

Technologien zur Indoor-Lokalisierung im Krankenhaus

Masterarbeit zur Erlangung des akademischen Grades Master of Science – Wirtschaftsinformatik

Felix Kirchgeorg

*Eingereicht im Februar 2020
In Kooperation mit der visgato GmbH*

Abstract

Diese Masterarbeit beschäftigt sich mit den spezifischen Herausforderungen von Krankenhäusern in Deutschland und der Notwendigkeit, die Chancen der Digitalisierung und des Internets der Dinge für die zukünftige Nutzung zu erörtern, um eine hohe Versorgungsqualität zu vertretbaren Kosten zu gewährleisten. Im Mittelpunkt dieser Untersuchung stehen Technologien zur Indoor-Lokalisierung für Krankenhäuser. Vor dem Hintergrund krankenhausspezifischer Herausforderungen wird der Status des Einsatzes dieser Technologien in Krankenhäusern erörtert. Dabei wird deutlich, dass sich der Einsatz entsprechender Technologien für diese Anwendungsfälle erst in den Anfängen befindet. Somit erlangen Entscheidungen zur Auswahl von Technologien zur Indoor-Lokalisierung für das Krankenhausmanagement zukünftig eine zunehmende Relevanz. Vor diesem Hintergrund wird in der Masterarbeit anhand der Systematisierung und Operationalisierung von Bewertungskriterien ein spezielles Entscheidungsmodell zur Auswahl von Indoor-Lokalisierungstechnologien entwickelt. Dieses ermöglicht die systematische Auswahl einer geeigneten Technologie und die beschleunigte Implementierung eines Indoor-Lokalisierungssystems.

Keywords

Krankenhaus 4.0 • Indoor-Lokalisierung • Entscheidungsheuristik • Krankenhausmanagement • Digitalisierung • Versorgungsforschung

Gliederung

1	Einleitung	51
1.1	Ausgangssituation	51
1.2	Problemstellung	53
1.3	Zielstellung	54
1.4	Methodik	54
1.5	Aufbau der Arbeit	55
2	Krankenhäuser in Deutschland	57
2.1	Definition, Arten und Aufgaben	57
2.2	Deskriptive Statistik	58
2.3	Aktuelle Probleme und Herausforderungen	59
2.4	Stand der Digitalisierung und internationaler Vergleich	61
2.5	Krankenhauspezifische Einsatzmöglichkeiten von Indoor-Lokalisierung	65
3	Internet der Dinge	69
3.1	Definition und Entstehung	69
3.2	Entwicklung	70
3.3	Referenzarchitektur	72
3.4	Funktechnologien	75
3.5	Anwendungsbereiche im Krankenhaus	78
4	Verfahren und Messprinzipien der Indoor-Lokalisierung	80
4.1	Definitionen	81
4.2	Verfahren der Positionsbestimmung	82
4.2.1	Lateration und Angulation	83
4.2.2	Näherungsmessung (Proximity Detection)	84
4.2.3	Szenenanalyse (Fingerprinting)	84
4.3	Messprinzipien der funkwellenbasierten Lokalisierung	85
4.3.1	Messung der Signalstärke (Received Signal Strength Indication)	85
4.3.2	Messung der Ankunftszeit (Time of Arrival)	85
4.3.3	Messung der Laufzeitdifferenz (Time Difference of Arrival)	86
4.3.4	Messung des Eingangswinkels (AoA)	86
4.4	Weitere Verfahren zur Indoor-Lokalisierung	86
4.5	Weitere Aspekte von Verfahren zur Indoor-Lokalisierung	87
5	Technologien und Bewertungskriterien zur funkwellenbasierten Indoor-Lokalisierung	91
5.1	Technologien zur funkwellenbasierten Indoor-Lokalisierung	91

5.1.1	Wireless Local Area Network	91
5.1.2	Bluetooth / Bluetooth Low Energy.....	92
5.1.3	Ultra Wide Band	95
5.1.4	Radio Frequency Identification	96
5.1.5	Zusammenfassung von Vor- und Nachteilen	96
5.2	Bewertungs- und Abgrenzungskriterien für den Vergleich.....	98
5.2.1	Genauigkeit	98
5.2.2	Reichweite	98
5.2.3	Skalierbarkeit.....	98
5.2.4	Latenz	98
5.2.5	Kompatibilität.....	99
5.2.6	Störanfälligkeit	99
5.2.7	Energieeffizienz	99
5.2.8	Integration.....	99
5.2.9	Kosten.....	100
6	Vorstellung und Anwendung des heuristischen Entscheidungsverfahrens.....	101
6.1	Allgemeines heuristische Entscheidungsverfahren.....	101
6.1.1	Verifizierung des entdeckten Entscheidungsproblems.....	103
6.1.2	Problemanalyse	103
6.1.3	Erarbeitung von Lösungsvarianten.....	104
6.1.4	Festlegung der Entscheidungskriterien	105
6.1.5	Optional Festlegung von Umfeldszenarien	105
6.1.6	Ermittlung der Konsequenzen der Varianten.....	105
6.1.7	Gesamtbeurteilung der Varianten und Entscheidung.....	106
6.2	Krankenhausspezifische Anwendung der Entscheidungsheuristik	106
6.2.1	Kennzeichnung der einzelnen Stufen der Entscheidungsheuristik	106
6.2.2	Abgeleitete Entscheidungsmatrix	108
6.2.3	Gesamtbeurteilung der Technologieoptionen und Entscheidung	110
7	Zusammenfassung	111
7.1	Ergebnisse der Arbeit	111
7.2	Kritische Würdigung und Ausblick auf weitere Forschungsfragen	113

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Versorgungssituation in dt. Krankenhäusern.....	58
Abbildung 2: Entwicklung der Anzahl/Trägerschaft von Krankenhäusern.....	59
Abbildung 3: Herausforderungen an das Krankenhausmanagement	60
Abbildung 4: Erwartungen an die Digitalisierung im Krankenhaus	62
Abbildung 5: Verbreitung von stationären und mobilen Endgeräten	64
Abbildung 6: Entwicklung des Internet der Dinge	70
Abbildung 7: Entwicklung der Höhe des Breitbandvolumen in Festnetzen in Deutschland von 2001 bis 2019.....	71
Abbildung 8: Referenzarchitektur des Internet der Dinge	72
Abbildung 9: Technologien für den Aufbau von IoT-Systemen	74
Abbildung 10: Vergleich der Datenrate und Reichweite von unterschiedlichen Funktechnologien....	77
Abbildung 11: Anforderungen an industrielle Kommunikation.....	78
Abbildung 12: Einordnung der Verfahren zur Indoor-Lokalisierung.....	80
Abbildung 13: Verfahren zur Indoor-Lokalisierung.....	82
Abbildung 14: Clientbasierte Lokalisierung	88
Abbildung 15: Serverbasierte Lokalisierung	88
Abbildung 16: Aufbau einer clientbasierten BLE-Infrastruktur (Einsatz von BLE-Beacons und mobilen Endgeräten)	93
Abbildung 17: Aufbau einer serverbasierten BLE-Infrastruktur	94
Abbildung 18: Untergliederung der Problemanalyse in weitere Teilschritte	104
Abbildung 19: Position der Konsequenzen im Entscheidungsprozess	105
Abbildung 20: Empfohlenes Vorgehensmodell für die Einführung eines IPS.....	113

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Arten von Krankenhäusern in Deutschland.....	58
Tabelle 2:	Wahrnehmung von betriebswirtschaftlichen Chancen durch den Einsatz von Indoor-Lokalisierung	64
Tabelle 3:	Wahrnehmung von betriebswirtschaftlichen Chancen durch den Einsatz von Indoor-Lokalisierung	68
Tabelle 4:	Übersicht von Funktechnologien (Frequenzen, Reichweite, Datenrate, Anwendungen)	76
Tabelle 5:	Lizenzfreie Frequenzbereiche.....	77
Tabelle 6:	Vor- und Nachteile der client- und serverbasierten Lokalisierung.....	89
Tabelle 7:	Vor- und Nachteile von netz- und batteriebetriebenen Systemen	90
Tabelle 8:	Vor- und Nachteile der clientbasierten BLE-Lokalisierung mittels Beacons.....	94
Tabelle 9:	Vor- und Nachteile der serverbasierten BLE-Lokalisierung mittels Gateways	95
Tabelle 10:	Vor- und Nachteile der betrachteten Technologien im Überblick	97
Tabelle 11:	Spezifikation der Entscheidungsstufen des allgemeinen heuristischen Entscheidungsverfahrens.....	108
Tabelle 12:	Bewertungsskala für die betrachteten Entscheidungskriterien	109
Tabelle 13:	Entwickelte Entscheidungsmatrix für die Technologieauswahl	110
Tabelle 14:	Ergebnisse der Literaturrecherche zur dt. Krankenhauslandschaft	121
Tabelle 15:	Ergebnisse der Literaturrecherche zu Verfahren und Technologien der Indoor-Lokalisierung	123
Tabelle 16:	Datenblatt der WLAN-Spezifikation.....	124
Tabelle 17:	Hardwarekomponenten der WLAN-Lokalisierung/-Lokalisierung.....	124
Tabelle 18:	Datenblatt der BT/BLE-Spezifikation/-Lokalisierung	125
Tabelle 19:	Hardwarekomponenten der BT/BLE-Lokalisierung	126
Tabelle 20:	Datenblatt der UWB-Spezifikation / -Lokalisierung.....	127
Tabelle 21:	Hardwarekomponenten der UWB-Lokalisierung	127
Tabelle 22:	Datenblatt der RFID-Spezifikation	128
Tabelle 23:	Hardwarekomponenten der RFID-Lokalisierung	129

Abkürzungsverzeichnis

AoA	Angle of Arrival (Einfallswinkel)
BT	Bluetooth
BLE	Bluetooth Low Energy
CPS	Cyber-physische Systeme
EMRA	Electronic Medical Record Adoption
FHIR	Fast Healthcare Interoperability Resources
GKV	Gesetzliche Krankenversicherung
GPS	Globales Positionierungssystem
HL7	Health Level 7
IdD	Internet der Dinge
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologien
ICD	International Classification of Diseases
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IoMT	Internet of Medical Things
IoT	Internet of Things
IPS	Indoor-Positionierungssystem
IPv4	Internet Protocol Version 4
IPv6	Internet Protocol Version 6
IT	Informationstechnik
LPWAN	Low Power Wide Area Network
OPS	Operationen- und Prozeduren-Schlüssel
RFID	Radio Frequency Identification
RSSI	Received Signal Strength Indication
RTLS	Real-Time-Location-System
TDoA	Time Difference of Arrival
ToA	Time of Arrival
UWB	Ultra Wide Band
WLAN	Wireless Local Area Network
WPAN	Wireless Personal Area Network

1 Einleitung

Das Auseinandersetzen mit den Themen der Digitalisierung erlangt nicht nur für die Industrie, sondern auch für das Gesundheitswesen und insbesondere für Krankenhäuser in Deutschland eine zunehmende Bedeutung. Einleitend werden daher zunächst die Ausgangssituation im Gesundheitswesen beleuchtet, vorhandene Probleme im Kontext der Digitalisierung und spezifisch für den Einsatz von Verfahren der Indoor-Lokalisierung in Krankenhäusern identifiziert und die daraus abgeleiteten Zielstellungen der Arbeit vorgestellt. Schließlich werden die wissenschaftliche Methodik und der Aufbau der Arbeit skizziert.

1.1 Ausgangssituation

Krankenhäuser sind oft große und unübersichtliche Gebäudeeinheiten mit komplexen Geschäftsprozessen, die die Betreiber vor zahlreiche Herausforderungen stellen. Das Gesundheitswesen sieht sich zudem den Problematiken steigender Patient:innenzahlen, Fachkräftemangel sowie der schlechten Wirtschaftlichkeit bzw. dem Kostendruck gegenüber. Die Digitalisierung bietet angesichts dessen und speziell für Krankenhäuser verschiedene Chancen zur Unterstützung, Optimierung und Automatisierung von Prozessen (Klauber, Geraedts, Friedrich & Wasem, 2019). In der Produktion und Industrie, insbesondere in den Branchen Maschinen- und Anlagenbau, Elektrotechnik und Automobilbau, wird unter dem Begriff Industrie 4.0 der flächendeckende Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) sowie deren Vernetzung zu einem Internet der Dinge (IdD) beschrieben. Durch diese Vernetzung wird die Echtzeitfähigkeit der Steuerung innerhalb der Produktion gewährleistet: „Autonome Objekte, mobile Kommunikation und Echtzeitsensorik erlauben neue Paradigmen der dezentralen Steuerung und Ad-hoc-Gestaltung von Prozessen“ (Spath, Ganschar, Gerlach, Hämmerle, Krause & Schlund, 2013, S. 2). Dies führt in der Industrie insbesondere zur Effizienzsteigerung, wirtschaftlicheren Produktionsprozessen sowie schnellerem und flexiblerem Reaktionsvermögen, um letztendlich die Wettbewerbsfähigkeit zu steigern.

In einer Studie von Spath et al. (2013) steht auch in einem vollständig digitalisierten Unternehmen der Mensch weiterhin im Mittelpunkt. Dies wird damit begründet, dass die Mitarbeitenden die zentralen Fähigkeiten und langfristigen Erfahrungen haben, um sensorische Lücken zu schließen. Darüber hinaus werden vor allem Kreativität und Flexibilität in Arbeitsabläufe eingebracht, was in diesem Maße noch nicht von Maschinen gewährleistet werden kann (Spath et al., 2013, S. 2). Die Entfaltung der Mitarbeitenden werde durch den Einsatz neuer Unterstützungsmöglichkeiten und Technologien erheblich gesteigert, weil die monotonen und körperlich anstrengenden Tätigkeiten nunmehr von der Technik übernommen werden. Die Mitarbeitenden können ihre Fähigkeiten damit effizienter und gezielter für anspruchsvollere Aufgaben einbringen (Spath et al., 2013, S. 2). Im Kontext der krankenhausspezifischen Digitalisierung beschreiben die Begriffe *Krankenhaus 4.0* sowie *Smart Hospital* die Vision eines digitalen Krankenhauses bzw. eines Krankenhauses der Zukunft. Dieses wird insbesondere durch den Einsatz mobiler Geräte und Applikationen, Roboter, Mensch-Maschine-Interaktionen, Telemedizin sowie einer vollständigen, sektorübergreifenden Vernetzung einschließlich substanzieller Struktur- und Prozessinnovationen charakterisiert (Muhr, Hasebrook & Hahnenkamp, 2019, S. 117). Dazu gehören auch – analog zur Industrie 4.0 – der zunehmende Einsatz von Unterstützungs- und Entscheidungssystemen, künstlicher Intelligenz und die Vernetzung durch das IdD im Krankenhauskontext. Das Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik (Wibbeling, 2017, S. 6) definiert den Begriff und das Konzept Krankenhaus 4.0 daher wie folgt: „Krankenhaus 4.0 ist die Digitalisierung und Vernetzung von Behandlungs- und Versorgungsprozessen im Krankenhaus mit Hilfe von Cyber-physischen Systemen

und dem IdD und Dienste als Unterstützungssysteme bis hin zur dezentralen Steuerung und Entscheidungsfindung“. Als Cyber-physische Systeme (CPS) werden intelligente Objekte mit dezentraler Steuerung – verbunden durch das IdD – verstanden, welche sich zudem selbst steuern können (Spath et al., 2013, S. 23).

Insbesondere Kommunikations- und Funktechnologien ermöglichen die Integration, Vernetzung und Weitergabe der erfassten und generierten Daten von intelligenten Objekten. Ein wesentliches Merkmal des Krankenhaus 4.0 ist die Unterstützung der Patient:innenbehandlung und -koordination durch CPS (Wibbeling, 2017, S. 6). Die Studie des Fraunhofer IML (Wibbeling, 2017) zeigt weitere Kernkomponenten, die das Krankenhauses 4.0 kennzeichnen. Für die Digitalisierung ist demnach die automatische Datenerfassung und -verarbeitung, der Einsatz von Assistenzsystemen und die vollständige Vernetzung sowie Integration in Prozesse notwendig. Als Beispiele werden Armbänder für Patient:innen, mobile Endgeräte sowie elektronische Akten angeführt. Für die automatische Identifikation von Objekten und Patient:innen können Technologien wie beispielsweise Radio Frequency Identification (RFID) eingesetzt werden. Auf Grundlage digitaler Daten und Prozesse erfolgt innerhalb der nächsten Entwicklungsstufe des Krankenhaus 4.0 eine zunehmende Dezentralisierung und Serviceorientierung. Am Beispiel der OP-Logistik zeigt die Fraunhofer-Studie (Wibbeling, 2017, S. 11), dass in Zukunft interne Prozesse im Krankenhaus parallelisiert anstatt seriell abgearbeitet werden können, da relevante Informationen in Echtzeit zur Verfügung stehen, was zur Reduktion von Wechselzeiten führt.

Weiterhin wird gezeigt, dass zur Optimierung der internen Krankenhausabläufe auch Systeme und Technologien zur Indoor-Lokalisierung bzw. Indoor-Positionierung beitragen und in einigen Krankenhäusern bzw. Leuchtturm-Projekten (Stand 2017) bereits eingesetzt werden. Durch den Einsatz von Technologien der Indoor-Lokalisierung können medizinische Geräte (Betten, Infusionspumpen, mobile Ultraschallgeräte u. v. a.), wie auch Patient:innen und Mitarbeitende geortet werden. Somit kann das Personal entlastet und Transport- und Suchzeiten sowie der Gerätebestand optimiert werden. Auch für die Parallelisierung von Krankenhausprozessen ist die ständige Verfügbarkeit der Standortinformationen von Personen und medizinischen Geräten in Echtzeit von hoher Relevanz. Systeme zur Indoor-Lokalisierung sowie zum Indoor-Tracking können auch zur automatischen Dokumentation von Reinigungs- und Hygieneprozessen oder zur Navigation von Patient:innen und Besuchern eingesetzt werden und daher als Assistenzsysteme sowie Systeme zur automatischen Datenerfassung betrachtet und klassifiziert werden. Weitere Einsatzmöglichkeiten werden im Verlauf dieser Masterarbeit ergänzt und beschrieben.

In den kommenden Jahren wird die Arbeitsbelastung der Pflegekräfte und des ärztlichen Personals in deutschen Krankenhäusern durch die steigenden Patient:innenzahlen und den Fachkräftemangel zunehmen (vgl. Kapitel 2 und Roland Berger GmbH, 2018). Die Ansätze, Konzepte und Technologien des Krankenhaus 4.0 ermöglichen die Neugestaltung von Prozessen mit dem Ziel der Effizienzsteigerung bei gleichbleibender oder verbesserter Behandlungs- und Versorgungsqualität. Ähnlich wie im Kontext der Industrie 4.0 können Mitarbeitende bei monotonen und körperlich anstrengenden Tätigkeiten unterstützt und entlastet werden. Technologien zur Indoor-Lokalisierung von Objekten und Personen innerhalb von Krankenhausgebäuden spielen daher eine besondere Rolle. Eine Anwendung zur Navigation und Steuerung von Patient:innenströmen innerhalb eines Klinikgebäudes kann beispielsweise zur Entlastung der Pflegekräfte und des ärztlichen Personals führen. Mit Hilfe eines Indoor-Ortungssystems können sich die Patient:innen lokalisieren und selbstständig bzw. systemgestützt den Weg zu den Behandlungsorten finden.

In der Literatur und Praxis existieren optische/visuelle, akustische, magnet- sowie funkwellenbasierte Verfahren, die Möglichkeiten für die Implementierung eines Systems zur Indoor-Lokalisierung bzw. Indoor-Positionierung darstellen (Mautz, 2012). In dieser Arbeit wird insbesondere die funkwellenbasierte Lokalisierung betrachtet, da Funktechnologien wie Wireless Local Area Network (WLAN), Bluetooth bzw. Bluetooth Low Energy (BT/BLE) oder RFID in Krankenhäusern bereits verwendet werden. Zudem birgt die Einführung von Funknetzwerken bzw. funkwellenbasierten Sensornetzwerken die Möglichkeit, eine Vielzahl von weiteren Anwendungen in der Zukunft zu realisieren. Funkwellenbasierte Lokalisierung kann unter Verwendung von verschiedenen Technologien, welche heutzutage vor allem im Bereich des IdD und der Unterhaltungselektronik (Consumer Electronics) eingesetzt werden und unterschiedliche Spezifika sowie Vor- und Nachteile aufweisen, umgesetzt werden (vgl. Kapitel 2.4 und Kapitel 5). Die Bewertung der aktuell verfügbaren Technologien und die Auswahl einer geeigneten Technologie für den Einsatz im Krankenhaus stellen dabei insbesondere für das Krankenhausmanagement aufgrund der Menge an zu berücksichtigenden Anforderungen und Entscheidungskriterien (darunter Infrastruktur, Komponenten, Genauigkeit, Skalierbarkeit, Latenz, Kompatibilität, Störanfälligkeit, Energieeffizienz, Energieversorgung, Kosten und Integrationsaufwand) eine komplexe Herausforderung dar. Im Rahmen der vorliegenden Masterarbeit wird deshalb eine Entscheidungsheuristik für die Auswahl von Technologien der Indoor-Lokalisierung entwickelt. In der Literatur werden neben dem Begriff Indoor-Lokalisierung vielfach auch die Begriffe Indoor-Positionierung, Indoor-Positionierungssystem (IPS), Echtzeit-Lokalisierung, Real-Time-Location-System (RTLS) sowie Indoor-Tracking verwendet. Innerhalb des Theorieteils werden die Definitionen und Abgrenzungen der Begriffe erarbeitet. Zur Vereinfachung und besseren Lesbarkeit wird im Nachfolgenden primär der Begriff Indoor-Lokalisierung verwendet.

1.2 Problemstellung

Die Betrachtung der Krankenhauslandschaft in Deutschland offenbart einen unzureichenden Grad der Digitalisierung bei zunehmenden Herausforderungen an das Krankenhausmanagement (Klauber et al., 2019). Der Fachkräftemangel und der steigende Kostendruck zwingen das Management von Krankenhäusern sowie Reha- und Pflegeeinrichtungen dazu, zunehmend innovative Ansätze und Lösungen zur Steigerung der Effizienz zu verfolgen. Systeme der Indoor-Lokalisierung können als Assistenz- und Datenerfassungssysteme hierzu ebenfalls eingesetzt werden. Für den Aufbau einer entsprechenden Infrastruktur bzw. zur Umsetzung eines Systems zur Lokalisierung von Personen und Objekten innerhalb von Gebäuden existieren verschiedene Verfahren und Technologien. Insgesamt zeigt eine Auseinandersetzung mit der Literatur zwei zentrale Erkenntnisdefizite und Herausforderungen:

- **Theoriedefizit im sektoralen Bereich (Krankenhaus):** In der Literatur werden vielfältige Technologien zur Indoor-Lokalisierung bzw. zur Echtzeit-Lokalisierung innerhalb von Gebäuden beschrieben, wobei unter anderem Vor- und Nachteils kataloge angeführt werden. Bisher fehlen für krankenhausspezifische Kontexte allerdings theoriebasierte und systematisch abgeleitete Bewertungskataloge, auf deren Grundlage die verfügbaren Technologien bewertet, verglichen und ausgewählt werden können.
- **Praxisherausforderung:** Das Krankenhausmanagement steht in der Zukunft zunehmend vor den Herausforderungen, Digitalisierungstechnologien – in dieser Masterarbeit speziell Technologien zur Indoor-Lokalisierung – bewerten und auswählen zu können. Hierdurch entstehen komplexe Entscheidungssituationen für das Krankenhausmanagement, für die bisher keine spezifischen Bewertungskriterien und Entscheidungsheuristiken, weder in der Literatur noch in der Praxis, entwickelt wurden.

1.3 Zielstellung

Das Ziel dieser Masterarbeit besteht darin, ausgewählte Technologien zur Indoor-Lokalisierung für den Einsatz im Krankenhaus zu untersuchen und durch die Entwicklung einer kriterienbasierten Entscheidungsheuristik die Auswahl von entsprechenden Technologien durch das Krankenhausmanagement zu unterstützen. Ausgehend von diesem übergeordneten Ziel werden die folgenden Teilziele verfolgt:

- Darstellung einer kompakten Übersicht zum Stand von Verfahren und Technologien zur Indoor-Lokalisierung und deren Integration in krankenhausspezifische Wertschöpfungsketten
- Identifikation und Systematisierung von Bewertungskriterien unter besonderer Berücksichtigung von krankenhausspezifischen Anforderungen
- Vergleichende Analyse der wichtigsten Technologien zur Indoor-Lokalisierung anhand der Bewertungskriterien (literaturgestützt)
- Diskussion der krankenhausspezifischen Entwicklungsmöglichkeiten von Entscheidungsheuristiken zur Auswahl von Technologien zur Indoor-Lokalisierung
- Entwicklung einer speziellen Entscheidungsheuristik für die Wahl einer geeigneten Technologie zur Indoor-Lokalisierung im Krankenhaus

Die folgenden Technologien werden innerhalb der Arbeit für den Aufbau einer geeigneten Infrastruktur zur funkwellenbasierten Indoor-Lokalisierung im Krankenhaus untersucht:

- Wireless Local Area Network (WLAN)
- Bluetooth/Bluetooth Low Energy Beacons (BT/BLE)
- Ultra Wide Band (UWB)
- Radio Frequency Identification (RFID)

Die Festlegung der zu untersuchenden Technologien erfolgte nach dem Relevanzprinzip. Bei Fragestellungen der Indoor-Lokalisierung, Indoor-Positionierung, Indoor-Tracking sowie Echtzeit-Lokalisierung innerhalb von Gebäuden werden funkwellenbasierte Verfahren unter Verwendung dieser Technologieoptionen heutzutage innerhalb der Literatur im Schwerpunkt diskutiert (Hilty, Oertel, Wölk & Pärli, 2012; Kern, 2010; Hormes & Fottner, 2019).

1.4 Methodik

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit erfolgt eine umfassende Auseinandersetzung mit den Einsatzmöglichkeiten und Wirkungen von funkwellenbasierten Technologien der Indoor-Lokalisierung als Element des Krankenhaus 4.0-Ansatzes. Die Grundlage der Arbeit bildet eine umfassende Literaturrecherche zu Verfahren und Technologien der Indoor-Lokalisierung mit dem Schwerpunkt des Einsatzes im Krankenhaus. Als wissenschaftliche Methodik zur Bewertung und Auswahl einer geeigneten Technologie wird die Vorgehensweise des allgemeinen heuristischen Entscheidungsverfahrens für komplexe Probleme nach Grünig und Kühn (2013) verwendet. Die verschiedenen Technologieoptionen stellen dabei die zu betrachtenden Lösungsvarianten des Entscheidungsproblems dar. Unterschiedliche Bewertungs- und Abgrenzungskriterien wie Genauigkeit, Skalierbarkeit, Latenz, Kompatibilität, Störanfälligkeit, Energieeffizienz, Energieversorgung, Kosten und Aspekte der Integrationsfähigkeit werden diskutiert und in das Entscheidungsverfahren einbezogen. Zudem werden die Besonderheiten der Prozesse und Infrastrukturen von Krankenhäusern bei der Auswahl einer Lokalisierungstechnologie in besonderer Weise berücksichtigt.

Innerhalb der Untersuchung und dem Auswahlprozess werden die Technologien WLAN, BT/BLE, UWB und RFID zur funkwellenbasierten Lokalisierung gegenübergestellt. Die in der Literatur diskutierten Vor- und Nachteile werden mit krankenhausspezifischen Anforderungen im heuristischen Entscheidungsverfahren betrachtet. Bei dieser Analyse werden zudem die Erfahrungen der visgato GmbH in Bezug auf die Bedürfnisse von Krankenhäusern einbezogen.¹ Zusätzlich wird eine spezielle Entscheidungsheuristik zur Technologieauswahl (hier mit dem Fokus auf Indoor-Lokalisierungstechnologien) entwickelt und gewürdigt.

1.5 *Aufbau der Arbeit*

Der Theorieteil (Kapitel 1–4) umfasst die Betrachtung der Krankenhauslandschaft in Deutschland und die Definition des IdD sowie die Einordnung von Verfahren und Technologien der funkwellenbasierten Indoor-Lokalisierung in dieses Forschungsfeld. Zudem werden die wesentlichen Grundlagen durch die Betrachtung von verschiedenen Verfahren und Technologien literaturgestützt dargestellt. Im Praxisteil (Kapitel 5–6) erfolgt die Auswahl einer geeigneten Technologie für den Einsatz im Krankenhauskontext anhand von aus der Literatur systematisierten und operationalisierten Bewertungskriterien und die Ableitung eines speziellen Entscheidungsverfahrens für das Krankenhausmanagement. Orientiert an den Zielsetzungen wird die Masterarbeit in sieben Kapitel untergliedert:

Das zweite Kapitel umfasst eine detaillierte Betrachtung der Krankenhauslandschaft in Deutschland, in der die aktuellen und zukünftigen Herausforderungen, der Stand sowie die Chancen der Digitalisierung literaturgestützt dargestellt werden. Anhand des Wertschöpfungskettenansatzes werden Einsatzmöglichkeiten und Wirkungen von Technologien der Indoor-Lokalisierung identifiziert und beschrieben.

Innerhalb des dritten Kapitels werden die Konzepte des IdD beschrieben und die Ansätze der Indoor-Lokalisierung in diesen Kontext eingeordnet sowie Beispiele für den Einsatz im Gesundheitswesen insbesondere für Krankenhäuser dargestellt.

Im vierten Kapitel werden die wesentlichen Begriffe der Themenstellung definiert und im Anschluss die allgemeinen Verfahren zur Lokalisierung und Positionsbestimmung innerhalb von Gebäuden beschrieben sowie der aktuelle Stand der Forschung dargestellt. In diesem Kapitel werden noch keine Technologien betrachtet. Es wird ein Überblick über die Vor- und Nachteile von verschiedenen Verfahren zur Positionsbestimmung gegeben.

Das fünfte Kapitel umfasst die Detailbetrachtung von einzelnen Technologien zur Indoor-Lokalisierung. Es werden die vier Funktechnologien BT/BLE, WLAN, UWB sowie RFID untersucht und Abgrenzungs- und Bewertungskriterien literaturgestützt systematisiert dargestellt.

Das sechste Kapitel beschäftigt sich mit der Erläuterung des allgemeinen heuristischen Entscheidungsverfahrens für komplexe Probleme, einschließlich der Beschreibung der einzelnen Schritte der Methodik. An dieser Stelle wird zudem das Entscheidungsverfahren für die Wahl einer geeigneten Technologie zur Indoor-Lokalisierung im Krankenhaus vorgestellt. Die erarbeiteten Anforderungs- und Bewertungskriterien werden operationalisiert und in die Entscheidungsheuristik einbezogen. Hierbei werden insbesondere krankenhausspezifische Besonderheiten berücksichtigt.

Den Abschluss der Arbeit bildet das siebte Kapitel, in dem die Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst dargestellt werden. Die Auswahl einer geeigneten Technologie durch die Anwendung des heuristi-

¹ Die Masterarbeit entstand in Kooperation mit der visgato GmbH. Weitere Informationen können bei der visgato GmbH angefragt werden.

schen Entscheidungsverfahren sowie die daraus abgeleitete und entwickelte spezifische Entscheidungsheuristik werden kritisch gewürdigt. Im Ausblick der Arbeit werden weitere Einsatzoptionen und technologische Zukunftsoptionen der Indoor-Lokalisierung wie auch von Entscheidungsheuristiken für Krankenhäuser aufgezeigt und zugehörige Untersuchungsfelder und Forschungsbereiche identifiziert. Gleichzeitig werden die Möglichkeiten des Einsatzes und der Weiterentwicklung der in dieser Arbeit entwickelten Entscheidungsheuristik für das Krankenhausmanagement dargestellt.

2 Krankenhäuser in Deutschland

Die Krankenhauslandschaft in Deutschland ist heterogen und steht vor einem tiefgreifenden Wandel, sodass in diesem Kapitel eine Detailbetrachtung dieses komplexen Systems auf Basis einer Literaturrecherche durchgeführt wird. Ausgewählte Ergebnisse der Literaturrecherche und relevante Veröffentlichungen zu diesem Thema sind im Anhang A dokumentiert und kompakt zusammengefasst.

2.1 Definition, Arten und Aufgaben

Nach § 2 Krankenhausfinanzierungsgesetz sind Krankenhäuser „Einrichtungen, in denen durch ärztliche und pflegerische Hilfeleistungen Krankheiten, Leiden oder Körperschäden festgestellt, geheilt oder gelindert werden sollen oder Geburtshilfe geleistet wird und in denen die zu versorgenden Personen untergebracht und gepflegt werden können“. Ausgehend von dieser Definition führt Schlüchtermann (2016, S. 18) unter Bezugnahme auf die gesetzlichen Grundlagen weitere konstitutive Merkmale von Krankenhäusern an:

- Ständige fachlich-medizinische ärztliche Leitung
- Arbeit auf Basis von wissenschaftlich anerkannten Methoden
- Vorhandensein der für den Versorgungsauftrag entsprechenden diagnostischen und therapeutischen Möglichkeiten
- Ständige Verfügbarkeit von ärztlichem sowie Pflege-, Funktions- und medizinisch-technischem Personal

Unter einem Versorgungsauftrag wird in Deutschland die Wiederherstellung, Aufrechterhaltung und positive Beeinflussung des Gesundheitszustandes durch eine flächendeckende, meist stationäre Versorgung von Patient:innen verstanden (Schlüchtermann, 2016, S. 30). Zusätzliche Aufgaben von Krankenhäusern liegen in der Ausbildung von Ärzt:innen und Pflegekräften. Bei Universitätskliniken stehen daneben zusätzlich die Forschung und Lehre im Mittelpunkt.

Die Aufgabe der Krankenhausversorgung unterliegt in Deutschland nicht direkt dem Staat sondern einer gemeinsamen Selbstverwaltung bestehend aus dem Gemeinsamen Bundesausschuss, der deutschen Krankenhausgesellschaft, den Spitzenverbänden der gesetzlichen (GKV) sowie privaten Krankenversicherung und Institutionen auf Landesebene (Schlüchtermann, 2016, S. 30).

Die Krankenhauslandschaft ist in Deutschland weitgehend heterogen strukturiert. Zur grundlegenden Unterscheidung und Systematisierung existieren die in **Tabelle 1** dargestellten Klassifikationsmöglichkeiten. Tages- und Nachtkliniken sowie psychiatrische und neurologische Krankenhäuser werden in dieser Systematik separat von Allgemeinkrankenhäusern als „Sonstige“ erfasst. Neben der Klassifizierung nach der Art der Aufgabe gibt es weitere Differenzierungskriterien wie die Trägerschaft, GKV-Zulassung, Öffentliche Förderung, Rechtsform, Versorgungsstufe und ärztliche Besetzung (Schlüchtermann, 2016, S. 30).

Art der Aufgabe (seit 1990)	Allgemeine		Sonstige	
Ärztlich-pflegerische Zielsetzung (bis 1990)	Allgemeinkrankenhäuser	Fachkrankenhäuser	Sonderkrankenhäuser	
Trägerschaft	Öffentlich	Freigemeinnützig	Privat	
GKV-Zulassung	Vertragskrankenhäuser	Plankrankenhäuser	Hochschulkliniken	Nicht zugelassene Krankenhäuser
Öffentliche Förderung der Investition	Ja		Nein	
Rechtsform	Öffentlich-Rechtlich (z. B. Regiebetrieb, Eigenbetrieb)		Privat-Rechtlich (z. B. GmbH, AG)	
Versorgungsstufe	Grundversorgung	Regelversorgung	Schwerpunktversorgung	Maximalversorgung
Ärztliche Besetzung	Anstaltskrankenhäuser		Belegkrankenhäuser	

Tabelle 1: Arten von Krankenhäusern in Deutschland²

2.2 Deskriptive Statistik

Nach Angaben des Statistisches Bundesamts gibt es in Deutschland insgesamt 1.942 Krankenhäuser und Kliniken (Stand 2017; Statistisches Bundesamt, 2018b, S. 14). Davon werden 85 % als allgemeines Krankenhaus und 15 % als sonstiges Krankenhaus klassifiziert (vgl. Tabelle 1 **Tabelle** und Schlüchtermann, 2016, S. 30). Die **Abbildung 1** zeigt den Verlauf der wichtigsten Kennzahlen der Krankenhausversorgung in Deutschland im Zeitraum von 1991 bis 2013.

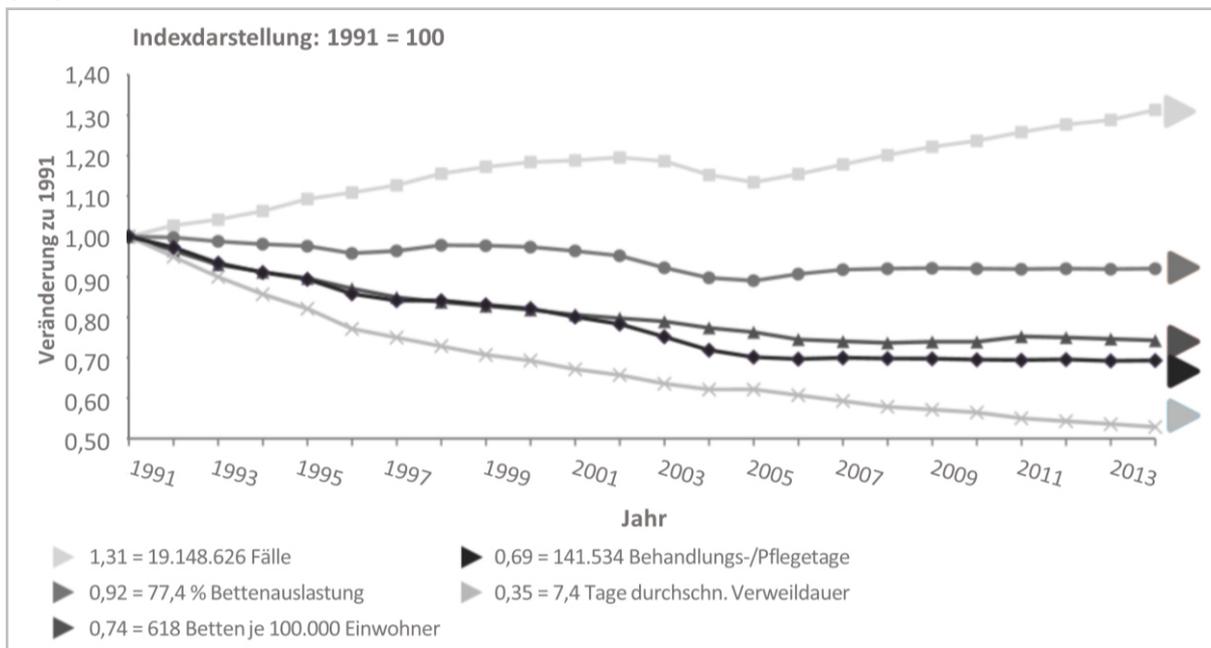


Abbildung 1: Versorgungssituation in deutschen Krankenhäusern³

² Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von Schlüchtermann (2016, S. 30).

