

1 Einleitung

1.1 Motivation

Knapp ein Viertel der Bruttowertschöpfung in Deutschland war im Jahr 2019 auf das produzierende Gewerbe zurück zu führen (statista 2020b). Im Jahr 2018 setzte sich das produzierende Gewerbe in Deutschland aus rund 200.000 kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) sowie rund 5.000 großen Unternehmen zusammen (statista 2020a). Hierbei sind kurze und insbesondere zuverlässige Lieferzeiten wichtige Wettbewerbsvorteile für das produzierende Gewerbe in Deutschland (Pötters et al. 2018; Elser et al. 2018). Die Erreichung dieser Kundenanforderungen hängt im Wesentlichen von der Genauigkeit der Produktionsplanung und -steuerung ab, die auf den Kenntnissen über den Status quo des Produktionsprozesses und der benötigten Durchlaufzeit eines Auftrages je Prozessschritt aufbaut (Elser et al. 2021; Schuh und Stich 2012, S. 29). Zur zuverlässigen Ermittlung dieser Informationen, ist eine durchgängige Rückverfolgung der Aufträge bzw. Bauteile entlang des Produktionsprozesses notwendig. Insbesondere in der Einzel- und Kleinserienfertigung stellt die durchgängige Bauteilrückverfolgung, aufgrund des vielfältigen Auftragsspektrums und der hohen Varianz in der Abfolge der einzelnen Prozessschritte, eine große Herausforderung für die verantwortlichen Mitarbeiter dar. Diese Aufgabe wird noch schwieriger, wenn Störungen wie Maschinenausfälle oder Eilaufträge (Wiendahl 2019, S. 257) die geplanten Abläufe in der Produktion verändern.

Diese Herausforderung kann durch den Einsatz von Echtzeit-Lokalisierungssystemen (engl. Real-Time Locating System | RTLS) bewältigt werden. Ein aus dem Alltag bekanntes Beispiel für ein Outdoor Echtzeit-Lokalisierungssystem ist das im Straßenverkehr eingesetzte GPS (engl. Global Positioning System). Basierend auf den vom GPS ermittelten Standortinformationen kann eine Navigationssoftware, wie beispielsweise Google Maps, dem Nutzer nicht nur seine aktuelle Lage auf einer Karte anzeigen, sondern unter Berücksichtigung weiterer Informationen auch die noch verbleibende Dauer bis zur Erreichung seines Ziels prognostizieren. Vergleichbar zur GPS-Navigation im Straßenverkehr, wird mit Hilfe von Indoor Echtzeit-Lokalisierungssystemen in der Produktion die aktuelle Position eines Auftrags bzw. der dazugehörigen Bauteile bestimmt. Basierend auf der Position des Bauteils in der Produktion kann unter Berücksichtigung weiterer Hintergrundinformationen, wie beispielsweise der aktuellen Maschinenauslastung, der voraussichtliche Fertigstellungstermin mit Hilfe passender Softwarelösungen zur Produktionsplanung und -steuerung prognostiziert werden.

Im Gegensatz zum Straßenverkehr kommen in der Produktion aktuell überwiegend Indoor Echtzeit-Lokalisierungssysteme basierend auf Funktechnologien wie RFID (engl. Radio-Frequency Identification) und UWB (engl. Ultra-Wideband) sowie vereinzelt Wi-Fi (engl. Wireless Fidelity) und Bluetooth LE (engl. Low Energy) (Donaubauer 2019; Röhrig et al. 2015; Hohenstein und Günther 2012) zum Einsatz. Im Rahmen der Industrie 4.0 Initiative bilden Indoor Echtzeit-Lokalisierungssysteme in der Produktion einen wichtigen Bestandteil für das Internet der Dinge (engl. Internet of Things | IoT) bzw. die Entwicklung von Cyber-physischen Systemen (engl. Cyber-Physical Systems | CPS) (Forschungsunion 2013; Vogel-Heuser et al. 2017,

S. 4). Nach aktuellen Studien wird der allgemeine Bedarf an Indoor Echtzeit-Lokalisierungssystemen in den nächsten Jahren voraussichtlich stark zunehmen (Zimmerman und Zimmermann 2020). Nachfolgend ist eine Übersicht über die Technologien der verschiedenen Indoor Echtzeit-Lokalisierungssysteme dargestellt. Die Ausprägung der Merkmale der verschiedenen Technologien dient lediglich als Orientierung und variiert je nach Anwendungsfall und Hersteller.





