

Projekt

INSPIRER

(PartizipatioN in StadtPlanungsprozessen In viRtuEllen und Realen Räumen)

Arbeitspaket 6 „AR-App“

Tracking, Positioning, Localization & Tracing Technologien und Lösungen

Vorgelegt durch:

Virtual Dimension Center (VDC) Fellbach

Stand: v04. 15.04.2023



Förderhinweis:

Das Projekt wird vom Bundesministerium
für Bildung und Forschung unter dem
Förderkennzeichen 16SV8746 gefördert.



Inhaltsverzeichnis

1. Einführung - Aufgabenstellung.....	5
1.1 Hintergrund	5
1.2 Augmented Reality für Inspirer	5
1.3 Augmented-Reality-Grundlagen.....	5
1.4 Nahtlose Augmented-Reality-Arbeitsräume	6
1.5 Problemstellung.....	7
1.6 Zielsetzung.....	7
2. Vorgehensweise	8
3. Technologien Positioning, Localisation, Tracking, Tracing.....	9
3.1 Kurzerläuterungen, Vor- und Nachteile einzelner Technologien.....	9
3.1.1 2D-markerbasiertes Tracking	9
3.1.2 2D natural feature tracking (NFT) / optisches 2D-Scannen / Photogrammetrie	9
3.1.3 3D natural feature tracking (NFT) / optisches 3D-Scannen	9
3.1.4 Active Badge (IR)	10
3.1.5 Bluetooth.....	11
3.1.6 Bluetooth-Low-Energy (BLE)	11
3.1.7 CSS (Chirp Spread Spectrum bzw. Zirpenfrequenzspreizung).....	12
3.1.8 Elektromagnetisches Tracking.....	13
3.1.9 (Elektro-)mechanische Systeme	13
3.1.10 Erdmagnetfeldmessung	14
3.1.11 GNSS / Satellitenortung.....	14
3.1.12 GSM-Ortung I; Mobilfunk-basierte Ortung: Cell-ID.....	14
3.1.13 GSM-Ortung II; Mobilfunk-basierte Ortung: TOA, TDOA, U-TDOA	15
3.1.14 GSM-Ortung III; Mobilfunk-basierte Ortung: EOTD	16
3.1.15 GSM-Ortung IV; Mobilfunk-basierte Ortung: Sidelink	16
3.1.16 Inertialmesseinheit / inertial measurement unit (IMU) / Trägheitsnavigationssystem.....	17
3.1.17 LASER-Tracking	17
3.1.18 LoRa (long range)	18
3.1.19 Near Field Communication (NFC).....	18
3.1.20 Optisches IR-Tracking.....	19

3.1.21	RFID / Funketiketten	20
3.1.22	SigFox	20
3.1.23	Strukturiertes Licht.....	21
3.1.24	Ultraschall-Tracking.....	22
3.1.25	Ultra-Wide-Band (UWB).....	22
3.1.26	VLC Visible Light Communication und LiFi Light Fidelity (definierte Modulation der Beleuchtung).....	23
3.1.27	WiFi/WLAN	23
3.1.28	Zigbee	25
3.2	Vergleich der Tracking-Technologien	26
3.3	Normen und Standards zum Vergleich von XR-Trackingverfahren	29
4.	Erfassung & Mapping	29
4.1	Google GeoSpatial API.....	29
4.2	Microsoft Azure Anchors	30
4.3	Mapstar	30
4.4	bitstars/HoloBuilder	30
4.5	inCITU	31
4.6	wintor	31
5.	Glossar.....	32
6.	Quellen und weiterführende Literatur.....	33
7.	Impressum.....	34
8.	Förderhinweis.....	34

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3: Das XR-Kontinuum (eig. Darstellung VDC)	6
Abbildung 1: Legende von Vergleichsgrößen.....	26
Abbildung 3: Positionierungstechnologien: Vergleich (Teil 1)	27
Abbildung 3: Positionierungstechnologien: Vergleich (Teil 2)	28



1. Einführung - Aufgabenstellung

1.1 Hintergrund

Augmented Reality (AR, deutsch: Erweiterte Realität) ist die kontextsensitive, räumlich-geometrisch korrekte Überlagerung von Computergraphik in die natürliche Perspektive. Zielsetzung ist es, nützliche Informationen räumlich nahe an dort zu platzieren wo sie semantisch sinnvoll sind, etwa im Sinne von Assistenzsystemen. Auch können Konsistenzüberprüfungen (digitales Soll versus reales Ist) durchgeführt werden. AR lässt sich für Blicke in andere Zeiten verwendet, indem etwa nicht mehr existente Objekte nochmals an ihrem damaligen Ort dargestellt werden oder aber noch nicht existente Planungen bereits an ihrem echten Ort sichtbar erscheinen. Schließlich gibt es natürlich auch in der AR etliche Unterhaltungs- und Spiele-Anwendungen.

1.2 Augmented Reality für Inspirer

Für das Inspirer-Projekt ist AR interessant und relevant, da sich damit Zukunftsperspektiven und Vergangenheitsbetrachtungen anstellen lassen, unter Berücksichtigung des aktuellen Baubestands und – falls gewünscht – an der richtigen Örtlichkeit. Ansätze mit Handheld Devices sind für die Mehrzahl an Bürgern realistisch; über Cardbards ließe sich selbst einfache VR in einen größeren Verbreitungsgrad bringen. Mittels betreuter Ortsbesichtigungen ist der Einsatz teurerer VR-Headsets und AR-Headsets denkbar.

Die Motivation zum Einsatz von AR für das Projekt Inspirer liegt darin, Zukunftsprojekte und in die Zukunft gelegte Entscheidungsalternativen auf eine sehr verständliche Art und Weise darzustellen. AR kann signifikant dabei helfen, Barrieren zu überwinden, die einer weiteren Bürgerbeteiligung heute noch im Wege stehen: die intuitive AR-Darstellung hilft so, wenn die Vorstellungskraft nicht ausreicht; es gelingt leichter Lösungsansätze auf die eigene Umgebung zu transferieren. Das digitale AR-Modell kann interaktiv und dynamisch gestaltet werden; der Nutzer hat also die Möglichkeit, entsprechend seine Ideen, Vorstellungen und Wünsche mit dem Modell zu arbeiten (insofern die AR-Entwickler dieses so vorgesehen haben). Auch Perspektivwechsel entsprechend der eigenen Interessen („*wie sieht das vorgeschlagene Bauwerk von meiner Heimadresse aus betrachtet aus?*“) werden möglich. Mittels AR sind also zweifelsohne mehr Möglichkeiten gegeben, sich aktiv und interaktiv mit einem Vorschlag auseinanderzusetzen als etwa mit Printmedien oder Filmen. Weiterhin ist im Inspirer-Kontext sehr relevant, dass die AR-Darstellung weniger Manipulation zulässt als diese beiden genannten Optionen: je nach Intention, oder aus Unwissenheit, können für Foto- und Filmaufnahmen bzw. bei der Erstellung von Montagen, unterschiedliche Objektiven (also mit unterschiedlichen Brennweiten) zum Einsatz kommen. Wird ein Teleobjektiv eingesetzt, so werden Objekte aus dem Hintergrund in der Wahrnehmung stärker nach vorne geholt. Wird Weitwinkel, etwa ein Fischaugeobjektiv verwendet, erscheinen Objekte im Hintergrund kleiner als in der natürlichen Sicht des Menschen. Man kann auf diese Weise also etwa unliebsame Objekte kleiner erscheinen lassen als wir sie später tatsächlich sehen und wahrnehmen. Virtual Reality und Augmented Reality versuchen hingegen immer, der natürlichen, menschlichen Wahrnehmung zu entsprechen.

1.3 Augmented-Reality-Grundlagen

Hardware-technisch gibt es drei Möglichkeiten, AR zu realisieren. Erstens kann der Nutzer ein Headset, ein Head Mounted Display, tragen, in welchem diese Überlagerung vorgenommen wird. Zweitens kann der Nutzer ein Hand Held Device, also ein Smartphone oder einen Tablet PC, nutzen. Drittens werden so genannte AR-Aufprojektionen verwendet, bei denen digitale Zusatzinformationen mittels eines Projektors auf

ein physisch-reales Objekt projiziert werden. Systemisch unterscheiden sich weiterhin die zwei grundsätzlichen Methoden des Optical-See-Through (oder: see through) und des Video-See-Through (oder pass through, video pass through). Bei Optical See Through werden semi-transparente Displays verwendet, in denen digitaler Content angezeigt wird. In der Folge wird eine extrem genaue Sichtachse Auge-Display-Realität benötigt, damit die Überlagerung an korrekter Stelle erscheint. Bei (Video) Pass Through wird ein Kamerabild aufgenommen, dann mit Zusatzinformationen angereichert (augmentiert), um dann in einem nicht transparenten Display angezeigt zu werden. Hier ist die oben genannte Sichtachse nicht mehr zwingend. Dieser Video-Pass-Through-Ansatz kommt vor allem bei Handheld Devices zum Einsatz, in jüngster Zeit sind aber auch wieder vermehrt Umsetzungen in Virtual Reality Headsets zu beobachten. Falls auch noch graphische oder optische Marker eingesetzt werden, ist dieser Ansatz technologisch sehr einfach umzusetzen. Problematisch ist die Gefahr, bei Systemversagen die Sicht zu verlieren. Daher kann diese Technik bei schnellen, sicherheitskritischen Einsatzfällen nicht genutzt werden.

Unabhängig von den dargestellten AR-Hardware-Optionen und unabhängig von der Art des See-Through/Pass-Through ist es erforderlich, dass der Betrachter und das Anzeigegerät zueinander und im Raum verortet werden können. Dafür sind Positionierungstechnologien zwangsläufig erforderlich.

1.4 Nahtlose Augmented-Reality-Arbeitsräume

Aktuelle Diskussionen um die Zukunft der XR und das Konzept des Metaverse haben einen Aspekt wieder in den Vordergrund gerückt, den Paul Milgram et al. bereits 1994 skizziert hat: er ging in diesem Konzept davon aus, dass die verschiedenen Technologien Virtual Reality, Augmented Reality, Mixed Reality künftig in einem Kontinuum nahtlos in-

einander übergehen: der Nutzer arbeitet auf einer konsistenten Basis aus 3D-Daten mit dem XR-User Userface, welches er gerade für seine Aufgabe oder auch in seiner aktuellen Lage benötigt. Grenzen zwischen der Verwendung von XR innerhalb von Gebäuden und außerhalb sind so gesehen lediglich technisch bedingt und kein Ergebnis eines intendierten XR-Systemdesigns.



Abbildung 1: Das XR-Kontinuum (eig. Darstellung VDC)

Neue Mobilfunkgenerationen wie 5G und 6G werden die infrastrukturellen Grundlagen für eine gute Versorgung mit 3D-Daten bis hin zu neuartigen Ansätzen wie „AR out of the Cloud“ und „AR Cloud Streaming“ bieten.

Für die angestrebten, nahtlosen 3D-Arbeitsumgebungen, die mobil überall als Ubiquitous Computing einsetzbar sind, werden neuartige Kombinationen verschiedener Trackings-Technologien notwendig werden. Dieses so genannte hybride Tracking ist dabei kein neues Konzept, sondern wurde auch schon bereits in der Vergangenheit eingesetzt, um etwa zu langsames, aber absolut messendes optisches Tracking mit schnellem, aber ungenauem, mit Drift behaftetem Inertialtracking zu ergänzen. Auf diese Weise kann man also mittels „Sensorfusion“ schnelles, genaues und absolut messendes Tracking erhalten. Ein weiterer Vorteil liegt darin, Redundanz zu schaffen, indem ein Trackingverfahren übernimmt, falls das andere temporär nicht funktionsfähig ist, zum Beispiel bei Verlust des Signalkontakts oder bei Okklusion. In solchen Fällen



kann das verbleibende Trackingsystem die Positionierung fortschreiben („*Dead Reckoning*“). Bei Wiederherstellung des Signalkontakts folgt die Konvergenzphase. Für Inspirier wird es interessanter sein, durchgängig getrackte Räume zu schaffen, die nahtlos innerhalb und außerhalb von Gebäuden funktionieren können. Auch ein zuverlässiges Outdoor-AR-Tracking ist noch nicht absolut selbstverständlich und robust, so dass selbst auf diesem Gebiet noch Fortschritte erreichbar sind.

