

safe@home – Ein drahtloses Assistenzsystem mit integrierter IEEE 802.15.4a Lokalisierung

Prof. Dr. Christof Röhrig, Fachhochschule Dortmund, Intelligent Mobile Systems Lab, Emil-Figge-Str. 42, 44227 Dortmund, Deutschland, E-Mail: christof.roehrig@fh-dortmund.de

Kurzfassung

Der Beitrag beschreibt das drahtlose Assistenzsystem safe@home, das die Erfassung der Position von Personen ermöglicht und kommerziell verfügbare Sensoren einbinden kann. Ziel ist die einfache und kostengünstige Ausstattung bestehender Wohnungen, um den Bewohnern möglichst lange ein sicheres Leben im gewohnten Umfeld zu ermöglichen. Um die Privatsphäre zu wahren, wird auf eine Kameraüberwachung verzichtet und stattdessen die Funktechnologie IEEE 802.15.4a zur Lokalisierung von Personen und Objekten genutzt. Das Assistenzsystem dient der Erhöhung des Sicherheitsgefühls und der Lebensqualität älterer oder behinderter Menschen im eigenen Haushalt durch Erfassung von Sensordaten und Überwachung sicherheitsrelevanter Aspekte. Durch die drahtlose Lokalisierungsfunktion des Systems und das kontinuierliche Monitoring von Vitaldaten können Parameterabweichungen in Verhaltensmustern schnell erkannt und Notsituationen rechtzeitig behandelt werden. Im Vergleich zu anderen Assistenzsystemen ermöglicht die Funklokalisierung von Benutzern ein feingranulareres Aktivitätsmonitoring und unterstützt weiterhin eine intuitive Benutzerschnittstelle.

1 Einführung

Assistenzsysteme sind aus der Automobiltechnik bekannt und dort allgegenwärtig. Die im Auto eingesetzten Systeme erhöhen den Komfort oder unterstützen den Fahrer bei Gefahrensituationen und helfen so, Unfälle zu vermeiden. Durch den Einsatz von Assistenzsystemen in Automobilen konnte die Zahl der Unfalltoten stetig gesenkt werden und es sterben mittlerweile mehr Menschen bei Unfällen im Haushalt als bei Unfällen im Straßenverkehr, wobei 85% der Personen, die 2008 im Haushalt verunglückten, über 65 Jahre alt waren [1]. Assistenzsysteme für das „Ambient Assisted Living“ (AAL) sollen älteren Menschen ein sicheres Leben zu Hause ermöglichen. Im Vordergrund stehen dabei die Aspekte der komfortablen Unterstützung und der schnellen Hilfe in Notsituationen.

Das am „Intelligent Mobile Systems Lab“ der Fachhochschule Dortmund entwickelte Assistenzsystem safe@home basiert auf der Nutzung von drahtlosen Sensornetzwerken und kann dadurch leicht in Wohnungen nachgerüstet werden. Das drahtlose Sensornetzwerk dient zur Erfassung von Sensordaten wie Raumtemperatur, Licht etc. und besteht sowohl aus stationären Sensorknoten und Funkgateways als auch aus mobilen Knoten, wie beispielsweise Tags zur Sturzerkennung. Gerade im häuslichen Umfeld steht die Notfallvermeidung und Erkennung an erster Stelle. Notfälle sollen durch die Fusion von Sensordaten schnell erkannt und Hilfe über das Internet oder das Mobilfunknetz gerufen werden. Notfälle, die erkannt werden sollen, sind neben dem Sturz von Personen, auch auslaufendes Wasser (z. B. überlaufende Badewanne), vergessene elektrische Verbraucher (Bügeleisen, Herd), Rauch (Feuer, vergessene Kerze) sowie offene Fenster beim Verlassen der Wohnung. Neben der direkten Gefahrenerkennung soll auch die Aktivität der Bewohner erfasst werden. Eine Abweichung vom gewohnten Verhalten kann dann erkannt und den Angehörigen mitgeteilt werden. So kann damit z. B. das Fortschreiten einer demenziellen

Erkrankung erkannt werden.

Das entwickelte Assistenzsystem unterstützt mehrere Funkstandards und ist damit in der Lage, verschiedenste Sensoren integrieren zu können. Die im AAL eingesetzten Funktechnologien sind sehr heterogen, für verschiedene Einsatzzwecke werden unterschiedliche Technologien verwendet. Im Bereich der Gebäudeautomatisierung haben sich Funktechnologien wie KNX-RF und EnOcean etabliert. Für die Vitaldatenerfassung werden u.a. Bluetooth (IEEE 802.15.1) und Bluetooth low energy (BLE) eingesetzt, wobei auch der Einsatz von IEEE 802.15.4a denkbar ist.

Durch die Verwendung des Funkstandards IEEE 802.15.4a als Funk-Backbone ist die Lokalisierung von Objekten und Personen möglich, was das Assistenzsystem von anderen Systemen wesentlich unterscheidet. Durch die Lokalisierungsfunktion von safe@home kann ein, gegenüber bisherigen Systemen, feingranulareres Aktivitätsmonitoring erzielt werden, welches auch für eine teilautomatische Inbetriebnahme mit Selbstlernen der Lebensgewohnheiten des Anwenders genutzt werden kann.

2 Stand der Wissenschaft und Technik

2.1 Aktivitätsmonitoring

Wesentliche Voraussetzung für eine effiziente Notfallerkennung ist das Aktivitätsmonitoring. Dabei wird die tägliche Aktivität ermittelt und Abweichungen davon erkannt und gemeldet. Das Aktivitätsmonitoring von Assistenzsystemen im AAL unterliegt gewissen Akzeptanzbarrieren, die in [2] klassifiziert werden. Probleme, die die Akzeptanz derartiger Systeme schmälern, sind z. B. datenschutzrechtliche Bedenken und die Angst vor dem Verlust der Privatsphäre.

Eine Möglichkeit der Aktivitätsüberwachung ist die direkte

Lokalisierung einer Person in der Wohnung. Dadurch ist eine feingranulare Erkennung der Bewegung und damit der Aktivität der Person möglich. Die Benutzerlokalisierung kann zusätzlich auch für weitere Funktionen genutzt werden. So ist die Lokalisierung des Benutzers in der Wohnung ein essentieller Bestandteil einer intuitiven Benutzerschnittstelle [3]. Eine Übersicht über die verschiedenen Lokalisierungstechniken ist in [4] zu finden. In der Regel wird versucht auf eine Kameraüberwachung zu verzichten, um die Privatsphäre zu wahren.

Ein neuartiges Kamerasystem, welches nur Bewegungsinformationen erkennt und damit die Privatsphäre schützt, wird in [5] vorgestellt. Grundsätzlich ist es auch möglich, akustische Signale zur Sprecherlokalisierung zu nutzen [6]. Durch die flächendeckende Ausstattung der Wohnung mit einem Sensorteppich, wie z. B. dem SensFloor® kann die Bewegung und der Sturz von Personen detektiert werden [7].

Die Bewegung und damit die Aktivität einer Person kann auch mittels Beschleunigungssensoren gemessen werden [8]. Um daraus Aktivitätsmuster abzuleiten sind probabilistische Methoden erforderlich [9]. Einfacher kann die Aktivität von Personen durch in der Wohnung installierte Bewegungsmelder erkannt werden. Die dabei häufig eingesetzten Infrarotsensoren sind jedoch nicht besonders empfindlich. In [10] wird eine Kombination aus Ultraschall- und Infrarotsensoren vorgestellt, die auch kleinere Bewegungen des Benutzers im Schlaf erkennen kann. Auch Ultrabreitband-Sensoren, die nach dem Radar-Prinzip arbeiten, können zur Messung der Aktivität und sogar zur berührungslosen Vitaldatenerfassung genutzt werden [11]. Problematisch bei dieser Technologie sind die großen Antennen und die eher kurze Reichweite.