³ Quelle: Schlüchtermann (2016, S. 16).

Die Fallzahlen sind demnach um 30 % gestiegen und die durchschnittliche Verweildauer um knapp 50 % gesunken. 2017 waren in deutschen Krankenhäusern insgesamt 19.952.735 Fälle zu verzeichnen (Statistisches Bundesamt, 2020). Weiterhin hat die Anzahl an Pflgetagen, die Bettenauslastung sowie die Anzahl an Betten abgenommen (Schlüchtermann, 2016, S. 16). Die Anzahl der Krankenhausbetten in Deutschland beträgt 497.200, die durchschnittliche Verweildauer liegt bei 7,3 Tagen (Stand 2017; Statistisches Bundesamt, 2018a).

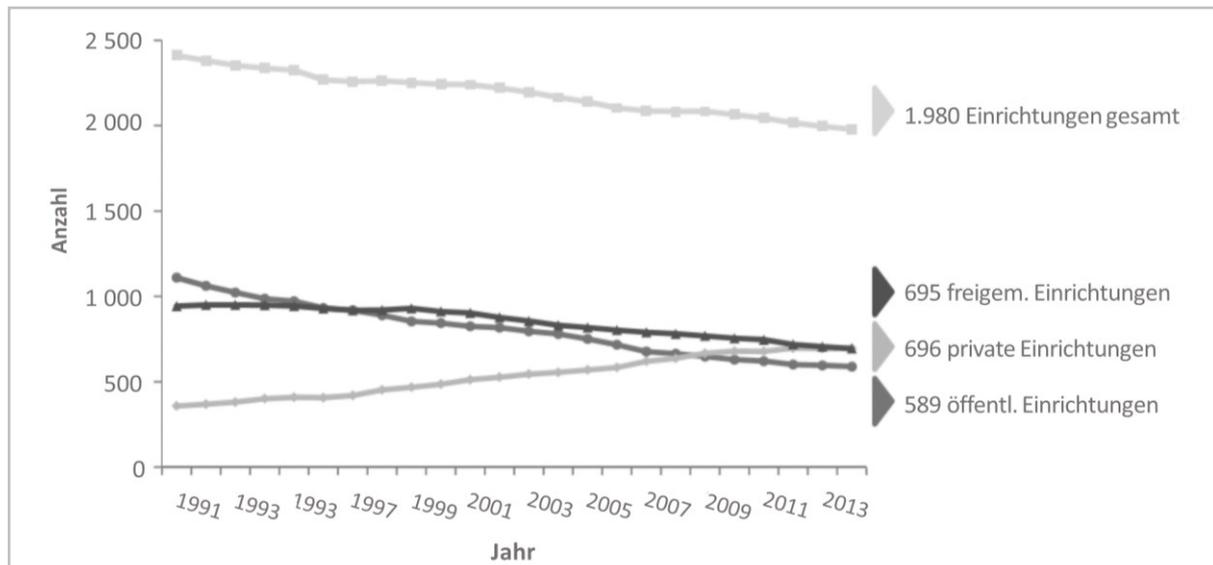


Abbildung 2: Entwicklung der Anzahl/Trägerschaft von Krankenhäusern⁴

In **Abbildung 2** ist zu erkennen, dass die Anzahl an Krankenhäusern in den Jahren 1991 bis 2013 abgenommen hat und zusätzlich ein Strukturverschiebungseffekt der Trägerschaft eingesetzt hat. Öffentliche Krankenhäuser werden zunehmend von privaten Trägern gekauft (Schlüchtermann, 2016, S. 17). Neben der Privatisierung zeigt die sinkende Anzahl an Krankenhäusern eine zunehmende Konzentration des Marktes. Krankenhäuser generieren in Deutschland insgesamt einen Gesamtumsatz von jährlich 80 Mrd. EUR (Schlüchtermann, 2016, S. 16). Dies entspricht ungefähr einem Drittel der Gesamtausgaben für Gesundheitsleistungen in Deutschland (Schlüchtermann, 2016, S. 15). Die durchschnittlichen Kosten pro Fall lagen 1990 bei ca. 2.600 EUR und 2016 bei ca. 3.900 EUR (Schlüchtermann, 2016, S. 16).

2.3 Aktuelle Probleme und Herausforderungen

Gerade in Deutschland stehen Krankenhäuser vor erheblichen Herausforderungen. Die Krankenhausstudie 2018 der Roland Berger GmbH (2018) zeigt auf, in welchen Bereichen die aktuellen Herausforderungen, Probleme und Chancen liegen. Die wirtschaftliche Lage der Krankenhäuser in Deutschland ist demnach kritisch zu beurteilen, denn 41 % der Allgemeinkrankenhäuser sind defizitär und können keine Überschüsse erwirtschaften (Roland Berger GmbH, 2018, S. 2). Aufgrund des technologischen Fortschrittes und der demographischen Entwicklung sind in den letzten 20 Jahren die Fallzahlen angestiegen (Abbildung 1 und Schlüchtermann, 2016, S. 15). Auch in den kommenden Jahren wird die Nachfrage nach Gesundheitsleistungen aufgrund dieser Entwicklungen weiter zunehmen. Trotz der zunehmenden Fall- bzw. Patient:innenzahlen (vgl. Abbildung 1) und den damit verbundenen steigenden Umsätzen verschlechtert sich die wirtschaftliche Lage zunehmend. Dies wird in der Studie der Roland Berger GmbH durch die im Vergleich zum Umsatz überproportional steigenden Kosten sowie nicht effi-

⁴ Quelle: Schlüchtermann (2016, S. 17).

zient ausgerichteten Prozesse begründet. In den vergangenen 25 Jahren sind die Kosten der Krankenhausversorgung um 225 % gestiegen während Förderungen für Investitionen hingegen um 23 % gesunken sind (Muhr et al., 2019, S. 117). Die Krankenhäuser versuchen vor allem mit traditionellen Maßnahmen, wie durch die Steigerung der stationären Leistungen, die Umsätze zu erhöhen (Roland Berger GmbH, 2018, S. 3). Um dem oben genannten Trend entgegenzuwirken, muss aber eine Steigerung der Effizienz der Behandlungs- und Versorgungsprozesse und Patient:innenorientierung gefordert werden (Porter, Pabo & Lee, 2013). Die steigenden Fallkosten (Kapitel 2.2) begründet Schlüchtermann ebenfalls durch den technologischen Fortschritt und die demographische Entwicklung.

Durch die kritischen Entwicklungen und Perspektiven auf dem Arbeitsmarkt wird sich in den kommenden Jahren zugleich der schon vorhandene Mangel an Fachkräften im Gesundheitsbereich weiter verschärfen. Nach Schätzungen von Expert:innen werden in allgemeinen Krankenhäusern bis 2030 ca. 130.000 Stellen in der Pflege nicht besetzt werden können. Im gesamten Pflegebereich wird die Anzahl auf ca. 400.000 unbesetzte Stellen geschätzt (Hasebrook, Hingst, Hoffmann & Hahnenkamp, 2019, S. 104). Die Versorgung einer steigenden Anzahl von Patient:innen mit weniger Fachkräften wird daher mit als zentrale Herausforderung angesehen (Roland Berger GmbH, 2018; Augurzyk & Beivers, 2019).

Für die effiziente Ausrichtung der Krankenhausprozesse ergibt sich zukünftig ein hoher Investitionsbedarf, dessen Finanzierung bei rückläufigen Fördermitteln und geringeren Erträgen das Management der Krankenhäuser vor erhebliche betriebswirtschaftliche Herausforderungen stellt (Roland Berger GmbH, 2018). Vor diesem Hintergrund werden die Digitalisierung und die Steigerung des Qualitätswettbewerbs als besondere Chancen für Krankenhäuser hervorgehoben (Roland Berger GmbH, 2018).

Eine der größten Herausforderungen nach Angaben der Studie ist letztendlich auch die Bewältigung der hohen Komplexität der Maßnahmen zur Einführung von Verbesserungen im Krankenhaus. Ca. 70 % der befragten Krankenhäuser kooperieren aus diesem Grund mit Medizintechnik-Unternehmen zur Verbesserung der Qualität von Behandlungen und zur Steigerung der Effizienz von Prozessen (Roland Berger GmbH, 2018, S. 22). Dies zeigt deutlich, dass Krankenhäuser externe Innovationen erwarten und auch auf externen Input angewiesen sind. Die Ergebnisse der Befragung unterstreichen, dass Krankenhausmanager vor allem die Unternehmen im Bereich der Medizintechnik als wichtige Ideengeber und als zentrale Treiber von Innovationen ansehen und deren Beratungskompetenz entsprechend schätzen (Roland Berger GmbH, 2018, S. 22–23). Die betriebswirtschaftlichen Herausforderungen von Krankenhäusern sind in **Abbildung 3** zusammenfassend dargestellt.



Abbildung 3: Herausforderungen an das Krankenhausmanagement⁵

⁵ Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Schlüchtermann (2016, S. 18).

Durch den gesellschaftlichen und demographischen Wandel, die Änderungen von gesetzlichen Rahmenbedingungen sowie den steigenden Wettbewerb und technologischen Fortschritt steht das Krankenhausmanagement fortlaufend unter Druck. Patient:innen werden zunehmend als Kund:innen betrachtet und haben ein erhöhtes Bedürfnis nach qualifizierten Informationen und Partizipation (Schlüchtermann, 2016, S. 18; Porter et al., 2013, S. 518ff). Verglichen mit anderen Branchen unterliegen Krankenhäuser jedoch strengeren gesetzlichen Rahmenbedingungen, die die Entscheidungsprozesse zur Zukunftsausrichtung determinieren. Aufgrund der zahlreichen Herausforderungen im Gesundheitssystem ist es daher besonders für Krankenhäuser, die die Grundversorgung in Deutschland gewährleisten müssen, wichtig, die Chancen der Digitalisierung zu nutzen und neue Technologien sowie deren Einsatz frühzeitig zu diskutieren und im Gesamtkontext bewerten zu können. Der Artikel *Facharzt und RoboDoc: Digitalisierung verändert Umgang mit ärztlicher Kompetenz* von Muhr et al. (2019) fasst den kritischen Stand der deutschen Krankenhäuser mit Blick auf die Digitalisierung, den Fachkräftemangel und die steigende Fallschwere und Arbeitsbelastung, den hohen Investitionsbedarf von jährlich 6 Milliarden EUR und den Möglichkeiten des Krankenhaus 4.0 zusammen.

2.4 Stand der Digitalisierung und internationaler Vergleich

Ein wichtiger Ausgangspunkt für den Anwendungssektor „Krankenhäuser“, der im Rahmen dieser Untersuchung im Mittelpunkt steht, ist die Analyse des aktuellen Stands der Digitalisierung der Krankenhäuser in Deutschland. Der Krankenhaus-Report 2019 (Klauber et al., 2019) gewährt hierzu entsprechende aktuelle Einblicke.

Die deutsche Krankenhaus-Informationstechnik (IT)-Infrastruktur wird im Report durch Verwendung des EMRA-Modells (Electronic Medical Record Adoption) im internationalen Vergleich bewertet. Alle untersuchten Krankenhäuser wurden auf einer Skala von 0 (keine Digitalisierung) bis 7 (papierloses Krankenhaus) eingeordnet (Stephani, Busse & Geissler, 2019, S. 23). Der Report zeigt, dass Krankenhäuser in Deutschland (Skalenwert 2,3) im Vergleich zu Krankenhäusern in den USA und Dänemark (Skalenwert 5,3), Spanien (3,2) oder der Türkei (3,8) weit unterdurchschnittlich digitalisiert sind und andere Länder bereits wesentlich weiterentwickelt sind (Sellge & Hagenmeyer, 2019; Stephani et al., 2019, S. 17). Ca. 40 % der in Deutschland mit dem Modell überprüften Krankenhäuser sind überhaupt nicht digitalisiert und haben keine IT-Strategie.

Hervorgehoben wird das Universitätskrankenhaus Hamburg-Eppendorf, das sich bereits vor über 20 Jahren im Rahmen der Modernisierung gezielt mit verschiedenen IT-Strategien auseinandergesetzt hat. Demnach wurden Patient:innenakten, Archive sowie die Arzneimittelversorgung digitalisiert, um dadurch die darauf aufbauenden Krankenhausprozesse effizienter auszurichten. Das Universitätskrankenhaus Hamburg-Eppendorf erreicht somit in Deutschland die Stufe 6 (Klauber et al., 2019, S. XIII). Der Report verdeutlicht zudem, dass im Bereich der Pflege die Digitalisierung beispielsweise durch den Einsatz von IKT, Unterstützungssystemen und Robotern bisher kaum ausgeprägt ist. Die notwendigen Investitionen in die Digitalisierung werden zudem als erfolgskritisch beschrieben.

IKT sind die Schlüsseltechnologien der Digitalisierung. Der Aufbau von digitalen Kommunikationsmöglichkeiten gestattet es beispielweise, die vorhandenen Arbeitsabläufe wesentlich effizienter zu gestalten und enorme Zeitersparnisse zu erzielen (Klauber et al., 2019, S. XV). Der Bericht *Voraussetzungen und Potenziale des digitalen Krankenhauses* von Oswald und Goedereis (2019, S. 49ff), veröffentlicht als Teil des Krankenhaus-Reports 2019, zeigt, welche Erwartungen an die Digitalisierung im Krankenhaus gestellt werden (**Abbildung 4**). Weiterführend werden Bereiche identifiziert, die einen größtmöglichen Beitrag zur Effizienzsteigerung durch die Digitalisierung leisten können.

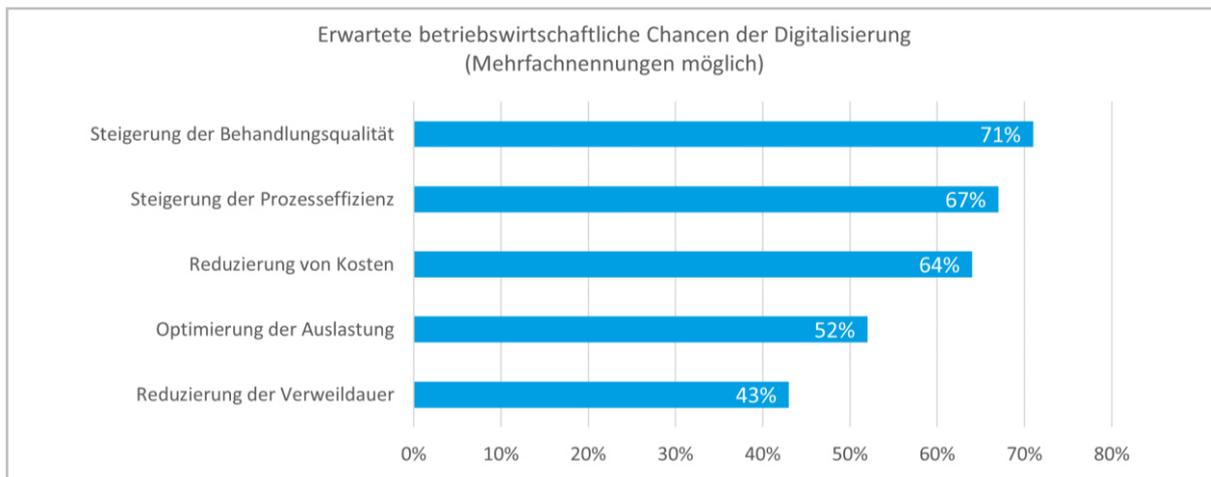


Abbildung 4: Erwartungen an die Digitalisierung im Krankenhaus⁶

Das größte Potenzial der Digitalisierung im Krankenhaus liegt demnach in der Steigerung der Behandlungsqualität und der Verbesserung der Effizienz von internen Prozessen sowie der Reduktion von Kosten. Weitere Chancen liegen in der Optimierung der Auslastung und der Reduktion der Verweildauer (Oswald & Goedereis, 2019, S. 51).

Die im Krankenhaus Report 2019 besonders hervorgehobenen erfolgskritischen Problempunkte der Digitalisierung von Krankenhäusern in Deutschland sind (Klauber et al., 2019):

Fehlende patient:innenbezogene Datenintegration

Probleme bei der Einführung der elektronischen Patientenakte, die im Mittelpunkt der Digitalisierung steht und die eine zentrale Daten- und Kommunikationsgrundlage bildet sowie wesentlich für den Aufbau einer Telematik-Infrastruktur ist (Bertram, Püschner, Gonçalves, Binder & Amelung, 2019, S. 3–16).

Fehlende technische Standards sowie Interoperabilität von Systemen

Im Report erfolgt eine Unterscheidung zwischen technischer, syntaktischer und semantischer Interoperabilität (Stephani et al., 2019, S. 19). Technische Interoperabilität bezeichnet das Vorhandensein der notwendigen technischen Voraussetzungen für den Austausch von Informationen über einzelne Systemgrenzen hinaus. Die meisten Krankenhäuser in Deutschland sind an das Internet angebunden und haben interne Netzwerke. Im Klinikalltag erfolgt die Kommunikation dennoch hauptsächlich über die klassischen Medien: Telefon, Post oder Fax (Stephani et al., 2019, S. 19). Unabhängig vom Breitbandausbau besteht daher die Forderung nach einer einheitlichen, digitalen Kommunikationsstruktur. Im Bereich der syntaktischen Interoperabilität existieren verschiedene Standards, die die Struktur von zu übermittelnden Informationen spezifizieren. Zu den bekanntesten Standards gehören: Health Level 7 (HL7) Version 2, HL7 Version 3 sowie Fast Healthcare Interoperability Resources (FHIR). Das Problem ist die unterschiedlich starke Verbreitung der Standards. HL7 Version 2 wird für den Nachrichtenaustausch zwischen Krankenhausinformationssystem und Laborsystemen bereits vielfach eingesetzt, der Nachfolger HL7 Version 3 hat sich bisher aufgrund der Komplexität nicht durchgesetzt (Stephani et al., 2019, S. 19). FHIR versucht, die Fehler der vorhergehenden Standards zu vermeiden und setzt verstärkt auf eine bessere Anpassbarkeit an neue Anwendungsfelder (Stephani et al., 2019, S. 20). Die semantische Interoperabilität ermöglicht die gleiche Interpretation der Daten in verschiedenen Systemen. Die Grundlage dafür bilden Standards wie International Classification of Diseases

⁶ Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Oswald & Goedereis (2019, S. 51).

(ICD)-Codes zur Klassifizierung von Krankheiten, Operationen- und Prozeduren-Schlüssel (OPS) zur Kodierung von Behandlungen, GS1 Standards zur Kennzeichnung von Produkten oder Pharmazentralnummern zur Kennzeichnung von Medikationen. Ein weiterer Standard mit zunehmender Relevanz ist *Systematized Nomenclature of Medicine*, der 800.000 Begriffe enthält und zum einheitlichen Sprachgebrauch für klinische Inhalte unabhängig von der Ursprungssprache eingesetzt werden kann. Die Verwendung des Standards steigert insbesondere die Möglichkeit, Suchanfragen in IT-Systemen mit einer hohen Genauigkeit und Vollständigkeit durchzuführen. In Deutschland wird der Standard derzeit noch nicht eingesetzt (Stephani et al., 2019, S. 21).

Schlechte IT-Infrastruktur

Die Ergebnisse der European Hospital Studie von 2014 zeigen, dass nur ca. 30 % der Krankenhäuser ein einheitliches WLAN mit einem Durchsatz von mehr als 50 Mbit/s haben. Damit fehlt die Grundlage, um flächendeckend Kommunikations- und Telemonitoring-Lösungen aufzubauen und einzusetzen (Stephani et al., 2019, S. 29). Auch die Verbreitung und der Einsatz von mobilen Endgeräten befinden sich in den meisten Krankenhäusern erst in den Anfängen (vgl. **Abbildung 5** und Hübner et al., 2019, S. 40)

Ineffiziente Krankenhaus-Logistik

Eine Untersuchung der Krankenhauslandschaft in Dänemark zeigt, dass vor allem große Krankenhäuser auf eine effiziente Logistik angewiesen sind und dass Investitionen in Logistikkösungen zur erheblichen Steigerung der Produktivität, Reduktion von Verzögerungen und Wartezeiten zu Stoßzeiten sowie zur Beschleunigung des Patient:innenflusses führen (Henriksen, 2019, S. 95).

Im Gegensatz zur defizitären Lage der Krankenhausdigitalisierung in Deutschland gibt es in Nachbarländern bereits starke Fortschritte. Im Artikel *Facharzt und RoboDoc: Digitalisierung verändert Umgang mit ärztlicher Kompetenz* von Muhr et al. (2019) wird exemplarisch anhand des Musterkrankenhauses Aarhus in Dänemark beschrieben, wie eine effiziente Nutzung von Ressourcen basierend auf Technologien der Echtzeit-Lokalisierung von Objekten, Personen und Geräten realisiert wurde. Durch das Konzept „Tracking & Tracing“ werden medizinische Geräte lokalisiert und zeitnah zum Einsatzort transportiert oder eine Behandlung direkt am Standort des Gerätes geplant und durchgeführt, wodurch die Effizienz und Flexibilität der Arbeitsabläufe erhöht werden.

Ein weiteres Beispiel ist das Universitätsklinikum Aalborg, das durch die Einführung eines Systems zur Echtzeit-Lokalisierung die Effizienz der Logistikprozesse um 20 % steigern konnte (Henriksen, 2019, S. 95). Durch Konzepte wie „Just-in-Time“-Logistik auf Basis der Ortung und dem Tracking von Personal und medizinischen Geräten, Automatisierungslösungen für wiederholende Aufgaben und Applikationen zur Patient:innenführung können Verzögerungen und Stoßzeiten von Prozessen entgegengesteuert und vermieden werden (Henriksen, 2019, S. 95).

Insgesamt konnte durch die Digitalisierung der gesamten Krankenhauslogistik in Dänemark seit 2003 die Produktivität um 30 % gesteigert werden (Henriksen, 2019, S. 95). Eine erste Einschätzung des Autors auf Basis der zugrundeliegenden Literatur und der Erfahrungen der visgato GmbH bei der Implementierung von Indoor-Lokalisierungstechnologien ist in **Tabelle 2** dargestellt. Sie verdeutlicht, in welchen Bereichen insbesondere durch den Einsatz von Indoor-Lokalisierung positive Effekte erzielt werden können.

Gestützt auf die Betrachtung der Krankenhäuser in Dänemark wird vom Autor ein sehr hoher positiver Einfluss durch den Einsatz von Indoor-Lokalisierung in der Steigerung der Prozesseffizienz wahrgenommen. Weiterhin wird ein hoher positiver Einfluss für die Optimierung der Auslastung verortet und

ebenfalls ein positiver Einfluss für die Reduktion von Kosten, der Verweildauer und zur Steigerung der Behandlungsqualität angenommen.

Wirkungsdimensionen	Einfluss der Einführung von Systemen zur Indoor-Lokalisierung
Behandlungsqualität	+
Prozesseffizienz	+ + +
Kostenreduktion (Prozesskosten, Ressourcen)	+
Auslastung	+ +
Verweildauer	+
(+) positiver Einfluss, (+ +) hoher positiver Einfluss, (+ + +) sehr hoher positiver Einfluss	

Tabelle 2: Wahrnehmung von betriebswirtschaftlichen Chancen durch den Einsatz von Indoor-Lokalisierung⁷

Für die Umsetzung von „Tracking & Tracing“-Konzepten sind mobile Endgeräte und das IdD von zentraler Bedeutung. Mobile Endgeräte und Applikationen ermöglichen es, notwendige Informationen zu jeder Zeit und an jedem Ort abrufen und bearbeiten zu können. Abbildung 5 zeigt ein Box-Plot Diagramm zur Verbreitung von stationären und mobilen Endgeräten in deutschen Krankenhäusern. Die y-Achse zeigt die Anzahl der betrachteten Einrichtungen (Umfang der Stichprobe n) und zudem, welche Endgeräte zur Verfügung stehen. Auf der x-Achse ist die Verbreitung der einzelnen IT-Geräte abgebildet, das heißt wie viel Prozent der Stationen der untersuchten Krankenhäuser diese Geräte nutzen können. Die Betrachtung zeigt, dass Tablets, Smartphones und Terminals an Betten in den meisten Krankenhäusern noch nicht oder nur auf einzelnen Stationen verfügbar sind (Hübner et al., 2019, S. 40).

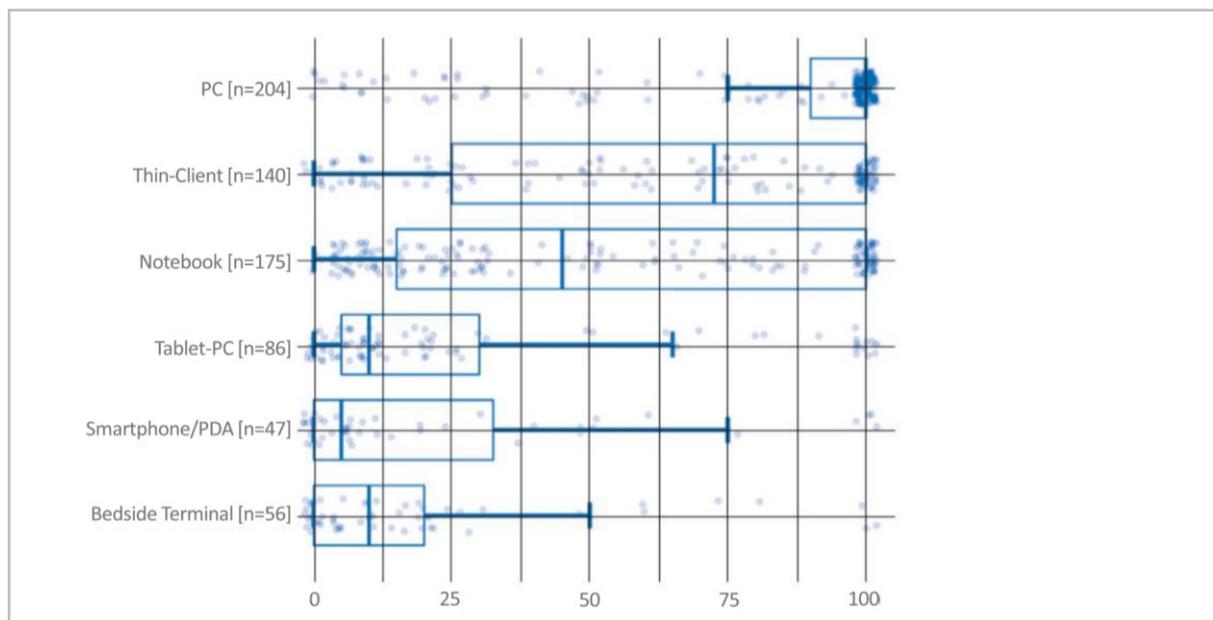


Abbildung 5: Verbreitung von stationären und mobilen Endgeräten⁸

Im Kontext der Indoor-Lokalisierung stellen mobile Endgeräte eine wesentliche Komponente dar. Für die funkwellenbasierte Indoor-Lokalisierung zur Navigation von Besucher:innen, Patient:innen und Mitarbeitenden werden mobile Endgeräte benötigt, die die Signale von Funktechnologien bzw. entsprechenden externen Signalgebern (Access-Points, Gateways, Controllern oder Beacons) interpretieren und auswerten können oder selbst ein Signal aussenden, um die Position innerhalb von Gebäuden zu bestimmen. Im Bereich des Asset-Tracking werden Mobilgeräte benötigt, mit denen die Mitarbeitenden jederzeit und

⁷ Quelle: Eigene Darstellung auf Basis der Literaturlauswertung und Einschätzung des Autors.

⁸ Quelle: Hübner et al. (2019, S. 41).

ohne Einschränkungen der Mobilität den Standort von medizinischen Geräten bestimmen sowie Änderungen an objektspezifischen Datensätzen vornehmen können (z. B. Statusinformationen).

Das IdD ermöglicht die Vernetzung von physischen Objekten, kleineren Geräten und Sensoren untereinander sowie mit dem Internet und stellt damit die technologische Grundlage für den Aufbau von geeigneten Infrastrukturen, die auch zur Lokalisierung von Objekten (Asset-Tracking) eingesetzt werden können, dar.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass der Grad der Digitalisierung der Krankenhäuser in Deutschland schwach ausgeprägt und im Vergleich zu anderen Ländern unterdurchschnittlich ist. Vor dem Hintergrund der aktuellen Probleme und Herausforderungen bietet die Digitalisierung den Krankenhäusern die Möglichkeit, gezielt neue und innovative Technologien zur Steigerung der Effizienz von internen Prozessen einzusetzen. Ziel sollte es sein, die Arbeitsbelastung der Mitarbeitenden zu senken sowie gleichzeitig die Qualität der Versorgung kosteneffizient zu erhöhen, um auch in Hinblick auf den Fachkräftemangel weiterhin die Leistungs- und Wettbewerbsfähigkeit gewährleisten zu können. Vor diesem Hintergrund beschäftigt sich die vorliegende Untersuchung mit der systematischen Auswahl und dem Einsatz von Technologien zur Lokalisierung in Krankenhausprozessen.

2.5 Krankenhausspezifische Einsatzmöglichkeiten von Indoor-Lokalisierung

Angesichts der dargestellten Zukunftsherausforderungen für die deutsche Krankenhauslandschaft gilt es, die Chancen der Digitalisierung und der damit verbundenen Krankenhaus 4.0 Konzepte systematisch zu nutzen. Die Indoor-Lokalisierung wurde als Teilbereich des Krankenhaus 4.0 Konzeptes eingeordnet und die systematische Auswahl entsprechender Technologien für Einsatzbereiche in Krankenhäusern steht im Mittelpunkt der Masterarbeit.

Für die Identifikation von krankenhausspezifischen Einsatzmöglichkeiten der funkwellenbasierten Indoor-Lokalisierung finden sich in der Literatur bisher keine umfassenden Systematisierungsansätze. Vielmehr werden in Beiträgen Einzelanwendungen betrachtet oder verschiedene Anwendungsoptionen listenartig zusammengestellt. Sowohl für eine wissenschaftliche Analyse als auch für das Krankenhausmanagement erscheint es zielführend, für die Identifikation und Verortung von Indoor-Lokalisierungsoptionen in Krankenhäusern einen Systematisierungsrahmen zu nutzen, der einerseits für die Strukturierung von Krankenhausaktivitäten und -prozessen geeignet ist und andererseits auch eine hinreichende Akzeptanz im Krankenhausmanagement erreicht hat. Im Rahmen der vorliegenden Masterarbeit soll hierzu auf den Wertkettenansatz zurückgegriffen werden, der in den 1980er Jahren von Michael Porter (1985) für klassische Wertschöpfungsaktivitäten im Konsum- und Industriegüterbereich entwickelt wurde und in den letzten Jahrzehnten zunehmend auf Dienstleistungssektoren wie z. B. Krankenhäuser übertragen wurde (Pitta & Laric, 2004; Albarune, Farhat & Afzal, 2015). Die Übertragung des Wertschöpfungskettenansatzes auf Krankenhäuser wurde beispielsweise genutzt, um das Qualitätsmanagement zu verbessern oder Prozesse effektiver auf betriebswirtschaftliche Ziele und den Patient:innennutzen auszurichten (vgl. z. B. Walters & Jones, 2001, S. 319ff; De Korne et al., 2009, S. 245ff; Porter & Thomas, 2013, S. 50ff).

Im Folgenden wird der Wertschöpfungskettenansatz zur Verortung von Einsatzmöglichkeiten der Indoor-Lokalisierung in Krankenhäuser genutzt. Hierzu wird die Grundstruktur eines auf den Krankenhauskontext übertragenen Wertkettenmodell von Töpfer (2010) verwendet (vgl. **Abbildung 6**). Grundsätzlich bietet die Nutzung dieses Modells für die Identifizierung von Einsatzbereichen der Indoor-Lokalisierung die folgenden Vorteile:

- Der Einsatz von Lokalisierungstechnologien kann direkt einzelnen Prozessen zugeordnet werden, sodass sich konkrete Ansatzpunkte für die Prozessintegration ergeben. Grundsätzlich bilden Prozesse eine zeitliche Abfolge von Aktivitäten, die in einem inhaltlichen Zusammenhang stehen (Töpfer, 2010, S. 437), sodass gezielt jene Teilaktivitäten ermittelt werden können, die durch Technologien der Indoor-Lokalisierung beeinflusst bzw. überflüssig werden.
- Über die Identifikation von Prozessen bzw. Prozessteilen können auch die prozessverantwortlichen Mitarbeitenden ermittelt werden. Diese können für ein Projektmanagement zur Implementierung von Indoor-Lokalisierungstechnologien einbezogen und/oder im Umgang mit Lokalisierungstechnologien geschult werden.
- Die Verwendung des Wertschöpfungskettenansatzes zwingt das Krankenhausmanagement in der Praxis dazu, den Bezug zwischen den einzelnen Prozessen und den sich daraus ergebenden Wirkungen zu betrachten. Letztlich beeinflussen Kern-, Steuerungs- und unterstützende Prozesse die krankenhausspezifische Wertschöpfung (vgl. Abbildung 6). Werden Prozesse durch neue Technologien (z. B. der Indoor-Lokalisierung) angepasst bzw. verändert, so hilft der Ansatz, die Wirkungen der Digitalisierung (vgl. auch Kapitel 2.4) auf die Wertschöpfung zu operationalisieren.
- Die Wertschöpfungskette vermittelt einen Überblick über alle Kern-, Steuerungs- und Unterstützungsprozesse im Krankenhaus. Hierdurch können die direkten wie auch indirekten Wirkungen, die durch die Implementierung der Indoor-Lokalisierung erzielt werden können, gesamthaft ermittelt und veranschaulicht werden. Zu den direkten Wirkungen sollen jene Effekte gezählt werden, die direkt in dem Prozess, in dem die Technologie eingesetzt wird, und bei den hier involvierten Personen (Patient:innen, Krankenhauspersonal u. a.) ermittelt werden können (z. B. Verbesserung der Orientierung für Patient:innen, Zeitersparnisse des Krankenhauspersonals für das Auffinden von Medizintechnik etc.). Interessant sind aber auch indirekte Wirkungen, die durch die Indoor-Lokalisierung in anderen Prozessen ausgelöst werden. So können z. B. Informationen der Indoor-Lokalisierung im Controlling und der Materialwirtschaft genutzt werden, um die Ressourcenverfügbarkeit zu steuern bzw. nicht genutzte Ressourcenpotentiale zu identifizieren. Indirekte Wirkungen können sich auch für das Gebäudemanagement ergeben, wenn eine effiziente Patient:innenführung die Anpassung der Infrastruktur erfordert.

Somit bleibt festzuhalten, dass die Verortung der Indoor-Lokalisierung in krankenhausspezifischen Wertschöpfungsketten und den dort dokumentierten Prozessen sowohl den spezifischen Einsatz in einzelnen Prozessen aufzeigen kann wie auch die hiermit verbundenen direkten und indirekten Wirkungen über alle Prozesse hinweg.

Abbildung 6 zeigt eine typische Wertschöpfungskette eines Krankenhauses mit den patient:innenorientierten Kernprozessen sowie den hierfür notwendigen Steuerungsprozessen des Krankenhausmanagements und den unterstützenden Prozessen, die auf die Kernprozesse ausgerichtet sind und eine Entwicklung von notwendigen Ressourcen (z. B. Personal, Schulungskapazitäten, Medizintechnik, Gebäudeinfrastruktur etc.) für die Krankenhausprozesse sicherstellen (Töpfer, 2010, S. 437ff). In der

Wertschöpfungskette sind zentrale Einsatzbereiche von Technologien der Indoor-Lokalisierung gekennzeichnet sowie deren indirekte Wirkungen auf andere Krankenhausprozesse. Dieser Überblick zeigt, dass sowohl direkte Wirkungen der Implementierung von Indoor-Lokalisierung wie auch indirekte Wirkungen zu identifizieren sind. Die indirekten Wirkungen ergeben sich vielfach aus den über die Indoor-Lokalisierung generierten (Echtzeit-)Daten und die hierüber vermittelten Erkenntnisse z. B. für eine effizientere Personaleinsatzplanung, Geräteauslastung u. a. m.



Abbildung 6: Verortung von Einsatzmöglichkeiten der Indoor-Lokalisierung in der Wertschöpfungskette eines Krankenhauses⁹

In **Tabelle 3** werden die in der Wertschöpfungskettendarstellung verorteten Einsatzmöglichkeiten der Indoor-Lokalisierung nach den jeweiligen Prozesskategorien ausführlicher gekennzeichnet (Klauber et al., 2019; Muhr et al., 2019; Roland Berger GmbH, 2018).

Art	Mögliche Einsatzoptionen von Indoor-Lokalisierungstechnologien und deren Informationen	Betroffene Personen	Wirkungsdimensionen
Steuerungsprozesse	Krankenhausstrategie: <ul style="list-style-type: none"> Integration von Technologien der Indoor-Lokalisierung in ein Gesamtkonzept Krankenhaus 4.0 Planung von Integration- und Vernetzungspotenzialen mit anderen Technologien 	Management	indirekt
	Controlling: <ul style="list-style-type: none"> Nutzung der durch die Indoor-Lokalisierung generierten Daten zur Optimierung von Prozessen 	Management Mitarbeitende	indirekt
Patient:innenorientierte Kernprozesse	Patient:innenaufnahme: <ul style="list-style-type: none"> Patient:innenleitsysteme 	Patient:innen, Mitarbeitende	Direkt
	Diagnostik: <ul style="list-style-type: none"> Patient:innenleitsystem zur effizienteren Orientierung während komplexen und räumlich verteilten Diagnoseaktivitäten Reduktion von Wartezeiten durch dynamische Diagnostik-Planung mithilfe von Echtzeitdaten 	Patient:innen	Direkt
	Therapie: <ul style="list-style-type: none"> Steigerung der Verfügbarkeit von medizinischen Geräten Navigation von Patient:innen zur Therapieplätzen 	Patient:innen, Mitarbeitende	Direkt

⁹ Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an die Wertschöpfungskettenstruktur von Töpfer (2010, S. 437).

