Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis 2
Tabellenverzeichnis 5
1 Ausgangssituation und Motivation 8
1.1 Wirtschaftliche Problemstellung 8
1.2 Wissenschaftlich-technische Problemstellung 10
1.3 Zielsetzung des Projekts 12
2 Vorgehensweise 13
3 Grundlagen 16
3.1 Drahtlose Sensornetze 16
3.2 Beleglose Kommissionierverfahren 17
3.3 Kommissionierszenarien 20
4 Anforderungen an ein drahtloses Pick-by-Light-System 22
4.1 Analyse von Kommissioniersystemen in der Praxis 22
4.1.1 Experteninterviews 22
4.1.2 Prozessanalysen 24
4.2 Einsatzszenarien 27
4.2.1 Einflussfaktoren auf die Einsatzszenarien 28
4.2.2 Auswahl geeigneter Einsatzszenarien 31
4.3 Anforderungen an das PbLL-System 34
4.3.1 Logistische und prozesstechnische Anforderungen 34
4.3.2 Technische Anforderungen 38
5 Konzepte für die Umsetzung von Pick-by-Local-Light 39
5.1 Vorgehensweise bei der Konzepterstellung 39

5.2 Konzept 1 – „Drahtloses Pick-by-Light“ 40
5.3 Konzept 2 – „Mobiler Sensorknoten“ 42
5.4 Konzept 3 – „Terminal“ 44
5.5 Konzept 4 – „Wearable Device“ 46
5.6 Konzeptbewertung und -auswahl 49
6 Auswahl der Komponenten 50
6.1 Baugruppe PBLUIB 51
6.1.1 Verbindung zum s-net®-Sensorknoten 51
6.1.2 Versorgung 53
6.1.3 Display 53
6.1.4 LEDs 58
6.1.5 Taster 58
6.2 Leiterplatte 59
6.3 Gehäuse 61
7 Anpassung der Sensornetzkomponenten 63
7.1 Plattformunterstützung 63
7.2 PbLL-Services 64
7.2.1 Fachanzeigeknoten 64
7.28.2 Regalknoten 70
7.28.3 Kommissioniererknoten 71
7.29 Konfiguration des Netzes 72
7.30 Stabilität 73
8 Anwendungsprogrammierung 74
8.1 Softwarearchitektur 75
8.1.1 Architektur des Gesamtsystems 75
8.1.2 Architektur der Webschnittstelle 77
8.2 Softwarekomponenten 80
8.3 Restriktionen, Umsetzung und Funktionen 81

8.4 Schnittstellenspezifikationen des Systems 82
9 Probandenversuche 87
9.1 Versuchsvorbereitung 87
9.1.1 Fragebogen 87
9.1.2 Versuchsaufbau 90
9.2 Versuchsdurchführung 91
9.3 Versuchsergebnisse 93
9.4 Fazit 94
10 Feldtest 95
10.1 Rahmenbedingungen und Vorbereitung 95
10.1.1 Technologische Rahmenbedingungen 95
10.1.2 Logistische Rahmenbedingungen 97
10.1.3 Prozesstechnische Rahmenbedingungen 99
10.2 Versuchsdurchführung 102
10.3 Versuchsergebnisse 103
10.3.1 Störungen während des Feldtests 103
10.3.2 Beurteilung durch die Probanden 107
10.4 Fazit 109
11 Zusammenfassung und Ausblick 111
12 Nutzen der Forschungsergebnisse für Unternehmen (insbesondere KMU) 112
13 Ergebnistransfer in Wirtschaft und Forschung 114
14 Literaturverzeichnis 118
15 Anhang A – Fragebogen Industriebefragung 122
16 Anhang B – AHP Konzepte 139
17 Anhang C – Fragebogen 166

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Einschätzung der Eigenschaften klassischer Kommissionierverfahren nach [Rei-09] ... 19
Tabelle 2: Relevante Szenarien für die Kommissionierung mit PbLL angelehnt an [Ten-10] 21
Tabelle 3: Eignung verschieder Materialflusssysteme für PbLL 29
Tabelle 4: Übersicht über die wichtigsten Merkmale der Konzepte 40
Tabelle 5: Nach- und Vorteile der Konzepte 49
Tabelle 6: Ergebnis der Konzeptbewertung 50
Tabelle 7: Tastenkombinationen der Fachanzeigenknoten 66
Tabelle 8: Schematische Darstellung des Materialflusssystems der untersuchten Kommissionierung 99
Tabelle 9: Transfermaßnahmen 116

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Vergleich der Tot- und Basiszeiten verschiedener Kommissioniersysteme [Kai-10] 9
Abbildung 2: Vergleich der positionsbezogenen Fehlerquote verschiedener Kommissioniersysteme [Gün-12] 9
Abbildung 3: Vision eines Pick-by-Local-Light Systems 12
Abbildung 4: Vorgehensweise bei der Bearbeitung des Vorhabens 14
Abbildung 5: Prozess der Kommissionierung von Ersatzteilen weißer Ware am Warenausgang. 24
Abbildung 6: Beispielprozess einer Kommissionierung in der Montageversorgung 25
Abbildung 7: Beispielprozess einer Sequenzierung von Kabelbäumen. 26
Abbildung 8: Beispielprozess eines vollautomatischen Kommissioniersystems. 27
Abbildung 9: Definierter Kommissionierprozess PbLL 37
Abbildung 10: Schaubild zum Konzept "Drahtloses Pick-by-Light" 41
Abbildung 11: Schaubild zum Konzept „Mobiler Sensorknoten“ 43
Abbildung 12: Schaubild zum Konzept "Terminal" 45
Abbildung 13: Schaubild zum Konzept "Wearable Device" 46
Abbildung 14: Temperaturverhalten bei E-Paper Displays 57
Abbildung 15: Oberseite der Baugruppe PBLUIB 59
Abbildung 16: Unterseite der Baugruppe PBLUIB 60
Abbildung 17: Boardoutline der Baugruppe PBLUIB 60
Abbildung 18: Pick-By-Local-Light-Knoten im Gehäuse am Regal montiert 62
Abbildung 19: Fachanzeigenknoten für das Pick-by-Local-Light System 65
Abbildung 20: Fachanzeigeknoten im Zustand „Kein Auftrag verfügbar“ 67
Abbildung 21: Fachanzeigeknoten im Zustand „Mehrere Aufträge verfügbar“ 68
Abbildung 22: Fachanzeigeknoten im Zustand „Auftrag auswählen“ 69
Abbildung 23: Fachanzeigeknoten im Zustand „Auftrag aktiv“ 70
Abbildung 24: Kontextdiagramm Pick by Local Light IAP 75
Abbildung 25: Gesamtarchitektur des Vorhabens 76
Abbildung 26: Elemente der Webschnittstelle 78
Abbildung 27: Benutzeroberfläche des Pick-by-Local-Light Demonstrators 81
Abbildung 28: Beispiel einer Kontrollfrage 88
Abbildung 29: Kommissionierlager der fml-Versuchshalle 90
Abbildung 30: Systemaufbau für den Versuch am Lehrstuhl fml 91
Abbildung 31: Beispiel eines Auftrags mit Pickliste 92
Abbildung 32: Anteil der Antworten in der jeweiligen Zielgrößen im Fragebogen. 93

Abbildung 33: Systemaufbau Feldtest 96
Abbildung 34: Barcodes zur Auswahl der Kommissionierfarbe. 97
Abbildung 35: Lagerung der A-Teile in a) Durchlaufregal obere Ebene, b) Durchlaufregal untere Ebene, c) Gitterbox und d) der C-Teile in Fachbodenregal 98
Abbildung 36: Bestehender Kommissionierprozess des Unternehmens in der ausgewählten Zone. 100
Abbildung 37: Neuer Kommissionierprozess 101
Abbildung 38: Anteil nicht fehlerfrei verlaufener Positionen bzw. Aufträgen ohne RFID. 103
Abbildung 39: Auflistung der verschiedenen Störungsarten in Bezug auf die Aufträge. 104
Abbildung 40: Aufteilung der Störungen nach ihrer Fehlerquelle. 105
Abbildung 41: Anteil der Aufträge mit / ohne RIFD. 106
Abbildung 42: Anteil nicht fehlerfrei verlaufener Positionen bzw. Aufträgen mit RFID. 106
Abbildung 43: Auflistung der verschiedenen Störungsarten in Bezug auf die Aufträge mit / ohne RFID. 107
Abbildung 44: Negative Antworten im Fragebogen des Feldtests. 108
Abbildung 45: Positive Antworten im Fragebogen des Feldtests. 109
Abbildung 46: Vergleich der Fragebogenergebnisse (oben: Positive Bewertungen, unten: Negative Bewertungen) 110

1 Ausgangssituation und Motivation

1.1 Wirtschaftliche Problemstellung

Die Logistik ist einer der wichtigsten Wirtschaftszweige in Deutschland mit einem Marktvolumen von 230 Mrd. € [SCS-16], wovon die Lagerlogistik etwa 55 Mrd. € ausmacht. Zentrale Funktion der Lagerlogistik ist die Kommissionierung. Sie hat signifikanten Einfluss auf andere Unternehmensbereiche wie die Produktion oder Distribution [Lan-01]. Die hohe Bedeutung der Kommissionierung zeigt sich unter anderem in den Kosten, die sie verursacht. Abhängig von der Branche betragen die Kosten für die Lagerlogistik 5 bis 8% des Umsatzes eines Unternehmens [Str-08], von denen wiederum etwa 50% auf die Kommissionierung entfallen [Fra-01].

Im Hinblick auf den wirtschaftlichen Betrieb der Kommissionierung besteht die Forderung nach Kommissioniersystemen, die eine hohe Kommissionierleistung bei gleichzeitig niedriger Fehlerrate ermöglichen. In bestimmten Branchen (beispielsweise im Pharma-Großhandel) werden deshalb automatisierte Kommissionierlösungen eingesetzt [Sce-97]. Diese weisen zwar eine sehr hohe Kommissionierleistung und niedrige Fehlerrate auf, bieten jedoch nur eine geringe Flexibilität beispielsweise bei Veränderungen des Sortiments oder Auftragsschwankungen. Deshalb werden automatisierte Kommissionierlösungen insgesamt und insbesondere im Bereich der kleinen und mittelständischen Unternehmen (KMU) nur selten eingesetzt. Umfragen zufolge beträgt der Automatisierungsgrad in der Kommissionierung lediglich 25% [Str-05]. Dabei setzen KMU prozentual mehr manuelle Systeme ein als Großunternehmen [Str-05].

Die häufigste in der Praxis anzutreffende Art der Kommissionierung ist die manuelle Kommissionierung nach dem Prinzip Mann-zur-Ware (MzW). Die Ware wird bei dieser Art der Kommissionierung statisch und meist in Regalen bereitgestellt. Die prozessrelevanten Informationen erhält der Kommissionierer oftmals in Form einer Papierliste. Ein Vorteil dieser Art der Kommissionierung ist deren hohe Flexibilität, denn der Mensch ist aufgrund seiner kognitiven Fähigkeiten und des flexiblen Tast- und Greifvermögens [Arn-03] als Kommissionierer auch bei inhomogenem oder ständig wechselndem Sortiment einsetzbar. Darüber hinaus kann der Personaleinsatz an Auftragsschwankungen angepasst werden. Nachteilig ist die – verglichen mit Kommissionierautomaten – geringe Kommissionierleistung und die Tatsache, dass Menschen Fehler machen. Um diese Nachteile zu kompensieren, werden heute verstärkt beleglose Kommissioniersysteme (vgl. Abschnitt 5.2) wie Pick-by-Voice, Pick-by-Light oder mobile Datenterminals eingesetzt.

Insbesondere Pick-by-Light Systeme unterstützen den Kommissionierer mittels Lichtsignalen beim intuitiven und schnellen Auffinden eines Lagerfachs. Die Kommissionierzeit und somit die Kommissionierleistung wird durch die vier Zeitanteile Wegzeit, Greifzeit, Basiszeit (z. B. Übernahme eines Auftrags an der Basis) und Totzeit (z. B. Lesen, Suchen, Identifizieren oder Kontrollieren) bestimmt [Arn-03]. Eine Untersuchung hat gezeigt, dass die Greifzeit und die Wegzeit unabhängig von der Art der Informationsbereitstellung sind, jedoch bei Pick-by-Light-Systemen deutlich niedrigere Tot- und Basiszeiten als bei anderen Kommissioniersystemen auftreten (vgl. Abbildung 1), wodurch sich höhere Kommissionierleistungen erzielen lassen [Kai-10].

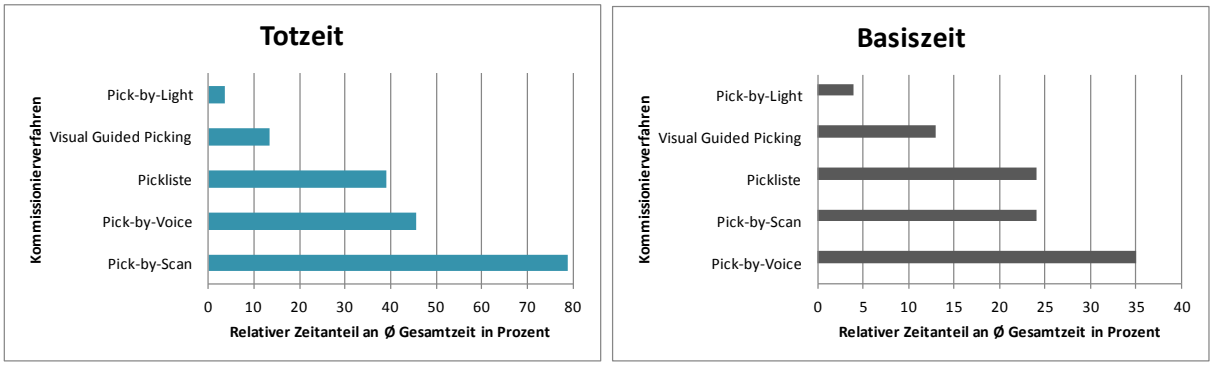


Abbildung 1: Vergleich der Tot- und Basiszeiten verschiedener Kommissioniersysteme [Kai-10]

Gleichzeitig kann durch den Einsatz von Pick-by-Light-Systemen auch eine niedrigere Fehlerquote erreicht werden. Diese liegt in der Größenordnung von 0,1% der kommissionierten Positionen. Abbildung 2 zeigt die Fehlerquote verschiedener Technologien der Informationsbereitstellung im Vergleich [Gün-12].

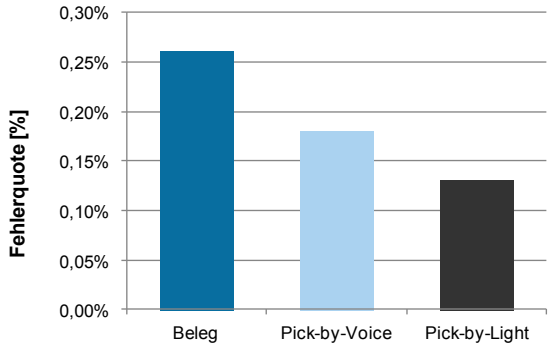


Abbildung 2: Vergleich der positionsbezogenen Fehlerquote verschiedener Kommissioniersysteme [Gün-12]

Aufgrund der genannten Vorteile hinsichtlich der Kommissionierleistung und der Fehlerquote erscheint der Einsatz von Pick-by-Light-Systemen in der manuellen Kommissionierung aus wirtschaftlicher Sicht naheliegend. Jedoch stehen diesen Vorteilen auch einige Nachteile

gegenüber, die den Einsatz von Pick-by-Light in vielen Anwendungsbereichen bisher verhindern. Die wesentliche Problemstellung hinsichtlich des wirtschaftlichen Einsatzes heute gängiger drahtgebundener Pick-by-Light-Systeme ist deren geringe Flexibilität bei Änderungen der Lager- und Warenstruktur sowie bei Sortimentsumstellung [Kla-08]. Weitere wirtschaftliche Problemstellungen resultieren aus den hohen Kosten für die Technik, dem hohen Aufwand für die Installation und Inbetriebnahme sowie den Einschränkungen hinsichtlich des flexiblen Personaleinsatzes, die darauf zurückzuführen sind, dass aus technischen Gründen nur wenige Kommissionierer gleichzeitig in einem Lagerbereich arbeiten können.

1.2 Wissenschaftlich-technische Problemstellung

Pick-by-Light-Systeme sind in der manuellen Kommissionierung eine naheliegende Technologieunterstützung, werden jedoch aufgrund der angesprochenen Nachteile in der Praxis nicht flächendeckend eingesetzt. Eine Alternative zu den leitungsgebundenen Pick-by-Light-Systemen wären drahtlose Pick-by-Light-Systeme. Diese bieten eine höhere Flexibilität bei Waren und Lagerstrukturänderungen. Derzeit existierende kommerziell-verfügbare drahtlose Pick-by-Light-Systeme, welche meist die auf dem Protokoll IEEE 802.11 [IEEE-07] aufbauende WiFi-Technologie nutzen, werden jedoch aufgrund ihrer geringen Batterielaufzeit nur sehr vereinzelt eingesetzt, da der resultierende Wartungsaufwand im Vergleich zu kabelgebundenen Systemen nicht mehr wirtschaftlich wäre (vgl. Abschnitt 5.2). Konventionelle energieeffiziente Point-to-Point Funktechnologien, welche z. B. mit IEEE 802.15.4 [IEEE-03] arbeiten, ermöglichen eine längere Batterielebenszeit, erreichen jedoch eine geringere Funkreichweite. Die Funkreichweite solcher Point-to-Point-Funktechnologien liegt im Freifeld unter 100 Metern und in Gebäuden oft weit darunter [Rot-02], was für die Abdeckung zahlreicher Läger nicht ausreichend ist.

Die generelle Problemstellung, ein Pick-by-Light-System wirtschaftlich einsetzbar zu machen, kann in die technische Herausforderung überführt werden, ein neuartiges drahtloses Pick-by-Light-System zu entwickeln. Dieses System muss gekennzeichnet sein durch lange Batterielebenszeiten mit einer großen Flächenabdeckung und einem hohen Grad an Flexibilität und Skalierbarkeit. Diese Anforderung an die drahtlose Datenkommunikation können durch ein sich selbst organisierendes, energieeffizientes drahtloses Sensornetz erfüllt werden [Yic-08]. Drahtlose Sensornetze (welche in Abschnitt 5.1 noch näher beschrieben werden) bestehen aus miniaturisierten eingebetteten Hardwareplattformen, welche die verteilte Erfassung und Verarbeitung von Messwerten, aber auch die verteilte Anwendungsausführung ermöglichen. Weiterhin unterstützen diese sowohl eine Multi-Hop-Datenkommunikation als auch eine Ad-hoc-

Vernetzung und erlauben somit Systeme zur großflächigen, energieeffizienten, flexiblen und skalierbaren drahtlosen Datenübertragung, welche eine längere Batterielebenszeit und höhere Reichweiten als bisher eingesetzte Funktechnologien ermöglichen.

Auch wenn der Einsatz drahtloser Multi-Hop Sensornetze zahlreiche Vorteile bietet, ist eine einfache Übertragung der Technologie auf eine Anwendung in der Kommissionierung nicht möglich. Vielmehr ergibt sich eine Vielzahl technologischer und wissenschaftlicher Problemstellungen, die gelöst werden müssen, bevor ein solches, im Folgenden Pick-by-Local-Light (PbLL) genanntes System produktiv werden kann.

So müssen die Anforderungen an ein möglichst wartungsarmes Pick-by-Light-System durch langlebige batteriebetriebene Hardwarekomponenten erfüllt werden, was sich wiederum in einem extrem energieeffizienten Hard- und Software-Design der im geplanten Pick-by-Local-Light-System verwendeten Komponenten niederschlägt. Insbesondere müssen also nicht nur verfügbare Hardware-Bauteile (z. B. Microcontroller, Funk-Transceiver, Displays) hinsichtlich ihrer Energieeffizienz bewertet und ausgewählt werden, sondern auch in einen kompakten Sensorknoten integriert werden.

Darüber hinaus muss der energieeffiziente Protokollstack des drahtlosen Sensornetzes an die spezifischen Anforderungen und Kommunikationsszenarien eines PbLL-Kommissioniersystems angepasst werden. Die Herausforderung dabei ist, die teilweise gegensätzlichen Anforderungen wie geringe Latenz, räumlich unterschiedliches Datenaufkommen oder die Einbindung von Kommissionierern getragener, daher mobiler Knoten mit geringstem Energieverbrauch zu vereinbaren.

Um neue Funktionalitäten für die Kommissionierung mit dem geplanten PbLL-System zu ermöglichen, ist es weiterhin notwendig, neue Funktionalitäten, wie beispielsweise Lokalisierungsalgorithmen (vgl. [Rot-02], [Mue-12]), für einzelne Sensorknoten zu realisieren. Hierbei muss ebenfalls den spezifischen Anforderungen eines energieeffizienten Systems entsprochen werden. Die Problemstellung ist dabei, die Lokalisierungsalgorithmen auf geringstes Datenaufkommen zwischen den Knoten zu optimieren, ohne die Praxistauglichkeit zu beeinträchtigen.

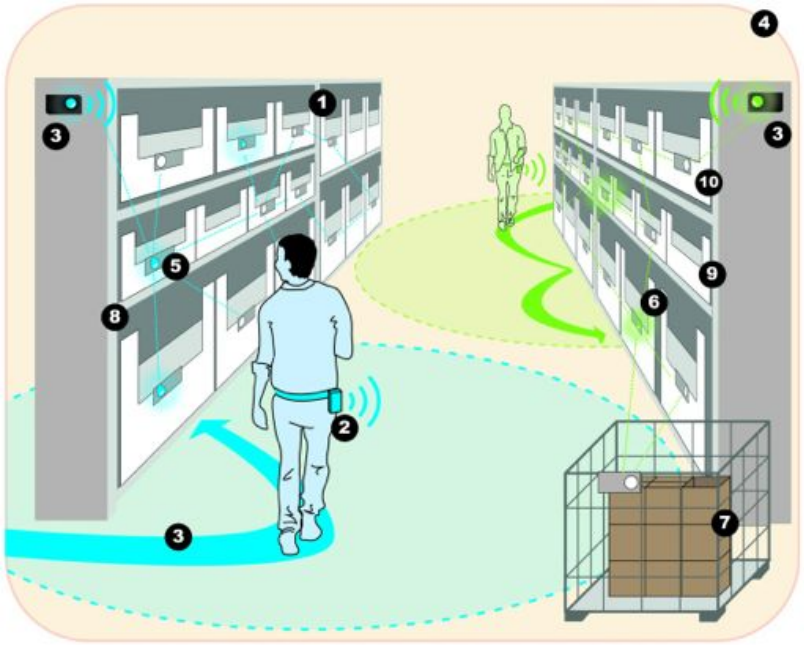
Aus der Notwendigkeit der Balance zwischen Energieeffizienz und hochverteilter Anwendungslogik resultiert als weitere Problemstellung die Aufteilung der Anwendungskomponenten zwischen den dezentralen Knoten und dem zentralen Warehouse Management System (WMS). Weder für die Aufteilung der Anwendungslogik noch für die Anbindung der Sensorknoten mit dezentraler Anwendungslogik an ein WMS existieren derzeit Standardlösungen (vgl. hierzu Abschnitt 10).

Hierfür ist also eine Analyse, Bewertung und anschließende Verteilung der Anwendungskomponenten hinsichtlich des Ressourcenverbrauch erforderlich.

Zuletzt muss das System einschließlich aller Komponenten nicht nur unter Laborbedingungen, sondern auch im Praxisbetrieb funktionieren. Hierfür ist eine Evaluierung in Form von Versuchsreihen unter praxisnahen Bedingungen erforderlich.

1.3 Zielsetzung des Projekts

Ziel des Forschungsprojektes „Einsatz von Drahtlossensornetzen in der Kommissionierung (Pick-by-Local-Light)“ ist die Entwicklung und Evaluierung einer neuartigen drahtlosen Pick-by-Light (PbL) Technologie für die manuelle Kommissionierung auf Basis von sich selbstständig vernetzenden Sensorknoten. Der Systemaufbau und die neuartigen Funktionen der zu entwickelnden Technologie sind schematisch in Abbildung **3** dargestellt und werden im Folgenden beschrieben.



1. Sensorknoten kommunizieren per Multi-Hop (Statu und Kommissioniereereignisse)
2. Kommissionierer tragen jeweils einen Sensorknote
3. Lokalisierung und Führung der Mitarbeiter z. B. du Mitarbeiter-Leitsystem
4. Mehrere Kommissionierer arbeiten im gleichen Be
5. Sensorknoten leuchten blau, sobald sich der blaue Kommissionierer annähert (nur in Reichweite)
6. Sensorknoten leuchten grün, sobald sich der grün Kommissionierer annähert (nur in Reichweite)
7. Flexible Kennzeichnung von Paletten, Gitterboxen Infrastruktur
8. Verschiedene und variable Höhen der Lagerfäche
9. Behälter ohne drahtlose Sensorknoten
10. Behälter mit drahtlosen Sensorknoten

Abbildung 3: Vision eines Pick-by-Local-Light Systems

Wie in Abbildung **3** gekennzeichnet, werden Sensorknoten mit Display, Tastern und LEDs an Regalfächern, Behältern oder anderen Ladehilfsmitteln angebracht, vgl. (1), (5), (6) und (7). Weiterhin sind Kommissionierer mit Sensorknoten ausgestattet (2) sowie einfachere Sensorknoten an den Stirnseiten von Regalen angebracht (3). Die verschiedenen Sensorknoten organisieren sich in einem energieeffizienten drahtlosen Multi-Hop-Netzwerk selbst (vgl. Abschnitt 3.1). Diese

selbstorganisierende Multi-Hop-Datenweiterleitung ermöglicht den Betrieb von großflächigen Systemen mit einer hohen Anzahl an Knoten und die Einbindung von Knoten an den Ladehilfsmitteln, Regalen oder Kommissionierern ohne administrativen Aufwand.

Die in Unternehmen eingesetzte Anwendungssoftware (z. B. Warehouse Management System) kann über eine im Rahmen des Projektes entwickelte Integrations- und Anwendungsplattform das drahtlose Sensornetz nutzen, um Aufträge an einen Kommissionierer zu übermitteln, unabhängig von dem Bereich, in dem er sich aufhält (2). Dieser Auftrag wird auch an die restlichen Sensorknoten im System weitergegeben.