Ein häufiges Ziel von Forschungsarbeiten ist das indirekte Aktivitätsmonitoring mit wenigen leicht nachrüstbaren Sensoren [12]. Mittels Funktechnologie können diese einfach in Wohnungen nachgerüstet werden, wobei neben Bewegungsmeldern auch Tür- und Fensterkontakte [13], Lichtschalter und Kontakte an der Kühlschranktür [14] bis hin zu speziellen Drucksensoren für die Detektion der Anwesenheit in Bett und Sofa [15], zum Einsatz kommen. Auch Sensoren zur Vitaldatenerfassung wie das VIVAGO Sicherheitsarmband können für das Aktivitätsmonitoring verwendet werden [16]. Zukünftig bieten auch Intelligente Zähler (Smart Meter) die Möglichkeit über den Stromverbrauch von Verbrauchern Aktivität der Bewohner einer Wohnung zu detektieren. Eine Hauptaufgabe ist neben der Sensordatenerfassung auch die Verarbeitung der Sensordaten. Wichtig bei derartigen Softwarelösungen ist die Modularität, die weitgehende Hardwareunabhängigkeit und die Adaption an unterschiedliche Benutzerverhalten [17].

2.2 Funklokalisierung

Wesentlicher Teil des im Artikel vorgestellten Assistenzsystems ist die Benutzerlokalisierung mittels Funktechnologie. Die weit verbreitete Satellitenortung per Global Positioning System (GPS) ist im Allgemeinen für drahtlose Assistenzsysteme ungeeignet, da GPS für Anwendungen in Gebäuden aufgrund der Signaldämpfung nicht eingesetzt werden kann. Allerdings kann für eine kombinierte Indoor- und Outdoor-

Ortung GPS mit Funktechnologien wie WLAN und Bluetooth kombiniert werden [18].

Für die Bestimmung der Position mittels Funktechnologien existieren unterschiedliche Verfahren. Diese Verfahren können nach den Informationen, die sie für die Positionsbestimmung verwenden, eingeteilt werden:

- Verbindungsinformationen (CoO)
- Signalstärken der eingehenden Signale (RSSI)
- Empfangswinkel der Signale (AoA)
- Empfangszeitpunkte der Signale (ToA)
- Zeitdifferenzen der eingehenden Signale (TDoA)
- Bidirektionale Umlaufzeit des Signals (RTof)

Verbindungsinformationen sind fast in jedem drahtlosen Funknetz vorhanden. Die Genauigkeit hängt bei diesem Verfahren mit der Granularität und der Größe der Zellen im verwendeten Funknetz zusammen. Bei diesem, auch „Cell of Origin“ (CoO) genannten, Verfahren wird die Position anhand der mit dem mobilen Knoten assoziierten ortsfesten Knoten bestimmt. Jedem ortsfesten Knoten und damit auch der Zelle ist eine eindeutige Identifizierung (Cell-ID) zugeordnet. Die Positionen der ortsfesten Knoten müssen bekannt sein. Mittels dieses Verfahrens können mit Funktechnologien, die eine kurze Reichweite haben, Personen und Objekte raumgenau geortet werden [19]. Ein Beispiel für eine Funktechnologie, die aufgrund der kurzen Reichweite eine raumgenaue Ortung ermöglicht, ist Bluetooth. Damit können Mobiltelefone oder aber auch andere Geräte, die mit Bluetooth ausgestattet sind, grob geortet werden.

In die Kategorie CoO fällt auch die Ortung mit passiven RFID-Tags. Um eine Person mit RFID-Technik raumgenau lokalisieren zu können, muss an jeder Tür ein RFID-Lesegerät mit vergleichsweise großer Antenne und hohem Energieverbrauch angebracht werden. Diese Technologie eignet sich deshalb eher für Pflegeeinrichtungen als für private Wohnungen. Servicerobotern oder Rollstühlen können sich mittels RFID-Reader, der in kurzem Abstand über einem Bodenbelag mit integrierten RFID-Tags (z. B. Navifloor® von FutureShape) angebracht ist, selbst lokalisieren [20, 21].

Verfahren, die empfangene Signalstärken für die Positionsbestimmung verwenden, werden RSSI-Verfahren (Received Signal Strength Indicator) genannt. Die Distanz zu einem ortsfesten Knoten kann über das logarithmische Distanzverlustmodell berechnet werden. Dabei wird die Freiraumdämpfung berücksichtigt, die besagt, dass die Signalstärke mit der Distanz zum Sender quadratisch abnimmt. Allerdings ist dieses Modell aufgrund von Dämpfungen und Reflektionen der Funksignale in Innenräumen nur sehr eingeschränkt zu gebrauchen und eignet sich nur zur raumgenauen Lokalisierung.

Das AoA-Verfahren (Angle of Arrival) verwendet die Einfallswinkel der empfangenen Signale. Dabei werden mindestens zwei ortsfeste Knoten mit Richtantennen benötigt. Mit den empfangenen Signalen von einem mobilen Knoten kann der Einfallswinkel des Signals bestimmt werden. Die Berechnung der Distanz zu den bekannten Positionen der ortsfesten Stationen erfolgt mittels Triangulation. Dabei werden die Winkelbeziehungen innerhalb eines Dreiecks

ausgenutzt.

Die Techniken „Time of Arrival“ (ToA), „Time Difference of Arrival“ (TDoA) und „Round-trip Time of Flight“ (RToF) bestimmen die Distanz zwischen zwei Knoten durch Signallaufzeitmessung. Aus den Distanzen zu mindestens drei ortsfesten Knoten kann mittels Trilateration die Position eines mobilen Knotens bestimmt werden.

Das ToA-Verfahren bestimmt anhand der Signallaufzeit eines Signals die Distanz zwischen zwei Knoten. Voraussetzung für ToA ist eine hochgenaue Synchronisation der Uhren auf beiden Knoten, damit die Laufzeit exakt bestimmt werden kann. Da Sensorknoten in der Regel nicht über hochgenaue synchronisierte Uhren verfügen, wird dieses Verfahren in drahtlosen Sensornetzwerken nicht eingesetzt.

Als TDoA werden zwei unterschiedliche Verfahren bezeichnet. Bei dem einen TDoA-Verfahren sendet ein Knoten gleichzeitig zwei Signale mit unterschiedlicher Signalausbreitungsgeschwindigkeit aus. Aus den unterschiedlichen Empfangszeitpunkten kann im Empfänger die Distanz zum Sender bestimmt werden. Dieses Verfahren wird in drahtlosen Sensornetzwerken beim Cricket Lokalisierungssystem, welches vom MIT entwickelt wurde und von Crossbow¹ vertrieben wird, eingesetzt [22]. Dem Vorteil der Vermeidung der Uhrensynchronisation steht der Nachteil eines höheren Hardware-Aufwandes in den Knoten gegenüber.

