in fading environments. *IEEE International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, 2011, S. 1–6.
- Fink, A., Beikirch, H.: Hybrid indoor tracking with bayesian sensor fusion of RF localization and inertial navigation. *IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)*, 2011, S. 823–827.
- Molisch, A.: *Wireless Communications*. John Wiley & Sons, 2005.
- Jakes, W., Cox, D.: *Microwave Mobile Communications*. Wiley-IEEE Press, 1994.
- Texas Instruments Inc.: CC1101 Low-Power Sub-1 GHz RF Transceiver. Revision SWRS061D, 05/2008.
- Texas Instruments Inc.: CC2500 Low-Cost Low-Power 2.4 GHz RF Transceiver. Revision SWRS040C, 05/2008.

Anschrift der Autoren

Andreas Fink | Helmut Beikirch
 Universität Rostock
 Institut für Gerätesysteme und Schaltungstechnik (IGS)
 A-Einstein-Straße 2, 18059 Rostock
 andreas.fink@uni-rostock.de
 helmut.beikirch@uni-rostock.de