Weiterhin können die an den Regalen und Lagerplätzen bzw. Ladehilfsmitteln angebrachten, ortsgebunden Knoten die Annäherung eines von einem Kommissionierer getragenen Knotens erkennen. Dies ermöglicht, dass die Blickfangleuchte des am entsprechenden Regalfach angebrachten Sensorknotens situationsbezogen aktiviert wird, wenn der Kommissionierer sich diesem nähert, vgl. (5) und (6). Befindet sich der Kommissionierer nicht in Sichtweite, ist die Blickfangleuchte inaktiv, um zum einen Energie zu sparen und zum anderen beim Vorhandensein mehrerer Kommissionierer im gleichen Bereich das Picken durch einen anderen Kommissionierer zu verhindern bzw. übersichtlicher zu gestalten. Über weitere, an den Regalen (z. B. Stirnseiten) angebrachte Knoten werden die optimalen Laufwege für den Kommissionierer optisch angezeigt (3).

Aufgrund der dezentralen Struktur und der Möglichkeit, bestimmte Funktionen auf Basis der Positionsdaten von mobilen Knoten an einem bestimmten Ort auszuführen, wird die neuartige PbL-Technologie im Folgenden als Pick-by-Local-Light (PbLL) bezeichnet.

2 Vorgehensweise

Zur Realisierung des Forschungsziels wurde das Vorhaben in insgesamt drei Teilpakete untergliedert, die wiederum in einzelne Arbeitspakete (AP) aufgeteilt sind (vgl. Abbildung 4: Vorgehensweise bei der Bearbeitung des Vorhabens). Bei **Teilpaket 1** wurde eine detaillierte Analyse von Kommissionierprozessen vorgenommen. Davon ausgehend wurden zielführende Einsatzszenarien abgeleitet und Anforderungen an die zu entwickelnde Technologie definiert.

Um eine anforderungsgerechte Entwicklung zu gewährleisten, wurden zu Beginn von **Teilpaket 2** basierend auf den Ergebnissen des Teilpakets 1 Konzepte für ein Pick-by-Local-Light System

aufgestellt. Nach Auswahl des Konzepts mit Hilfe wissenschaftlich-statistischer Methoden und des Projektausschusses, wurde recherchiert, welche Hard- und Softwarekomponenten aktuell am Markt befindlich sind, um geeignete Komponenten für die exemplarische Umsetzung der Technologie als Demonstrator zu beschaffen. Damit der Demonstrator die Anforderungen einer Kommissionierumgebung erfüllt, war es erforderlich, Hardware-Komponenten anzupassen und gewisse Software-Komponenten weiterzuentwickeln beziehungsweise komplett neu umzusetzen. In Teilpaket 2 wurde daher eng mit einem Hersteller von Warehouse Management Systemen zusammengearbeitet.

Teilpaket 3 beinhaltete schwerpunktmäßig die Evaluierung des entwickelten Demonstrators. Ein Funktionstest unter Laborbedingungen wurde hierbei ebenso durchgeführt wie ein Praxistest in Zusammenarbeit mit einem Industriepartner. Abschließend wurde die Dokumentation des Vorhabens und seiner Ergebnisse in Form des vorliegenden Forschungsberichts durchgeführt.

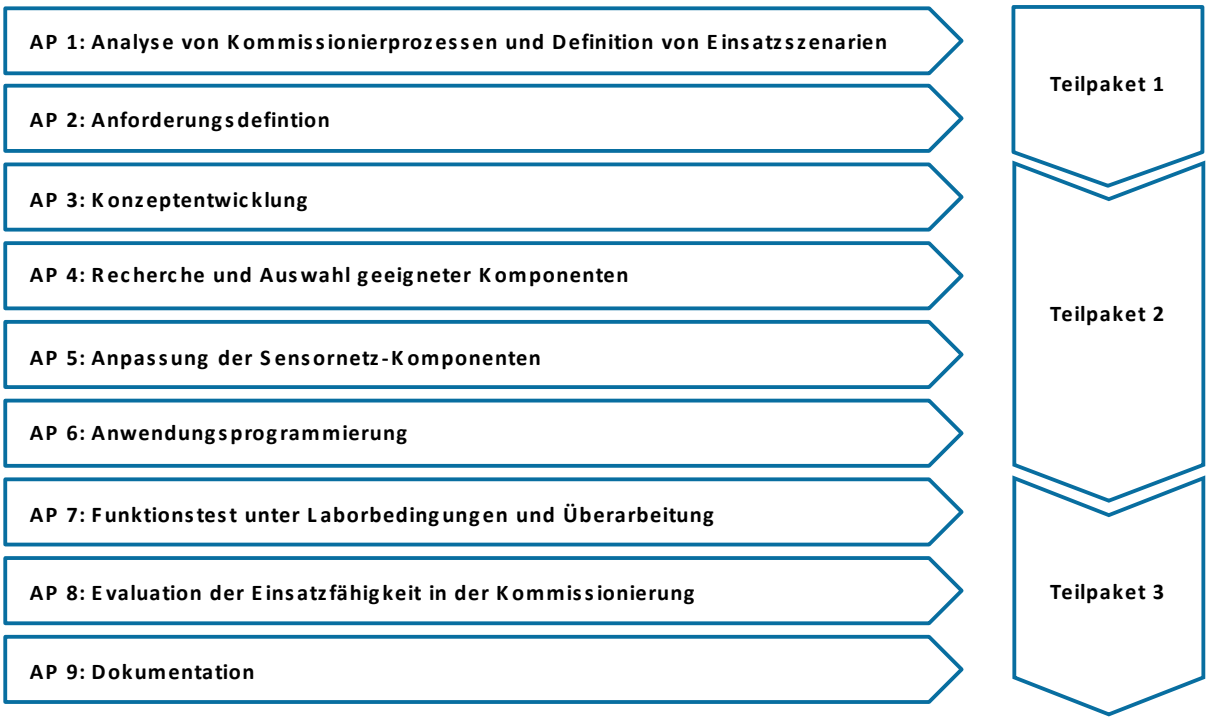


Abbildung 4: Vorgehensweise bei der Bearbeitung des Vorhabens

Der vorliegende Abschlussbericht orientiert sich an dieser Gliederung. Zunächst werden interdisziplinär die Grundlagen dargestellt, um eine Wissensbasis zu schaffen (AP1). Im Anschluss werden die Ergebnisse zu Anforderungen an ein Pick-by-Local-Light-System zusammengefasst, die sich in eine Analyse bestehender Kommissionierverfahren, die Darstellung von Kommissionierszenarien und die Anforderungen an das umzusetzende Gesamtsystem

untergliedern (AP2). Die daraus abgeleiteten Konzepte zur Umsetzung eines Pick-by-Local-Light-Kommissionierverfahrens werden im darauffolgenden Kapitel vorgestellt (AP3). Im Anschluss an die Vorstellung und Auswahl des Umsetzungskonzepts werden sowohl die ausgewählten Komponenten vorgestellt (AP4), die ein drahtloseses, batteriesparendes Pick-by-Local-Light-System ermöglichen als auch der Auswahlprozess erläutert. Darauf folgen die getätigten Anpassungen des Sensornetzes sowie die erfolgten Schritte im Rahmen der Anwendungsprogrammierung, um das drahtlose Kommissionierverfahren zu realisieren (AP5 und AP6). Probandenversuche und Feldtest werden in den nachfolgenden Kapiteln vorgestellt (AP7 und AP8). Abschließend werden die Ergebnisse in einem Fazit zusammengefasst, ein Ausblick auf die zukünftigen Tätigkeiten gewährt und die Maßnahmen zum erfolgten und noch geplanten Transfer in die Wirtschaft vorgestellt (teilweise AP9).

Von Seiten des Lehrstuhls fml der TU München waren 25,5 Personenmonate notwendig für die Bearbeitung des Vorhabens. Fraunhofer IIS und SCS haben 25 Personenmonate geleistet, um eine adäquate Bearbeitung im beantragten Funktions- und Leistungsumfang des Systems zu gewährleisten. Zur Realisierung des Vorhabens war des Weiteren der Einsatz eines Servers notwendig, der ebenfalls im Zuge des Vorhabens wie beantragt zu einem Nettopreis von 6.549€ beschafft wurde.

Die durchgeführten Arbeiten waren in ihrem Umfang notwendig, um zu gewährleisten, dass ein Demonstrator anforderungsgerecht umgesetzt werden sowie eine Erprobung in einem industriellen Umfeld im Rahmen eines Feldtests stattfinden konnte. Dafür mussten Umsetzungen in den Bereichen Hard- und Software erfolgen, kontinuierlich getestet, weiterentwickelt und an prozessuale Gegebenheiten angepasst werden.

Der Einsatz von wissenschaftlichem Personal war in dem Forschungsvorhaben notwendig, um sicherzustellen, dass interdisziplinär ein neues Konzept eines Kommissioniersystems verwirklicht werden konnte. Dafür galt es informationstechnische-, betriebswirtschaftliche- und Ingenieursarbeiten in einem Vorhaben zu vereinen, um sowohl prozessbedingte als auch (informations-) technische Weiterentwicklungen der Komponenten des Pick-by-Light-Systems gewährleisten zu können.

3 Grundlagen

Um sich dem Thema der Entwicklung eines drahtlosen, batteriesparenden Pick-by-Light-Systems anzunähern, gilt es zunächst einige technische Grundlagen und betriebswirtschaftliche Arbeitsbedingungen sowie am Markt verfügbare Systeme genauer zu betrachten. Im ersten Teil des Kapitels wird daher die im Vorhaben eingesetzte Technologie der drahtlosen Sensornetze vorgestellt und technisch abgegrenzt. Eine Beschreibung, welche Kommissionierverfahren am Markt verfügbar sind, zeigt auf welche Lücken es durch eine Neuentwicklung zu schließen gilt. Im weiteren Verlauf wird dargestellt, in welchen Kommissionierszenarien diese Verfahren eingesetzt werden, sodass eingeordnet werden kann, welche Einsatzpotenziale und Märkte für ein Pick-by-Local-Light-System bestehen.

3.1 Drahtlose Sensornetze

Sensornetze sind eine besondere Formen von Kommunikationssystemen. Im Gegensatz zu den universellen hochbitratigen und Multimedia-fähigen Datennetzen sind Sensornetze auf einen ganz bestimmten Einsatzzweck zugeschnitten. Durch eine solche Spezialisierung kann bei gegebenen Anforderungen ein bestmögliches Systemverhalten erreicht werden. Sensornetze erlauben beispielsweise eine langfristige Speisung durch Batterien.

Eine ausschließliche Speisung durch Batterien ist nur möglich, wenn ein solches Sensornetz hochgradig auf ein bestimmtes Einsatzszenario zugeschnitten werden kann. Dabei muss im Vorfeld beispielsweise geklärt sein, wie groß das Datenaufkommen im Netz ist, welche maximalen Verzögerungszeiten bei der Datenübertragung noch toleriert werden und wie groß das Einsatzareal ist. In typischen Sensornetzen werden beispielsweise nur wenige Nachrichten pro Minute mit vergleichsweise geringer Größe (weit unter 100 Bytes) übertragen. Durch ein derart geringes Datenaufkommen können die Knoten eines Sensornetzes einen Großteil ihrer Zeit in einem Ruhezustand verbringen und damit ihre Leistungsaufnahme stark reduzieren. Korrekt dimensioniert können derartige Systeme mehrere Jahre lang mit einem einzigen Batteriesatz arbeiten.

Des Weiteren gibt es leitungsfähige Sensornetztechnologien welche die so genannte „Multi-Hop-Kommunikation“ beherrschen. In solchen Sensornetzen können Nachrichten über große Distanzen verschickt werden. Die Übermittlung erfolgt hierbei durch Zwischensysteme („Routerknoten“). Man ist hierbei nicht länger durch die Funkreichweite bezüglich einer Zentrale limitiert, sondern schickt

die Nachrichten über eine längere Kette von Zwischensystemen. Derartige Systeme sind deutlich leistungsfähiger als „Single-Hop-Systeme“, benötigen aber aufwendige Mechanismen, um noch energieeffizient und damit langlebig arbeiten zu können. Die Sensornetztechnologie s-net® vom Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen (IIS) ist eine solche Sensornetztechnologie. Sie ermöglicht den Betrieb aller Zwischen- und Endsysteme mit Batterien, erlaubt die Abdeckung großer Areale dank Multi-Hop-Kommunikation und gestattet zudem mobile Teilnehmer. Damit ist s-net® prädestiniert für den Einsatz in einem Pick-by-Light-System.

3.2 Beleglose Kommissionierverfahren

Am Markt existiert bereits eine Vielzahl an Lösungen für die technische Unterstützung der Mann-zu-Ware-Kommissionierung. Die am weitesten verbreiteten Systeme sind klassische Lösungen wie Pick-by-Light, Pick-by-Voice und Pick-by-Scan [Wea-10]. Zusätzlich gibt es zahlreiche weitere Systeme, die Nischen bedienen, wenig verbreitete Technologien einsetzen oder Abwandlungen der genannten klassischen Systeme darstellen. Im Folgenden werden Kommissionierverfahren vorgestellt, die ein besonders attraktives Preis-Leistungs-Verhältnis bieten und somit eine technologiegestützte Kommissionierung mit niedrigen Kosten pro Lagerfach ermöglichen. Es werden zunächst klassische papierlose Kommissionierverfahren und im Anschluss deren Variationen vorgestellt.

Pick-by-Scan

Ein gängiges Kommissionierverfahren ist das Kommissionieren mit mobilen Datenterminals (MDT). Darin kann ein Scanner zum Auslesen von Barcodes integriert sein. Auf dem Gerät werden Auftragspositionen und deren Standort angezeigt. Um zu quittieren, muss der Kommissionierer den am Lagerfach befindlichen Barcode scannen. Durch das Scannen wird eine Fehlerquote von kleiner 0,4% erreicht [Lol-03]. Die Handhabung des MDTs erfordert manuelle und kognitive Prozesse wie Scannen, Ablesen und Orientieren. Dadurch wird der Kommissionierer im Prozess häufig unterbrochen. Zudem kann der Kommissionierer nur mit einer Hand Waren handhaben. Ring- oder Fingerscanner beseitigen diese Problematik, weisen jedoch aus Sicht des Arbeitsschutzes Gefahren beispielsweise durch Verhaken auf [Rei-09]. Eine äußerst kostengünstige Umsetzung der drahtlosen Ringscanner findet sich neuerdings am Markt: Hierbei wird ein Ringscanner per Bluetooth mit einem Smartphone verbunden, welches auch explizit vom Kommissionierer selbst mitgebracht werden kann. Zu den oben genannten Nachteilen kommen dann allerdings durch den „Bring your own Device“-Ansatz noch Sicherheitsproblematiken hinzu

[Grü-16].

Pick-by-Voice

Pick-by-Voice-Systeme stellen eine weitere Möglichkeit zur effizienten Kommissionierung dar. Dabei erhält der Kommissionierer mittels computergestützter Sprachausgabe über ein Headset Anweisungen. Nach erfolgreicher Entnahme eines Artikels muss der Kommissionierer diesen durch eine sprachliche Bestätigung in ein Mikrofon quittieren. Ein klarer Vorteil dabei ist, dass der Kommissionierer durchgängig beide Hände frei hat. Durch die Bestätigung mit Prüfziffern können darüber hinaus sehr gute Fehlerraten (etwa 0,1%) erzielt werden [Lol-03, Mil-04]. In der Praxis zeigt sich jedoch, dass bei gleichbleibenden Prüfziffern die Fehlerrate sukzessive wieder ansteigt.[1] Die Kommissionierung mit Pick-by-Voice wird durch die monotonen Sprachbefehle schnell eintönig und demotivierend für die Beschäftigten. Sprachbefehle können nicht immer verstanden werden, und Aussagen des Kommissionierers werden vor allem in lauten Umgebungen nicht immer korrekt vom System interpretiert. Durch die Sprachgebundenheit sind die sprachlichen Fähigkeiten der Nutzer ausschlaggebend für den Erfolg der Anwendung des Systems. In kleinen Kommissionierzonen können zudem Dialogzeiten die Wegzeiten überschreiten [Föl-05].

Pick-by-Light

Bei der Kommissionierung mit Pick-by-Light wird der Kommissionierer mit Signalleuchten an den richtigen Lagerort geführt. Zumeist ist dort dann ein Display auf einer Fachanzeige installiert, auf dem der Kommissionierer die Entnahmemenge ablesen kann. Nach erfolgter Entnahme kann die Quittierung durch Betätigen eines Tasters an der Fachanzeige des Lagerfachs erfolgen. Durch diese Anordnung ermöglicht Pick-by-Light eine hohe Kommissionierleistung bei durchgängig niedrigen Fehlerraten von 0,1% bis 0,4% [Ten-04, Mat-04]. Pick-by-Light ist allerdings mit hohen Anschaffungs- und Installationskosten verbunden und daher nur für Kommissionierbereiche mit Schnelldreher-Artikeln geeignet [Dla-06]. Die Fachanzeigen sind verkabelt, weswegen eine Umorganisation der Artikel den kostenpflichtigen Eingriff des Systemanbieters erfordert [Lan-15]. Die gegebenen Vorteile der Pick-by-Light-Kommissionierung haben zu zahlreichen weiteren Variationen geführt, bei denen die Kosten pro Lagerfach im Vergleich zum konventionellen Verfahren niedriger ausfallen.

[1] Interview mit Herrn Rögnitz, Lagerleiter BSH Hausgeräte Fürth

Am Markt existieren zahlreiche Abwandlungen des Pick-by-Light-Prinzips. Dazu zählen beispielsweise „Beamer Shuttle“ und „Beamer Frame“ von Meta und Safelog. Sie werden direkt am Regal montiert, wo sie innerhalb eines Rahmens anzeigen, aus welchem Fach Artikel gegriffen werden müssen. Durch die feste Installation fehlt diesen Lösungen jedoch die Flexibilität. Daneben kann die Performanz im Kommissionierprozess darunter leiden, dass der Rahmen immer nur einen Ausschnitt der zu greifenden Artikel anzeigt. Eine weitere Variation findet sich im intelligenten Kommissionierwagen von Safelog. Dieser begleitet den Kommissionierer im Prozess und leuchtet in die nahegelegenen Fächer eines Regalgangs, aus denen Artikel zu greifen sind. Die Kosten für einen Wagen sind sehr hoch (als fahrerloses Transportsystem kostet er über 35.000€). Zudem ist der Wagen nur für spezifizierte Regalgänge geeignet [Saf-16].

Kommissionier-verfahren	Geschwin-digkeit	Fehlerraten in Prozent	Systemkosten in €	Vorteile	Nachteile
Papierliste	<160 Positionen pro Stunde	<1,22	10.000	Flexibel, kostengünstig	Langsam, fehleranfällig
Pick-by-Scan	<160 Positionen pro Stunde	<0,46	20.000	Flexibel, kostengünstig,	Langsam, eingeschränkte Beidhändigkeit
Pick-by-Voice	<200 Positionen pro Stunde	<0,3	40.000	Flexibel, niedrige Fehlerraten, skalierbar	Abnutzungseffekt, auf Dauer anstrengend
Pick-by-Light	<400 Positionen pro Stunde	<0,4	120.000	Schnell, niedrige Fehlerraten, einfach	Starres System, hohe Kosten

Tabelle 1: Einschätzung der Eigenschaften klassischer Kommissionierverfahren nach [Rei-09][2]

Weitere Kommissionierverfahren

Pick-by-Vision bietet Unternehmen die Möglichkeit, eine technische Unterstützung für ihre Kommissionierer bereitzustellen. Der Kommissionierer bekommt Informationen zum Kommissionierprozess auf dem am Rahmen einer Datenbrille montierten Display angezeigt [Gün-12]. Allerdings ist die Akzeptanz von am Markt verfügbaren Lösungen bislang gering. Erste Versuche in der Logistik haben gezeigt, dass viele Modelle für das längere Tragen über eine

[2] Systemkosten ergeben sich für ein beispielhaftes Lager mit etwa 1.000 Fächern und 2 Kommissionierern

Schicht nicht geeignet sind. Für Brillenträger im Speziellen kann das Tragen von Datenbrillen je nach Modell unangenehm bis unmöglich sein.[3]

Pick-Term-Pointer oder Pick-by-Point stellt ein Verfahren dar, das sich an Pick-by-Light orientiert. Dabei ist eine Lichtquelle versetzt über dem Regal montiert. Mittels Lichtpunkten wird dem Kommissionierer signalisiert, in welches Fach er greifen muss. Nachteile des Systems sind die feste Installation der Leuchten und die fehlende Anzeige der Entnahmemenge [Luc-16].

3.3 Kommissionierszenarien

Die vorgestellten Kommissionierverfahren finden Einsatz in unterschiedlichen Szenarien mit dementsprechend heterogenen Anforderungen. In der untenstehenden Tabelle werden unterschiedliche Kommissionierszenarien dreistufig bewertet. Zunächst wird dargestellt, ob ein belegloses Kommissioniersystem im Szenario benötigt wird. Dann wird geklärt, ob Pick-by-Light im Szenario Anwendung finden sollte. Gemäß [Pan-11][4] ist diese der Fall, wenn eine gewisser Auftrags-Durchsatz im Szenario erreicht wird. Abschließend wird in der rechten Spalte vermerkt, ob das unterstützende System im Szenario über eine drahtlose Funktionsweise verfügen sollte. Dies kommt vor allem dann zu tragen, wenn Artikelumstrukturierungen in regelmäßigen Abständen vorgenommen werden oder mobile Objekte mit Kommissioniergütern in die Landschaft integriert werden sollen. (+) steht hierbei für einen hohen Bedarf, (o) für einen geringen Bedarf und (-) für keinen Bedarf.

Verfahren	**Bedarf an beleglosen Kommissionier-verfahren**	**Bedarf an PbL-Unterstützung**	**Bedarf an drahtloser Unterstützung**
Person-zu-Ware Kommissionierverfahren			
Kommissionierung im Kleinteilelager	+	+	+
Kommissionierung in	+	+	+

[3] Interview mit Herrn Gerking, Innovation Manager von Kühne+Nagel, am 6.7.2016
[4] http://dx.doi.org/10.1016/j.cor.2011.09.022

Kommissioniernestern			
Großteilekommissionierung	0	0	+
Kommissioniertunnel	+	+	0
Kommissionierung mit FTF	0	0	+
Ware-zu-Person Kommissionierverfahren			
Kommissionierstationen mit Anbindung an Fördertechnik	+	+	-
Umlaufregale und Liftsysteme	0	0	-
Stationärer Kommissionierroboter	0	-	-
Schachtkommissionierer	-	-	-
Automatisches Kollipicken	-	-	-
Hybride Kommissionierverfahren			
Zweistufige Kommissionierung	+	+	0
Kommissionierung entlang einer AKL Regalfront	+	+	-
Inverses Kommissionieren	+	+	-

Tabelle 2: Relevante Szenarien für die Kommissionierung mit PbLL angelehnt an [Ten-10]

Tabelle 2 zeigt, dass vor allem in manuellen Person-zu-Ware-Szenarien ein Bedarf nach drahtlosen Pick-by-Light-Systemen besteht. Sie erfüllen die Anforderungen einer heterogenen, sich verändernden Artikelstruktur, aus welcher kontinuierlich und in hoher Frequenz Artikel entnommen werden müssen.

4 Anforderungen an ein drahtloses Pick-by-Light-System

Als Basis für die Entwicklung des drahtlosen Kommissioniersystems wurden für das PbLL-System zu Beginn bestehende Kommissioniersysteme in mehreren Industrieunternehmen analysiert. Vor allem die logistischen und prozesstechnischen Gegebenheiten wurden hierbei aufgenommen. In Kombination mit dem Stand der Technik wurden die daraus gewonnenen Erkenntnisse anschließend in ein Lastenheft überführt.

4.1 Analyse von Kommissioniersystemen in der Praxis

Zur Entwicklung eines neuen Kommissioniersystems ist es ratsam zuerst bestehende Kommissioniersysteme eingehend zu untersuchen. Dazu wurden bei vier Projektpartnern die Daten zu deren eingesetzten Technologien und dem entsprechenden Lager aufgenommen. Die analysierten Lager dienten einerseits der Montageversorgung und wurden andererseits für den Warenausgang genutzt. Drei der Lager wurden manuell bedient, ein Lager war vollständig automatisiert. Als Methode zur Ist-Aufnahme dienten Experteninterviews und Prozessanalysen vor Ort.

4.1.1 Experteninterviews

Um die Ergebnisse der Befragungen besser analysieren zu können, wurden die Interviews in der Industrie über einen standardisierten Fragebogen (siehe Anhang A) durchgeführt. Dabei wurden folgende Themengebiete erfasst:

- Daten zum Experten
- Artikelstruktur (Sortiment, Aufbau, …)
- Lagerstruktur (Aufbau, Ausstattung mit Lagertechnik,…)
- Aufbau der Kommissionierung (eingesetzte Technik, Informations-/Materialfluss und Organisationssystem, …)
- Vor- und Nachteile der eingesetzten technischen Hilfseinrichtungen
- Kennzahlen zur Kommissionierung (z. B. Fehlerquote)
- Informationen über das eingesetzte Personal (Alter, Aufgabenbereiche, Schichtzeiten, …)

- Technische Rahmenbedingungen im Lager (verwendete Funktechnologien, minimal geforderte Verfügbarkeit für ein Kommissioniersystem, …)

Die Auswertung des Fragebogens ergab, dass die Anzahl der Artikel je nach Art der Kommissionierung sehr stark streut (280 – 140.000 pro Kommissionierzone). Dabei handelt es sich großteils um handliche, kleine Artikel, die sich teilweise sehr ähnlich sind. Erfahrene Kommissionierer kennen den Lagerort der meisten Artikel sehr genau. Die einzelnen Lagerfächer sind bei drei der vier Lager artikelrein bestückt, d. h. jedem Lagerfach ist genau ein Artikel zugeordnet. Im anderen Fall wurden fünf verschiedene Produkte einem Fach zugeordnet. Alle untersuchten Kommissionierlager waren nach der ABC-Analyse (Schnellläuferkonzentration) segmentiert und mit Fachboden- oder Durchlaufregalen aus Stahl ausgestattet.

Zum Informationssystem gibt es die folgenden Erkenntnisse: Die Auftragserfassung und -verarbeitung ist dem heutigen Stand der Technik entsprechend vollständig automatisiert. Gestartet werden Kommissionieraufträge jedoch manuell, entweder über Taster (z. B. PbL) oder durch die Anmeldung an einem MDT. Die Ware wird anschließend entweder mit einem Behälter (bspw. Kleinladungsträger, folgend KLT) oder mit Hilfe eines Kommissionierwagens transportiert. Zu 75% wird dabei noch ein Beleg mitgeführt. Die Abarbeitung der Aufträge wird auftragsorientiert durchgeführt, und somit sind auch die Kommissionierungen einstufig organisiert.