Bei dem anderen TDoA-Verfahren berechnen die ortsfesten Empfänger die Position eines mobilen Senders aus der Differenz der Empfangszeitpunkte des Signals. Dieses Verfahren wird im Mobilfunk auch als „Observed Time Difference of Arrival“ (OTDoA) bezeichnet. Der Vorteil gegenüber ToA liegt darin, dass keine Synchronisation zwischen den mobilen Knoten und den ortsfesten Knoten vorhanden sein muss. Somit wird keine hochpräzise Uhr in den mobilen Knoten benötigt. Das Ubisense System², welches an der Cambridge Universität entwickelt wurde, verwendet diese Variante des TDoA zusammen mit AoA zur Lokalisierung von mobilen Knoten [23]. Das Ubisense System ist für die breite Ausstattung von Wohnungen zu teuer, wird aber zu Benutzerlokalisierung in der AAL-Forschung eingesetzt [24, 25].

Beim RToF-Verfahren wird die Umlaufzeit eines Signals gemessen. Eine Synchronisation der Uhren der Knoten ist nicht notwendig, da keine absoluten Zeiten zwischen Sender und Empfänger benötigt werden. Für die Erzeugung des Acknowledgement-Frames wird im Empfänger im Vergleich zur Signallaufzeit eine relativ große Zeitspanne benötigt. Die führt zu einem Messfehler, falls die Uhren beider Knoten während der Messung auseinander laufen (Clock Drift). Dieser Fehler kann ausgeglichen werden wenn RToF von beiden Seiten aus initiiert wird (siehe Abschnitt 3). Das Symeo System³ verwendet RToF zusammen mit der Transpondertechnik zu Lokalisierung mobiler Knoten [26].

Das Interesse an metergenaue Lokalisierung führte in den letzten Jahren zu einer Reihe von neuen Verfahren und Produkten. Neben proprietären Verfahren wie Ubisense und Sy-

meo wurden auch standardisierte Verfahren vorangetrieben. Aufbauend auf dem Funkstandard IEEE 802.15.4 wurden als neue Physical Layer Ultra Wide Band (UWB) und Chirp Spread Spectrum (CSS) in IEEE 802.15.4a definiert, um eine Entfernungsbestimmung zu anderen Knoten genauer 1 m zu ermöglichen [27]. Die IEEE 802.15.4a Technologie kann sowohl zur Lokalisierung als auch zu Kommunikation genutzt werden. Zur Lokalisierung wird ein doppelseitiges RToF verwendet (siehe Abschnitt 3).

2.3 Bewertung

Ein drahtloses Sensornetzwerk mit IEEE 802.15.4a Funktechnologie bietet vielfältige Möglichkeiten für den Einsatz in AAL-Applikationen. Neben der drahtlosen Kommunikation ist zudem die Lokalisierung von Personen oder Objekten möglich. Im Gegensatz zur passiven RFID-Technik können die Sensorknoten innerhalb einer Wohnung auch über eine größere Distanz geortet werden. Um eine Person mit RFID-Technik raumgenau lokalisieren zu können, muss an jeder Tür ein RFID-Lesegerät mit vergleichsweise großer Antenne und hohem Energieverbrauch angebracht werden. Bei IEEE 802.15.4a Sensornetzwerken ist der Installationsaufwand wesentlich geringer und es können Sensorknoten batteriebetrieben werden.

Gegenüber anderen Technologien kann mittels IEEE 802.15.4a Funktechnologie ein feingranulareres Aktivitätsmonitoring erzielt werden. Weiterhin ist eine teilautomatische Inbetriebnahme mit Selbstlernen der Lebensgewohnheiten des Anwenders möglich. Die Nutzung von IEEE 802.15.4a als alleinige Funktechnologie ist zum jetzigen Zeitpunkt nur mit hohem Entwicklungsaufwand möglich, da das Angebot an Funk-Sensorik mit IEEE 802.15.4a Technologie für AAL-Anwendungen nicht ausreichend ist.

Aktuell ist nicht absehbar, ob zukünftig IEEE 802.15.4a bei der Vitaldatenerfassung eine Rolle spielt. Es gibt eine Reihe von Forschungsarbeiten, die IEEE 802.15.4a für den Einsatz in der Telemedizin untersuchen [28, 29]. Zukünftig könnte in diesem Bereich aber auch der neue Standard IEEE 802.15.6 für „Wireless Body Area Networks“ eine Rolle spielen [30].

3 Funklokalisierung mit IEEE 802.15.4a CSS

Das bisher einzige kommerziell verfügbare Funklokalisierungssystem basierend auf IEEE 802.15.4a wird von der Nanotron Technologies GmbH⁴ entwickelt und vertrieben. Das dabei verwendete Ranging-Verfahren „Symmetrical Double-Sided Two Way Ranging“ (SDS-TWR) gestattet eine funkbasierte Abstandsmessung anhand der Signallaufzeiten und bietet die Grundlage für eine metergenaue Positionsbestimmung eines mobilen Objektes [31]. Die drahtlose Kommunikation sowie das Ranging-Verfahren sind in einem einzigen Chip, dem Transceiver nanoLOC TRX integriert. Dieses Hochfrequenz-Funkmodul arbeitet in dem weltweit verfüg-

¹<http://www.xbow.com>

²<http://www.ubisense.net>

³<http://www.symeo.com/>

⁴<http://www.nanotron.de>

baren ISM-Band von 2,4 GHz. Die CSS-Modulation bietet neben der Möglichkeit der Lokalisierung von mobilen Knoten zusätzlich den Vorteil, dass diese Modulation besonders energieeffizient ist. Damit eignet sie sich in besonderem Maße für einen Batteriebetrieb.

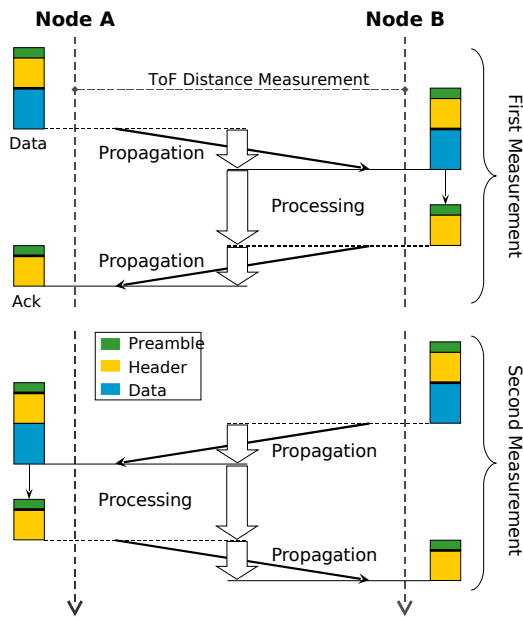


Bild 1: Symmetrical Double-Sided Two Way Ranging [32]

Der Vorteil von SDS-TWR liegt darin, dass keine zeitliche Synchronisierung zwischen den Knoten erforderlich ist und dadurch bekannte Probleme anderer zeitbasierter Lokalisierungsverfahren behoben werden. Das Verfahren basiert auf RTof, wobei dieses symmetrisch und doppelseitig ausgeführt wird. Der genaue Ablauf wird in der **Bild 1** dargestellt. Bei SDS-TWR wird die Signalübertragungszeit in zwei Richtungen gemessen (Two-Way Ranging). Dabei entstehen zwei Zeitspannen: Die Signallaufzeit (Signal Propagation Delay) die benötigt wird, um ein Frame von Knoten A zu B zu übermitteln und eine Bestätigung zurückzusenden, wird von Knoten A gemessen. Die Zeit um das eintreffende Datenpaket zu verarbeiten, die Bestätigung zu generieren und um das Versenden vorzubereiten, wird als Verzögerungszeit (Processing Delay) bezeichnet und von Knoten B gemessen. Die Differenz der beiden Zeitangaben (Signallaufzeit - Verzögerungszeit) beschreibt somit die zweifache Signalübertragungszeit. Zudem wird eine doppelseitige Messung (Symmetrical Double-Sided) durchgeführt, um den Fehler der Uhrenabweichungen (Clock Drift) zu eliminieren. Dazu wird das gleiche Verfahren in umgekehrter Laufrichtung durchgeführt, also von Knoten B zu A und zurück zu B.

