

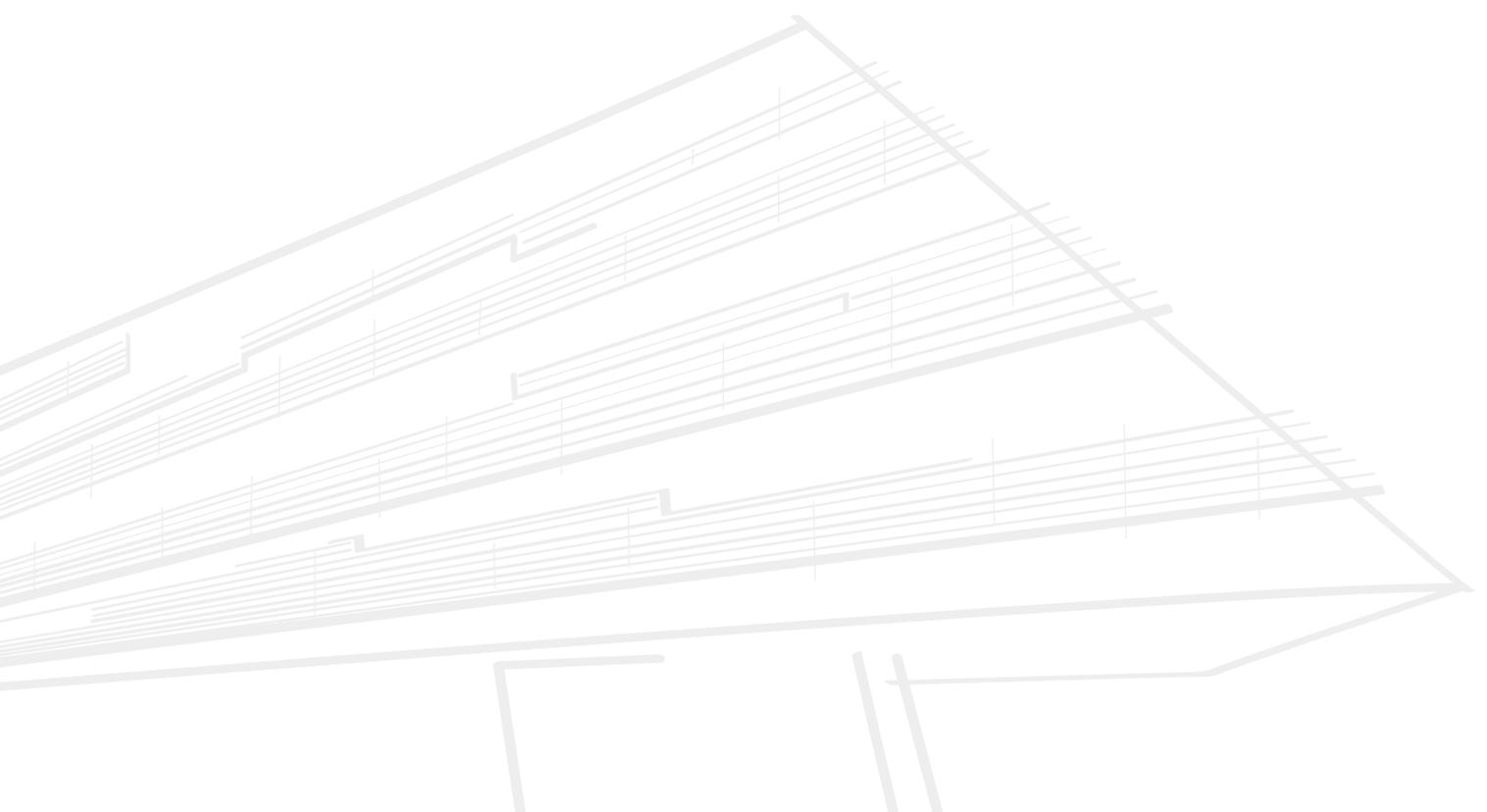
INDOOR-LOKALISIERUNG INTEGRIERTE LÖSUNGEN

Whitepaper

www.lcm.at

INHALT

Was ist Indoor-Lokalisierung	3
Einleitung, Grundlagen der Lokalisierung	4
Lokalisierung, Messprinzipien	5
Methoden zur Positionsbestimmung	8
Positions-Schätzverfahren	10
Kerngrößen von Lokalisierungssystemen	11
Technologien	12
Zusammenfassung	15



Impressum

Herausgeber Linz Center of Mechatronics GmbH **Adresse** Altenberger Straße 69, 4040 Linz, Austria **Telefon** +43 (0)732/2468–6002
Fax +43 (0)732/2468–6005 **E-Mail** office@lcm.at **Web** www.lcm.at **Blattlinie** Technische Informationen und News aus Forschung und
(Produkt)Entwicklung



WAS IST INDOOR-LOKALISIERUNG?



■ Ist der an der Maschine stehende Arbeiter befugt, genau diese Maschine zu bedienen? Auf welche Maschine sieht der Wartungsbeauftragte gerade, und wie ist deren aktueller Zustand?

Indoor-Lokalisierung ermöglicht, die Position von Personen oder Objekten innerhalb von Gebäuden zu bestimmen. Indoor-Lokalisierung legt damit den Grundstein für zahlreiche innovative Anwendungen, die sowohl für Unternehmen als auch für Endnutzer von Wert sind. In vielen Anwendungen reicht jedoch die bloße Kenntnis der Positionen nicht aus, da Objektverfolgung (Tracking), niedriger Energieverbrauch oder ein kleiner Formfaktor erforderlich sind.

In diesem Whitepaper präsentieren wir Ihnen nicht nur einen Überblick über Technologien zur Lokalisierung in Innenräumen. Wir weisen Sie auch auf wichtige Aspekte und Technologien hin, die die Funktionalität erhöhen sowie den Nutzen der Anwendungen steigern können.