1.5 Problemstellung

Technologien für das Tracking, Tracing, die Positionserfassung werden seit Jahrzehnten entwickelt. Teils unterliegen sie externen technischen Voraussetzungen (wie GPS der Satellitentechnik, optische Verfahren der Computing-Power), teils werden einzelne Verfahren durch Integration, Miniaturisierung und folgende Massenproduktion (wie 9-DOF-IMUs) wesentlich kostengünstiger. Es gibt Lösungen die wieder vom Markt verschwinden (Google Projekt Tango) und Lösungen, die neu hinzukommen (Apple LiDAR). Gleichzeitig sind sie aber miteinander kombinierbar und werden auch bereits seit langem miteinander kombiniert. So verfügt ein Apple iPhone 14 Pro allein über folgende Sensoren: 48-MP-Hauptkamera, 12-MP-Kamera, LiDAR Scanner, Barometer, Magnetometer, Gyrosensor, High-g Beschleunigungssensor, Näherungssensor, Umgebungslichtsensoren.

Den verfügbaren Verfahren liegen verschiedene Technologien (z. B. elektromagnetische Wellen, Ultraschall, optische Erfassung, Messung von Gravitation, Beschleunigung), verschiedene Messverfahren (Triangulation von Signallaufzeiten, Messung von Signalstärken, Einsatz elektronischer oder elektromechanischer Sensorik) und verschiedene, auch durchaus flexible Systemarchitekturen / Implementierungen zugrunde. Diese Parameter bestimmen die Charakteristiken des Trackingsystems, hier nicht nur die technischen (wie Freiheitsgrade, Präzision, Reichweite, Geschwindigkeit, Anzahl messbarer Objekte) sondern auch weitere (Einsatzvoraussetzungen, Kosten, Komplexität von Inbetriebnahme und Verwendung).

1.6 Zielsetzung

Die Auswahl eines passenden Systems hängt von den Anforderungen ab. Liegen diese fest, kann begonnen werden, grundsätzlich passende Technologien, passende Lösungen und geeignete Implementierungen zu erarbeiten. Dazu müssen die einzelnen Verfahren bekannt sein und verglichen werden können.

Eine Übersicht über das riesige Themenfeld des Trackings, Tracing, Positioning und der Localization existiert bislang nicht. Das hängt u.a. damit zusammen, dass diese Technologien aus verschiedenen Einsatzfeldern und Branchen stammen (etwa: Logistik, Militär, Virtual Reality, Medizin). Wir sind jedoch der Überzeugung, dass die im Folgenden adressierten Technologien und Lösungen zusammenwachsen werden um den Anforderungen nahtloser XR-Arbeitsumgebungen zu entsprechen.

Ziel dieser Arbeit ist es, einen Überblick über vorhandene Technologien zu geben und diese in einfacher Art und Weise miteinander zu vergleichen, um eine ggf. vorliegende Auswahlaufgabe initial zu unterstützen. Gleichwohl ist den Erstellern dieses Dokuments bewusst, dass die Eigenschaften eines Trackingsystems nicht alleine von der Technologie abhängen, sondern auch von der Implementierung (z.B. Anzahl der Sender, Kameras, etc.).



2. Vorgehensweise

Für die Recherche erfolgte zunächst der Rückgriff auf die bestehende Produktdatenbank des Virtual Dimension Centers (VDC).

Es folgte ein Desk Research nach verschiedenen Trackingtechnologien und vergleichenden Darstellungen derselben. Die zugehörigen Hersteller wurden identifiziert. Die Herstellerseiten wurden nach weiteren Produkten und Technologien durchsucht.

Aus dem Vorwissen des VDCs und der Sichtung externer Vergleiche von Trackingtechnologien wurden die wichtigsten Begrifflichkeiten und Parameter extrahiert. Anhand dieser wurden die gefundenen Trackingtechnologien eingeordnet und bewertet.

Eine anerkannte Bewertung von Trackingtechnologien sollte auch anerkannte Verfahren zur Beurteilung berücksichtigen. Diese finden sich teils im bestehenden Normenwerk. Wir haben daher ebenso Normen und Standards recherchiert, die für die Beurteilung der Qualität von Trackingsystemen zu Rate zu ziehen sind.



3. Technologien Positioning, Localisation, Tracking, Tracing

3.1 Kurzerläuterungen, Vor- und Nachteile einzelner Technologien

Die folgende Übersicht gibt eine ganze Reihe kurzer Portraits verschiedener Technologien für Positioning / Localisation / Tracking / Tracing, die aktuell verfügbar und einsetzbar sind. Diese unterscheiden sich naturgemäß hinsichtlich ihrer technischen Leistungsfähigkeit, ihrer Einsatzvoraussetzungen, ihrer Einsetzbarkeit. Die folgenden Kapitel thematisieren das grundsätzliche technische Verfahren, das angewandte Messprinzip, sowie Vor- und Nachteile der jeweiligen Technologie.

3.1.1 2D-markerbasiertes Tracking

Beschreibung: Der Raum wird mit RGB(-D)-Kameras erfasst und die Positionen von 2D-Markern (z.B. DotMatrix Codes) werden räumlich verortet. Diesen Markern können dann z.B. in der Folge digitale 3D-Objekte zugeordnet werden, so dass sich gemischte Szenen aus dem realen Kamerabild und der digitalen 3D-Objekte erstellen lassen. Die Marker können passiv (etwa papierene Ausdrücke) oder aktive (LED-Muster; IR-LED-Muster) sein.

Messprinzip: Die Verortung erfolgt über Bildverarbeitungsalgorithmen, die ggf. ergänzt werden über eine Fortführung des Trackings (Dead Reckoning) mittels SLAM, falls die Sichtverbindung Kamera-Marker (LoS) nicht mehr gegeben ist.

Vorteile: sehr einfach zu implementieren; Papier und Standard-RBG-Kameras reichen aus.

Nachteile: erfordert relevante Rechenleistung; erfordert Sichtverbindung; Marker anzubringen; Reichweite mit der Markergröße begrenzt; Reichweite daher häufig sehr überschaubar.

Beispiele: ARCore, ARKit, Sky-Trax, StarGazer

3.1.2 2D natural feature tracking (NFT) / optisches 2D-Scannen / Photogrammetrie

Beschreibung: Der Raum wird mit RGB-Kameras erfasst und 3D-Objekte erkannt und räumlich verortet. Auch der umgebende Raum selbst kann erkannt werden, so dass eine Verortung der Kamera in ebendiesem Raum möglich wird. Die zu erkennenden 3D-Objekte oder der umgebende Raum müssen dem Rechnersysteme bekannt sein.

Messprinzip: Die Verortung erfolgt über Bildverarbeitungsalgorithmen, die ggf. ergänzt werden über eine Fortführung des Trackings (Dead Reckoning) mittels SLAM, falls eine Sichtverbindung (LoS) nicht mehr gegeben ist.

Vorteile: sehr einfach zu implementieren; Standard-RBG-Kameras

Nachteile: erfordert hohe Rechenleistung; erfordert Sichtverbindung; ungenauer als 3D NFT.

Beispiele: Quest II, visionLib, Thales Intersense

3.1.3 3D natural feature tracking (NFT) / optisches 3D-Scannen



Beschreibung: Der Raum wird mit RGB-D-Kameras oder LiDAR-Systemen (LiDAR: gleiche Funktionsweise wie RADAR, aber LASER anstelle von Radiowellen) erfasst und 3D-Objekte erkannt und räumlich verortet. Auch der umgebende Raum selbst kann erkannt werden, so dass eine Verortung der Kamera/LiDAR in ebendiesem Raum möglich wird. Die zu erkennenden 3D-Objekte oder der umgebende Raum müssen dem Rechnersysteme bekannt sein.

Messprinzip: Die Verortung erfolgt über Bildverarbeitungsalgorithmen, die ggf. ergänzt werden über eine Fortführung des Trackings (Dead Reckoning) mittels SLAM, falls die Sichtverbindung Kamera-Marker (LoS) nicht mehr gegeben ist.

Vorteile: keine Marker anzubringen; keine sonstige Infrastruktur anzubringen, genauer als 2D NFT

Nachteile: erfordert hohe Rechenleistung; Sichtverbindung erforderlich; die zu erkennende 3D-Objekte oder der umgebende Raum müssen initial erfasst werden oder als 3D-Modell vorliegen; spezielle Hardware im Gegensatz zu 2D NFT.

Beispiele: Hololens 2, BECOM Systems Argos 3D, ASUS Xtion Pro Live, Intel Real Sense 3D, Leap Motion, Mantis Vision, Microsoft Kinect 2, PMD, Primesense Carmine, Softkinetics, Space Glasses, MESA Imaging

3.1.4 Active Badge (IR)

Beschreibung: Infrarot (IR): Eines der ersten Indoor-Lokalisierungssysteme war Active Badge mittels IR-Signalen. Dieses System war für die Personenverfolgung unter Verwendung einer Reihe von Tags vorgesehen, von denen jedes alle 15 s ein IR-Signal mit einem eindeutigen Code aussendet. Die Signale werden von Badge-Sensoren aufgenommen, die in verschiedenen Räumen innerhalb des Gebäudes installiert sind und eine Genauigkeit auf Raumebene bieten. Badge-Sensoren wurden über ein spezielles 4-Draht-System mit Telefon-Twisted-Pair-Kabel und RS232-Datenübertragungsformat mit Strom versorgt und an ein Netzwerk angeschlossen.

Messprinzip: Die drahtlose Infrarotkommunikation nutzt das unsichtbare Lichtspektrum direkt unterhalb des roten Rands des sichtbaren Spektrums. IR kann auf zwei verschiedene Arten verwendet werden: direktes IR und diffuses IR. IrDA (Infrared Data Association) ist ein Beispiel für direktes IR, das einen Punkt-zu-Punkt-Ad-hoc-Datenübertragungsstandard verwendet und für stromsparende Kommunikation ausgelegt ist. IrDA erfordert eine Sichtverbindung zwischen Geräten über sehr kurze Entfernungen und bis zu 16 Mbit/s. Diffuses IR nutzt stärkere Signale als direktes IR und hat daher eine größere Reichweite (9-12) Meter. Diffuses IR verwendet Weitwinkel-LEDs, die Signale in viele Richtungen aussenden. Somit ermöglicht es eine bis viele Verbindungen und erfordert keine direkte Sichtverbindung.

Vorteile: Drahtlose Infrarotkommunikation nutzt das unsichtbare Lichtspektrum direkt unterhalb des roten Rands des sichtbaren Spektrums, was diese Technologie



im Vergleich zur Positionsbestimmung in Innenräumen auf der Grundlage von sichtbarem Licht weniger störend macht.

Nachteile: Je höher die HF-Frequenz, desto kürzer die Reichweite und desto mehr Wellen breiten sich tendenziell geradlinig aus; obwohl IR dort begrenzt ist, wo es nicht durch Wände emittieren kann, hat es eine gute Genauigkeit innerhalb des Blocks. Dies mag als Vorteil dieser Technik gelten, hat aber den Nachteil einer geringeren Verfügbarkeit.

Beispiele: [Verfügbarkeit fraglich]

3.1.5 Bluetooth

Beschreibung: Bluetooth ist ein drahtloser Standard für Wireless Personal Area Networks (WPANs). Im Gegensatz zu ZigBee ist der Bluetooth-Standard ein proprietäres Format, das von der Bluetooth Special Interest Group (SIG) verwaltet wird. Bluetooth ist als sehr stromsparende Technologie für die Peer-to-Peer-Kommunikation konzipiert, die im 2,4-GHz-ISM-Band arbeitet. Im Vergleich zu WLAN ist die Bruttobitrate geringer (1 Mbit/s) und die Reichweite von etwa 10 cm bis 10 Meter geringer. Die Local Positioning Group ist eine der Bluetooth SIG-Gruppen, die die Verwendung der drahtlosen Bluetooth-Technologie zur Positionsbestimmung untersucht.