Die Berechnung der Signallaufzeit t_d ergibt sich wie folgt

$$t_d = \frac{(T_1 - T_2) + (T_3 - T_4)}{4}, \quad (1)$$

wobei T_1 und T_4 von Knoten A gemessen werden und T_2 und T_3 von Knoten B gemessen werden. Über die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Funksignals (Lichtgeschwindigkeit) kann damit die Distanz zwischen den beiden Knoten berechnet werden.

3.1 Positionsbestimmung mittels Trilateration

Sind die Distanzen zu mindestens drei ortsfesten Knoten bestimmt, kann mit der Trilateration eine Position im zwei-dimensionalen Raum berechnet werden. Im Gegensatz zur Triangulation werden bei der Trilateration nur die Entfernungen zu den ortsfesten Knoten benötigt, dadurch ist dieses Verfahren deutlich leichter zu implementieren, da die Anforderungen an eine Hardware zur Distanzmessung deutlich geringer als die für die Bestimmung des Einfallswinkels eines empfangenen Signals sind.

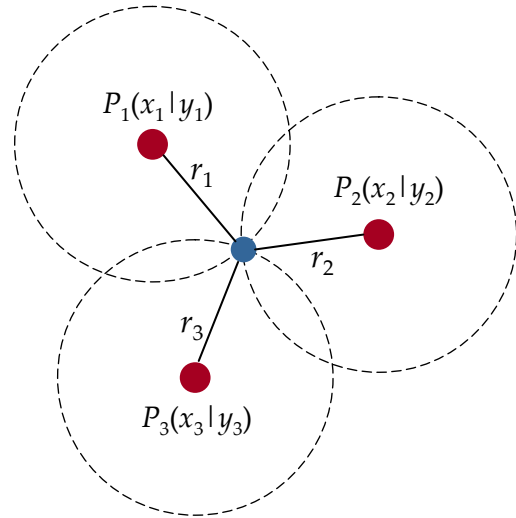


Bild 2: Trilateration mit drei ortsfesten Sensorknoten

Bild 2 zeigt die Trilateration mit drei nicht kollinearen Positionen der ortsfesten Knoten und den Entfernungen zu diesen. Für die gemessenen Distanzen zu den ortsfesten Knoten gilt:

$$r_i = \sqrt{(p_x - x_i)^2 + (p_y - y_i)^2} \quad (2)$$

Die Position des mobilen Knotens p_x, p_y lässt sich damit aus den gemessenen Distanzen r_1, r_2, r_3 und den bekannten Positionen der drei ortsfesten Knoten mit Gleichungssystem (3) berechnen.

$$\begin{pmatrix} p_x \\ p_y \end{pmatrix} = \mathbf{H}^{-1} \cdot \mathbf{z} \quad \text{mit} \quad \mathbf{H} = \begin{pmatrix} 2 \cdot x_1 - 2 \cdot x_2 & 2 \cdot y_1 - 2 \cdot y_2 \\ 2 \cdot x_1 - 2 \cdot x_3 & 2 \cdot y_1 - 2 \cdot y_3 \end{pmatrix}$$

$$\text{und} \quad \mathbf{z} = \begin{pmatrix} r_2^2 - r_1^2 + x_1^2 - x_2^2 + y_1^2 - y_2^2 \\ r_3^2 - r_1^2 + x_1^2 - x_3^2 + y_1^2 - y_3^2 \end{pmatrix} \quad (3)$$

3.2 Positionsbestimmung unter Verwendung von Filteralgorithmen

Neben der direkten Berechnung der Position aus drei Distanzmessungen mit Gleichung (3), können auch Filteralgorithmen zur Positionsbestimmung genutzt werden. Der Vorteil beim Einsatz von Filteralgorithmen liegt in der Berücksichtigung von Messfehlern und Bewegungsmodellen.

Ein häufig für die Positionsbestimmung eingesetzter Algorithmus ist das Kalman-Filter. Das Kalman-Filter beschreibt ein rekursives Verfahren, um den Zustand eines dynamischen Systems aufgrund von verrauschten Messungen zu schätzen, mit dem Ziel, den mittleren quadratischen Fehler der Schätzung zu minimieren. Die Grundform des Filters, das Diskrete Kalman-Filter (DKF), schätzt den internen Systemzustand in dem Fall, dass der gesamte Prozess durch lineare Gleichungen dargestellt wird. In dem Fall, dass Prozesszustände geschätzt werden sollen, die durch ein zeitdiskretes, nichtlineares System beschrieben werden, kommt das Erweiterte Kalman-Filter (EKF) zum Einsatz. Da die Distanzmessungen nichtlinear von der zu schätzenden Position abhängen, wird zur Positionsbestimmung ein EKF eingesetzt. Das Kalman-Filter setzt normalverteilte Messfehler voraus. Bei der Funklokalisierung treten Messfehler durch Mehrwegeausbreitung und „Non-Line-of-Sight“ auf, die nicht der Normalverteilung entsprechen. In diesem Fall müssen die Messfehler entweder vorverarbeitet werden [33] oder es wird ein Monte Carlo Partikelfilter eingesetzt, bei dem angepasste Sensor- und Bewegungsmodelle Anwendung finden [34]. Ein weiterer Ansatz zur Erhöhung der Genauigkeit der Lokalisierung ist die Hinzunahme zusätzlicher Knoten [35].

4 Systemarchitektur

Das Assistenzsystem safe@home basiert auf der Nutzung von drahtlosen Technologien und kann dadurch leicht in bestehende Wohnungen nachgerüstet werden. Das System verwendet drei verschiedene Funktechnologien, die zu einem Netzwerk verbunden sind:

- *IEEE 802.15.4a Backbone*: Das Kernnetz besteht aus Sensorknoten, die permanent mit Strom versorgt werden und mit IEEE 802.15.4a untereinander kommunizieren. Die Sensorknoten sind als Zwischenstecker für die Steckdose konzipiert und sind mit Sensoren zur Überwachung der Umgebung ausgestattet. Da diese Knoten immer verfügbar sind, können sie von mobilen Knoten ständig zur Lokalisierung genutzt werden. Weiterhin fungieren diese Knoten als Gateway zu den anderen Funktechnologien. Das Kernnetz ist über ein Gateway mit dem Internet verbunden, worüber eine Alarmierung stattfindet.
- *Wireless Home Automation (WHA)*: Diese Funktechnik dient zur Anbindung der Gebäude-Sensorik und ggf. der Aktorik. In safe@home wurde hierfür exemplarisch die EnOcean Technologie gewählt, da deren Sensoren Energy Harvesting nutzen und deshalb ohne zusätzliche Stromversorgung auskommen. Andere Funktechnologien wie KNX-RF sind aber genauso denkbar.
- *Body Sensor Network (BSN)*: Dieses Netzwerk dient zur Anbindung von Telemedizin- oder Telemonitoring-Geräten. Exemplarisch wurde Bluetooth implementiert, wodurch z. B. eine Anbindung an einen RunOn-

Brustgurt⁵ möglich ist. Langfristig ist geplant, als BSN direkt das IEEE 802.15.4a Backbone zu verwenden, um damit die Lokalisierung von Personen zu ermöglichen. Dazu müssen aber zuerst Geräte zur Vitaldatenerfassung mit IEEE 802.15.4a verfügbar sein oder entwickelt werden.