Bei den Stärken und Schwächen bisher erhältlicher technischer Hilfsmittel zur Unterstützung der Kommissionierung ergaben sich bei den Befragten gemeinsame Vorteile bzw. Nachteile unabhängig von der eingesetzten Technik (PbL, PbV, MDT, vollautomatisches Lager). Als positiv wurde vor allem die Erhöhung der Kommissionierleistung angesehen. Der größte negative Punkt ist die Abhängigkeit von der Technik. Es ist maßgeblich, dass sowohl die IT funktionstüchtig ist, also auch die permanente Energieversorgung gewährleistet wird. Daher ist den Experten auch eine hohe Verfügbarkeit eines neuen Kommissioniersystems besonders wichtig. Im Optimalfall sollte diese bei 100% liegen, die Mindestanforderung beträgt 99%. Die Verfügbarkeit sollte auch nicht durch andere Technologien (WLAN, Bluetooth, RFID), die vermehrt in den betrachteten Lagern eingesetzt werden, gemindert werden. Neben der technischen wird auch auf die mechanische Robustheit Wert gelegt, da in der Kommissionierung durch den Einsatz von vielen Transportmitteln, wie z. B. Kommissionierwagen oder Hubwagen, Stöße mit Lagereinrichtungen vorkommen.

Die Mitarbeiter der untersuchten Lager sind zwischen 20 und 50 Jahre alt, haben eine geringe Schulbildung, sind aber meist ausgebildete Fachkräfte in der Lagerlogistik. Durch den Einsatz von

Zeitarbeitskräften kommen allerdings auch unausgebildete Arbeiter zum Einsatz, welche zum Teil deutsch nur schwer verstehen bzw. sprechen können.

4.1.2 Prozessanalysen

Es stellt eine Herausforderung dar, einen Kommissionierprozess zu definieren, der für alle Kommissioniersysteme angewandt werden kann, aber zugleich detailliert ist. Daher wurden bei den Projektpartnern die verschiedenen Prozessschritte aufgenommen, um später einen für das PbLL-System und Einsatzgebiet spezifischen Kommissionierprozess zu generieren. Im Folgenden wird die Kommissionierung für den Warenausgang, für die Montageversorgung, Sequenzierung von Kabelbäumen und für ein vollautomatisches Lager vorgestellt.

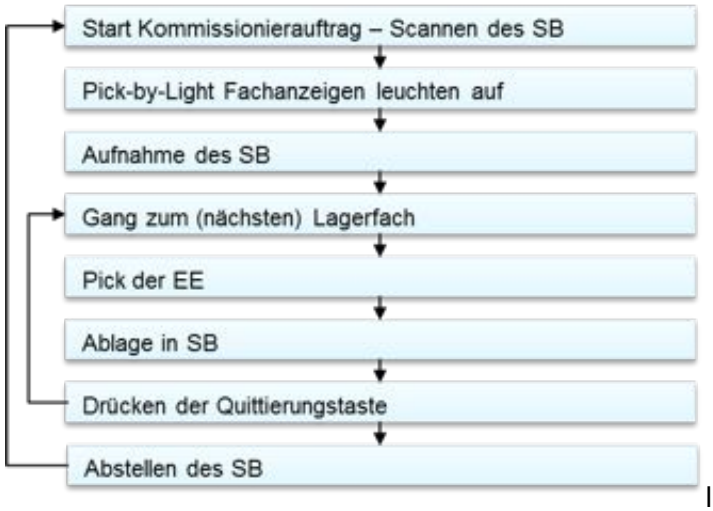


Abbildung 5: Prozess der Kommissionierung von Ersatzteilen weißer Ware am Warenausgang.

Das in Abbildung 5 dargestellte Schaubild zeigt den Ablauf der Kommissionierung an einem Warenausgang für den Versand von Ersatzteilen. Als technische Unterstützung werden MDT und PbL-Fachanzeigen verwendet. Zum Start eines Kommissionierauftrags nimmt sich der Mitarbeiter einen bereitgestellten Sammelbehälter (SB) und scannt dessen Barcode mit einem MDT. Daraufhin leuchten die PbL-Anzeigen in der Kommissionierzone auf und der Mitarbeiter nähert sich einem aktiven Lagerfach. Er greift die Entnahmeeinheit (EE) und legt sie in den SB. Dieser Vorgang wiederholt sich, bis der Auftrag vollständig kommissioniert wurde. Zum Abschluss stellt der Kommissionierer den SB ab und beginnt einen neuen Auftrag.

Abbildung 6: Beispielprozess einer Kommissionierung in der Montageversorgung

In der Montageversorgung ist es besonders wichtig, dass die richtigen Teile kommissioniert werden, damit der Montageprozess nicht verzögert wird. Daher wird der Kommissionierprozess, dargestellt in Abbildung 6, zusätzlich durch eine 3D-Laser-gesteuerte Eingriffsüberwachung unterstützt. In diesem Fall wird zudem nicht nur ein PbL-System, sondern auch ein Put-to-Light-System eingesetzt, damit der Kommissionierer mehrere Aufträge fehlerfrei parallel abarbeiten kann.

Zu Beginn jeder Schicht melden sich die Kommissionierer über ein Terminal an einem Kommissionierwagen an. Zum Start des Kommissioniervorgangs betätigt der Mitarbeiter einen Taster, der sich am Eingang der Kommissionierzone befindet. Durch ein PbL-System wird dem Kommissionierer anschließend mitgeteilt, welche Artikel er entnehmen muss. Beim Griff zur Entnahmeeinheit registriert ein 3D-Laserscanner den Griff ins richtige Lagerfach und quittiert den Griff zugleich. Der Mitarbeiter legt die entnommenen Artikel in die Ebene des Kommissionierwagens, die ihm über ein Put-to-Light-System visualisiert wird. Handelt es sich dabei um Stückgut, müssen die Waren vor der Ablage an einer Waage am Kommissionierwagen auf die richtige Menge hin kontrolliert werden. Die Ablage wird ebenso wie die Aufnahme durch Lichtschranken auf Richtigkeit überprüft und automatisch quittiert. Über einen erneuten

Tastendruck an der Basisstation beginnt der Prozess erneut, d. h. ein neuer Auftrag wird gestartet. Am Ende der Schicht melden sich die Kommissionierer in der jeweiligen Zone über das Terminal am Kommissionierwagen ab.

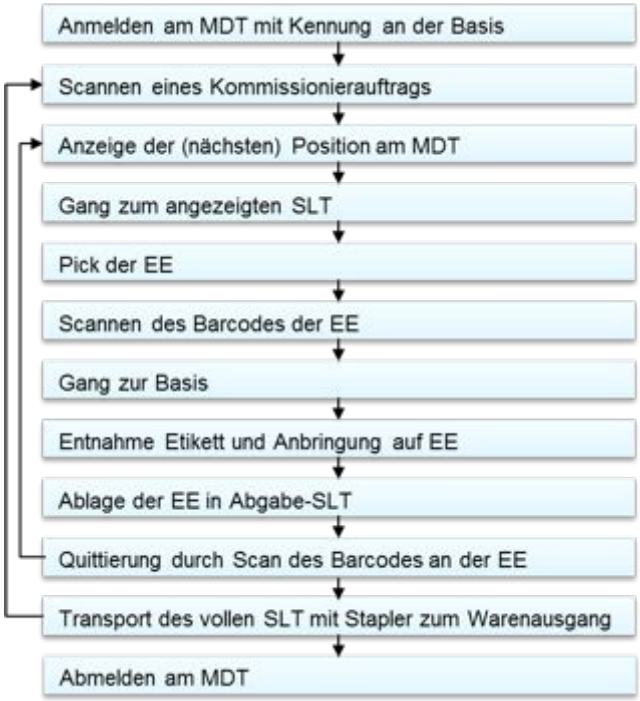


Abbildung 7: Beispielprozess einer Sequenzierung von Kabelbäumen.

Die Kommissionierung kann neben der reinen Zusammenstellung von Aufträgen auch zur Sequenzierung von Artikeln verwendet werden. In dem betrachteten Lager wird dazu als technisches Hilfsmittel ein MDT mit Ringscanner verwendet.

Der Auftrag wird gestartet, indem der Kommissionierer den Barcode eines an der Basis ausgedruckten Kommissionierauftrags scannt. Auf dem MDT erscheinen mehrere Informationen, unter anderem an welchem Standort sich der Artikel befindet. Der Mitarbeiter geht zum Sonderladungsträger (SLT), der den Artikel enthält, entnimmt ihn und scannt dessen Barcode. Bei der Quittierung der Position (und damit des Auftrags) durch den Scan wird an der Basis ein Etikett gedruckt, welches auf die Entnahmeeinheit geklebt wird. Zum Ende wird die Ware in einen SLT gelegt und durch das Scannen des neuen Barcodes quittiert. Ein neuer Auftrag beginnt mit dem Scannen eines anderen Kommissionierauftrags. Dieser Prozess wird solange wiederholt, bis der SLT voll ist und mit einem Stapler zum Warenausgang transportiert wird. Zum Ende der Schicht meldet sich der Mitarbeiter über das MDT vom System ab.

Abbildung 8: Beispielprozess eines vollautomatischen Kommissioniersystems.

Beim automatisierten Lagersystem „AutoStore“ der Fa. Hatteland wird die „Ware zu Person“ geliefert, jedoch sind zur endgültigen Kommissionierung noch Mitarbeiter notwendig.

Zum Start meldet sich ein Arbeiter über einen PC an einer Kommissionierstation an und beginnt die Kommissionierung über einen Taster. Das AutoStore-System liefert jede Position einzeln in bis zu 8-fach geteilten KLT-Behältern an. Für jedes der bis zu acht Fächer ist ein Lichtspot vorhanden, der die Entnahme aus dem jeweiligen Fach anzeigt. Der Kommissionierer liest die zu entnehmende Menge an einem Monitor ab, greift die Entnahmeeinheiten und wiegt diese gegebenenfalls (bei Schüttgut) zur Bestimmung der richtigen Menge. Nach der Entnahme klebt der Kommissionierer ein lieferantenspezifisches Etikett auf die Verpackungseinheit und legt sie in einen Kommissionierwagen. Anschließend wiederholt sich der Prozess mit dem Start eines neuen Kommissionierauftrags durch Tastendruck.

4.2 Einsatzszenarien

Grundsätzlich sind für das PbLL-System viele Einsatzszenarien denkbar, bei denen PbL-Anzeigen verwendet werden. Sinnvoll ist der Einsatz von PbLL allerdings nur in Bereichen, in denen die

Ortungsfunktion und die hohe Flexibilität genutzt werden kann und der Nachteil der nötigen Wartung der Energieversorgung bzw. Akkus nicht nachteilig ist. Daher werden im Folgenden zuerst die Einflussfaktoren auf mögliche Einsatzszenarien, wie z. B. das Materialflusssystem, definiert und daraus anschließend die Anwendungsgebiete abgeleitet.

4.2.1 Einflussfaktoren auf die Einsatzszenarien

Zur Auswahl von Einsatzszenarien wurden zuerst die Ausprägungen von Kommissioniersystemen bzw. deren übergeordneter Lager untersucht. Dafür ist entscheidend, für welche Arten von Kommissioniersystemen die Verwendung des angedachten PbLL-Systems grundsätzlich in Betracht gezogen werden kann. Im Folgenden werden verschiedene Materialflusssysteme, Lagereinrichtungen sowie weitere Einflussfaktoren auf ihre Eignung hinsichtlich der zu entwickelnden Technologie untersucht.

Materialflusssystem

Die möglichen Ausprägungen von Materialflusssystemen werden durch einen morphologischen Kasten der VDI Norm 3590 abgedeckt [VDI 3590]. Die Bewertung hinsichtlich der Eignung für PbLL ist in der Tabelle 3 zu finden. Grün gekennzeichnet sind Varianten, die geeignet sind. Gelb markierte Attribute sind nur bedingt (nicht optimal) geeignet. Systemausprägungen, welche sich nicht für das PbLL-System eignen, sind rot gekennzeichnet. Einzelne grau hinterlegte Aspekte, wie bspw. die Orientierung der Artikel im Lagerfach, haben keinen direkten Einfluss auf das Kommissioniersystem.

Materialflusssystem				
Vorgang	Realisierungsmöglichkeiten			
Bereitstellung	statisch		dynamisch	
	zentral		dezentral	
	geordnet		ungeordnet	
Fortbewegung	eindimensional o. GW	eindimensional m. GW	zweidimensional o. GW	zweidimensional m. GW
	manuell		mechanisch	automatisch
Entnahme	manuell	mechanisch		automatisch
	ein Teil pro Zugriff		mehrere Einzelteile pro Zugriff	
Abgabe	statisch		dynamisch	
	zentral		dezentral	
	geordnet		ungeordnet	

gut geeignet
möglich
ungeeignet
nicht relevant

Tabelle 3: Eignung verschieder Materialflusssysteme für PbLL

Eine dezentral und statisch organisierte Person-zur-Ware-Bereitstellung bietet die besten Potenziale für die Nutzung der hohen Flexibilität von PbLL, da hierbei die Belegung der Regale häufiger wechselt als es bei dynamisch bzw. dezentral organisierten Bereitstellungen der Fall ist. Trotzdem könnte das PbLL-System auch bei dezentralen und dynamischen Systeme Einsatz finden. Üblicherweise bewegt sich ein Kommissionierer bei einer Person-zur-Ware eindimensional mit oder ohne Gassenwechsel (GW). Bei einer zweidimensionalen Fortbewegung würde der Mitarbeiter ein Transportmittel zur Fortbewegung benötigen. In diesem Fall sind Fachanzeigen zwar möglich, aber nicht praxistauglich. Gleiches gilt bei der Entnahme: Bei mechanisch (z. B. per Stapler) entnommener Ware müsste der Mitarbeiter von dem Transportmittel absteigen um die Quittierung zu bestätigen. Im Falle einer automatisierten Entnahme entfällt die visuelle Identifikation des zu greifenden Guts ohnehin. Für die Abgabe ergibt sich die gleiche Eignung wie für die Bereitstellung.

Regalarten

Die Lagereinrichtung ist weiterer Aspekt, der bei der Anwendung des PbLL-Systems berücksichtigt werden muss. Die verschiedenen Lagerarten unterscheiden sich nicht nur in Material oder Artikelstruktur sondern auch in der Art wie das jeweilige Regal bedient wird. In der folgenden Aufzählung werden die gebräuchlichsten Lagertypen auf Ihre Eignung hin überprüft und in Tabelle 4 zusammengefasst. Mögliche Ausschlusskriterien sind eine zu niedrige Kommissionierleistung, fehlende Anbringungsmöglichkeiten für Fachanzeigen oder die mechanische Bedienung der Regale.

Block- und Zeilenlager eignen sich für PbLL nicht, da es für die Fachanzeigen keine sinnvollen Anbringungsmöglichkeiten gibt. Bei *Einschubregal-*, *Einfahrregal-, Kragarm-, Verschieberegal-, Rungen- und Umlaufregallagern* ist die Umschlagsleistung der Artikel in dieser Art der Lager zu gering. Somit ist das PbLL-System nicht sinnvoll einsetzbar, da mit der Technologie hohe Kommissionierleistungen angedacht sind. *Automatische Kleinteile-, Tunnel-* und sind üblicherweise automatisiert und erfordern keine Unterstützung. *Paletten- und Hochregallager* werden aufgrund der mehrdimensionalen und mechanischen Bedienung als nur bedingt geeignet eingestuft.

Fachboden- und Durchlaufregale werden zumeist manuell und eindimensional bedient. Die Kommissionierleistung streut bei diesen Regalen stark, ist aber eher im hohen Bereich.

Die in Betracht kommenden Regaltypen sind der Analyse zufolge nur *Fachboden- und Durchlaufregale* und bedingt *Platten-/Hochregale*.

Regaltyp	**Eignung für PbLL**
Block-/Zeilenlager	-
Einschubregallager	-
Einfahrregallager	-
Kragarmregallager	-
Verschieberegallager	-
Rungenlager	-
AKL-System	-
Tunnelregallager	-
Umlaufregallager	-
Paletten-/Hochregallager	o
Fachbodenregallager	+
Durchlaufregallager	+

Tabelle 4: Eignung verschiedener Lagertypen für PbLL: (+) gut geeignet, (o) bedingt geeignet, (-) nicht geeignet

Weitere Einflussfaktoren

Die Auftragsstruktur ist mitunter entscheidend dafür, ob ein Kommissioniersystem rentabel ist. Die Anzahl der umgeschlagenen Ware beeinflusst maßgeblich die Kosten für die Technik. Hinsichtlich des PbLL-Systems steigen die Kosten allerdings nicht linear mit der Auftragszahl, sondern geringer an, da pro Lagerfach eine Anzeige verwendet wird. Demnach korreliert die Rentabilität mit steigendem Durchsatz.

Ein hoher Durchsatz kann nur erreicht werden, wenn die Artikeldichte im Lagerbereich sehr hoch ist. Dementsprechend sollten für das Einsatzgebiet von PbLL die Lagerfächer möglichst klein sein

und eng beieinander liegen. Dies trifft vor allem auf A-Teile zu, die sehr oft umgeschlagen werden und eine handliche Größe besitzen.

4.2.2 Auswahl geeigneter Einsatzszenarien

Wie die vorherige Analyse gezeigt hat, sollte das PbLL-System vor allem in Lagern, die hohe Kommissionierleistungen erfordern und flexibel gestaltet sind, eingesetzt werden. Die folgenden definierten Einsatzszenarien wurden über morphologische Kästen (u. a. [VDI 3590]) entwickelt und ausgewählt.

Als wichtigstes Einsatzszenario wurde im Projekt die Kommissionierung von Kleinteilen im Warenausgang bzw. Vormontage aus Durchlaufregalen bzw. Fachbodenregalen spezifiziert. Bei dieser Art der Kommissionierung sind hohe Kommissionierleistungen nötig und die Kommissionierung muss anpassungsfähig sein. Darüber hinaus sind diese Kommissionierzonen meist dezentral und statisch organisiert. Hohe Leistungen sind ebenso in Kommissioniernestern vorzufinden und es werden meistens Fachboden-/Durchlaufregale verwendet. Deshalb werden diese als zweites Einsatzszenario definiert. Die nur bedingte Eignung für Palettenlager soll im dritten Szenario untersucht werden, wobei dem Szenario nur eine geringen Bedeutung beigemessen wird und bei der folgenden Konzeption dementsprechend gering gewichtet wird.

Szenario 1: Kommissionierung von Kleinteilen

Die Kommissionierung von Kleinteilen ist einer der Standardeinsatzzwecke von PbL-Systemen. Der Grund für den häufigen Einsatz von Fachanzeigen ist die hohe Kommissionierleistung, die für diesen Fall oftmals notwendig ist. Darauf aufbauend soll nachfolgend für das PbLL-System ein Szenario spezifiziert werden, welches an die bereits existierende Variante angelehnt ist.

Lager-, Artikel und Auftragsstruktur

Das Lager setzt sich zusammen aus der Kommissionierzone, den darin verwendeten Regalen und den Artikeln. Die definierte Kommissionierzone enthält 250 bis 1.000 Lagerfächer, wobei als Lagerhilfsmittel KLT-Behälter, Kartonagen oder Sichtlagerkästen verwendet werden. Die Wege der Zone werden als kurz angenommen, daher wird die mittlere Wegezeit pro Position auf unter zehn Sekunden definiert. Die Definition der Anzahl der Lagerfächer und die Wegezeiten pro Position sind dahingehend wichtig, da sie zur Auslegung des Sensorknotennetzwerks benötigt werden. Da mit steigender Anzahl an Lagerfächern auch die Netzwerkauslastung steigt, sinkt damit die mögliche Betriebsdauer der einzelnen Fachanzeigen. Zugleich hat die Wegezeit pro Position eine indirekte Auswirkung auf die Akkulaufzeit, denn umso größer dieser Wert ist, desto länger leuchtet

jede Fachanzeige pro Auftrag. Der zugrunde liegende Wert stammt aus den Erfahrungswerten der Industriebesuche. Aus diesen wurde ebenso die übliche Anzahl von einem Kommissionierern pro Zone übernommen. Insgesamt sollten in der Kommissionierzone nicht mehr als 1.000.000 Aufträge pro Jahr durchlaufen, aber mindestens 100.000. Dabei hat jeder Auftrag bis zu fünf Positionen.

Die Bereitstellung findet statisch, dezentral in Durchlauf- oder Fachbodenregalen statt. Die Anordnung der Lagerfächer ist durch eine ABC-Analyse bestimmt. Im definierten Szenario werden allerdings hauptsächlich A-Teile und gegebenenfalls wenige B-Teile kommissioniert. Die jeweiligen Artikel sind bezüglich der Größe derart beschaffen, dass sie manuell gehandhabt werden können. In jedem Lagerfach befindet sich nur ein Artikel, welcher ungeordnet gelagert ist. Die Abgabe erfolgt statisch und zentral an einer Basisstation, an der sich auch die Sammelbehälter befinden.

Ablauf

Der Kommissionierer bewegt sich in diesem Fall nur eindimensional, dementsprechend sich auch keine technischen Hilfsmittel wie bspw. Stapler vorgesehen. Während der Bearbeitung sind keine Gassenwechsel vorgesehen. Entnimmt der Mitarbeiter einen Artikel, hat er ebenso keine Hilfsmittel dafür zur Verfügung. Dabei ist es unerheblich, ob er bei einem Griff nur einen oder mehrere Artikel entnimmt. Die Ablage eines entnommenen Artikels erfolgt in einen mitgeführten Sammelbehälter, der nach dem Prozess an einem zentralen Ort abgestellt wird.

Bei dem dargestellten Szenario sind mehrere Variationen, die in der Praxis beobachtet wurden, definiert worden. Diese werden in der späteren Konzeptionsphase wie auch das Basisszenario berücksichtigt. In Ersterer werden auch Systeme mit Gassenwechseln berücksichtigt. In dem Fall sind die Wegezeiten höher (10 bis 60 Sekunden). Die zweite Variante enthält mittelgroße, -schwere Artikeln. Dabei sind dann zumeist zwei Hände bei der Kommissionierung notwendig und die Entnahmemenge beschränkt sich auf einen Artikel pro Zugriff. Weitere Varianten sind die Kommissionierung mit einem Kommissionierwagen und die Kommissionierung aus Fachbodenregalen. Schließlich wird in der letzten Variante die Zahl der Kommissionierer auf drei erhöht.

Szenario 2: Kommissioniernest

Ein weiterer Anwendungsfall von PbLL sind Kommissioniernester. In diesen sind besonders hohe Kommissionierleistungen möglich, da der Mitarbeiter keine bzw. nur geringste Laufwege in Anspruch nehmen muss.

Lager- und Artikelstruktur

Kommissioniernester sind gekennzeichnet durch eine u-förmige Anordnung der Regale. Aufgrund des begrenzten Raums werden maximal 250 Lagerfächer pro Zone angenommen und minimale Wegezeiten (unter zehn Sekunden). Außerdem ist infolge des geringen Platzes nur ein Mitarbeiter pro Zone sinnvoll. Als Bereitstelleinheiten werden KLT-Behälter, Kartonagen oder Sichtlagerkästen verwendet, wobei Fachboden- und Durchlaufregale zum Einsatz kommen.

Die Bereitstellung findet statisch, dezentral in Durchlauf- oder Fachbodenregalen statt. In den Lagerfächern befinden sich aufgrund der hohen Ansprüche bezüglich Kommissionierleistung üblicherweise nur A-Teile bzw. Schnellläufer. Die jeweiligen Artikel sind bezüglich der Größe derart beschaffen, dass sie manuell entnommen werden können. In jedem Lagerfach befindet sich nur ein Artikel, welcher ungeordnet gelagert ist. Die Abgabe der Sammeleinheit erfolgt statisch und zentral an einer Fördertechnik.

Die Auftragsstruktur verhält sich wie in Szenario 1.

Ablauf

Im Szenario „Kommissioniernest“ findet keine Bewegung des Kommissionierers statt. Entnimmt der Mitarbeiter einen Artikel, hat er keine Hilfsmittel zur Verfügung. Beim Zugriff auf ein Lagerfach greift der Kommissionierer ein oder mehrere Teile gleichzeitig. Die entnommenen Güter werden anschließend in einer Sammeleinheit (Kartonage oder KLT-Behälter) abgelegt, die nach dem Prozess an über ein Förderband abgeführt wird.

Szenario 3: Kommissionierung in Palettenlagern

Das Szenario drei deckt große Lager mit palettierten Artikeln ab, sogenannte Palettenlager. Diese werden für gewöhnlich nicht manuell gehandhabt, sondern über mechanische Transportmittel, wie z. B. Stapler oder Hubwagen, bedient. Sie haben daher einen geringeren Umschlag als die Lager in den vorher definierten Szenarien.

Lager- und Artikelstruktur

Palettenlager sind gekennzeichnet durch eine große Grundfläche. Gemäß der Ausmaße des Lagers werden für dieses mehr als 1.000 Lagerfächer angenommen und Wegezeiten mit bis zu 60 Sekunden. Zur Bedienung des definierten Lagers werden mehr als zwei Mitarbeiter eingesetzt. Als Bereitstelleinheiten werden Paletten und Gitterboxen verwendet.

Die Bereitstellung findet statisch, dezentral in Palettenregalen statt. Die Bestückung der Lagerfächer ist gemischt, es befinden sich dort A-, B- sowie C-Teile. In jedem Lagerfach befindet

sich nur ein Artikel, welcher geordnet gelagert ist. Die Transporteinheit (Palette oder Gitterbox) wird statisch und zentral an einer Sammelstelle mittels eines Staplers abgestellt.

Die Auftragsstruktur verhält sich wie in Szenario 1.

Ablauf

Im Großlager ist die Bewegung zweidimensional mit mehreren Gassenwechseln. Die Entnahme der Artikel wird mit einem Gabelstapler realisiert, wobei immer nur eine Palette aufgenommen wird. Nach der Aufnahme stellt der Staplerfahrer die Transporteinheit an einer Sammelstelle ab und begibt sich zur nächsten Position des Auftrags bis dieser fertig bearbeitet ist.

4.3 Anforderungen an das PbLL-System

Die Anforderungen an das zu entwickelnde Kommmissioniersystem werden aus den Daten der Ist-Aufnahme und den Anwendungsfällen aus dem vorherigen Kapitel abgeleitet. Der Fokus liegt bei den Anwendungsfällen auf dem ersten Szenario.

Nachdem die Anforderungen erstellt worden sind, wurden sie mittels der MoSCoW-Methode priorisiert. [Pri-04][5] Im Folgenden werden nur die wichtigsten Anforderungen aufgeführt, eine vollständige Auflistung ist unter Anhang B zu finden.

4.3.1 Logistische und prozesstechnische Anforderungen

Ein wichtiger logistischer Aspekt ist neben der Leistung und Fehlersicherheit die Verfügbarkeit, d. h. die Kommissionierung mit dem PbLL-System muss ohne Störungen durchführbar sein. Dementsprechend hat die störungsfreie Anzeige zu entnehmender Positionen und der Entnahmemenge sowie die Quittierung eines Picks höchste Priorität.