Messprinzip: Angle of Arrival/TOF; TDOA; RSS/TOA

Vorteile: geringer Stromverbrauch; einfache Bereitstellung; höhere Datenrate als ZigBee

Nachteile: zusätzliche Hardware; beeinflusst zeitveränderliches RSS; interferiert im selben Frequenzband; Genauigkeit hängt vom Zugangspunkt ab; kürzere Reichweite als ZigBee

Beispiele: Samsung Galaxy SmartTag und SmartTag+ , Apple AirTag, Tile Pro, Musegear Finder 2

3.1.6 Bluetooth-Low-Energy (BLE)

Beschreibung: Bluetooth Low Energy, Bluetooth LE (kurz BLE), ehemals Bluetooth Smart, ist eine Funktechnik, mit der sich Geräte in einer Umgebung von etwa 10 Metern vernetzen lassen. Im Vergleich zum „klassischen“ Bluetooth soll BLE einen deutlich geringeren Stromverbrauch und geringere Kosten mit einem ähnlichen Kommunikationsbereich haben. Die unabhängig entwickelte Technik wurde 2009 als optionaler Teil von Bluetooth 4.0 veröffentlicht. Die BLE-Beacons sind kleine drahtlose Funksender, die Daten mittels BLE übertragen. Sie sind relativ günstig, können bis zu fünf Jahre und mehr mit einer Knopfzelle betrieben werden und haben im Innenbereich eine Reichweite von maximal 75 Metern. Die Genauigkeit liegt typischerweise bei unter acht Metern. Beacons gibt es in den unterschiedlichsten Formen, sie sind skalierbar und sehr portabel. AoA-basierte RTLS-Lösungen können auf eine Vielzahl von Szenarien angewendet werden, darunter Gesundheitswesen, Fertigung, Einzelhandel, Transport, öffentliche Sicherheit usw.



Messprinzip: **Pegelmessung** (RSS received signal strength); Triangulation oder Fingerprinting; Bluetooth Low Energy-Technologie, kurz BLE, ermöglicht ein kontinuierliches Asset Tracking bei einer mindestens raumgenauen Ortung. RSSI bezeichnet dabei die Methode der Indoor Ortung mit Hilfe von Beacons und bedeutet Received SignalStrength Indicator, der als Hauptindikator der Positionsberechnung via Beacons herangezogen wird.

Der **Angle of Arrival (AoA)**-Positionierungsalgorithmus lokalisiert die Position eines AoA-Tags basierend auf dem Ankunftsinkel des Signals.

Vorteile: Das Bluetooth-AoA-Ortungssystem zeichnet sich durch seine Submeter-Genauigkeit, hohe Kapazität, hohe Kompatibilität, niedrige Kosten und geringen Energieverbrauch aus.

Nachteile: Nutzung des ISM-Bandes: Interferenz; niedrige Reichweite

Beispiele: Apple iBeacons, Juniper

3.1.7 CSS (Chirp Spread Spectrum bzw. Zirpenfrequenzspreizung)

Beschreibung: Mit Frequenzspreizung (englisch spread spectrum) bezeichnet man in der Nachrichtentechnik ein Verfahren, bei dem ein schmalbandiges Signal in ein Signal mit einer größeren Bandbreite als für die Informationsübertragung nötig umgewandelt wird. Die Sendeenergie, die zuvor in einem kleineren Frequenzbereich konzentriert war, wird dabei auf einen größeren Frequenzbereich verteilt. CSS arbeitet auf dem ISM-Band 2.4 GHz.

Messprinzip: Chirp Spread Spectrum bzw. „Zirpenfrequenzspreizung“ nutzt zur Frequenzspreizung sogenannte Chirp-Impulse (= Zirpen). Dieses spezielle Modulationsverfahren wird unter anderem zu drahtlosen Datenübertragungen auf kurze Distanzen im Rahmen des Wireless Personal Area Network nach Standard IEEE 802.15.4a eingesetzt.

Time Hopping Spread Spectrum (THSS): Das Zeitsprung setzt Verfahren das Vorhandensein von Zeitschlitzen voraus. Die zeitliche Lage des ausgesendeten Trägersignals springt innerhalb der Zeitschlitze pseudozufällig. Obwohl das Verfahren oft zusammen mit Frequenzspreizverfahren wie z. B. DSSS used WIRD, stellt es selbst stark genommen kein Frequenzspreizverfahren dar, da die Bandbreite des Signals nicht vergrößert WIRD. Nachteil dieser Technik ist die schwierige Synchronisierung.

Direktsequenz-Spreizspektrum (DSSS): Beim Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS) genannten Verfahren werden die Nutzdaten in direkter Folge (direct sequence) per Exklusiv-Oder (XOR) mit einem Spreizcode verknüpft und anschließend auf einen Träger aufmoduliert. Ohne Kenntnis des Spreizcodes ist eine Rückgewinnung der Nutzinformation auf der Empfängerseite nicht möglich. Der Spreizcode hat dadurch bei geschickter Wahl die Funktion eines Kryptoschlüssels.

Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS): Beim Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS, deutsch Frequenzsprungverfahren) wird die zu übertragende



Information nacheinander auf viele Kanäle verteilt; zu einem Zeitpunkt wird immer nur ein Frequenzkanal genutzt. Dadurch ergibt sich, obwohl jeder Kanal eine kleinere Bandbreite besitzt, für das Gesamtsignal eine größere Bandbreite. Der Empfänger muss synchron mit dem Sender die Kanäle anspringen. Bei geschickter Wahl der Sprungsequenz erscheint this als pseudozufällig und hat die Funktion eines Kryptoschlüssels.

Vorteile: größere Robustheit gegenüber schmalbandigen Störungen; Vertraulichkeit: ein Mithörer kann nicht unbefugt Nachrichteninhalte erlauschen; er kann nur schwer erkennen, dass überhaupt eine Übertragung stattfindet.

Nachteile: höhere Komplexität beim Empfang; größere Bandbreite, bei niederen Sendefrequenzen unter Umständen aus frequenztechnischen Gründen nicht anwendbar.

Beispiele: xoko Smart, KKM, BlueCats, BlueSense, Estimote, Gelo, Gimbal by Qualcomm, Glimworm, Sensorberg, Sonic Notify

3.1.8 Elektromagnetisches Tracking

Beschreibung: Von einem zentralen Standpunkt aus wird eine modulierte elektromagnetische Welle ausgesandt. Die Feldstärke fällt mit der Distanz ab. Über sog. Long-Range (große Spulen) kann die Reichweite gesteigert werden.

Messprinzip: Kleine Empfängerspulen registrieren die Feldstärke und Feldrichtung. Damit ist eine Lokalisierung möglich.

Vorteile: Elektromagnetische Wellen durchdringen einfache, nicht-metallische Objekte wie z. B. Projektionsscheiben; technisch einfache Empfänger.

Nachteile: Störung durch andere elektromagnetische Felder; Störung durch metallische Gegenstände; dadurch häufig Anwendung von Fingerprinting: der Raum muss mit allen elektromagnetischen Verzerrungen anfänglich ausgemessen werden; schwierig in EMV-empfindlichen Umgebungen, auch z.B. für Herzschrittmacher.

Beispiele: NDI Aurora, Polhemus, Pico Neo 2 Controller

3.1.9 (Elektro-)mechanische Systeme

Beschreibung: Mechanische oder elektromechanische Systeme (kinematische Ketten, Seilzugsysteme, Handschuhe, etc.) werden in der Bewegung betätigt.

Messprinzip: Die Bewegungen der mechanischen oder elektromechanischen Systeme werden gemessen (Dehnmessstreifen, Potentiometer, Rotationsencoder, etc.) und daraus auf die Position und/oder Orientierung des Endeffektors geschlossen. Dafür werden geometrische Mechanikberechnungen (etwa: Kinematik) durchgeführt.

Vorteile: robust gegenüber Störeinflüssen; skalierbar; einfache Berechnungen; verknüpfbar mit haptischem Feedback, etwa taktile Ausgabe oder Krafrückkopplung;



Nachteile: mechanischer Aufbau geometrisch und optisch im Weg; Gewicht der Mechanik; Einrichtungsaufwand; größere Skalierung u.U. auf Kosten der Präzision;

Beispiele: Faro, Haption, Manus, Senseglove

3.1.10 Erdmagnetfeldmessung

Beschreibung: Das Magnetfeld der Erde ist ein natürlich vorkommendes Phänomen. Wenn es durch die Stahlkonstruktion eines Gebäudes und bestimmte elektrische Geräte tritt, hat jeder Ort in einem Raum eine einzigartige Magnetfeldsignatur. Die Verwendung dieser spezifischen Merkmale zum Erstellen eines Datensatzes, der als „geomagnetischer Fingerabdruck“ oder „Fingerabdruckkarte“ des Gebäudes bezeichnet wird, impliziert, dass die geomagnetische Positionsbestimmung für Indoor-Positionierungs- und Navigationszwecke verwendet werden kann.

Messprinzip: Fingerprinting: Feldmessung; Messung Erdmagnetfeld und Einordnung in bestehende Karte (fingerprinting).

Vorteile: Sensoren kostengünstig

Nachteile: ungenaue Ausrichtung; regelmäßige Wartung (Besichtigung/Aufzeichnung vor Ort) erforderlich; Beeinflussung des Magnetfelds durch die umgebene Infrastruktur.

Beispiele: Fujitsu, Sony, Bosch Sensortec, GiPStech

3.1.11 GNSS / Satellitenortung

Beschreibung: Ein globales Navigationssatellitensystem (englisch global navigation satellite system) oder GNSS ist ein System zur Positionsbestimmung und Navigation auf der Erde und in der Luft durch den Empfang der Signale von Navigationssatelliten und Pseudoliten. Die Satelliten der GNSS-Satellitenkonstellation teilen über Funkcodes ihre genaue Position und Uhrzeit mit. Zur Positionsbestimmung muss ein Empfänger die Signale von mindestens vier Satelliten gleichzeitig empfangen. Im Empfangsgerät werden die Pseudo-Signallaufzeiten gemessen (von den Satelliten zur Empfangsantenne inklusive Uhrenfehler des Empfängers) und daraus die aktuelle Position (inklusive der Höhe) und der Uhrenfehler ermittelt.

Messprinzip: ToA Time-of-Arrival: Laufzeit-Triangulation der von Satelliten gesendeten Zeitstempel; GPS. Das zivile L1-Signal funktioniert mit einer Trägerwelle von 1575,42 MHz und das verschlüsselbare L2-Signal mit einer Trägerwelle von 1227,60 MHz.

Vorteile: Abdeckung der gesamten Erde; Verwendung der ohnehin in Smartphones oder Smart Watches verbauten Sensoren.

Nachteile: geringe Sicherheit; Belegung Kanalresource.

Beispiele: GPS, Galileo, GLONASS, Google Maps, Baidu (Maps)

3.1.12 GSM-Ortung I; Mobilfunk-basierte Ortung: Cell-ID



Beschreibung: **Cell-ID:** Im Mobilfunk beruht die einfachste Art der Positionsbestimmung darauf, dass die Zelle, in der sich ein Mobilfunktelefon befindet, bekannt ist. Da ein eingeschaltetes Smartphone immer mit einer Basisstation in Verbindung steht, lässt sich die Position des Smartphones zumindest einer Mobilfunkzelle zuordnen. Für die automatische Positionsbestimmung nutzen die Mobilfunknetzbetreiber die Informationen über die Funkzelle in der sich das Smartphone befindet. Wenn eine Funkzelle mit mehreren Antennen ausgeleuchtet wird, ist sogar das Teilsegment einer Funkzelle bekannt. Werden Cell-ID und TA miteinander kombiniert, dann erhöht sich die Genauigkeit ein wenig. Der TA-Parameter (Timing Advance) ist ursprünglich für die Synchronisierung von Smartphone und Basisstation gedacht gewesen. Je höher dieser Wert ist, desto weiter weg ist das Smartphone von der Basisstation. Der TA-Parameter beeinflusst, wie schnell die Daten vom Smartphone an die Basisstation geschickt werden. Je weiter das Smartphone entfernt ist, desto früher muss es die Daten abschicken, damit sie rechtzeitig bei der Basisstation ankommen. Dem GSM-Mobilfunkstandard sind in Deutschland die Frequenzbereiche von 890 bis 915 MHz und von 935 bis 960 MHz (GSM 900) sowie von 1.710 bis 1.785 und von 1.805 bis 1.880 MHz (GSM 1800) zugeordnet. Der UMTS-Standard nutzt die Frequenzen von 1.920 bis 1.980 MHz sowie von 2.110 bis 2.170 MHz. Für den LTE-Standard wurden von der Bundesnetzagentur ursprünglich Frequenzen in den Bereichen 800 MHz, 1,8 GHz, 2 GHz und 2,6 GHz vergeben. Hinzu kamen durch die Versteigerung im Juni 2015 Frequenzen aus dem Bereich 700 MHz, die sich für den Einsatz in ländlichen Regionen besonders gut eignen und bisher vom Rundfunk verwendet wurden. Die Bundesnetzagentur hat 2019 in einer Frequenzauktion 41 Frequenzblöcke aus den Frequenzbereichen 2 GHz und 3,6 GHz versteigert.