GRUNDLAGEN DER LOKALISIERUNG

EINLEITUNG

DIE HERAUSFORDERUNG

Kommerzielle Lokalisierungssysteme gibt es viele. In manchen Fällen mag ein herkömmliches System reichen, meist aber nicht. Das Problem an solchen Systemen ist zweigeteilt: Einerseits müssen oft wichtige Funktionen mühsam und kostspielig nachgerüstet werden. Andererseits liegt das Hindernis darin, dass kommerzielle Systeme für bestimmte Anwendungen von vornherein nicht geeignet sind, weil dazu eine andere Systemarchitektur erforderlich wäre.

Unternehmen und Institutionen brauchen in der Regel immer ein auf ihre Anforderungen ausgerichtetes Gesamtsystem, das alle nötigen Funktionen beinhaltet und genau ihre Bedürfnisse und Wünsche erfüllt; also nicht nur eine Lokalisierungsfunktion, sondern auch Zusatz-Features bietet. Oft sind etwa Mustererkennung oder ein besonders niedriger Energieverbrauch gewünscht.

DIE LÖSUNG

Es führt kein Weg daran vorbei: ein funktionierendes Lokalisierungssystem muss gut durchdacht an die gegebenen Anforderungen angepasst sein, es muss von Anfang an alle notwendigen Funktionen beinhalten.

■ In diesem Kapitel beschreiben wir Prinzipien, Algorithmen und Technologien, mit denen Sie die Positionen von Personen und Objekten in Gebäuden bestimmen können. Weiters zeigen wir Ihnen Kenngrößen, anhand derer Sie die Systeme unterscheiden und das für Sie (oder einen konkreten Anwendungsfall) passende System finden können. ■



LOKALISIERUNG

■ In den meisten Fällen besteht ein Indoor-Lokalisierungssystem aus mehreren Ankern, das sind an fixer, bekannter Position installierte Sender/Empfänger und an zu lokalisierenden Objekten angebrachte (Lokalisier-) Marken (mobile tags).

Für eine Positionsmessung werden je nach Messprinzip von den Ankern und/oder von den Markern Signale ausgesendet, die von den anderen Teilnehmern empfangen werden.

Nachfolgend werden Mess-Prinzipien dokumentiert, mit denen eruiert wird sowie Algorithmen, mit denen die erhaltenen Messdaten ausgewertet und Positionsdaten berechnet werden können. ■

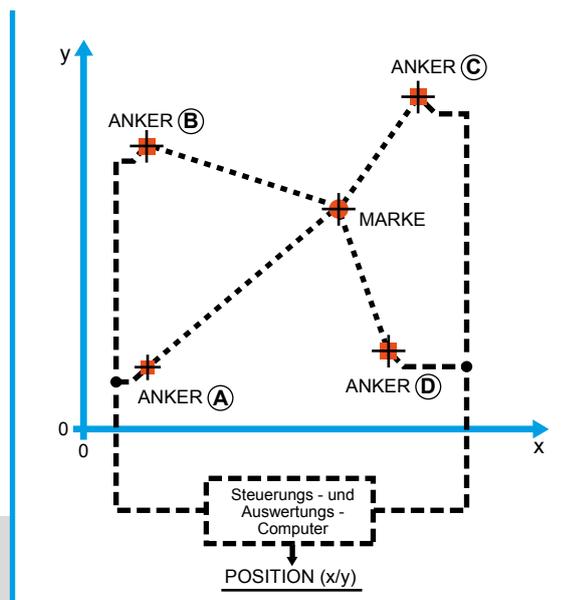


Abbildung 1. Lokalisierungs-Szenario mit vier Ankern und einer Marke.

MESSPRINZIPIEN

■ Positionen werden üblicherweise nach einem der folgenden Messprinzipien geschätzt.

Time-of-Arrival (ToA) / Time-of-Flight (ToF)

Messung der absoluten Zeit, die ein Mess-Signal von einem Sender zu einem Empfänger braucht. Über die Ausbreitungsgeschwindigkeit (Licht- oder Schallgeschwindigkeit) kann die Distanz berechnet werden. Genaue Messungen erfordern, dass Sender und Empfänger präzise synchronisiert sind. ▶

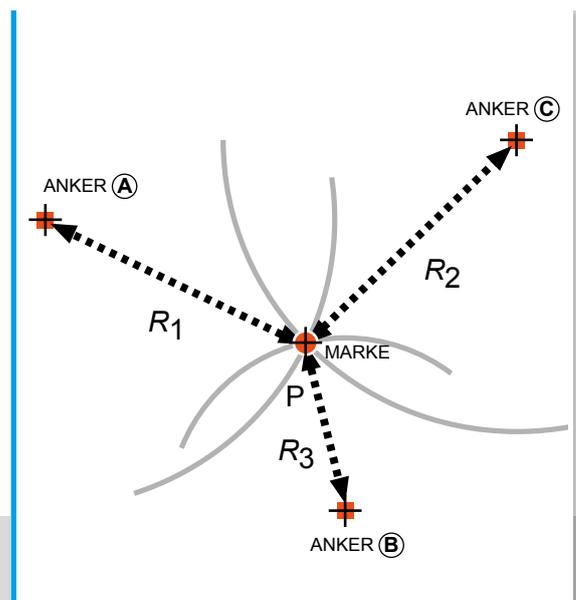


Abbildung 2. Time-of-Arrival Messung. R1-R3 sind die Abstände zwischen Marke P und den Ankern (A-C).

Round-Trip-Time-of-Flight (RTof)

Ein Signal wird vom Sender zu einem Empfänger und dann umgehend zurück zum Sender übertragen. Anhand der halben Gesamtübertragungszeit – abzüglich einer potenziellen, konstanten Verzögerungszeit, bevor das Signal zurückgesendet wird – kann ohne Zeitsynchronisierung die Distanz zwischen Sender und Empfänger gemessen werden.