	UWB	RFID	Wi-Fi	Bluetooth LE
Genauigkeit	< 0,3 m - 1 m	< 0,1 m - 1 m	< 5 m - 15 m	< 1 m - 5 m
Reichweite	< 100 m	< 10 m - 30 m	< 100 m	< 50 m
Energieverbrauch				
Kosten	€ € €	€ € €	€ €	€

Abbildung 1-1: Übersicht Indoor Lokalisierungstechnologien

UWB verwendet zwei Arten von Lokalisierungsmethoden – Two Way Ranging (TWR) und Time Difference of Arrival (TDoA). Mit diesen Methoden können Genauigkeiten von unter 0,3 m (TWR) bzw. unter 1 m (TDoA) erreicht werden. Die höhere Genauigkeit ist mit einem entsprechend höheren Energieverbrauch der aktiven Sender verbunden. Auf Grund der aktuell noch beschränkten Verbreitung der Hardware für Sender und Empfänger ist UWB noch vergleichsweise teuer. (Donaubauer 2019; Röhrig et al. 2015; Hohenstein und Günther 2012)

RFID lässt sich grundlegend in Systeme mit aktiven und passiven Sendern unterteilen. Passive Sender haben je nach Ausprägung eine Reichweite von unter 0,1 m bis rund 10 m und eine Genauigkeit von unter 0,1 m bis 1 m. Aktive Sender haben eine höhere Reichweite von rund 30 m und eine geringere Genauigkeit von bis zu 1 m. Während passive RFID Sender weit verbreitet und günstig sind, sind aktive Sender und Empfänger noch relativ teuer. (Finkenzeller und Gebhart 2015)

Wi-Fi zeichnet sich durch eine hohe Reichweite und geringe Kosten auf Grund seiner hohen Verbreitung aus. Jedoch benötigt die Technologie vergleichsweise viel Energie und hat eine geringe Genauigkeit im Bereich mehrerer Meter. (Gessler und Krause 2015, S. 232–242)

Während RFID, UWB und Wi-Fi als Technologien für Indoor Echtzeit-Lokalisierungssysteme (Donaubauer 2019; Hohenstein und Günther 2012; Liu et al. 2007; Bahl und Padmanabhan 2000) bereits seit langem etabliert und umfangreich erforscht sind, ist Bluetooth Low Energy (LE) in diesem Bereich eine noch vergleichsweise junge Technologie, welche sich in den letzten Jahren umfangreich weiterentwickelt hat (Core Specification Working Group 2019, S. 101).

Charakteristisch für die Bluetooth Low Energy Technologie ist der geringe Energieverbrauch, wodurch batteriebetriebene Sender bzw. Empfänger – sogenannte Bluetooth Low Energy Beacon – teilweise über mehrere Jahre betrieben werden können. Durch einen hohen Verbreitungsgrad der Technologie in Endgeräten wie Smartphones und der damit einhergehenden Massenproduktion der entsprechenden Hardwarekomponenten, zeichnet sich Bluetooth Low Energy zudem durch eine hohe Kompatibilität zu verschiedenen Endgeräten und geringe Hardwarekosten aus (Bluetooth SIG 2020). Diese Eigenschaften machen Bluetooth Low Energy als Technologie für ein Indoor Echtzeit-Lokalisierungssystem besonders interessant. Durch die schwierigen Umgebungsbedingungen in der Einzel- und Kleinserienfertigung, wie z. B. reflektierende Metalloberflächen, ist jedoch ungewiss, inwiefern diese Technologie als Grundlage für ein Indoor Echtzeit-Lokalisierungssystem zur Rückverfolgung von Bauteilen in der Einzel- und Kleinserienfertigung geeignet ist.