Messprinzip: Cell-ID-Identifikation (Cell Global Identity, GSI), Antenna opening angle, Timing advance (TA)

Vorteile: große Reichweite, keine zusätzlichen Kosten; frei von gleichfrequenten Störungen; in Smartphones oder Smartwatches eingebettete Sensoren wiederverwenden.

Nachteile: limitierte Genauigkeit

Beispiele: Mozilla Location Service, OpenCellID, Navizon, OpenSignal

3.1.13 GSM-Ortung II; Mobilfunk-basierte Ortung: TOA, TDOA, U-TDOA

Beschreibung: **Time of Arrival; Time Difference of Arrival; Uplink Time Difference of Arrival (U-TDOA):** Bei diesem Verfahren wird die Position des Endgeräts anhand der Laufzeiten der Signale des Endgeräts zu bestimmten Stellen im Mobilfunknetz, den sogenannten Location Measurement Units (LMU), ermittelt.

Messprinzip: Viele Funkortungssysteme verwenden TOA-Messungen, um eine Geopositionierung über True-Range-Multilateration durchzuführen. Die wahre Entfernung oder Entfernung kann direkt aus der TOA berechnet werden, da sich die Signale mit bekannter Geschwindigkeit ausbreiten. TOA von zwei



Basisstationen engt eine Position auf einen Positionskreis ein; Daten von einer dritten Basisstation sind erforderlich, um die genaue Position auf einen einzigen Punkt aufzulösen. TDOA-Techniken wie Pseudobereichs-Multilateration verwenden die gemessene Zeitdifferenz zwischen TOAs.

Vorteile: große Reichweite; gute Genauigkeit; keine zusätzlichen Kosten; frei von gleichfrequenten Störungen; in Smartphones oder Smartwatches eingebettete Sensoren wieder-verwenden.

Nachteile: erfordert synchronisierte Basisstationen; geringe Zuverlässigkeit; Datenschutzprobleme.

Beispiele: Google Maps, E112/ E911, Vehicle eCall

3.1.14 GSM-Ortung III; Mobilfunk-basierte Ortung: EOTD

Beschreibung: Mit dem **EOTD-Verfahren** lassen sich Smartphones genauer orten. Bei dieser Methode misst das Mobilfunkgerät die Differenz zwischen den Ankunftszeiten von bestimmten Signalen, die von mehreren Basisstationen (BTS) abgestrahlt werden. Aus den gemessenen Zeitdifferenzen lässt sich dann die Position berechnen. Die Genauigkeit der gemessenen Werte ist durch die Mehrwegausbreitung der Funksignale beschränkt. So lässt sich der Standort eines Smartphones auf bis zu 25 Metern genau bestimmen. Nachteilig ist allerdings, dass die Mobilfunkgeräte für dieses Verfahren ausgelegt sein müssen.

Messprinzip: TOA/CSI; TDOA/RSS; RSRP/RSRQ; massive MIMO, mmWave, D2D

Vorteile: große Reichweite; bessere Genauigkeit als andere GSM-Verfahren; keine zusätzlichen Kosten; frei von gleichfrequenten Störungen; in Smartphones oder Smartwatches eingebettete Sensoren wieder-verwenden.

Nachteile: erfordert synchronisierte Basisstationen; geringe Zuverlässigkeit; Datenschutzprobleme.

Beispiele: handelsübliche Smartphones

3.1.15 GSM-Ortung IV; Mobilfunk-basierte Ortung: Sidelink

Beschreibung: **Sidelink:** LTE Sidelink ist eine Anpassung des LTE-Kernstandards, der eine direkte Kommunikation zwischen zwei LTE-Geräten ohne Umweg über eine Basisstation ermöglicht. LTE Sidelink wurde von 3GPP in Release 12 als Standard definiert, der für die öffentliche Sicherheitskommunikation verwendet werden kann. Mit LTE Sidelink sind Geräte in der Lage, ihre Positionen relativ zueinander zu bestimmen.

Messprinzip: LTE Sidelink ist eine Anpassung des LTE-Kernstandards, der die Kommunikation zwischen zwei oder mehr Geräten in der Nähe mithilfe der E-UTRAN-Technologie (Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network) ohne die Notwendigkeit einer Basisstation ermöglicht.

Vorteile: Diese Technologie kann für das Out-of-Network-Abdeckungsszenario verwendet werden. Die Funktionalität kann auch in Verbindung mit herkömmlichen



LTE-Verbindungen zu Mobilfunknetzen genutzt werden, um eine Vielzahl innovativer Connected-Car-Dienste zu erschließen. Es kann auf jedem LTE-Band bereitgestellt werden, wobei das 5,9-GHz-Band für ITS-Dienste (Intelligent Transport System) zugewiesen ist.

Nachteile: erfordert synchronisierte Basisstationen; geringe Zuverlässigkeit; Datenschutzprobleme.

Beispiele: 5G: Sidelink ist eine Kerntopologie des 5G-Systemdesigns, die eine direkte Kommunikation zwischen zwei Geräten ohne Beteiligung einer Basisstation am Senden und Empfangen des Datenverkehrs ermöglicht.

3.1.16 Inertialmesseinheit / inertial measurement unit (IMU) / Trägheitsnavigationssystem

Beschreibung: Eine inertielle Messeinheit ist eine räumliche Kombination mehrerer Inertialsensoren wie Beschleunigungssensoren und Drehratensensoren. Sie stellt die sensorische Messeinheit eines Trägheitsnavigationssystems (englisch Inertial Navigation System, INS) dar. Anwendungen von IMUs liegen unter anderem bei Flugzeugen und Raketen zur Flugnavigation.

Messprinzip: Eine IMU vom Typ I umfasst Beschleunigungsmesser und Gyroskope, während die IMU vom Typ II zusätzlich Magnetometer aufweist. Die Beschleunigungsmesser, Gyroskope und Magnetometer dienen zur Messung von Daten auf einer einzigen Achse (X: Nick, Y: Roll, Z: Gier). Um Informationen für die 3 Achsen zu erhalten, müssen jeweils drei Bauteile jedes Geräts (d. h. von Beschleunigungsmessern, Gyroskopen und Magnetometern) integriert werden, um eine IMU vom Typ II zu erhalten. Ein typischer IMU-Sensor umfasst 9 Freiheitsgrade (DoF) mit Beschleunigungsmessern, Gyroskopen und Magnetometern. Bestimmte IMU können zusätzliche Freiheitsgrade über einen Temperatursensor, GPS-Sensor, Drucksensor usw. aufweisen. Basierend auf der Beschleunigung können Berechnungen zur Lagebestimmung, von Geschwindigkeit und Position durchgeführt werden.

Vorteile: unabhängig von externen Informationen und verbraucht nicht viel Energie; kann über Standort, Geschwindigkeit, Winkellage, Winkeldaten informieren, und die anschließenden Navigationsinformationen erfolgen kontinuierlich; Hochfrequenzmessung und gute Stabilität.

Nachteile: Aufgrund Integration steigt der Positionsfehler im Laufe der Zeit an (Drift) und gewährleistet langfristig nur eine geringe Präzision; eine lange Angleichungszeit zu Beginn ist vor jeder Nutzung notwendig; es können keine Zeitangaben geliefert werden.

Beispiele: handelsübliche Smartphones, Thales Intersense, XSens

3.1.17 LASER-Tracking

Beschreibung: Lasertracker sind Instrumente, die große Objekte genau messen, indem sie die Positionen von optischen Zielen bestimmen, die gegen diese Objekte gehalten werden. Die Genauigkeit von Lasertrackern liegt in der Größenordnung von



0,025 mm über eine Distanz von mehreren Metern. Verwendet werden dazu Interferometer, deren Laserstrahl automatisch einem Reflektor folgen kann. Lasertracker werden zur Digitalisierung von Objekten, zur Messung großer Bauteile in der Qualitätssicherung, zur Kalibrierung von Werkzeugmaschinen und in der Geodäsie verwendet.

Messprinzip: Zur Messung baut der Techniker zunächst einen Lasertracker auf einem Stativ mit freier Sicht auf das Messobjekt auf. Der Techniker entfernt ein Ziel von der Basis des Lasertrackers und trägt es zu dem zu messenden Objekt, wobei er sich gleichmäßig bewegt, damit der Lasertracker der Bewegung des Ziels folgen kann. Der Techniker platziert das Ziel gegen das Objekt und löst Messungen aus, die an ausgewählten Punkten vorgenommen werden sollen, manchmal durch ein Fernsteuergerät. Messungen können in verschiedene Arten von Software importiert werden, um die Punkte zu zeichnen oder die Abweichung von der korrekten Position zu berechnen. Die Ziele werden als „retroreflektierend“ bezeichnet, da sie den Laserstrahl in dieselbe Richtung zurückwerfen, aus der er gekommen.

Vorteile: extrem genau;

Nachteile: erforderliche direkte Sichtverbindung; teuer; bietet nur eine relative Positionierung; aufwändiges Verfahren; kann nicht für die Objektverfolgung in Echtzeit verwendet werden.

Beispiele: API, FARO, Leica

3.1.18 LoRa (long range)

Beschreibung: LoRa (von „Long Range“) ist eine physikalische proprietäre Funkkommunikationstechnik. Sie basiert auf Spread-Spectrum-Modulationstechniken, die von der Chirp Spread Spectrum (CSS)-Technologie abgeleitet sind. LoRa wurde von Cycleo entwickelt, einem Unternehmen aus Grenoble, das später von Semtech übernommen wurde. LoRa verwendet in Europa die lizenzfreie Sub-Gigahertz-Funkfrequenzbänder EU868 (863–870/873 MHz).

Messprinzip: RSS; TDOA; Triangulation; Das LoRa-GPS arbeitet, indem es den Geo-Standort des Subjekts empfängt und die Daten in seinem Speicher aufzeichnet. Anschließend übermittelt es die empfangenen Daten über einen sicheren Kanal an ein beliebiges LoRaWAN-Gateway-Gerät in der Nähe. Diese Daten werden dann vom LoRaWAN-Gateway entsprechend an die Cloud-Server gesendet.

Vorteile: große Reichweite; extrem niedriger Energieverbrauch; deckt große Fläche ab

Nachteile: Signaldämpfung und Multipath; lange Reichweite zwischen Server und Gerät; Outdoor-to-Indoor schwierig.

Beispiele: ioTracker; Semtech

3.1.19 Near Field Communication (NFC)

Beschreibung: Ein NFC-Tag kann eine dedizierte Asset-Tracking-Funktion einbetten. Durch die Einrichtung von Kontrollpunkten an verschiedenen Orten auf der ganzen Welt



können Unternehmen den Standort ihrer Waren dank der in das Produkt eingebetteten NFC-Tags und der in ihren Lagern und Büros installierten NFC-Lesegeräte überwachen. NFC-Lesegeräte sind heutzutage beispielsweise in Smartphones und Zahlungsterminals eingebettet, können aber auch in Lagereingänge und Gateways eingebettet werden.