Art	Mögliche Einsatzoptionen von Indoor-Lokalisierungstechnologien und deren Informationen	Betroffene Personen	Wirkungsdimensionen
Unterstützende Prozesse	Pflege: <ul style="list-style-type: none"> • Druck- und Lokalisierungssensoren zur Patient:innenüberwachung/-monitoring • Bewegungsprofile zur Dokumentation von Regenerationsaktivitäten von Patient:innen 	Patient:innen, Mitarbeitende	Direkt
	Qualitätsmanagement: <ul style="list-style-type: none"> • Identifikation defekter Geräte • Analyse von Verzögerungen in Behandlungsprozessen 	Mitarbeitende	Indirekt
	Finanz-/Rechnungswesen: <ul style="list-style-type: none"> • Investitionen- und Kosten für die Implementierung und den laufenden Betrieb von Indoor-Lokalisierungstechnologien 	Mitarbeitende	Indirekt
	Personalwesen/-entwicklung: <ul style="list-style-type: none"> • Ermittlung der Entlastung bei der Patient:innenbetreuung • Schulungskonzepte für die Bedienung der Indoor-Technologien und die Informationsauswertung • Anpassung der Personalplanung durch effizientere Behandlungs-, Pflege- und Betreuungsprozesse 	Mitarbeitende	Direkt und indirekt
	Einkauf/Materialwirtschaft: <ul style="list-style-type: none"> • Mitwirkung in einem Projektteam • Auswertung der Ressourcenverfügbarkeit zur Optimierung der Gerätebestände • Ggf. Einrichtung automatisierter Einkaufs-/Bestellprozesse (z. B. beim Tracking von klinischem Verbrauchsmaterial) 	Mitarbeitende	Indirekt
	Technik-/Gebäudemanagement: <ul style="list-style-type: none"> • Mitwirkung in einem Projektteam • Ggf. infrastrukturbezogene Anpassungen zur Implementierung von Sensoren etc. • Ggf. kontinuierliche Wartungsaufgaben in der Abstimmung mit der IT-Abteilung 	Mitarbeitende	Indirekt
	IT-/Informationsmanagement: <ul style="list-style-type: none"> • Ggf. Übernahme der Projektleitung für die Planung und Implementierung • Sicherstellung der Integration mit anderen Technologien im Rahmen einer Krankenhaus 4.0 Strategie • Datenverarbeitung und -speicherung, Wartung der neuen Indoor-Lokalisierungstechnologien • Informations- und Schulungsaufgaben 	Mitarbeitende	Direkt

Tabelle 3: Wahrnehmung von betriebswirtschaftlichen Chancen durch den Einsatz von Indoor-Lokalisierung¹⁰

¹⁰ Quelle: Eigene Darstellung auf Basis der Literaturlauswertung und Einschätzung des Autors.

3 *Internet der Dinge*

In diesem Kapitel werden der Begriff und die Entwicklung des IdD (engl. Internet of Things – kurz: IoT) beschrieben und die Ansätze sowie Konzepte der Indoor-Lokalisierung in dieses Forschungsfeld eingeordnet.

3.1 *Definition und Entstehung*

Der Begriff *Internet of Things* geht zurück auf Kevin Ashton, der diesen 1999 als Titel für eine Präsentation vor Führungskräften bei Procter & Gamble zum Einsatz der RFID-Technologie innerhalb der Logistik bzw. des Supply Chain Management wählte (Ashton, 2009, S. 1). Im Jahr 1999 betrug die Größe des Internet schätzungsweise 50 Petabyte. Diese Datenmenge wurde 1999 im Gegensatz zum heutigen Volumen des Internet primär durch die manuelle Eingabe von Menschen erstellt (Ashton, 2009, S. 1). Mit dem Untertitel *In the real world, things matter more than ideas* beschrieb Ashton seine Vision des IdD (Ashton, 2009, S. 1). Die Grundgedanken, die 1999 zur Wahl des Begriffes führten, sind im Folgenden zusammenfassend dargestellt (Ashton, 2009, S. 1):

- Computer sowie das Internet basieren ausschließlich auf Informationen, die von Menschen erfasst und eingepflegt werden.
- Menschen und deren Umwelt sind physisch. Die Menschen sind nicht besonders gut darin, Informationen über Dinge und Daten der realen Welt zu erfassen. Das Problem ist die Fehleranfälligkeit bei der händischen Eingabe der Daten durch den Menschen bedingt durch begrenzte Zeit, Aufmerksamkeit und Genauigkeit bei der Datenerfassung.
- Ideen und Informationen haben eine besondere Stellung, aber physische Objekte haben für den Menschen einen höheren Stellenwert – die Wirtschaft, die Gesellschaft und das Überleben der Menschen basiert nicht auf Ideen oder Informationen, sondern primär auf Gegenständen.
- Durch den Einsatz von RFID und Sensortechnologien können Computer die reale Welt beobachten und ohne die Hilfe des Menschen Informationen über Objekte erfassen.
- Durch diese automatisierte und genauere Art der Datenerfassung können Abfall, Kosten sowie Verluste erheblich reduziert und Informationen von Objekten der realen Welt zuverlässiger ermittelt werden. Durch diese effizientere Art der Informationsbeschaffung können weitere Optimierungen vorgenommen werden. Wartungsarbeiten oder Rückrufaktionen von Objekten und Geräten können beispielsweise ohne Einschränkungen und ohne die Notwendigkeit von händisch eingegebenen ggf. fehlerhaften Daten erfolgen.

Somit entwickelte sich der Ansatz, Informationen und Daten von physischen Objekten und deren Zuständen in der Welt durch Sensoren automatisch zu erfassen und durch die Vernetzung weiterzugeben. Durch die Integration von Alltagsgegenständen in das Internet wird dieses zunehmend in die reale Welt „verlängert“ (Mattern & Flörkemeier, 2010, S. 1). Die Allgegenwärtigkeit der Rechenkapazität durch kleine, preiswerte Mikrokontroller wurde bereits vor der Idee des IdD im Jahr 1991 unter dem Begriff „Ubiquitous Computing“ von Mark Weiser (1991, S. 1) beschrieben: „Specialized elements of hardware and software, connected by wires, radio waves and infrared, will be so ubiquitous that no one will notice.“ Diese Definition zeigt ebenfalls, dass der technologische Fortschritt im Bereich von Funktechnologien bzw. der drahtlosen Kommunikation eine wesentliche Bedeutung für die Vernetzung der physischen Welt hat. Die Begriffe *Internet of Things* und *Ubiquitous Computing* können den-

noch unterschieden werden. Im IdD werden alle Objekte an das Internet angebunden. In dem Begriffsverständnis des Ubiquitous Computing hingegen können Objekte auch lediglich über lokale Netzwerke verbunden oder unter Umständen gar nicht vernetzt sein (Engemann & Sprenger, 2015). Im IdD konvergieren verschiedene Konzepte, Trends und Technologien. Beispielsweise Ubiquitous Computing als Trend für die zunehmende Miniaturisierung, Sensornetzwerke bzw. Funktechnologien für die Adressierung und Vernetzung sowie Cloud-Computing einschließlich Big Data zur Interpretation und Auswertung der generierten Daten (Engemann & Sprenger, 2015, S. 14).

3.2 Entwicklung

Die zunehmende Vernetzung und Allgegenwärtigkeit von Computern und Sensoren sind insbesondere auf die Fortschritte in den Bereichen der Mikroelektronik, Kommunikations- sowie Informationstechnologien zurückzuführen (Mattern & Flörkemeier, 2010, S. 107). Bedingt durch die Steigerung der Leistung von Prozessoren, die sinkenden Preise, die abnehmende Größe, den abnehmenden Energiebedarf sowie die zunehmende Vielzahl an neuen IKT, insbesondere Funktechnologien, dringen die Verarbeitung von Informationen sowie die Möglichkeiten der Vernetzung in Gegenstände des täglichen Gebrauchs ein (Mattern & Flörkemeier, 2010, S. 107). **Abbildung 7** zeigt auf der Grundlage einer Rückschau und Projektion aus dem Jahre 2008 einen Zeitstrahl mit der Reichweite und den Entwicklungsstufen der IdD. Die Grundlage bildete im Jahr 1999 das Auto-ID-Verfahren unter Verwendung der RFID-Technologie. Der Einsatz von RFID-Tags innerhalb der Lieferkette und Warenwirtschaft stand bis Mitte des letzten Jahrzehnts maßgeblich im Vordergrund. Durch die massive Reduktion der Kosten (vor allem der Tags) verbreitete sich die Verwendung von RFID sehr schnell, so dass diese Technologie mittlerweile flächendeckend in fast allen Branchen eingesetzt wird. Beispielsweise zur eindeutigen Identifikation und Nachverfolgung sowie für Überwachungs- und Sicherheitsapplikationen im Transportwesen, Handel, Gesundheitswesen sowie in der Lebensmittelindustrie.

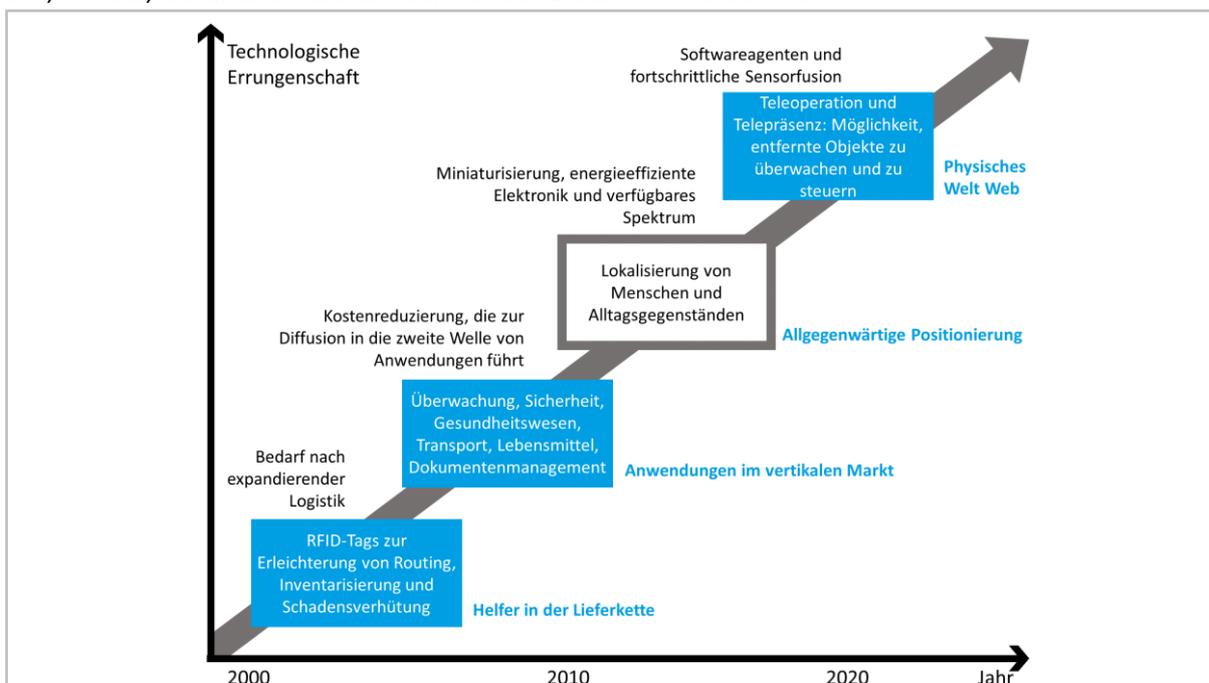


Abbildung 7: Entwicklung des Internet der Dinge¹¹

¹¹ Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an SRI Consulting Business Intelligence (2008, Appendix F-1).

Neben RFID bieten heutzutage weitere Funktechnologien ebenfalls die Möglichkeit, Objekte zu identifizieren und auch zu lokalisieren. Der Zeitstrahl zeigt, dass diese Phase des IdD (seit 2017) als „Ubiquitous Positioning“ bezeichnet wird und die Möglichkeit schafft, Menschen und Objekte allgegenwärtig zu lokalisieren (vgl. Abbildung 7 und SRI Consulting Business Intelligence, 2008, Appendix F-3). Neben etablierten Möglichkeiten zur Lokalisierung außerhalb von Gebäuden, beispielsweise mithilfe des globalen Positionierungssystems (GPS), können Geräte unter Verwendung unterschiedlicher Verfahren und Technologien heutzutage auch die Position innerhalb von Gebäuden bestimmen. Diese Anwendungsperspektive steht im Mittelpunkt der vorliegenden Masterarbeit.

Systeme zur Indoor-Lokalisierung bzw. Echtzeit-Lokalisierung speziell auf Grundlage von Funktechnologien können in das Forschungsfeld des IdD eingeordnet werden. Weiterhin zählen Funktechnologien mit zu den elementaren Bausteinen des IdD und sind maßgeblich für die Vernetzung von Objekten und Geräten. Der im Jahr 2008 entwickelte Zeitstrahl zeigt die Prognose, dass im Jahr 2020 die Möglichkeit besteht, entfernte Objekte zu steuern und zu überwachen. In verschiedenen Anwendungsbereichen wie der Industrie 4.0 und des Smart Home ist dies bereits Realität geworden (Engemann & Sprenger, 2015, S. 13). Im Smart Home-Ansatz werden Funktechnologien zur Vernetzung von beispielsweise Lampen, Lichtschaltern, Bewegungssensoren, Heizungssteuerung und weiteren Haushaltgeräten eingesetzt (Systeme sind z. B. Google Nest, Apple HomeKit und Philipps Hue).

Im Gegensatz zum Datendurchsatz kann die genaue Größe des Internet heutzutage kaum zuverlässig bestimmt werden. Der in **Abbildung 8** dargestellte Anstieg des Datendurchsatzes im Breitband bzw. Festnetz in Deutschland zeigt jedoch, dass die Menge an transportierten Daten in den vergangenen 18 Jahren kontinuierlich angestiegen ist (Statistisches Bundesamt, 2019). Dieser Trend wird sich auch in den kommenden Jahren fortsetzen. Die Gründe für den zunehmenden Anstieg sind vielfältig. Das zunehmende Streaming von Videos in hoher Qualität erzeugte in den vergangenen Jahren insbesondere einen explosionsartigen Anstieg der Datendurchsätze im Festnetz sowie in mobilen Netzen (Rao, Lim, Barakat, Legout, Towsley & Dabbous, 2011, S. 1). Doch auch die zunehmende Vernetzung von Gegenständen des Alltags und der wachsende Einsatz von Lokalisierungssystemen führt dazu, dass die Menge an Daten ansteigt. Heutzutage wird eine Vielzahl der über das Internet übertragenen Daten nicht mehr nur durch den Menschen maßgeblich verursacht, sondern auch durch die Erfassung der Sensordaten von IoT-Anwendungen in hohen zeitlichen Intervallen (Zanella, Bui, Castellani, Vangelista & Zorzi, 2014, S. 27).

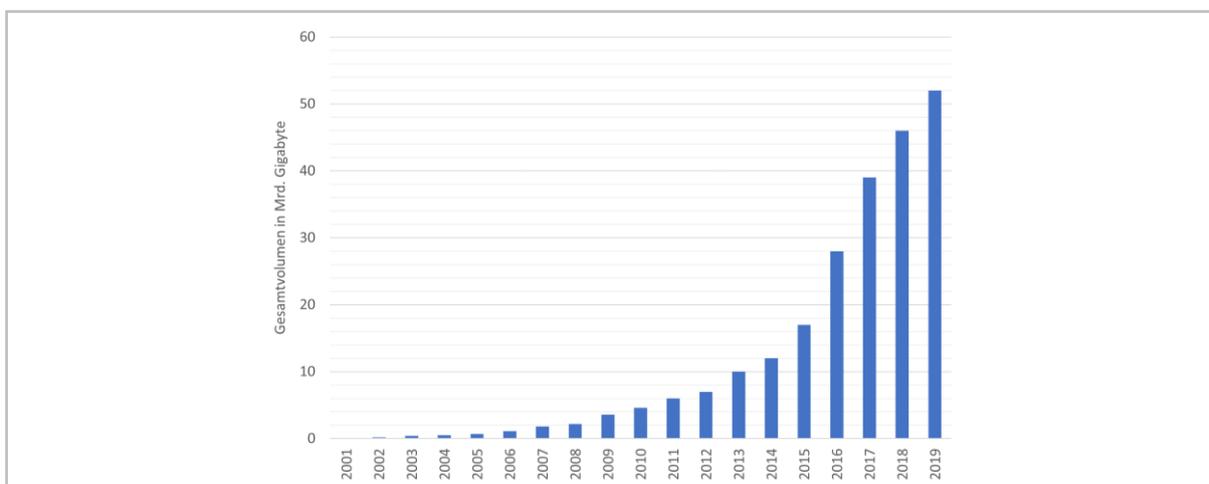


Abbildung 8: Entwicklung der Höhe des Breitbandvolumen in Festnetzen in Deutschland von 2001 bis 2019¹²

¹² Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Statistisches Bundesamt (2019).

Die Anzahl der im Internet zur Adressierung von Netzwerkgeräten zur Verfügung stehenden IPv4-Adressen (Internet Protocol Version 4) von ca. 4 Milliarden ($2^{32} = 2564 = 4.294.967.296$) ist bereits ausgeschöpft (Durand, Droms, Woodyatt & Lee, 2011, S. 2). Für die Vernetzung der Vielzahl von neuen Geräten, bedingt durch das IdD, wird daher der Einsatz von IPv6-Adressen (Internet Protocol Version 6) notwendig. IPv6 erhöht den Adressraum (2^{128}) und steigert damit die Anzahl der vernetzbaren und eindeutig adressierbaren Geräte im Internet auf 340 Sextillionen (Zanella et al., 2014, S. 27). In den nächsten 20 Jahren wird die Anzahl an neuen mit dem Internet verbundenen IoT-Geräten auf ca. 25 Milliarden ansteigen, die insgesamt ein Volumen von schätzungsweise 44 Zettabyte an Daten generieren (Lueth & Kotzorek, 2015, S. 2). Für die Erfassung und Verarbeitung der Daten des IoT werden entsprechende Architekturen und Plattformen benötigt, die im nachfolgenden Abschnitt im Überblick beschrieben werden, weil sie auch für die Infrastruktur der Indoor-Lokalisierung eine Voraussetzung darstellen.

3.3 Referenzarchitektur

Die Architektur des IdD kann in mehrere Schichten unterteilt werden. Die Referenzarchitektur umfasst eine Erfassungs- bzw. Sensor-, Netzwerk-, Datenverarbeitungs- und Anwendungssicht (vgl. **Abbildung 9**).

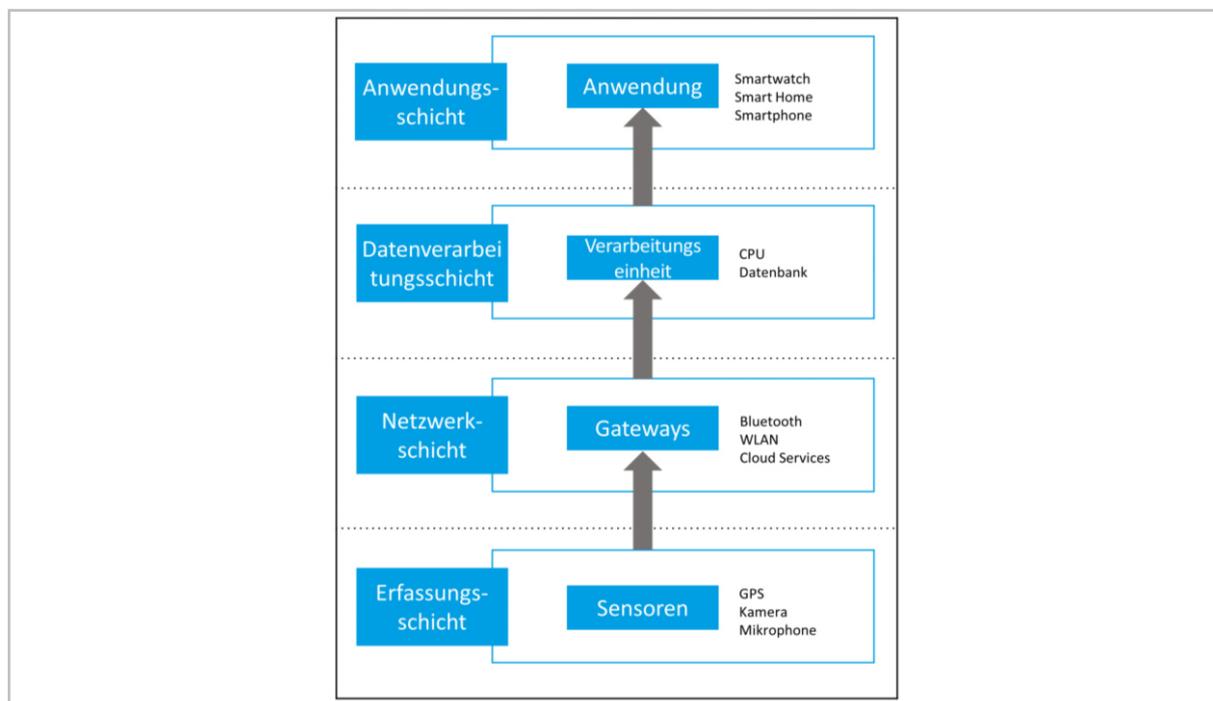


Abbildung 9: Referenzarchitektur des Internet der Dinge¹³

Der Hauptzweck der Erfassungsschicht („Sensing Layer“) besteht darin, Informationen aus der realen Welt durch Sensoren zu erfassen. Die einzelnen Sensoren werden über ein Gateway oder einen sogenannten Sensorhub in eine Netzwerkstruktur („Network Layer“) eingebunden. Ein Gateway bzw. Sensorhub ist ein zentraler Verbindungspunkt für verschiedene Sensoren und dient dazu, die Informationen zu sammeln sowie zu aggregieren und über ein Netzwerk an die darüberliegende Sicht zur Datenverarbeitung weiterzugeben. Ein Sensorhub kann abhängig von den eingesetzten Sensoren über verschiedene Transportmechanismen wie beispielsweise den Bussystemen Inter-Integrated Circuit oder Serial Peripheral Interface angebinden werden, die den Datenfluss zur Verarbeitungsschicht („Data Processing Layer“) ermöglichen (Sikder et al., 2018, S. 2). Auf der Netzwerkebene werden oftmals

¹³ Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Sikder, Petracca, Aksu, Jaeger & Uluagac (2018, S. 3).

Nachrichtenprotokolle bzw. sogenannte Message-Broker (Client-Server-Protokolle mit Publish-Subscribe Funktionalitäten) wie Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) als Mechanismen zum Versenden der Daten eingesetzt (Wortmann & Flüchter, 2015, S. 222). Für die Erfassung existieren unterschiedliche Arten von Sensoren (Sikder et al., 2018, S. 2):

- Bewegungssensoren für Bewegungen bzw. Änderungen der Ausrichtung von Geräten (Gyroskop bzw. Kreiselinstrumente und Beschleunigungssensoren)
- Umgebungssensoren für Änderungen von Umgebungsparametern (z. B. Annäherungs- Temperatur-, Licht-, Feuchtigkeits-, Luftdruck- sowie akustische und visuelle Sensoren)
- Positionierungssensoren zur Bestimmung des Standortes eines Gerätes (z. B. Magnetsensoren oder GPS)

Die Netzwerkschicht ermöglicht die Übertragung der Daten, die von den Sensoren erfasst wurden. Die technologische Grundlage dafür bilden Ethernet-Verbindungen sowie moderne Funktechnologien. Die Verarbeitungssicht umfasst eine Recheneinheit zur Verarbeitung und Analyse der erfassten Daten. In dieser Schicht können die Daten von unterschiedlichen Sensoren zusammengefasst ausgewertet sowie der Applikationssicht („Application Layer“) bereitgestellt werden.

Für die effiziente Nutzung und Verwaltung von IoT-Geräten werden vermehrt sogenannte IoT-Plattformen entwickelt und eingesetzt. Mittlerweile entwickeln alle großen Anbieter von Cloud-Software ebenfalls IoT-Plattformen. Prominente Vertreter dafür sind beispielsweise Microsoft Azure IoT, Amazon Web Services, Google Cloud Platform, ThingWorx, Cisco IoT Cloud Connect, Universal of Things von Hewlett Packard oder die Bosch IoT Suite sowie IBM Watson IoT (Tredwell, 2018; Hejazi, Rajab, Cinkler & Lengyel, 2018, S. 5–6). In dem Aufbau und der Funktionsweise entsprechender Plattformen sind die Schichten der Referenzarchitektur erkennbar. Unter dem Begriff „Technology Stack“ des IdD wird in einer Betrachtung von Michael Porter und James Heppelmann (2014, S. 7) das technologische Ökosystem des IdD zusammengefasst. **Abbildung 10** wurde in Anlehnung an Wortmann und Flüchter (2015), erstellt, die sich ihrerseits an der Betrachtung von Porter und Heppelmann (2014) orientierten. Sie zeigt das Ökosystem von IoT-Plattformen. Die Darstellung zeigt die drei Bereiche Cloud, Konnektivität und Geräte, die den drei Schichten Applikationen, Netzwerk und Sensorik der Referenzarchitektur entsprechen. Eine Ergänzung und wichtiger funktioneller Bestandteil des Bereiches Ding/Gerät ist demnächst die Firmware zur Verwaltung. Die Endanwender greifen über die IoT-Cloud auf spezielle Anwendungen, Analysetools, sowie Werkzeuge zur Verwaltung von Geräten und verknüpften Prozessen zu und haben somit umfassende Möglichkeiten zur Nutzung und Administration einer IoT-Infrastruktur einschließlich den Geräten.

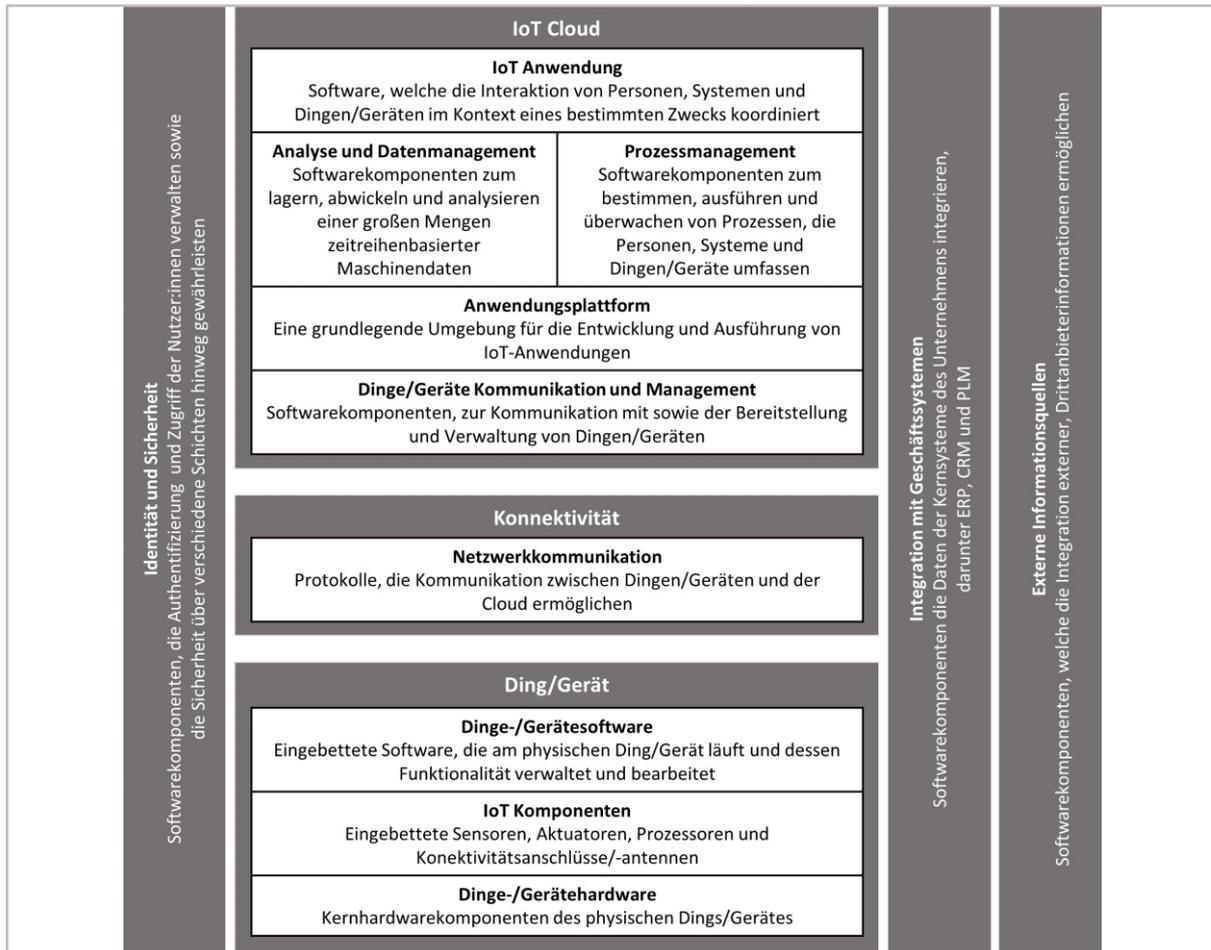


Abbildung 10: Technologien für den Aufbau von IoT-Systemen¹⁴

Das Gerätemanagement ist eine wesentliche Komponente, um beispielsweise Sensoren und Geräte zu kalibrieren oder Statusinformationen (z. B. Batterielaufzeiten) abzufragen. Abbildung 10 zeigt auch die Netzwerkschicht, bestehend aus unterschiedlichen Protokollen für die Vernetzung der Geräte. Weitere wichtige Komponenten von IoT-Plattformen sind Sicherheitsmechanismen wie Benutzerverwaltung und -authentifizierung. Entsprechende Plattformen bieten nur betriebliche Abläufe und zudem oftmals nur entsprechende Mehrwerte, wenn diese einfach und flexibel in unternehmensinterne Software wie Enterprise-Resource-Planning-, Customer-Relationship-Management- sowie Produktions- und Logistiksysteme eingebunden werden können. Auch die Integration weiterer Drittsoftware über Schnittstellen hat eine hohe Bedeutung, um die Systeme mit weiteren Informationen anzureichern. Die Konzepte der allumfassenden Vernetzung, umfangreiche Auswertungs- und Analysemöglichkeiten und vollständigen Integrationsfähigkeit für Prozesse, Sensordaten und weiteren Informationsquellen sind daher charakteristisch für IoT-Plattformen. Für die Vernetzung und effiziente Verwaltung der Komponenten von Systemen der Indoor-Lokalisierung auf Basis von Funktechnologien werden ebenfalls geeignete Plattformsätze benötigt. Wesentliche Funktionalitäten in diesem Kontext sind Möglichkeiten zur Herstellung eines notwendigen räumlichen Bezugs der Signalgeber auf einer digitalen Karte. Neben geeigneten Funktionen zur Abfrage und Visualisierung der Standortinformationen sowie Auswertung der erfassten Daten werden auch beispielsweise Möglichkeiten zur Abfrage des Batteriestatus von Asset-Tags benötigt, um die Wartung optimal durchzuführen und einen zuverlässigen Betrieb gewährleisten zu können.

¹⁴ Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Wortmann und Flüchter (2015, S. 223).

3.4 Funktechnologien

Wie in allen Bereichen der IKT finden auch im Rahmen der Funktechnologien kontinuierlich Weiterentwicklungen statt. Dazu zählen Fortschritte in der Leistungsfähigkeit insbesondere bezüglich Datenraten, Reichweiten, Energiebedarf sowie den Möglichkeiten der Integration in vorhandene Infrastrukturen (Steffen & Augel, 2007, S. 40). Die Anzahl der verfügbaren Technologien einschließlich der unterschiedlichen Ausprägungen (Standards und Protokolle) ist in den vergangenen Jahren erheblich angestiegen (Steffen & Augel, 2007, S. 42). Diese Entwicklung verdeutlicht das hohe Einsatzpotenzial, welches diese Funktechnologien bieten.

In der nachfolgenden **Tabelle 4** werden einzelne Funkstandards und die primären Anwendungsbereiche zusammenfassend dargestellt. Gerade im Bereich der industriellen Kommunikation, Heimautomatisierung, Landwirtschaft und Medizintechnik werden zunehmend Low-Power-Funktechnologien (Low Power Wide Area Network – kurz: LPWAN) eingesetzt (Steffen & Augel, 2007, S. 40). Neben den im Endverbrauchermarkt weit verbreiteten Funktechnologien für Kurzstreckenkommunikation (engl. Wireless Personal Area Network – kurz: WPAN) wie RFID, WLAN und BT haben sich in den letzten Jahren auch Protokolle und Spezifikationen wie BLE, UWB, Sigfox, ZigBee, Z-Wave, Enocean, LoRa und NB-IoT zunehmend verbreitet, die für unterschiedliche Anwendungsbereiche aufgrund der technischen Spezifikationen besonders geeignet sind (Steffen & Augel, 2007, S. 42ff).

Technologie	Frequenzband	Max. Datenrate	Max. Reichweite	Anwendungsbereiche
NFC	13,56 MHz	424 Kbit/s	10 cm	<ul style="list-style-type: none"> • Kontaktloses Bezahlen (EC-/Kreditkarten) • Identifikation in der Tierhaltung
LF-RFID	125–135 kHz	4 Kbit/s	1,5 m	<ul style="list-style-type: none"> • Zugangskontrolle (z. B. bei Autos) • Identifikation in der Tierhaltung • Inventar
HF-RFID	13,56 MHz	424 Kbit/s	1,5 m	<ul style="list-style-type: none"> • Asset-Tracking (auf Artikel- und Gehäuseebene) • Smart Cards
VHF-RFID	433 MHz	10 Mbit/s	300 m	<ul style="list-style-type: none"> • Asset-Tracking • Lokalisierung • Tracking von Containern
UHF-RFID	860–960 MHz	30 Mbit/s	5 m	<ul style="list-style-type: none"> • Asset-Tracking (auf Paletten und Gehäuseebene) • Identifikation im Sport (Rennläufen)
LoRa/LoRa-WAN	433–434 MHz 863–870 MHz	50 Kbit/s	40 km	<ul style="list-style-type: none"> • IoT-Netzwerke/-Anwendungen
Sigfox	868 MHz	100 Bit/s	50 km	<ul style="list-style-type: none"> • Diebstahlschutz • Geotracking in der Logistik • Sensorische Überwachung (Temperatur, Füllstände etc.)/IoT-Anwendungen • Patient:innenüberwachung
NB-IoT LTE-M LTE-Cat-NB-1	800/900 MHz	250 Kbit/s		<ul style="list-style-type: none"> • IoT-Netzwerke/-Anwendungen
GSM UMTS LTE 5G	890–960 MHz 600 MHz–6 GHz	217 Kbit/s 300 Mbit/s 1 Gbit/s 10 Gbit/s	35 km	<ul style="list-style-type: none"> • Mobilfunk/mobiles Internet • Schließtechnik • Status- und Alarmübertragung
ZigBee	868–928 MHz 2,4 GHz	20–40 Kbit/s 250 Kbit/s	100 m	<ul style="list-style-type: none"> • IoT-Netzwerke/-Anwendungen • Smart Home
Z-Wave	850–950 MHz	100 KB/s	200 m	<ul style="list-style-type: none"> • Smart Home

Technologie	Frequenzband	Max. Datenrate	Max. Reichweite	Anwendungsbereiche
EnOcean	868 MHz	125 Kbit/s	300 m	<ul style="list-style-type: none"> • Batterielose Anwendungen • Sensornetzwerke • Gebäudeautomatisierung
BT/BLE	2,4 GHz	3 Mbit/s	70 m	<ul style="list-style-type: none"> • Verbindung von mobilen Geräten und Peripherie • Lokalisierung
WLAN	2,4 GHz 5,0 GHz	150 Mbit/s 1300 Mbit/s	200 m	<ul style="list-style-type: none"> • Heimnetzwerke • Smart Home • Lokalisierung
UWB	3,1–10,6 GHz	1320 Mbit/s	50 m	<ul style="list-style-type: none"> • Anwendungen mit hoher Datenrate über kurze Distanzen • Sensornetzwerke • Radarwendungen • Lokalisierung (hohe Genauigkeit) • Medizinische Anwendungen (Monitoring)

Tabelle 4: Übersicht von Funktechnologien (Frequenzen, Reichweite, Datenrate, Anwendungen)¹⁵

Die Reichweiten der Technologien sind immer abhängig von der konfigurierten Sendeleistung. Tabelle 4 umfasst daher Durchschnittswerte zu Datenraten und Reichweiten der Technologien. Das Frequenzspektrum von Funktechnologien ist in verschiedene Bereiche aufgeteilt, welche als Frequenzbänder bzw. Funkbänder bezeichnet werden (Aktas et al., 2017, S. 21). Die Frequenzbänder von Funktechnologien können in Bezug auf die Lizenz unterschieden werden. Technologien wie LoRa und Sigfox sind beispielsweise lizenzfrei, hingegen ist NB-IoT lizenzpflichtig. In lizenzfreien Frequenzbändern können neue Standards schneller und ohne weitere Einschränkungen entwickelt werden. Bei lizenzpflichtigen Frequenzbereichen müssen zuvor die notwendigen Lizenzen erworben werden, die die Nutzung legitimieren bzw. ermöglichen. Die Technologien können zudem nach proprietären und offenen Standards unterschieden werden. LoRa wird beispielsweise von der LoRa Alliance standardisiert und Sigfox von dem gleichnamigen französischen Unternehmen, beide sind proprietäre Standards. Die freigegebenen Frequenzbänder sind zudem abhängig und unterscheiden sich von den geografischen Regionen (Europa, Asien, Amerika). Sigfox, LoRa und NB-IoT fallen in die Kategorie der LPWAN-Technologien und eignen sich damit für die energieeffiziente Vernetzung von Geräten über große Distanzen (vgl. **Abbildung 11**).