Darüber hinaus sollte während der Kommissionierung das System zusätzlich auf nachfolgende Situationen reagieren können. Anstehende Aufträge werden automatisch vom System an alle zur Verfügung stehenden Kommissionierer verteilt. Der Mitarbeiter muss anschließend erkennen können, aus welchem Lagerfach er Artikel entnehmen muss. Sind mehrere Mitarbeiter in einer Kommissionierzone tätig, so muss durch eine technische Lösung dies unterstützt werden. Bei Mindermengen im Lagerfach muss es dem Mitarbeiter möglich sein, eine entsprechende Korrektur

[5] Iris Pinkster, Bob van de Burgt, Dennis Janssen, Erik van Veenendaal: *Successful Test Management* 2. Aufl. Springer Verlag, 2004

der vorhandenen bzw. entnommenen Menge durchzuführen. Wenn sich ein Kommissionierer aus einer Kommissionierzone abmeldet wird ein etwaiger laufender Auftrag abgebrochen werden. Der abgebrochene Auftrag wird wieder in der Warteschlange eingereiht, sodass der nächste verfügbare Kommissionierer diesen bearbeiten kann.

PbL-Systeme werden unter anderem auch zur Inventur verwendet. Diese Funktionalität soll im PbLL-System ebenfalls implementiert werden. Deshalb soll ein separater Inventurmodus implementiert werden. Während der Inventur kann der Mitarbeiter die im Warehouse-Management-System (WMS) hinterlegten Lagerbestände direkt am Lagerfach ablesen und gegebenenfalls über eine Eingabe ändern.

Das PbLL-System ist hauptsächlich für das Szenario 1 auszulegen. Daher müssen jegliche Komponenten an Fachboden- und Durchlaufregalen problemlos abgebracht werden können. Zusätzlich zu der Anbringung an den Regalen soll auch eine Anbringung an den Bereitstelleinheiten (KLT-Behälter) möglich sein. Das System muss außerdem die geforderten 1.000.000 Aufträge pro Jahr problemlos übermitteln können. Dies bedeutet, dass das System 5,2 Aufträge pro Minute bei angenommenen 200 Arbeitstagen mit zwei Schichten verarbeiten kann. Eine weitere Anforderung ist die Menge der Lagerfächer, die aus dem Szenario resultiert. Es ist erforderlich, dass mindestens 250 Fachanzeigen gleichzeitig in einer Zone betrieben werden können. Aus der notwendigen Anforderung der Unterstützung paralleler Kommissionierung in mehreren Gassen wird die Mindestreichweite des Systems vorgegeben. Der maximale Abstand zweier Sensorknoten entspricht der Gangbreite der Kommissionierzone, da zwischen zwei Regalen sich kein Sensorknoten befindet. In einem industrieüblichen Lager beträgt die Gangbreite etwa 1,5m. Demzufolge sollte die Reichweite der Sensorknoten mindestens bei diesem Wert plus einem Sicherheitsaufschlag von 30% liegen.

Das PbLL-System soll zudem einen Kommissionierprozess unterstützen, welcher aus den Untersuchungen in 4.1.2 und der Literatur [VDI 3590, VDI 3311] festgelegt (siehe Abbildung 9 wurde.

Der Prozess startet mit der Registrierung des Mitarbeiters in der Kommissionierzone durch die zu entwickelnde Integrations- und Anwendungsplattform (IAP). Danach betritt der Mitarbeiter die Kommissionierzone und holt sich einen Sammelbehälter (oder gegebenenfalls einen Kommissionierwagen). Von diesem Moment an bekommt der Kommissionierer solange Aufträge, bis er die Zone wieder verlässt.

Ein Auftrag startet mit dem Aufblinken der Fachanzeige- und Regalknoten. Letzterer signalisiert dem Kommissionierer am Ende von Gassen, in welchen Bereich er sich bewegen muss. In dem

Bereich sucht er die leuchtenden Fachanzeigen. Am Lagerort angekommen, teilt ihm das PbLL-System die zu entnehmende Menge mit. Nach der Entnahme der einzelnen Artikel quittiert der Kommissionierer die erfolgreiche Entnahme durch einen Tastendruck. Sollte die zu entnehmende Menge nicht im Lagerfach vorhanden sein, korrigiert der Mitarbeiter die reale Entnahmemenge über entsprechende Tasten (nicht in Abbildung 9 dargestellt). Die IAP übermittelt die quittierte Position inklusive einer etwaigen Mengenänderung. Dieser Vorgang wiederholt sich, bis alle Positionen abgearbeitet worden sind. Mit der Quittierung der letzten Position des Auftrags gilt dieser als abgeschlossen. Daraufhin wird ein neuer Auftrag gestartet.

Verlässt der Kommissionierer während eines laufenden Auftrags den Kommissionierbereich oder meldet sich ab, so wird der Auftrag abgebrochen und in die Warteschlange wieder eingereiht. Die Abmeldung nach der Schicht wird wie bei der Anmeldung entweder über das Verlassen des mobilen Sensorknotens (MSK) aus einem Kommissionierbereich oder über eine manuelle Abmeldung detektiert.

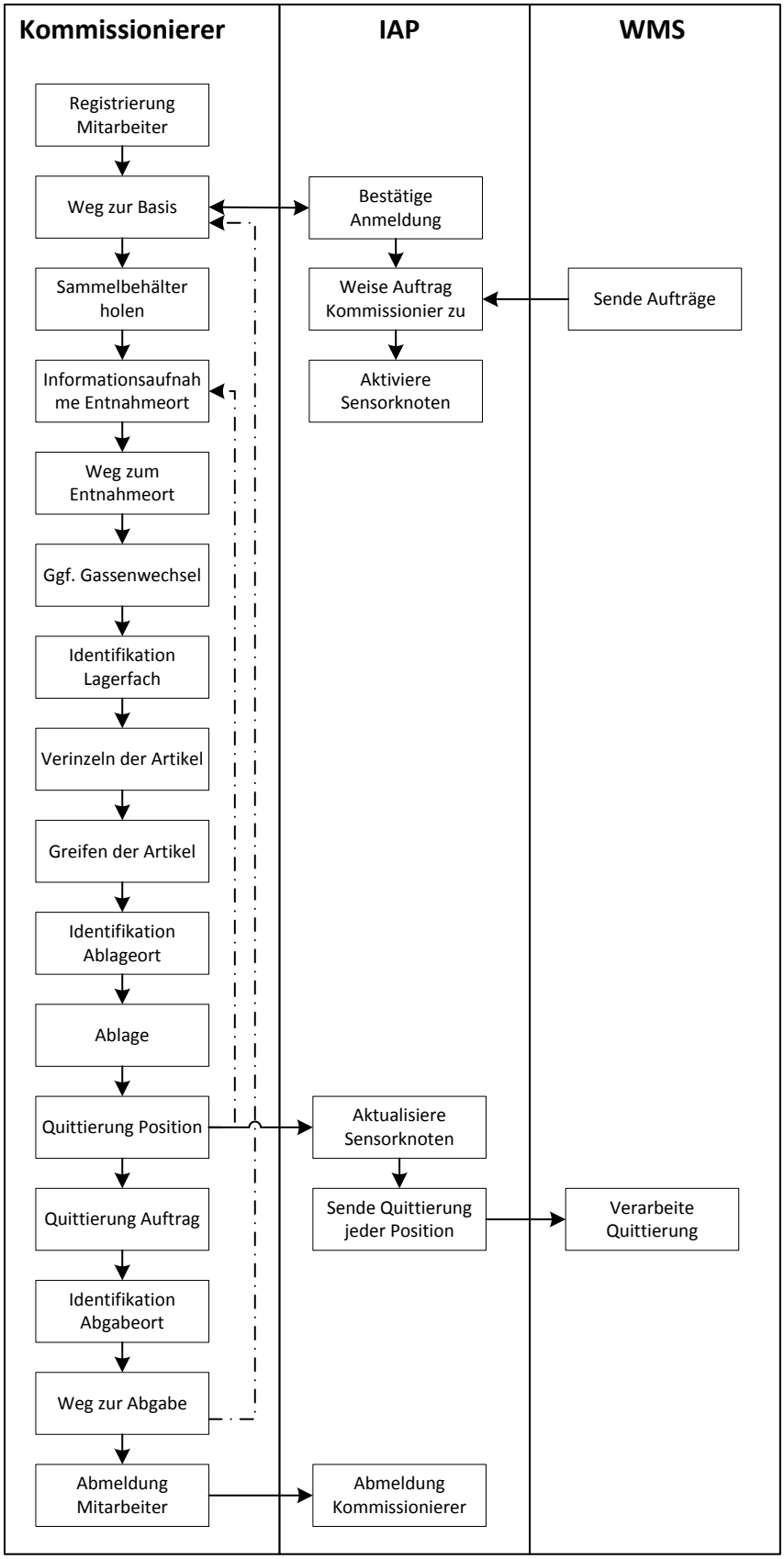


Abbildung 9: Definierter Kommissionierprozess PbLL

4.3.2 Technische Anforderungen

Zur Schärfung der technischen Anforderungen wurden mehrere Maßnahmen ergriffen. Neben der Befragung von Experten wurden die Befunde aus den Prozessbegehungen herangezogen. Die nach der MoSCoW-Methode gegliederten Anforderungen an das Gesamtsystem wurden dann in mehrere Lastenhefte überführt. Ein Lastenheft wurde angefertigt, um die Hardware gezielt für das Vorhaben zu entwickeln. Es wurde ein Lastenheft für die Weiterentwicklung des Funkprotokolls formuliert und eines zur Umsetzung der Integrations- und Anwendungsplattform.

Als wesentliche Anforderungen für die Umsetzung des Lastenhefts zur Anpassung des Sensornetzprotokolls wurden die Anforderungen der Umsetzung eines stabilen Funknetzes, einer schnellen Reaktionszeit und der hohen Verfügbarkeit gesehen. Ein stabiles Funknetz bedeutet, dass innerhalb des Netzes keine gesendeten Nachrichten verloren gehen und Klienten nicht unerwartet aus dem Netz abgemeldet werden. Die Anforderung, ein stabiles Funknetz zu ermöglichen wurde daher überführt in eine Übertragungsquote für Nachrichten, welche bei 99,99966% liegen sollte. Klienten sollten sich automatisch wieder mit dem Netz verbinden, sollte sich die Verbindung trennen.

Die hohe Verfügbarkeit des Netzes wurde in die Anforderung überführt, sodass die Lebensdauer der mit Batterien ausgestatteten Sensornetzknoten nicht unter einem Jahr liegen sollte. Die Anforderung der Umsetzung eines schnellen Funknetzes wurde realisiert, indem per Desk-Research hohe Kommissionierwerte in Form von Picks-per-Minute ermittelt wurden. Diese sollte das System im Stande sein zu leisten. In einem Artikel der DVZ aus dem Jahr 2014 wird als Obergrenze die Zahl von 3750 Artikeln pro Stunde genannt, die mit einer Pick-by-Light Anlage kommissioniert werden.[6] Heruntergebrochen auf das Fach ergibt dies 7,4 Picks pro Stunde pro Fach bei gleichmäßiger Verteilung der Auftragspositionen auf die vorhandenen Fächer. Da dies in den seltensten Fällen geschieht, wurden 7,4 Picks pro Stunde pro Fach als zu erfüllende Untergrenze für die Performanz des Systems angesehen.

Die wesentlichen Anforderungen an die Integrations- und Anwendungsplattform lassen sich ebenfalls aus den Expertenbefragungen ableiten. Die Flexibilität des Systems sowie die WMS-Anbindung waren die wichtigsten Anforderungen an die umzusetzende Middleware-Komponente. Flexibilität wurde erreicht, indem eine einfache Verheiratung von Fachanzeigenknoten und Artikeln auf der Plattform stattfinden soll sowie eine automatisierte Erkennung noch nicht eingebundener Sensorknoten stets ohne Zutun von der Plattform durchgeführt werden sollte. Die Anbindung an

6

das WMS war eine maßgebliche Anforderung an die Plattform, die durch eine offene XML/SOAP Schnittstelle ermöglicht werden sollte, sodass eine Grundkompatibilität zu zahlreichen Systemen bestand.

5 Konzepte für die Umsetzung von Pick-by-Local-Light

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden insgesamt vier Konzepte mittels morphologischer Kästen entwickelt. Die Konzepte wurden unabhängig von den Einsatzszenarien gebildet, da sie anhand dieser bewertet werden. Grundsätzlich sind aber alle Konzepte mit den definierten Einsatzszenarien möglich. Die ersten drei Konzepte bauen auf der herkömmlichen PbL-Technologie auf und unterscheiden sich vor allem darin, welche bereits verfügbaren technischen Hilfsmittel zusätzlich integriert werden. Das vierte Konzept weicht vom Standardprinzip PbL deutlich ab: Statt der Visualisierung der wichtigsten Informationen am Lagerfach wird die Informationsausgabe auf ein Wearable Device verlagert.

5.1 Vorgehensweise bei der Konzepterstellung

Vor der Erstellung der Konzepte müssen eingangs die möglichen Systemausprägungen festgelegt werden. Dazu wurden zu jedem in Abschnitt 4.1.2 vorgestellten Prozessschritt ein morphologischer Kasten erstellt. Anschließend wurden aus den jeweiligen Attributen sinnvolle Paare ausgewählt und zu Konzepten zusammengestellt.

Die wichtigsten Unterscheidungsmerkmale sind in Tabelle 4 dargestellt:

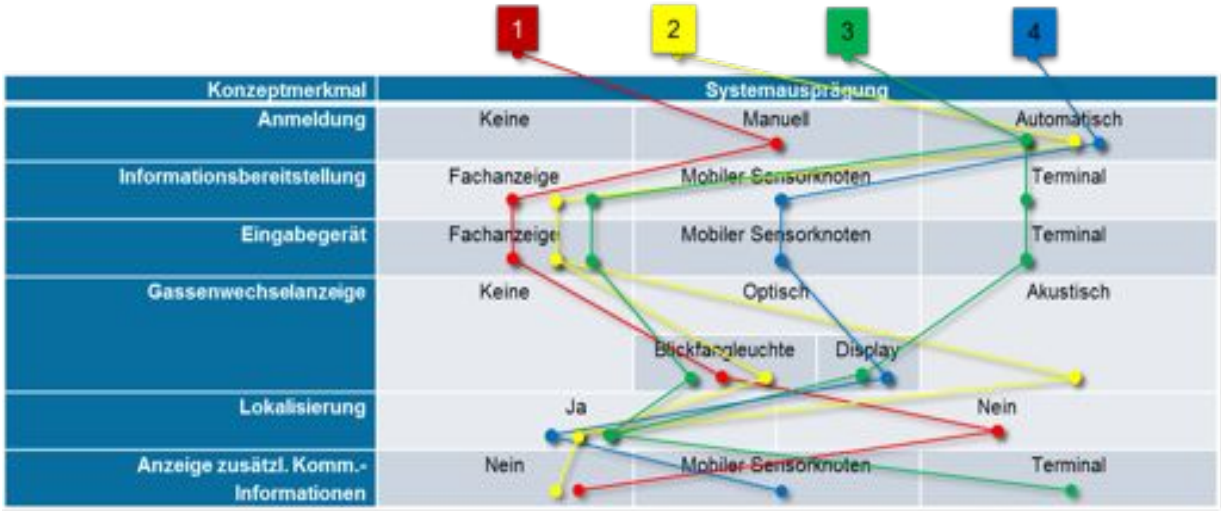


Tabelle 4: Übersicht über die wichtigsten Merkmale der Konzepte

Die Anmeldung kann entweder entfallen, manuell oder automatisch durchgeführt werden. Eine manuelle Anmeldung erfordert die Eingabe von Daten durch einen Mitarbeiter. Bei der automatischen Anmeldung wird ein Mitarbeiter durch den Eintritt in die Kommissionierzone angemeldet.

Informationen, die zur Kommissionierung notwendig sind, können entweder am Display der Fachanzeige, am mobilen Sensorknoten oder an einem Terminal angezeigt werden.

Zur Eingabe von Daten (z. B. Quittierung einer Position, Änderung der Entnahmemenge) können ebenso die zuletzt genannten Geräte verwendet werden.

Sofern ein Gassenwechsel während der Kommissionierung notwendig ist, kann dies entweder akustisch über einen Lautsprecher oder optisch in Form einer Leuchte oder eines Displays anzeigt werden. Darüber hinaus ist es möglich, den Mitarbeiter mittels eines getragenen mobilen Sensorknotens zu lokalisieren (z. B. zur automatischen Anmeldung).

Zusätzliche Informationen, die nicht zwangsläufig zur Kommissionierung benötigt werden, wie z. B. verbleibende Positionsanzahl oder Aufträge, können entweder entfallen, oder aber am mobilen Sensorknoten oder Terminal angezeigt werden.

5.2 Konzept 1 – „Drahtloses Pick-by-Light“

Das erste Konzept lehnt sich an bisherige Pick-by-Light-Systeme an. Die Grundfunktionen bleiben die gleichen, die Kommunikation wird allerdings über ein Sensorknotennetzwerk realisiert. Dementsprechend gibt es keine zusätzlichen Systemkomponenten im Vergleich zu PbL außer den Auftragsknoten. An diesem Knoten werden durch Tastendruck neue Aufträge gestartet.

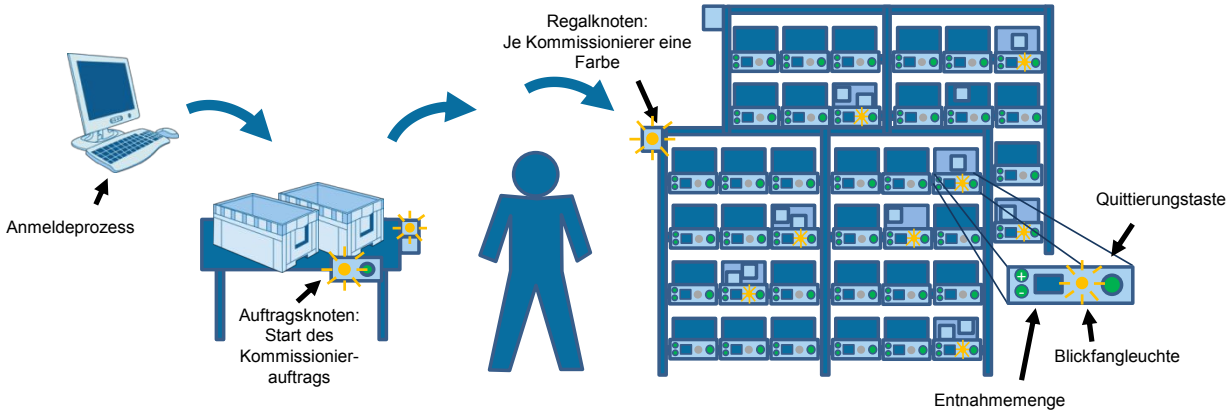


Abbildung 10: Schaubild zum Konzept "Drahtloses Pick-by-Light"

Die **Fachanzeigen** übernehmen die meisten Aufgaben im Kommissionierprozess. Ihre erste Funktion ist die Hervorhebung der Lagerfächer, aus denen Artikel entnommen werden müssen, mittels einer Blickfangleuchte. Durch die Verwendung einer mehrfarbigen Blickfangleuchte wird das Arbeiten von mehreren Kommissionierern in einem Bereich ermöglicht. Während der Bearbeitung eines Kommissionierauftrags leuchten alle Blickfangleuchten auf, sodass der Kommissionierer seinen Weg frei wählen kann.

Die zweite Funktion ist die Visualisierung der Entnahmemenge der jeweiligen Position auf einem Display. Weitere Funktionen sind die Bestätigung der Entnahme durch eine Quittierungstaste und die Korrektur von Mindermengen mithilfe weiterer Tasten.

Die Anbringung der Fachanzeigen ist frei wählbar. Sie können z. B. an den Regalfronten oder an den Bereitstelleinheiten befestigt werden. Die Zuweisung eines Fachanzeigen-Sensorknotens zu einem Lagerfach wird in der IAP manuell durchgeführt.

Neben den Fachanzeigen werden zusätzlich **Auftragsknoten** verwendet. Diese bestehen aus einem Sensorknoten, einem Taster und einer Blickfangleuchte. Die Funktion der Auftragsknoten besteht darin, Kommissionieraufträge zu starten. Daher ist die Anbringung in der Nähe der Sammelbehälter sinnvoll. Die Leuchte dient zur Visualisierung des erfolgreichen Auftragsstarts.

Die **Regalknoten** sind am Ende jedes Regals – an den Gassenfronten – und an den Sammelbehältern platziert. Der Zweck ist die Führung des Kommissionierers bei Aufträgen, die einen Gassenwechsel erfordern. Arbeiten mehrere Kommissionierer in den gleichen Gassen, so wechselt der Regalknoten in einem definierten Zeitintervall zyklisch die Farbe. Der technische Aufbau des der Regalknotens unterscheidet sich dabei nicht von dem des Auftragsknotens.

Die Anmeldung des Kommissionierers im System wird in diesem Konzept über einen PC realisiert. Die IAP übernimmt lediglich die Zuweisung der Farbe zu einem bestimmten Mitarbeiter, die restlichen Daten wie z. B. die Kommissionerzonenzuordnung werden vom WMS übernommen.

Ein Nachteil des dargestellten Konzepts ist, dass durch das gleichzeitige Leuchten aller Fachanzeigen keine Wegeführung in der Gasse realisierbar ist. Das Arbeiten von mehreren Kommissionieren wird zwar durch die mehrfarbigen Blickfangleuchten erleichtert, Kollisionen bei der Arbeit können allerdings nicht verhindert werden. Die nicht vorhandene Wegeführung macht auch die Hervorhebung verschiedener Gassen komplex, denn dem System ist nicht bekannt, welches Fach als nächstes gewählt wird. Daher müssen alle zu bedienenden Regal(-knoten) dauerhaft leuchten. Außerdem könnte der Einsatz von Displays an allen Fachanzeigen zu einem deutlichen Verlust der Betriebsdauer führen. Letztlich ist auch der Innovationsgrad als niedrig zu bewerten, da das Konzept keine neuen Funktionen beinhaltet.

Der Vorteil des Konzepts ist die Ähnlichkeit zu herkömmlichen Pick-by-Light-Systemen. Der Einarbeitungsaufwand ist aufgrund der gleichen Bedienungsweise einfach, die Akzeptanz ist ebenso als entsprechend hoch einzuschätzen. Zudem begünstigt die geringe Abweichung von bestehenden Systemen aufgrund der niedrigen Komplexität eine schnelle Entwicklung. Letzteres wird darüber hinaus durch die Beschränkung auf zwei Sensorknotenvarianten (Fachenzeigen, Regalknoten) gefördert.

5.3 Konzept 2 – „Mobiler Sensorknoten“

Das Konzept zur Verwendung von mobilen Sensorknoten zur anonymen Auftragszuweisung zielt auf die Eliminierung unnötiger Anmeldeprozesse. In dieser Variante leuchten alle Blickfangleuchten eines Auftrages, der Kommissionierer wird dementsprechend nicht innerhalb der Gasse geführt. Das Konzept beinhaltet die Module: Fachanzeigen, Regalknoten und mobile Sensorknoten.

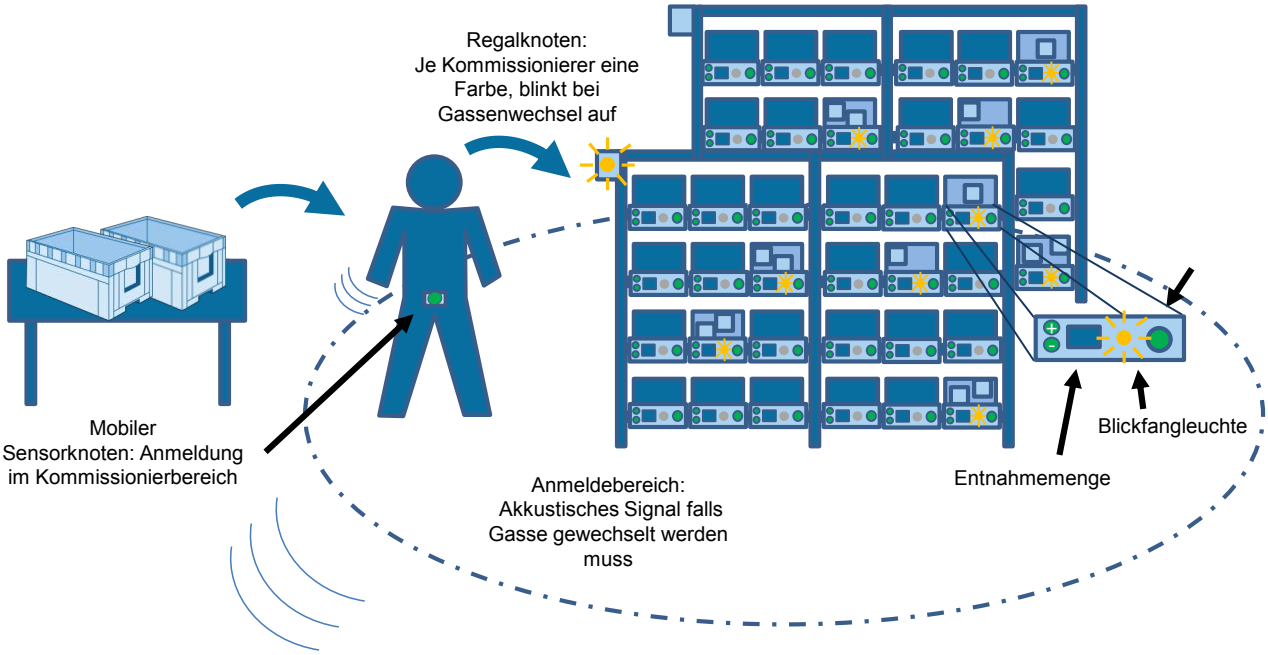


Abbildung 11: Schaubild zum Konzept „Mobiler Sensorknoten“

Die **Fachanzeigen** und **Regalknoten** übernehmen die gleichen Aufgaben wie in Konzept 1.

Der **mobile Sensorknoten** wird zur Lokalisierung und Anmeldung des Kommissionierers verwendet. Der Mitarbeiter nimmt sich dazu einen beliebigen Sensorknoten, schaltet ihn ein und wird automatisch angemeldet. Es findet hierbei bewusst keine Verknüpfung zwischen dem Mitarbeiter und dem Sensorknoten zu Gunsten des Datenschutzes statt, weswegen das System lediglich anonyme Kommissionierer registrieren kann.