Bild 3 zeigt das drahtlose Assistenzsystem. Das Assistenzsystem besteht aus dem drahtlosen Sensornetzwerk, welches aus stationären und mobilen Knoten besteht. Die stationären Knoten sind fest positioniert und dienen zur Erfassung von Sensordaten und zur Interaktion mit der Umgebung durch ihre Aktoren. Die stationären Knoten sind entweder als Zwischenstecker realisiert und bilden dann das Backbone oder sind als Geräte des WHA über EnOcean an das Backbone angebunden. Personen sind über das BSN in das drahtlose Sensornetzwerk integriert. Über das Sensornetzwerk kann dabei die Position der Person sowie seine Vitaldaten abgefragt werden. Das Sensornetzwerk ist über ein Gateway mit dem Internet verbunden, so dass darüber Telemonitoring von Wohnung und Bewohnern durchgeführt werden kann. Die intelligente Umgebung bietet auch die Möglichkeit, Serviceroboter zu integrieren. Als preiswerte Unterstützung im Haushalt kann ein Staubsaugroboter in das drahtlose Sensornetzwerk eingebunden werden. Der Staubsaugroboter kann selbst mit Sensorik ausgestattet werden, um als mobiler Sensorknoten Überwachungsaufgaben zu übernehmen.

Um eine gute Nachrüstbarkeit zu gewährleisten, wird ein modulares Konzept für die Integration der Sensorknoten gewählt. Das Assistenzsystem soll je nach Bedarf von einem Pflegedienstleister oder aber auch von den Angehörigen der Endbenutzern installiert werden können. Stationäre Sensorknoten können sowohl über das Stromnetz betrieben werden und sind dann Bestandteil des Backbone oder sie sind batteriebetrieben oder auch batterieless und werden über das WHA eingebunden. Die Zwischenstecker können gleichzeitig Routing-Funktionen übernehmen und bilden das Gateway zum WHA und BSN.

Batteriebetriebene Geräte werden um Strom zu sparen, die meiste Zeit in den Schlafzustand versetzt. Mittels Zeitgeber wird der Knoten zyklisch geweckt, so dass in regelmäßigen Zeitabständen Sensordaten erfasst und an die netzbetriebenen Knoten gesendet werden können. Die Batterielebensdauer kann somit auf mehrere Jahre verlängert werden. Die Sensordaten werden dann über netzbetriebene Knoten zum Gateway geroutet und dort akkumuliert. Im Alarmfall werden diese über das Internet an eine Alarmstelle gesendet.

4.1 Sensorknoten als Zwischenstecker

Eine einfache Möglichkeit der Nachrüstung von netzbetriebenen Knoten ist durch die Installation als Zwischenstecker in Steckdosen gegeben, wobei die angeschlossenen Verbraucher darüber auch überwacht und geschaltet werden können.

Bild 4 zeigt die prototypisch realisierten Sensorknoten. Die Sensorknoten unterstützen die Funktechnologien IEEE 802.15.4a, Bluetooth und EnOcean. Das IEEE 802.15.4a Netz

⁵<http://run-on.de>

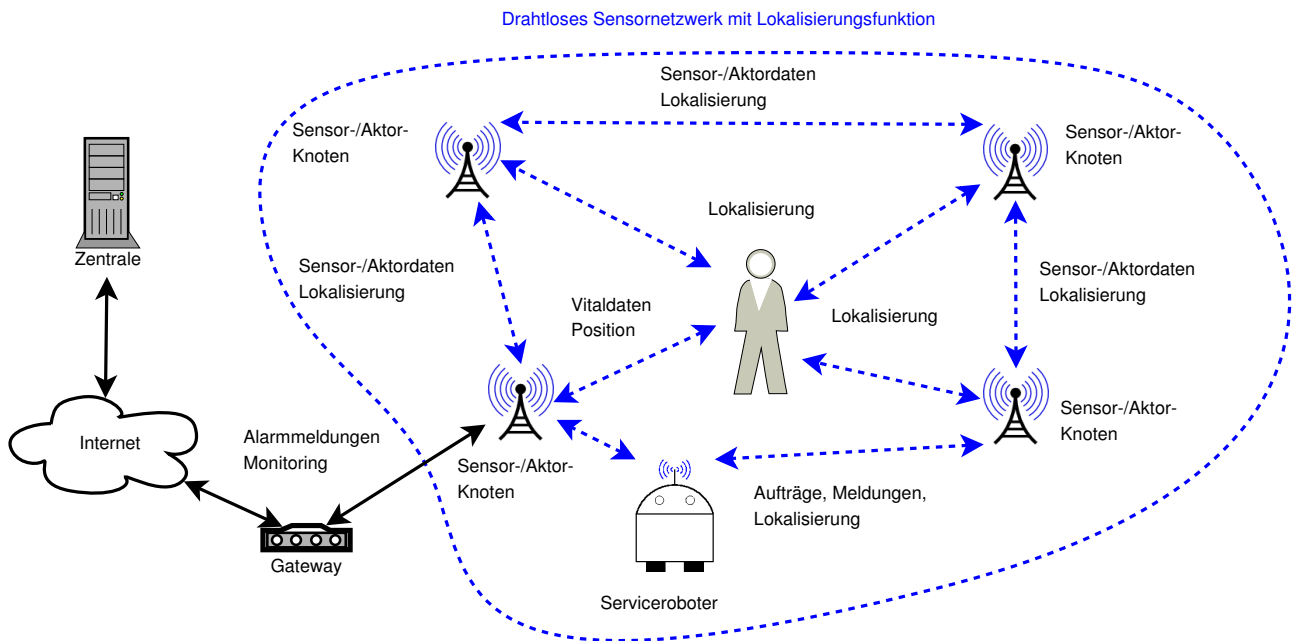


Bild 3: Drahtloses Assistenzsystem mit Lokalisierung

bildet das Backbone zur Kommunikation und Lokalisierung, über Bluetooth werden Vitaldaten erfasst (BSN) und Bluetoothgeräte wie z. B. Mobiltelefone raumgenau geortet, EnOcean bildet die Schnittstelle zu den Sensoren der Home Automation (WHA). Über den Zwischenstecker kann

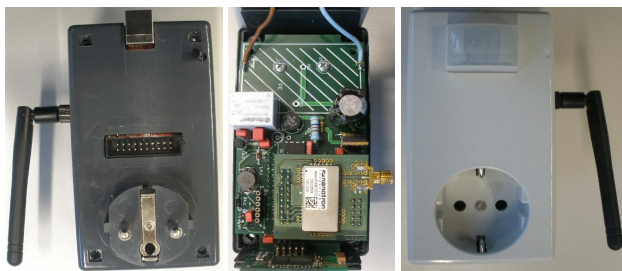


Bild 4: Sensorknoten als Zwischenstecker

der Stromverbrauch angeschlossener Verbraucher gemessen werden, was das Aktivitätsmonitoring unterstützt. Weiterhin können damit im Gefahrenfall auch die angeschlossenen Verbraucher abgeschaltet werden. In die Sensorknoten wurden weitere Sensoren zur Erfassung der Umgebungsparameter integriert:

- Temperatursensor
- Bewegungsmelder (Infrarot)
- Lichtsensor

Kern des Sensorknotens bildet ein 32 Bit Mikrocontroller mit ARM Cortex-M3 Architektur. Damit sind auch komplexere Aufgaben wie Sensorvorverarbeitung und Routing möglich.