Weiterhin ist zu erwähnen, dass heutzutage auch batterielose Funktechnologien entwickelt werden, die durch unterschiedliche Verfahren die notwendige Energie aus der Umgebung beziehen können. Das zugrundeliegende Forschungsfeld *Energy Harvesting* beschäftigt sich gezielt mit den dafür notwendigen Verfahren. Die Verbesserung der Energieeffizienz ermöglicht längere Laufzeiten im Batteriebetrieb. Heutzutage können Mikrokontroller mit Sensoren durch nur eine Knopfzelle betrieben werden und Datenpakete mit Messwerten unter Verwendung eines energiesparenden Protokolls senden, wodurch Laufzeiten von mehreren Jahren erreicht werden können.

¹⁵ Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von Steffen und Augel (2007, S. 42ff) sowie Aktas et al. (2017, S. 18f).

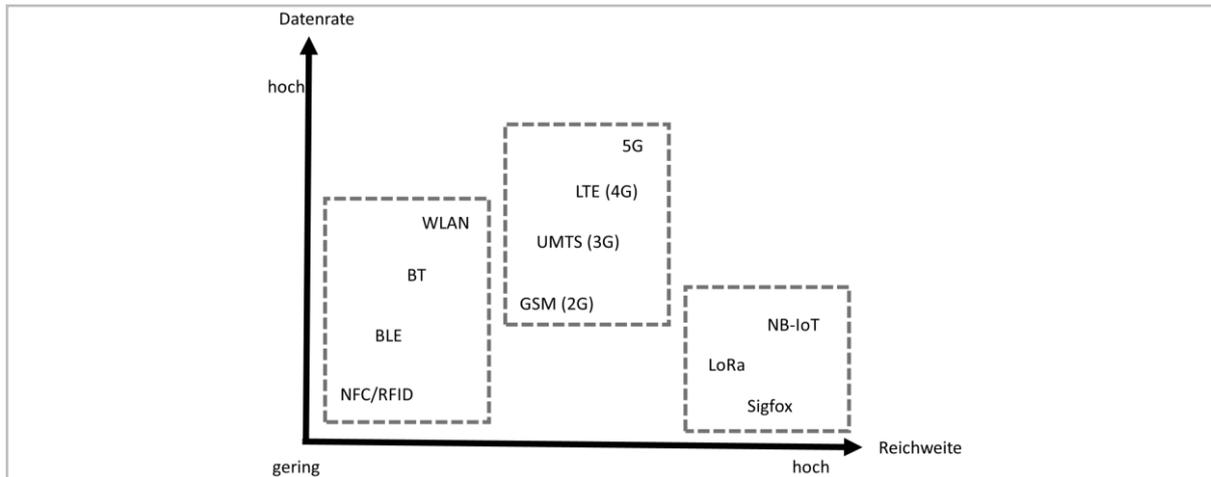


Abbildung 11: Vergleich der Datenrate und Reichweite von unterschiedlichen Funktechnologien¹⁶

Die Funktechnologie UWB kann mittlerweile auch in Deutschland eingesetzt werden, da die notwendigen Frequenzbereiche freigegeben wurden. Die verfügbaren lizenzfreien Frequenzbänder sind in **Tabelle 5** zusammenfassend dargestellt. Die Sendeleistung ist in lizenzfreien Funkbereichen eingeschränkt, wodurch die Reichweite ebenfalls begrenzt wird. BT bietet beispielsweise eine Reichweite – abhängig von der Sendeleistung – von ca. 70 Metern. IEEE 802.11-basierte WLAN-Netzwerke haben hingegen eine Reichweite von ungefähr 200 Metern auf Freiraumflächen (Aktas et al., 2017, S. 21). IEEE steht für Institute of Electrical and Electronics Engineers, einem Konsortium, das sich maßgeblich mit der Standardisierung von Techniken, Hardware und Software beschäftigt. Alle Funktechnologien können zum Aufbau von lokalen Netzwerken eingesetzt werden. Der Aufbau von Punkt-zu-Punkt-Verbindungen und Mesh-Netzwerken ermöglicht die Überwindung größerer Distanzen unter Einschränkung der Latenz. Mobilfunknetze sind zelluläre Systeme, die im lizenzpflichtigen Spektrum senden und mittlere bis hohe Reichweiten bieten.

Frequenzband	Anwendungen	Anmerkung
13,56 MHz	Nahfeldkommunikation; im Wesentlichen für RFID, Smart Tags genutzt	Sehr geringe Datenrate
433,00 MHz	Für „Low Power Devices“ mit geringer Sendeleistung	Nur Region 1 (Europa, Afrika, Nachfolgestaaten der UdSSR)
860,00 MHz	LPWAN: eingeschränkte Sendeleistung, unterschiedliche Bandbreiten, „Duty Cycle“	Nur Region 1; dafür 900 MHz in Region 2 (Nord- und Südamerika)
2,40 GHz	Leistungsbegrenzung. WLAN, Bluetooth®, ZigBee®, WirelessHART® u. a. m.	Weltweit verfügbar, aber sehr stark ausgelastet
5,00 GHz	Anwendungstechnologien WLAN und IWLAN. Datenraten bis etwa 450 Mbit/s.	Bisher weniger stark ausgelastet als das 2,4 GHz Band
24,00 GHz	Radar	Bisher kaum Anwendungen für die Industriekommunikation
60,00 GHz	Hochratige Line-of-Sight Kommunikation	Bisher kaum Anwendungen für die Industriekommunikation

Tabelle 5: Lizenzfreie Frequenzbereiche¹⁷

Der Artikel *Funktechnologien für Industrie 4.0* von Aktas et al. (2017) zeigt die Möglichkeiten des Einsatzes von Funktechnologien sowie die Anforderungen, Herausforderungen und Problemstellungen, die im industriellen Umfeld aufzufinden sind. Zu den wesentlichen Anforderungen von Funksystemen

¹⁶ Quelle: Eigene Darstellung.

¹⁷ Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von Aktas et al. (2017, S. 28).

gehören Verfügbarkeit, Zuverlässigkeit und Echtzeitfähigkeit (Aktas et al., 2017, S. 13). Bei dem Vergleich der Anforderungen von Mobilfunkkommunikation und industrieller Kommunikation sind unterschiedliche Schwerpunkte zu erkennen (vgl. **Abbildung 12**).

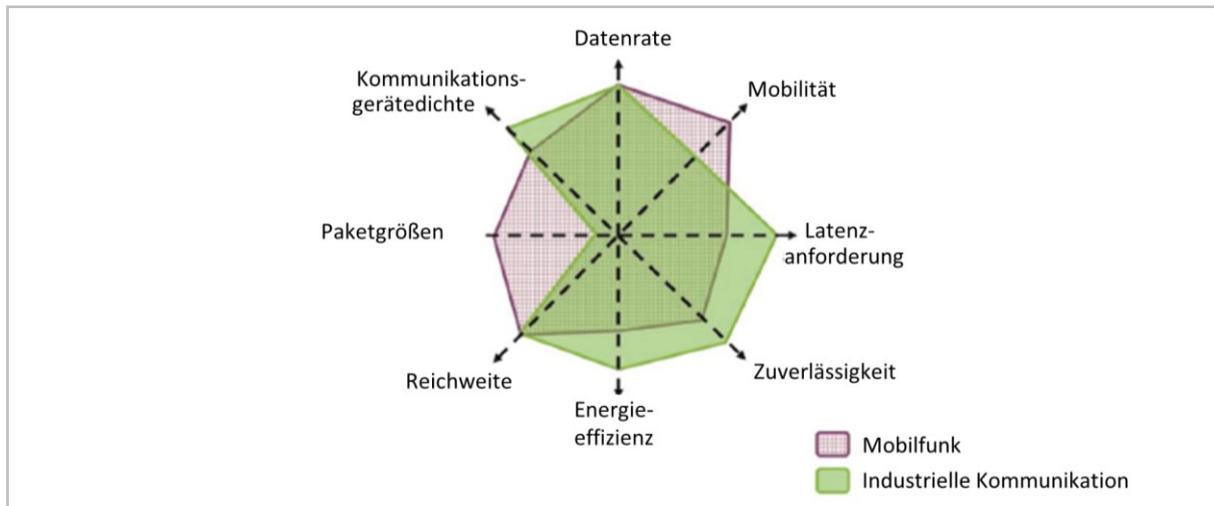


Abbildung 12: Anforderungen an industrielle Kommunikation¹⁸

Bei industriellen Anwendungen müssen demnach eine hohe Zuverlässigkeit, hohe Datenraten und Reichweiten, geringe Latenzen sowie eine entsprechende Energieeffizienz gewährleistet werden. Zusätzlich muss eine Vielzahl an Geräten (Kommunikationsgerätedichte) unterstützt werden (vgl. Abbildung 12). Alle Funktechnologien können innerhalb von Gebäuden zur Indoor-Lokalisierung eingesetzt werden.

3.5 Anwendungsbereiche im Krankenhaus

Die Digitalisierung bietet im Gesundheitswesen und insbesondere für Krankenhäuser verschiedene Möglichkeiten zur Optimierung von Prozessen (vgl. Kapitel 2). In der Gesundheitsversorgung und Pflege können durch Sensoren und Aktoren an bzw. in Betten und Patient:innenzimmern dem medizinischen Personal relevante Daten effizienter und ohne zeitliche Einschränkungen zur Verfügung gestellt werden. Durch einen Drucksensor in einem Bett kann beispielsweise die Herzfrequenz, Atmung und Bewegung beobachtet werden. Durch weitere Sensoren in Räumen und Fluren bzw. in unmittelbarer Nähe zu Patient:innen kann der Sturz einer Person erkannt werden. Die Universität von Virginia hat in einem Forschungsprojekt Beschleunigungssensoren und einen GPS-Empfänger in die Kleidung eingebettet, um den Standort von Patient:innen zu erkennen und bestimmte Aktivitäten zu klassifizieren (SRI Consulting Business Intelligence, 2008, Appendix F-11). Durch Drucksensoren in Betten können möglicherweise auch plötzliche Gewichtszunahmen festgestellt werden, die auf bestimmte Herzerkrankungen und Nebenwirkungen von Betablockern hinweisen können (SRI Consulting Business Intelligence, 2008, Appendix F-11).

Verschiedene Projekte und Firmen vernetzten auch weitere Geräte wie Medizin-Spender oder Hygiene-Spender im Krankenhaus, die die Einhaltung verschreibungspflichtiger Behandlungsschemata und krankenhausspezifischer Prozesse erleichtern (SRI Consulting Business Intelligence, 2008, Appendix F-11). Die deutsche Firma GWA Hygiene nutzt beispielsweise das IdD und entsprechende Sensoren in Kombination mit BLE zum Aufbau von Hygienemonitoring-Lösungen (GWA Hygiene GmbH, 2020). Auch

¹⁸ Quelle: Aktas et al. (2017, S. 21).

Smart Watches oder andere Wearables wie intelligente Pflaster können durch das IdD unter Verwendung von Funktechnologien in Prozesse im Krankenhaus eingebunden werden und ermöglichen somit eine zeitgemäße Behandlung der Patient:innen.

Obwohl die Gesundheitsbranche die Technologien des IdD langsamer adaptiert als andere Branchen, wird das Internet der medizinischen Dinge (engl. Internet of Medical Things – kurz: IoMT) die Art und Weise verändern, wie die Gesundheit und Sicherheit von Patient:innen gewährleistet werden kann, insbesondere angesichts der steigenden Nachfrage und den fehlenden Fachkräften.

Zudem kann der Einsatz zur Senkung der Gesundheitskosten maßgeblich beitragen (Marr, 2018). Dabei kann das IoMT nicht nur helfen, interne Prozesse und Pflegekräfte zu überwachen und zu benachrichtigen, sondern auch weiteren Gesundheitsdienstleistern aktuellere Daten zur Verfügung zu stellen. Dies ermöglicht es, patient:innenbezogene Probleme frühzeitig zu identifizieren, bevor diese kritisch werden. Ein Bericht von Allied Market Research mit der Prognose, dass der IoT-Gesundheitsmarkt bis 2021 weltweit 136,8 Milliarden USD erreichen wird, zeigt die hohe Relevanz der Thematik (Marr, 2018).

Die Betrachtung von Porter und Heppelmann (2014) unterstreicht die hohe Bedeutung des IoT für den Gesundheitsbereich durch die Möglichkeiten des effizienten Monitorings von Patient:innen und Geräten.

4 Verfahren und Messprinzipien der Indoor-Lokalisierung

Die Position von Objekten innerhalb von Gebäuden kann durch verschiedene Verfahren und funktwellenbasierte Messprinzipien, die im Nachfolgenden beschrieben werden, bestimmt werden. Die Veröffentlichungen im Bereich der Indoor-Lokalisierung, verwandter Fragestellungen und Begrifflichkeiten sowie auch die spezifischen Beiträge zum Krankenhauskontext zeigen, dass unterschiedliche Verfahren zur Bestimmung der Position von Objekten existieren und heutzutage eingesetzt werden (vgl. **Abbildung 13**).

Dieses Kapitel schafft daher einen grundlegenden Überblick zu entsprechenden Verfahren und Messprinzipien der funktwellenbasierten Indoor-Lokalisierung, auf denen die vorliegende Arbeit basiert und deren Verständnis für das nachfolgende Kapitel vorausgesetzt wird.

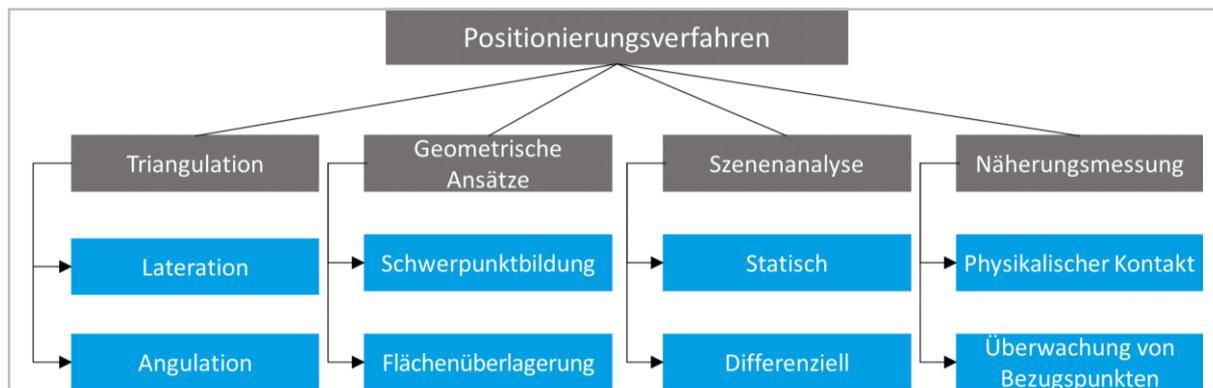


Abbildung 13: Einordnung der Verfahren zur Indoor-Lokalisierung¹⁹

Der Standort eines Objektes ist eine wichtige Determinante für den Kontext von Objekten. Die Position kann absolut in einem fixen Koordinatensystem oder relativ in Bezug zu anderen Objekten beschrieben werden (Eisenhauer, Oppermann & Prinz, 2007, S. 54). Absolute Koordinatensysteme referenzieren ein globales übergeordnetes System (z. B. Längen- und Breitengrade im Rahmen der Kartografie bzw. bei GPS). Relative Koordinatensysteme sind hingegen abhängig von einem lokalen Referenzrahmen, dabei muss die Position von einem Objekt im Vorfeld bestimmt werden, damit in Abhängigkeit dazu die Position des eigentlichen Objektes angegeben werden kann (Mautz, 2012, S. 27).

IPS bieten die Möglichkeit, den Nutzer:innen und IT-Systemen die Standortinformationen von Objekten und Personen zur Verfügung zu stellen und ortsbezogene Relationen abzubilden, beispielsweise welche Objekte sich in unmittelbarer Nähe zu einem bestimmten Gerät oder einer Person befinden oder wohin sich einzelne Objekte bewegen (Eisenhauer et al., 2007, S. 54). Diese Beziehungen können von IT-Systemen gezielt genutzt werden, um auf einen bestimmten Kontext zu reagieren oder den Nutzer:innen relevante Informationen zu Objekten in seiner Nähe zu präsentieren sowie diese zu den Objekten zu führen (Eisenhauer et al., 2007, S. 54). Die Genauigkeit der Positionsbestimmung hängt dabei unmittelbar von dem eingesetzten Messverfahren und den auftretenden Messfehlern sowie der Abtastrate der Systeme und den verwendeten Algorithmen zur Interpretation und Glättung der Messwerte ab (Eisenhauer et al., 2007, S. 54). Welche Genauigkeiten, Latenzen und weiteren Kriterien ein System zur Indoor-Lokalisierung erfüllen muss, hängt von den anwendungsspezifischen Anforderungen ab (Eisenhauer et al., 2007, S. 55). In dem nachfolgenden Kapitel 5 werden aufbauend auf den Verfahren und Technologien die relevanten Kriterien beschrieben, welche in heuristische Entscheidungsverfahren als Bewertungskriterien einbezogen werden können.

¹⁹ Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Blumenthal (2004, S. 8).

Grundlage für die funkwellenbasierte Positionsbestimmung ist die physikalische Eigenschaft, dass die Signalstärke mit der Entfernung zu einer Signalquelle korreliert, das heißt mit steigender Entfernung zu einem Sender nimmt die Signalstärke ab. Durch die Messung von Signalstärken kann somit die Entfernung bestimmt werden (Eisenhauer et al., 2007). Mittels der geometrischen Verfahren der Lateration oder der Angulation, der Szenenanalyse bzw. des Fingerprinting von Signalstärken oder durch Näherungsmessungen kann danach eine relative Position in Relation zu vorhandenen Bezugspunkten ermittelt werden (vgl. Abbildung 13). Im Anhang B sind die Ergebnisse der sektorspezifischen Literaturanalyse zu Verfahren der Indoor-Lokalisierung, die bereits im Krankenhaus angewendet werden, zusammenfassend dargestellt.

4.1 Definitionen

Im folgenden Abschnitt werden die Begriffe Indoor-Lokalisierung, Indoor-Positionierung, Indoor-Tracking, IPS und Echtzeit-Lokalisierung beschrieben und voneinander abgegrenzt. Viele Veröffentlichungen unterscheiden diese Begriffe nicht explizit und verwenden diese synonym. Die Definition der einzelnen Begrifflichkeiten dient jedoch der Präzisierung des Verständnisses der Technologiebewertung.

Indoor-Positionierung

Der Begriff Indoor-Positionierung bezeichnet die Ermittlung der Position innerhalb von Gebäuden unter Bezugnahme von Koordinaten (Eisenhauer et al., 2007, S. 54). In geografischen Informationssystemen bzw. GPS-Systemen werden für die Positionierung in Außenbereichen Längen- und Breitengradangaben als absolute Positionsangaben verwendet. Für die Indoor-Positionierung können klassische räumliche kartesische Koordinatensysteme eingesetzt werden, da die Krümmung der Erde einen zu vernachlässigenden Einfluss hat. Die z-Koordinate im Bereich der Indoor-Positionierung kann einer absoluten Höhenangabe oder auch der Angabe der Etage eines Gebäudes entsprechen. Alternativ kann eine Position auch relativ zu einem anderen Objekt, dessen Position bekannt ist, beschrieben werden (Eisenhauer et al., 2007, S. 54).

Indoor-Lokalisierung

Im Gegensatz zur Indoor-Positionierung bezeichnet der Begriff Indoor-Lokalisierung die Angabe bzw. Ermittlung einer Lokalität innerhalb von Gebäuden. Eine Lokation ist definiert als bestimmter Punkt in einer fest definierten Umgebung (Eisenhauer et al., 2007, S. 54). Im Gegensatz zur Indoor-Positionierung liegt der Fokus bei der Indoor-Lokalisierung auf der Angabe von räumlichen Bezeichnungen wie Raumnamen oder Raumnummern.

Indoor-Tracking

Unter dem Begriff Indoor-Tracking werden alle Schritte zum gleichzeitigen Verfolgen und Überwachen von beweglichen Objekten oder Personen sowie die Weitergabe dieser Informationen an eine zentrale Stelle verstanden (Eisenhauer et al., 2007, S. 54). Der Tracking-Prozess eines Objekts oder einer Person kann dabei nicht aktiv von der Person oder dem Objekt beeinflusst werden. Der wesentliche Unterschied zur Indoor-Positionierung und Indoor-Lokalisierung besteht in der Verarbeitung der Informationen. Im Gegensatz zur Positionierung und Lokalisierung, wo die Position auch lokal ermittelt wird, werden beim Tracking die Informationen zwangsläufig an ein zentrales Tracking-System übermittelt (Eisenhauer et al., 2007, S. 55). Tracking umfasst also primär die Ermittlung der Position durch ein externes System, bei dem die ermittelte Position nicht zwangsläufig auf dem erfassten Gerät zur Verfügung steht (Mautz, 2012, S. 26).

Indoor-Positionierungssystem

Ein IPS umfasst die notwendigen Software-, Hardware- und Netzwerkkomponenten sowie Daten, die eine automatische Positions- und Orientierungsbestimmung von Personen oder Objekten innerhalb von Gebäuden in Echtzeit ermöglichen (Blankenbach, Sternberg & Tilch, 2016, S. 3). Diese Definition kann dem englischsprachigen Begriff RTLS gleichgesetzt werden, wobei dieser nicht zwangsweise auf Innenbereiche beschränkt ist (Blankenbach et al., 2016, S. 3). Funkwellenbasierte IPS benötigen eine Hardwareinfrastruktur bestehend aus Sende- und Empfangseinheiten (Referenzstationen) sowie mobilen Empfangs- und Sendegeräten (Blankenbach et al., 2016, S. 4).

Echtzeit-Lokalisierung

Die Echtzeit-Lokalisierung bezeichnet die Bestimmung einer Lokalität mit einer sehr geringen Latenz. Die Verzögerung für die Ermittlung der Position ist minimal, da die Abstraten entsprechender Systeme sehr hoch sind. Der Begriff Echtzeit-Lokalisierung ist nicht auf die Lokalisierung innerhalb von Gebäuden beschränkt.

4.2 Verfahren der Positionsbestimmung

Für die Distanzbestimmung existieren Zeitmessungs- sowie Signalstärkemessungsverfahren (vgl. **Abbildung 14**). Einige der Verfahren sind nur mit Multiantennensystemen umsetzbar, da mehrere Antennen benötigt werden, um die Laufzeiten der Signale auszuwerten und Winkel bzw. Distanzen zu ermitteln (Kern, 2010, S. 28).

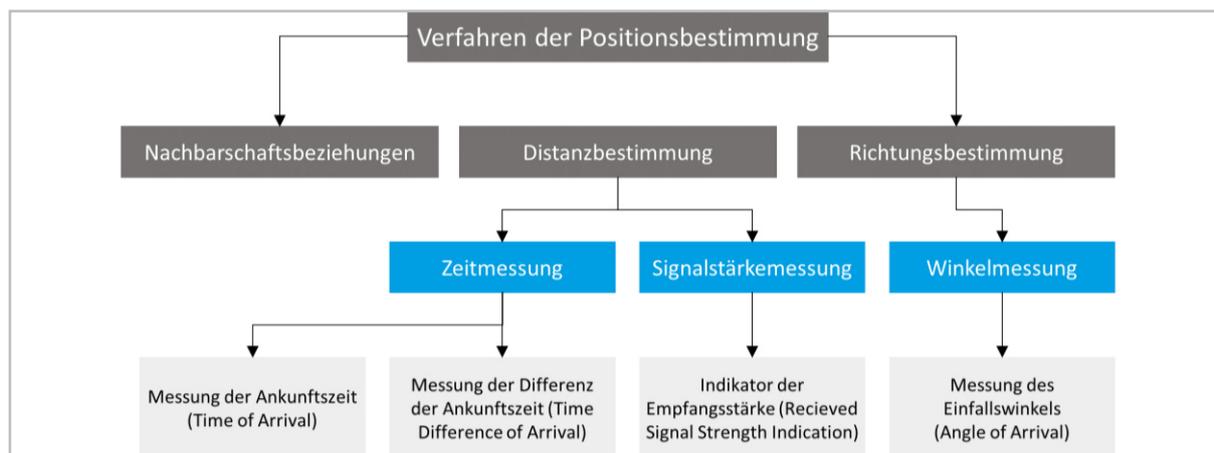


Abbildung 14: Verfahren zur Indoor-Lokalisierung²⁰

Eines der am häufigsten verwendeten Verfahren ist die Messung von Signalstärken, welches verschiedene Vor- und Nachteile aufweist. Zeitmessungsverfahren bieten im Vergleich eine höhere Genauigkeit, da die Laufzeiten der Signale ausgewertet werden und diese nicht unmittelbar durch die Umgebung beeinflusst werden. Die größte Fehlerquelle von funkwellenbasierten Verfahren zur Indoor-Lokalisierung ist die Mehrwegausbreitung aufgrund der Reflexion der Signale an Objekten und Teilen der Infrastruktur z. B. Wänden oder Böden (Eisenhauer et al., 2007, S. 56). **Abbildung 15** visualisiert unterschiedliche Verfahren zur Positionsbestimmung auf Grundlage von infrastrukturgestützten Systemen.

²⁰ Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Blumenthal (2004, S. 34).

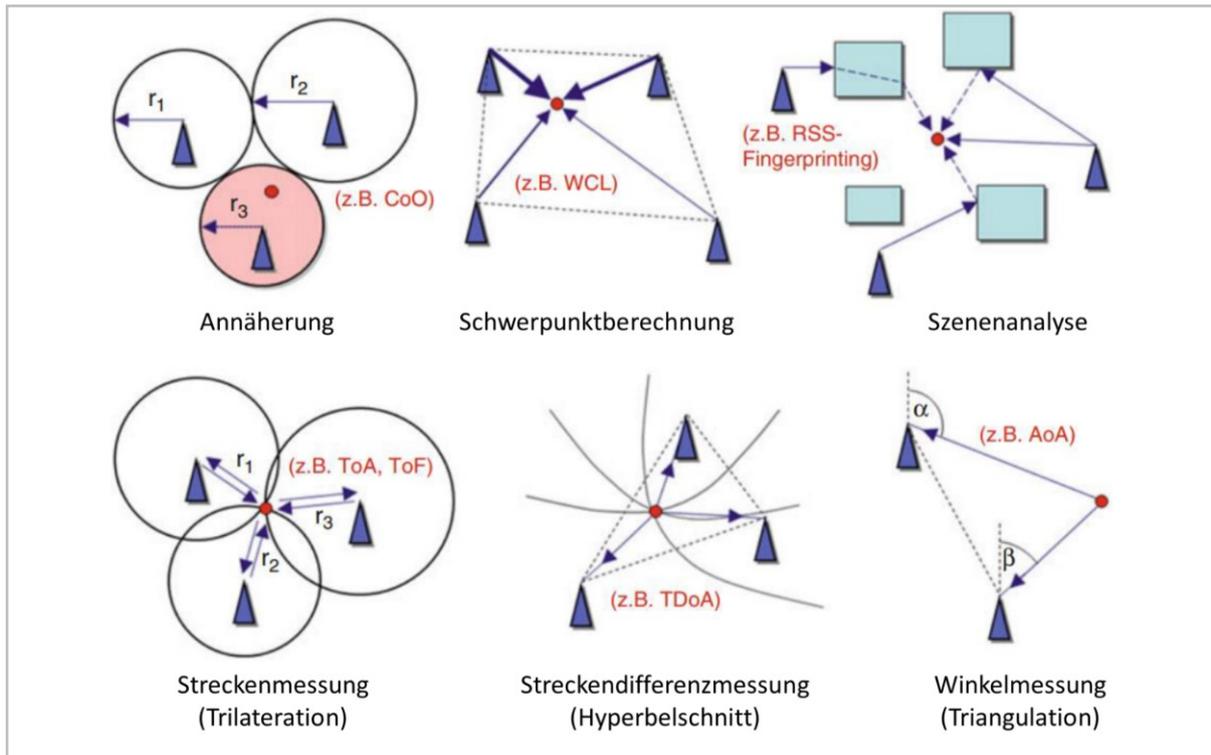


Abbildung 15: Visualisierung von Verfahren zur Positionsermittlung²¹

Im Nachfolgenden wird die Funktionsweise von ausgewählten Verfahren, die im Rahmen der Indoor-Lokalisierung eingesetzt werden, beschrieben.

4.2.1 Lateration und Angulation

Die Lateration ist ein Messverfahren zur Bestimmung der Position eines Punktes im zweidimensionalen Raum (Kern, 2010, S. 28). Bei der Positionsbestimmung mittels Lateration erfolgt die Berechnung der Position auf Grundlage von Abstands- und Distanzmessungen. Nachdem der Abstand zu drei Referenzpunkten ermittelt wurde, kann der Schnittpunkt von drei Kreisen berechnet werden. Ist nur die Entfernung zu einem Punkt bekannt, kann die Position auf allen Punkten des Kreises vom Referenzpunkt mit dem Radius der ermittelten Distanz liegen. Wenn die Entfernung zu zwei Punkten bekannt ist, kann die Position auf die Schnittfläche der beiden Kreise eingegrenzt werden. Sobald die Distanz zu einem dritten Referenzpunkt vorliegt, kann die Position genau bestimmt werden.

Bei der Ermittlung einer Position durch Angulation erfolgt die Positionsbestimmung durch die Messung von Winkeln unter Verwendung der geometrischen Eigenschaften von Dreiecken (Kern, 2010, S. 28). Durch die Messungen zu mindestens zwei verschiedenen Referenzpunkten (Triangulation) kann durch einfache Dreiecksberechnungen die Position bestimmt werden (**Abbildung 16**). Bei der Angulation ist die Messung des Einfallswinkels (engl. Angle of Arrival – kurz: AoA) von Signalen bei der funkwellenbasierten Lokalisierung notwendig (vgl. Kapitel 4.3.4 und Kern, 2010, S. 28). Bei der Verwendung von mehr als drei Referenzpunkten bzw. mehr als drei bekannten Winkeln zur Positionierung spricht man von Multilateration bzw. Multiangulation.

²¹ Quelle: Blankenbach et al. (2016, S. 5).

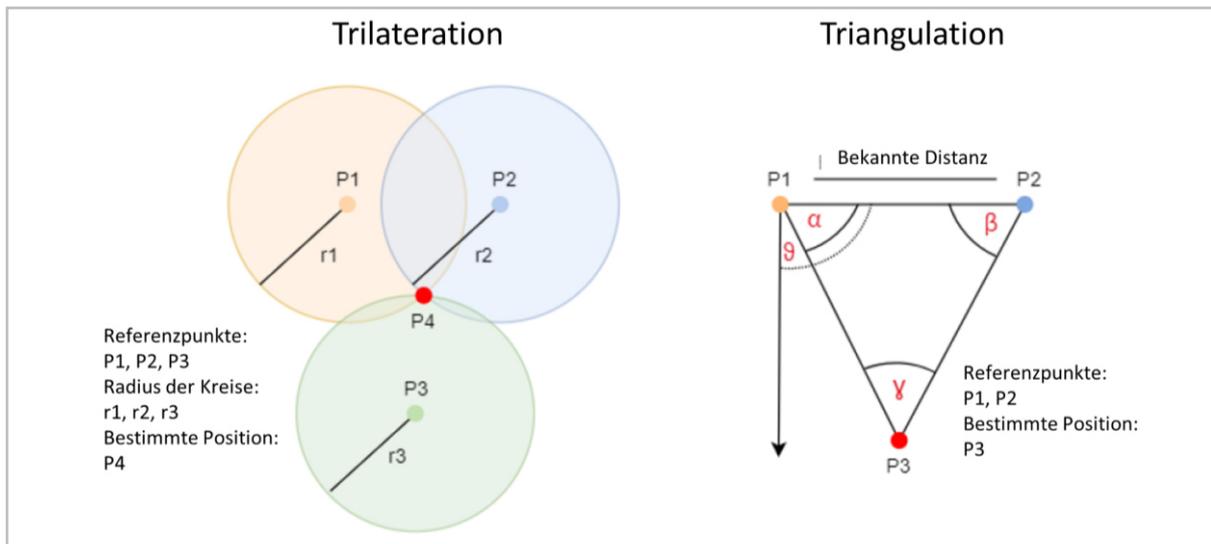


Abbildung 16: Geometrische Positionsbestimmung durch Trilateration und Triangulation²²

Ein Nachteil dieser beiden Methoden sind mögliche hohe Messungenauigkeiten, die auftreten, wenn die ermittelten Distanzen bzw. Winkel beispielsweise durch Veränderungen in der Umgebung schwanken. Dies wird in der Praxis maßgeblich durch Abschirmungs- und Reflexionseffekte der Funksignale durch Personen und Objekte herbeigeführt oder durch Signalschwankungen der Funkmodule der Sende- und Empfangsgeräte verursacht. Ein weiterer Nachteil beim Verfahren der Angulation ist der hohe technische Aufwand für die Ermittlung der Winkel (Kern, 2010, S. 28).

4.2.2 Näherungsmessung (Proximity Detection)

Bei Verfahren der Näherungsmessung (engl. Proximity Detection) kann lediglich festgestellt werden, ob sich ein Objekt in der Nähe zu einer bekannten Position befindet oder nicht. Dies kann durch physischen Kontakt erfolgen oder durch die Interpretation von Funksignalen (Tekler, 2005, S. 21f). Bei dem Verfahren wird im Allgemeinen eine relative Position zu einem Referenzpunkt bestimmt (Kern, 2010, S. 28). Sollten im Rahmen der funkwellenbasierten Näherungsmessung mehrere Signale empfangen werden, so wird der Referenzpunkt, von dem das Signal mit der höchsten Signalstärke gesendet wird, als Bezugspunkt für eine relative Positionsangabe ausgewählt (Kern, 2010, S. 28). Dieses Verfahren entspricht im Wesentlichen dem in der Literatur auch als „Cell of Origin“ bezeichneten Ansatz (Tekler, 2005, S. 22).

4.2.3 Szenenanalyse (Fingerprinting)

Bei dem Verfahren der Szenenanalyse (engl. Fingerprinting) werden erfasste Signalstärken mit den in einer Datenbank hinterlegten Signalstärken abgeglichen. Für dieses Verfahren müssen im Rahmen einer Trainingsphase an mehreren vordefinierten Messpunkten zunächst Messungen vorgenommen werden, um eine sogenannte Fingerprint-Datenbank zu erstellen (Tekler, 2005, S. 19). Während der Positionsbestimmung werden fortlaufend die erfassten Signale bzw. Signalstärken mit den in der Datenbank hinterlegten Mustern abgeglichen. Das Training erfolgt durch das Ablaufen von Räumen zur Aufzeichnung der notwendigen Muster. Durch dieses Training wird für jeden Raum ein Fingerabdruck bzw. ein Umgebungsprofil erstellt. Neben der Signalstärken können auch weitere Metriken wie beispielsweise Bilder als Datengrundlage genutzt werden (Tekler, 2005, S. 19). Die erfassten Muster werden meistens durch ein Post-Processing-Verfahren nachbearbeitet und weiter vereinfacht, damit ein

²² Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Kern (2010, S. 28).

Abgleich besser durchgeführt werden kann. Um Messfehler von anderen Verfahren zu reduzieren, kann die Fingerprint-Methode in Kombination eingesetzt werden (Eisenhauer et al., 2007, S. 55). Da in großen Räumen die Ausschließlichkeit von Fingerabdrücken, aufgrund von uneindeutigen bzw. öfter auftretenden gleichen Mustern, nicht immer gewährleistet werden kann, ist es sinnvoll, diese Methodik in Kombination mit anderen Verfahren zu verwenden (Eisenhauer et al., 2007, S. 55). Der Nachteil der Methode ist der hohe Aufwand zur Bereitstellung der notwendigen Datengrundlage durch eine Trainingsphase (Eisenhauer et al., 2007, S. 55). Das kommerzielle, WLAN-basierte Lokalisierungssystem von Ekahau (heute AiRSTA) setzt diese Methode in Kombination mit Trilateration ein (Eisenhauer et al., 2007, S. 55).

4.3 Messprinzipien der funkwellenbasierten Lokalisierung

Die nachfolgend beschriebenen Messprinzipien ermöglichen die Ermittlung der Distanz zwischen Funkgeräten bzw. einem Transmitter und einem Receiver (Sende- und Empfangseinheiten). Durch die Ermittlung der Distanz zu mindestens drei Referenzpunkten kann unter Verwendung des Verfahrens der Lateration eine Position bestimmt werden (vgl. Kapitel 4.2.1) wofür Messverfahren zur Ermittlung der Distanz notwendig sind.

4.3.1 Messung der Signalstärke (*Received Signal Strength Indication*)

Die Messung der Signalstärken (engl. Received Signal Strength Indication – kurz RSSI) ist mit eines der populärsten und am meisten eingesetzten Verfahren im Bereich der funkwellenbasierten Indoor-Lokalisierung. Die Distanz zwischen zwei Funkeinheiten wird durch das Auslesen der erfassten Signalstärke auf Seiten der Empfangseinheit berechnet. Grundlage dafür ist, dass die Signalstärke in der Luft quadratisch im Verhältnis zum Abstand vom Sender abnimmt (Teker, 2005, S. 27). Durch die Kenntnis der Ausgangsleistung bzw. Sendeleistung des Transmitters und der erfassten Empfangsleistung auf Seiten des Receivers kann somit die Berechnung vorgenommen und die Distanz ermittelt werden. Das Problem dieses Verfahrens ist, dass unterschiedliche Objekte (Wände, Gegenstände, Flüssigkeiten, Personen) abhängig von den Materialien die Signale zusätzlich abschwächen. Ein weiteres Problem ist die adaptive Anpassung der Signalstärken auf Seiten des Senders, die die Sendestärke ggf. fortlaufend reguliert (Teker, 2005, S. 27). Ein Lösungsansatz dafür ist bei BLE Beacons die Möglichkeit, in den gesendeten BLE-Paketen auch die konfigurierte Sendestärke zu hinterlegen und in jedem Datenpaket mitzusenden, welches dann von dem Empfänger ausgelesen werden kann.