Time-Difference-of-Arrival (TDoA)

Bei diesem Messprinzip wird der Zeitunterschied gemessen, der entsteht, wenn ein von einer mobilen Marke abgesendetes Signal von mehreren synchronisierten Ankerknoten empfangen wird. Aus den Zeitunterschieden lassen sich Hyperbeln berechnen, in deren Schnittpunkt die Position der Marke geschätzt werden kann.

Angle-of-Arrival (AoA)

Am Empfänger wird der Winkel des ankommenden Signales gemessen. Aus einem Set von zusammengehörigen Winkeln wird dann die Position ermittelt (Triangulation). In Abbildung 5 sind die Winkel $\sphericalangle A$ bis $\sphericalangle D$ bei den entsprechenden Ankern markiert, die dann durch Triangulation (s. unten) zur Position der Marke führen.

Received-Signal-Strength (RSS)

An einem Empfänger werden die empfangenen Signalstärken mehrerer Sendestationen gemessen, deren Positionen bekannt sind. Über den theoretischen Zusammenhang zwischen Abstand und Signalstärke kann diese Information zur Abstandsschätzung herangezogen werden. Aus den geschätzten Abständen wird wiederum die Position des Empfängers ermittelt, die allerdings meist recht ungenau ist.

Phase-of-Arrival (PoA)

Die sich an fixen Positionen befindlichen Ankerknoten senden jeweils ein Signal aus, das von einer mobilen Marke reflektiert und von einem Empfänger aufgezeichnet wird. Durch die Auswertung der Phasen der an den Ankerknoten empfangenen Antwortsignale wird die Position der Marke geschätzt.

Phasen-basierte Messungen unterliegen Mehrdeutigkeiten und erfordern für deren Auflösung meist ein weiteres Messprinzip, wie etwa Time-of-Flight. Außerdem ist oft eine Kalibrierung erforderlich, um unbekannte Phasenverschiebungen im Signalpfad zu kompensieren. ■

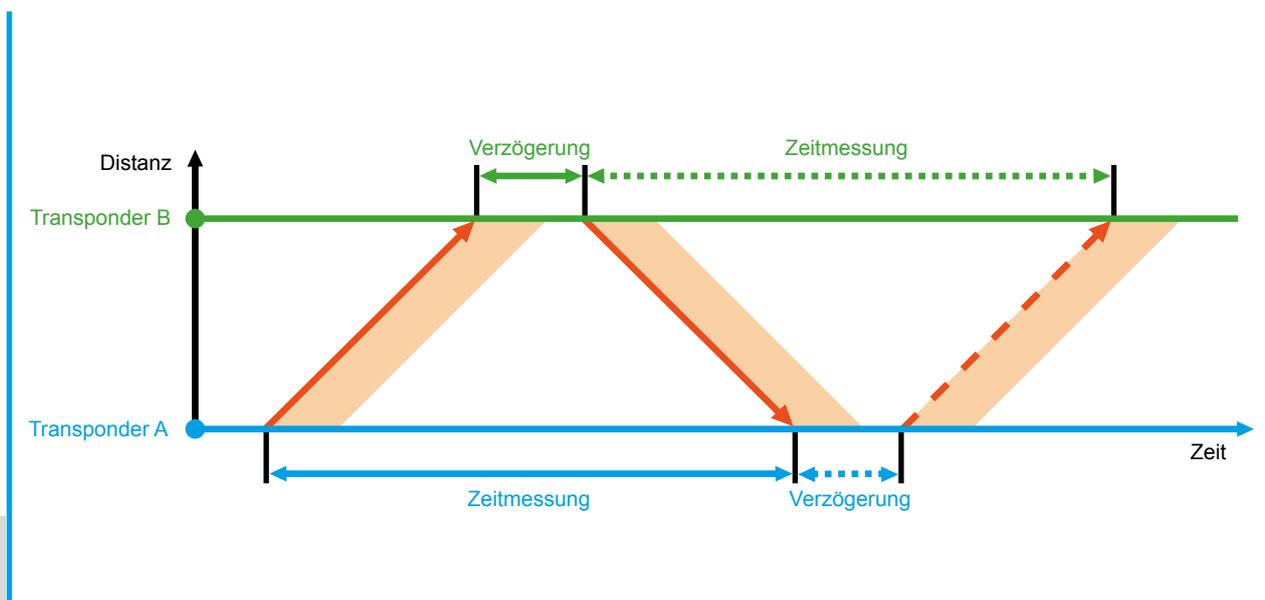


Abbildung 3. Roundtrip-Time-of-Flight-Messung.

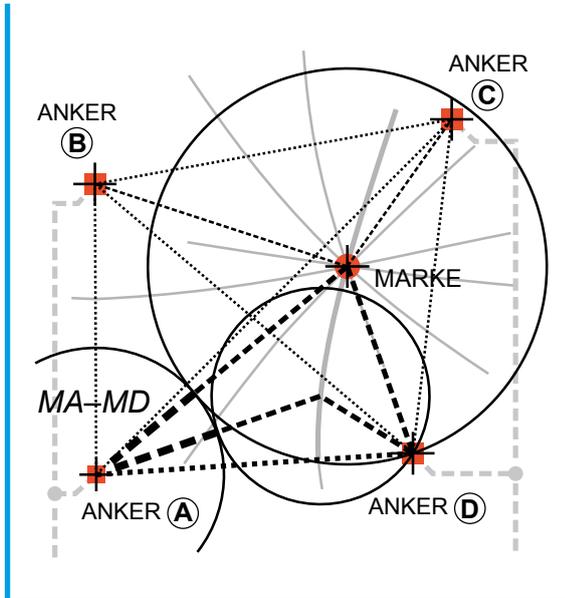


Abbildung 4. Time-Difference-of-Arrival-Messung: An Ankerpaaren wird die Differenz der Ankunftszeitpunkte eines Signals von der Marke zur Auswertung herangezogen. Die möglichen Lösungen bewegen sich entlang von Hyperbeln.