4.2 Automatische Inbetriebnahme

Durch die Distanzmessung zwischen den Sensorknoten ist eine Lokalisierung und damit eine automatische Inbetriebnahme der Knoten realisierbar. Dadurch wird das Nachrü-

sten von vorhandenen Wohnungen ohne hohen Installations- und Inbetriebnahmeaufwand ermöglicht.

Eine automatische Ankerkalibrierung reduziert den Arbeitsaufwand bei der Installation eines Funknetzwerkes. Nach dem Platzieren der ortsfesten Ankerknoten können deren Positionen automatisch berechnet werden. Um die korrekte Lokalisierung zu gewährleisten, müssen dem Tag mindestens drei Positionen von Ankerknoten bekannt sein. Diese werden durch den nachfolgend beschriebenen Algorithmus berechnet.

Für eine vorgegebene Menge von N ortsfesten Ankerknoten $A = \{A_1, A_2, \dots, A_N\}$ sollen die den Knoten zugeordneten Positionen $P = \{p_1, p_2, \dots, p_N\}$ mit den kartesischen Koordinaten $p_i = (x_i, y_i)$ bestimmt werden. $r_{i,i-1}$ bezeichnet die über eine Funk-Messung berechnete Distanz zwischen den Knoten A_i und A_{i-1} . Die erste Ankerposition wird als Ursprung des Koordinatensystems $p_1 = (0,0)$ definiert. Anker A_2 ermittelt anschließend die Distanz $r_{2,1}$ zu A_1 . Diese wird als Entfernung der beiden Knoten auf der x-Achse festgelegt, womit sich die Position von Anker zwei zu $p_2 = (r_{2,1}, 0)$ ergibt. Knoten A_3 kann nun die Distanzen $r_{3,1}$ und $r_{3,2}$ bestimmen. Somit ist es möglich die Position des dritten Ankers per Bilateration zu berechnen. Die Kreise mit dem Radius $r_{3,1}$ um den Mittelpunkt p_1 und dem Radius $r_{3,2}$ um den Mittelpunkt p_2 schneiden sich in den beiden Punkten $p_3 = (x_3, y_3)$ und $p_3^* = (x_3, -y_3)$. Bei diesem Verfahren wird $p_3 = (x_3, y_3)$ als Position des dritten Knotens gewählt. Das Koordinatensystem kann durch diese Wahl also spiegelverkehrt angenommen werden. **Bild 5** stellt den bisher beschriebenen Ablauf grafisch dar.

Um die Genauigkeit der Lokalisierung zu erhöhen, können nun die Positionen weiterer Ankerknoten mit $i > 3$ berechnet werden. Um die Position des i -ten Ankerknotens zu ermitteln, wird lediglich vorausgesetzt, dass mindestens drei Distanzen zu Ankerknoten mit bereits bekannter Position

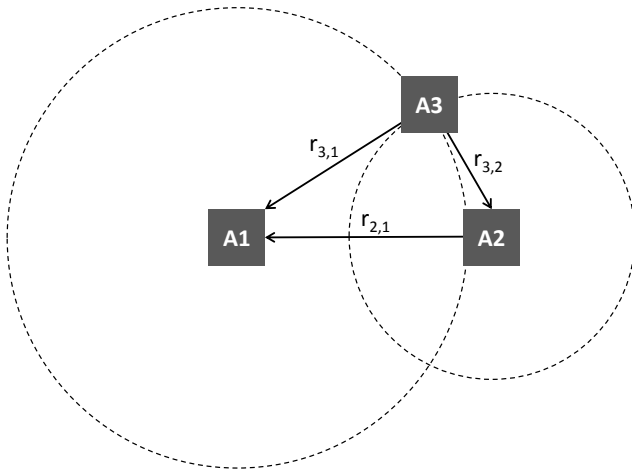


Bild 5: Ablauf der Ankerkalibrierung

gemessen werden können. Ist dies der Fall, kann die Position p_i per Trilateration eindeutig bestimmt werden. Falls dies nicht der Fall ist, müssen die Positionen der Anker über ein Bilaterationsnetz berechnet werden [36].

Nachdem die Ankerkoordinaten festgelegt sind, müssen die Koordinaten der einzelnen Räume zugeordnet werden. Dazu wird ein mobiler Knoten für das „teachen“ der Raumkoordinaten verwendet. In einer dafür vorgesehenen Benutzerschnittstelle können die einzelnen Räume über ihre Funktion (Wohnraum, Schlafzimmer, Küche, etc.) ausgewählt werden. Um die Position eines Raumes zu definieren, werden die Ecken des Raumes sowie die Türen zu anderen Räumen mittels „Teach-In“ festgelegt.

4.3 Szenarien und Funktionalitäten

Um die Anforderung an ein längeres selbstbestimmtes Leben im gewohnten Umfeld zu ermöglichen, müssen eine Reihe von Funktionalitäten erfüllt werden. Dabei müssen verschiedene Anforderungen, Wünsche, Voraussetzungen und finanziellen Möglichkeiten berücksichtigt werden. So sollten Lösungen für unterschiedliche Zielgruppen in unterschiedlichen Lebensphasen erbracht werden, die auch einen sanften Übergang ermöglichen. So kann ein Einstieg über Komfortfunktionen für nicht pflegebedürftige Menschen erreicht werden. Es können aber auch Lösungen einer umfassenden Pflegeversorgung bis hin zur telemedizinischen Betreuung realisiert werden.

Durch die Lokalisierungsfunktion des Assistenzsystems können eine Reihe von bisher nicht realisierbaren Funktionen ermöglicht werden. Verhaltensmuster der Bewohner können durch die Lokalisierung im Zusammenhang mit Sensorik an Schranktüren und Fenstern leichter und präziser bestimmt werden. Abweichungen davon können frühzeitig erkannt werden. Nimmt eine erkrankte Person beispielsweise bestimmte alltägliche Verrichtungen wie Zähneputzen oder Waschen nicht mehr selbstständig vor, kann dies auf eine verschlechterte Demenz oder eine Depression hindeuten. Auch ein ständiges Wiederholen von den gleichen Handlungen kann ein Hinweis auf eine Verschlechterung von psychi-

schen Erkrankungen sein.

Erkennung von Gefahrensituationen – Die Sensoren spielen in Hinsicht auf die persönliche oder das Umfeld betreffende Sicherheit eine Rolle. Durch Vernetzung und Fusion können Sensoren spezifische Notfallmaßnahmen schnell und automatisiert auslösen. Durch Rauchmelder kann ein Brand erkannt werden und sofort ein Alarm ausgelöst werden. Ein vergessener elektrischer Verbraucher (Herd, Bügeleisen) kann dadurch erkannt werden, dass der Benutzer den Raum für längere Zeit verlassen hat. Der Verbraucher kann dann abgeschaltet werden. Durch einen Rauchmelder in der Küche ist weiterhin sofort eine Gefahr durch verbranntes Essen erkennbar. In beiden Fällen kann der Strom des Herdes abgeschaltet werden. Bodenfeuchtigkeit z. B. das Überlaufen einer vergessenen, gerade einlaufenden Badewanne kann erkannt und die Wasserzufuhr dann abgeschaltet werden. Verlässt ein Bewohner die Wohnung und sind gefährliche Verbraucher eingeschaltet oder ein Wasserzufluss wird erkannt, kann die Gefahrensituation durch Abschalten von Strom bzw. Wasser gelöst werden. Der von den Bewohnern getragene Sensorknoten kann auch mit Beschleunigungssensoren ausgestattet werden, so dass Stürze erkannt und alarmiert werden können.