4.3.2 Messung der Ankunftszeit (*Time of Arrival*)

Die Messung der Signallaufzeit bzw. Ankunftszeit von Signalen (engl. Time of Arrival – kurz: ToA) zwischen zwei Funkgeräten ermöglicht die Bestimmung der Distanz zwischen den Geräten. Dafür wird die fest definierte Ausbreitungsgeschwindigkeit von elektromagnetischen Signalen durch die Luft genutzt (Teker, 2005, S. 23). Durch die Erfassung der Sende- und Empfangszeit kann die Laufzeit eines Signals ermittelt werden. Grundlage dafür ist die Notwendigkeit einer sehr genauen Zeitmessung auf beiden Seiten, wofür eine ständige Synchronisation der Zeitgeber bzw. Uhren erforderlich ist. Bei der Ausbreitungsgeschwindigkeit in der Luft würde eine Abweichung von einer Millisekunde eine Abweichung der ermittelten Distanz von 300 Metern bedeuten, da die Ausbreitungsgeschwindigkeit von elektromagnetischen Wellen in der Luft bzw. im Vakuum 300.000 km/s (Lichtgeschwindigkeit) beträgt (Teker, 2005, S. 23). Diese Art der Distanzbestimmung wird bei GPS und Radaranwendungen eingesetzt (Teker, 2005, S. 22). Bei diesem Verfahren wird im Gegensatz zur Laufzeitdifferenzmessung die absolute Zeit verwendet.

4.3.3 *Messung der Laufzeitdifferenz (Time Difference of Arrival)*

Die Messung der Laufzeitdifferenz (engl. Time Difference of Arrival – kurz: TDoA) ist ebenfalls ein zeitbasiertes Verfahren zur Bestimmung der Entfernung von Funkgeräten. Im Gegensatz zur Messung der Laufzeit wird in diesem Verfahren, anstelle absoluter Zeiten, die zeitliche Differenz der Signale von mehreren gleichzeitig funkenden Sendeeinheiten betrachtet (Teker, 2005, S. 24). Durch die Messung zu drei verschiedenen Referenzpunkten bzw. Basisstationen kann mithilfe der Trilateration ebenfalls die Position bestimmt werden. Es gelten die gleichen Einschränkungen wie bei der Messung der Laufzeit, die Sender benötigen ebenfalls synchronisierte Uhren. Das Verfahren bietet jedoch eine höhere Genauigkeit. Bei lediglich zwei Sendereinheiten kann eine hyperbolische Kurve berechnet werden, auf der die Position des Empfängers liegt (Teker, 2005, S. 24).

4.3.4 *Messung des Einfallswinkels (AoA)*

Für die Messung der AoA von Signalen sind mehrere Antennen, sogenannte Antennen-Arrays, notwendig (Kern, 2010, S. 28). Durch die Erfassung des AoA eines empfangenen Signales kann die Position zum Sender ermittelt werden. Dieses Verfahren wird klassischerweise in der Schiff- und Luftfahrt von den entsprechenden Radarsystemen für die Positionsbestimmung eingesetzt (Teker, 2005, S. 25). Für dreidimensionale Messungen besteht die Notwendigkeit, zusätzlich einen Azimutwinkel zu bestimmen (Kern, 2010, S. 28). Um eine höhere Genauigkeit bei Messungen zu gewährleisten, sollten gerichtete Antennen im Verbund eingesetzt werden (Kern, 2010, S. 28).

4.4 *Weitere Verfahren zur Indoor-Lokalisierung*

Im Folgenden werden weitere mögliche Verfahren zur Indoor-Lokalisierung aufgelistet und zusammenfassend beschrieben.

Akustische Lokalisierung

Bei der akustischen Lokalisierung wird die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Schallwellen genutzt, um analog zur funkwellenbasierten Lokalisierung die Laufzeiten zu ermitteln und Distanzmessungen zu ermöglichen (Blankenbach et al., 2016, S. 4f). Zur Positionsbestimmung können im Anschluss die gleichen Verfahren, die im Kapitel 4.2 beschrieben wurden, auch für die akustische Lokalisierung verwendet werden. Abhängig von der Wellenlänge bzw. Frequenz der akustischen Signale können verschiedene Arten von Schallwellen eingesetzt werden. Ultraschall hat einen Frequenzbereich von 20 kHz–1,6 GHz und wird vermehrt eingesetzt, da diese Schallwellen von Menschen nur in einem begrenzten Maße wahrgenommen werden können (Blankenbach et al., 2016, S. 4). Ein Nachteil der schallwellenbasierten Lokalisierung ist die Veränderung der Ausbreitungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur sowie akustische Störquellen und die Notwendigkeit von direkten Sichtverbindungen (engl. Line of Sight) zu den Sendern (Blankenbach et al., 2016, S. 5).

Optische bzw. visuelle Lokalisierung

Bei der Vorstellung des Fingerprinting-Verfahrens wurde die Möglichkeit der optischen bzw. visuellen Positionsbestimmung erwähnt (Teker, 2005, S. 19f). Durch die Aufnahme von Bildern innerhalb eines Gebäudes kann für jeden Raum eine Menge an Bildern oder auch Videomaterial hinterlegt werden, welches den Raum kennzeichnet und als Fingerabdruck bzw. Muster eines Raumes fungiert. Durch entsprechende Algorithmen der Bilderkennung bzw. zur Feststellung der Ähnlichkeit von zwei Aufnahmen kann die Wahrscheinlichkeit für die Übereinstimmung eines neu aufgenommenen Bildes von ei-

dem Gerät, welches seine Position bestimmen möchte, mit einem Bild in der Datenbank ermittelt werden. Die Nachteile dieses Verfahrens sind ähnlich zu denen des Fingerprinting von Signalstärken. Wenn wesentliche Objekte in einem Raum verändert werden, kann abhängig von dem Algorithmus ggf. keine Wiedererkennung stattfinden. Im Forschungsbereich des „Machine-Learning“ wird sich speziell mit diesen Fragestellungen auseinandergesetzt, d. h. welche Features eines Bildes muss bzw. sollte ein Algorithmus zur Wiedererkennung (engl. Feature-Engineering) beachten. Für den Menschen stellt diese Problematik aufgrund seiner Erfahrung und Intuition eine vielfach einfachere Herausforderung dar. Auf Basis der Erfahrungswerte kann von Menschen besser eingeschätzt werden, welche Objekte sich in einem Raum über die Zeit verändern können und welche nicht. Ein Computer bzw. Algorithmen des maschinellen Lernens müssen darauf erst trainiert werden.

Magnetwellenbasierte Lokalisierung

Bei magnetwellenbasierter Lokalisierung wird auch das Verfahren der Szenenanalyse angewendet. Dabei wird für jeden Raum in einem Gebäude ein magnetischer Fingerabdruck aufgezeichnet. Für die Positionsbestimmung wird ein Abgleich des erfassten Magnetfeldes mit den hinterlegten Mustern durchgeführt. Die Firma IndoorAtlas Ltd. (2020) entwickelt hierfür geeignete Algorithmen und Messverfahren. Dabei wird das Magnetfeld der Erde zur Lokalisierung verwendet. Innerhalb von Gebäuden entsteht durch Metall und Stahlbeton sowie elektronische Geräte ebenfalls ein messbares Magnetfeld, das zur Lokalisierung verwendet werden kann. Der Nachteil dieses Verfahrens ist wie bei allen Fingerprint-Ansätzen die Notwendigkeit einer Trainingsphase zur Erstellung der Musterdatenbank.

4.5 Weitere Aspekte von Verfahren zur Indoor-Lokalisierung

In diesem Abschnitt werden weitere zu berücksichtigende Aspekte von Verfahren der Indoor-Lokalisierung und geeigneten Infrastrukturen unter Betrachtung von Vor- und Nachteilen dargestellt.

Client- und serverbasierte Lokalisierung

Bei Verfahren der Indoor-Lokalisierung kann zwischen client- und serverbasierter Lokalisierung auch als Selbst- bzw. Fremddortung unterschieden werden (Teker, 2005, S. 14f).

Bei der clientbasierten Lokalisierung erfolgt die Ermittlung der Position direkt auf die Endgeräte wie einem Smart Phone oder einem Tablet (vgl. **Abbildung 17**; Teker, 2005; infsoft GmbH, 2020).

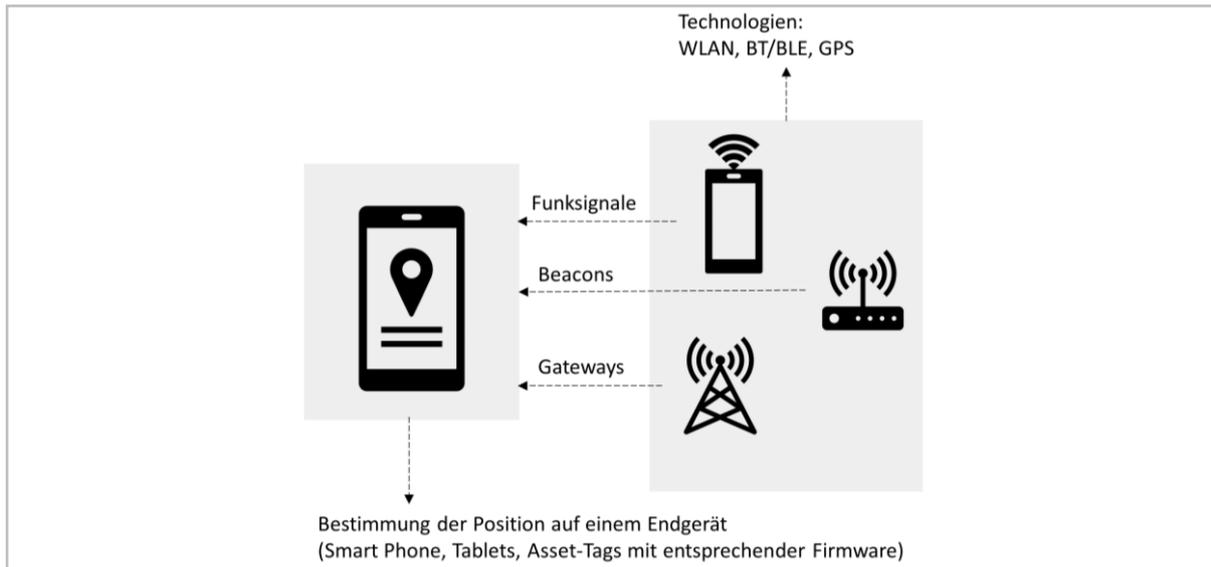


Abbildung 17: Clientbasierte Lokalisierung²³

In Anwendungen der serverbasierten Lokalisierung wird die Position eines mobilen Endgerätes, eines Tags oder Beacons von einem externen Gerät (Access-Point bzw. Gateway) bzw. einem Server bestimmt (vgl. **Abbildung 18**).

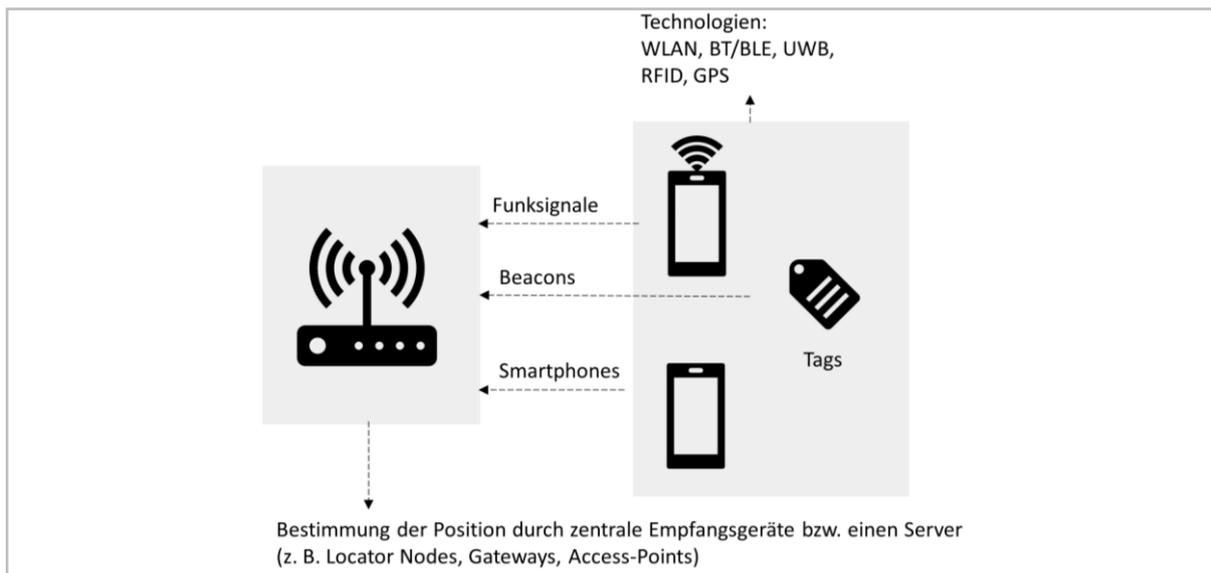


Abbildung 18: Serverbasierte Lokalisierung²⁴

²³ Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an insoft GmbH (2020).

²⁴ Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an insoft GmbH (2020).

Die daraus resultierenden wesentlichen Vor- und Nachteile sind in der nachfolgenden **Tabelle 6** zusammenfassend dargestellt.

	Vorteile	Nachteile
Client-basierte Lokalisierung	<ul style="list-style-type: none"> • Höchstmögliche Form des Datenschutzes/Schutz der Privatsphäre, da die Position direkt auf einem Endgerät (Client) bestimmt wird • Geringere Latenzzeiten, da keine Serverkommunikation notwendig ist • Hohe Flexibilität bei der Integration und Installation, da unterschiedliche Arten von Signalgebern (z. B. Beacons) eingesetzt werden können • Einfache Implementierung und Skalierbarkeit • Gut geeignet für den Anwendungsbereich der Indoor-Navigation • Geringere Kosten in der Anschaffung im Vergleich zu einer serverbasierten BLE-Infrastruktur • Geringerer Stromverbrauch als eine serverbasierte BLE-Infrastruktur • Echtzeitfähigkeit für Indoor-Navigation 	<ul style="list-style-type: none"> • Weniger gut bzw. nicht geeignet für den Anwendungsbereich Asset-Tracking • Für die Lokalisierung ist eine App bzw. Firmware auf dem Endgerät notwendig • Ggf. Kalibrierung des Systems an die Umgebung notwendig • Aktualisierungsintervall im Fall von Asset-Tracking abhängig von der Bewegung und Frequenz notwendiger Clients
Server-basierte Lokalisierung	<ul style="list-style-type: none"> • Sehr gut geeignet für den Anwendungsbereich des Asset-Tracking • Tags mit zusätzlichen Buttons und entsprechender Sensorik bieten weitere Möglichkeiten (z. B. Hardwarebutton für mögliche Interaktionen, Sensoren zur Erfassung von Zuständen: Temperatur, Feuchtigkeit, Luftdruck, Lichtverhältnisse, Bewegungen, Magnetfeld) 	<ul style="list-style-type: none"> • Weniger Datenschutz bzw. Privatsphäre • Bei Anwendungen der Indoor-Navigation ist die höhere Latenz im Vergleich zur clientbasierten Lokalisierung zu berücksichtigen • Höhere Kosten für den Aufbau im Vergleich zu einer clientbasierten BLE-Infrastruktur • Geringerer Datenschutz, da Geräte lokalisiert werden können, ohne eine App zu benötigen

Tabelle 6: Vor- und Nachteile der client- und serverbasierten Lokalisierung²⁵

In Abhängigkeit von den Anwendungsfällen bzw. Einsatzbereichen der Indoor-Lokalisierung kann die Wahl eines der beiden Mechanismen zur Positionsbestimmung erfolgen. Zudem besteht die Möglichkeit, ein Hybridsystem zu implementieren, das die client- und serverbasierte Lokalisierung unterstützt und so die Vorteile beider Verfahren kombiniert.

Netz- und Batteriebetriebe Systeme

Die Sicherstellung der Energieversorgung von wesentlichen Komponenten eines IPS spielt eine zentrale Rolle. Technologien und Protokolle mit einer schlechten Energieeffizienz haben einen erhöhten Energiebedarf. Gerade bei diesen Technologien muss die Stromversorgung sichergestellt und für den zuverlässigen Betrieb gewährleistet werden. Neben dem Risiko, dass die einzelnen Komponenten in batteriebetriebenen Systemen ausfallen und den Betrieb gefährden, ist auch der erhöhte Wartungsaufwand für den Austausch von Batterien bzw. das Aufladen ein Kostenfaktor. Mobile Geräte und Tags sind zwangsläufig auf eine Batterieversorgung angewiesen. In einzelnen Anwendungsfällen besteht auch die Möglichkeit, diese an eine Stromversorgung anzubinden, z. B. im Bereich des Fahrzeug-Tracking, da diese ohnehin eine Stromquelle besitzen und notwendige Lokalisierungscomponenten dadurch ebenfalls mit Strom versorgen können. Die Zusammenfassung der Vor- und Nachteile ist in **Tabelle 7** dargestellt.

²⁵ Quelle: Eigene Darstellung.

	Vorteile	Nachteile
Netz- betriebene Systeme	<ul style="list-style-type: none"> • Geringere Kosten für die Wartung von Tags • Technologien mit schlechter Energieeffizienz können problemlos eingesetzt werden 	<ul style="list-style-type: none"> • Notwendigkeit der ständigen Verfügbarkeit von Stromquellen
Batterie- betriebene Systeme	<ul style="list-style-type: none"> • Keine Einschränkung der Mobilität 	<ul style="list-style-type: none"> • Wartungskosten für den Austausch von Batterien • Störanfälligkeit bei dem Ausfall von Batterien

Tabelle 7: Vor- und Nachteile von netz- und batteriebetriebenen Systemen²⁶

²⁶ Quelle: Eigene Darstellung.

5 *Technologien und Bewertungskriterien zur funkwellenbasierten Indoor-Lokalisierung*

Wie die GPS-Technologie für den Außenbereich, so können heute Funktechnologien (insbesondere WPAN-Technologien) und die physikalischen Eigenschaften von Funkwellen unter Verwendung verschiedener Verfahren zur Lokalisierung innerhalb von Gebäuden eingesetzt werden. In diesem Kapitel werden zunächst funkwellenbasierte Technologien zur Indoor-Lokalisierung beschrieben, die heute vielfach als Optionen für die Indoor-Lokalisierung zur Verfügung stehen und auch in Krankenhäusern zum Einsatz gelangen können. Die betrachteten Technologien wurden nach dem Relevanzprinzip ausgewählt, d. h. bei Fragestellungen der funkwellenbasierten Indoor-Lokalisierung werden diese Technologien heutzutage innerhalb der Literatur im Schwerpunkt diskutiert (Hilty et al., 2012, Kern, 2010 und Hormes & Fottner, 2019). Die technischen Spezifikationen der Technologien und die wesentlichen Komponenten für die Implementierung geeigneter Infrastrukturen werden im Überblick dargestellt. Zudem werden die, in der Literatur hervorgehobenen, Vor- und Nachteile der Technologieoptionen herausgearbeitet, weil diese bei der Anwendung der Entscheidungsheuristik und der Auswahlentscheidung einbezogen werden müssen. Die Ergebnisse der sektorspezifischen Literaturrecherche zu geeigneten funkwellenbasierten Technologien für den Einsatz im Krankenhaus sind in Anhang B zusammenfassend dargestellt und dokumentiert.

Im weiteren Verlauf des Kapitels werden Bewertungskriterien vorgestellt, die in der Literatur für die Auswahlentscheidung von funkwellenbasierten Technologien der Indoor-Lokalisierung diskutiert werden. Diese Bewertungskriterien fließen in die, in Kapitel 6 dargestellte, Entscheidungsheuristik ein und werden exemplarisch für die Auswahlentscheidung einer Technologie zur Indoor-Lokalisierung angewendet.

5.1 *Technologien zur funkwellenbasierten Indoor-Lokalisierung*

Im Folgenden werden die ausgewählten Technologien im Detail beschrieben.

5.1.1 *Wireless Local Area Network*

Lokalisierung und Navigation mit WLAN ist weit verbreitet und wird heutzutage in vielen Projekten der Indoor-Lokalisierung verwendet. Zurückzuführen ist dies auf die vielfach bereits vorhandenen WLAN-Infrastrukturen, die unter bestimmten Voraussetzungen verwendet werden können (Eisenhauer et al., 2007, S. 55). Eine Möglichkeit des Indoor-Trackings mit WLAN besteht bereits, wenn die Nutzer:innen lediglich WLAN auf Smartphones aktiviert haben. Eine aktive Verbindung mit einem WLAN-Access-Point ist dafür nicht zwingend notwendig. Die Lokalisierung mit WLAN hat jedoch auch entscheidende Nachteile. Die Abweichung der Genauigkeit der Positionsbestimmung liegt mit 10 bis 15 Metern deutlich über der BT/BLE-Technologie. Hinzu kommt, dass Geräte des Herstellers Apple von einer clientseitigen Lokalisierung ausgeschlossen sind. Für die serverseitige Lokalisierung können nur wenige ausgewählte Access-Points verwendet werden. WLAN-fähige Asset-Tags sind zudem teurer und haben einen höheren Energieverbrauch als BT-fähige Tags.

Die im Bereich der WLAN-Lokalisierung eingesetzten Verfahren sind Näherungsmessungen und Szenenanalysen. Hierbei erfolgt die Auswertung der erfassten Signalstärken durch WLAN-Access-Points. Die Bestimmung der Position kann ebenfalls mittels Lateration anhand der Ermittlung von notwendigen Distanzen durch die Messung der Signalstärke erfolgen.

Zusammenfassend können folgende technische Spezifikationen der WLAN-Technologie aufgeführt werden:

- Verschiedene Standards, höchste Verbreitung haben die Standards
- 802.11b/g/c: Frequenzband 2,400–2,485 GHz/Sendeleistung: 100 mW
- 802.11ac: Frequenzband 5 GHz/Sendeleistung: 25–4000 mW
- 802.11ad: Zukünftig 60 GHz
- Bei 5 GHz sind deutlich höhere Übertragungsrate möglich, Signale werden aber von Wänden schnell abgeschirmt
- Bei 2,4 GHz Band überwindet abschirmende Materialien besser und hat somit eine höhere Reichweite

Zusammenfassend ist ein Datenblatt der WLAN-Spezifikation und -Lokalisierung einschließlich einer ausführlichen Beschreibung der notwendigen Komponenten in Anlage C kompakt dargestellt.

5.1.2 *Bluetooth/Bluetooth Low Energy*

Die Verwendung der BT-Technologie bezeichnet meist im Zusammenhang der Indoor-Lokalisierung den Einsatz von BLE. BLE ist der Funkstandard, mit dem sogenannte Beacon-Pakete (am weitesten verbreitet sind die Protokolle iBeacon und Eddystone) ausgesendet werden können. Die von Beacons ausgesendeten Pakete können zur client- und serverbasierten Lokalisierung verwendet werden. BLE zeichnet sich im Vergleich zum klassischen BT durch einen wesentlich geringeren Energieverbrauch aus. Das Betriebssystem Android unterstützt BLE ab der Version 4.3. iOS, das Betriebssystem von Apple, unterstützt BLE seit iOS 5.

Die Lokalisierung mittels BLE bietet entscheidende Vorteile, womit die weite Verbreitung erklärt werden kann. Zentrale Komponenten in BLE-Systemen zur Lokalisierung sind BLE-Beacons und BLE-Gateways (auch BLE-Controller genannt). Typischerweise wird ein clientseitiges BLE-System vor allem für die Navigation von Personen mittels Smartphones eingesetzt. Für die Lokalisierung von Objekten ist in der Regel ein serverbasiertes BLE-System unter Einsatz von BLE-Gateways notwendig. Die Lokalisierung über BLE unter Verwendung der clientseitigen Lokalisierung funktioniert, indem ein Smartphone die Signalstärke von einzelnen Beacons interpretiert und auswertet. Dazu muss das Smartphone wissen, wo sich die einzelnen Beacons im Raum (als Referenzpunkte) befinden. Diese Interpretation kann lokal auf dem Endgerät erfolgen, beispielsweise innerhalb einer mobilen Applikation. Notwendige Komponenten für eine clientbasierte Lokalisierung sind daher mobile Geräte und Applikationen (z. B. Smartphones oder Tablets) sowie BLE-Beacons, welche als externe Signalgeber eingesetzt werden. Durch die Lateration der durch die Signalstärkemessung ermittelten Distanzen von BLE-Beacons kann eine Genauigkeit von bis zu 3 Metern erzielt werden, wobei diese von der Umgebung und der jeweiligen Implementierung abhängt.

Serverseitiges Lokalisieren von Personen oder Objekten (Tracking von BLE-Beacons bzw. den BLE-Signalen von Smartphones) ist nur mit gesonderter Hardware möglich. Hierfür werden BLE-fähige Access-Points oder BLE-Gateways benötigt. Eine geeignete Infrastruktur wird meist durch die Verwendung von BLE-Gateways aufgebaut, welche nach Analyse der Infrastruktur (engl. Site Survey) und Ermittlung einer Verbauungsplanung in den einzelnen Räumen installiert werden. Die Gateways ermöglichen die Erfassung der Beacon-Pakete bzw. der BLE-Signale von mobilen Geräten. Ein zu lokalisierendes Objekt wird im Anwendungsbereich des Asset-Trackings mit einem BLE-Beacon ausgestattet und kann danach

serverseitig lokalisiert werden. Die BLE-Gateways scannen fortlaufend nach BLE-Signalen und leiten diese zur Auswertung an einen Server oder eine entsprechende Software-Plattform weiter.

Zusammenfassend lassen sich folgende technische Spezifikationen von BT/BLE aufzählen:

- 2,4 GHz ISM Frequenzband (2,402–2,480 GHz)
- BLE typischerweise 10 mW Sendeleistung/BT 100 mW
- Unterschiedliche Sendestärken (Sendeleistung meist bei 10 mW/Reichweite bei 10 mW ca. 40 m)
- iBeacon und Eddystone Beacon-Protokolle
- BLE-Beacons untereinander unterstützen teilweise Mesh-Networking
- Geringer Stromverbrauch
- Seit BT 4.0 wird BLE unterstützt
- Durch BT 5.0 sind weitere Features zu BLE hinzugekommen (z. B. Mesh-Netzwerk)

Clientbasierte Lokalisierung mittels BLE-Beacons:

Bei der clientbasierten Lokalisierung fungieren in Gebäuden festinstallierte BLE-Beacons als Referenzstation bzw. Signalgeber, indem diese periodisch BLE-Signale aussenden. Die ausgesendeten Signale können von BT-fähigen mobilen Endgeräten empfangen und ausgewertet werden. Mobile Endgeräte haben zudem meist eine vorhandene Netzwerkverbindung (WLAN oder Mobilfunk), durch die Informationen an einen Server bzw. eine Lokalisierungsplattform weitergegeben werden können. Somit kann bei der clientbasierten Lokalisierung auch der Standort über einen solchen Rückkanal (**Abbildung 19**) weitergegeben und anderen Geräten zur Verfügung gestellt werden.

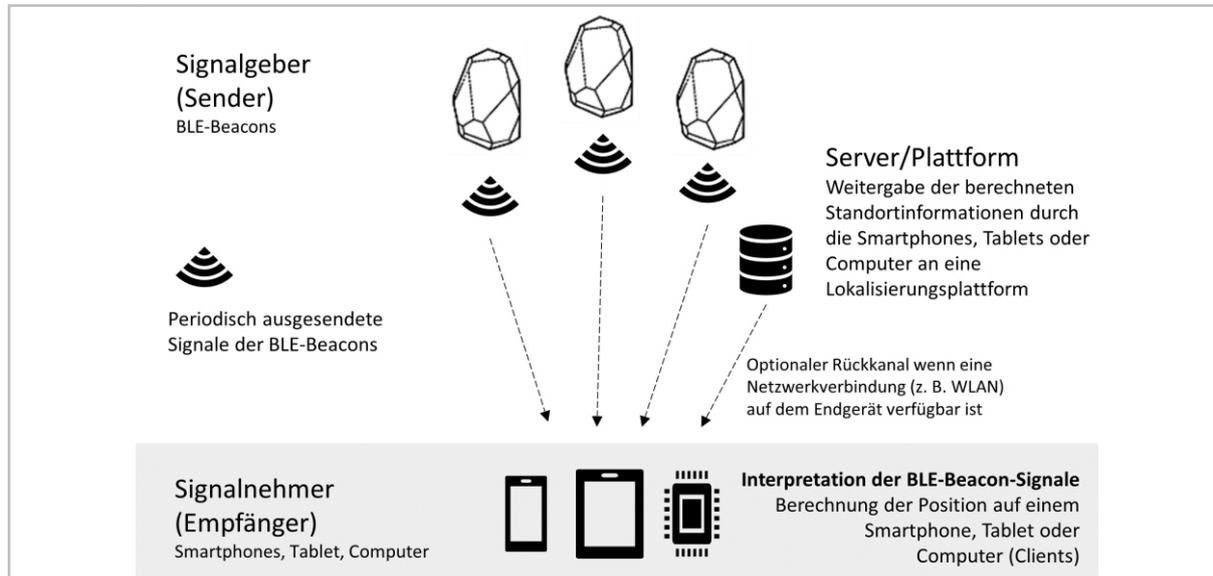


Abbildung 19: Aufbau einer clientbasierten BLE-Infrastruktur²⁷
(Einsatz von BLE-Beacons und mobilen Endgeräten)

Da die Berechnung der Position auf dem mobilen Endgerät erfolgt, wird ein größtmögliches technisches Maß an Datenschutz geboten, wobei Endnutzer ohne die Kenntnis der Implementierung der notwendigen mobilen Anwendungen dies nicht abschließend überprüfen bzw. beeinflussen können. Die Vor- und Nachteile der clientbasierten BLE-Lokalisierung mittels Beacons sind in **Tabelle 8** dargestellt.

²⁷ Quelle: Eigene Darstellung.

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Einfachheit der Implementierung für Indoor-Navigation • Kompatibel mit iOS und Android • Möglichkeiten von Batterie- oder Netzbetrieb • Hohe Flexibilität bei der Integration und Installation (verschiedene Arten von Beacons) • Höhere Genauigkeit verglichen mit WLAN-Positionsermittlung • Geringere Kosten in der Anschaffung im Vergleich zu einer serverbasierten BLE-Infrastruktur • Geringerer Stromverbrauch als eine serverbasierte BLE-Infrastruktur • Echtzeitfähigkeit: Geringe Latenz für Indoor-Navigation 	<ul style="list-style-type: none"> • Notwendigkeit der ständigen Verfügbarkeit von Stromquellen • Beacons mit zusätzlichen Buttons und entsprechender Sensorik bieten weitere Möglichkeiten (z. B. Hardwarebutton für mögliche Interaktionen, Sensoren zur Erfassung von Zuständen: Temperatur, Feuchtigkeit, Luftdruck, Lichtverhältnisse, Bewegungen, Magnetfeld), wobei dafür ein Rückkanal zur Weitergabe der Informationen notwendig ist (daher eher ungeeignet) • Ausführliche Planung der Verbauung notwendig und Kalibrierung des Systems an die Umgebung erforderlich • Für die Lokalisierung ist eine App auf dem Endgerät notwendig • Weniger gut geeignet für die Anwendung zur Lokalisierung von Objekten bzw. Wirtschaftsgütern, da das Aktualisierungsintervall beim Fall von Asset-Tracking von der Bewegung und Frequenz notwendiger Clients abhängt

Tabelle 8: Vor- und Nachteile der clientbasierten BLE-Lokalisierung mittels Beacons²⁸

Im Nachfolgenden wird diesem Ansatz die serverbasierte Lokalisierung mittels BLE-Gateways gegenübergestellt und beschrieben.

Serverbasierte Lokalisierung mittels BLE-Gateways:

Im Rahmen der serverbasierten Lokalisierung mittels BLE-Gateways werden von diesen die Signale von mobilen Geräten und BLE-Beacons bzw. Asset-Tags empfangen. Die erfassten Daten sowie die gemessenen Signalstärken werden danach über die Netzwerkanbindung der Gateways an eine Lokalisierungsplattform weitergeleitet, wo die Berechnung der Position erfolgt (**Abbildung 20**).

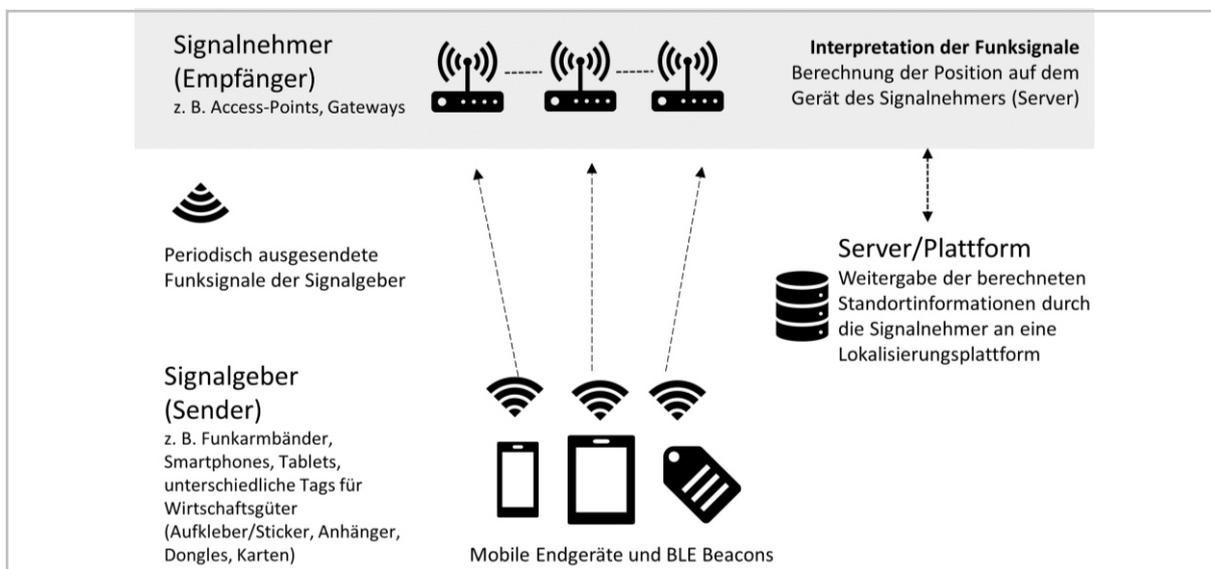


Abbildung 20: Aufbau einer serverbasierten BLE-Infrastruktur²⁹
(Einsatz von BLE-Gateways, BLE-Beacons und mobilen Endgeräten)

²⁸ Quelle: Eigene Darstellung.

²⁹ Quelle: Eigene Darstellung.

Die Vor- und Nachteile der serverbasierten BLE-Lokalisierung mittels Gateways sind in **Tabelle 9** dargestellt.

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Sehr gut geeignet für die Lokalisierung von Personen und Objekten • Möglichkeiten von Batterie- oder Netzbetrieb • Hohe Flexibilität bei der Integration und Installation (verschiedene Arten von Beacons) • Höhere Genauigkeit verglichen mit WLAN-Positionsermittlung • Geringere Kosten in der Anschaffung im Vergleich zu einer serverbasierten BLE-Infrastruktur • Geringerer Stromverbrauch als eine serverbasierte BLE-Infrastruktur • Echtzeitfähigkeit: Hohe Aktualität der Daten für das Tracking von Assets • Einsatz von unterschiedlichen BLE-Beacons (Arten und Formen), insbesondere zur Kennzeichnung und Lokalisierung von Objekten und Personen (z. B. Armbänder, EC-/Chip-Karten, wetterfeste Beacons, Sensorik) • Verschiedene Formen und Arten von BLE-Beacons, insbesondere zur Kennzeichnung von Wirtschaftsgütern und Personen (z. B. Armbänder, EC-/Chip-Karten, wetterfeste Beacons, Sensorik) • Beacons mit zusätzlichen Buttons und entsprechender Sensorik bieten weitere Möglichkeiten (z. B. Hardwarebutton für mögliche Interaktionen, Sensoren zur Erfassung von Zuständen wie Temperatur, Feuchtigkeit, Luftdruck, Lichtverhältnisse, Bewegungen und Magnetfeld können einfach integriert werden) 	<ul style="list-style-type: none"> • Höhere Kosten für den Aufbau im Vergleich zu einer clientbasierten BLE-Infrastruktur • Geringerer Datenschutz, da Geräte lokalisiert werden können, ohne eine App zu benötigen

Tabelle 9: Vor- und Nachteile der serverbasierten BLE-Lokalisierung mittels Gateways³⁰

Zusammenfassend ist ein Datenblatt der BT-/BLE-Spezifikation und -Lokalisierung einschließlich einer ausführlichen Beschreibung der notwendigen Komponenten in Anlage D kompakt dargestellt.

5.1.3 Ultra Wide Band

UWB ist ein Breitbandsignal und mit eine der modernsten Technologien, die zur Lokalisierung innerhalb von Gebäuden eingesetzt werden kann. Ein wesentlicher Vorteil der Technologie ist die hohe Genauigkeit, mit der die Position bestimmt werden kann. Dabei können Genauigkeiten von 10 bis 30 Zentimetern erreicht werden. Zusätzlich ist die Lokalisierung im dreidimensionalen Raum möglich. Die Technologie benötigt als Hardware-Komponenten sogenannte UWB-Tags und eine bestimmte Anzahl sogenannter UWB-Anchor. Die Anchor übernehmen in einer UWB-Infrastruktur die Funktion der festinstallierten Referenzpunkte, analog zu BLE-Beacons bei der Verwendung von BT. Die Anchor bieten eine Sendereichweite von mehreren 100 Metern. Mit drei Anchor in Reichweite eines Tags ist eine Lokalisierung im zweidimensionalen Raum möglich. Für eine 3D-Lokalisierung müssen mindestens vier Anchor in Reichweite sein (Blankenbach et al., 2016, S. 10). Für die Ermittlung der Distanzen werden die Verfahren Ankunftszeitmessung (ToA), Laufzeitdifferenzmessung (TDoA) oder die Messung der AoA von Signalen eingesetzt (Blankenbach et al., 2016, S. 7).

Der Gegenstand oder die Person, die lokalisiert werden soll, muss mit einem batteriebetriebenen UWB-Tag ausgestattet sein. Für die Positionsbestimmung ermittelt der Tag den Abstand zu mehreren Anchor und sendet die Daten an die Anchor zurück, welche die Daten wiederum an einen Server senden. Die Latenzzeiten bei der Verwendung von UWB sind sehr gering, somit sind bis zu 100 Positions-

³⁰ Quelle: Eigene Darstellung.

abfragen pro Sekunde möglich. Die Technik hat dennoch eine Sonderstellung bzw. Nachteile. Es werden entsprechende preisintensive Komponenten benötigt und die Technologie wird derzeit noch nicht nativ von Smartphones und Tablets unterstützt. Ein wesentlicher Vorteil von UWB ist, dass die Fehler durch die Mehrwegausbreitung der Signale mithilfe der kurzen Dauer der Funksignale und des hohen Frequenzbereichs reduziert und herausgefiltert werden können (Eisenhauer et al., 2007, S. 56).