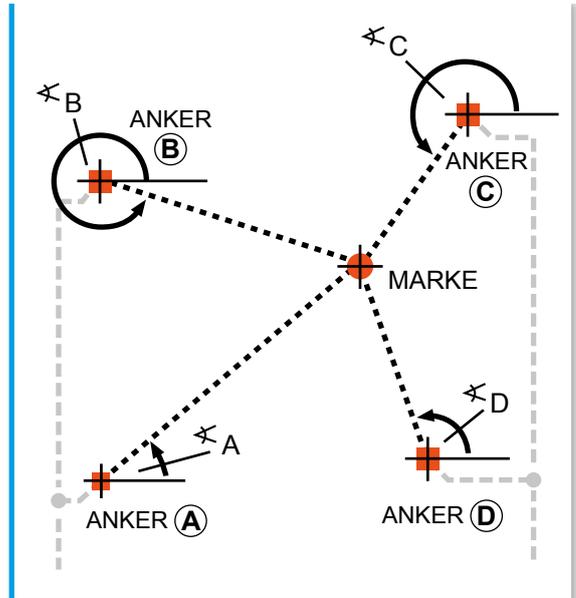


Abbildung 5. Angle-of-Arrival-Messung. An jedem Anker wird der Winkel in Richtung der Marke gemessen.

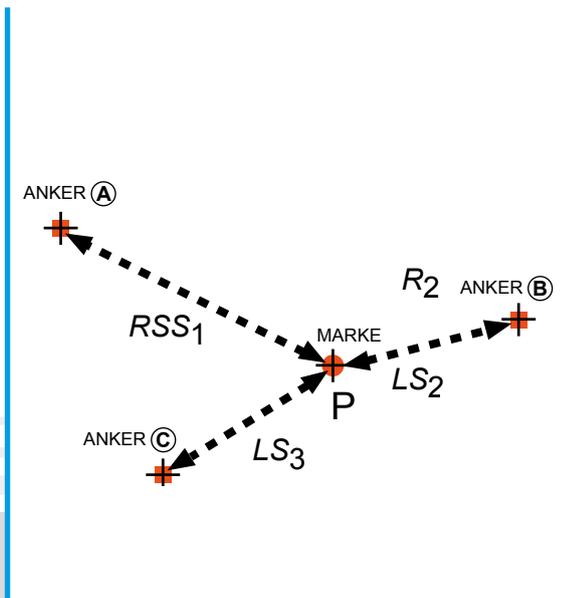


Abbildung 6. Received-Signal-Strength-Messung.

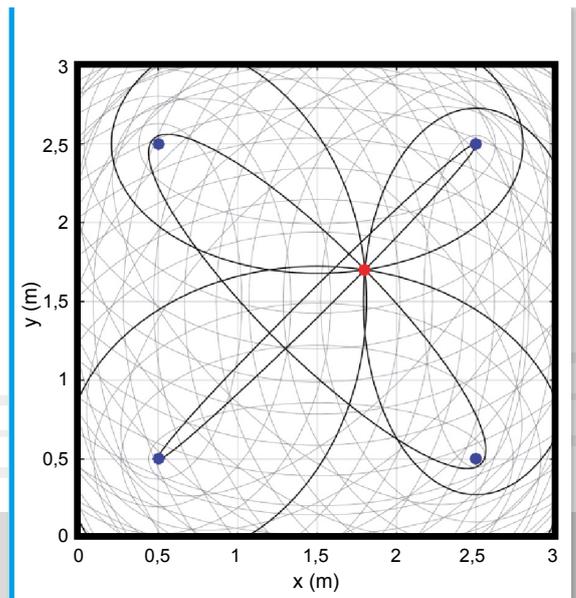


Abbildung 7. Lokalisierung basierend auf Phase-of-Arrival-Messungen. Die Ellipsen sind Kurven gleicher Phase, jeweils mit einer Sende- und einer Empfangsantenne im Fokus.

METHODEN ZUR POSITIONSBESTIMMUNG

■ Sobald die Mess-Rohdaten (Abstände, Winkel, etc.) verfügbar sind, wird, je nach Messprinzip, mit folgenden Methoden die Position der Marke bestimmt.

Trilateration

Wie in Abbildung 8 zu sehen ist, werden die Kreise, die durch die gemessenen Distanzen zwischen Marke und Anker gezogen werden können, gekreuzt. Am Schnittpunkt befindet sich die Position der Marke.

Um eine eindeutige Position zu erhalten, müssen für eine 2D-Lokalisierung die Abstände der Marke zu zumindest drei Anker bekannt sein. Da sich die Kreise

aufgrund von Messfehlern nie exakt schneiden, wird die Position durch eines der unten angeführten Verfahren geschätzt.

Triangulation

Wie in Abbildung 9 zu sehen ist, kann durch die gemessenen Winkel die Position bestimmt werden.

Scene Analysis/Fingerprinting

Das Fingerprinting-Prinzip basiert auf der Erstellung einer Landkarte durch Messung etwa der empfangenen Signalstärke (RSS) an vorgegebenen Positi- ▶

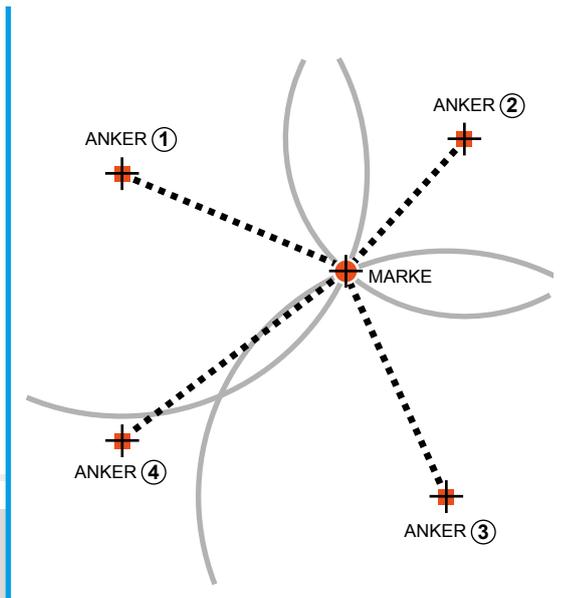


Abbildung 8. Trilateration.