Telemonitoring, Telemedizin – Aus medizinischer Sicht kann es sinnvoll sein, den betreuten Menschen mit Sensorik auszustatten, um Vitaldaten zu erfassen. Diese Vitaldaten können z. B. Blutdruck, Puls, Schweißsekretion und Atemfrequenz sein. Über das Monitoring dieser Sensordaten können bestimmte Krankheitsprogressionen schneller erkannt werden. Im einfachsten Fall können Patienten mit einer Uhr mit Sensorknoten ausgestattet werden, die den Puls misst und überträgt sowie den Patienten in der Wohnung lokalisiert. Eine etwas weitergehende Sensorik ist ein Brustgurt, der ein 1-Kanal EKG aufnimmt. Durch das 1-Kanal EKG können Herzrhythmusstörungen erkannt und eine Alarmmeldung ausgelöst werden. Mehrkanalige EKGs bieten weitergehende Diagnosemöglichkeiten, verringern jedoch den Tragekomfort. Durch die Aufzeichnung und Übertragung der EKGs kann eine telemedizinische Diagnose durchgeführt werden.

Komfortfunktionen – Durch Fensterkontakte und Erkennung des Verhaltens der Bewohner kann die Heizungssteuerung optimal an das Wohnverhalten angepasst werden. Die Nachtabsenkung kann an die Schlafphasen der Bewohner adaptiert werden. Serviceroboter (im einfachsten Fall Staubsaugroboter) können Hilfestellung bei der Reinigung der Wohnung geben. Weiterhin können diese zur Inspektion von Räumen bei Gefahrensituationen und Alarmen verwendet werden.

5 Zusammenfassung

Das drahtlose Assistenzsystem safe@home nutzt zur Kommunikation und Lokalisierung die Funktechnologie IEEE 802.15.4a. Das Kernnetz besteht aus Zwischensteckern, die leicht in bestehende Wohnungen nachgerüstet werden können. Die Zwischenstecker haben bereits Sensoren zur Erfassung von Bewegung, Temperatur, Licht sowie Stromverbrauch von angeschlossenen Verbrauchern integriert und

können Verbraucher ein- und ausschalten. Weitere Sensoren und Aktoren der Heimautomatisierung werden über die Funktechnologie EnOcean integriert. Zudem besteht die Möglichkeit durch das Einbinden von Body Sensor Networks, Vitaldaten von Patienten zu erfassen und damit Telemonitoring zu ermöglichen. Durch Anbindung an ein Gateway können die Daten über das Internet oder ein Mobilfunknetz abgerufen bzw. im Alarmfall direkt versendet werden. Im Vergleich zu anderen Assistenzsystemen ermöglicht die Lokalisierung von Benutzern ein feingranulareres Aktivitätsmonitoring und unterstützt weiterhin eine intuitive Benutzerschnittstelle.

6 Literatur

- [1] EBERHARDT, B ; FACHINGER, U.: Verbesserte Gesundheit durch Ambient Assisted Living aus globaler, regionaler und lokaler wirtschaftlicher Perspektive. In: FACHINGER, U. (Hrsg.) ; HENKE, K.D. (Hrsg.): *Der private Haushalt als Gesundheitsstandort – Theoretische und empirische Analysen. Europäische Schriften zu Staat und Wirtschaft* Bd. 31. Baden-Baden : Nomos Verlagsgesellschaft, 2010, S. 33–59
- [2] LUTZE, R.: Assistenzsysteme für Zuhause - Wirtschaftlichkeit, Akzeptanzbarrieren und multivalenter Nutzen. In: *Tagungsband – Ambient Assisted Living – 4. Deutscher AAL-Kongress 2011*. Berlin, Deutschland : VDE Verlag GmbH, Januar 2011
- [3] IVANECKY, J. ; MEHLHASE, S. ; MIESKES, M.: Sprachkontrolle eines intelligenten Hauses mit integrierter Lokalisierung. In: *Tagungsband – Ambient Assisted Living – 4. Deutscher AAL-Kongress 2011*. Berlin, Deutschland : VDE Verlag GmbH, Januar 2011
- [4] SCHINDELM, C.K. ; MACWILLIAMS, A.: Overview of Indoor Positioning Technologies for Context Aware AAL Applications. In: *Tagungsband – Ambient Assisted Living – 4. Deutscher AAL-Kongress 2011*. Berlin, Deutschland : VDE Verlag GmbH, Januar 2011
- [5] MATOLIN, D. ; BELBACHIR, A.N. ; SCHRAML, S.: Ein neuartiger, biologisch inspirierter, optischer Sensor für den Einsatz in Ambient Assisted Living Anwendungen. In: *Tagungsband – Ambient Assisted Living – 3. Deutscher AAL-Kongress 2010*. Berlin, Deutschland : VDE Verlag GmbH, Januar 2010
- [6] HUMMES, F.J. Q. ; FINGSCHIEDT, T.: Untersuchung verschiedener Parameter für die Sprecher-Lokalisierung mittels akustischer Sensoren in Wohnräumen. In: *Tagungsband – Ambient Assisted Living – 3. Deutscher AAL-Kongress 2010*. Berlin, Deutschland : VDE Verlag GmbH, Januar 2010
- [7] STEINHAGE, A. ; LAUTERBACH, C.: SensFloor®: Ein AAL Sensorsystem für Sicherheit, Homecare und Komfort. In: *Tagungsband – Ambient Assisted Living – 1. Deutscher AAL-Kongress 2008*. Berlin, Deutschland : VDE Verlag GmbH, Januar 2008
- [8] HOFFMEYER, André ; TEIPEL, Stefan ; KIRSTE, Thomas: *Bewertung des kognitiven Zustandes von Demenzpatienten mit Hilfe mobiler Sensoren*. Mannheim, Germany, 2010
- [9] HOFFMEYER, André ; BAUER, Alexandra ; TEIPEL, Stefan ; KIRSTE, Thomas: *Erkennung von Demenzerkrankungen auf der Basis von Bewegungsprofilen mit Hilfe hierarchischer Markov-Modelle*. Mannheim, Germany, 2011
- [10] NILAS, N.: An Alerting Wireless Sensor System for Long Period of Immobilized Elderly in a Residential Room. In: *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2011 (IMECS 2011)*. Hong Kong, März 2011
- [11] SACHS, J. ; HELBIG, M. ; HERRMANN, R. ; WELGE, R. ; BOLLOW, E.: Merkmalsextraktion und semantische Integration von Ultrabreitband-Sensoren zur Erkennung von Notfällen. In: *Tagungsband – Ambient Assisted Living – 3. Deutscher AAL-Kongress 2010*. Berlin, Deutschland : VDE Verlag GmbH, Januar 2010
- [12] MAYER, P. ; PANEK, P.: Erste Ergebnisse einer Status- und Aktivitätsbeurteilung mittels Expertenwissen und wenigen unaufdringlichen Sensoren. In: *Tagungsband – Ambient Assisted Living – 4. Deutscher AAL-Kongress 2011*. Berlin, Deutschland : VDE Verlag GmbH, Januar 2011
- [13] FLOECK, M. ; LITZ, L.: Aktivitätsüberwachung in Bestandswohnungen mit einfach nachrüstbarer Basisausstattung. In: *Tagungsband – Ambient Assisted Living – 3. Deutscher AAL-Kongress 2010*. Berlin, Deutschland : VDE Verlag GmbH, Januar 2010
- [14] KRENN, B. ; GSTREIN, E. ; GOETZLOFF, I.: Vitalmonitoring für ein langes Leben in den eigenen vier Wänden. In: *Tagungsband – Ambient Assisted Living – 3. Deutscher AAL-Kongress 2010*. Berlin, Deutschland : VDE Verlag GmbH, Januar 2010
- [15] ZAPATA, J. ; FERNÁNDEZ-LUQUE, F.J. ; RUIZ, R.: Wireless Sensor Network for Ambient Assisted Living. In: *Wireless Sensor Networks: Application-Centric Design*. InTech, Dezember 2010, S. 127–146
- [16] NUNNER, G.: Aktivitätsmonitoring in der Betreuung alter Menschen. In: *Tagungsband – Ambient Assisted Living – 3. Deutscher AAL-Kongress 2010*. Berlin, Deutschland : VDE Verlag GmbH, Januar 2010
- [17] HANKE, S. ; MAYER, C. ; KROPF, J. ; HOCHGATTERER, A. ; NIEKE, P.: Flexible Sensor Architektur zur Sensordatenanalyse und Mustererkennung im AAL Kontext. In: *Tagungsband – Ambient Assisted Living – 3. Deutscher AAL-Kongress 2010*. Berlin, Deutschland : VDE Verlag GmbH, Januar 2010
- [18] KRUPPA, M.: Notfall-Benutzer-Lokalisierung im Innen- und Außen-Bereich Emergency Indoor and Outdoor