Zusammenfassend können folgende technische Spezifikationen der UWB-Technologie aufgeführt werden, ein Datenblatt der UWB-Spezifikation und -Lokalisierung einschließlich einer ausführlichen Beschreibung der notwendigen Komponenten in Anlage E kompakt dargestellt:

- Nutzung großer Frequenzbereiche mit einer Bandbreite von mindestens 500 MHz
- Frequenzbereich 3,1–10,6 GHz
- Sendeleistung 0,5 mW/–41,3 dBm/MHz
- Reichweite 10–150 m (je nach Anwendungsfall)
- Datenrate 110 kbit/s–6,8 Mbit/s

5.1.4 *Radio Frequency Identification*

Die Technologie RFID ist eine Funktechnologie zur drahtlosen Kommunikation, die insbesondere zur Identifikation von Objekten eingesetzt werden kann. Die passive RFID-Technologie funktioniert nur in der Nähe von speziellen RFID-Lesegeräten, welche die RFID-Tags mit Energie versorgen und deren Daten empfangen. Die Position der zu verfolgenden Objekte kann nicht permanent, sondern nur zu einem Lesezeitpunkt bestimmt werden. Zusammenfassend können folgende technische Spezifikationen der RFID-Technologie aufgeführt werden:

- Langwelle bei 125 kHz, 134 kHz, 250 kHz, 375 kHz, 500 kHz, 625 kHz, 750 kHz, 875 kHz: geringe bis mittlere Reichweite (bis zu 1 m), geringe Datenraten, Erkennungsrate
- Kurzwelle (HF) bei 13,56 MHz: mittlere Reichweite, mittlere bis hohe Übertragungsgeschwindigkeit
- UHF bei 865–869 MHz (europäische Frequenzen) bzw. 950 MHz: hohe Reichweite (2–6 m mit passiven Transpondern, 6–100 m für semiaktive Transponder)
- Aktive und passive RFID-Tags (mit und ohne Batterie) auch Transponder genannt
- RFID-Transponder können sehr klein sein
- Passive Tags werden vom Lesegerät mit Energie versorgt (magnetische Wechselfelder)

Zusammenfassend ist ein Datenblatt der RFID-Spezifikation und -Lokalisierung einschließlich einer ausführlichen Beschreibung der notwendigen Komponenten in Anlage F kompakt dargestellt.

5.1.5 *Zusammenfassung von Vor- und Nachteilen*

Nachfolgend werden die zentralen Vor- und Nachteile der betrachteten Technologien in Bezug auf die Möglichkeiten und Einschränkungen zur Indoor-Lokalisierung dargestellt (vgl. **Tabelle 10**).

	Vorteile	Nachteile
WLAN	<ul style="list-style-type: none"> Die weite Verbreitung von WLAN-Netzwerken macht diese Technologie besonders attraktiv WLAN-fähige Geräte können durch Auswertung der Signale von vorhandenen WLAN-Netzen (Access-Points) eine Position bestimmen Hohe Reichweite von WLAN-Signalen (bis zu 150 m) Gut geeignet, um Besucherströme zu erfassen und zu analysieren Vielzahl an Integrationsmöglichkeiten (vorhandene Enterprise WLAN-Netzwerkcontroller und Access-Points bieten teilweise notwendige Funktionalitäten (z. B. Cisco, Aruba) Geringere Kosten, da die erforderlichen Infrastrukturen bestehen und diese für den Datentransfer sowie zur Positionsbestimmung verwendet werden können (Eisenhauer et al., 2007, S. 55) 	<ul style="list-style-type: none"> Genauigkeit von 10–15 m (Genauigkeit von UWB, RFID oder BLE ist nur schwer bzw. in Kombination unterschiedlicher Verfahren mit WLAN zu erreichen) Hohe Latenzzeiten Für die Lokalisierung von Objekten weniger gut geeignet (Asset-Tracking) Hoher Energiebedarf WLAN-fähige Tags sind nicht so preiswert wie BLE-Tags Access-Points bzw. Gateways für die serverbasierten Lokalisierung sind teuer (Hardware sowie notwendige Lizenzen)
BT/BLE	<ul style="list-style-type: none"> Sehr energieeffizient bei Verwendung von BLE Kostengünstig Vergleichsweise hohe Reichweiten Für Anwendung der Indoor-Navigation einfache Möglichkeiten zur Implementierung, da batteriebetriebene BLE-Beacons zur clientbasierten Lokalisierung schnell in Gebäuden ohne Verkabelung oder bauliche Maßnahmen installiert werden können Ausreichende Genauigkeiten für die meisten Anwendungsfälle Sehr gut für Näherungserkennung (engl. Proximity Detection) 	<ul style="list-style-type: none"> Keine sehr genaue Lokalisierung möglich Störanfälligkeit, wenn sich die Signale im 2,4 GHz Bereich überschneiden Probleme bei einer hohen Anzahl von Tags auf engem Raum
UWB	<ul style="list-style-type: none"> Extrem hohe Genauigkeit der Lokalisierung Geringere Störanfälligkeit (Interferenzen, Reflexionen), da Effekte der Mehrwegausbreitung der Signale durch den hohen Frequenzbereich reduziert werden Lokalisierung im dreidimensionalen Raum/ Erfassung der Höhe (z-Koordinate) 	<ul style="list-style-type: none"> Vergleichsweise hohe Anschaffungskosten Unzureichende Kompatibilität mit mobilen Endgeräten (aktuelle Smartphones und Tablets bis auf das iPhone 11 haben keinen UWB-Chip)
RFID	<ul style="list-style-type: none"> Unempfindlich für Interferenzen und Signalstörungen Keine Batterien notwendig, da die Tags passiv mit Energie versorgt werden 	<ul style="list-style-type: none"> Kostenintensiv, da Lesegeräte oder Schranken verbaut werden müssen (z. B. in Türrahmen) Geringe Reichweite (maximal bis zu 1 m) Stationäres System (Lesegeräte können nur die Information, ob ein Tag „gesehen“ oder „nicht gesehen“ wird, weitergeben) Mobile Endgeräte haben keine native RFID-Schnittstelle und können nur in Kombination mit entsprechender Peripherie RFID-Tags lesen

Tabelle 10: Vor- und Nachteile der betrachteten Technologien im Überblick³¹

Neben den dargestellten Vor- und Nachteilen, die bereits einzelne Bewertungs- und Abgrenzungskriterien beinhalten, werden im folgenden Kapitel zentrale Bewertungskriterien von Indoor-Lokalisierungssystemen beschrieben.

³¹ Quelle: Eigene Darstellung.

5.2 *Bewertungs- und Abgrenzungskriterien für den Vergleich*

Im Folgenden werden die zentralen Kriterien herausgearbeitet, die in der Literatur für die Bewertung von Technologien der Indoor-Lokalisierung diskutiert werden und die in eine Entscheidungsheuristik für die Technologieauswahl Eingang finden sollten.

5.2.1 *Genauigkeit*

Die Genauigkeit, Präzision oder auch Auflösung der Lokalisierung ist eines der wichtigsten Kriterien für die Indoor-Lokalisierung (Mautz, 2012, S. 17) und kann ebenfalls als zentrales Kriterium für die Abgrenzung und den Vergleich von unterschiedlichen funkwellenbasierten Technologien der Indoor-Lokalisierung (Zafari, Gkelias & Leung, 2017) operationalisiert werden. Die Präzision der Lokalisierung ist dabei kein starres Kriterium, da durch die Installation von zusätzlichen Sende- bzw. Empfangseinheiten (Tekker, 2005, S. 15) oder durch die Kombination unterschiedlicher Verfahren eine Steigerung möglich ist (Mautz, 2012; Kapitel 4). Abhängig von den Anwendungsbereichen und der Infrastruktur können unterschiedliche Anforderungen an die Genauigkeit festgelegt werden (vgl. Anhang F).

5.2.2 *Reichweite*

Funktechnologien können auch durch die Betrachtung der Reichweite der Signale miteinander verglichen werden (vgl. Kapitel 3.4). Die Reichweite ist maßgeblich abhängig von der Sendeleistung der Funkmodule. Zudem wird die Reichweite der Signale von der Beschaffenheit der Infrastruktur, in der die Technologien eingesetzt werden, beeinflusst (Tekker, 2005, S. 16). Eine höhere Reichweite bedeutet ebenfalls, dass die Anzahl an notwendigen Referenzpunkten und damit die Kosten vergleichsweise geringer sind (Zafari et al., 2017, S. 14). Es muss dennoch beachtet werden, dass die Performance mit zunehmender Entfernung von Receiver und Transmitter abnimmt (Zafari et al., 2017, S. 14). Genauso wie die Genauigkeit ist auch die Reichweite ein wichtiges Kriterium, welches abhängig von den Anwendungsfällen und der Umgebung, in der die Lokalisierung erfolgen soll, betrachtet werden muss (Zafari et al., 2017, S. 14).

5.2.3 *Skalierbarkeit*

Die Skalierbarkeit von Systemen und Technologien zur Indoor-Lokalisierung ist ein weiteres wichtiges Kriterium und stellt zudem eine technische Herausforderung dar. Gerade in öffentlichen Gebäuden mit einer Vielzahl von Nutzer:innen oder in Anwendungsbereichen des Trackings mit einer hohen Anzahl von Assets, muss eine entsprechende Skalierbarkeit gewährleistet werden können. Im Gegensatz zur clientbasierten Lokalisierung, bei der die Position auf den Endgeräten ermittelt wird, bestehen bei der serverbasierten Lokalisierung aufgrund der hohen Anzahl von Assets und der damit verbundenen notwendigen Rechenleistung zusätzliche technische Schwierigkeiten (Zafari et al., 2017, S. 15). Gerade im Anwendungsbereich der Krankenhäuser spielt die Skalierbarkeit aufgrund der hohen Anzahl von Personen und Objekten eine wichtige Rolle.

5.2.4 *Latenz*

Systeme zur Indoor-Lokalisierung haben in der Regel die Anforderung einer geringen Latenz bzw. Verzögerung für die Bestimmung der Position, da dies die User Experience maßgeblich beeinflusst. Die Nutzer:innen entsprechender Systeme fordern meist ein direktes Feedback nach Änderung der Position (Zafari et al., 2017, S. 15). Eine geringe Latenz ist daher insbesondere für Anwendungen der Indoor-Navigation ein relevantes Kriterium, aber auch für verschiedene Asset-Tracking Applikationen

nicht vernachlässigbar. Für die Praxis bedeutet dies vor allem, dass eine Position möglichst durch eine geringe Anzahl an Referenzpunkten innerhalb von Millisekunden bestimmt werden sollte. Dies impliziert, dass bei der Verbauplanung und Installation diese Anforderung mitberücksichtigt werden muss.

5.2.5 *Kompatibilität*

Unter Kompatibilität wird die Unterstützung von verschiedenen Endgeräten beschrieben (Zafari et al., 2017, S. 14). Die UWB-Technologie bietet viele Vorteile, wie beispielsweise eine hohe Genauigkeit. Gleichzeitig ist diese Technologie aber auch für eine unzureichende Kompatibilität bekannt, da die meisten der Endgeräte die UWB-Technologie nicht nativ unterstützen und zur Lokalisierung daher nur spezielle UWB-Tags eingesetzt werden können (Zafari et al., 2017, S. 14).

5.2.6 *Störanfälligkeit*

Funkwellenbasierte Technologien werden von verschiedenen Faktoren beeinflusst. Es ist zu beachten, dass sich Signale überlagern und gegenseitig auslöschen können. Im Nachfolgenden sind die verschiedenen Stör- und Fehlerquellen der funkwellenbasierten Lokalisierung aufgelistet (Mautz, 2012, S. 7–8):

- Mehrwegausbreitung der Signale durch die Reflexion an Wänden und Gegenständen
- Dämpfung und Streuung von Signalen durch Hindernisse
- Beeinflussung bzw. Schwankungen der Signale durch elektronische Geräte
- Nicht-Sichtlinien-Bedingungen (engl. Non-Line-of-Sight)
- Veränderungen in der Umgebung (hoher Einfluss auf Fingerprinting-Lösungen), beispielsweise durch Menschen, bewegliche Gegenstände oder Türen

5.2.7 *Energieeffizienz*

Ein weiteres, sehr relevantes Kriterium ist die Energieeffizienz, da oftmals batteriebetriebene Endgeräte und Asset-Tags eingesetzt werden. Die Energieversorgung und insbesondere die Energieeffizienz von Funktechnologien hat daher einen sehr hohen Einfluss auf IPS, da hierdurch der Wartungsaufwand für den Austausch von Batterien und Akkus maßgeblich beeinflusst wird (Zafari et al., 2017, S. 14). Technologien mit einem hohen Energieverbrauch werden daher im Bereich der Indoor-Lokalisierung keine weite Verbreitung und Anwendung finden (Zafari et al., 2017, S. 14). Die Energieeffizienz von Indoor-Lokalisierungstechnologien sollte daher möglichst minimiert werden. Dies kann zum einen durch Verwendung einer energiesparenden Technologie erfolgen, zum anderen durch die Verwendung von rechenintensiven Verfahren und zugehörigen Algorithmen der Positionsbestimmung auf Seite eines Servers, anstatt auf den Endgeräten (Zafari et al., 2017, S. 14). Weiterhin kann auch durch die Konfiguration des Sendeintervalls sowie der Sendeleistung der Energieverbrauch beeinflusst werden (Zafari et al., 2017, S. 14).

5.2.8 *Integration*

Die Integration umfasst die Anzahl von notwendigen Maßnahmen zum Aufbau eines entsprechenden Systems. Weitere Aspekte der Integration umfassen die Möglichkeit, ein System problemlos in vorhandene Infrastrukturen einzubinden sowie diese neben dem Einsatz zur Indoor-Lokalisierung auch zur Integration weiterer Sensordaten zu nutzen. Offene Protokolle bzw. Spezifikationen von Protokollen, die dafür geeigneten Freiräume bieten, sind demnach für die Integration besonders geeignet.

5.2.9 *Kosten*

Die Kosten für die Anpassung, Implementierung und den Betrieb von Technologien und Systemen zur Indoor-Lokalisierung sollten möglichst gering sein. Die Anschaffung von proprietären Systemen verursacht meist höhere Kosten (Zafari et al., 2017, S. 14). Geringe Kosten steigern demnach auch Verbreitung und Adoption geeigneter Systeme, da auch kleinere Unternehmen die Möglichkeit haben, anfallende Investitionskosten zu tragen (Zafari et al., 2017). Im Hinblick auf die Kosten kann eine Unterscheidung der folgenden Positionen erfolgen:

- Betrachtung der Investitions- bzw. Anschaffungskosten für die Infrastruktur
- Betrachtung der laufenden Kosten für Betrieb und die Wartung der Infrastruktur

6 Vorstellung und Anwendung des heuristischen Entscheidungsverfahrens

Als Entscheidungsverfahren wird ein „System von intersubjektiv nachvollziehbaren Regeln der Informationsbeschaffung und -verarbeitung verstanden, das zur Bewältigung einer bestimmten Art von Entscheidungsproblemen eingesetzt werden kann“ (Grünig & Kühn 2013, S. 43). Im Folgenden wird das allgemeine heuristische Entscheidungsverfahren beschrieben.

6.1 Allgemeines heuristische Entscheidungsverfahren

Das allgemeine heuristische Entscheidungsverfahren für komplexe Probleme nach Grünig und Kühn (2013) ermöglicht die objektive Entscheidungsfindung durch die systematische Betrachtung und Beurteilung von möglichen Lösungsvarianten. Das Verfahren umfasst sieben Schritte, die aufeinander aufbauen und heuristische Schlaufen beinhalten können, welche den Rücksprung bzw. die Rückkopplung auf vorhergehende Stufen ermöglichen (vgl. **Abbildung 21**).

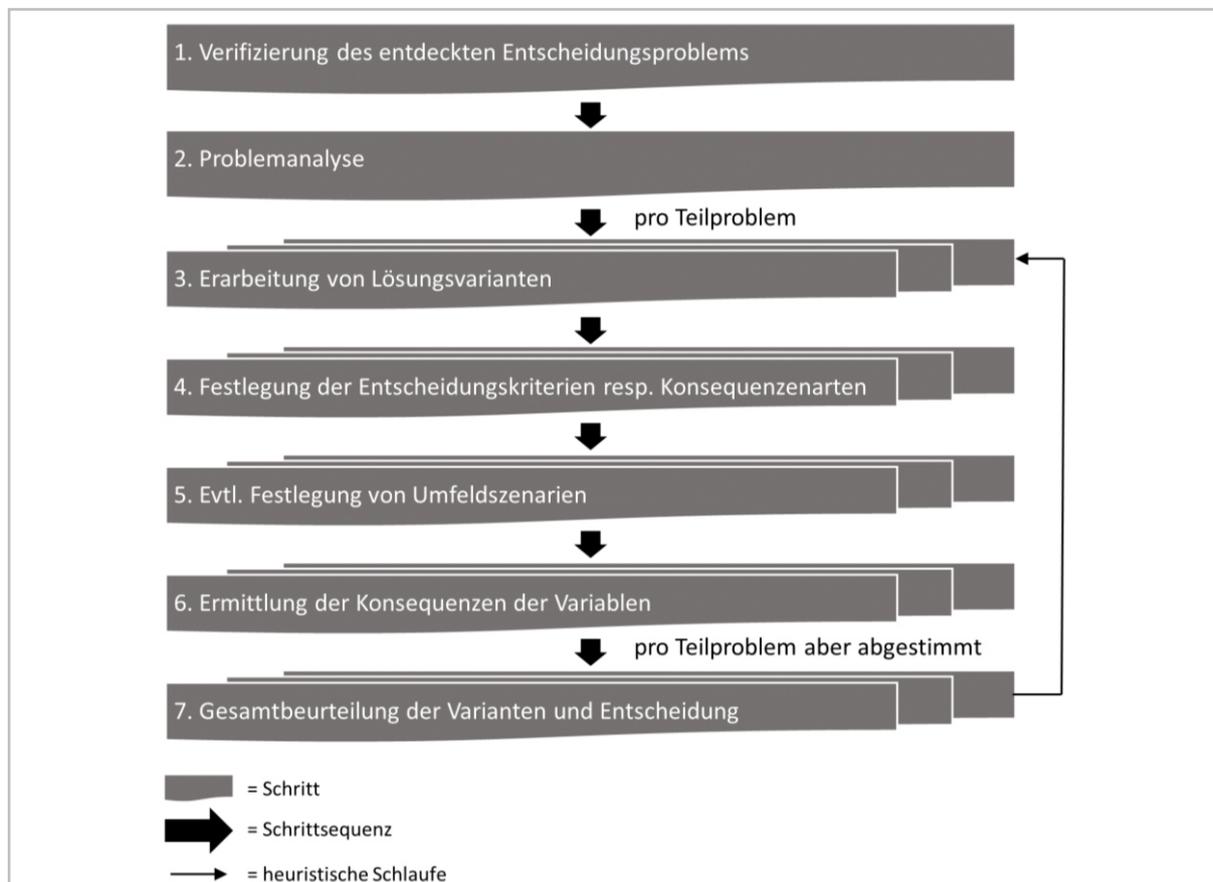


Abbildung 21: Schritte des allg. heuristischen Entscheidungsverfahrens³²

Der Problemlösungsprozess wird durch die Anwendung des Verfahrens in verschiedene Teilschritte zerlegt. Wenn im Rahmen der Problemanalyse mehrere Teilprobleme identifiziert werden, müssen für jedes Teilproblem die Schritte drei bis sieben durchgeführt werden. Dabei beschreibt das Entscheidungsproblem eine Situation, in der ein:e Akteur:in bzw. Entscheidungsträger:in (z. B. Führungskraft des Krankenhausmanagements) eine bestimmte Vorstellung über einen Sollzustand hat, die von dem Istzustand abweicht und zu dessen Erreichung mehrere Handlungsalternativen vorliegen (Grünig & Kühn,

³² Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Grünig und Kühn (2013, S. 66).

2013, S. 7). Als Aktor:in wird die Person bezeichnet, die sich der Problemlösung annimmt, das Problem analysiert, über die Lösungsvarianten entscheidet und letztendlich Handlungen vornimmt (Grünig & Kühn, 2013, S. 34). Ein:e Aktor:in bzw. Entscheidungsträger:in steht vor der Problemstellung, die unterschiedlichen Handlungsmöglichkeiten zu verstehen und zu bewerten, um eine objektive Entscheidung fällen zu können. Abbildung 21 zeigt die wichtigste heuristische Schlaufe des Verfahrens, die einen Rücksprung von Schritt sieben zu Schritt drei ermöglicht. Heuristische Verfahren sind insbesondere dadurch gekennzeichnet, dass auch weitere Schleifen auftreten können. Beispielsweise kann von Schritt sechs – Ermittlung von Konsequenzen – auch ein Rücksprung zu Schritt vier, der Festlegung von Entscheidungskriterien, erfolgen (Grünig & Kühn, 2013, S. 69). Rücksprünge sind notwendig, wenn im Verlauf der Problemlösung neue Erkenntnisse erarbeitet werden, welche Einfluss auf die vorherigen Betrachtungen haben. Die Autoren unterscheiden zwischen einfachen und komplexen Entscheidungsproblemen. In **Abbildung 22** sind die Merkmale von komplexen Entscheidungsproblemen aufgeführt. Ein komplexes Entscheidungsproblem liegt vor, wenn mindestens zwei der nachfolgenden Merkmale erfüllt sind (Grünig & Kühn, 2013, S. 8):

- Gleichzeitiges Verfolgen von mehreren Zielstellungen
- Hohe Anzahl von Entscheidungsvariablen und -ausprägungen
- Beurteilung der Lösungen im Hinblick auf mehrere Umfeldszenarien
- Konsequenzen der Problemlösungen können nur partiell bestimmt werden

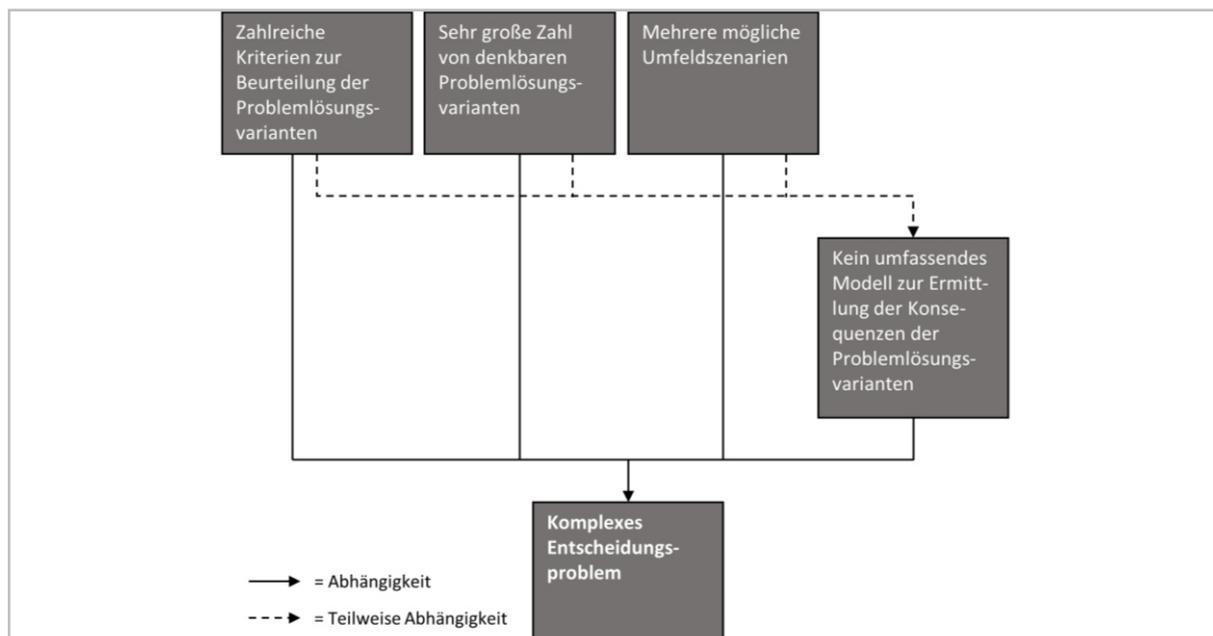


Abbildung 22: Merkmale von komplexen Entscheidungsproblemen³³

Betriebswirtschaftliche Problemstellungen und Entscheidungsprozesse haben oftmals eine hohe Komplexität. Die angestrebten Sollzustände werden in der Betriebswirtschaftslehre vielfach als Ziele bezeichnet. Unternehmensziele bzw. betriebswirtschaftliche Ziele stellen die Orientierungs- bzw. Richtgrößen für das Handeln von Unternehmen und Entscheidungsträger:innen dar und umfassen eine Beschreibung der Zustände, die durch unternehmerische Maßnahmen erreicht werden sollen (Meffert, Burmann, Kirchgeorg & Eisenbeiß, 2018, S. 284). Allgemein kann zwischen Sach-, Wert- und Sozialzielen unter-

³³ Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Grünig und Kühn (2013, S. 10).

schieden werden (Sawalsky, 2013, S. 62). Eine weitere Kategorisierung führt zur Unterteilung in Marktleistungs-, Marktstellungs-, Rentabilitäts- sowie finanzielle, soziale, gesellschafts- oder umweltbezogene Ziele (Meffert et al., 2018). Zur Erreichung der Ziele und für den langfristigen Erfolg von Unternehmen ist die Fähigkeit des Managements, Probleme zu analysieren und zieladäquat zu lösen, essenziell (Grünig & Kühn, 2013, S. 1). Der Einsatz von Entscheidungsverfahren steigert die Qualität von Problemlösungen im Vergleich zur intuitiven Entscheidungsfindung. Zudem kann durch den Einsatz entsprechender Verfahren gewährleistet werden, dass Außenstehende die Gedankengänge von Aktor:innen besser verstehen und nachvollziehen können. Im Gegensatz zur intuitiven Entscheidungsfindung bietet die Anwendung des Verfahrens weitere zentrale Vorteile (Grünig & Kühn, 2013, S. 63–64):

- Ausrichtung der Überlegungen zur Problemlösung auf übergeordnete Ziele (Reduktion von Fehlentscheidungen durch mangelnde Zielausrichtung)
- Strikte Trennung zwischen Analyse, Erarbeitung und Beurteilung der Lösungen (Abgrenzung von Faktenwissen und subjektiven Bewertungen)
- Systematische Vorgehensweise zur Steigerung der Qualität und Effizienz von Entscheidungen (durch frühzeitiges Erkennen von Fehlern und Widersprüchen in den Überlegungen)

Innerhalb der nachfolgenden Abschnitte wird beschrieben wie die einzelnen Teilschritte des Verfahrens zur zielorientierten Entscheidungsfindung und Problemlösung angewendet werden sollten.

6.1.1 *Verifizierung des entdeckten Entscheidungsproblems*

Der erste Schritt des Verfahrens erfordert die Verifizierung des Vorliegens eines Entscheidungsproblems. Ein:e Aktor:in muss in diesem Schritt überprüfen, ob eine Divergenz zwischen dem Soll- und Istzustand vorliegt und ob diese auf verlässliche Informationen zurückführen ist (Grünig & Kühn, 2013, S. 69). Liegt ein Entscheidungsproblem vor, so müssen die Verantwortlichen ein Zeitfenster für die Bearbeitung des Problems festlegen. Das Zeitfenster der Bearbeitung wird primär durch die Dringlichkeit und die Wichtigkeit der Problemlösung und der zur Verfügung stehenden Ressourcen bestimmt. Grünig und Kühn führen drei zentrale Fragen an, die im Vorfeld der Untersuchung zur Verifizierung eines Entscheidungsproblems gestellt werden sollten (Grünig & Kühn, 2013, S. 79):

- Wurde eine Soll-Ist-Abweichung durch verlässliche Informationen bestimmt?
- Wie erheblich ist diese Soll-Ist-Abweichung?
- Ist die Bearbeitung des Entscheidungsproblems lohnend?

Probleme können nach Grünig und Kühn (2013) ad hoc oder durch ein Problementdeckungssystem identifiziert werden. Als Problementdeckungssysteme werden Systeme des betrieblichen Managements zur Beschaffung, Verarbeitung, Speicherung und Bereitstellung von Informationen, die zur Problementdeckung eingesetzt werden können, bezeichnet (Grünig & Kühn, 2013, S. 24f). Systeme der Finanzbuchhaltung oder des Unternehmenscontrollings können beispielsweise zur Identifikation von betriebswirtschaftlichen Problemen eingesetzt werden. Nach erfolgreicher Identifikation des Entscheidungsproblems erfolgt im nächsten Schritt die Problemanalyse.

6.1.2 *Problemanalyse*

Im zweiten Schritt des Verfahrens, der Problemanalyse, erfolgt die Untersuchung, Abgrenzung und Strukturierung des Problems. Ein Problem kann in diesem Schritt, bei hoher Komplexität, in weitere Teilprobleme unterteilt werden. Wenn mehrere Probleme identifiziert wurden, kann zwischen parallel

und nacheinander zu bewältigenden Teilproblemen unterschieden werden. In diesem Fall müssen die nachfolgenden Verfahrensschritte für jedes Teilproblem bearbeitet werden. Die Struktur der Probleme ist ausschlaggebend dafür, ob eine parallele oder serielle Abarbeitung notwendig ist. Für die Problemanalyse sollten folgende Teilschritte durchgeführt werden (vgl. **Abbildung 23** und Grünig & Kühn, 2013, S. 82ff):

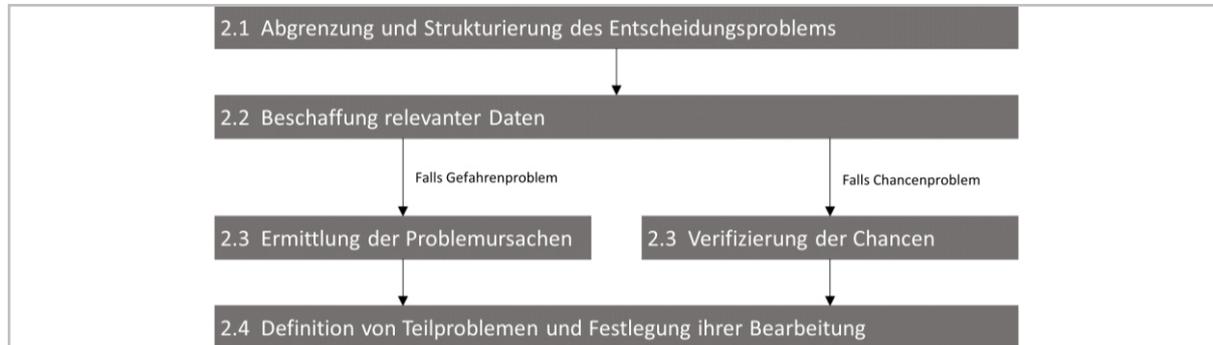


Abbildung 23: Untergliederung der Problemanalyse in weitere Teilschritte³⁴

Es kann optional ein sogenannter Frame erstellt werden, um das Problem zu skizzieren (Grünig & Kühn, 2013, S. 85). Bei der Betrachtung des Problemcharakters kann zwischen Wahl- und Gestaltungsproblemen (auch bezeichnet als Designprobleme) sowie Gefahren- und Chancenproblemen unterschieden werden (Grünig & Kühn, 2013, S. 9). Wahlprobleme entfallen in die Kategorie der einfachen Entscheidungsprobleme und sind dadurch gekennzeichnet, dass die Entscheidungsvarianten abschließend bekannt sind. Gestaltungsprobleme werden als komplexe Entscheidungsprobleme interpretiert, da eine Vielzahl von Möglichkeiten zur Umsetzung existieren. Liegt ein Chancenproblem vor, so ist es sinnvoll, die wichtigsten Einflussfaktoren darzustellen, um die Chance zu verifizieren. Nachdem ein Problem analysiert, skizziert und verstanden wurde, können im nächsten Schritt die möglichen Lösungsvarianten erarbeitet werden. Für die nachhaltige Lösung von Gefahrenproblemen sollten zusätzlich die Ursachen des Problems ermittelt werden (Grünig & Kühn, 2013, S. 91).

6.1.3 Erarbeitung von Lösungsvarianten

Innerhalb dieses Schrittes müssen mindestens zwei Lösungsvarianten für das Entscheidungsproblem erarbeitet werden. Für die Erarbeitung der Lösungsvarianten sollten zuvor die Rahmenbedingungen und der Lösungsraum festgelegt werden. Die Definition von Rahmenbedingungen ermöglicht es, die Verhaltensweisen und die einsetzbaren Ressourcen zu beschränken. Durch die Festlegung des Lösungsraums wird ein Überblick über die Vielzahl an möglichen Lösungsansätzen geschaffen, wobei gleichzeitig einzelne Ansätze von der Betrachtung ausgeschlossen werden können (Grünig & Kühn, 2013, S. 103). Die im Lösungsraum identifizierten Ansätze stellen die einzelnen Lösungsvarianten dar, aus denen eine Entscheidungsalternative auszuwählen ist. Sollte eine Fortführung des Status Quo ebenfalls eine Alternative bzw. Variante darstellen, so ist zudem mindestens eine weitere Variante zu ermitteln. Ebenfalls kann der Status Quo eine Bewertungsbasis für den Vergleich darstellen, zu der die Differenzen der Konsequenzen ermittelt werden können (Grünig & Kühn, 2013, S. 108). Sollten keine zwei grundlegend unterschiedlichen Lösungsvarianten erarbeitet werden können, liegt kein Entscheidungsproblem vor. In diesem Fall ist keine aufwändige Bewertung notwendig und der Prozess kann abgebrochen werden. Die zweckmäßigste Variante kann direkt ausgewählt werden (Grünig & Kühn, 2013, S. 70).

³⁴ Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Grünig und Kühn (2013, S. 83).

6.1.4 Festlegung der Entscheidungskriterien

In diesem Schritt müssen die wesentlichen Entscheidungskriterien zur Bewertung der Lösungsvarianten festgelegt werden. Für die Festlegung der Entscheidungskriterien ist die Definition eines konkreten Zieles notwendig, anschließend kann die Bewertung der Varianten erfolgen (Grünig & Kühn, 2013, S. 109). Nach Grünig und Kühn (2013, S. 111) muss ein Entscheidungskriterium daher die folgenden zwei Anforderungen erfüllen:

- Repräsentation des Zieles
- Möglichkeit zur Bewertung der Varianten

Da oftmals mehrere Zielstellungen gleichzeitig verfolgt werden, müssen meist verschiedene Entscheidungskriterien definiert werden. Eine Überschneidung von Kriterien ist zu vermeiden, da diese unabhängig voneinander sein sollten. Für jedes Entscheidungskriterium muss eine Messskala bzw. ein Skalenniveau für die Bewertung bestimmt werden. Die nachfolgenden Skalen können dazu verwendet werden (Grünig & Kühn, 2013, S. 113):

- Ratioskala/Verhältnisskala: Rangfolge mit Messbarkeit der Abstände und eines Nullpunktes
- Intervallskala: Rangfolge mit Messbarkeit der Abstände
- Ordinalskala: Rangfolge ohne Messbarkeit der Abstände

6.1.5 Optional Festlegung von Umfeldszenarien

Bei vorhandenen Unsicherheiten der Auswirkungen der Lösungsvarianten können verschiedene Umfeldszenarien in das Entscheidungsverfahren einbezogen werden. Nach Möglichkeit sollten dabei die Wahrscheinlichkeiten für den Eintritt der jeweiligen Szenarien bestimmt werden. Erst danach kann festgelegt werden, ob das Problem parallel auch in Abhängigkeit von unterschiedlichen Umfeldszenarien betrachtet werden sollte. Grundlegend sollte zuvor die Notwendigkeit der Festlegung von Umfeldszenarien beurteilt werden. Auf Basis der Ergebnisse dieses und der vorherigen Schritte kann nun eine Entscheidungsmatrix erstellt werden, in der die erarbeiteten Lösungsvarianten den Kriterien und Szenarien gegenübergestellt werden.

6.1.6 Ermittlung der Konsequenzen der Varianten

Dieser Schritt erfordert die Erarbeitung der Auswirkungen und Konsequenzen der einzelnen Lösungsmöglichkeiten. Es müssen für jede Lösungsmöglichkeit, jedes Entscheidungskriterium und jedes Umfeldszenario die individuellen Konsequenzen ermittelt werden.

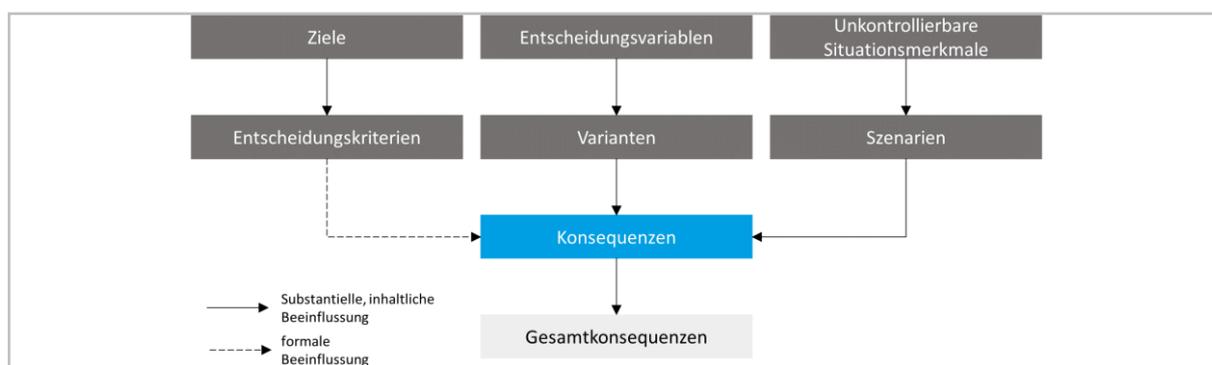


Abbildung 24: Position der Konsequenzen im Entscheidungsprozess³⁵

³⁵ Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Grünig und Kühn (2013, S. 125).