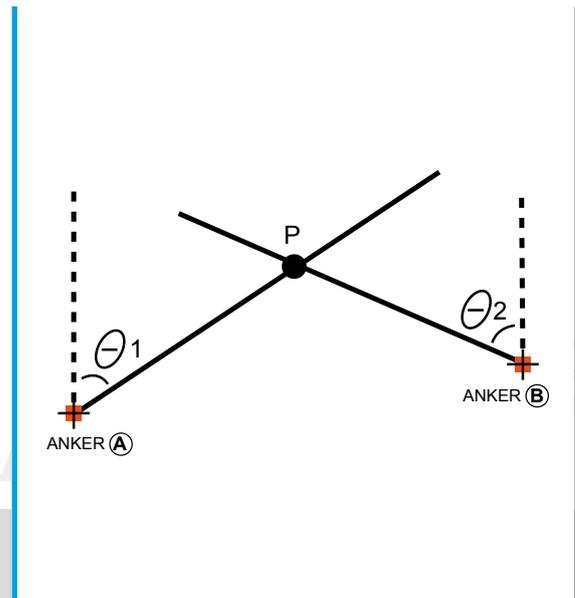


Abbildung 9. Triangulation: Ermittlung der Position von Punkt P mittels zweier Winkel, die an bekannten Positionen (A und B) gemessen wurden.

onen. Für eine Messung werden die aktuellen RSS-Werte mit der Datenbank verglichen, daraus wird die Position geschätzt. Diese Methode ist wegen der erforderlichen Messdatenaufzeichnung in der Regel sehr aufwendig.

Proximity Detection

Bei der Messung der Proximity (Nähe) wird festgestellt, ob sich eine mobile Marke in der Nähe einer bekannten Position befindet. Diese kann durch einen Anker oder ein Beacon gekennzeichnet sein. ■

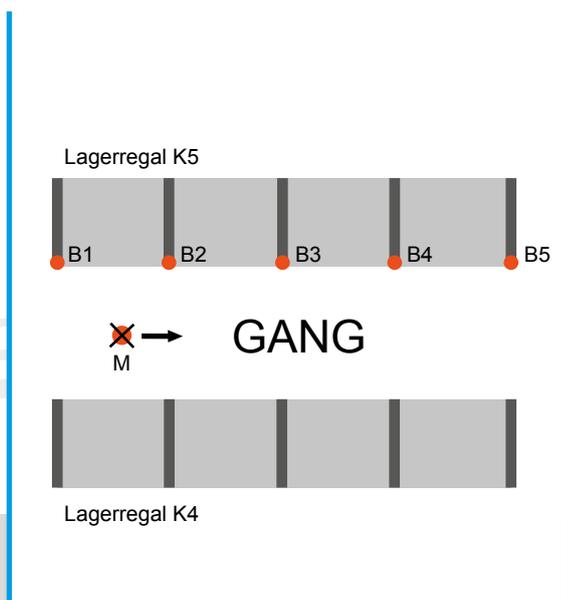


Abbildung 10. Proximity detection. Anhand der Nahfeld-detection durch die Beacons B1–B5 erkennt das System, wo sich die mobile Marke M aufhält.

POSITIONS-SCHÄTZVERFAHREN

■ Die Position lässt sich nach zwei grundsätzlichen Methoden bestimmen: Punktschätzung oder Bayes'sche Schätzmethoden.

Punktschätzverfahren

Diese Verfahren schätzen bei jeder Messung die aktuelle Position, ohne dabei frühere Messungen heranzuziehen. Beispiele für Punktschätzverfahren sind vor allem

- der Least-squares estimator („kleinste Quadrate“-Methode),
- der Maximum-likelihood estimator („maximale Wahrscheinlichkeit“-Schätzer),
- und eine analytische Lösung.

Bayes'sche Schätzmethoden

Diese Methoden greifen auf Informationen aus bisherigen Messungen zurück und beschreiben die Position der mobilen Marke durch Wahrscheinlichkeitsverteilungen. Beispiele sind

- Kalman Filter, Extended und Unscented Kalman Filter
- Partikelfilter
- Gitterbasierte Bayes'sche Filter
- Trajektorienschätzer

Ein Vorteil des Partikelfilters und des gitterbasierten Bayes'schen Filters ist, dass diese eine bekannte Raumgeometrie in die Positionsschätzung miteinbeziehen können. Mit Kalman-Filtern ist dies nicht möglich, allerdings zeichnen sich diese durch eine geringere Komplexität aus. ■

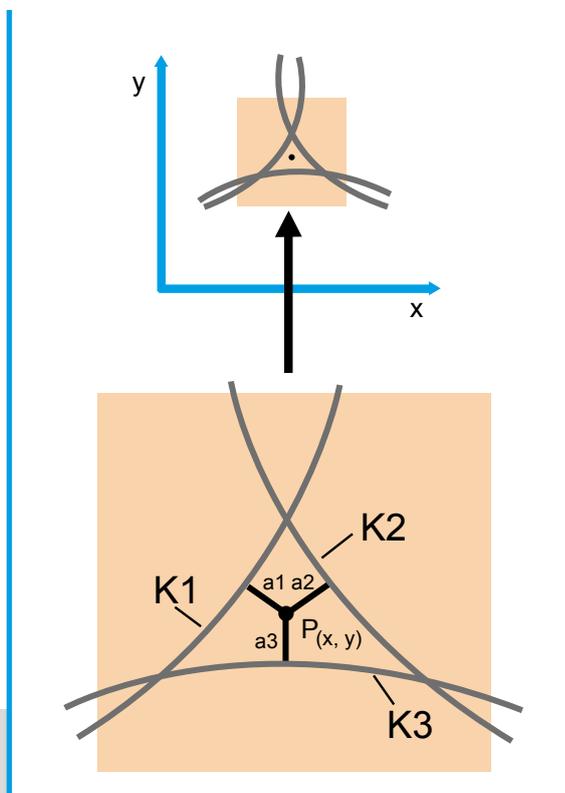


Abbildung 11. Least-Squares Estimation. Die Positionsschätzung basiert darauf, dass die Summe der quadratischen Abstände a_1 , a_2 und a_3 des Punktes zu den drei Kreisen minimal ist.