- User Localization . In: *Tagungsband – Ambient Assisted Living – 4. Deutscher AAL-Kongress 2011*. Berlin, Deutschland : VDE Verlag GmbH, Januar 2011
- [19] D'SOUZA, M. ; WARK, T. ; ROS, M.: Wireless localisation network for patient tracking. In: *Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing, 2008. ISSNIP 2008. International Conference on*, 2008, S. 79–84
- [20] STEINHAGE, A. ; LAUTERBACH, C.: SensFloor® and NaviFloor®: Large-Area Sensor Systems. In: *Handbook of Research on Ambient Intelligence and Smart Environments: Trends and Perspectives*. IGI Global, 2011, S. 41–55
- [21] KOCH, J. ; WETTACH, J. ; BLOCH, E.: Indoor Localisation of Humans, Objects, and Mobile Robots with RFID Infrastructure. In: *Proceedings of the 7th International Conference on Hybrid Intelligent Systems*. Kaiserslautern, Germany, September 2007, S. 271–276
- [22] PRIYANTHA, N. B. ; MIU, A. K. L. ; BALAKRISHNAN, H. ; TELLER, S.: The Cricket Compass for Context-aware Mobile Applications. In: *Proceedings of the 7th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*. Rome, Italy, Juli 2001, S. 1–14
- [23] CADMAN, J.: Deploying Commercial Location-aware Systems. In: *Proceedings of the 2003 Workshop on Location-Aware Computing*. Seattle, USA, Oktober 2003, S. 4–6
- [24] GRÜNERBL, A. ; HANSER, F. ; LUKOWICZ, P. ; SUST, S. ; LORENZ, D. ; MÜLLER, S. ; LANG, D. ; HEIN, P. ; DEHOFF, P.: Einsatz von UWB-Lokalisierung zur Beobachtung von Reaktionen Demenzkranker auf unterschiedliche Lichtverhältnisse. In: *Tagungsband – Ambient Assisted Living – 4. Deutscher AAL-Kongress 2011*. Berlin, Deutschland : VDE Verlag GmbH, Januar 2011
- [25] STELIOS, M.A. ; NICK, A.D. ; EFFIE, M.T. ; DIMITRIS, K.M. ; THOMOPOULOS, S.C.A.: An indoor localization platform for ambient assisted living using UWB. In: *Proceedings of the 6th International Conference on Advances in Mobile Computing and Multimedia (MoMM '08)*, 2008, S. 178–182
- [26] FUENTES MICHEL J. C. ; MILLNER, H. ; VOSSIEK, M.: A Novell Wireless Forklift Positioning System for Indoor and Outdoor Use. In: *Proceedings of the 5th Workshop on Positioning, Navigation and Communication (WPNC 2008)*. Hannover, Germany, März 2008, S. 219 – 227
- [27] SAHINOGLU, Z. ; GEZICI, S.: Ranging in the IEEE 802.15.4a Standard. In: *Proceedings of the IEEE Annual Wireless and Microwave Technology Conference, WAMICON '06*. Clearwater, Florida, USA, Dezember 2006, S. 1–5
- [28] DOMENICALI, D. ; DI BENEDETTO, M.-G.: Performance Analysis for a Body Area Network composed of IEEE 802.15.4a devices. In: *Proceedings of the 4th Workshop on Positioning, Navigation and Communication, 2007 (WPNC '07)*, 2007, S. 273–276
- [29] GANDOLFO, P. ; RADOVIC, D. ; SAVIC, M. ; SIMIC, D.: IEEE 802.15.4a UWB-IR radio system for telemedicine. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Ultra-Wideband, 2008 (ICUWB 2008) Bd. 3*, 2008, S. 11–14
- [30] KWAK, K.S. ; ULLAH, S. ; ULLAH, N.: An overview of IEEE 802.15.6 standard. In: *Proceedings of the 3rd International Symposium on Applied Sciences in Biomedical and Communication Technologies (ISABEL)*, 2010
- [31] SCHLICHTING, F.: nanoLOC TRX: Präzise Abstandsbestimmung und Lokalisierung mittels Laufzeitmessung (RTOF) durch Einsatz der 2,4 GHz Chirp Spreiztechnologie (CSS). In: *Tagungsband Wireless Automation: Funkgestützte Kommunikation in der industriellen Automatisierungstechnik*, VDI Verlag GmbH, Februar 2008 (VDI-Berichte 2010), S. 61–70
- [32] NANOTRON TECHNOLOGIES GMBH: nanoLOC TRX Transceiver (NA5TR1). Berlin, Germany, April 2008 (NA-06-0230-0388-2.00). – Datasheet
- [33] RÖHRIG, C. ; MÜLLER, M.: Indoor Location Tracking in Non-line-of-Sight Environments Using a IEEE 802.15.4a Wireless Network. In: *Proceedings of the 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2009)*. St. Louis, USA, Oktober 2009, 552-557
- [34] RÖHRIG, C. ; BÜCHTER, H. ; KIRSCH, C.: Monte Carlo Lokalisierung Fahrerloser Transportfahrzeuge mit drahtlosen Sensornetzwerken. In: *Tagungsband 21. Fachgespräch Autonome Mobile Systeme*. Karlsruhe, Deutschland, Dezember 2009, 161-168
- [35] ZAMORA-CADENAS, L. ; SEVILLANO, J.F. ; LOSADA, M. ; VÉLEZ, I.: Improving a Localization System for Ambient Assisted Living. In: *Proceedings of the CONFIDENCE 2010 International Conference: Open Doors to ICT for Ageing and eInclusion*. Jyväskylä, Finland, Dezember 2010, S. 99–103
- [36] MÜLLER, M. ; LATEGAHN, J. ; TELLE, L. ; RÖHRIG, C.: Automatic Anchor Calibration in IEEE 802.15.4a Networks. In: *Proceedings of the 8th IEEE Workshop on Positioning Navigation and Communication (WPNC 2011)*. Dresden, Germany, April 2011