Der Mitarbeiter muss zum Schichtbeginn wissen (z. B. durch Anweisung des Schichtleiters), in welchen Kommissionierbereich er gehen muss, bzw. wählt sich diesen frei aus. Sobald er eine Kommissionierzone betritt, meldet das System den Mitarbeiter automatisch für diesen Bereich an, sofern die maximale Anzahl der Kommissionierer in dieser Zone nicht überschritten wird. Über ein optisches Instrument wird ihm anschließend seine individuelle Farbe zugewiesen. Daraufhin beginnt automatisch ein Kommissionierauftrag, der optional durch ein akustisches Signal bestätigt wird. Ist in dem Bereich die maximale Anzahl der Kommissionierer bereits erreicht, bekommt der Mitarbeiter keine Farbe zugewiesen und es wird kein Kommissionierauftrag gestartet. Muss der Kommissionierer während eines Auftrages die Gasse wechseln, so bekommt er nach der letzten Position der aktuellen Gasse ein akustisches Signal am MSK. Der Kommissionierer bekommt solange neue Aufträge, bis er die Zone verlässt. Mit dem Verlassen des Bereichs wird er automatisch in der jeweiligen Zone abgemeldet. Geschieht dies während eines aktiven Auftrags,

wird dieser abgebrochen und steht dem nächsten Kommissionierer zur Verfügung. Der Mitarbeiter kann daraufhin in einen anderen Kommissionierbereich wechseln oder meldet sich ab, indem er den MSK ausschaltet.

Der größte Nachteil in diesem Konzept ist, dass an allen Fachanzeigen Displays angebracht werden müssen, was zu einer starken Verkürzung der Betriebsdauer führen kann. Darüber hinaus ist keine Kontrolle der Mitarbeiter möglich, da diese anonymisiert arbeiten. Eine statistische Auswertung der Pickzeiten ist demzufolge schwieriger bzw. nicht mehr personalisiert durchführbar. Der Einarbeitungsaufwand ist aufgrund des neuen Prozesses verglichen zum konventionellen Pick-by-Light-System höher. Die Akzeptanz ist als mittelhoch einzuschätzen, da sich die Mitarbeiter einerseits überwacht fühlen könnten, andererseits jedoch ihren Weg frei wählen können.

Vorteile des Konzepts sind vor allem, dass Prozessverbesserungen durch eine erhöhte Automatisierung erreicht werden und Gassenwechsel sowohl optisch über Regalknoten als auch akustisch über die MSK signalisiert werden. Letzteres gewährleistet auch bei mehreren Mitarbeitern in einer Gasse eine Verbesserung der Wahrnehmung nötiger Gassenwechsel. Außerdem bietet die Lokalisierung die Möglichkeit Anmelde- und Auftragsstartprozesse vollständig zu umgehen und damit die Effizienz zu steigern.

5.4 Konzept 3 – „Terminal“

Das Konzept der Kombination mobiler Sensorknoten mit einem Terminal zielt auf die Eliminierung unnötiger Anmeldeprozesse bei gleichzeitiger möglicher Identifikation der Mitarbeiter im Kommissionierprozess. Zu diesem Zweck werden Sensorknoten in Fachanzeigen, Regalknoten, mobile Sensorknoten und Terminals eingesetzt.

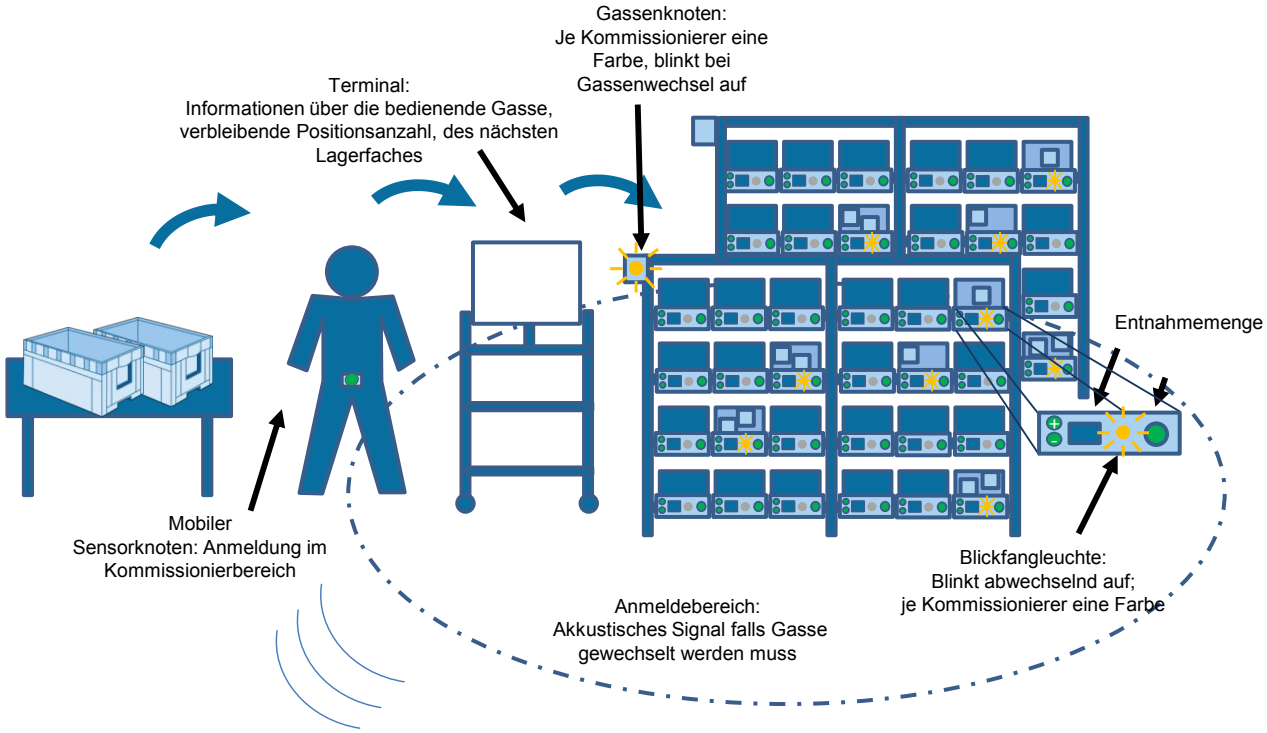


Abbildung 12: Schaubild zum Konzept "Terminal"

Die **Fachanzeigen**, **Regalknoten** und **mobilen Sensorknoten** übernehmen die gleichen Aufgaben wie in Konzept 1.

Das **Terminal** dient zur zusätzlichen Informationsbereitstellung und zur Anmeldung. Besonders hilfreich ist das Terminal, wenn der Kommissionierer die Gasse wechseln muss: Dann erscheint auf dem Monitor des Terminals die nächste zu bedienende Gasse. Darüber hinaus bekommt er Informationen für den aktuellen Auftrag (aktuelle Position, Anzahl der Positionen, aktuelle Entnahmemenge, Lagerfach, Gasse, Kommissionierfarbe) angezeigt.

Der größte Nachteil in diesem Konzept ist, dass an allen Fachanzeigen Displays integriert sein müssen, was zu einer starken Verkürzung der Betriebsdauer führen kann. In diesem Konzept sind zwar statistische Auswertungen für die Optimierung des Lagers möglich, allerdings könnte die Zuweisung von den Daten zu Mitarbeitern datenschutzrechtliche Probleme darstellen. Der Einarbeitungsaufwand ist aufgrund des neuen Prozesses verglichen zum konventionellen Pick-by-Light-System höher. Die Akzeptanz ist aufgrund der personenbasierten Lokalisierung als mittel einzuschätzen.

Vorteile des Konzepts sind vor allem, dass Prozessverbesserungen durch eine erhöhte Automatisierung erreicht werden und Gassenwechsel sowohl optisch als auch akustisch signalisiert werden. Letzteres gewährleistet das sichere Erkennen eines nötigen Gassenwechsels

auch bei mehreren Mitarbeitern in einer Gasse. Außerdem bietet die Lokalisierung die Möglichkeit, den manuellen Start eines Auftrags vollständig zu umgehen und damit Zeit zu sparen.

5.5 Konzept 4 – „Wearable Device“

In diesem Konzept werden alle für die Kommissionierung nötigen Informationen auf einem Display am Handgelenk des Mitarbeiters bereitgestellt. Eingaben (z. B. Quittierung) werden unverändert an den Fachanzeigen durchgeführt. Die benötigten Systemelemente für dieses Konzept sind Fachanzeigen, Regalknoten und mobile Sensorknoten (hier als Wearable Device).

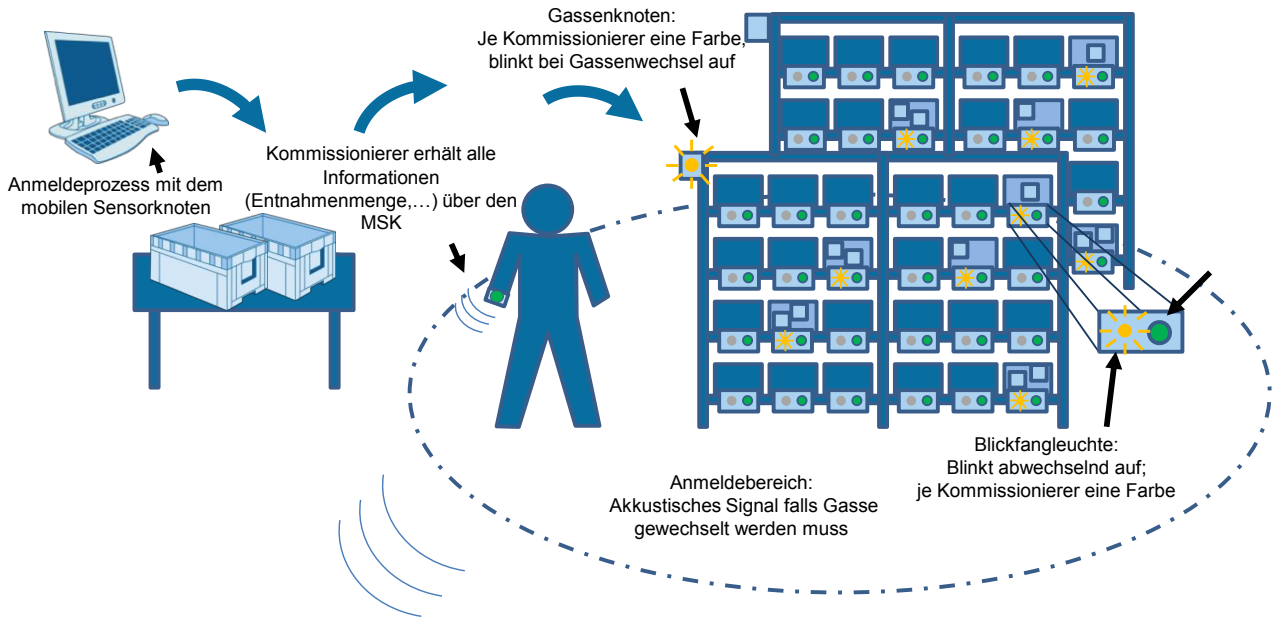


Abbildung 13: Schaubild zum Konzept "Wearable Device"

Die **Fachanzeigen** dienen in diesem Konzept zur Hervorhebung der Entnahmefächer und zur Eingabe von Informationen. Die erste Funktion ist die Hervorhebung der Lagerfächer, aus denen Artikel entnommen werden müssen, mittels einer Blickfangleuchte. Durch die Verwendung einer mehrfarbigen Blickfangleuchte wird das Arbeiten von mehreren Kommissionierern in einem Bereich ermöglicht. Während der Bearbeitung eines Kommissionierauftrags leuchten alle Blickfangleuchten auf, sodass der Kommissionierer seinen Weg frei wählen kann. Müssen in einem Auftrag mehrere Gassen bedient werden, leuchten die Blickfangleuchten nur in derjenigen Gasse auf, in welcher sich der Kommissionierer aufhält. Weitere Funktionen sind die Bestätigung der Entnahme durch eine Quittierungstaste und die Korrektur von Mindermengen mithilfe weiterer Tasten. Die korrigierte Menge wird dabei auf dem Wearable Device angezeigt. Individuelle

Funktionen (z. B. die Einleitung der Berichtigung der Lagermenge im Inventurmodus) können durch eine zusätzliche Funktionstaste implementiert werden.

Die Anbringung der Fachanzeigen ist frei wählbar. Sie können z. B. an den Regalfronten oder an den Bereitstelleinheiten befestigt werden. Die Zuweisung eines Fachanzeigen-Sensorknotens zu einem Lagerfach wird in der IAP manuell durchgeführt.

Die **Regalknoten** haben dieselbe Funktion wie in Konzept 1.

Der **mobile Sensorknoten (MSK)** dient zur Bereitstellung aller Informationen, die für die Kommissionierung notwendig sind. Darunter zählen die Entnahmemenge, die Gasse und die Anzahl der verbleibenden Positionen. Die Entnahmemenge kann allerdings erst angezeigt werden, sobald die Ankunft des Mitarbeiters am Lagerfach quittiert wurde. Die Quittierung erfolgt dabei automatisch durch die Ortung des Kommissionierers oder manuell durch den Tastendruck an der jeweiligen Fachanzeige.

Der Ablauf gestaltet sich wie folgt: Der Mitarbeiter nimmt sich zum Schichtbeginn einen beliebigen Sensorknoten und schaltet ihn ein. An einem PC meldet er sich anschließend an und wählt einen Sensorknoten aus. Zur Auswahl stehen hierbei nur aktive mobile Sensorknoten, die noch keinem Kommissionierer zugewiesen sind. Der Mitarbeiter muss zu diesem Zeitpunkt wissen (z. B. durch Anweisung des Schichtleiters), in welchen Kommissionierbereich er gehen muss. Sobald er in einen Bereich geht, meldet das System den Mitarbeiter automatisch für diesen an, sofern die erlaubte Anzahl von Kommissionierern nicht überschritten wurde. Über ein optisches Instrument wird ihm anschließend seine individuelle Farbe angezeigt. Daraufhin beginnt automatisch ein Kommissionierauftrag. Ist in dem Bereich die maximale Anzahl der Kommissionierer bereits erreicht, bekommt der Mitarbeiter keine Farbe zugewiesen und es wird kein Kommissionierauftrag gestartet, außer er stimmt der Überbelegung (Warnung auf dem Display) durch Drücken eines Softkeys auf dem MSK zu. Muss der Kommissionierer während eines Auftrages die Gasse wechseln, so bekommt er nach der letzten Position der aktuellen Gasse die Aufforderung zum Gassenwechsel auf dem Display des MSK angezeigt. Der Kommissionierer bekommt solange neue Aufträge, bis er die Zone verlässt. Mit dem Verlassen des Bereichs wird er automatisch in der jeweiligen Zone abgemeldet. Der Mitarbeiter kann daraufhin in einen anderen Kommissionierbereich wechseln oder er meldet sich ab, indem er den mobilen Sensorknoten ausschaltet.

Ein Nachteil an diesem Konzept ist, dass die Einarbeitung in das neue System aufwendiger ist als es bei anderen Systemen ist (z. B. konventionellem Pick-by-Light). Außerdem könnte die Zuweisung von Positionsdaten zu Mitarbeitern datenschutzrechtliche Probleme hervorrufen. Die

Akzeptanz ist aufgrund dessen als mittel einzuschätzen. Die automatische Quittierung der Ankunft an einem Lagerfach könnte wegen einer fehlenden Genauigkeit bei der Ortung des Mitarbeiters zu einer Minderung der Zuverlässigkeit des Systems führen. Der alternative Tastendruck an der Fachanzeige, z. B. wenn die Ortung nicht ordnungsgemäß funktioniert, erfordert einen zusätzlichen Zeitaufwand. Dieser setzt sich zusammen aus der Zeit zum Drücken der Taste und der darauffolgenden Wartezeit, bis das System die notwendigen Informationen auf das Display liefert.

Vorteile des Konzepts sind vor allem, dass Prozessverbesserungen durch eine erhöhte Automatisierung erreicht werden und das mobile Display beliebige Informationen (wie z. B. einen Gassenwechsel) während des Kommissionierprozesses anzeigen kann. Der Transfer des Displays von der Fachanzeige auf den mobilen Sensorknoten hat ferner die Vorteile, dass der Wartungsaufwand deutlich geringer wird und die Fachanzeigen allgemein deutlich kompakter werden, wodurch sich zusätzlich der Anwendungsbereich vergrößert. Außerdem bietet die Lokalisierung die Möglichkeit, Prozesse und damit Zeit einzusparen. Allerdings muss dazu die Ortung präzise genug sein, da ansonsten der Nachteil eines zusätzlichen Prozessschritts entsteht. Die freie Wegwahl bietet den Vorteil, dass die Akzeptanz bei den Mitarbeitern steigt.

Zusammengefasst ergeben sich für die Konzepte 1 bis 4 folgende Nach- und Vorteile:

Konzept	**Nachteile**	**Vorteile**
1	• Gassenwechselsignalisierung schwierig • Sehr hoher Energieverbrauch • Niedriger Innovationsgrad	• Ähnlichkeit zu herkömmlichen Systemen • Hohe Akzeptanz • Niedrige Komplexität
2	• Hoher Energieverbrauch • Moderater Innovationsgrad	• Prozessverbesserung (Reduktion von Totzeit) • Gute Gassenwechselsignalisierung • Datenschutz der Lokalisierung • Mittlere bis hohe Akzeptanz (anonyme Lokalisierung)
3	• Niedriger Datenschutz durch benutzerspezifische Lokalisierung • Hohe Komplexität • Niedrige Akzeptanz • Kommissionierwagen notwendig	• Anzeigemöglichkeit nützlicher optionaler Informationen (z. B. verbleibende Positionen) • Prozessverbesserung (Reduktion von Totzeit) • Sehr gute Gassenwechselsignalisierung

4	• Niedrige Kompatibilität mit anderen Kommissioniersystemen • Erhöhung der Totzeit • Hohe Komplexität • Niedrige Akzeptanz	• Hoher Innovationsgrad • Geringer Energieverbrauch • Anzeigemöglichkeit nützlicher optionaler Informationen (z. B. verbleibende Positionen) • Sehr gute Gassenwechselsignalisierung

Tabelle 5: Nach- und Vorteile der Konzepte

5.6 Konzeptbewertung und -auswahl

Für die Bewertung der Konzepte wurde die „Analytic Hierarchy Process“ (AHP)-Methode verwendet. [Saa-01] Bei dieser Methode werden nicht nur die Bewertung von Kriterien der verschiedenen Konzepte in einem paarweisen Vergleich gegenübergestellt, sondern auch die Kriterien selbst werden durch paarweise Vergleiche gewichtet. Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal zum gewöhnlichen paarweisen Vergleich besteht darin, dass die Bewertungen einer Konsistenzprüfung unterzogen werden. Der Konsistenzwert einer Vergleichsmatrix zeigt, ob die Bewertungen in sich schlüssig sind. Dies wurde bei der Bewertung der Konzepte berücksichtigt, sodass der Konsistenzwert stets unter dem kritischen Schwellwert von 0,1 lag.

Zur Bewertung wurden die Anforderungen aus den Expertengesprächen und die in 0 definierten Einsatzszenarien als Kriterien verwendet:

- Anforderungseignung (50% Gewichtung)
    - Akzeptanz der Mitarbeiter
    - Einfachheit in der Anwendung
    - Energieverbrauch
    - Fehlerquote
    - Flexibilität bzgl. Lagerumstrukturierungen
    - Inventureignung
    - Innovationsgrad
    - Entwicklungsaufwand
- Szenarieneignung (50% Gewichtung, siehe 4.2.2)

- Szenario 1 – „Kommissionierung von Kleinteilen (75% Gewichtung, alle fünf Varianten)
- Szenario 2 – „Kommissioniernest“ (20% Gewichtung)
- Szenario 3 – „Kommissionierung von Großteilen (5% Gewichtung)

Die verschiedenen Kriterien wurden in zwei Gruppen zusammengefasst: die Anforderungs- und die Szenarieneignung. Erstere subsumiert die Anforderungen aus der Ist-Aufnahme. Diese werden ergänzt durch den Innovationsgrad des Konzepts und den Aufwand, der mit dessen Entwicklung nötig ist. Die Kategorie „Szenarieneignung“ leitet sich aus den in Abschnitt 4.2.2 definierten Einsatzszenarien ab. Am stärksten gewichtet ist das Szenario 1, da es den wahrscheinlichsten Anwendungsfall des Systems darstellt. Die Auswertung der Konzeptbewertung ist sehr ausführlich, weshalb für die vollständige Beschreibung auf den Anhang B verwiesen sei. Das Resultat der Auswertung zeigt **Tabelle 6: Ergebnis der Konzeptbewertung**

Das Konzept „Mobiler Sensorknoten“ hat das beste Ergebnis bezüglich der eingangs definierten Anforderungen erzielt.

Konzeptname	Gesamtbewertung
Konzept 2 – „Mobiler Sensorknoten“	31,81 %
Konzept 4 – „Wearable Device“	24,93 %
Konzept 1 – „Pick-by-Light“	23,78 %
Konzept 3 – „Terminal“	19,48 %

Tabelle 6: Ergebnis der Konzeptbewertung

Nach der Konzeptauswahl wurde die Entwicklung begonnen. Der erste Schritt der Auswahl der Hardware-Komponenten wird im nächsten Kapitel beschrieben

6 Auswahl der Komponenten

Nachdem das Konzept festgelegt worden ist, wurde dessen Entwicklung begonnen. Der erste Schritt ist die Auswahl der Hardwarekomponenten, welche in diesem Kapitel beschrieben wird.

Für die drahtlose Kommunikation soll die vom Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS entwickelte s-net®-Technologie zum Einsatz kommen. Die Hardware-Baugruppen, auf welchen die s-net®-Technologie verwendet wird, werden ebenfalls vom Fraunhofer IIS entwickelt.

Dabei soll eine besonders stromsparende Kommunikation und dadurch eine besonders lange Lebenszeit realisiert werden. Wartungskosten können dadurch gegenüber bisherigen drahtlosen Lösungen verringert werden.

6.1 Baugruppe PBLUIB

Mit dem Sensorknoten S7TAG wurde für s-net® das 2,4 GHz Frequenzband nutzbar gemacht. Mit dem Design PBLUIB soll die Funktionalität dieses Sensorknotens in Form einer Adapterplatine erweitert werden. Das so entstehende Gerät „PbLL-Knoten“ soll Funktionalitäten wie beispielsweise ein Display und mehrere Taster zur Interaktion mit dem Kommissionierer bereitstellen und somit den bisherigen Kommissionierprozess gewinnbringend unterstützen. Im Folgenden werden die Anforderungen und die Realisierung des Designs PBLUIB genauer erläutert.

6.1.1 Verbindung zum s-net®-Sensorknoten

Um den Funktionsumfang eines s-net®-Sensorknotens erweitern zu können, muss eine zuverlässige Verbindung zwischen dem Sensorknoten und der Adapterplatine PBLUIB vorhanden sein. Die Sensorknoten verfügen standardmäßig über je zwei 10-polige Buchsenleisten „JTAG/BSL“ und „Extension“. Über diese sind verschiedene Funktionalitäten, wie beispielsweise das Programmieren der Sensorknoten über JTAG oder der Anschluss externer Hardware realisierbar.

Um diese bereits vorhandene Möglichkeit der Verbindung mit dem Sensorknoten nutzen zu können, soll die Adapterplatine zwei zu den Buchsenleisten passende Steckerleisten besitzen. Die Pinbelegung der beiden Steckerleisten ist den folgenden Tabellen zu entnehmen:

- Pinbelegung Programmierschnittstelle „JTAG/BSL“:

Pin	Signalname	Beschreibung

1	TDI	Test Data In (JTAG)
2	TDO	Test Data Out (JTAG)
3	TMS	Test Mode Select (JTAG)
4	BSL_TX	V.24 Datenausgang (vom Modul)
5	BSL_RX	V.24 Dateneingang (zum Modul)
6	TCK	Test Clock (JTAG)
7	VOUT	Versorgungsspannung für die Systemumgebung (typ. 3.0 V – 3.3 V)
8	RESETn	Reset-Signal
9	TEST	TEST Signal (JTAG)
10	GND	Masse

- Pinbelegung Systemumgebung-Schnittstelle „Extension“:

Pin	Signalname	Beschreibung
1	SENS_SCL	I2C SCL (USCIB0)
2	SENS_SDA	I2C SDA (USCIB0)
3	USCIB0_CLK	USCI Clock (USCIB0)
4	EE_SOMI	Slave Out, Master In (USCIB1)
5	EE_UCLK	USCI Clock (USCIB1)
6	EE_SIMO	Slave In, Master Out (USCIB1)
7	P2.6	Digitaler Ein- oder Ausgang
8	P6.4	Digitaler Ein- oder Ausgang bzw. analoger Eingang
9	P2.0	Digitaler Ein- oder Ausgang

10	P2.4	Digitaler Ein- oder Ausgang

6.1.2 Versorgung

Um den Entwicklungsaufwand für die Adapterplatine PBLUIB möglichst gering zu halten, wurde die Stromversorgung über den angeschlossenen s-net®-Sensorknoten realisiert. Dazu wird die über die 10-polige Steckerleiste „JTAG/BSL“ zur Verfügung stehende Versorgungsspannung „VOUT“ zur Versorgung der Komponenten auf der Baugruppe PBLUIB verwendet.

Das Display zur Interaktion mit dem Kommissionierer soll über einen Port-Pin und einen elektronischen Schalter mit der Versorgungsspannung verbunden oder von ihr getrennt werden können.

Als elektronischer Schalter wird dabei der Chip SN74LVC1G3157DCKR der Firma Texas Instruments verwendet. Dieser zeichnet sich durch eine einfache Ansteuerung und geringen Stromverbrauch aus. Angesteuert wird der Schalter über einen IO-Pin, welcher ebenfalls über die „JTAG/BSL“-Schnittstelle mit dem Chip verbunden ist.

6.1.3 Display

Um dem Kommissionierer Informationen wie beispielsweise die zu entnehmende Menge eines bestimmten Produkts anzeigen zu können, soll die Baugruppe PBLUIB über ein Display verfügen.

Hierbei standen grundsätzlich mehrere Technologien zur Auswahl, welche jeweils sowohl Vor- als auch Nachteile mit sich bringen.

In der engeren Auswahl standen für das Projekt Pick-by-Local-Light die folgenden drei Technologien:

1. Liquid Crystal Displays (LC-Display)
2. E-Paper Displays (EPD)
3. Memory LC-Display

6.1.3.1 Liquid Crystal Displays

Liquid Crystal Displays bestehen aus zwei Glasplatten, auf welche eine dünne Metallschicht aufgebracht wird. Zwischen diesen beiden Glasplatten wird eine Flüssigkeit eingefüllt, die in der Lage ist, die Polarisationsebene von Licht zu drehen. Dies ist durch kleine in der Flüssigkeit schwebende Kristalle möglich.