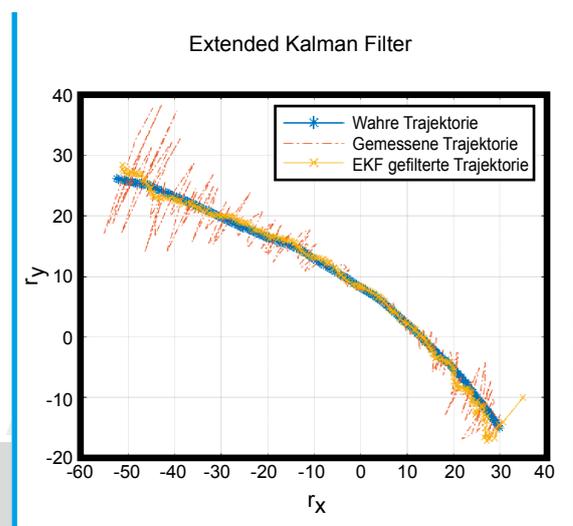


Abbildung 12. Beispiel, wie Rauschen in den Messungen durch ein Extended Kalman Filter verringert werden kann.

KENNGRÖSSEN VON LOKALISIERUNGSSYSTEMEN

■ Wie leistungsfähig sind Lokalisierungssysteme? Und sind sie für eine konkrete Anwendung verwendbar? Die folgenden Kenngrößen helfen dabei, diese Fragen zu beantworten.



Die **Genauigkeit** gibt den mittleren Positions-Messfehler an und die Präzision deren mittlere Streuung.



Die **Aktualisierungsrate** gibt an, wie viele Messungen pro Zeiteinheit (Sekunde) durchgeführt werden können. Vor allem in Szenarien, in denen die mobile Marke schnell bewegt wird, ist eine hohe Aktualisierungsrate notwendig.



Die **Verzögerung (Latenz)** vom Augenblick der Messung bis zum Erhalt des Positionswertes wirkt sich direkt auf die Reaktionsfähigkeit eines Systems aus, das auf die Positionswerte angewiesen ist.



Der **Stromverbrauch** der mobilen Marken im laufenden Betrieb ist sehr wichtig, das regelmäßige Wechseln von Batterien oder Aufladen von Akkus ist eine aufwendige Wartungsarbeit.



Bereits bei der Konzeptentwicklung muss die Skalierbarkeit des Systems berücksichtigt werden, damit die Anzahl der lokalisierbaren Marken ohne viel technischen Zusatzaufwand problemlos erhöht werden kann.



Die Abdeckung bzw. **Reichweite** geben an, innerhalb welchen Abstandes die Lokalisierung verlässlich funktioniert. ■

TECHNOLOGIEN

■ Technologien zur Lokalisierung basieren auf Funkübertragung, Inertialsystemen, optischen oder akustischen Methoden. Im Folgenden sind die wichtigsten Systeme beschrieben.

Funk

Funk-basierte Technologien verwenden für die Signalübertragung elektromagnetische Wellen, die sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten.



Ultra-wideband (UWB). „Ultra-wideband“ bedeutet, dass das Messsignal eine sehr hohe Bandbreite aufweist. Die notwendige Sendeleistung kann gering sein, wodurch sich verschiedene Sender nicht gegenseitig stören. Im Vergleich zu Schmalband-Funkverfahren ermöglicht die hohe Bandbreite eine vergleichsweise hohe Genauigkeit im Bereich einiger Zentimeter bis Dezimeter.



Bluetooth Low Energy (BLE). Für die Lokalisierung werden so genannte Beacons an bekannten Positionen montiert, die periodisch Signale aussenden. Der Abstand zwischen den Beacons und einem Empfän-

ger, z. B. einem Smartphone, wird durch Signalstärkemessung (RSS) geschätzt.



WLAN. WLAN-Zugänge sind weit verbreitet und bieten sich als Basistechnologie für Lokalisierung an. Geortet wird dabei entweder durch Trilateration von RSS-Werten von verschiedenen Zugangspunkten (Access Points) oder über das Fingerprinting-Verfahren. WLAN-Ortung ist günstig, bietet allerdings nur eine Genauigkeit im Bereich einiger Meter.



RFID (Radio-frequency identification). RFID-Tags werden u. a. als Diebstahlkontrolle im Handel verwendet. Je nach Art der Tags – passiv ohne bzw. aktiv mit Batterie – und je nach Sendefrequenz, können diese innerhalb eines Bereiches von einigen Metern (passiver Tag) bis zu 100 Metern (aktiver Tag) lokalisiert werden.



Inertiale Messeinheiten

Inertiale Messeinheiten (Inertial Measurement Unit – IMU) beinhalten Beschleunigungs- und Drehraten- ▶

sensoren, mit denen Geschwindigkeitsänderungen und Drehungen gemessen werden können. Sensoren in aktueller MEMS-Technologie (Micro-Electro-Mechanical-System) lassen sich im Chipformat herstellen und liefern in der Regel je ein Sensorsignal für jede Raumachse. Heutzutage sind diese Systeme in Smartphones allgegenwärtig.