Die prinzipielle Eignung von Bluetooth Low Energy als Technologie für Lokalisierungssysteme konnte in anderen Anwendungsbereichen bereits erfolgreich nachgewiesen werden. Eines der bekanntesten Anwendungsbeispiele in Deutschland ist die für Smartphones entwickelte CORONA-WARN-APP des Robert Koch Instituts (Robert Koch Institut 2020a). Basierend auf einem von Google und Apple definierten Bluetooth Low Energy Standard (Apple Inc. und Google LLC 2020), wird anhand der Signalstärke der Abstand zwischen App-Nutzern bzw. deren Smartphones kontinuierlich überprüft und potentiell kritische Begegnungen mit anderen Nutzern in der App entsprechend anzeigt (Robert Koch Institut 2020b). Anhand eines Pendlerbusses in Dublin mit einer hohen Anzahl an metallischen Oberflächen konnte jedoch gezeigt werden, dass der von Google und Apple entwickelte Bluetooth Low Energy Standard in diesem Umfeld erhöhten Schwankungen der Genauigkeit unterliegt (Leith und Farrell 2020).

1.2 Zielstellung und Forschungsfrage

Das übergeordnete Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung der Eignung von Bluetooth Low Energy als Technologie für ein Indoor Echtzeit-Lokalisierungssystem zur Rückverfolgung von Bauteilen in der Einzel- und Kleinserienfertigung. Zur Erreichung dieses Ziels wird unter Berücksichtigung der Rahmenbedingungen in der Einzel- und Kleinserienfertigung und dem Stand der Technik zunächst ein auf Bluetooth Low Energy basierendes Indoor Echtzeit-Lokalisierungssystem definiert und prototypisch umgesetzt. Mit Hilfe dieses Prototyps werden die Einflussgrößen auf das Systemverhalten anhand von Versuchen im Produktions- und Laborumfeld analysiert. Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen, wird in einem erweiterten Versuch unter produktionsähnlichen Bedingungen die Leistungsfähigkeit des Indoor-Lokalisierungssystems anhand etablierter Kennzahlen bestimmt. Basierend auf den gewonnenen Kennwerten, wird abschließend die Eignung von Bluetooth Low Energy als Technologie für ein Indoor Echtzeit-Lokalisierungssystem zur Rückverfolgung von Bauteilen in der Einzel- und Kleinserienfertigung beurteilt.

Basierend auf dieser Zielstellung ergibt sich folgende übergeordnete Forschungsfrage:

Eignet sich Bluetooth Low Energy als Technologie für ein Indoor Echtzeit-Lokalisierungssystem zur Rückverfolgung von Bauteilen in der Einzel- und Kleinserienfertigung?

Zur Beantwortung dieser Forschungsfrage werden folgende untergeordnete Forschungsfragen betrachtet:

- *Wie sieht ein Konzept für ein Indoor Echtzeit-Lokalisierungssystem auf Basis von Bluetooth Low Energy zur Rückverfolgung von Bauteilen in der Einzel- und Kleinserienfertigung aus?*
- *Welche Einflüsse auf das Systemverhalten bestehen für ein Indoor Echtzeit-Lokalisierungssystem auf Basis von Bluetooth Low Energy zur Rückverfolgung von Bauteilen in der Einzel- und Kleinserienfertigung?*
- *Wie hoch ist die Leistungsfähigkeit eines Indoor Echtzeit-Lokalisierungssystems auf Basis von Bluetooth Low Energy zur Rückverfolgung von Bauteilen in der Einzel- und Kleinserienfertigung?*

1.3 Forschungsmethodik und Aufbau der Arbeit

Basierend auf der zuvor dargelegten Zielstellung und Forschungsfrage, lässt sich diese Arbeit dem Bereich des „Information Systems (IS) Research“ zuordnen (Peffers et al. 2007). Für diesen Forschungsbereich hat sich die Methodik des Design Science Research (Peffers et al. 2007; Hevner et al. 2004) bewährt, die daher entsprechend in dieser Arbeit aufgegriffen wird. Die Zielstellung der Design Science Research Methodik ist wie folgt definiert:

“The result of design-science research in IS is, by definition, a purposeful IT artifact created to address an important organizational problem. It must be described effectively, enabling its implementation and application in an appropriate domain.” (Hevner et al. 2004, S. 82)

1.3.1 Forschungsmethodik

Den Kern der Design Science Research Methodik (DSRM) nach Hevner (2007) bilden die folgenden drei Forschungszyklen (Abbildung 1-2):