Messprinzip: RSS; Near Field Communication (NFC)-Technologie ist eine drahtlose Konnektivitätstechnologie, die auf Radio Frequency Identification (RFID) basiert und eine kontaktlose Kommunikation zwischen einem NFC-Lesechip und einem NFC-Tag ermöglicht. Das NFC-Lesegerät ist die Hauptsteuerung des Kommunikationssystems, da es die drahtlose Kommunikation initiiert, das NFC-Tag einschaltet und Befehle durch das Magnetfeld an das passive NFC-Tag sendet.

Vorteile: kostengünstig; hohe Genauigkeit; bietet eine sichere und private Navigation; einfache Integration: die kleinsten verfügbaren NFC-Tags sind nur etwa 10 mm breit und können beispielsweise in Produktverpackungen, Kleidung oder Weinflaschen leicht unbemerkt bleiben.

Nachteile: Die Genauigkeit hängt von der Anzahl und der richtigen Platzierung der Tags ab; sehr kleine Reichweite.

Beispiele: TrackMatrix, Centiloc, Torchwood Tech

3.1.20 Optisches IR-Tracking

Beschreibung: Im Raum verorteten IR-Targets werden digitale 3D-Objekte zugeordnet werden, z. B. die Betrachterposition und -orientierung (=Head Tracking), Controller zur Steuerung der Applikation oder auch 3D-Objekte.

Messprinzip: **Outside-In-Tracking:** Der Raum wird mit mindestens zwei IR-Lichtquellen und IR-Kameras erfasst. Die Positionen der 3D-Targets werden räumlich verortet. Die Targets können passiv (etwa Konstellationen aus retroreflektiven Kugeln) oder aktive (Konstellationen aus IR-LEDs) sein. Soll Motion Capturing durchgeführt werden, müssen deutlich mehr als zwei Kameras eingesetzt werden. Die Verortung erfolgt über Bildverarbeitungsalgorithmen, die ggf. ergänzt werden über eine Fortführung des Trackings (Dead Reckoning) mittels SLAM, falls die Sichtverbindung Kamera-Marker (LoS) nicht mehr gegeben ist.

IR-Leuchtf Feuer: Es werden zwei zeitdynamische, senkrecht zueinanderstehende IR-Lichtkegel von zwei raumfesten Positionen aus ausgesandt, die den Raum überstreichen. Die Empfänger (etwa XR Headset, 3D-Controller) registrieren, wann sie von einem IR-Lichtkegel getroffen werden. Damit kann rückgerechnet werden, wo sich die Empfänger relativ zu den IR-Sendern befinden. Die Position der IR-Sender ist bekannt, damit ist als absolutes Tracking möglich.

Vorteile: sehr präzise; sehr schnell; gute Reichweite in Innenräumen; Reichweite kaskadierbar; IR-Leuchtf Feuer kostengünstig.

Nachteile: erforderliche direkte Sichtverbindung; kann leicht durch undurchsichtige Gegenstände blockiert werden; Probleme bei direkter Sonneneinstrahlung;



Outside-In kostenintensiv; mehrere Tracking-Systeme können sich gegenseitig stören (bei den teuren Outside-In-Trackingsystemen können die IR-Blitze verschiedener Trackingsysteme häufig noch voneinander getrennt werden, bei den preisgünstigen IT-Leuchtfedern geht das nicht).

Beispiele: A.R.T, Vicon, NDI, Boulder Innovation, ps-tech, Optitrack, Motion Analysis Corporation, Qualisys, Phase Space, Valve Lighthouse/HTC Vive, Tundra, Valve Index

3.1.21 RFID / Funketiketten

Beschreibung: Radio Frequency Identification (RFID) ist ein allgemeiner Begriff, der verwendet wird, um ein System zu beschreiben, das die Identität eines Objekts oder einer Person drahtlos unter Verwendung von Funkwellen überträgt. Die RFID-Technologie wird am häufigsten verwendet, um Objekte in großen Systemen automatisch zu identifizieren. RFID basiert auf dem Austausch unterschiedlicher Frequenzen von Funksignalen zwischen zwei Hauptkomponenten: RFID-Lesegeräte und RFID-Tags. RFID-Tags senden Funksignale aus, die von RFID-Lesegeräten empfangen werden und umgekehrt. RFID-Tags und -Lesegeräte verwenden vordefinierte Funkfrequenzen und Protokolle, um Daten zwischen ihnen zu senden und zu empfangen. An allen zu verfolgenden Objekten werden RFID-Tags angebracht. Die RFID-Tags bestehen aus einem Mikrochip, der typischerweise bis zu 2 Kilobyte Daten speichern kann, und einer Funkantenne. Es gibt zwei Arten von Tags; aktives Tag und passives Tag. Andererseits besteht ein RFID-Lesegerät aus verschiedenen Komponenten; Antenne, Transceiver, Netzteil, Prozessor und eine Schnittstelle, um sich mit einem Server zu verbinden

Messprinzip: RSS/TOA; DOA/AoA; TDOA; PDOA

Vorteile: kein Kontakt und NLoS-Charakter; gleichzeitiges und schnelles Lesen mehrerer Tags; Widerstandsfähigkeit gegenüber Umweltveränderungen; Sensibilität bezüglich Nutzerorientierung reduzieren, Kosten moderat; hohe Genauigkeit.

Nachteile: benötigt zusätzliche Hardware; Mehrwegeeffekt und Signalfuktuation; großer Fehler mit mehr zu lokalisierenden Ziel-Tags; begrenzte Fähigkeiten der passiven Tags; geringe Reichweite und geringe Abdeckung; unsichere Kommunikation; Tags fehlen Kommunikationsfähigkeiten; Positionsabdeckung ist begrenzt; Zusatzgeräte.

Beispiele: Impinj xArray; Microsoft RADAR, Cricket (MIT); SpotOn (UW)

3.1.22 SigFox

Beschreibung: Sigfox Geolocation ist ein proprietärer Ortungsdienst für alle Geräte, die mit dem einfachsten Sigfox-Modul ausgestattet sind. Sigfox kann einen Standort für alle vorhandenen und zukünftigen Geräte in allen Bereichen bereitstellen, in denen das Netzwerk bereitgestellt wird. Sigfox Geolocation eignet sich für Anwendungsfälle, in denen keine metrische Genauigkeit erforderlich ist. Der Service ist beispielsweise besonders relevant, um bewegliche Artikel durch



komplexe Lieferketten an mehreren Standorten oder während der Lagerung in großen Einrichtungen, Höfen oder Lagern zu verfolgen.

Messprinzip: RSS; der Sigfox-Netzwerkstandort basiert auf einer proprietären probabilistischen Berechnung des wahrscheinlichsten Standorts des Geräts. Dies geschieht dank des Received Signal Strength Indicator (RSSI), der aus den Nachrichten stammt, die von einem Gerät gesendet und von der Sigfox-Infrastruktur empfangen werden. Es ist nicht auf die Ankunftszeitdifferenz (TDOA) oder die Dopplerverschiebung des Signals angewiesen. Für jede von einem Gerät gesendete Nachricht stellt Sigfox Geolocation Echtzeitkoordinaten (Breiten-/Längengrad) und den genauen Standort in km bereit, die über einen Rückruf oder eine Standard-API bereitgestellt werden. Dieser Ansatz ermöglicht, dass die erste Version des Dienstes eine Genauigkeit in km (zwischen 1 km und 10 km für 80 % der Geräte) hat, abhängig von der Basisstationsdichte, an der sich das Gerät befindet. Diese Genauigkeit wird dank maschinellem Lernen durch weitere Versionen verbessert.

Vorteile: Langstrecken; deckt große Fläche ab; bedient große aktive Knoten; sehr niedriger Energieverbrauch; kosteneffizient, resistent gegen Interferenzen.

Nachteile: Betrieb von außen nach innen ggf. schwierig; Signaldämpfung; Das Berechnungsverfahren (unter Verwendung von RSSI und dem Standort empfangender Basisstationen) ermöglicht eine Genauigkeit im Bereich von 1 bis 10 km für mehr als 80 % der Nachrichten, abhängig von der Umgebung und der Basis Stationsdichte im betrachteten Gebiet. Der Zugriff auf den Dienst hängt stark von der Sigfox-Netzabdeckung im jeweiligen Gebiet ab.

Beispiele: SigFox

3.1.23 Strukturiertes Licht

Beschreibung: Ein schnelleres und vielseitigeres Verfahren ist die Projektion von Mustern, die aus vielen Streifen auf einmal oder aus beliebigen Streifen bestehen, da dies die gleichzeitige Erfassung einer Vielzahl von Mustern ermöglicht. Kameras aus verschiedenen Blickwinkeln erfassen das aufgrund der Oberflächenform des Objekts geometrisch verzerrte Muster. Eine typische Messanordnung besteht aus einem Projektor und mindestens einer Kamera. Für viele Anwendungen haben sich zwei Kameras auf gegenüberliegenden Seiten des Projektors bewährt.

Messprinzip: Diese o.a. Verzerrung wird per Bildverarbeitung zur Positionsbestimmung verwendet.

Vorteile: mit entsprechend großen Streifenmustern und Aufbauten können beliebig große Objekte gemessen werden; obwohl bei den meisten Streifenlichtvarianten mehrere Muster pro Bild aufgenommen werden müssen, stehen für eine Reihe von Anwendungen Hochgeschwindigkeitsimplementierungen zur Verfügung, zum Beispiel: Inline-Präzisionsprüfung von Bauteilen während des Produktionsprozesses.



Nachteile: erfordert relevant Rechenleistung; erfordert freie Sicht auf Objekt; wie bei allen optischen Verfahren bereiten reflektierende oder transparente Oberflächen Schwierigkeiten; Doppelreflexionen und Zwischenreflexionen können dazu führen, dass das Streifenmuster mit unerwünschtem Licht überlagert wird, wodurch die Möglichkeit einer ordnungsgemäßen Erkennung vollständig beseitigt wird. Reflektierende Hohlräume und konkave Objekte sind daher schwierig zu handhaben.

Beispiele: Hololens 1, Kinect, GOM Atos

3.1.24 Ultraschall-Tracking

Beschreibung: Beim Ultraschall-Tracking emittiert ein Sender ein Ultraschall-Signal, das von mehreren (mindestens drei) Empfängern, die an verschiedenen Orten positioniert sind, registriert wird.

Messprinzip: Aus den unterschiedlichen Laufzeiten des Signals lässt sich die Position und gegebenenfalls auch die Orientierung des Senders über Triangulation ermitteln.

Vorteile: keine Sichtverbindung (LoS) erforderlich; stört nicht elektromagnetische Wellen; wird nicht durch elektromagnetische Störfelder und metallische Objekte beeinträchtigt; relative einfach zu implementieren; kostengünstig.

Nachteile: anfällig für akustisches Rauschen; kann keine festen Wände durchdringen; Signalverlust aufgrund von Hindernissen; Fehlsignal durch Reflexionen.

Beispiele: Thales Intersense IS-900 ; Hexamite; Telocate Wave; Logitech 6DOF Tracker; TDK Chirp SonicTrack; Active Bat; Sonitor IPS

3.1.25 Ultra-Wide-Band (UWB)

Beschreibung: Die FCC (Federal Communications Commission) definiert Ultrabreitband (UWB) als ein HF-Signal, das einen Teil des Frequenzspektrums belegt, der größer als 20 % der mittleren Trägerfrequenz ist oder eine Bandbreite von mehr als 500 MHz hat. UWB ist ein Kommunikationskanal, der Informationen über einen sehr breiten Teil des Frequenzspektrums verteilt. Dadurch können die UWB-Sender sehr wenig Sendeenergie verbrauchen, während sie große Datenmengen übertragen.

Messprinzip: AoA/ToA; TDOA; RSS/DOA. UWB kann zur Positionierung verwendet werden, indem hauptsächlich die Ankunftszeit (TOA) oder die Ankunftszeitdifferenz (TDOA) der HF-Signale verwendet werden, um die Entfernung zwischen dem Ziel und dem Referenzpunkt zu ermitteln.

Vorteile: hohe Genauigkeit; unbeeinflusst von Störungen; weniger Auswirkungen auf den Menschen; geeignet für körperzentriertes und tragbares Netzwerk.