Mit IMUs kann kontinuierlich die relative räumliche Bewegung eines Objektes bestimmt werden. Ein Nachteil ist aber, dass die Sensoren im Laufe der Zeit driften, d. h. die Messwerte werden ungenau.

Daher wird eine IMU in Lokalisiersystemen meist als zusätzliche Datenquelle eingebaut und die vorverarbeiteten Bewegungssignale mittels Sensor Fusion mit den Positionsdaten einer anderen Ortungsmethode verknüpft.

Optisch

Wird optisch lokalisiert, gibt es zwei Hauptverfahren: Visible Light Positioning und die Visuelle Odometrie, an

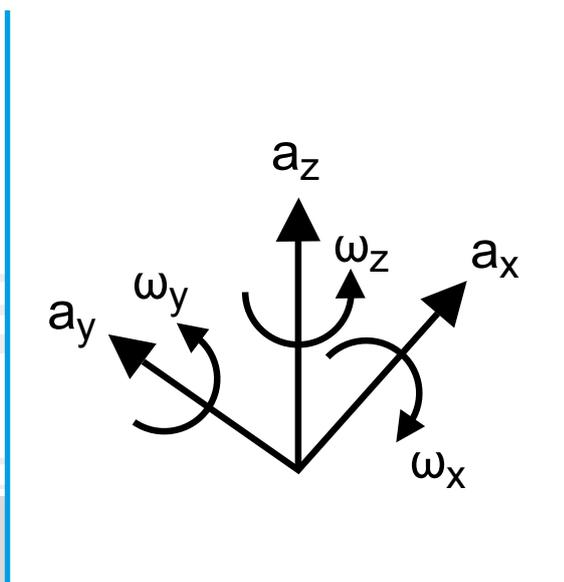


Abbildung 13. Die sechs Freiheitsgrade (6-DoF–Degrees of Freedom) einer IMU bestehend aus Beschleunigungssensor ($a_x/a_y/a_z$) und Drehratensensor (Gyro, $\omega_x/\omega_y/\omega_z$).

die wir auch die Methoden zur gleichzeitigen Lokalisierung und Kartenerstellung knüpfen (SLAM, Simultaneous Localization and Mapping).



Visible Light Positioning (VLP)

Bei dieser Technologie werden Daten mit dem Licht übertragen. Um die Position zu bestimmen, senden LEDs (Light Emitting Diodes) spezifische Lichtsignale von bekannten Positionen, die von Bildsensoren (Kameras) empfangen werden und die wiederum auf den zu lokalisierenden Objekten angebracht sind. Aus den empfangenen Lichtsignalen wird die Position und ggf. Ausrichtung der Kameras Position bestimmt. Das Verfahren kann umgekehrt auch mit fix montierten Kameras und mobilen LEDs implementiert werden. ▶

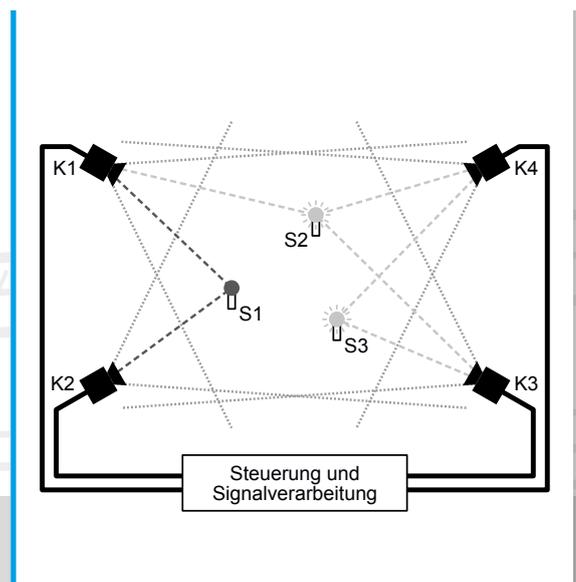


Abbildung 14. Prinzip des Visible Light Positioning: An mehreren Empfängern (Kamera) werden die Signale von an fixen Positionen installierten Leuchtquellen (LEDs) empfangen und ausgewertet.



Visual Odometry/SLAM (Simultaneous Localization and Mapping).

Mit Hilfe von einer oder mehreren Kameras wird die Pose (Position und Orientierung) eines sich bewegenden Objektes bestimmt. SLAM-Algorithmen bestimmen in der unmittelbaren Umgebung die Position und erstellen gleichzeitig eine Karte (Map) der Umgebung.

Akustisch

Soll eine Position akustisch bestimmt werden, bedient man sich unhörbarer oder hörbarer Schallwellen. Dabei werden Distanzen und/oder Winkel gemessen. Aufgrund der wesentlich geringeren Übertragungsgeschwindigkeit (Schallgeschwindigkeit $c \approx 330$ m/s bei 20 °C Lufttemperatur; ein Schallsignal durchläuft eine Distanz von 10 m in etwa 30 ms) im Vergleich zur Lichtgeschwindigkeit beim Funk können akustische Systeme bei der Aktualisierungsrate nicht mit den entspre-

chenden Möglichkeiten bei Funk-Systemen (100 Messungen/Sekunde und mehr) mithalten.

Wird die Position akustisch bestimmt, dann muss berücksichtigt werden, dass sich die Schallgeschwindigkeit mit der Temperatur ändert. Gemessen wird mit akustischen Signalen, allfällige Synchronisations-Signale bzw. Daten werden über Funk gesendet.



Ultraschall.

Nicht hörbare Ultraschallsignale bestimmen die Position über die Distanz zwischen fix montierten Anker und Marke. Je nach Konzept des Systems senden die Anker oder die Marke das Messsignal aus.



Hörbar.