Die **Abbildung 24** zeigt, dass die Entscheidungskriterien, Varianten und Szenarien im Wesentlichen die Konsequenzen im Entscheidungsverfahren sowie die Gesamtkonsequenzen beeinflussen. Konsequenzen können nach Grünig und Kühn subjektiv, durch empirische Erhebungen oder durch wissenschaftlich gestützte Prognosemethoden bestimmt werden, wobei im letzten Fall das höchste Qualitätsniveau erreicht wird (Grünig & Kühn, 2013, S. 126).

6.1.7 Gesamtbeurteilung der Varianten und Entscheidung

Die Gesamtbeurteilung der Lösungsvarianten stellt den letzten Schritt des Verfahrens dar. Diese kann analytisch oder summarisch erfolgen (Grünig & Kühn, 2013, S. 71). Für eine analytische Beurteilung müssen methodische Regeln, die als Entscheidungsmaxime bezeichnet werden, festgelegt werden, um die Gesamtkonsequenzen der Varianten zu bestimmen. Bei einem summarischen Vorgehen erfolgt die Abwägung der einzelnen Vor- und Nachteile der Varianten. Die Grundlage für die Gesamtbeurteilung bildet die ausgefüllte Entscheidungsmatrix, welche die Varianten, Entscheidungskriterien und Konsequenzen darstellt (Grünig & Kühn, 2013, S. 161). In die Entscheidungsmatrix können auch die Eintrittswahrscheinlichkeiten der unterschiedlichen Szenarien mit einbezogen werden. Die Entscheidungsmatrix wird innerhalb dieses Schrittes um Konsequenzenwerte ergänzt. Weiterhin können bei der Gesamtbeurteilung auch irrelevante Varianten entfernt werden. Danach kann die Entscheidung über die zu realisierende Variante auf Basis dieser Übersicht gefällt werden.

6.2 Krankenhausspezifische Anwendung der Entscheidungsheuristik

Das allgemeine heuristische Entscheidungsverfahren wird innerhalb dieser Arbeit zur Auswahl einer geeigneten Technologie zur Indoor-Lokalisierung im Krankenhaus eingesetzt, da keine speziellen Entscheidungsverfahren für diese Problemstellung in der Literatur identifiziert werden konnten. Der Einsatz der vorgestellten Entscheidungsheuristik ermöglicht ein systematisches Vorgehen und soll sicherstellen, dass Außenstehende das Vorgehen und die Gedankengänge des Auswahlprozesses nachvollziehen können. Dies bedeutet nicht, dass Dritte auch mit der Auswahlentscheidung einverstanden sein müssen. Bei abweichenden Zielen, Einsatzbereichen, gesetzten Anforderungen sowie Bewertungskriterien können Informationen anders bewertet werden. Zudem können anderen Akteur:innen auch andere Informationen zur Verfügung stehen, welche eine andere Technologieauswahl begründen lässt.

6.2.1 Kennzeichnung der einzelnen Stufen der Entscheidungsheuristik

Im Kapitel 6.1 wurden die generellen Schritte der Entscheidungsheuristik vorgestellt. Für eine exemplarische Anwendung der Entscheidungsheuristik werden die Erkenntnisse der Literaturanalyse einbezogen. Zur Ermittlung der krankenhausspezifischen Entscheidungskriterien und Bedürfnisse wurden im Vorhinein qualitative Expert:inneninterviews mit den Führungskräften und den Fachabteilungen verschiedener Krankenhäuser geführt.³⁶ In der folgenden **Tabelle 11** ist die Spezifikation der Entscheidungsstufen 1–5 dargestellt, wobei auf die entsprechenden Kapitel und Quellen sowie Anhänge verwiesen wird, die zur Spezifikation der Entscheidungsstufen einbezogen wurden.

³⁶ Aus Gründen der Vertraulichkeit können die Gesprächsprotokolle dieser Publikation nicht beiliegen. Für diesbezügliche Informationen kann Kontakt mit der visgato GmbH aufgenommen werden.

Entscheidungsstufe	Anwendung auf das Entscheidungsproblem zur Auswahl einer Technologie der Indoor-Lokalisierung	Quellen und Kapitel
1	<p>Aufgrund der dargestellten Analyse von deutschen Krankenhäusern wurden Soll- und Ist-Abweichungen identifiziert oder solche sind in der Zukunft zu erwarten.</p> <p>Im Rahmen der Soll-Analyse wurden folgende Bereiche identifiziert:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Steigerung der Behandlungsqualität • Steigerung der Prozesseffizienz • Kostenreduktion • Optimierung der Auslastung • Reduzierung der Verweildauern <p>Die Ist-Analyse der deutschen Krankenhauslandschaft zeigt:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Schlechte betriebswirtschaftliche Lage (Notwendigkeit der Kostenreduktion und Optimierung der Auslastung) • Problem des Fachkräftemangels (Notwendigkeit zur Steigerung der Prozesseffizienzen und Reduktion der Verweildauern) • Fehlender Einsatz von IKT (Möglichkeit zur Steigerung der Prozesseffizienzen) 	<p>Kapitel 2.4</p> <p>Kapitel 2.2 Kapitel 2.3</p>
2	<p>Gerade die, als Chancen der Digitalisierung beschriebenen, Wirkungsdimensionen können als anzustrebende bzw. wünschenswerte Sollzustände interpretiert werden.</p> <p>Aus den, im Vorhinein durchgeführten, qualitativen Expert:innen-interviews ging hervor, dass in deutschen Krankenhäusern bisher noch keine Technologien zur Indoor-Lokalisierung eingesetzt werden und den Entscheidungsträgern auch keine zuverlässigen Möglichkeiten zur Beurteilung von geeigneten Technologien zur Verfügung stehen.</p> <p>Zur Reduktion der im vorherigen Schritt dargestellten Ist-Abweichungen, die insbesondere durch die Betrachtung der aktuellen Situation und den Herausforderungen (Ist-Analyse) ermittelt wurden, können auf der anderen Seite die Chancen der Digitalisierung (Soll-Analyse) zur Bewältigung der folgenden Probleme eingesetzt werden:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ineffizienter Einsatz von Ressourcen • Steigerung der Servicequalität 	Kapitel 2.5
3	<ul style="list-style-type: none"> • WLAN • BT/BLE • UWB • RFID 	Kapitel 5.1
4	<ul style="list-style-type: none"> • Genauigkeit • Skalierbarkeit • Latenz • Kompatibilität • Störanfälligkeit • Energieversorgung und Energieeffizienz • Integrationsaufwand • Kosten 	Kapitel 5.2
5	<p>Die Ermittlung von Umfeldszenarien wird im Rahmen dieser Arbeit aus Gründen der hohen Komplexität, welche den Rahmen der Arbeit überschreiten würde, nicht betrachtet. Als mögliche Umfeldszenarien für eine weiterführende Betrachtung können die</p>	

Entscheidungsstufe	Anwendung auf das Entscheidungsproblem zur Auswahl einer Technologie der Indoor-Lokalisierung	Quellen und Kapitel
	Entwicklung der Anschaffungskosten von notwendigen Komponenten sowie die Weiterentwicklung der Technologien zur Indoor-Lokalisierung mögliche Anknüpfungspunkte für weitere Forschungsarbeiten darstellen.	
6	Ermittlung der Konsequenzen der Varianten Entscheidungsmatrix auf Grundlage der Lösungsvarianten (Schritt 3) und Entscheidungskriterien (Schritt 4)	Kapitel 4 Kapitel 5.1 Kapitel 5.2
7	Gesamtbeurteilung der Varianten und Entscheidung Auf Grundlage der Ergebnisse der Entscheidungsmatrix	Kapitel 6.2.2 Kapitel 6.2.3

Tabelle 11: Spezifikation der Entscheidungsstufen des allgemeinen heuristischen Entscheidungsverfahrens³⁷

Entsprechend der Verifikation des Entscheidungsproblems und der Problemanalyse werden die, im Rahmen der Arbeit beschriebenen, Technologieoptionen zur Indoor-Lokalisierung sowie die abgeleiteten Bewertungskriterien im Nachfolgenden in einer Entscheidungsmatrix zusammengeführt.

6.2.2 Abgeleitete Entscheidungsmatrix

Zur Bewertung ist eine Operationalisierung der einzelnen Bewertungskriterien notwendig. Für die Operationalisierung können zum Teil objektive Daten herangezogen werden. Allerdings ist für die Einschätzung einiger Bewertungskriterien fundiertes Erfahrungswissen aus Pilotprojekten oder von Expert:innen notwendig. Beispielsweise können für die Reichweite oder den Energieverbrauch die Technologiespezifikationen herangezogen werden. Um die Technologie in einer vergleichenden Bewertung zu betrachten, ist es zu empfehlen, die spezifischen Datenniveaus in eine einheitliche Skalierung zu überführen. Die nachfolgenden Skalen können dazu verwendet werden (Grünig & Kühn, 2013, S. 113):

- Ratioskala/Verhältnisskala: Rangfolge mit Messbarkeit der Abstände und eines Nullpunktes
- Intervallskala: Rangfolge mit Messbarkeit der Abstände
- Ordinalskala: Rangfolge ohne Messbarkeit der Abstände

Im Folgenden wird für die exemplarische Bewertung der Technologien eine Ordinalskala mit den Werten 1 bis 10 herangezogen (**Tabelle 12**).

³⁷ Quelle: Eigene Darstellung.

Bewertungskriterium	Operationalisierung
Genauigkeit	Objektive Daten aus Technologiespezifikation und Verfahrensbeschreibungen: Kleiner 10 cm ←————→ größer 20 cm
	Ordinalskala: 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 Sehr hoch ←————→ sehr gering
Reichweite	Objektive Daten aus Technologiespezifikation und Verfahrensbeschreibungen: größer 200 m ←————→ kleiner 10 m
	Ordinalskala: 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 Sehr hoch ←————→ sehr gering
Skalierbarkeit	10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 Sehr hoch ←————→ sehr gering
Latenz	10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 Sehr hoch ←————→ sehr gering
Kompatibilität	10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 Sehr hoch ←————→ sehr gering
Störanfälligkeit	10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 Sehr hoch ←————→ sehr gering
Energieeffizienz	10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 Sehr hoch ←————→ sehr gering
Integration	10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 Sehr hoch ←————→ sehr gering
Kosten	10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 Sehr hoch ←————→ sehr gering

Tabelle 12: Bewertungsskala für die betrachteten Entscheidungskriterien³⁸

In Tabelle 12 werden die Kriterien Genauigkeit und Reichweite, für die objektive Daten zur Verfügung stehen, in eine Ordinalskala von 1 bis 10 transformiert. Der Wert 10 steht für die beste Ausprägung des Kriteriums während der Wert 1 die schlechteste Ausprägung signalisiert. Für die einzelnen Kriterien wurden die Skalenwerte entsprechend ausgerichtet, sodass ein summierter Gesamtwert ermittelt werden kann. Der höchste Gesamtwert aller Technologien würde die beste Bewertung widerspiegeln.

Über den Vergleich der aggregierten Gesamtwerte kann somit eine Priorisierung der betrachteten Technologieoptionen vorgenommen werden und auf dieser Grundlage die Auswahlentscheidung getroffen werden. In der folgenden **Tabelle 13** ist eine Entscheidungsmatrix dargestellt, in der die oben gekennzeichneten Bewertungskriterien und Technologieoptionen zur Indoor-Lokalisierung gegenübergestellt werden. Zielsetzung der Entscheidungsmatrix ist es, die einzelnen Technologien anhand der Bewertungskriterien einzustufen und über die Betrachtung aller Kriterien hinweg eine Gesamtbe-

³⁸ Quelle: Eigene Darstellung.

wertung pro Technologie vorzunehmen. Durch den Vergleich der aggregierten Bewertungszahlen können präferierte Technologiealternativen identifiziert werden bzw. jene Technologie mit dem besten Bewertungsergebnis ausgewählt werden.

Bewertungskriterium	Technologie			
	WLAN	BT/BLE	RFID	UWB
Genauigkeit	3	7	8	9
Reichweite	9	5	2	3
Skalierbarkeit	4	7	10	7
Latenz	4	7	10	8
Kompatibilität	10	10	4	2
Störanfälligkeit	5	5	7	9
Energieeffizienz	2	9	10	5
Integration	9	9	4	6
Kosten	3	9	3	6
Gesamtbewertung	49	68	58	55

Tabelle 13: Entwickelte Entscheidungsmatrix für die Technologieauswahl³⁹

Die Entscheidungsmatrix wurde auf Grundlage von objektiven Daten und subjektiven Einschätzungen ausgefüllt. Für eine fundiertere Aussage wäre eine Gewichtung der Bewertungskriterien gemäß der Priorität dieser für das jeweilige Krankenhaus angemessen. Die Bewertungsziffern in der Matrix könnten demzufolge mit den Äquivalenzkennzahlen, welche die Prioritätsstufen darstellen, multipliziert werden. Zusätzlich muss bei der Technologieauswahl die Kompatibilität mit der vorhandenen IT-Infrastruktur als erstes Ausschlusskriterium angesehen werden. Beispielsweise würde für ein Krankenhaus, welches nicht über mobile Endgeräte mit UWB-Chip verfügt, die UWB-Technologie nicht in Frage kommen, sofern die Endgeräte nicht ausgetauscht werden sollen.

Bei der Ausfüllung der Entscheidungsmatrix ergaben sich Probleme bei der Beurteilung einzelner Kriterien wie beispielsweise der Latenz und Skalierbarkeit, da diese unmittelbar von den zur Lokalisierung eingesetzten Verfahren abhängig sind. Somit sind die Technologien hinsichtlich der eingesetzten Verfahren weiter zu spezifizieren, um eine valide Bewertung final vornehmen zu können.

6.2.3 Gesamtbeurteilung der Technologieoptionen und Entscheidung

Zieht man die betrachtete Evaluierung der Technologieoptionen zur Indoor-Lokalisierung in krankenhausspezifischem Kontext heran, so ergibt sich folgende Priorisierung der Technologieoptionen:

1. BT/BLE
2. RFID
3. UWB
4. WLAN

Die BT-Technologie weist einen deutlichen Bewertungsabstand gegenüber den anderen Technologieoptionen auf. Insofern führt die Anwendung der hier dargestellten Entscheidungsheuristik zur Auswahl der BT bzw. BLE Technologie für die Indoor-Lokalisierung.

³⁹ Quelle: Eigene Darstellung.

7 Zusammenfassung

Im Folgenden werden die zentralen Ergebnisse und Aussagen der Arbeit zusammengefasst und kritisch gewürdigt. Abschließend wird ein Ausblick zu Fragestellungen gegeben, die zukünftig in der Forschung aufgegriffen werden können.

7.1 Ergebnisse der Arbeit

Die vorliegende Untersuchung der Einsatzmöglichkeiten von Technologien der Indoor-Lokalisierung in Krankenhäusern und die Entwicklung einer Entscheidungsheuristik für die Technologieauswahl hat eine Reihe von Erkenntnissen generiert, die den Stand der Literaturdiskussion in interessanter Weise erweitern. Zusammenfassend können folgende Untersuchungsergebnisse hervorgehoben werden:

Die literatur- und datenbasierte Analyse des Digitalisierungsgrades von Krankenhäusern in Deutschland hat gezeigt, dass im internationalen Vergleich erhebliche Defizite bei der Auseinandersetzung und Implementierung von Digitalisierungsansätzen (z. B. Krankenhaus 4.0-Konzepte) bestehen. Gleichzeitig nehmen die Managementherausforderungen von Krankenhäusern im Bereich der Kosten- und Erlösstrukturen wie auch der Fachkräftegewinnung in den nächsten Jahren erheblich zu, sodass eine Erhöhung des Digitalisierungsgrades als Chance wahrzunehmen ist, um den im Rahmen der Arbeit dargestellten krankenhausspezifischen Herausforderungen begegnen zu können.

Während einerseits der spezifische Branchenkontext des Gesundheitswesens und der Krankenhäuser Besonderheiten für die Digitalisierung offenbart, so ergeben sich andererseits auch aus dem dienstleistungsbezogenen Geschäftsmodell der Krankenhäuser Aspekte, die einen Einfluss auf die Digitalisierung und die Auswahl von Technologien der Indoor-Lokalisierung haben. So handelt es sich beispielsweise bei Krankenhausleistungen um Dienstleistungen, die im direkten Kontakt mit Menschen bzw. Patient:innen erbracht werden. Hieraus ergeben sich besondere Anforderungen an die Digitalisierung von Behandlungsprozessen. Vor diesem Hintergrund sind Erkenntnisse der Digitalisierung aus dem Industrie- und Konsumgüterbereich nicht uneingeschränkt auf den Krankenhauskontext zu übertragen.

In der vorliegenden Untersuchung wurden Einsatzmöglichkeiten und Wirkungsdimensionen von Technologien der Indoor-Lokalisierung in Krankenhäusern identifiziert und beschrieben (insbesondere in Kapitel 2). Da bisher in der Literatur umfassende Bezugsrahmen fehlen, um die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten entsprechender Technologien in krankenhausspezifischen Kontexten gesamthaft zu prüfen und beschreiben zu können, wurde hierzu erstmals der, in der betriebswirtschaftlichen Diskussion weit verbreitete, Wertkettenansatz als Strukturierungshilfe herangezogen. Es wurde aufgezeigt, dass bei Wertschöpfungsprozessen im Krankenhaus zwischen patient:innenorientierten Kernprozessen, managementbezogenen Steuerungsprozessen und Unterstützungsprozessen differenziert werden kann. Es wurde deutlich, dass die Integration von Technologien der Indoor-Lokalisierung in allen Prozesskategorien eine Wirkung entfalten kann, wobei zwischen direkten und indirekten Wirkungsdimensionen unterschieden wurde. Direkte Wirkungen entfalten sich direkt bei den Nutzern der Technologien (Patient:innen, Mitarbeitenden, Servicedienstleistern u. a.) in jenen Prozessen, in denen die Lokalisierungstechnologien zum Einsatz kommen. Darüber hinaus entstehen durch die Nutzung entsprechender Technologien auch indirekte Wirkungen in anderen Prozessen (z. B. in Steuerungs- und Unterstützungsprozessen), weil über die Indoor-Lokalisierung zusätzliche Daten generiert und ausgewertet werden können, die zur Effizienzverbesserung und Erhöhung der Wertschöpfung sowie Zufriedenheit der Patient:innen beitragen.

Ein wesentlicher Vorteil des hier verwendeten Wertkettenansatzes ist es, dass gesamtheitlich über alle Prozesskategorien und mit Blick auf die einzelnen Teilprozesse die Einsatzbereiche und Wirkungen von Lokalisierungstechnologien identifiziert werden können. Das Krankenhausmanagement kann durch diesen Ansatz eine integrierte Perspektive für die Digitalisierung und den Einsatz von Lokalisierungstechnologien einnehmen.

Grundsätzlich steht das Krankenhausmanagement bei der Digitalisierung von Prozessen sowie der spezifischen Einbeziehung von Technologien der Indoor-Lokalisierung vor einem komplexen Entscheidungsproblem. Aus diesem Grund war es ein zentrales Ziel der vorliegenden Arbeit, eine Entscheidungsheuristik zu entwickeln, die den Auswahlprozess geeigneter Lokalisierungstechnologien und –verfahren unterstützt bzw. erleichtert. Hierzu wurde einerseits aufgezeigt, dass Technologien der Indoor-Lokalisierung als Teilbereich des Krankenhaus 4.0-Konzeptes verstanden und andererseits auch mit dem Konzept des IdD verknüpft werden können. Die Komplexität der Auswahlentscheidung von Technologien der Indoor-Lokalisierung wird dadurch deutlich, dass eine Vielzahl von alternativen Verfahren und Technologien angeboten werden, die sich hinsichtlich der Methodik und Art der Positionsbestimmung sowie der Messprinzipien unterscheiden. Deshalb wurden in einer deskriptiven Betrachtung die Verfahren und Messprinzipien vorgestellt (Kapitel 4) und die in der Literatur am häufigsten diskutierten, funkwellenbasierten Technologien der Indoor-Lokalisierung diskutiert (Kapitel 5.1). Hierzu wurden WLAN, BT/BLE, UWB und RFID betrachtet. Die Komplexität der Auswahlentscheidung wird nicht nur aufgrund der Vielzahl von technologischen Lösungsoptionen bestimmt, sondern auch aufgrund multipler Ziele sowie Anforderungskriterien, die in Krankenhäusern der Entscheidung zugrunde gelegt werden. Im Kapitel 5.2 wurden deshalb, die in der Literatur diskutierten, Anforderungskriterien für die Auswahl von Indoor-Lokalisierungstechnologien herausgearbeitet. Diese Anforderungs- bzw. Bewertungskriterien fließen weiterführend in die zu entwickelnde Entscheidungs- bzw. Auswahlheuristik ein.

Im Kapitel 6 wurde eine allgemeine Entscheidungsheuristik für komplexe Entscheidungsprobleme vorgestellt, die spezifisch für das, in dieser Arbeit zu untersuchende, Auswahlproblem von Indoor-Lokalisierungstechnologien angepasst und angewendet wurde. Die **Abbildung 25** zeigt die Spezifikation der Entscheidungsheuristik für die Auswahlentscheidung von Technologien der Indoor-Lokalisierung bzw. IPS.

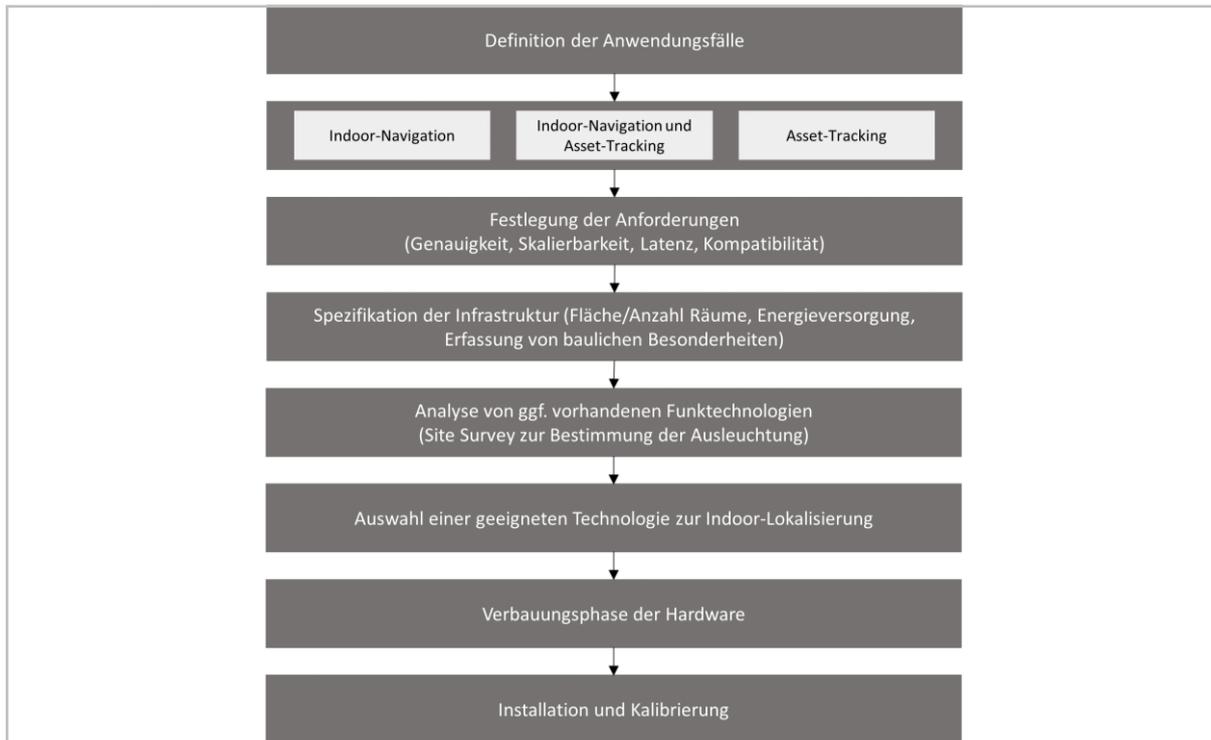


Abbildung 25: Empfohlenes Vorgehensmodell für die Einführung eines IPS⁴⁰

Die Vorteile der Entscheidungsheuristik liegen darin, dass das Krankenhausmanagement systematisch durch einzelne Schritte der Entscheidungsvorbereitung und Entscheidungsfindung geführt wird. Angereichert wurde das allgemeine Entscheidungsmodell durch die spezifischen Technologieoptionen der Indoor-Lokalisierung und durch die in der Literatur diskutierten Bewertungs- bzw. Auswahlkriterien. Im Rahmen der Arbeit werden auch Hinweise gegeben, wie die Bewertungskriterien operationalisiert werden können, sodass für die Entscheidungsmatrix die einzelnen Technologien anhand von ordinalen oder metrischen Skalen mit Bezug zu den einzelnen Bewertungskriterien beurteilt werden können.

Mit der Auswahl einer geeigneten Technologieoption können weiterführende Schritte der Implementierung eingeleitet werden. Dafür empfiehlt es sich, eine ausgewählte und präferierte Technologieoption mit den hierfür notwendigen Verknüpfungen zu verschiedenen Hardware- und Software-Infrastrukturen eines Krankenhauses in Form einer schriftlichen Skizze zu beschreiben. Ein solcher Systementwurf bildet für die weiterführende Implementierung ein wichtiges Hilfsmittel, um die damit zusammenhängenden Integrations- und Vernetzungsaufgaben mit verschiedenen Prozessverantwortlichen festzulegen.

7.2 Kritische Würdigung und Ausblick auf weitere Forschungsfragen

In einer kritischen Würdigung der hier durchgeführten Analyse, die primär literaturbasiert, sowie unter Einbeziehung qualitativer Interviews mit Expert:innen aus der Praxis⁴¹ durchgeführt wurde, können folgende Punkte erwähnt werden:

- Bei der Darstellung der Entscheidungsheuristik wurde der Begriff Akteur:in bzw. Entscheidungsträger:in verwendet. In der Realität werden komplexe Entscheidungen in Unternehmen aller-

⁴⁰ Quelle: Eigene Darstellung.

⁴¹ Aus Gründen der Vertraulichkeit können die Gesprächsprotokolle dieser Publikation nicht beiliegen. Für diesbezügliche Informationen kann Kontakt mit der visgato GmbH aufgenommen werden.

dings nicht von einer Person getroffen, vielmehr werden Projektteams gegründet, die interdisziplinär und mit Vertreter:innen aus unterschiedlichen Hierarchiestufen besetzt sind. Ggf. können auch externe Dienstleister:innen (z. B. Berater:innen) in ein Projektteam einbezogen werden. Somit ist bei der Anwendung des Entscheidungsmodells und der Aufstellung der Entscheidungsmatrix zu berücksichtigen, dass es sich um ein multipersonales Entscheidungsproblem handelt. Diese zusätzliche Komplexität konnte im Rahmen der vorliegenden Analyse nicht abgebildet werden und erfordert weitere Forschungsbemühungen. Hierbei kann auf Forschungsansätze zurückgegriffen werden, die industrielle Beschaffungsprozesse und Buying-Centerstrukturen untersuchen (vgl. z. B. Backhaus & Voeth, 2014).

- In der allgemeinen Entscheidungsheuristik von Grünig und Kühn wird die Berücksichtigung von alternativen Umfeldszenarien für die Entscheidungsfindung thematisiert. Aus Gründen der Komplexitätsreduktion wurden in der vorliegenden Untersuchung entsprechende Szenarien mit verschiedenen Eintrittswahrscheinlichkeiten nicht in der Entscheidungsmatrix abgebildet. Angesichts der sich abzeichnenden Umfeld- und Technologiedynamik wird es sich jedoch anbieten, zukünftig auch die Berücksichtigung von Umweltszenarien bei der Entscheidungsfindung zu modellieren. Auch dies muss weiterführenden Forschungen vorbehalten werden.
- In weiterführenden Untersuchungen kann die entwickelte Entscheidungsheuristik um andere Verfahren und Technologien zur Indoor-Lokalisierung erweitert werden. Beispielsweise können weitere Funktechnologien wie Z-Wave, ZigBee, EnOcean, die aktuell vermehrt im Bereich der Heimautomatisierung eingesetzt werden, als weitere Technologieoptionen mit in die Entscheidungsheuristik aufgenommen werden. Zudem können auch akustische, optische sowie magnetwellenbasierte Verfahren und die dafür notwendigen Technologiekomponenten integriert werden.
- Es ist anzunehmen, dass in der Praxis des Krankenhausmanagements die Bewertungskriterien zur Auswahl von Technologien der Indoor-Lokalisierung eine unterschiedliche Relevanz aufweisen. Dies kann durch den Typ des Krankenhauses wie auch durch spezifische Umfeldszenarien bedingt sein. Dies hat zur Folge, dass in die Entscheidungsmatrix für die Kriterien unterschiedliche Gewichtungsfaktoren einbezogen werden können, die bei der Kalkulation eines Gesamtwertes pro Technologie Eingang finden.
- Kritisch ist auch die Operationalisierung der hier verwendeten Bewertungskriterien zu würdigen. Dabei stellt sich einerseits die Frage, wer die Bewertung vornimmt und in welchem Umfang z. B. technologiespezifische Informationen (wie die Reichweite) in ein Ordinalskalenniveau transformiert werden. Die Operationalisierungsvorschriften sind sorgfältig zu dokumentieren, damit sie von Dritten nachvollzogen werden können. Weiterhin ist für die Operationalisierung die Frage zu beantworten, inwieweit subjektive Einschätzungen von Expert:innen bzw. Entscheidungsträger:innen einzubeziehen sind, wenn keine objektiven Daten zur Verfügung stehen. Auch hier sollte für Dritte nachvollziehbar dokumentiert werden, welche Person bzw. Personen die Bewertung vorgenommen haben.

Die aufgeführten kritischen Punkte schränken teilweise die Aussagefähigkeit der ermittelten Untersuchungsergebnisse ein. Sie weisen allerdings auch auf Forschungsfragen hin, die in der Zukunft aufgegriffen werden können.

Literaturverzeichnis

- AirFinder (Hrsg.). (2016). *Healthcare RTLS: An In-Depth Review Of Technologies & Considerations*. Online: <<https://www.airfinder.com/healthcare-rtls-an-in-depth-review-of-technologies-considerations>>.
- Aktas, I., Bentkus, A., Dombrowski, C., Golestani, A., Heidrich, M., Kays, R., Meyer, M., Müller, A., Brink, S. ten, Petreska, N., Rauchhaupt, L., Saad, A. & Wolff, I. (2017). *Funktechnologien für Industrie 4.0*. Verband der Elektrotechnik und Informationstechnik (VDE). (VDE Positionspapier).
- Albarune, A.R.B., Farhat, N. & Afzal, F. (2015). Value Supply Chain for Integrated Hospital Management: A Conceptual Framework. *International Journal of Supply Chain Management*, 4, S. 39–49.
- Ashton, K. (2019). *That 'Internet of Things' Thing*. RFID Journal. Online: <<https://www.rfidjournal.com/that-internet-of-things-thing>>.
- Augurzkzy, B. & Beivers, A. (2019). Digitalisierung und Investitionsfinanzierung. In: J. Klauber, M. Geraedts, J. Friedrich & J. Wasem (Hrsg.). *Krankenhaus-Report 2019*. Berlin: Springer, S. 67–82.
- Backhaus, K. & Voeth, M. (2014). *Industriegütermarketing*. 10. Aufl. München: Vahlen.
- Bertram, N., Püschner, F., Gonçalves, A. S. O., Binder, S. & Amelung, V. E. (2019). Einführung einer elektronischen Patientenakte in Deutschland vor dem Hintergrund der internationalen Erfahrungen. In: J. Klauber, M. Geraedts, J. Friedrich & J. Wasem (Hrsg.). *Krankenhaus-Report 2019*. Berlin: Springer, S. 3–16.
- Blankenbach, J., Sternberg, H. & Tilch, S. (2016). Indoor-Positionierung. In: W. Freeden & R. Rummel (Hrsg.). *Handbuch der Geodäsie*. Berlin: Springer Verlag, S. 1–36.
- Blumenthal, J. (2004). *Low-Power Positionierung in Sensornetzwerken*. Vortrag bei der 3rd Summerschool.
- Calderoni, L., Ferrara, M., Franco, A. & Maio, D. (2015). Indoor localization in a hospital environment using Random Forest classifiers. *Expert Systems with Applications*, 42(1), S. 125–134. DOI: 10.1016/j.eswa.2014.07.042.
- De Korne, D. F., Sol, K., Custers, T., van Sprundel, E., van Ineveld, B. M., Lemij, H. G. & Klazinga, N. S. (2009). Creating patient value in glaucoma care: applying quality costing and care delivery value chain approaches--a five-year case study in the Rotterdam Eye Hospital. *International journal of health care quality assurance*, 22(3), S. 232–251.
- Durand, A., Droms, R., Woodyatt, J. & Lee, Y. (2011). *Dual-Stack Lite Broadband Deployments Following IPv4 Exhaustion*. Online: <<http://www.hjp.at/doc/rfc/rfc6333.html>> (abgerufen am 12.02.2020).
- Eisenhauer, M., Oppermann, R. & Prinz, W. (2007). Internet der Dinge – Anwendung von RFID- und Tracking-Technologien zur intelligenten kooperativen Assistenz im Arbeitsprozess. In: H.-J. Bullinger, M. ten Hompel (Hrsg.). *Internet der Dinge*. Berlin: Springer, S. 49–62. DOI: 10.1007/978-3-540-36733-8.
- Engemann, C. & Sprenger, F. (Hrsg.). (2015). *Internet der Dinge. Über smarte Objekte, intelligente Umgebungen und die technische Durchdringung der Welt*. Bielefeld: transcript Verlag. DOI: 10.14361/9783839430460.
- Fisher, J. A. & Monahan, T. (2012). Evaluation of real-time location systems in their hospital contexts. *International journal of medical informatics*, 81(10), S. 705–712.

- Flores, J. Z., Huang, H., Verton, T., Boutros, L. J., Radoux, J.-P. & Breda, G. (2019). "Geo-Indoor" Design of an indoor navigation app to help elderly people to navigate in buildings. Journées d'Etude sur la TéléSanté, Sorbonne Universités. Paris. Online: <<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02161109/document>>.
- Fuhrer, P. & Guinard, D. (2006). Building a Smart Hospital using RFID technologies. In: H. Stormer, A. Meier, M. Schumacher (Hrsg.). *European Conference on eHealth 2006*. Bonn: Gesellschaft für Informatik e. V., S. 131–142. Online: <<https://dl.gi.de/bitstream/handle/20.500.12116/23988/GI-Proceedings-91-12.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>.
- Grünig, R. & Kühn, R. (2013). *Entscheidungsverfahren für komplexe Probleme. Ein heuristischer Ansatz*. 4. Aufl. Berlin: Springer.
- GWA Hygiene GmbH (Hrsg.). (2020). *Hygiene. Digitalisierung. NosoEx. Der digitale Assistent für Krankenhaushygiene*. Online: <<https://nosoex.com/>> (abgerufen am 15.02.2020).
- Hasebrook, J., Hingst, P., Hoffmann, W. & Hahnenkamp, K. (2019). Für das Leben gern arbeiten: Anwendung von Facharzt-Plus-Ansätzen in der Pflege. In: J. Hasebrook & K. Hahnenkamp (Hrsg.). *Arbeitsperspektiven im Krankenhaus: Ein Leben lang kompetent*. Heidelberg: medhochzwei Verlag, S. 103–114.
- Hejazi, H., Rajab, H., Cinkler, T. & Lengyel, L. (2018). Survey of platforms for massive IoT. *2018 IEEE International Conference on Future IoT Technologies (Future IoT)*, S. 1–8.
- Henriksen, H. E. (2019). Digitalisierung in der Neuordnung des dänischen Krankenhausmarktes. In: J. Klauber, M. Geraedts, J. Friedrich & J. Wasem (Hrsg.). *Krankenhaus-Report 2019*. Berlin: Springer, S. 91–100.
- Hilty, L., Oertel, B., Wölk, M. & Pärli, K. (2012). *Lokalisiert und identifiziert: Wie Ortungstechnologien unser Leben verändern*. (Zentrum für Technologiefolgen-Abschätzung – TA-SWISS, Universität Zürich (Hrsg.), Band 57). Zürich: vdf Hochschulverlag.
- Hormes, F. & Fottner, J. (2019). *Routenzüge indoor-lokalisiert. Technologien, Funktionen und Anwendungsbeispiele im Überblick*. Technische Universität München. Online: <https://www.researchgate.net/publication/337563267_Routenzuge_indoor-lokalisiert_-_Technologien_Funktionen_und_Anwendungsbeispiele_im_Uberblick> (abgerufen am 19.01.2020).
- Hübner, U., Liebe, J.-D., Esdar, M., Hüsters, J., Rauch, J., Thye, J. & Weiß, J.-P. (2019). Stand der Digitalisierung und des Technologieeinsatzes in deutschen Krankenhäusern. In: J. Klauber, M. Geraedts, J. Friedrich & J. Wasem (Hrsg.). *Krankenhaus-Report 2019*. Berlin: Springer, S. 33–47.
- IndoorAtlas Ltd (Hrsg.). (2020). *Last meter accuracy through technology fusion*. Online: <<https://www.indooratlas.com/positioning-technology/>> (abgerufen am 17.02.2020).
- infsoft GmbH (Hrsg.). (2020). *Indoor Positionsbestimmung – client- und serverbasierte Lokalisierung*. Online: <<https://www.infsoft.com/de/loesungen/grundlagen/basics-indoor-positionsbestimmung>> (abgerufen am 17.02.2020).
- Iqbal, Z., Luo, D., Henry, P., Kazemifar, S., Rozario, T., Yan, Y., Westover, K., Lu, W., Nguyen, D., Long, T., Wang, J., Choy, H. & Jiang, S. (2018). Accurate real time localization tracking in a clinical environment using Bluetooth Low Energy and deep learning. *PLoS one*, 13(10), S. 1–13.