- *Relevance Cycle* (dt. Relevanzzyklus)
- *Rigor Cycle* (dt. Stringenzyklus)
- *Design Cycle* (dt. Gestaltungszyklus)

Der *Relevance Cycle* erfasst bestehenden Anforderungen an die zu entwickelnde Lösung aus dem *Anwendungsbereich*. Darüber hinaus werden auch Kennzahlen definiert, über welche die Eignung der Lösung für den Anwendungsbereich validiert bzw. bewertet werden kann. (Hevner 2007)

Über den *Rigor Cycle* werden *Grundlagen* aus dem Stand der Technik, wie z. B. wissenschaftliche Theorien und Methoden, betrachtet und für die Lösungsentwicklung bereitgestellt. Hierdurch wird sichergestellt, dass auch neue Forschungsergebnisse bzw. innovative Lösungen

generiert werden. Zur Erweiterung der Wissensbasis werden neue Erkenntnisse aus dem Bereich der gestaltungsorientierten Forschung entsprechend zurückgeführt. (Hevner 2007)

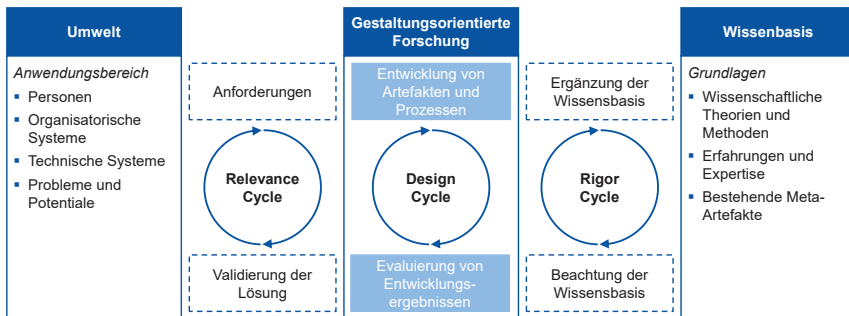


Abbildung 1-2: Design Science Research (Hevner 2007, S. 88; Hevner et al. 2004, S. 80)

Im Zentrum der Design Science Research Methodik steht der *Design Cycle*, welcher eine schnelle *Entwicklung und Evaluierung* von innovativen *Artefakten und Prozessen* fokussiert. Durch einen iterativen Designprozess können geänderte Anforderungen aus dem *Relevance Cycle* und neue Erkenntnisse aus dem *Rigor Cycle* bei der Erschaffung neuer Lösungsvarianten entsprechend berücksichtigt werden. (Hevner 2007)

1.3.2 Aufbau der Arbeit

Die einzelnen Kapitel der vorliegenden Arbeit können wie folgt an der Design Science Research Methodik verortet werden:

- **Umwelt:** In *Kapitel 2* wird der Anwendungsbereich der Arbeit – die Einzel- und Kleinserienfertigung – beschrieben. Der Fokus des Kapitels liegt hierbei auf der Definition der Eigenschaften der Einzel- und Kleinserienfertigung und beleuchtet darüber hinaus exemplarisch den Auftragsabwicklungsprozess sowie die Unternehmensziele.
- **Wissensbasis:** Die Grundlagen des Stands der Technik zu Echtzeit-Lokalisierungssystemen werden in *Kapitel 3* dargestellt. Neben der Lokalisierungssystemdefinition werden in diesem Kapitel die Grundlagen zu Bluetooth Low Energy und Lokalisierungsmethoden betrachtet.
- **Gestaltungsorientierte Forschung:** *Kapitel 4* beschreibt die Entwicklung und Validierung der Lösungsartefakte und Prozesse. Dies umfasst die Definition des Indoor Echtzeit-Lokalisierungssystems sowie die theoretische und experimentelle Analyse der Einflussgrößen auf das Systemverhalten. Unter Berücksichtigung der gewonnen Erkenntnisse wird abschließend eine experimentelle Bewertung der Leistungsfähigkeit des Indoor Echtzeit-Lokalisierungssystems unter Verwendung von künstlichen neuronalen Netzen als Lokalisierungsmethode durchgeführt.

In *Kapitel 5* werden die Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick über den weiteren Forschungsbedarf gegeben.