Hörbare Messsignale werden von mehreren Lautsprechern ausgestrahlt und von der mobilen Marke aufgenommen, vorverarbeitet und für die Positionsbestimmung per Funk an eine Basisstation gesendet. Umgekehrt ist das auch möglich: die mobile Marke sendet ein Signal aus, das von einem fix montierten Mikrofon aufgenommen wird. Je weiter das Signal gesendet werden soll, desto höher ist der Energieverbrauch der Sendeeinheit (Verstärker und Lautsprecher). ■

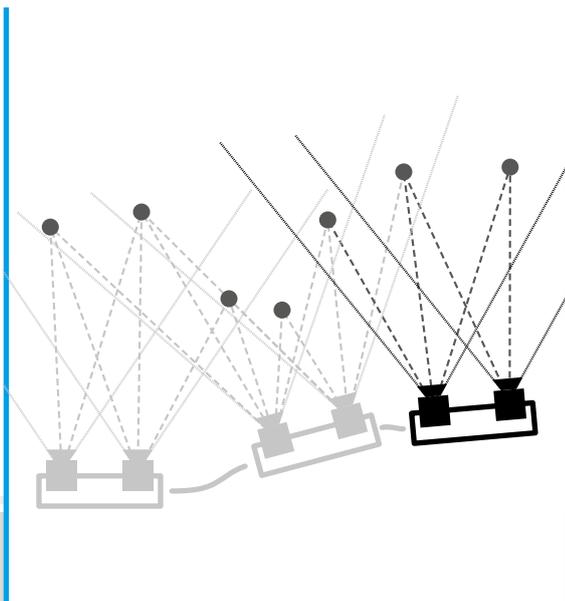
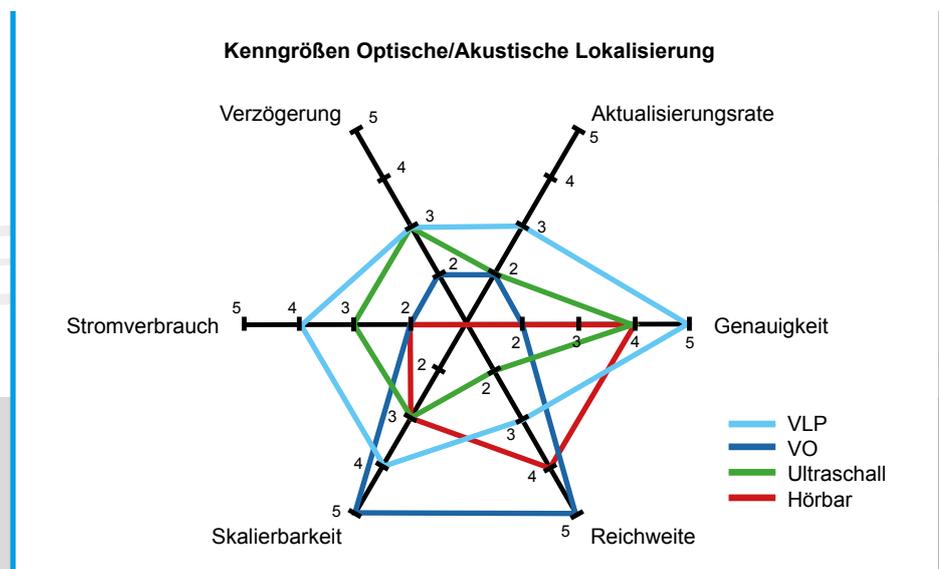
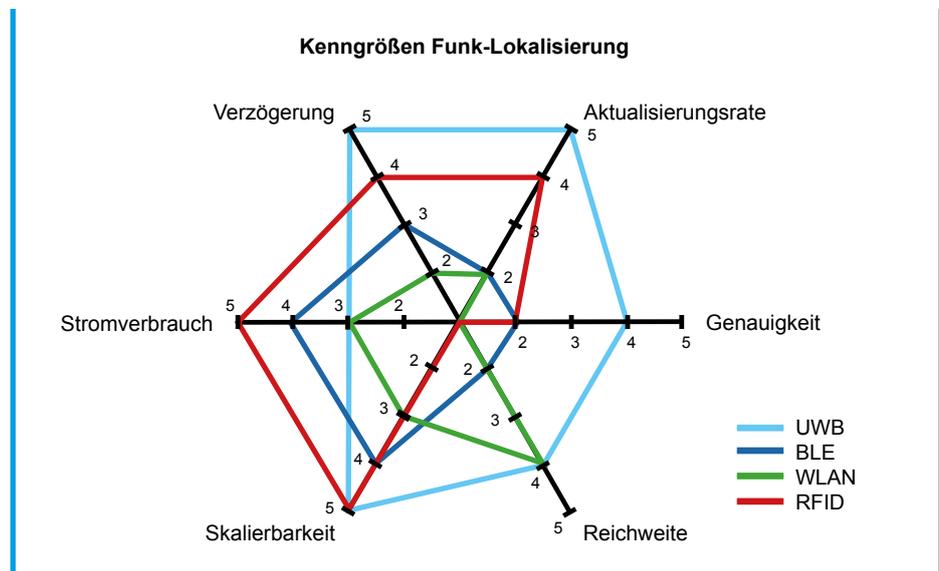


Abbildung 15. Visuelle Odometrie mit einer Stereokamera: Aus den Bildern wird über die Zeit hinweg die Pose (Position/Orientierung) relativ zu einem Startwert berechnet.

ZUSAMMENFASSUNG

Die folgenden Netzdiagramme geben eine Übersicht über die Lokalisierungsmethoden und deren grobe Bewertung bezüglich der Kenngrößen (5 = sehr gut). Je nach konkreter Anforderung kann diese Übersicht helfen, die richtige Methode zu finden. ■



KONTAKT

DI Dr. Markus Pichler-Scheder
Sensors & Communication | Team Leader Analytics
0043 (0)732 / 2468 - 6134
markus.pichler-scheder@lcm.at