Nachteile: geringe Reichweite; hohe Kosten; Herausforderungen in NLoS; benötigt zusätzliche Hardware; bietet eine hohe Genauigkeit; Signale können durch große metallische Gegenstände blockiert werden.

Beispiele: Poxyz, Rhode&Schwarz; Kinexon, Polestar, Eliko



3.1.26 VLC Visible Light Communication und LiFi Light Fidelity (definierte Modulation der Beleuchtung)

Beschreibung: Visible Light Communication (VLC) ist eine drahtlose Übertragungstechnologie, bei der sichtbares Licht mit dem Datensignal moduliert wird. Diese Technologie wird auch als Light Fidelity (LiFi) bezeichnet. Lichtmodulation wird allgemein in der optischen Übertragungstechnik und auch in Infrarot-LANs eingesetzt. In beiden Fällen wird nicht sichtbares Licht von Leuchtdioden (LEDs) oder Infrarot-LEDs (IR-LEDs) moduliert. Anders beim VLC-Verfahren, das mit sichtbarem Licht mit Wellenlängen zwischen 375 nm und 780 nm arbeitet: mit Licht von LED-Leuchten.

Messprinzip: Die Indoor-Positionsbestimmung VLC (Visual Light Communication, auch Visible Light Communication) wurde von Philips Lighting zur Marktreife entwickelt. Philips nennt die Ortung über Lichtsignale Indoor Positioning System (IPS) und verwendet LED-Leuchten für die lokale Navigation und Informationsübertragung. Lichtsignale übermitteln für jede Leuchte eine individuelle Codierung, die für die Smartphone-Kamera wahrnehmbar ist, nicht aber für das menschliche Auge. Ähnlich wie bei der GPS-Navigation kann die App aus den empfangenen Signalen der Lichter die aktuelle Position des Smartphones auf 30 Zentimeter genau bestimmen und mit den Zielkoordinaten vergleichen. Es ist keine WLAN- oder Mobilfunkverbindung erforderlich. Damit die Technik zur Navigation genutzt werden kann, muss allerdings eine ständige „Sichtverbindung“ zwischen Handykamera und Lichtquelle bestehen. Der Datenstrom ist auch für reines VLC eine Einbahnstraße. Das bedeutet, dass keine Daten über Kundenbewegungen erhoben werden können.

Vorteile: doppelte Nutzung der Beleuchtungsinfrastruktur; kompatibel mit HF-empfindlichen Bereichen; robuste Übertragung in EMV-sensiblen Umgebungen; großes Übertragungsband; lizenzfrei; sehr geringer Energieverbrauch; sehr genaue Positionierung

Nachteile: bestehende Leuchten sind durch LEDs zu ersetzen (Dual-Use): hohe Kosten; Sichtverbindung zwischen Kommunikationsteilnehmern; Bandbreite bricht bei Sonneneinstrahlung ein; andere künstliche Beleuchtungssysteme erzeugen störendes Licht; Mehrwegeausbreitung durch Reflektionen; über Reflektionen kommt das Licht zeitlich und dämpfungsbehaftet verteilt beim Empfänger an: das verzerrt das Nutzsignal im Nanosekunden-Bereich und setzt die Übertragungsqualität herab.

Beispiele: Bytelight; Ubeacon

3.1.27 WiFi/WLAN

Beschreibung: Drahtloses lokales Netzwerk (WLAN). Der WLAN-Standard IEEE 802.11 wurde im Juni 1997 ratifiziert. Der Standard definiert das Protokoll und die kompatible Verbindung von Datenkommunikationsgeräten über die Luft in einem lokalen Netzwerk (LAN) unter Verwendung des Mediums Carrier Sense Multiple Access Protocol with Collision Avoidance (CSMA/CA). Sharing-Mechanismus.



Mit einer typischen Bruttobitrate von 11, 54 oder 108 Mbit/s und einer Reichweite von 50 bis 100 Metern ist IEEE 802.11 derzeit der dominierende lokale drahtlose Netzwerkstandard. Die Verwendung von WLAN in Indoor-Ortungs- und Navigationssystemen hängt davon ab, dass Sie eine Liste der verfügbaren WLAN-Router kennen ein Bereich, in dem das System betrieben wird. Das beliebteste WLAN-Ortungsverfahren ist RSS (Received Signal Strength), das in 802.11-Netzwerken einfach zu extrahieren ist und auf handelsüblicher WLAN-Hardware ausgeführt werden kann. Die Methoden Time of Arrival (ToA), Time Difference of Arrival (TDoA) und Angle of Arrival (AoA) sind im WLAN aufgrund der Komplexität von Zeitverzögerungs- und Winkelmessungen weniger gebräuchlich. Die Genauigkeit von typisch WLAN-Ortungssysteme mit RSS beträgt etwa 3 bis 30 Meter, mit einer Aktualisierungsrate im Bereich weniger Sekunden.

Messprinzip: **ToF** – Laufzeitmessung;

Received Signal Strength Indicator (RSSI) Multilateration; Pegelmessung: Der WLAN-Empfänger (WLAN-Tracker) empfängt das jeweilige Signal und die übermittelten Parameter (Hardware, Signalstärke, Betriebssystem, Version, etc.). Auf Basis der Parameter Geräte-Kennung (Art der Hardware) kann der WLAN-Tracker die theoretische Signalstärke der Hardware in der Datenbank überprüfen. Auf Basis des Vergleichs von theoretischer und gemessener Signalstärke wird die Distanz vom Empfänger (Radius) bestimmt.

RSS AoA;

RSSI Fingerprinting: Eine weitere Technik zur Indoor-Lokalisierung ist das sogenannte WLAN-Fingerprinting. Die Idee ist, die Position anhand eines gewissen Musters der ausgesandten Funkwellen mehrerer WLAN-Access-Points zu bestimmen. Bevor man ein solches System verwenden kann, muss es also in einer „Offline-Phase“ kalibriert werden, d.h. man muss die auftretenden Muster an definierten Orten messen und in einer Tabelle ablegen. Wenn nun in der „Online-Phase“ ein bestimmtes Muster gemessen wird, kann man in der Tabelle nachlesen, an welcher Stelle man sich nun befindet. Für das Fingerprinting gibt es drei verschiedene Betriebsmodi: terminalunterstützt, terminalbasiert und netzwerkbasierter. Beim terminalunterstützten Verfahren werden die Messungen am Terminal (dem zu lokalisierenden Gerät) durchgeführt, an den Server weitergeleitet und dort ausgewertet. Die eigentliche Positionsbestimmung findet also am Server statt. Im terminalbasierten Modus hingegen werden sowohl Messung als auch Auswertung (Interpretation) der Daten im Terminal vorgenommen. Der netzwerkbasierte Ansatz funktioniert umgekehrt, hier werden die Beacons, die vom Terminal ausgesandt werden, von den verschiedenen Access-Points empfangen und von einem zentralen Server auf ihre Signalstärke o.Ä. hin untersucht – daraus wird letztendlich die Position des Terminals berechnet.

Vorteile: moderate Leistungsverbrauch; keine zusätzliche Hardware; einfache Bereitstellung; große Regionen abdeckbar; vorhandene Infrastruktur wiederverwendbar;



niedrige Infrastrukturkosten; Fingerprinting-Verfahren werden momentan verstärkt eingesetzt, da sie ein relativ einfach zu implementierendes Verfahren sind, das auf meist bereit vorhandener Infrastruktur aufsetzt (WLAN-Access-Points).

Nachteile: Beeinflusst zeitvariable RSS; Genauigkeit abhängig von der Anzahl der Zugangspunkte; Neuberechnung der Fingerabdruckkarte; mobile Endgeräte sind nicht immer in Sichtverbindung positioniert; damit Lampen als optischer Access Point dienen können, benötigen sie eine Datenzuführung über ein Kabel. Denkbar wäre hier die gleichzeitige Energieversorgung über Power-over-Ethernet; damit die Datenübertragung funktioniert, muss das Licht dauerhaft angeschaltet bleiben; Fingerprinting: Ein nicht zu unterschätzender Nachteil ist die aufwändige Offline-Phase, in der je nach gewünschter Genauigkeit sehr viele Positionsmessungen durchgeführt werden müssen. Ein weiterer Nachteil ist, dass bei einer Messung nicht einmal zwingend der richtige Raum vorhergesagt werden kann. Wenn sich die Person nahe der Wand aufhält und die Wellenmuster auf beiden Seiten der Wand ähnlich sind, könnte versehentlich die Person auf der falschen Seite vermutet werden – was in den meisten Fällen zu einem nicht-akzeptablen Ortungsergebnis führt.

Beispiele: handelsbliche Smartphones

3.1.28 Zigbee

Beschreibung: Der ZigBee-Standard bietet Netzwerk-, Sicherheits- und Anwendungsunterstützungsdienste, die auf der Grundlage der IEEE-802.15.4-Spezifikation arbeiten. Ein einfacher ZigBee-Knoten ist sehr klein, hat eine geringe Komplexität und geringe Kosten. Es besteht aus einem Mehrkanal-Funkgerät und einem Mikrocontroller. Zigbee ist für Anwendungen konzipiert, die einen geringen Stromverbrauch und einen geringen Datendurchsatz erfordern. Diese Technologie erreicht die Positionierung durch Koordination und Kommunikation mit benachbarten Knoten. Es gibt zwei unterschiedliche physische Gerätetypen, die für ZigBee-Knoten verwendet werden: Full Function Device (FFD) und Reduced Function Device (RFD).

Messprinzip: RSS/ToA; TDOA/AoA; Unterform der Low Power Wide Area Networks (LoPWAN/LoRa) in den Frequenzen 868/915 MHz und 2.4 GHz.

Vorteile: niedrige Leistungsaufnahme; keine große Netzwerkbandbreite erforderlich; niedrige Infrastrukturkosten; kurze Zeitverzögerung; hohe Sicherheit

Nachteile: geringe Reichweite; geringe Geschwindigkeit; benötigt zusätzliche Hardware; Interferenz und Stärke von Signalen; Verbindung mit Smartphone ggf. schwierig.

Beispiele: Jennic, Texas Instruments

3.2 Vergleich der Tracking-Technologien

Die im vorherigen Abschnitt portraitierten Trackingtechnologien werden in der Folge kurz einander gegenübergestellt. Den Erstellern dieses Dokuments ist bewusst, dass die Eigenschaften eines Trackingsystems nicht alleine von der Technologie abhängen, sondern auch von der Implementierung (z.B. Anzahl der Sender, Kameras, etc.). Daher sind die in der Tabelle getroffenen Aussagen lediglich als grobe Richtschnur zu verstehen.

Folgende Eigenschaften werden schematisch eingeordnet:

- Messprinzip
- Freiheitsgrade
- Absolut versus relativ
- Reichweite
- Präzision
- Antwortzeit,
- Energieverbrauch
- Kosten
- Beispiel / Lösung

Die gewählten Piktogramme für die Eigenschaften „Reichweite“, „Präzision“, „System- und Betriebskosten“ sowie „Energieverbrauch“ sind in der rechten Abbildung erläutert.