Polarisiertes Licht bezeichnet dabei Licht, das sich nur in eine bestimmte Schwingungsrichtung, in die so genannte Polarisationsebene ausbreitet. Um die Drehung der Polarisationsebene, also die Drehung der Lichtschwingung, nutzen zu können, wird auf den beiden Glasplatten zusätzlich je eine Folie aufgebracht, deren Polarisationsebenen um 90° zueinander gedreht sind.

Wird nun ein elektrisches Feld zwischen den Metallschichten auf den beiden Glasplatten angelegt, so drehen sich die Kristalle in der Flüssigkeit in die eine Polarisationsrichtung. Dadurch kann das Licht die entsprechende Polarisationsfolie auf einer der Glasplatte nicht mehr passieren und der Bereich ist für den Benutzer undurchsichtig. Wird das elektrische Feld abgeschaltet, drehen sich die Kristalle wieder in Richtung der anderen Polarisationsebene zurück und die Polarisationsfolie auf der anderen Glasplatte ist durchsichtig. Der Bereich erscheint für den Benutzer hell auf dem Display. Je nachdem, in welchem Bereich des Displays also eine Spannung angelegt wird, erscheint dieser Bereich dunkel, also undurchsichtig oder hell, also durchsichtig, auf dem Display.

Grundsätzlich wird bei Liquid Crystal Displays zwischen reflektiven Displays, transflektiven und transmissiven Displays unterschieden. Reflektive Displays können ausschließlich ohne Hintergrundbeleuchtung betrieben werden, da bei diesen Displays auf der Unterseite ein lichtundurchlässiger Reflektor aufgebracht wird.

Bei transflektiven Displays ist dieser Reflektor teilweise lichtdurchlässig, sodass das Display auch mit Hintergrundbeleuchtung betrieben werden kann. Ist keine Hintergrundbeleuchtung gewünscht reflektiert der angebrachte Reflektor auf der Unterseite des Displays das einfallende Licht aber noch stark genug um den Displayinhalt auch ohne Beleuchtung ablesen zu können.

Bei transmissiven Displays kommt dagegen kein Reflektor zum Einsatz, sodass kein Licht reflektiert wird. Hier muss daher stets eine Hintergrundbeleuchtung verwendet werden, da sonst der Displayinhalt nicht abgelesen werden kann. Durch den fehlenden Reflektor scheinen diese Displays jedoch besonders hell.

Der Vorteil von LC-Displays besteht darin, dass diese Technologie bereits seit Jahrzenten bekannt ist und Displays somit relativ preiswert von verschiedensten Herstellern erhältlich sind. Durch auf dem Markt erhältliche Controller mit vorprogrammierten Zeichen-Fonts ist die Ansteuerung und

Darstellung einzelner Schriftzeichen wie Buchstaben, Zahlen, etc. mit geringem Entwicklungsaufwand möglich.

Durch die verschiedenen Ausprägungen von reflektiven bis transmissiven Displays kann entsprechend der jeweiligen Anwendung ein geeigneter Typ ausgewählt werden. Jedoch bringen LCDs auch Nachteile mit sich.

Zur Darstellung eines Zeichens auf dem Display müssen die Kristalle in den entsprechenden Bereichen des Displays aktiv gedreht werden. Wird das angelegte elektrische Feld abgeschaltet, drehen sich die Kristalle wieder in ihre Ausgangsposition zurück und das Zeichen ist auf dem Display nicht mehr erkennbar. Dies hat zur Folge, dass LC-Displays zur dauerhaften Anzeige eines Zeichens eine dauerhafte Stromaufnahme aufweisen. Vor allem in batteriebetriebenen Geräten wie den Pick-by-Local-Light-Knoten ist dies ein großer Nachteil, der die Wartungsintervalle aufgrund auszutauschender Batterien deutlich verkürzt.

Ein weiterer Nachteil besteht in der Polarisation des Lichts. Diese hat zur Folge, dass das Display eine so genannte Vorzugsblickrichtung besitzt. Diese beschreibt den Bereich in dem der Inhalt auf dem Display optimal abzulesen ist. Vor allem im Bereich der Kommissionierung ist dies von Nachteil, da der Kommissionierer so stets in Vorzugsblickrichtung stehen muss, um beispielsweise die zu entnehmende Menge eines Artikels richtig ablesen zu können. Durch das segmentweise Anlegen einer Spannung, ist die Auflösung von LC-Displays begrenzt. Daher wurde für das Projekt Pick-by-Local-Light kein LC-Display für die Realisierung der Fachanzeigeknoten verwendet.

6.1.3.2 E-Paper Displays

E-Paper Displays bestehen aus zwei Elektroden, wobei die zum Benutzer zeigende transparent ist. Ähnlich zum LC-Display wird zwischen diesen beiden Elektroden eine Flüssigkeit eingefüllt. Allerdings sind in dieser Flüssigkeit keine Kristalle enthalten, sondern kleine so genannte Mikrokapseln, welche mit elektrisch geladener Tinte gefüllt sind. Schwarze Kapseln sind dabei meist negativ geladen, weiße positiv.

Wird nun eine Spannung über den beiden Elektroden angelegt, so werden die Tintenkapseln entsprechend der angelegten Spannung nach oben zur transparenten Elektrode gezogen oder nach unten. Die Platzierung der einzelnen Partikel an der durchsichtigen Elektrode ergibt dann den abzulesenden Inhalt des Displays.

Ein wesentlicher Vorteil der E-Paper Displays besteht im Stromverbrauch. Werden die Mikrokapseln durch das Anlegen einer Spannung in einen bestimmten Bereich des Displays gezogen, halten sie dort bis zu mehreren Monaten lang ihre Position, sodass die Spannung nach

Änderung des Display-Inhalts komplett abgeschaltet werden kann. Es entsteht kein statischer Stromverbrauch und die Batterielaufzeit wird entsprechend verlängert.

Durch die Verwendung von Mikrokapseln ist eine deutlich höhere Auflösung als bei LCDs realisierbar. Doch auch EPDs haben nicht zu vernachlässigende Nachteile.

Anders als bei LC-Displays erfolgt die Änderung des Displayinhalts bei einem E-Paper-Display in 4 Schritten: Zunächst wird das aktuelle Bild invertiert. Anschließend wird der aktuelle Inhalt gelöscht. Im dritten Schritt wird der neue Displayinhalt in invertierter Form dargestellt. Zum Schluss wird der neue Displayinhalt invertiert und damit wie gewünscht dargestellt und ablesbar. Dieses Prozedere erfordert spezielle Timing Controller zur Ansteuerung des Displays, um sicherzustellen, dass der nächste Schritt der Neubeschreibung erst dann begonnen wird, wenn der vorherige vollständig durchlaufen ist. Da es sich bei E-Paper Displays jedoch um eine relativ neue Technologie handelt, sind hier noch nicht viele für das jeweilige Display geeignete Controller und geeignete Ersatztypen auf dem Markt verfügbar.

Ein weiterer großer Nachteil ist das Temperaturverhalten der Displays. Die Flüssigkeit, in der die Tintenkapseln bewegt werden, weist in Abhängigkeit der Temperatur eine sich ändernde Viskosität auf. Messungen haben gezeigt, dass bei fallender Temperatur die Dauer, bis ein neuer Displayinhalt angezeigt wird, sehr stark ansteigt. Dabei bewegt sich die Antwortzeit eines Displays bei ca. +5° C Umgebungstemperatur bereits im zweistelligen Sekundenbereich. Die folgende Abbildung gibt die Messergebnisse wider und zeigt, dass E-Paper Displays beispielsweise für den Einsatz in Kühlräumen ungeeignet sind:

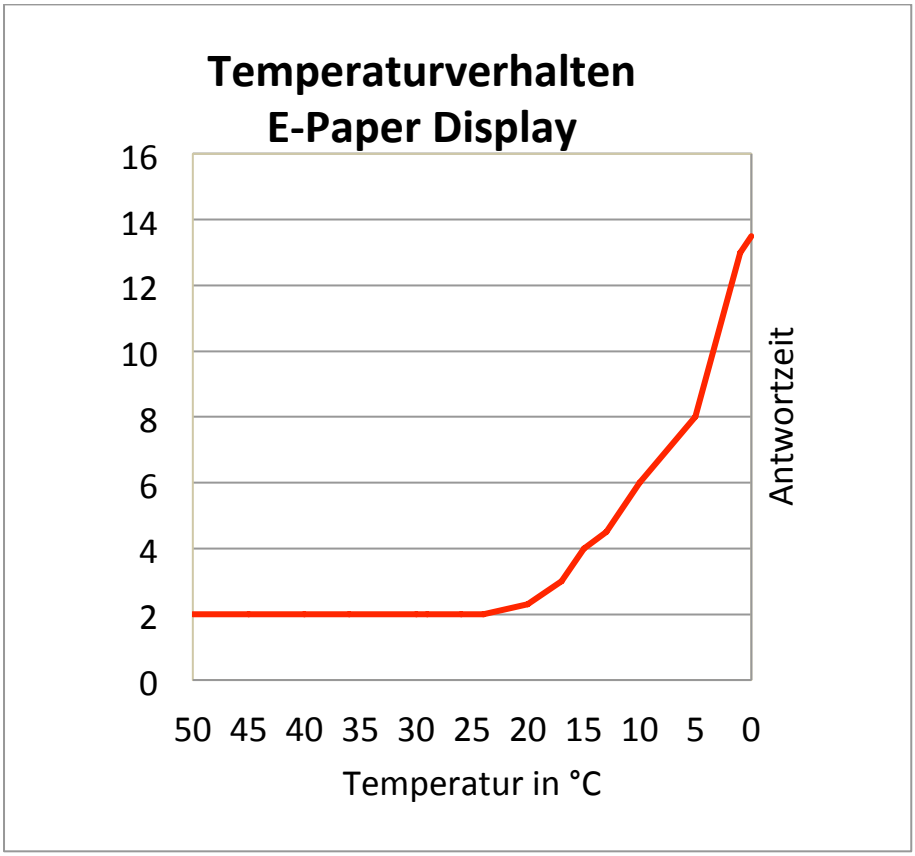


Abbildung 14: Temperaturverhalten bei E-Paper Displays

Daher ist auch das E-Paper Display nicht für das Pick-by-Local-Light-System geeignet und wurde für die Realisierung des Systems nicht eingesetzt.

6.1.3.3 Memory LC-Displays

Bei Memory LC-Displays handelt es sich um LC-Displays, die für jedes Pixel einen 1-bit großen Speicher vorhalten. Mit diesem Speicher ist es möglich, bei minimalem Stromverbrauch den Pixelzustand zu erhalten. Dadurch wird eine Änderung des Displayinhalts nicht mehr über das Anlegen mehrerer Spannungen, entsprechend den Pixelzuständen, umgesetzt, sondern über das Setzen der Speicherinhalte. Währenddessen wird das Display mit einer einzigen Versorgungsspannung versorgt.

Dabei ist ein Memory LC-Display wie ein normales LC-Display für einen wesentlich größeren Temperaturbereich geeignet als ein E-Paper Display und verbraucht gleichzeitig aber nur einen Bruchteil des Stroms, den ein konventionelles LCD benötigt. Damit bietet es bereits Vorteile gegenüber LCDs und EPDs.

Daher wurde die Realisierung der Baugruppe PBLUIB ein Memory LC-Display vom Typ LS013B7DH03 der Firma Sharp verwendet.

Es besitzt eine Diagonale von 1,28 Zoll und ist damit groß genug, um wesentliche Informationen wie z.B. die Entnahmemenge eines Artikels leserlich für den Kommissionierer darstellen zu können und gleichzeitig klein genug um die Abmessungen der Baugruppe als Aufsteckplatine für den S7TAG-Sensorknoten nicht zu vergrößern.

6.1.4 LEDs

Um dem Kommissionierer zu signalisieren, aus welchem Regal und aus welchem Fach er einen Artikel kommissionieren muss, sollen auf den Fachanzeige- und Regalknoten LEDs zum Einsatz kommen. Hierbei ist es wichtig, möglichst vielen verschiedenen Kommissionierern über verschiedene Farben zeitnah zu signalisieren, wo sie jeweils den nächsten Artikel finden können. Jeder Kommissionierer hält dabei stets nach einer anderen Farbe Ausschau.

Um dies zu realisieren, wurden für die Baugruppe PBLUIB RGB-LEDs vom Typ ASMT-YTC7-0AA02 der Firma Avago Technologies eingesetzt. Diese haben jeweils drei einzelne LEDs in rot, grün und blau verbaut, welche jeweils einzeln angesteuert werden können. Mit Hilfe eines RGB-Controllers, welcher die einzelnen LEDs mittels Pulsweitenmodulation ansteuert, können eine Vielzahl an Farben realisiert und somit deutlich mehr verschiedene Kommissionierer durch einen Knoten unterstützt werden, als es mit einfarbigen LEDs möglich wäre. Insgesamt wurden auf der Baugruppe drei RGB-LEDs verbaut, welche alle gleichzeitig vom RGB-Controller LP55231 der Firma Texas Instruments angesteuert werden können.

Der Controller wiederum ist über ein I²C-Interface mit der Steckerleiste „Extension“ und somit mit dem Mikrocontroller auf dem angeschlossenen s-net®-Sensorknoten verbunden.

6.1.5 Taster

Über drei Taster soll es dem Kommissionier möglich sein, mit dem Pick-by-Local-Light-System zu interagieren. Hierbei sollen Funktionalitäten, wie beispielsweise die Änderung der entnommenen Menge, die Bestätigung, dass der aktuelle Artikel entnommen wurde oder das An- und Ausschalten des Fachanzeigeknotens, realisiert werden.

Dazu kommen drei Taster vom Typ 1241.1618.23 der Firma Schurter zum Einsatz. Diese weisen eine benötigte Betätigungskraft von 2,2 N sowie einen Hub von 0,35 mm auf. Dadurch ist eine gute Haptik gewährleistet, bei der der Kommissionierer auch beim Tragen von Arbeitshandschuhen das

Schalten des Tasters spüren kann und somit Rückmeldung vom System erhält. Zusätzlich bietet die Firma Schurter passende Kappen zu ihren Tastern an, mit denen es möglich ist, die Höhe des Tasters variabel anzupassen. Um die Taster außerhalb des Gehäuses betätigen zu können, wurden die Kappen 0862.8102 verwendet. Diese haben eine Höhe von 9,25 mm und ragen damit weit genug aus dem geschlossenen Gehäuse heraus um problemlos betätigt zu werden.

Für die Baugruppe PBLUIB wurden insgesamt drei solcher Taster inklusive passender Verlängerungskappen verwendet.

6.2 Leiterplatte

Um die Kosten für die Baugruppe möglichst gering zu halten wurde das Design PBLUIB auf einer zweilagigen Leiterplatte gefertigt. Zur Verbindung der Leiterplatte mit einem s-net®-Sensorknoten wurden die beiden 10-poligen Stiftleisten auf der Unterseite der Leiterplatte platziert. Das Display, die RGB-LEDs, sowie die Taster wurden auf der Oberseite der Leiterplatte bestückt um eine Interaktion mit dem Kommissionierer zu ermöglichen.

Die folgenden 3 Abbildungen zeigen die Oberseite der Leiterplatte mit ihrer Bestückung, die Unterseite, sowie die Abmessungen, die so genannte Outline der Leiterplatte. Dabei ist zu beachten, dass X103 den Anschluss für das Display darstellt:

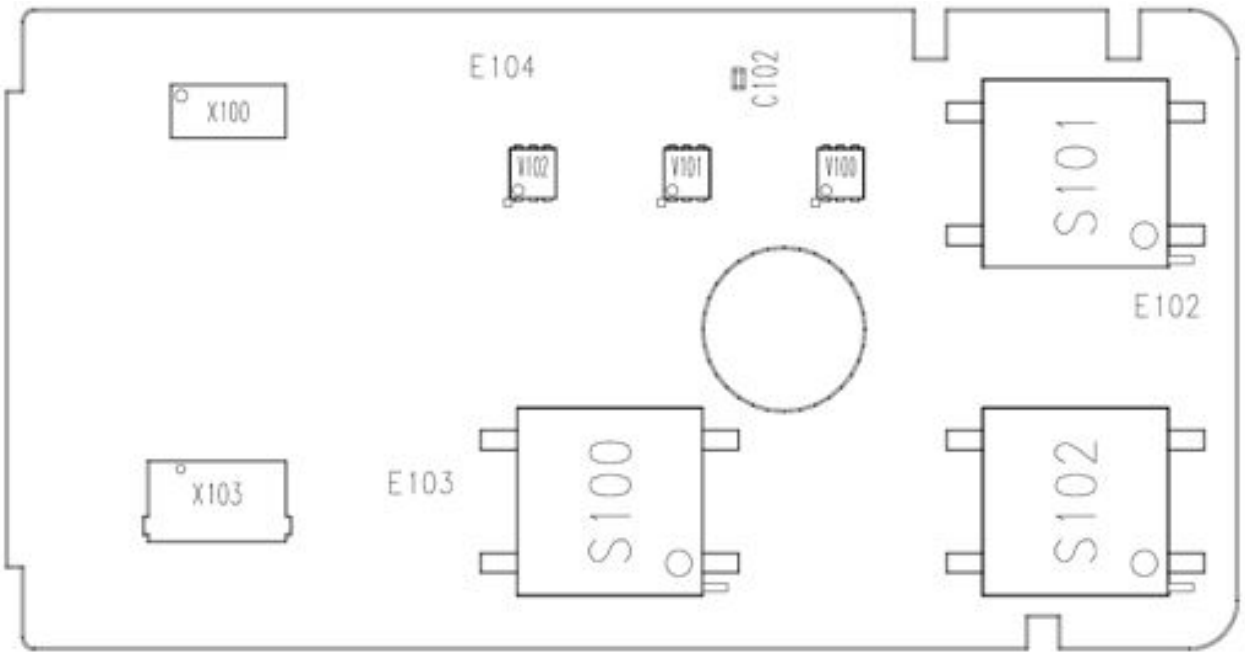


Abbildung 15: Oberseite der Baugruppe PBLUIB

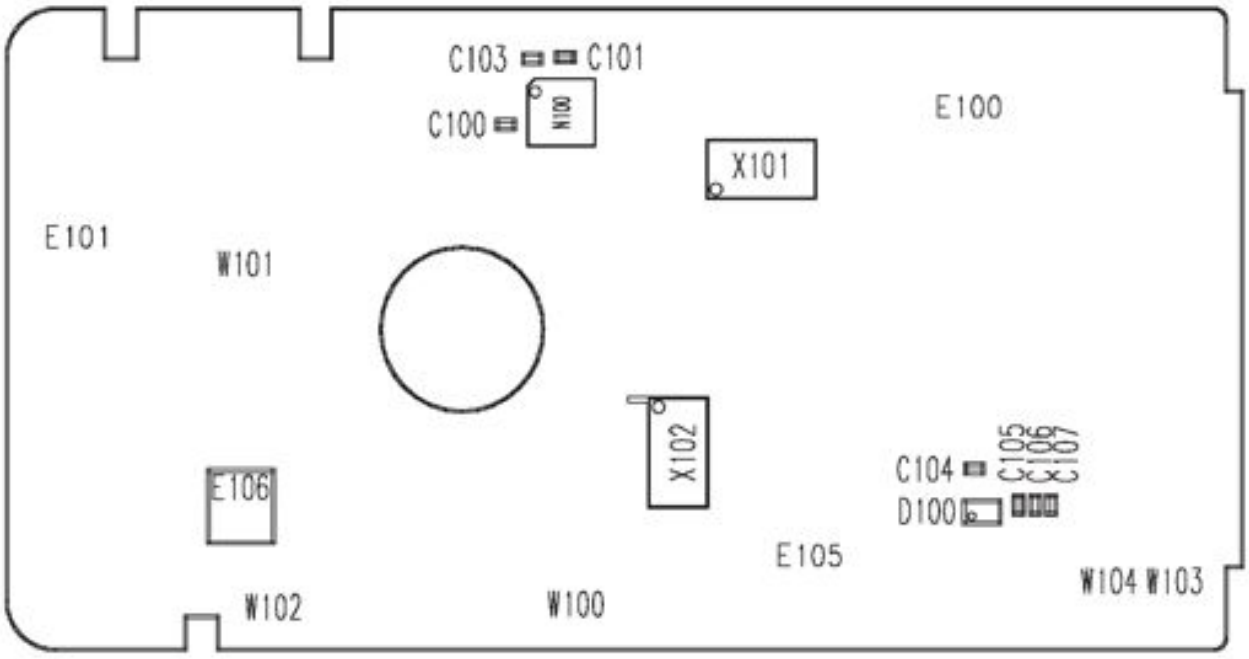


Abbildung 16: Unterseite der Baugruppe PBLUIB

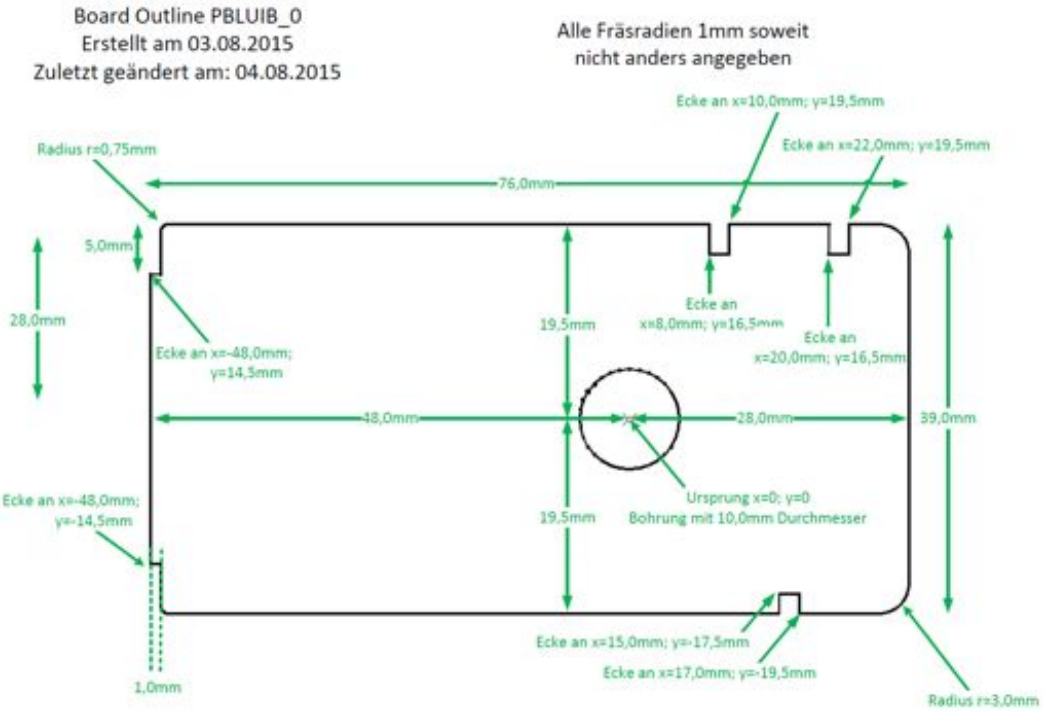


Abbildung 17: Boardoutline der Baugruppe PBLUIB

6.3 Gehäuse

Die Sensorknoten in TAG-Bauform des Fraunhofer IIS werden standardmäßig in das Standardgehäuse Datec-Poket-Box S der Firma OKW verbaut.

Da dieses Gehäuse mit seinen Außenmaßen von 85 x 46 x 16 mm für die Anbringung am Gürtel des Kommissionierers oder auch am Regalfach eines Pick-by-Local-Light-Systems geeignet ist, wurde für das Projekt entschieden dieses Gehäuse weiterhin zu verwenden.

Durch die aufgesteckte Baugruppe PBLUIB ist es jedoch nötig, einen höheren Deckel als bisher zu verwenden. Da hier die Fertigung eines neuen Gehäusedeckels mit Hilfe der in der Massenproduktion üblichen Spritzgussverfahren zu kostenintensiv wäre, kommt für die Umsetzung des Pick-by-Local-Light-Projekts ein mittels 3D-Druck gefertigter Deckel zum Einsatz.

Zur Auswahl standen hierbei drei verschiedene Fertigungsverfahren:

- FDM (Fused Deposition Modeling)
- SLM (Selective Laser Melting)
- MJM (Muliti-Jet Modeling)

Die Ansprüche an das Verfahren waren hierbei eine möglichst hohe Genauigkeit bei der Fertigung der Gehäusedeckel sowie eine hohe mechanische Stabilität, um Beschädigungen der Deckel und der Elektronik im laufenden Betrieb möglichst ausschließen zu können. Damit gelangte das Verfahren MJM nicht in die engere Wahl für die Fertigung der Gehäusedeckel. Dieses Verfahren zeichnet sich zwar durch das schichtweise Auftragen des Druckmaterials durch eine hohe Genauigkeit und damit geringe Fertigungstoleranzen aus, jedoch sind die entstehenden 3D-Modelle mechanisch wenig stabil und daher eher als Ansichtsobjekte geeignet.

Ein erster Prototyp wurde mit dem FDM-Verfahren gedruckt. Hierbei konnte kein Deckel in einer überzeugenden Qualität hergestellt werden. Sowohl die Oberflächenbeschaffenheit als auch die Genauigkeit der gedruckten Teile war für einen für ein Pick-by-Local-Light-System nicht geeignet.

Ein zweiter Prototyp wurde daraufhin mit Hilfe des SLM-Verfahrens erstellt. Hierbei war die Oberflächenbeschaffenheit des Druckes für den Zweck gut geeignet, doch die Auflösung und Genauigkeit des Modells konnte nicht überzeugen. Einige der gedruckten Deckel passten trotz genauem 3D-Modells nicht auf die passende Standardgehäuseschale von OKW.

Auf der Suche nach einer besser geeigneten Alternative empfahl ein Unternehmen, welches sowohl mit FDM, als auch mit SLM und MJM-Verfahren arbeitet, das Vakuumguss-Verfahren. In

diesem Verfahren werden zunächst Negativformen der zu gießenden Bauteile erstellt. Aus diesen wird dann unter Vakuum das Bauteil aus ABS-Kunststoff gegossen. Da für dieses Verfahren die Herstellung der Negativform in der Regel sehr kostspielig ist, wurde für das Pick-by-Local-Light-Projekt die Negativ-Form mit Hilfe des MJM-Verfahrens realisiert, da die Negative aus MJM-gefertigten Teilen zwar zu instabil für den laufenden Kommissionierbetrieb sind, aber stabil genug für das Vakuumgussverfahren. Die so entstandenen Deckel konnten durch eine hohe Genauigkeit und gute mechanische Stabilität überzeugen und wurden anschließend für den Pick-by-Local-Light-Demonstrator auf diese Weise gefertigt.

Dabei verfügt der gedruckte Deckel über Aussparungen für das Display, die RGB-LEDs sowie die Taster. Um das Gehäuse wie auch mit dem Standarddeckel von OKW schließen und mit einer Schraube fixieren zu können, ist im Inneren ein entsprechender Schraubdom eingearbeitet. Mit Hilfe weiterer Dome wird die Adapterplatine auf dem darunterliegenden Sensorknoten gehalten und gleichzeitig ein Herausfallen der Batterien im Batteriehalter des Gehäusebodens verhindert.