- Kern, A. (2010). Recent Trends in Indoor Localization Systems. In: B. Bako, B. Könings, F. Schaub, B. Wiedersheim & M. Weber (Hrsg.). *Proceedings of the Seminar Research Trends in Media Informatics*. Institute of Media Informatics, Ulm University. Online: <https://www.researchgate.net/profile/Florian_Schaub/publication/45529575_Proceedings_of_the_Seminar_Research_Trends_in_Media_Informatics_Summer_2010/links/0c960539b55b682ddc000000.pdf#page=27>.
- Klauber, J., Geraedts, M., Friedrich, J. & Wasem, J. (Hrsg.). (2019). *Krankenhaus-Report 2019*. Berlin: Springer.
- LANCOM Systems GmbH (Hrsg.). (2020). *AiRISTA Flow Blink Modus (vormals Ekahau Blink Modus)*. Online: <https://www.lancom-systems.de/docs/LCOS/referenzhandbuch/topics/wlan_ekahau_blink_mode_support.html> (abgerufen am 17.02.2020).
- Lueth, K. L. & Kotzorek, J. (2015). *IoT Platforms. The central backbone for the Internet of Things*. IoT Analytics GmbH. Online: <http://www.iot-analytics.com/wp/wp-content/uploads/2016/01/Whitepaper-IoT-platforms-The-central-backbone-for-the-Internet-of-Things-Nov-2015-vfi5.pdf> (abgerufen am 12.02.2020).
- Marr, B. (2018). Why The Internet Of Medical Things (IoMT) Will Start To Transform Healthcare In 2018. *Forbes Magazine*. Online: <<https://www.forbes.com/sites/bernardmarr/2018/01/25/why-the-internet-of-medical-things-iomt-will-start-to-transform-healthcare-in-2018/?sh=3d4b91b54a3c#26e2f5b34a3c>> (abgerufen am 15.02.2020).
- Mattern, F. & Flörkemeier, C. (2010). Vom Internet der Computer zum Internet der Dinge. *Informatik-Spektrum*, 33(2), S. 107–121.
- Mautz, R. (2012). *Indoor positioning technologies*. Habilitationsschrift am Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Department für Bau-, Umwelt- und Geomatiktechnik, ETH Zürich. Online: <<https://www.research-collection.ethz.ch/bitstream/handle/20.500.11850/54888/eth-5659-01.pdf>> (abgerufen am 04.02.2020).
- Meffert, H., Burmann, C., Kirchgeorg, M. & Eisenbeiß M. (2018). *Marketing*. 13. Aufl. Wiesbaden: Springer.
- Meyer, J. (2013). *Ortungsverbesserung durch hybride Verfahren*. Masterarbeit an der Fakultät Technik und Informatik der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg.
- Muhr, G., Hasebrook, J. & Hahnenkamp, K. (2019). Facharzt und RoboDoc: Digitalisierung verändert Umgang mit ärztlicher Kompetenz. In: J. Hasebrook, K. Hahnenkamp (Hrsg.). *Arbeitsperspektiven im Krankenhaus: Ein Leben lang kompetent*. Heidelberg: medhochzwei Verlag, S. 115–122.
- Oswald, J. & Goedereis, K. (2019). Voraussetzungen und Potenziale des digitalen Krankenhauses. In: J. Klauber, M. Geraedts, J. Friedrich & J. Wasem (Hrsg.). *Krankenhaus-Report 2019*. Berlin: Springer, S. 49–66.
- Pitta, D. A. & Laric, M. V. (2004). Value chains in health care. *Journal of Consumer Marketing*, 21(7), S. 451–464.
- Porter, M. E. & Heppelmann, J. E. (2014). How Smart, Connected Products Are Transforming Competition. *Harvard Business Review*, 92(11), S. 64–88.

- Porter, M. E. & Thomas, H. L. (2013). The Strategy That Will Fix Health Care. *Harvard Business Review*, 91(10), S. 50–70.
- Porter, M. E. (1985). *Competitive Advantage*. New York: The Free Press.
- Porter, M. E., Pabo, E. A. & Lee, T. H. (2013). Redesigning primary care: a strategic vision to improve value by organizing around patients' needs. *Health affairs (Project Hope)*, 32(3), S. 516–525.
- Rao, A., Lim, Y.-S., Barakat, C., Legout, A., Towsley, D. & Dabbous, W. (2011). Network Characteristics of Video Streaming Traffic. In: K. Cho (Hrsg.). *Proceedings of the Seventh Conference on emerging Networking Experiments and Technologies*. New York: ACM Special Interest Group on Data Communication, S. 1–12. Online: <<https://arxiv.org/pdf/1111.0948.pdf>> (abgerufen am 12.02.2020).
- Roland Berger GmbH (Hrsg.). (2018). *Krankenhausstudie 2018* [Skript]. München. Online: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwj97b_-htDtAhUJCxoKHQlbDsoQFjAAegQIBBAC&url=https%3A%2F%2Fwww.rolandberger.com%2Fpublications%2Fpublication_pdf%2Froland_berger_krankenhausstudie_2018.pdf&usq=AOvVaw21_weJD58PhEi3Fs9Ze08I>.
- Sawalsky, R. (2013). *Management und Controlling der Neuproduktentstehung*. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag.
- Schlüchtermann, J. (2016). *Betriebswirtschaft und Management im Krankenhaus*. 2. Aufl. Berlin: Medizinisch Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft.
- Sellge, E. & Hagenmeyer, E.-G. (2019). Digitalisierung und Patientensicherheit. In: J. Klauber, M. Geraedts, J. Friedrichs & J. Wasem (Hrsg.). *Krankenhaus-Report 2019*. Berlin: Springer, S. 129–144.
- Sikder, A. K., Petracca, G., Aksu, H., Jaeger, T. & Uluagac, A. S. (2018). *A Survey on Sensor-based Threats to Internet-of-Things (IoT) Devices and Applications*. Online: <https://www.researchgate.net/publication/322975901_A_Survey_on_Sensor-based_Threats_to_Internet-of-Things_IoT_Devices_and_Applications>.
- Spath, D., Ganschar, O., Gerlach, S., Hämmerle, M., Krause, T. & Schlund, S. (2013). *Produktionsarbeit der Zukunft – Industrie 4.0*. Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO). Online: <http://www.mechatronik-bw.de/attachments/article/272/Fraunhofer-IAO-Studie_Produktionsarbeit_der_Zukunft_-_Industrie_4.0.pdf> (abgerufen am 19.01.2020).
- SRI Consulting Business Intelligence (Hrsg.) (2008). *Disruptive Technologies Global Trends 2025. Appendix F: The Internet of Things, Background*.
- Statistisches Bundesamt (Hrsg.). (2018a). *Anzahl der Krankenhausbetten in Deutschland in den Jahren 1998 bis 2018*. Online: <<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/157049/umfrage/anzahl-krankenhausbetten-in-deutschland-seit-1998/>> (abgerufen am 12.02.2020).
- Statistisches Bundesamt (Hrsg.). (2018b). *Grunddaten der Krankenhäuser 2017*. (Fachserie 12, Reihe 6.1.1). Online: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Gesundheit/Krankenhaeuser/Publikationen/Downloads-Krankenhaeuser/grunddaten-krankenhaeuser-2120611177005.xlsx;jsessionid=3B1EECEB103CA3213A70143E565F75DA.internet8712?__blob=publicationFile>.

- Statistisches Bundesamt (Hrsg.). (2019). *Höhe des übertragenen Breitbanddatenvolumens in Festnetzen in Deutschland von 2001 bis 2019*. Online: <<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/13254/umfrage/datenvolumen-im-internet-ueber-das-breitband-seit-dem-jahr-2001/>> (abgerufen am 05.02.2020).
- Statistisches Bundesamt (Hrsg.). (2020). *Eckdaten der Krankenhauspatientinnen und -patienten*. Online: <<https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Gesundheit/Krankenhaeuser/Tabellen/entlassene-patienten-eckdaten.html>> (abgerufen am 04.02.2020).
- Steffen, R. & Augel, M. (2007). Mit Low-Power-Funktechnologie auf dem Weg zu ubiquitous computing. In: H.-J. Bullinger & M. ten Hompel (Hrsg.). *Internet der Dinge*. Berlin: Springer, S. 39–48.
- Stephani, V., Busse, R. & Geissler, A. (2019). Benchmarking der Krankenhaus-IT: Deutschland im internationalen Vergleich. In: J. Klauber, M. Geraedts, J. Friedrich & J. Wasem (Hrsg.). *Krankenhaus-Report 2019*. Berlin: Springer, S. 17–32.
- Teker, U. (2005). *Realisierung und Evaluation eines IndoorLokalisierungssystems mittels WLAN*. Diplomarbeit am Fachbereich Informatik der Universität Bremen.
- Töpfer, A. (2010). Prozessoptimierung: Von der Theorie zur konkreten Umsetzung. *Zeitschrift für Evidenz, Fortbildung und Qualität im Gesundheitswesen*, 104(6), S. 436–446.
- Tredwell, J. (2018). *Top 10 IoT Platforms To Watch For In 2018*. Datafloq. Online: <<https://datafloq.com/read/top-10-iot-platforms-to-watch-for-in-2018/5446>> (abgerufen am 13.02.2020).
- Walters, D. & Jones, P. (2001). Value and value chains in healthcare: a quality management perspective. *The TQM Magazine*, 13(5), S. 319–335.
- Weiser, M. (1991). The Computer for the 21st Century. *Scientific American*, 265(3), S. 94–105.
- Wibbeling, S. (2017). *Krankenhaus der Zukunft: Was davon ist 4.0?* [Skript]. Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik. Leipzig: med.Logistica – Kongress für Krankenhauslogistik mit Fachausstellung, 17.05.2017. Online: <<https://docplayer.org/57591008-Krankenhaus-der-zukunft-was-davon-ist-4-0.html>>.
- Wortmann, F. & Flüchter, K. (2015). Internet of Things. *Business & Information Systems Engineering*, 57(3), S. 221–224.
- Yang, J., Wang, Z., Zhang, X. (2015). An iBeacon-based Indoor Positioning Systems for Hospitals. *International Journal of Smart Home*, 9(7), S. 161–168. DOI: 10.14257/ijsh.2015.9.7.16.
- Zafari, F., Gkelias, A. & Leung, K. (2017). A Survey of Indoor Localization Systems and Technologies. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 21(3), S. 2568–2599. Online: <<https://arxiv.org/pdf/1709.01015v3.pdf>>.
- Zanella, A., Bui, N., Castellani, A., Vangelista, L. & Zorzi, M. (2014). Internet of Things for Smart Cities. *IEEE Internet of Things Journal*, 1(1), S. 22–23.

Anhang A: Literaturrecherche zur deutschen Krankenhauslandschaft

Autor	Titel	Inhalte
Roland Berger GmbH, 2018	Krankenhausstudie 2018	<p><u>Wirtschaftliche Situation:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Steigerung der Umsätze • Geringe Erträge/fehlende Überschüsse • Fehlende Investitionen/Fördermittel • Zukünftig hohe Belastung durch kreditfinanzierte Investitionen <p><u>Herausforderungen:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Zunehmender Fachkräftemangel • Hoher Investitionsbedarf • Digitalisierung und Qualitätswettbewerb als zentrale Chancen • Notwendigkeit von Innovationen und externem Input (Kooperation mit Medizin-Technik-Unternehmen) • Hohe Komplexität der Maßnahmen zur Umsetzung von Verbesserungen <p><u>Chancen:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Digitalisierung • Qualitätswettbewerb • Optimierungspotenzial in der strategischen Ausrichtung und im medizinischen Bereich (Auslastung, Sachkosten, Verwaltung) • Outsourcing
Klauber et al., 2019	Krankenhausreport 2019	<p><u>Probleme und Herausforderungen:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Schlechte wirtschaftliche Situation • Steigende Fall- bzw. Patient:innenzahlen • Fachkräftemangel • Investitionsstau • Potenzial der Digitalisierung wird kaum ausgenutzt • Bürokratie als Hemmnis <p><u>Stand der Digitalisierung:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Defizitäre Lage der Digitalisierung • Internationaler Vergleich zeigt die Rückständigkeit von deutschen Krankenhäusern • Viele Krankenhäuser haben keine Strategie bzgl. Digitalisierung • Krankenhaus-IT: Probleme der Interoperabilität (Vielzahl an unterschiedlichen Standards) • Fehlender Einsatz moderner IKT • Probleme bei der Einführung der Telematikinfrastruktur/elektronischen Patientenakte (als Grundlage für weitere Digitalisierung von Prozessen/einheitliche Datenbasis) <p><u>Chancen der Digitalisierung:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Erhöhung der Patient:innensicherheit z. B. durch computergestützte Medikamentenabgabe • Effizienzsteigerung im Bereich Krankenhauslogistik durch Indoor-Lokalisierung (Beispiel Dänemark)
Bertram et al., 2019	Einführung einer elektronischen Patientenakte in Deutschland vor dem Hintergrund der internationalen Erfahrungen	<ul style="list-style-type: none"> • Probleme der elektronischen Patientenakte in Deutschland/ Schlechter Stand im Vergleich mit skandinavischen Ländern • Fehlende Kommunikations- bzw. Telematik-Infrastruktur/Datengrundlage für Telemedizin • Fehlende Standards/Interoperabilität

Autor	Titel	Inhalte
Stephani et al., 2019	Benchmarking der Krankenhaus-IT: Deutschland im internationalen Vergleich	<ul style="list-style-type: none"> • Internationaler Vergleich von Krankenhaus-IT durch Anwendung des EMRAM-Modells • Schlechte Situation in Deutschland: Nutzung konventioneller Kommunikation, fehlende Infrastruktur • Standards für Daten: HL7, FHIR, ICD, OPS
Oswald & Gosedereis, 2019	Voraussetzungen und Potenziale des digitalen Krankenhauses	<ul style="list-style-type: none"> • Veränderung der Materialwirtschaft und Patient:innenlogistik durch RFID-Technologie
Augurzky & Beivers, 2019	Digitalisierung und Investitionsfinanzierung	<ul style="list-style-type: none"> • Steigende Nachfrage nach Gesundheitsleistungen • Rationalisierung auf dem Markt für Gesundheitsberufe • Digitalisierung als Lösungsoption für das deutsche Gesundheitswesen: Mit weniger Fachkräften mehr Menschen versorgen • Definition Krankenhaus 4.0: „Digitalisierung und Vernetzung von Behandlungs- und Versorgungsprozessen im Krankenhaus mithilfe von cyber-physischen Systemen und dem Internet der Dinge als Unterstützungssysteme“ (Augurzky & Beivers, 2019, S. 74) • Vergleich mit Dänemark
Henriksen, 2019	Digitalisierung in der Neuordnung des dänischen Krankenhausmarktes	<ul style="list-style-type: none"> • Enorme Effizienzsteigerungen durch die Digitalisierung der Krankenhauslogistik • Echtzeit-Lokalisierung von Personen und Objekten, im Universitätsklinikum Aarhus steigt die Effizienz um 20 %, Vermeidung von Verzögerungen und Störungen und Beschleunigung des Patient:innen- sowie Materialflusses („Just-in-Time“-Logistik) • Weitere Beispiele für erfolgreiche Digitalisierung der Krankenhäuser in Dänemark
Muhr et al., 2019	Facharzt und Robo-Doc: Digitalisierung verändert Umgang mit ärztlicher Kompetenz	<ul style="list-style-type: none"> • Einsatz von „Tracking & Tracing“ im Musterkrankenhaus Aarhus • Ortung aller Personen, Objekte und Geräte

Tabelle 14: Ergebnisse der Literaturrecherche zur deutschen Krankenhauslandschaft⁴²

⁴² Quelle: Eigene Darstellung.

Anhang B: Literaturrecherche zur Indoor-Lokalisierung

Autor	Titel	Inhalte
Teker, 2005	Realisierung und Evaluation eines Indoor-Lokalisierungssystems mittels WLAN	<ul style="list-style-type: none"> Eigenschaften von Lokalisierungssystemen Verfahren der Positionsbestimmung: Triangulation, Schauplatzanalyse, Näherungsanalyse Techniken der Positionsbestimmung
Fuhrer & Guinard, 2006	Building a Smart Hospital using RFID technologies	<ul style="list-style-type: none"> Verbauung von RFID-Lesegeräten an strategischen Stellen im Krankenhaus zur Identifikation und Lokalisierung von Patient:innen und Mitarbeitenden sowie Assets Einsatz zum Ressourcenmanagement und Diebstahlschutz
Kern, 2010	Recent Trends in Indoor Localization Systems	<ul style="list-style-type: none"> Betrachtung von Herausforderungen funkbasierter Positionsbestimmung: Mehrwegausbreitung, Veränderungen in der Umgebung Lokalisierung mittels Infrarot-Empfänger Verfahren: Triangulation (Angulation und Lateration), Scene Analysis (Fingerprinting), Proximity-Verfahren Angulation-Verfahren: AoA Lateration-Verfahren: ToA, RSSI, TDoA Betrachtung von WLAN, BT, RFID und UWB
Mautz, 2012	Indoor positioning technologies	<ul style="list-style-type: none"> Allgemeines: Definitionen, Technologieüberblick, Verfahren Darstellung der Probleme der funkwellenbasierten Lokalisierung im Innenbereich: Starke Mehrwegausstrahlung durch die Reflexion der Funkwellen an Wänden und Möbeln, keine Sichtverbindungen zwischen den Komponenten (Non-Line-of-Sight), hohe Dämpfung und Streuung der Signale durch Hindernisse Anforderungen: Genauigkeit, Reichweite, Verfügbarkeit, Latenz, Abtastrate
Fisher & Mohnan, 2012	Evaluation of real-time location systems in their hospital context	<ul style="list-style-type: none"> Mehrwerte im Krankenhaus: Reduktion von notwendigen Geräten durch Ressourcenoptimierung, Verschlankeung von Prozessen, Erhöhung der Verfügbarkeit, Predictive Maintenance Betrachtete Technologien: RFID, WiFi/WLAN, UWB, BT, ZigBee und Ultraschall
Hilty et al., 2012	Lokalisiert und identifiziert: Wie Ortungstechnologien unser Leben verändern	<ul style="list-style-type: none"> Klassifikation und Kategorisierung von Ortungsverfahren Stand der Technik: funkwellenbasierte Technologien (UWB, RFID, BT, WLAN) Akustische Verfahren Visuelle/kamerabasierte Systeme Rechtliche Rahmenbedingungen
Meyer, 2013	Ortungsverbesserung durch hybride Verfahren	<ul style="list-style-type: none"> Relative und absolute Ortungsverfahren Verschiedene Algorithmen zur Lokalisierung
Yang et al., 2015	An ibeacon-based indoor positioning systems for hospitals	<ul style="list-style-type: none"> Einsatz von BLE-Beacons im Krankenhaus
Calderoni et al., 2015	Indoor localization in a hospital environment using random forest classifiers	<ul style="list-style-type: none"> RFID
Blankenbach et al., 2016	Indoor-Positionierung	<ul style="list-style-type: none"> Definition IPS Klassifikationsmöglichkeiten Anforderungen/Bewertungskriterien: Genauigkeit, Reichweite, Basistechnologie, Positionsangabe, Schätzprinzip, Kosten Infrastrukturgestützte Positionierungssysteme Bildbasierte Positionsbestimmung

Autor	Titel	Inhalte
AirFinder, 2016	Healthcare RTLS: An In-Depth Review of Technologies & Considerations	<ul style="list-style-type: none"> • Anwendungsbereiche im Krankenhaus: • Asset/Personen Tracking, Compliance, Inventarverwaltung, Ressourcenauslastung • Darstellung von Vor- und Nachteilen von Technologien und Verfahren • Zentrale Überlegungen für die Einführung einer RTLS Lösung: Kosten der Tags, Energieverbrauch, Arbeits- und Integrationskosten, Anwendungsfall • Mögliche Lösungen: Infrarot, WiFi, UWB, Passive RFID, Proprietäre Wireless Systeme
Zafari et al., 2017	A Survey of Indoor Localization Systems and Technologies	<ul style="list-style-type: none"> • Betrachtete Technologien zur Indoor-Lokalisierung: WLAN, BT, UWB, RFID
Iqbal et al., 2018	Accurate real time localization tracking in clinical environment using Bluetooth Low Energy and deep learning	<ul style="list-style-type: none"> • Lokalisierung von Patient:innen und Mitarbeitenden durch BLE-Tags • Einsatz eines neuronalen Netzes zur Verbesserung der Lokalisierungsgenauigkeit • Vergleich des Verfahrens mit Triangulation • Probleme von RSSI-Messungen mit BT • Zeigt wie RSSI-Verfahren durch geeignete Algorithmen verbessert werden können
Flores et al., 2019	“Geo-Indoor” Design of an indoor navigation app to help elderly people to navigate in buildings	<ul style="list-style-type: none"> • Indoor Navigation in Krankenhäusern für ältere Menschen mittels BT-Beacons und Signalstärkemessungen

Tabelle 15: Ergebnisse der Literaturrecherche zu Verfahren und Technologien der Indoor-Lokalisierung⁴³

⁴³ Quelle: Eigene Darstellung.

Anhang C: Überblick WLAN-Lokalisierung

Eigenschaft	Spezifikation
Frequenzbereich	2,4 GHz oder 5 GHz
Sendeleistung	Bis zu 100 mW bei 2,4 GHz und bis zu 200 mW bei 5 GHz
Datenrate	54–1300 Mbit/s
Reichweite der Signale	30–200 m (abhängig von Sendeleistung und Frequenzbereich)
Standard	IEEE-802.11
Sub-Standards	802.11a, 802.11b, 802.11h, 802.11g, 802.11n, 802.11ac, 802.11ad
Zentrale Komponenten	<ul style="list-style-type: none"> • WLAN-Access-Points • WLAN-Asset-Tags • Mobile Endgeräte
Verfahren der Lokalisierung	<ul style="list-style-type: none"> • Messung von Signalstärken (RSSI) • Näherungsverfahren • Fingerprinting (Szenenanalyse) • Trilateration
Genauigkeit der Lokalisierung	5–15 m
Energieversorgung	<ul style="list-style-type: none"> • WLAN-Access-Points mit Netzteil • WLAN-Tags mit Batterien
Energieverbrauch	<ul style="list-style-type: none"> • Hoch: Aufgrund der Eigenschaften des WLAN-Protokolls für den Verbindungsaufbau und die Aufrechterhaltung von Verbindungen (Verbindungs-Overhead) • Mittel: Bei Verwendung des Blink-Modus (nur bei speziellen WLAN-Tags z. B. der Firma AiRISTA ehemals Ekahau vgl. LAN-COM Systems GmbH, 2020)
Kosten	WLAN-Tags: 70–120 EUR WLAN-Access-Points: 100–300 EUR
Kompatibilität	Unterstützung von allen WLAN-fähigen Endgeräten

Tabelle 16: Datenblatt der WLAN-Spezifikation⁴⁴

Komponente	Beschreibung
WLAN-Access-Point	WLAN-Access-Points nehmen bei der funkwellenbasierten Lokalisierung die Funktion der Signalgeber ein. Die von den Access-Points ausgesendeten Frames können von Endgeräten ausgewertet werden und zur Positionierung genutzt werden.
WLAN-Tags	Die Verbreitung von WLAN-Tags ist nicht sehr hoch. Nur wenige Firmen haben sich auf die Entwicklung geeigneter Tags spezialisiert (z. B. AiRISTA).
Mobile Endgeräte	Mobile Endgeräte wie Smartphones und Tablets können sich durch die oben genannten Verfahren lokalisieren.

Tabelle 17: Hardwarekomponenten der WLAN-Lokalisierung/-Lokalisierung⁴⁵

⁴⁴ Quelle: Eigene Darstellung.

⁴⁵ Quelle: Eigene Darstellung.

Anhang D: Überblick BT/BLE-Lokalisierung

Eigenschaft	Spezifikation
Frequenzbereich	2,4 GHz (Fast Frequency Hopping)
Sendeleistung	<ul style="list-style-type: none"> Bei 0 dBm = 0,001 Watt = 1 mW Maximal 100 mW
Datenrate	<ul style="list-style-type: none"> BT: 1–3 Mbit/s BLE: 125 Kbit/s–2 Mbit/s
Reichweite der Signale	<ul style="list-style-type: none"> BT ca. 100 m (abhängig von Sendeleistung und Frequenzbereich)
Standard	<ul style="list-style-type: none"> BT 4.0, 4.1, 4.2, 5.0, 5.1 Unterstützung von BLE ab BT 4.0
Sub-Standards	<ul style="list-style-type: none"> GATT-Protokoll Beacon-Protokolle: iBeacon/Eddystone
Zentrale Komponenten	<ul style="list-style-type: none"> BLE-Beacons BLE-Gateways Mobile Endgeräte
Verfahren der Lokalisierung	<ul style="list-style-type: none"> Messung von Signalstärken (RSSI) Näherungsverfahren (Proximity Detection) Fingerprinting (Szenenanalyse) Trilateration
Genauigkeit der Lokalisierung	1–3 m
Energieversorgung	<ul style="list-style-type: none"> Batteriebetriebe BLE-Beacons BLE-Beacons mit fester Stromversorgung (z. B. USB-Beacons) BLE-Gateways mit fester Stromversorgung
Energieverbrauch	<ul style="list-style-type: none"> BT: 1 W/< 30 mA BLE: 0,01–0,50 W/< 15 mA
Kosten	<ul style="list-style-type: none"> BLE-Beacons bzw. BLE-Tags: 15–60 EUR BLE-Gateways: 50–120 EUR
Kompatibilität	Unterstützung von BLE ab Android Version 4.3 und iOS Version 5

Tabelle 18: Datenblatt der BT/BLE-Spezifikation/-Lokalisierung⁴⁶

Komponente	Beschreibung
BLE-Beacon	Ein BLE-Beacon ist ein kleiner Signaltransmitter, der von der Funktionsweise vergleichbar ist mit einem Leuchtturm. Der Beacon sendet in einem konfigurierbaren Intervall einzelne Funksignale, die von anderen BT-Geräten erfasst werden können. Jeder Beacon sendet die Signale in einem vordefinierten Intervall mit einem eindeutigen Bezeichner aus. Ein mit BT ausgestattetes Gerät, wie ein Smartphone, kann ein Beacon „sehen“, sobald es sich in Reichweite zu diesem befindet. Das Prinzip ist ähnlich wie in der Seefahrt. Seeleute suchen Leuchttürme, um zu wissen, wo sie sich befinden. Smartphones und Tablets suchen Beacons und interpretieren die Signale, um sich zu lokalisieren. BLE-Beacons nutzen die Protokolle iBeacon oder Eddystone zur Kodierung und Übertragung der Daten. Die Protokolle bieten für die Kodierung von Sensordaten sogenannte Telemetrie-Frames.
BT-Gateways (auch als BT-Controller bezeichnet)	Gateways erkennen automatisch Beacons und geben die Daten weiter. Üblicherweise erfolgt die Weitergabe über WLAN, Ethernet-Verbindungen oder USB-Ports. Auf diese Weise können nachfolgende Desktops, Server, Plattformen oder Cloud-Dienste Beacons erkennen, die entweder in oder aus dem Bereich kommen. Bei Beacons, die den Akkustand oder Sensorwerte mitsenden, können Gateways auch diese Daten aus der Ferne überwachen. Für die Lokalisierung von Wirtschaftsgütern (serverbasierte Positionsbestimmung) ist ein Gateway mit einer Sende- bzw. Empfangseinheit ausreichend. Für client- und serverbasierte Lokalisierung wird ein Gateway mit zwei unabhängigen Sendeeinheiten benötigt. Wenn von den BLE-Beacons zusätzliche Sensordaten wie Beschleunigung

⁴⁶ Quelle: Eigene Darstellung.

Komponente	Beschreibung
	gung, Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Lichtstärke, Magnetfeld, PIR- und IR-Annäherung erfasst werden, können diese Daten im iBeacon oder Eddystone Protokoll ein Gateway übermittelt werden. Die Daten werden von einem Gateway an einen Server bzw. eine geeignete Plattform gesendet. Dies ermöglicht die Implementierung von IoT-Szenarien.
Firmware (insbesondere für das Management von Beacons)	Die BLE-Beacons sind mit einer Firmware ausgestattet, über die Konfigurationen vorgenommen werden können. Damit besteht die Möglichkeit, die Signalstärke, das Sendintervall sowie einen Referenzwert (eingestellte Sendeleistung, die in BLE-Paketen mitgesendet werden) um eine optimale Berechnung der Distanz auf Basis der Ausbreitungsgeschwindigkeit bzw. unter Verwendung des Path-Loss-Modells zu ermitteln. BLE-Gateways benötigen auch eine Firmware, die eine Konfiguration erlaubt und zudem die Kommunikation mit dem Netzwerk sowie geeigneten Plattform sicherstellt.
Mobile Endgeräte	Mobile Endgeräte sind Smartphones und Tablets die Signale bzw. Pakete von BLE-Beacons empfangen und diese entweder direkt auf den Endgeräten zur Lokalisierung auswerten (clientbasierte Lokalisierung) oder mittels Netzwerkkommunikation an einen Server zur Interpretation bzw. Auswertung senden. Weiterhin besteht die Möglichkeit, dass die mobilen Endgeräte auch selbst die Funktion eines BLE-Beacon übernehmen, d. h. periodisch Signale aussenden, die von einem BLE-Gateway empfangen werden und zur Lokalisierung verwendet werden können (serverbasierte Lokalisierung).

Tabelle 19: Hardwarekomponenten der BT/BLE-Lokalisierung⁴⁷

⁴⁷ Quelle: Eigene Darstellung.

Anhang E: Überblick UWB-Lokalisierung

Eigenschaft	Spezifikation
Frequenzbereich	3,1–10,6 GHz
Sendeleistung	–41,3 dBm/MHz = 0,5 mW
Datenrate	110 kbit/s–6,8 Mbit/s
Reichweite der Signale	50 m (abhängig von Sendeleistung und Frequenzbereich)
Standard	IEEE-802.15
Sub-Standards	IEEE 802.15.3a, 802.15.4a
Zentrale Komponenten	<ul style="list-style-type: none"> • UWB-Anchor • UWB-Tags
Verfahren der Lokalisierung	Laufzeitverfahren (Time of Flight): <ul style="list-style-type: none"> • Messung der Laufzeit (ToA) • Messung der Laufzeitdifferenz (TDoA) • Trilateration
Genauigkeit der Lokalisierung	10–30 cm
Energieversorgung	<ul style="list-style-type: none"> • UWB-Anchor mit fester Stromversorgung • UWB-Tags mit Batterien
Energieverbrauch	Im Durchschnitt 0,6 mW
Kosten	<ul style="list-style-type: none"> • UWB-Anchor: 70–300 EUR • UWB-Tags: 35–50 EUR
Kompatibilität	Eingeschränkt: Das iPhone 11 hat als erstes Smartphone einen UWB-Chip integriert, dessen Spezifikation aktuell aber von Apple nicht offengelegt wird, sodass eine Implementierung bzw. Integration aktuell nicht möglich ist.

Tabelle 20: Datenblatt der UWB-Spezifikation/-Lokalisierung⁴⁸

Komponente	Beschreibung
UWB-Anchor	UWB-Anchor übernehmen die Funktion von fest installierten Referenzpunkten. Im Rahmen der Lokalisierung senden diese aber keine Signale, sondern empfangen die von den UWB-Tags ausgesendeten Signale. Die UWB-Anchor sind miteinander verbunden und können die einzelnen Signallaufzeiten aggregiert an eine Plattform zur Lokalisierung weitergeben.
UWB-Tags	Die UWB-Tags übernehmen die Funktion der Signalgeber und senden fortlaufend Signale aus, die von UWB-Anchor erfasst werden und zur Lokalisierung verwendet werden.
UWB-Firmware	Die Firmware von UWB-System ermöglicht die Konfiguration des UWB-Tags sowie der UWB-Anchor.

Tabelle 21: Hardwarekomponenten der UWB-Lokalisierung⁴⁹

⁴⁸ Quelle: Eigene Darstellung.

⁴⁹ Quelle: Eigene Darstellung.

Anhang F: Überblick RFID-Lokalisierung

Eigenschaft	Spezifikation
Frequenzbereich	<ul style="list-style-type: none"> • NFC: 13,56 MHz • Kurzwellen: 13,56 MHz (HF) • Mittelwellen: 375 kHz, 500 kHz, 625 kHz, 750 kHz, 875 kHz (UHF) • Langwellen: 125 kHz, 134 kHz, 250 kHz (LF) • VHF: 433 MHz • UHF: 865–869 MHz • SHF: 2,45 GHz/5,8 GHz
Sendeleistung	UHF: 0,5–2 Watt
Datenrate	NFC: 424 Kbit/s, LF-RFID: 4 Kbit/s, HF-RFID: 424 Kbit/s, VHF-RFID: 10 Mbit/s, UHF-RFID: 30 Mbit/s
Reichweite der Signale	<ul style="list-style-type: none"> • Bei passiven Tags bis zu 15 m • Bei aktiven Tags mehrere km
Standard	ISO 18000-1
Zentrale Komponenten	<ul style="list-style-type: none"> • RFID-Antennen • RFID-Lesegeräte • RFID-Lesegeräte mit integrierten Antennen, • RFID-Tags bzw. -Transponder
Verfahren der Lokalisierung	Stationäre Identifikation und Lokalisierung in Bereichen der Lesegeräte
Genauigkeit der Lokalisierung	10–30 cm
Energieversorgung	<ul style="list-style-type: none"> • Passive Tags ohne Batterien (Induktion der Energie durch die Lesegeräte) • Aktive Tags mit Batterien (hohe Reichweiten)
Energieverbrauch	Sehr gering bei UHF-Systemen mit passiven Tags
Kosten	<ul style="list-style-type: none"> • RFID-Tags: 0,50–5 EUR • RFID-Lesegeräte mit Antennen: 100–3000 EUR (3000 EUR bei hochleistungsfähigen Mehrantennensystemen bzw. RFID-Arrays)
Kompatibilität	Eingeschränkt: Die Lokalisierung von mobilen Endgeräten wie Smartphones und Tablets werden nur in Kombination mit zusätzlicher Peripherie unterstützt.

Tabelle 22: Datenblatt der RFID-Spezifikation⁵⁰

Komponente	Beschreibung
RFID-Antennen	RFID-Antennen existieren in unterschiedlichen Varianten bzgl. Formen und Größen. Zudem existieren auch Antennen-Arrays, welche nicht nur eine Antenne, sondern mehrere Antennen in einem Bauteil integriert haben. Der Vorteil von Antennen-Arrays ist, dass diese besondere Möglichkeiten zur Lokalisierung bieten. Mit zwei bis drei Antennen kann beispielsweise die Richtung von Asset-Tags, welche durch den Lesebereich bewegt werden, bestimmt werden. Antennen-Arrays, die an die Decke von Räumen montiert werden können und mehrere Antennen enthalten, ermöglichen es, den Raum in unterschiedliche Sektoren aufzuteilen. Die Sektoren ermöglichen somit die Lokalisierung von Asset- oder Personen in unterschiedlichen Bereichen des Raumes.
RFID-Lesegeräte	Ein RFID-Lesegerät wird benötigt, wenn die externe bzw. einfache Antennen angebunden werden sollen. Die Lesegeräte versorgen die Antennen mit Strom und ermöglichen das Auslesen der Daten. Das Lesegerät stellt dafür eine geeignete Software bzw. Firmware bereit, die neben den Möglichkeiten der Konfiguration auch die Integration in vorhandene IT-Netzwerke ermöglicht. Die Daten der erfassten RFID-Tags können durch die Software und Netzwerkschnittstelle des Lesegerätes weitergegeben werden.
RFID-Antennen mit integrierten RFID-Lesegeräten	Für den praktikableren Einsatz werden RFID-Antennen mit integrierten Lesegeräten entwickelt. Diese Geräte können somit direkt an den Strom angebunden werden und sind ohne die Notwendigkeit, die Antennen zusätzlich zu verkabeln, direkt einsatzbereit.

⁵⁰ Quelle: Eigene Darstellung.

Komponente	Beschreibung
RFID-Tags	RFID-Tags existieren in unterschiedlichen Formen und Größen. Für das Asset-Tracking oder Personen-Tracking kann pauschal kein RFID-Tag empfohlen werden. In der Regel muss diskutiert und überprüft werden, welche RFID-Tags sich für die Einsatzszenarien am besten eignen. Wenn Objekte lokalisiert werden sollen, muss diskutiert werden, wo die Tags befestigt werden sollen. Einfache RFID-Tags sind beispielsweise oftmals nach der Befestigung auf Metalloberflächen nicht lesbar. Für dieses Einsatzszenario werden daher spezielle sogenannte On-Metall-Tags benötigt.

Tabelle 23: Hardwarekomponenten der RFID-Lokalisierung⁵¹

⁵¹ Quelle: Eigene Darstellung.

Anhang G: Fragekatalog für Kliniken zur Auswahl einer geeigneten Technologie zur Indoor-Lokalisierung

1. Für welche Anwendungsfälle bzw. Einsatzbereiche soll das System eingesetzt werden?
 - Navigation
 - Asset-Tracking
 - Unterstützung der beiden Anwendungsfälle
2. Infrastruktur:
 - Wie ist die Beschaffenheit der Wände und Decken? (Gipsbeton, Stahlbeton etc.)
 - Welche Ausmaße hat die Infrastruktur? (Anzahl m², Höhe der Decken)
 - Wie ist die Infrastruktur aufgebaut/strukturiert? (Anzahl der Räume, Bereitstellung des Gebäudeplans notwendig, Abschattungen und Reflexionen müssen berücksichtigt werden)
 - Ist eine feste Stromversorgung an zentralen Punkten gegeben?
 - Gibt es weitere Besonderheiten, die in der Infrastruktur berücksichtigt werden müssen?
 - Sind perspektivisch freie Sichtverbindungen gegeben? (zwischen den für Lokalisierung notwendigen Hardwarekomponenten: mobilen Endgeräten, Tags, Controllern bzw. Gateways)
3. Welche Genauigkeit soll bei der Lokalisierung erzielt werden können?
 - Raumgenaue Lokalisierung
 - Stationsgenaue Lokalisierung
 - Sehr hohe Genauigkeit (10–30 cm Genauigkeit im dreidimensionalen Raum)
4. Wie hoch darf die Verzögerung (Latenz) der Lokalisierung sein?
 - Kleiner 15 Sekunden
 - Kleiner 30 Sekunden
 - Maximal eine Minute
 - Keine Einschränkungen
5. Anwendungsfall: Asset-Tracking
 - Welche Art von Objekten soll lokalisiert werden können?
 - Wie viele Objekte sollen maximal gleichzeitig lokalisiert werden können?
 - Wie und wo können Tags an den Objekten befestigt werden? (Abschattungen und Reflexionen müssen berücksichtigt werden)
6. Anwendungsfall: Navigation
 - Welche Endgeräte und Betriebssysteme sollen unterstützt werden?
 - Soll die Position auf dem Endgerät oder von Seiten des Servers bestimmt werden? (Datenschutzrichtlinien)