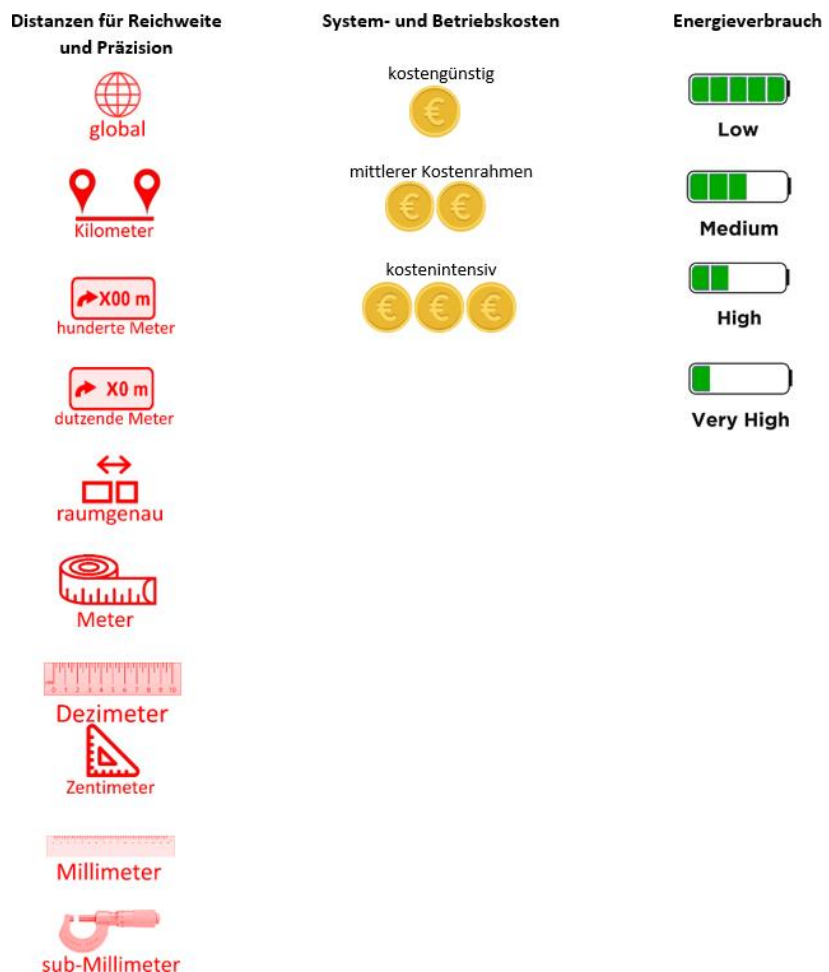


Abbildung 2: Legende von Vergleichsgrößen

#	Technologien	Messprinzip	DOF	absolut vs. relativ	Reichweite	Präzision	Antwortzeit, Abstrakte / Messfrequenz	Energieverbrauch	Kosten	Beispiel / Lösungen / Produkte	
1	GNSS / Satellitenortung	ToA	3D	absolut	global		10-60 sec	Very High	€€	GPS, Galileo, GLONASS, BeiDou, Google Maps, Baidu Maps	
2	GSM-/Mobilfunk-basierte Ortung,	Cell-ID	2D	absolut	global		wenige Hz	High	€	Google Maps (RSS)	
		TOA, TDOA, U-TDOA EOTD LTE Sidelink	3D	absolut absolut relativ							
3	Erdmagnetfeldmessung	Fingerprinting	3D	absolut	global		< 1ms	Medium	€	Fujitsu, Sony, Bosch Sensortec, GIPStech,	
4	LoRa	RSS; TOA; TDOA; Triangulation	3D	absolut	Komplex		< 1ms	Low	€	ioTracker; Semtech	
5	Chirp Spread Spectrum / Zirpenfrequenzspreizung	DSSS; FHSS; AFHSS; THSS	3D	absolut			< 1ms	Low	€	Inpixon	
		ToA; TDOA; RSS/DOA AoA	2D 3D	absolut			< 1ms	High	€€	Poxyz, Rhode&Schwarz; Kinexon, Polestar, Eilko	
7	RFID / Funketiketten	RSS/TOA; DOA/AoA; TDOA; PDOA	2D	absolut			10-30 sec	Low	€€	Impinj xArray; RADAR (Microsoft), Cricket (MIT); SpotOn (UW)	
8	Bluetooth	AoA; TOF; TDOA, RSS/TOA	3D	absolut			10-30 sec	Medium	€	Samsung Galaxy SmartTag und SmartTag+, Apple AirTag, Tile Pro	
		RSS; RSSI	3D	absolut			3-5 sec	Low	€€	Apple iBeacons, diverse; Juniper	
9	Bluetooth-Low-Energy	AoA	3D	absolut	optimal: 0-25 m; bis zu 300m		3-5 sec	Low	€€	Moko Smart, KKM, BlueCats, BlueSense, Estimote, Gelo, Gimbal	
		RSS/ToA; TDOA/AoA; LoPWAN/LoRa	3D	absolut			3-5 sec	Low	€	Best Beacon Match	
11	Visible Light Communication (VLC) und Light Fidelity (LIFI)	RSS	2D						€€	Bytelight; Ubeacon	
		TDOA/TOA	2D	absolut			< 1 sec	Medium	€€		
		AoA	3D								
12	WiFi/WLAN-Tracking	ToF		absolut			< 1ms		€€	Ekahau, Inpixon, SigFox, Nibble, Wayes; Smartphones der Hersteller Xiaomi, LG, Samsung und Google	
		RSSI Multilateration; Pegelmessung									
		RSS AoA		absolut							
		TDOA/TOA		absolut	optimal: 0-50 m bis zu 500m			3-5 sec	High	€€€	(niedrig mit bestehenden Access Points)
		RTT/CSI									

Abbildung 3: Positionierungstechnologien: Vergleich (Teil 1)



#	Technologien	Messprinzip	DOF	absolut vs. relativ	Reichweite	Präzision	Antwortzeit, Abtastrate / Messfrequenz	Energieverbrauch	Kosten	Beispiel / Lösungen / Produkte
13	Near Field Communication	RSS; NFC; Unique Identifier (UID)	3D	absolut			< 1 sec	Low	€	TrackMatrix, Centiloc, Torchwood Tech
14	SigFox	RSS; TOA	2D	absolut			10-30 sec	Low	€	SigFox
15	Active Badge (IR)	regelmäßiges Aussenden eines IR-Lichtimpulses	2D	absolut			10-30 sec	Low	€	wird nicht kommerziell hergestellt
16	Inertialmessenheit / Trägheitsnavigationssystem	mechanische Kreisel/Gyros; Kombination von 3 Beschleunigungssensoren und 3 Drehratensensoren; IMU Typ I: Beschleunigungsmesser und Gyroskope; IMU Typ II: zusätzlich Magnetometer		relativ			bis zu 1.000 Hz	Medium	€	9DOF-IMUs; Thales Intersense, XSens
17	optisches 2D-Scannen: NFT natural feature tracking / Photogrammetrie	2D-Aufnahme des Raums und Vergleich mit Referenz		absolut			einige Hz	High	€	Quest II, visionLib, Thales Intersense IS-1500 und IS-1200
18	Ultraschall	ToA		absolut			einige hundert Hz	High	€	Thales Intersense IS-900; Hexamitte; Telocate Wave; Logitech 6DOF
19	optisches IR-Tracking	optische Triangulation aktiver oder passiver IR-Marker		absolut			einige hundert Hz	Very High	€	ART, Vicon, NDI, Boulder Innovation, ps-tech, Optitrack, Motion Analysis
20	elektromagnetisches Tracking	IR-Leuchfeuer, moduliert/Lichtmodulation		absolut			einige hundert Hz	Very High	€	Valve Lighthouse/HTC Vive, Tundra, Valve Index
21	LASER-Tracker	Messung Feldstärke und -richtung; Fingerprinting	6D	absolut			einige hundert Hz	Very High	€	NDI Aurora, Polhemus, Pico Neo 2 Controller
22	optisches 3D-Scannen: natural feature tracking	Interferometrie		relativ			bis zu 1.000 Hz	Very High	€	API, FARO, Leica
23	markerbasiertes Tracking auf Basis von Codes (z.B. DotMatrix Codes) und Kameras	3D-Aufnahme des Raums (z.B. RGB-D-Kamera) und Vergleich mit Referenz LiDAR: Funktionsweise wie Radar, aber LASER anstelle Radiowellen		absolut			einige Hz	Very High	€	Hololens 2, BECOM Systems Argos 3D, ASUS Xtion Pro Live, Google iPhone 12 Pro und Tablet iPad Pro 2020
24	Structured Light	Interpretation Verzerrungen Streifenmuster durch Bildverarbeitung		absolut			einige Hz	Very High	€	ARCore, ARKit, ehemals: Vuforia; SkyTrax, StarGazer
25	dead reckoning	2D-Aufnahme eines Markers und Vergleich mit Referenz (hinterlegter Größenangabe)		absolut			bis zu 1.000 Hz	Very High	€	Hololens 1, Kinect, GOM Atos
26	(elektro-)mechanische Systeme: Potentiometer, Rotationsencoder, Dehnungstreifen	Weiterführung Tracking bei Signalverlust mittels Prognose und alternativer Sensorik, z.B. SLAM Umrechnung elektrisches Sensorsignal in Distanz- oder Winkelmaße	∞	relativ			je nach Sensorik (s.o.)	High	€	SLAM beschreibt grundlegende mathematische Verfahren wie appearance-based topological / hybrid topological metric / probabilistic appearance-based / Faro, Haption, Manus, Senseglove

Abbildung 4: Positionierungstechnologien: Vergleich (Teil 2)



3.3 Normen und Standards zum Vergleich von XR-Trackingverfahren

Eine anerkannte Bewertung von Trackingtechnologien sollte auch anerkannte Verfahren zur Beurteilung berücksichtigen. Diese finden sich teils im bestehenden Normenwerk. Wir haben daher ebenso Normen und Standards recherchiert, die für die Beurteilung der Qualität von Trackingsystemen zu Rate zu ziehen sind. Folgende Dokumente konnten als wahrscheinlich relevant identifiziert werden:

- Benchmarking of vision-based spatial registration and tracking methods for mixed and augmented reality, erstellt durch die ISO [02]
- Electronic displays: Measurement methods of specific functions with sensors for eyewear display, erstellt durch das IEC [03]
- Eyewear display – Measurement methods of specific functions with sensors for eyewear display, erstellt durch das IEC [04]
- Measurement methods of motion-tracking image-control response time for interactive projection display, erstellt durch das IEC [05]
- Tragbare elektronische Geräte und Technologien - Teil 402-1: Produkte und Systeme - Zubehör - Prüf- und Bewertungsverfahren für handschuhartige Bewegungssensoren zur Messung der Fingerbewegungen, erstellt durch das IEC [06]

4. Erfassung & Mapping

Die Erfassung der Realumgebung und das Mapping, also das Inbezugsetzen von Realität und digitaler 3D-Welt, sind wichtige methodische und technische Komponenten, die für Augmented Reality im Allgemeinen und die Inspirer-Anwendungen im Speziellen von Bedeutung sind.

4.1 Google GeoSpatial API

Mit der ARCore Geospatial API kann man Inhalte aus der Ferne an jeden von Google Street View abgedeckten Bereich anhängen und so AR-Erlebnisse auf der ganzen Welt schaffen. Anhand der Gerätesensor- und GPS-Daten wird die Umgebung des Geräts erkannt. Anschließend werden die erkennbaren Teile dieser Umgebung einem Lokalisierungsmodell des Google-Systems für visuelle Positionierung zugeordnet, um den genauen Standort des Geräts zu ermitteln. Die API übernimmt außerdem die Zusammenführung der lokalen Koordinaten des Nutzers mit den geografischen Koordinaten aus VPS, damit Sie in einem einzigen Koordinatensystem arbeiten können. Street View-Bilder aus Google Maps, die seit über 15 Jahren weltweit aufgenommen wurden, bilden die Grundlage von VPS. Neuronale Deep-Learning-Netzwerke identifizieren und beschreiben Teile der Bilder, die mit hoher Wahrscheinlichkeit über einen längeren Zeitraum erkennbar sind. Diese Teile werden dann über mehrere Milliarden Bilder kombiniert, um eine 3D-Punkt-Cloud der globalen Umgebung zu berechnen. Dieses Lokalisierungsmodell besteht aus Billionen Punkten und deckt nahezu alle Länder ab. Wenn das Gerät des Nutzers eine Anfrage an die Geospatial API sendet, verarbeitet ein neuronales Netzwerk die Pixel, um erkennbare Teile der Umgebung des Nutzers zu finden, und gleicht sie mit dem VPS-Lokalisierungsmodell ab. Die Algorithmen für maschinelles Sehen berechnen dann die Position und Ausrichtung des Geräts und bieten so einen weitaus genaueren Standort als früher mit GPS allein.