Der in das fertige Gehäuse und am Regal montierte Pick-by-Local-Light-Knoten ist in der folgenden Abbildung zu sehen:

Abbildung 18: Pick-By-Local-Light-Knoten im Gehäuse am Regal montiert

7 Anpassung der Sensornetzkomponenten

Die softwareseitigen Arbeiten an den Sensornetzkomponenten lassen sich in die Bereiche „Plattformunterstützung“ und „PbLL-Services“ gruppieren.

7.1 Plattformunterstützung

Zur Plattformunterstützung zählen sämtliche Arbeiten zur Anbindung der im Rahmen dieses Projektes entwickelten Hardwarekomponenten. Hierzu wurden Treiber entwickelt, welche diese Hardwarekomponenten im Ökosystem von s-net® verfügbar machen. Da mehrere Hardwarekomponenten hinzugekommen waren, mussten auch mehrere Treiber implementiert werden. Hierzu gehören:

- Ein Treiber zur Ansteuerung des Displays der Fachanzeigeknoten:
  Das Display soll dem Programmierer eine textbasierte Schnittstelle bieten, wobei mehrere Zeilen mit jeweils wählbarer Schriftgröße angeboten werden. Nur so konnten sowohl gut sichtbare, große und gut lesbare Schriften angeboten aber auch kleine Zusatzinformationen auf dem Display angezeigt werden.
- Ein Treiber zur Ansteuerung der RGB-Leuchtdioden:
  Jede dieser RGB-Leuchtdioden sollte einzeln ansteuerbar sein und eine frei wählbare Kombination aus Farbe und Helligkeit ermöglichen. Weiterhin sollen benutzerspezifische Blinkmuster unterstützt werden.
- Ein Treiber zur Ansteuerung der Bedientaster:
  Auf jeder PbLL-Erweiterungsplatine sind drei Taster vorgesehen. Für diese musste ein neuer Treiber entwickelt werden, damit auch gleich das Problem der „Entprellung“ softwareseitig mit gelöst werden konnte. Weiterhin wurde eine Logik über alle drei Taster hinweg implementiert, welche die Erkennung von Tastenkombinationen ermöglicht. Dank dieser Logik wurden komplexe Eingabemuster wie beispielsweise „alle drei Knöpfe für zwei Sekunden gedrückt halten“ möglich.

Alle Treiber wurden implementiert und zur Ansteuerung der Zusatzplatine herangezogen. Damit konnte die softwareseitige Integration erfolgreich abgeschlossen werden.

7.2 PbLL-Services

Die softwareseitige Unterstützung der neu hinzugekommenen Hardwarekomponenten war allerdings nur die Basis zur Entwicklung der eigentlichen Anwendungslogik. Das Display, die RGB-LEDs, der interne Buzzer sowie die Taster mussten schließlich so angesteuert werden, dass aus dem Knoten wahlweise ein Fachanzeigeknoten, ein Regalknoten oder ein Kommissioniererknoten wird. Die hierzu notwenige „Geschäftslogik“ wurde für das s-net®-Ökosystem in Form so genannter „Services“ implementiert. Diese Services und deren Kombinationen sind für jeden Knotentyp abweichend, was an den unterschiedlichen Aufgaben eines jeden Knotentyps liegt. Daher lohnt sich eine Betrachtung der einzelnen Knotentypen.

7.2.1 Fachanzeigeknoten

Die nachfolgende Abbildung gibt einen kurzen Überblick über den Aufbau eines Fachanzeigeknotens. Es existiert ein Display, über welches, abhängig vom jeweiligen Modus, Informationen wie Bestand oder Entnahmemenge angezeigt werden können. Rechts daneben befinden sich drei RGB-LEDs, über welche dem Kommissionierer signalisiert werden kann, dass ein Pickauftrag vorliegt. Gleichzeitig werden die LEDs dazu benutzt dem Kommissionierer zu signalisieren, in welchem Modus sich der Knoten derzeit befindet. Zum Justieren des Bestandes oder der Entnahmemenge sowie zur Auswahl eines Pickauftrags (falls mehrere vorliegen) existieren ein Plus- und ein Minus-Knopf. Der Quittierungsknopf wird benutzt um Justierungen zu bestätigen.

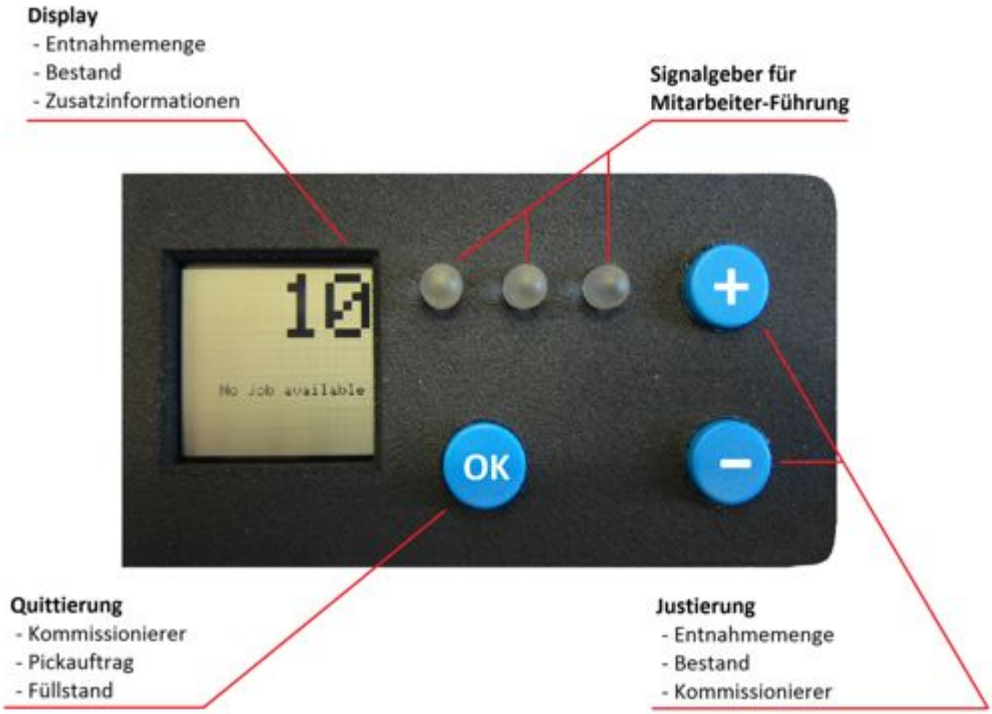


Abbildung 19: Fachanzeigenknoten für das Pick-by-Local-Light System

7.2.1.1 Tastenkombinationen Fachanzeigeknoten

Alle vom „Fachanzeigeservice“ interpretierten Tastenkombinationen sind in Tabelle 6 dargestellt. Sie können wahlweise mit mehreren Fingern eingegeben werden oder auch mit nur einem Finger, indem man „zügig“ nacheinander die jeweiligen Tasten einer Kombination drückt und die letzte Taste für die angegebene Dauer hält. Dies dient dazu, die Bedienung mit einer Hand zu erleichtern. Um nicht fälschlicherweise eine Tastenkombination einzugeben, ist es jedoch notwendig, zwischen einfachen Eingaben ca. 0,5 Sekunden zu warten.

7.3 Name	zu drückende Kombination	7.4 Dauer	7.5 Funktion
7.6 Quittierung	7.7 **Quittierung**	7.8 1 s	7.9 bestätigt die Eingabe
7.10 +	„**+**“	7.11 -	7.12 erhöht den angezeigten Wert oder wechselt zu anderem Auftrag
7.13 -	„**-**“	7.14 -	7.15 reduziert den angezeigten Wert oder wechselt zu anderem Auftrag
7.16 Cancel	7.17 **Quittierung** „**+**“	7.18 2 s	7.19 bricht den derzeitigen Modus ab und kehrt in den „Mehrere Aufträge verfügbar“ Modus zurück.
7.20 Emergency	7.21 **Quittierung** 7.22 „**-**“	7.23 2 s	7.24 wechselt zu „Kein Auftrag verfügbar“ (auch wenn derzeit Aufträge verfügbar sind), um den Bestand abändern zu können.
7.25 On/Off	7.26 **Quittierung** „**+**“ „**-**“	7.27 4 s	7.28 schaltet den Knoten aus oder an.

Tabelle 7: Tastenkombinationen der Fachanzeigenknoten

7.28.1.1 Modus: „Kein Auftrag verfügbar“

Bedingung: Solange kein Auftrag an der Fachanzeige verfügbar ist, befindet sich der Knoten automatisch in diesem Modus. Außerdem kehrt er nach Beenden des letzten verfügbaren Auftrags automatisch in diesen Modus zurück.

Zweck: Dieser Modus dient dazu den derzeitigen Füllstand anzuzeigen. Geschieht jedoch innerhalb von 40 Sekunden keine Interaktion mit dem Knoten, so schaltet sich aus Energiespargründen das Display ab. Es reaktiviert sich automatisch, sobald ein beliebiger Knopf gedrückt wird oder ein Auftrag eintrifft.

Möglichkeiten: In diesem Modus hat der Kommissionierer die Möglichkeit, den Füllstand mit Hilfe der „+“ und „-“ Tasten zu ändern und ihn mit Hilfe der Quittierungstaste zu speichern.

Besonderheit: Dieser Modus ist zusätzlich (falls ein Auftrag vorliegt und der Füllstand trotzdem geändert werden soll) über die „Emergency“ Tastenkombination erreichbar. Dieser Zustand wird nur verlassen, wenn er über die „Cancel“ Tastenkombination oder eine Bestätigung des Füllstands beendet wird.

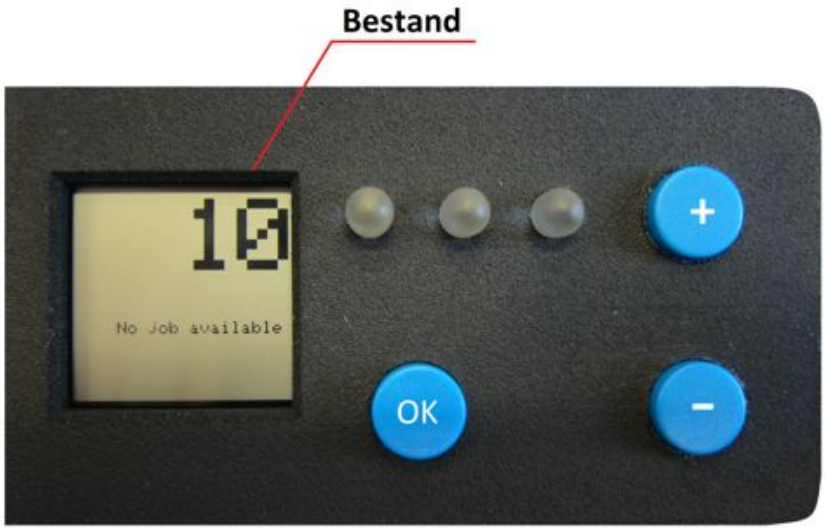


Abbildung 20: Fachanzeigeknoten im Zustand „Kein Auftrag verfügbar“

7.28.1.2 Modus: „Mehrere Aufträge verfügbar“

Bedingung: Die Fachanzeige befindet sich in diesem Zustand, wenn mehr als ein Pickauftrag an der Anzeige verfügbar ist.

Zweck: Dieser Modus dient dem Zweck, den zuständigen Kommissionierern zu signalisieren, dass an diesem Fach ein Auftrag für sie vorliegt. Hierzu iteriert der Knoten im 2-Sekunden-Takt über die verfügbaren Aufträge. Während dieser zwei Sekunden blinkt die **linke** LED kurz in der Farbe des für den Auftrag zuständigen Kommissionierers. Zusätzlich wird die Entnahmemenge angezeigt.

Möglichkeiten: Der Zustand wird sofort verlassen, sobald eine Interaktion durch den Kommissionierer geschieht. Es wird dabei in den Zustand „Auftrag auswählen“ gewechselt.

Besonderheit: Liegen mehrere Aufträge vor und geschieht innerhalb von 15 Sekunden keine Interaktion mit dem Knoten, so kehrt der Knoten immer automatisch in diesen Modus zurück.

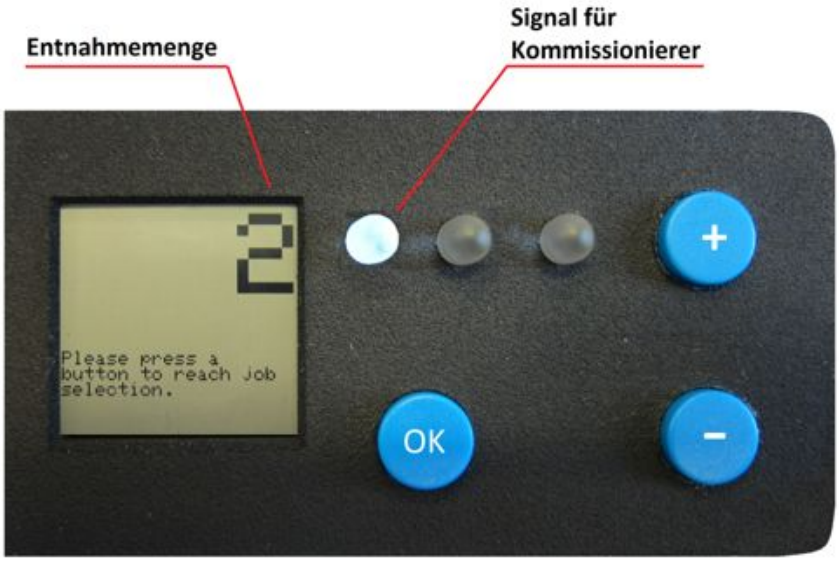


Abbildung 21: Fachanzeigeknoten im Zustand „Mehrere Aufträge verfügbar“

7.28.1.3 Modus: „Auftrag auswählen“

Bedingung: Die Fachanzeige befindet sich in diesem Zustand, wenn im „Mehrere Aufträge verfügbar“ Modus einer der drei Knöpfe gedrückt wurde.

Zweck: Dieser Modus dient dem Zweck, einen Pickauftrag zur Abarbeitung auszuwählen. Dies ist nötig, da sich die Fachanzeige nicht sicher sein kann welcher Kommissionierer gerade bedient.

Möglichkeiten: In diesem Zustand hat der Kommissionierer die Möglichkeit mit Hilfe der „+“ und „-“ Tasten einen Auftrag auszuwählen. Hierfür iteriert der Knoten über die verfügbaren Aufträge und zeigt die jeweilige Pickmenge auf dem Display an. Zusätzlich blinkt die **mittlere** LED in der Farbe des jeweils Zuständigen Kommissionierers. Ein Auftrag wird ausgewählt, indem die Quittierungstaste gedrückt wird.

Besonderheit: Geschieht innerhalb von 15 Sekunden keine Interaktion, so kehrt die Anzeige in den „Mehrere Aufträge verfügbar“ Zustand zurück.

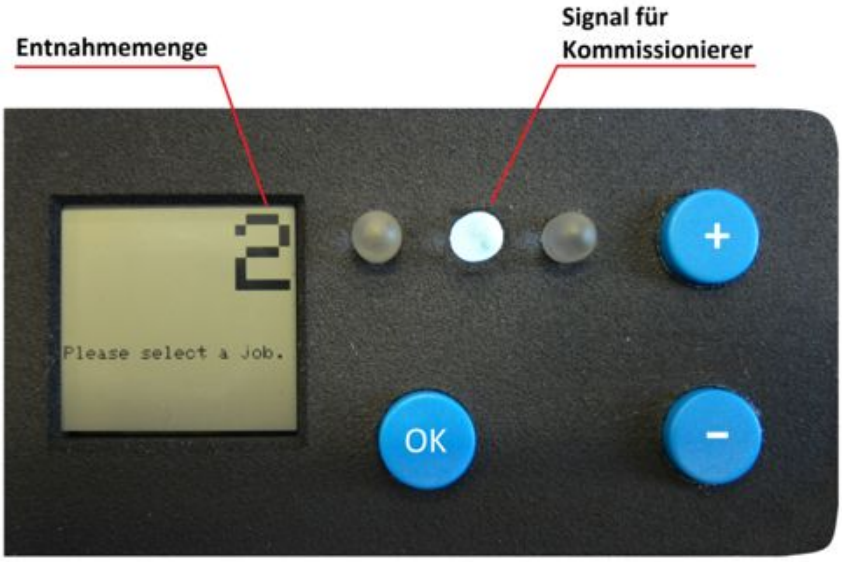


Abbildung 22: Fachanzeigeknoten im Zustand „Auftrag auswählen“

7.28.1.4 Modus: „Auftrag aktiv“

Bedingung: Die Fachanzeige befindet sich in diesem Zustand, wenn nur ein Pickauftrag vorliegt oder ein Pickauftrag explizit über den „Auftrag auswählen“ Zustand ausgewählt wurde.

Zweck: Dieser Modus dient dem Zweck, einen Auftrag Abzuarbeiten. Während sich die Anzeige in diesem Modus befindet, blinkt die **dritte** LED in der Farbe des zuständigen Kommissionierers.

Möglichkeiten: In diesem Zustand hat der Kommissionierer die Möglichkeit mit Hilfe der „+“ und „-“ Tasten“ die Entnahmemenge nach zu justieren, falls der Pickauftrag nicht stimmt. Mit Hilfe der Quittierungstaste wird die erfolgte Entnahme bestätigt. Der Auftrag wird daraufhin gelöscht und der Bestand angepasst.

Besonderheit: Geschieht innerhalb von 15 Sekunden keine Interaktion, so kehrt die Anzeige in den Zustand „Mehrere Aufträge verfügbar“ zurück bzw. setzt die eingestellte Entnahmemenge zurück auf die Auftragsmenge.

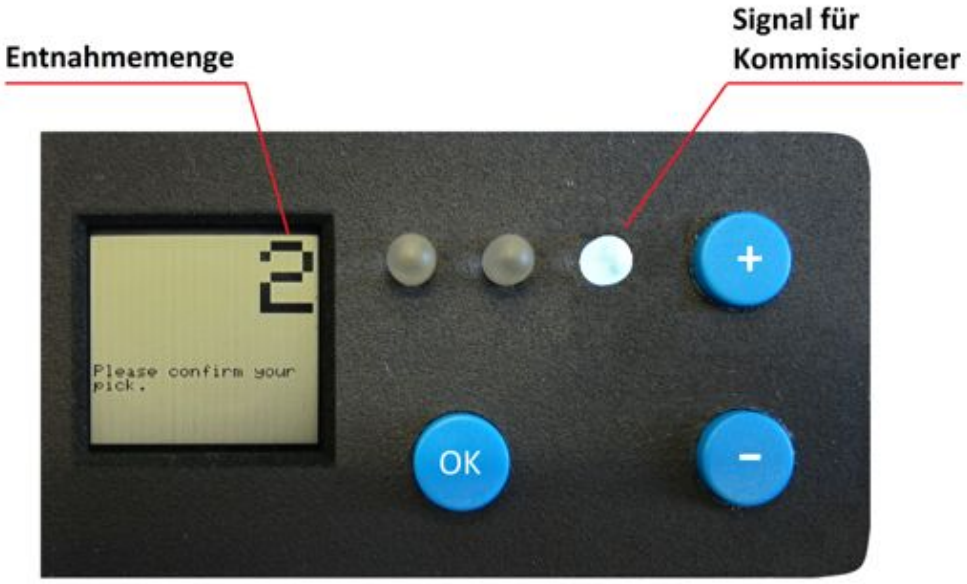


Abbildung 23: Fachanzeigeknoten im Zustand „Auftrag aktiv“

7.28.2 Regalknoten

Aus Hardwaresicht lassen sich Regalknoten als eine reduzierte Form eines Fachanzeigeknotens beschreiben: Sie besitzen kein Display, weisen aber weiterhin drei LEDs sowie drei Taster auf. Die Taster werden ausschließlich zum Ein- aus Ausschalten der Regalknoten benötigt und erfüllen darüber hinaus keinen weiteren Zweck. Die LEDs weisen die Kommissionierer durch Farbe und Blinkmuster in die jeweiligen Gassen, wo sie dann die ebenfalls in ihrer zugewiesenen Farbe blinkenden Fachanzeigeknoten vorfinden.

Aus Sicht von s-net® besteht allerdings ein signifikanter Unterschied zwischen Fachanzeigeknoten und Regalknoten. Fachanzeigeknoten stellen so genannte „Endknoten“ dar und sind damit „Blätter“ in der Baumtopologie von s-net®. Regalknoten hingegen sind als „Routerknoten“ konfiguriert. Im Gegensatz zu Endknoten können Routerknoten eigene „Kindknoten“ akzeptieren und damit die Ausdehnung des Multi-Hop-Netzes vergrößern. Idealerweise vernetzen sich alle Fachanzeigen eines Regals auch auf die Regalknoten dieses Regals. Die regalknoten spannen damit eine Art „Rückgrat“ auf, an welches die Fachanzeigeknoten sich frei einhängen können.

Eine weitere Aufgabe der Regalknoten besteht in ihrer Rolle als „Lokalisierungsanker“. Sie werden einmalig ortsfest installiert und mit ihrer eingemessenen Position in Form einer Koordinate parametriert. Sie kennen also ihre eigene Position. Mit dieser Information wird es in weiteren Schritten schlussendlich ermöglicht, dass sich mobile Kommissioniererknoten anhand dieser

Lokalisierungsanker selbst lokalisieren können. Der Algorithmus hierzu wird als „Weighted Centroid Localization“ (WCL) bezeichnet. Bei WCL sendet jeder Lokalisierungsanker periodisch Nachrichten aus. In jeder dieser Nachrichten ist zudem die dem Lokalisierungsknoten bekannte Eigenposition eingebettet. Einem mobilen Knoten, welcher mehrere Lokalisierungsknoten hört, erlaubt dies die Schätzung seiner eigenen Position. Er gewichtet dazu die bekannte Position eines jeden Lokalisierungsankers mit dessen aktueller Signalstärke und erhält damit einen Schätzwert seiner Eigenposition.

Diese geschätzte Eigenposition ist die Basis für das ortsabhängige Knotenverhalten in diesem Projekt, welches schlussendlich den Zusatz „Local“ im Namen „Pick-by-Local-Light“ rechtfertigt. Allerdings zeigte sich im Laufe des Projektes, dass diese Form der Lokalisierung zu träge ist. Die Kommissionierer bewegen sich schneller durch die Gassen als der Algorithmus nachführen kann, womit sich die Regalknoten erst viel zu spät aktivieren. Daher wurden für die Feldtests die Lokalisierungsfunktionen durch einen einfacheren, aber schnelleren „Regal-Detektionsservice“ ersetzt. Da dieser Teil des Kommissionierknotens ist, wird er im folgenden Abschnitt beschrieben.

7.28.3 Kommissioniererknoten

Die Kommissioniererknoten, welche von den Kommissionierern am Körper getragen werden, weist keinerlei Bedienschnittstelle zum Kommissionierer auf: Es gibt kein Display, keine LEDs und keine Taster. Aus Sicht von s-net® handelt es sich bei den Kommissioniererknoten um Endknoten (ähnlich der Fachanzeigen), welche sich mit den Regalknoten eines Regals assoziieren.

Die einzige Aufgabe der Kommissioniererknoten besteht in der Schaffung eines Positionsbewusstseins. Hierzu führt jeder Kommissioniererknoten eine andauernde Schätzung der Eigenposition anhand der ihn umgebenden Lokalisierungsanker (Regalknoten) durch. Diese Positionsschätzungen werden zyklisch an das Backend versendet, wo sie dann als Basis für die ortsabhängige Aktivierung von Fachanzeigeknoten dienen.

Statt einer auf WCL-basierenden Lokalisierung musste im Projektverlauf ein alternatives Lokalisierungsverfahren entwickelt werden. Es zeigte sich, dass WCL zu träge ist, um einen Kommissionierer schnell genug auf seinem Weg durch die Regalgassen zu folgen. Als Alternative werden Kommissioniererknoten pro Auftrag von nun an mit einer Liste an relevanten Regalknoten konfiguriert. Diese Regalknoten wählt man so aus, dass sie sich nahe der gewünschten Fachanzeigen des aktuellen Pickauftrages befinden. Da s-net®-Knoten stets über ein aktuelles Nachbarschaftsbewusstsein verfügen, erfolgt die Filterung nach Nachbarschaft hinsichtlich dieser Liste augenblicklich. Sobald einer der interessanten Regalknoten entdeckt wird, sich der

Kommissionierer also auf seine Zielgasse zubewegt, wird eine Annäherungsmeldung an das Backend verschickt. Das Backend kann dann sofort die entsprechenden Aufträge an die nahen Fachanzeigen senden, idealerweise noch bevor der Kommissionierer in die Gasse einbiegt.

7.29 Konfiguration des Netzes

Beim Einsatz von Sensornetzen ist eine korrekte Dimensionierung der Systemparameter an das jeweils gegebene Szenario entscheidend für die Eignung. Gegenüber beispielsweise Multimedia-fähigen Netzen wie WLAN sind Sensornetztechnologien in der Theorie hochgradig flexibel und anpassbar. Das Ziel besteht darin, den Zielkonflikt zwischen Energieverbrauch, Datenrate und Latenz so auszutarieren, dass man ein hochgradig spezialisiertes aber passgenaues System für einen aktuellen Anwendungsfall erhält.

Bei der Analyse der geplanten Einsatzszenarien von Pick-by-Local-Light fiel auf, dass es lohnenswert hinsichtlich der Dimensionierung ist, diese in Gruppen aufzuteilen. Bezüglich Pick-by-Local-Light basiert diese Unterscheidung auf der Art der zu kommissionierenden Artikel. In der Kommissionierung werden die so genannten „Schnelldreher“ von den „Mitteldrehern“ und den „Langsamdrehern“ unterschieden. Als Schnelldreher werden Artikel mit hoher Umschlagshäufigkeit bezeichnet. Schnelldreher sind damit das Gegenteil von Ladenhütern, welche als Langsamdreher bezeichnet werden. Während Schnelldreher idealerweise nahe beieinander gelagert werden, um die Wege der Kommissionierer kurz zu halten, sind Langsamdreher tendenziell über weitere Laufwege in unzugänglicheren Arealen größerer Lagerhallen anzutreffen. Daraus ergeben sich bei Schnelldrehern durchgehend höhere Anforderungen an die Kommunikation als bei Langsamdrehern. Durch die kurzen Wege sind die Latenzanforderungen härter und durch die schnellere Abarbeitung müssen mehr Aufträge pro Zeit übertragen werden. Gemäß des skizzierten Zielkonfliktes bei der Dimensionierung ist somit bei Schnelldrehern mit einem erhöhten Energieverbrauch zu rechnen, was aber auf Grund des vergleichsweise kleinen Areals mit einer begrenzten Artikelmenge als beherrschbar eingestuft wird. Bei Langsamdrehern werden jedoch weitaus größere Artikelzahlen verwaltet, welche sich zudem auf ein größeres Areal verteilen. Daraus folgt, dass es bei Langsamdrehern wichtig ist, die geringeren Anforderungen an Latenz und Datenrate zu nutzen, um die Lebensdauer der Batterien zu erhöhen.