Die Geospatial API bietet die horizontalen (Breitengrad und Längengrad) und vertikalen (Höhen) Positionen gemäß der WGS84-Spezifikation. Man kann einen raumbezogenen Anker fast überall auf der Welt an einem bestimmten Breiten-, Längengrad- und Höhenpunkt platzieren, ohne den Ort manuell kartografieren zu müssen. Ein Anker im Gelände ist eine Art raumbezogener Anker, mit dem Sie AR-Objekte nur mit Längen-



und Breitengrad platzieren können. Dabei werden Informationen aus Google Maps dazu verwendet, die genaue Höhe über dem Boden zu ermitteln.

<https://developers.google.com/ar/develop/geospatial>

4.2 Microsoft Azure Anchors

Azure Spatial Anchors ist ein verwalteter Cloud-Dienst und eine Entwicklerplattform, die räumlich bewusste Mixed-Reality-Erlebnisse für mehrere Benutzer auf HoloLens-, iOS- und Android-Geräten ermöglicht. Azure Spatial Anchors bietet Entwicklern wichtige Funktionen für die Erstellung von raumbezogenen Mixed-Reality-Anwendungen. Diese Anwendungen können Microsoft HoloLens, iOS-basierte Geräte, die ARKit unterstützen, und Android-basierte Geräte, die ARCore unterstützen, unterstützen. Azure Spatial Anchors ermöglicht es Entwicklern, mit Mixed-Reality-Plattformen zu arbeiten, um Räume wahrzunehmen, präzise Points of Interest zu bestimmen und diese Points of Interest von unterstützten Geräten abzurufen. Diese präzisen Punkte von Interesse werden als Spatial Anchors bezeichnet. Mit einer App kann ein Benutzer einen virtuellen Kalender an der Wand eines Konferenzraums platzieren, den die Teilnehmer über eine Telefon-App oder ein HoloLens-Gerät sehen können (Persistieren virtueller Inhalte in der realen Welt.). In einem industriellen Umfeld könnte ein Benutzer kontextbezogene Informationen über eine Maschine erhalten, indem er die Kamera eines unterstützten Geräts auf diese richtet. Azure Spatial Anchors besteht aus einem verwalteten Dienst und Client-SDKs für unterstützte Geräteplattformen.

URL: <https://azure.microsoft.com/de-de/products/spatial-anchors>

4.3 Mapstar

Mapstar ist ein kartenbasiertes XR-Metaversum für die physische Welt, in welchem man Extended Reality (XR)-Karten erstellen, bearbeiten, besitzen, tauschen und teilen, zusammenarbeiten oder die 3D-Welten anderer erkunden kann. Die Point-and-Scan-Technologie von Mapstar ermöglicht das Mapping und die Umwandlung realer 3D-Daten. Mit den Mapping-Funktionen von Mapstar kann man so die reale Welt um sich herum erfassen und Extended Reality-Karten erstellen. Diese VR-Landschaften kann man mit anderen teilen. Diesem XR-Universum können digitale Assets wie Texte, Links, Videos oder Ihre individuellen 3D-Modelle hinzugefügt werden. In folgenden vier Schritten werden mit dem Smartphone XR-Karten erstellt, die in der physischen Welt, im Web oder in der Virtuellen Realität erlebbar sind: [1] Umgebungserfassung per App und Kamera; [2] Karte bearbeiten und kommentieren(interessante Punkte in der XR-Karte mit Anmerkungen versehen, Ihre eigenen 3D-Modelle hochladen, YouTube-Videos hinzufügen, Text einfügen etc.) [3] Umgebung entdecken: Standort der physischen Welt entdecken mit nutzergenerierten Inhalten in Augmented Reality; [4] Kollaboration in 3D: Umgebung teilen bw. andere geteilte Umgebungen erleben.

URL: <https://www.mapstar.io/>

4.4 bitstars/HoloBuilder

HoloBuilder ist eine Plattform, die es verschiedenen Stakeholdern (Betrieb, Finanzen, Sicherheit, Eigentümer, Architekten, Handelspartner, Inspektoren und Investoren) ermöglicht, Fernzugriff auf Baustellen zu erhalten und alle Details des aktuellen und historischen Fortschritts in 360° zu sehen. Die JobWalk-App von HoloBuilder führt dabei durch den Prozess der Erfassung von 360°- und 2D-Fotos, die automatisch nach Projekt, Grundriss und Datum/Uhrzeit organisiert werden. Die HoloBuilder-Plattform basiert auf drei Arbeitsschritten: Fortschrittserfassung, Fortschrittsanzeige und Fortschrittskontrolle. 360°-Fotos können mit BIM-Modellen verglichen werden, sowie mit historischen Fotos und Projektplänen, um sicherzustellen, dass der Projektfortschritt wie geplant verläuft. Der Nutzer kann die Aufnahmen markieren, kommentieren und



kennzeichnen. HoloBuilder verfügt über eine zentrale Datenhaltung, über die Dokumente geteilt werden können: relevanten Dokumente und digitalen Assets werden in einem organisierten digitalen Fortschrittsprotokoll gespeichert. HoloBuilder verwendet bitstarts-Technologie, einer Punktwolkenerstellung per Smartphones mittels Photogrammetrie.

URL: <https://www.holobuilder.com/>

4.5 inCITU

inCitu kartiert die zukünftige bebaute Umwelt in Augmented Reality, um so zukünftige Städte zum Leben zu erwecken. inCitu nimmt dazu Informationen über geplante und bevorstehende Bauvorhaben aus privaten und öffentlich zugänglichen Quellen auf und verwandelt die Daten in eine greifbare 3D-Visualisierung, die in Augmented Reality auf den zukünftigen Bauplatz im realen Maßstab verknüpft (geofenced) ist. Zielsetzung ist es, die Stadtentwicklung zu demokratisieren, indem Anreize für die Beteiligung der Gemeinschaft durch immersive Erfahrungen geschaffen werden. inCitu's Visualisierungen ermöglichen es Anwohnern, Entwicklern und Stadtverwaltungen, ihre Gemeinden gemeinsam und inklusiv zu gestalten.

URL: <https://www.incitu.us>

4.6 wintor

Wintor ist ein standortbasierter Augmented Reality Creator. Mit dem Smartphone wird die Realumgebung gescannt, um so Ankerpunkte für die Platzierung digitaler 3D-Inhalte zu erhalten. Die wintor-Plattform kombiniert in der Cloud gespeicherten Medien mit einem visuellen Positionierungssystem (VPS) und GPS. Auch Inhalte in Innenräumen können platziert und gespeichert werden. Mit der No-code AR-Plattform von Wintor kann man relativ einfach digitale Führungen erstellen; Wintor unterstützt virtuelle Führer, Videos, 3D-Modelle, Bilder, Text, 360-Portale, Audio und mehr. Die Navigationselemente werden automatisch erstellt, um die Besucher zu führen. Der zugehörige Content-Manager läuft auf einem Desktop-Rechner und kann über einen Browser aufgerufen werden.

URL: <https://www.wintor.com>



5. Glossar

2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
Active RFID	Active radio frequency identification
Active RFID-IR	Active radio frequency identification - infrared hybrid
A FHSS	Adaptive Frequency Hopping Spread Spectrum
AoA	Angle of arrival
AoD	Angle of departure
CDT	Cross-device tracking
CSI	channel-state information
CSMA/CA	multiple access protocol with collision avoidance
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
EOTD	Enhanced Observed Time Difference
FFD	Full Function Device
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum
IR	Infrared
LFSI	Low-frequency signpost identification
LM	light modulation; Lichtmodulation
LoS	Line of sight
LOS	line-of-sight
NFER	Near-field electromagnetic ranging
NFT	natural feature tracking
NLOS	non-line-of-sight
OL	Optical locating
Passive RFID	Passive RFID RTLS locating via steerable phased array antennae
PDOA	phase difference of arrival
PDR	Pedestrian Dead Reckoning
POA	phase of arrival
RB	Radio beacon
RCDN	RTT compensation distance network
RFD	Reduced Function Device
RPN	region proposal network
RSRP	Reference Signals Received Power
RSRQ	Reference Signal Received Quality
RSS	received signal strength
RSSI	received signal strength indicator
RTLS	Real-Time-Locating-System
RTOF	round trip time of flight
RTT	Wi-Fi round-trip timing
SDS-TWR	Symmetrical double-sided two-way ranging
semi-active RFID	Semi-active radio frequency identification
SLAM	Simultaneous Localisation and Mapping
TA	Timing Advance



TDoA	Multilateration (Time difference of arrival)
THSS	Time Hopping Spread Spectrum
ToA	Time of arrival
ToF	Time of flight
TWR	Two-way ranging according to Nanotron's patents
US-ID	Ultrasound Identification
US-RTLS	Ultrasonic ranging
U-TDOA	Uplink Time Difference of Arrival
UWB	Ultra-wideband
VIO	visuell-inertial orientation
VIO	visuell-inertial orientation
WLAN, Wi-Fi	Wireless local area network
WONB	Wide-over-narrow band

6. Quellen und weiterführende Literatur

- [01] Milgram, Paul; H. Takemura; A. Utsumi; F. Kishino (1994). "Augmented Reality: A class of displays on the reality-virtuality continuum". Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering Vol. 2351
- [02] xInternational Organization for Standardization (ISO), „Benchmarking of vision-based spatial registration and tracking methods for mixed and augmented reality (MAR)“, Nr. 18520. ISO, Genf, Schweiz, 1. Januar 2019. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.iso.org/standard/66281.html>
- [03] International Electrotechnical Commission (IEC), „Electronic displays: Measurement methods of specific functions with sensors for eyewear display“, Nr. PWI 110-38. IEC oder VDE-Verlag, London, UK, November 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.iec.ch/dyn/www/f?p=103:38:410177659173670:::FSP_ORG_ID,FSP_APEX_PAG E,FSP_PROJECT_ID:1313,23,102669
- [04] International Electrotechnical Commission (IEC), „Eyewear display – Measurement methods of specific functions with sensors for eyewear display“, Nr. 63145–40. IEC oder VDE-Verlag, London, UK. [Online]. Verfügbar unter: https://www.iec.ch/dyn/www/f?p=103:38:9300628085515:::FSP_ORG_ID,FSP_APEX_PAGE, FSP_PROJECT_ID:1313,23,102669
- [05] International Electrotechnical Commission (IEC), „Measurement methods of motion-tracking image-control response time for interactive projection display: PNW 110-1467 ED1: Future IEC 62908-42-10“, Nr. 62908-42–10. IEC oder VDE-Verlag, London, UK, 30. November 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.iec.ch/ords/f?p=103:38:16173973914150:::FSP_ORG_ID,FSP_APEX_PAGE,FSP_ PROJECT_ID:1313,23,107475
- [06] International Electrotechnical Commission (IEC), „Tragbare elektronische Geräte und Technologien - Teil 402-1: Produkte und Systeme - Zubehör - Prüf- und Bewertungsverfahren für handschuhartige Bewegungssensoren zur Messung der Fingerbewegungen“, Nr. 63203-402–1. IEC oder VDE-Verlag, London, UK, 4. November 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://webstore.iec.ch/publication/62633>



7. Impressum

Verantwortlich für die Inhalte dieser Publikation ist das Virtual Dimension Center (VDC) Fellbach. Die Inhalte wurden mit größter Sorgfalt erstellt. Für die Richtigkeit, Vollständigkeit und Aktualität der Inhalte kann jedoch keinerlei Gewähr übernommen werden. Die Inhalte unterliegen dem deutschen Urheberrecht. Die Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und jede Art der Verwertung außerhalb der Grenzen des Urheberrechts bedürfen der schriftlichen Zustimmung des Erstellers.

Verantwortlich für den Inhalt:

Die Übersetzung der englischen Texte erfolgte zum Großteil mittels Google Translate und DeepL.

Virtual Dimension Center (VDC) Fellbach
Kompetenzzentrum für Virtuelle Realität und kooperatives Engineering w.V.
Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Christoph Runde
Auberlenstr. 13
70736 Fellbach
URL: www.vdc-fellbach.de

Kontakt:

Tel.: +49(0)711 58 53 09-0
Fax : +49(0)711 58 53 09-19
Email: info@vdc-fellbach.de

8. Förderhinweis

Das Projekt „Inspirer“ wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 16SV8746 gefördert.