Für Schnelldreher, Mitteldreher und Langsamdreher wurden entsprechend spezialisierte Konfigurationsparameter für s-net® hergeleitet und validiert. Für den Feldtest wurde schließlich das Profil der „Schnelldreher“ gewählt.

7.30 Stabilität

Beim Test des Systems wurden starke Verzögerungen hinsichtlich der Datenübertragung beobachtet. Die Verzögerungen traten insbesondere dann auf, wenn seitens des Backends eine größere Anzahl an Aufträgen an das Sensornetz übergeben wurde. Statt einer zügigen Übertragung der Aufträge an die Fachanzeigeknoten kam es hier zu signifikanten Verzögerungen über mehrere Sekunden hinweg, welche zunächst nicht erklärt werden konnten. Nach einer Analyse zeigte sich, dass es sich hierbei um eine Verkettung mehrerer isolierter Einzelprobleme handelt, welche im Folgenden aufgelistet werden:

- Mangelnde Rückstaufestigkeit:

  Die s-net®-Technologie ist aktuell nicht rückstaufest. Dieses Defizit tritt dann zu Tage, wenn von außen ein größerer „Burst“ aus mehreren Nachrichten an das Sensornetz übergeben wird. Da die Sensorknoten nur über begrenzten Speicherplatz verfügen und das Funknetz vergleichsweise langsam ist, werden die zuerst eintreffenden Nachrichten angenommen und gespeichert, während später eintreffende Nachrichten des Bursts verworfen werden. Dieser Totalverlust von Nachrichten führt zu Ende-zu-Ende-Timeouts mit dann stark verzögerten Neuübertragungen.

- Kollision von Bestätigungen im Uplink:

  Ein Sensornetz bei Pick-by-Local-Light zeichnet sich durch wenige Routerknoten (Regalknoten) und sehr viele Endknoten (Fachanzeigen) aus. Die hierbei entstehende Baumtopologie ist tendenziell flach aber sehr breit, wobei zehn Fachanzeigeknoten pro Regalknoten erlaubt werden. In einer solchen Konstellation zeigt sich, dass s-net® ursprünglich als klassisches Datensammelnetz konzipiert wurde, da es bei der PbLL-typischen „Hereinleitung“ von Daten zu massiven Kollisionen und damit Verlust von Bestätigungsnachrichten kommt: Wenn ein Routerknoten seinen Kindknoten eine Nachricht schickt, muss jeder dieser Kindknoten die Nachricht bestätigen. Die Übertragung dieser Bestätigungsnachrichten erfolgt jedoch kollisions- und damit verlustbehaftet (ein Elternknoten ist der zentrale Flaschenhals für alle seine Kindknoten). Sobald dem Elternknoten nur eine einzige Bestätigungsnachricht fehlt muss dieser die Nachricht erneut versenden. Dies muss zudem so oft geschehen, bis sich der Elternknoten sicher sein kann, dass jeder seiner Kindknoten die fragliche Nachricht erhalten hat. Extrem problematisch ist

an dieser Stelle, dass Kindknoten nicht ableiten können warum der Elternknoten gerade eine bestimmte Nachricht wiederholt; Er muss immer davon ausgehen, dass *seine* Bestätigungsnachricht verloren ging und bestätigt damit den Empfang erneut. In der Folge wird jede Nachricht und jede Wiederholung dieser Nachricht immer von allen Kindknoten bestätigt. Dies führt zu massiven Kollisionen und Übertragungswiederholungen, und solche Staus dauern viele Sekunden an, bis sich eine solche „Lawine“ vollständig abgebaut hat. In dieser Zeit tritt insbesondere das eben erklärte Rückstauproblem zu Tage, wobei dann tatsächlich auch Daten verloren gehen und nur Ende-zu-Ende erneut übertragen werden können.

Beide Probleme konnten durch eine kurzfristig improvisierte Lösung soweit abgemildert werden, dass der Feldtest stattfinden konnte. Für einen produktiven Einsatz sollten aber eine Staukontrolle und eine effizientere Handhabung von Bestätigungen für s-net® implementiert werden. Idealerweise erweitert man s-net® um Mechanismen zur Staukontrolle, sodass es zu keinen Paketverlusten bei Bursts von Nachrichten mehr kommen kann. Das skizzierte Kollissionsproblem im Uplink ist durch eine Überarbeitung der Punkt-zu-Punkt-Sicherungssysteme von s-net® lösbar, was jedoch nicht mehr im Rahmen dieses Projekts durchgeführt werden konnte.

8 Anwendungsprogrammierung

Im Forschungsvorhaben sollen Informationen aus dem Warehouse Management System (WMS) auf die Sensorknotenhardware eingespeist werden. Zur Schaffung von Transparenz über den Status der Aufträge müssen Interaktionen des Kommissionierers außerdem an ein übergeordnetes Management-System rückgemeldet werden. Um dies zu realisieren, wird eine Middleware-Plattform benötigt. Diese muss mit der Sensornetz-Hardware ebenso wie mit einer übergeordneten Softwareplattform kommunizieren können. Neben Integrationskomponenten muss diese Middleware über eine Anwendungsebene verfügen, auf der Nutzer des Systems die Status überwachen und Einstellungen des Gesamtsystems vornehmen können. Im Folgenden wird diese Software Integrations- und Anwendungsplattform genannt (IAP).

Die Pick-by-Local-Light-IAP dient demnach als Kommunikationsbrücke zwischen Sensornetzhardware und WMS. Über die Pick-by-Local-Light-IAP werden Informationen zu Aufträgen und Lagerorten der jeweiligen Güter übertragen. Des Weiteren werden darüber Spezifikationen des s-net®-Protokolls festgelegt und damit an die Anforderungen des

anwendungsindividuellen Lagerumfelds angepasst. Über eine Anwenderschnittstelle der Pick-by-Local-Light-IAP können außerdem Informationen über den Systemzustand erfasst werden. Im Kontextdiagramm in Abbildung 24 ist dies dargestellt.

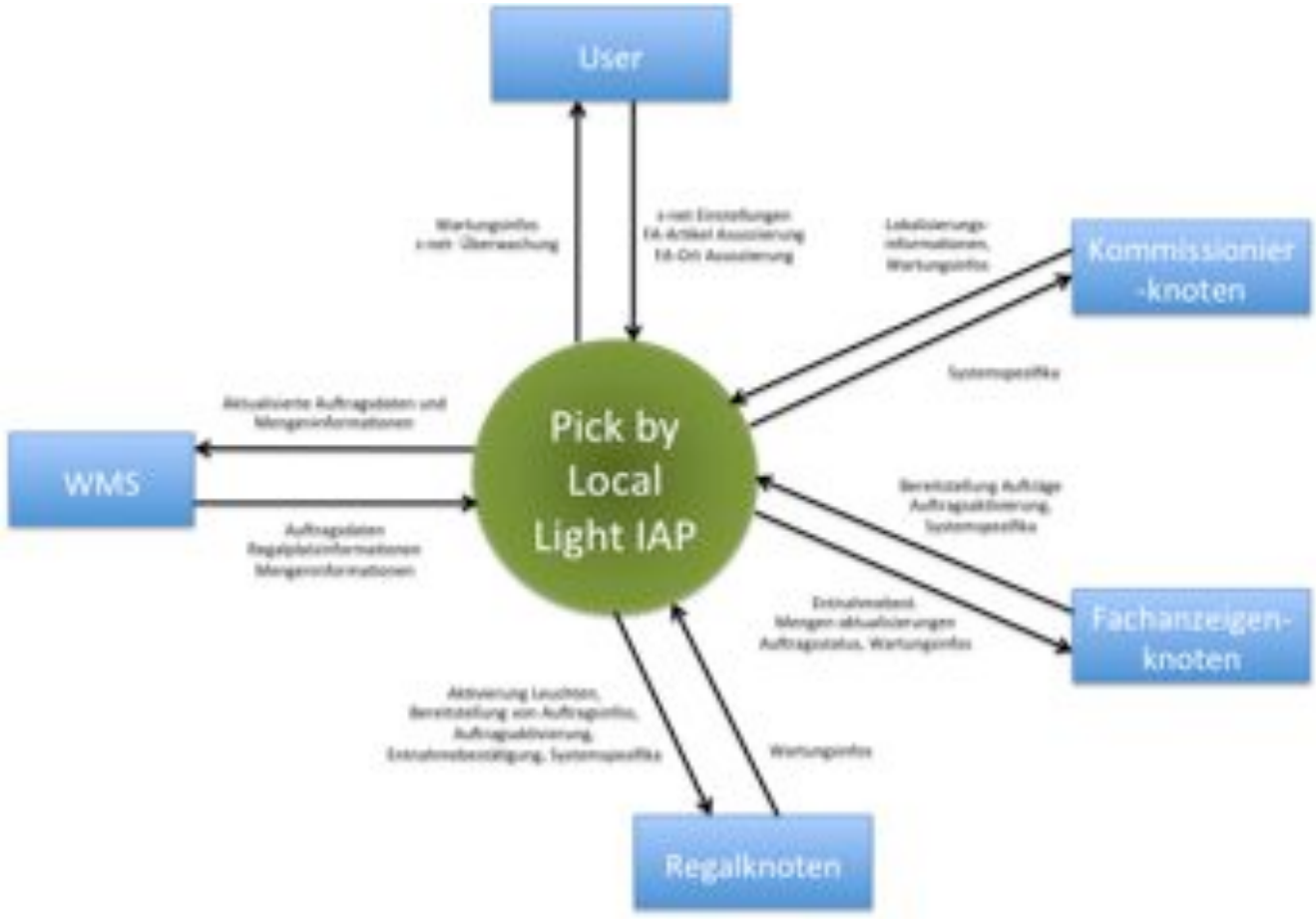


Abbildung 24: Kontextdiagramm Pick by Local Light IAP

8.1 Softwarearchitektur

8.1.1 Architektur des Gesamtsystems

Um die Kommunikation von der Integrations- und Anwendungsplattform mit dem Sensornetz zu gewährleisten, müssen sowohl physische als auch software-seitige Schnittstellen umgesetzt werden. Die Kommunikation erfolgt über ein Gateway, an das mittels USB-Schnittstelle ein oder

mehrere Masterknoten angeschlossen werden können. Die Masterknoten ermöglichen die Kommunikation mit jeweils einem Sensornetz und bilden mit dem Gateway die physische Schnittstelle zwischen Sensornetz und IAP.

Auf Seiten des Sensornetzes findet die Kommunikation zwischen Masterknoten und Sensornetz über die Regalknoten statt. Diese bilden somit die Kanten des Netzes und leiten Informationen an die hierarchisch-niedrigeren Fachanzeigenknoten weiter. Das Netz überprüft des Weiteren, ob das Funken von Kommissioniererknoten bzw. mobilen Sensorknoten „gehört“ werden kann. Je nachdem, welche Knoten identifiziert werden konnten, werden dann Kommissionierer durch die IAP in den jeweiligen Zonen an- oder abgemeldet. Orientiert man sich Abbildung 25, so findet die Kommunikation des Sensornetzes mit Hilfe des Fraunhofer s-net®-Protokolls statt. Die Kommunikation der Pick-by-Local-Light-IAP mit dem Warehouse-Management-System findet mittels einer JSON/XML-Schnittstelle statt. Die Pick-by-Local-Light-IAP wurde mit Hilfe von Java Enterprise Edition umgesetzt. Sie besteht aus einer Integrationskomponente und einer Anwendungskomponente. Die Anwendungskomponente ist in der Abbildung 25 als Wartungssoftware dargestellt. Um eine universelle Anwendbarkeit zu gewährleisten, findet die Interaktion mit dem Nutzer über eine browserbasierte Web-Schnittstelle statt.

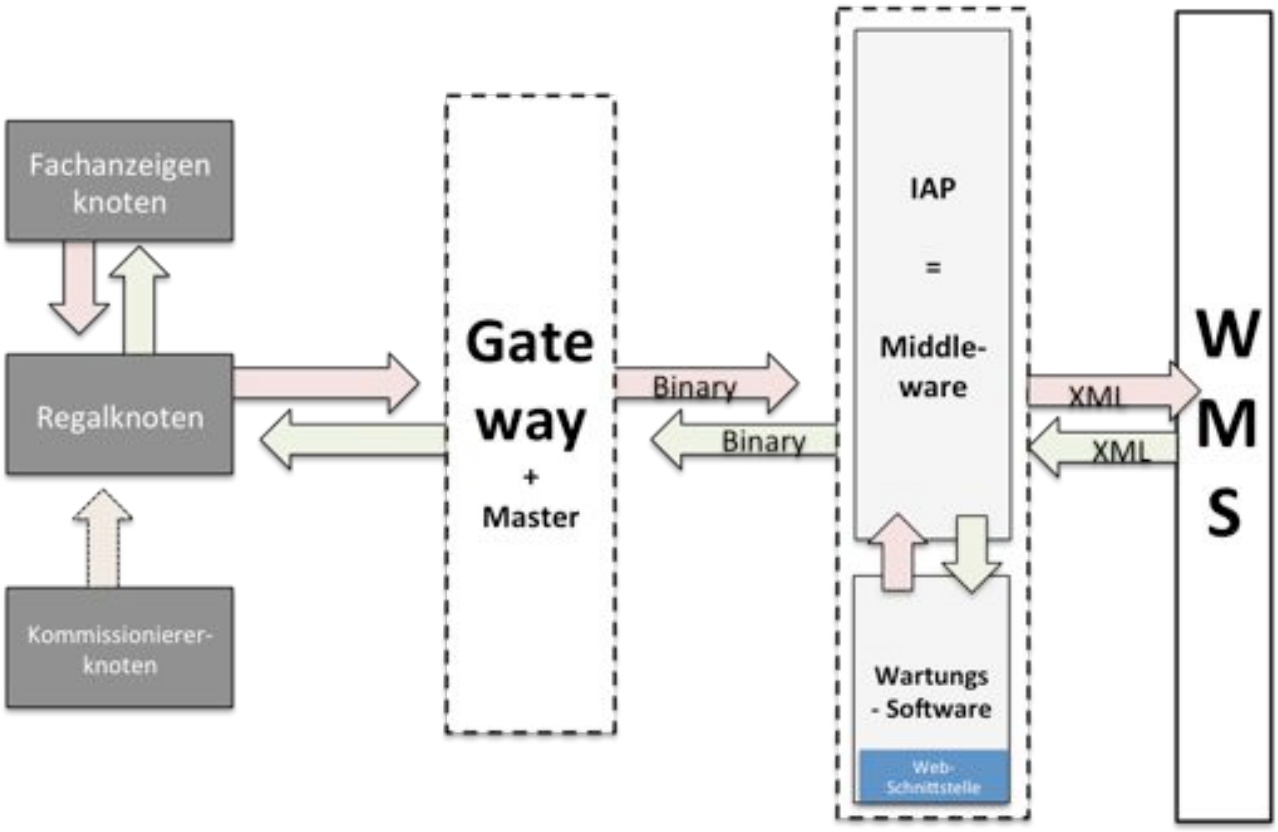


Abbildung 25: Gesamtarchitektur des Vorhabens

Bei der Umsetzung der hier vorgeschlagenen Architektur der Pick-by-Local-Light-IAP wurden viele Komponenten neu umgesetzt, allerdings wurden auch vorhandene Bausteine der IAP integriert und angepasst. Dabei handelt es sich im Speziellen um die Module Maintenance Services, Visualization Services (beide für Wartungsaufgaben) sowie die Module Filtering & Enhancement Services und Event Management Services (beide für die Integrationsebene). Um Informationen speichern zu können, ist außerdem eine Datenbank Bestandteil der Integrationskomponente. Auf dieser Datenbank befinden sich ein Logbuch, Auftragsinformationen, welche vorgepuffert wurden und Informationen zu Einstellungen des Gesamtsystems.

8.1.2 Architektur der Webschnittstelle

Die Webschnittstelle ist die Ein- und Ausgabeseite der IAP bei Pick-by-Local-Light und ermöglicht es dem Nutzer, mit dem technischen Gesamtsystem zu interagieren. Sie ist ein Bestandteil der IAP und stellt im klassischen Anwendungsfall die Schnittstelle zum Systemadministrator des Logistikprozesses dar. In der folgenden Abbildung 26 wird der funktionale Aufbau der Webschnittstelle skizziert:

Abbildung 26: Elemente der Webschnittstelle

Die grafische Benutzeroberfläche dient zum einen der Einstellung und Verwaltung unterschiedlicher Stammdaten, die für den Betrieb des Gesamtsystems notwendig sind. Es kann beispielsweise das Lagerumfeld schematisch abgebildet werden. Zum anderen dient die Benutzeroberfläche zur Darstellung wichtiger Informationen. Beispielsweise kann man sich auflisten lassen, welche Aufträge welchem Kommissionierer zugeordnet sind und wie der aktuelle Bearbeitungsstatus einzelner Aufträge ist.

In den Stammdaten werden unter anderem die aktuell zur Verfügung stehenden Kommissionierer verwaltet. Den jeweiligen Kommissionierern kann ein Kommissionierknoten zur Identifizierung im Sensornetz und eine Farbe für das Signalgebungsmuster an den Fachanzeigen bzw. den Regalknoten zugewiesen werden.

Zur software-seitigen Abbildung des Lagerumfelds wurde eine hierarchische Datenstruktur gewählt, um größtmögliche Flexibilität zu gewährleisten. Dadurch ist es möglich mehrere Standorte und deren spezifisches Lagerumfeld zu definieren, zum Beispiel verschiedene Lager,

Kommissionierbereiche, Regale und Entnahmefächer. Des Weiteren ist es möglich, die Sensornetz-Hardware mit realweltlichen Objekten zu verknüpfen, d.h. Fachanzeigen mit Entnahmefächern, Regale/Gassen mit Regal-Knoten und Lager oder Kommissionierbereiche mit Sensornetz-Gateways zu verbinden. Durch die hierarchische Struktur und die Verknüpfung mit der Sensornetz-Hardware ist es somit möglich, einzelne Fachanzeigen über das Gateway mit Aufträgen zu bestücken und gleichzeitig die zugehörigen Regalknoten zur besseren Orientierung der Kommissionierer zu aktivieren.

Die Definition des Lagerumfeldes stellt die Basis dar für die weitere Konfiguration und Funktionalität des Gesamtsystems innerhalb der Pick-by-Local-Light-IAP. Mit der Konfiguration der Entnahmefächer war es möglich, deren Bestückung über spezielle Schnittstellen zum WMS abzufragen. Im Falle der Probandenversuche wurde von der TU München eine SOAP-Schnittstelle zum WMS Prolag-World® der CIM GmbH entwickelt. Über diese Schnittstelle war es dann möglich, initial bzw. in regelmäßigen Abständen die Artikelinformationen zu den Entnahmefächern abzufragen, also welcher Artikel in welcher Anzahl in einem Entnahmefach enthalten ist. Die Mengeninformation über einen Artikel in einem Fach wird auch durch die IAP in eine s-net®-kompatible Nachricht gewandelt und an die Fachanzeige gesendet, um die Inventurfunktion des Gesamtsystems zu ermöglichen. Diese Information wird auf dem Display der entsprechenden Fachanzeige dargestellt.

Im umgekehrten Fall ist es auch möglich, die Mengeninformation an der Fachanzeige mit Hilfe der entsprechenden Knöpfe anzupassen und diese Aktualisierung über die IAP an das WMS über eine Methode der SOAP-Schnittstelle zu übertragen.

Eine weitere Funktionalität, die über die SOAP-Schnittstelle zur Verfügung gestellt wird, ist die Möglichkeit, in regelmäßigen Abständen oder bei Bedarf Kommissionieraufträge abzufragen. Es wird dann eine Liste von Kommissionieraufträgen zurückgeliefert, die jeweils eine Auftragsnummer und eine variable Liste von Auftragspositionen enthalten. Die einzelnen Auftragspositionen legen fest, welche Artikel in welcher Anzahl aus einem Entnahmefach genommen werden sollen. Auch hier besteht die Aufgabe der IAP darin, die einzelnen Positionen in eine snet-spezifische Nachricht zu übersetzen und diese an die einzelnen Fachanzeigen zu versenden. Bevor die Nachrichten jedoch versendet werden, wird dem Auftrag ein verfügbarer Kommissionierer zugeordnet und die ihm zugewiesene Farbe für das Blinkmuster an der Fachanzeige mit in die einzelnen Nachrichten codiert. An den Fachanzeigen leuchten die LED dann in der Farbe des verantwortlichen Kommissionierers und es wird die zu entnehmende Menge am Display der Fachanzeige angezeigt. Mit Hilfe der Knöpfe an der Fachanzeige kann der Kommissionierer dann die Entnahme bestätigen und gegebenenfalls noch die entnommene Menge anpassen. Über das Gateway erhält

die IAP dann eine spezifische Nachricht aus dem Sensornetzwerk, welche dann übersetzt und über die SOAP-Schnittstelle an das WMS weitergeleitet wird. Sobald die IAP feststellt, dass ein Auftrag fertiggestellt wurde, also alle Positionen bestätigt wurden, wird an die Fachanzeige der letzten Position eine zusätzliche Nachricht versendet, die dem Kommissionierer mit einem akustischen Signal die Fertigstellung des Auftrags signalisiert.

Für die Feldversuche im Logistikzentrum der B/S/H/ Hausgeräte GmbH in Fürth bedurfte es einer Anpassung der Pick-by-Local-Light-IAP. Die Notwendigkeit der Anpassung wird in Kapitel 10 näher erläutert. Aus software-technischer Sicht wurde hierfür die Verbindung zum WMS Prolag-World® mittels Webservice durch eine direkte Verbindung zu einer Oracle-Datenbank ersetzt. Des Weiteren wurde ein zusätzliches Softwaremodul implementiert, welches die Auftragsbearbeitung innerhalb der IAP mithilfe eines mobilen Barcode-Scanners initiiert. Die Auftragsvergabe erfolgt hier durch das Scannen von zwei Barcodes – ein Barcode, der auf einem Laufzettel für einen Auftrag aufgedruckt ist, und einem weiteren, der den Bearbeiter identifiziert. Nachdem beide Barcodes erfolgreich gescannt und verifiziert wurden, wird eine Abfrage in der Oracle-Datenbank ausgelöst, um die Auftragsdetails (Artikelinformationen, Mengen, Entnahmeorte, …) zu erhalten. Mit Hilfe dieser Auftragsdetails werden dann, wie oben beschrieben, Aufträge innerhalb der IAP erzeugt und der entsprechende Mitarbeiter zugewiesen. Die Interaktion mit dem Sensornetzwerk erfolgt analog wie oben beschrieben. Eine Aktualisierung der Informationen innerhalb des WMS, nachdem ein Auftrag abgearbeitet wurde, findet allerdings nicht statt.

8.2 Softwarekomponenten

Das im Vorhaben entwickelte Software-System – die Pick-by-Local-Light-IAP – liegt auf einem physischen Server und besteht aus zwei Hauptkomponenten:

Integrations- und Anwendungskomponente:

Diese fungiert zur Übertragung und Strukturierung (Business Logic) von Daten aus dem WMS an das Gateway des Sensornetzwerks und umgekehrt. Im Nachfolgenden wird diese Komponente IAP genannt.

Die grafische Benutzeroberfläche (GUI):

Die Wartungssoftware stellt dem Benutzer eine Web-Schnittstelle zur Verfügung, welche auf einem externen Desktop-Rechner aufgerufen werden kann (im Nachfolgenden Web-Schnittstelle genannt).

Ihre Funktionen sind die Ausgabe von Informationen über die Aufträge und eingesetzten Hardwarekomponenten und die Konfiguration sowie Installation des Gesamtsystems durch den Benutzer.

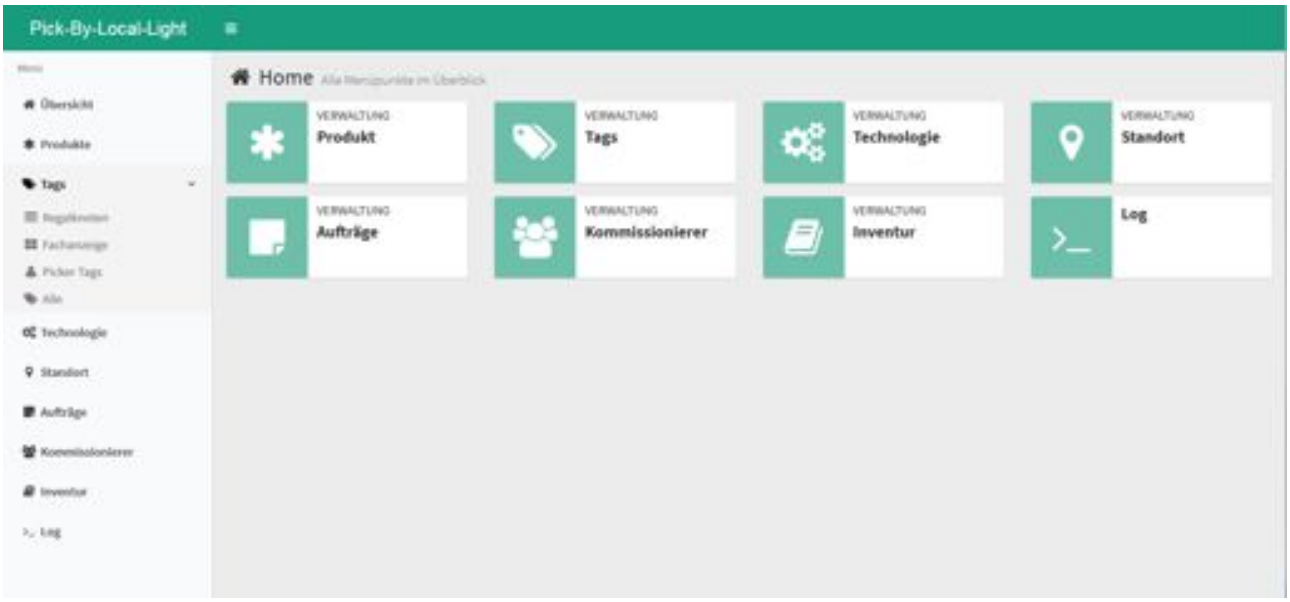


Abbildung 27 zeigt das Hauptmenü der Benutzeroberfläche des umgesetzten Demonstrators.

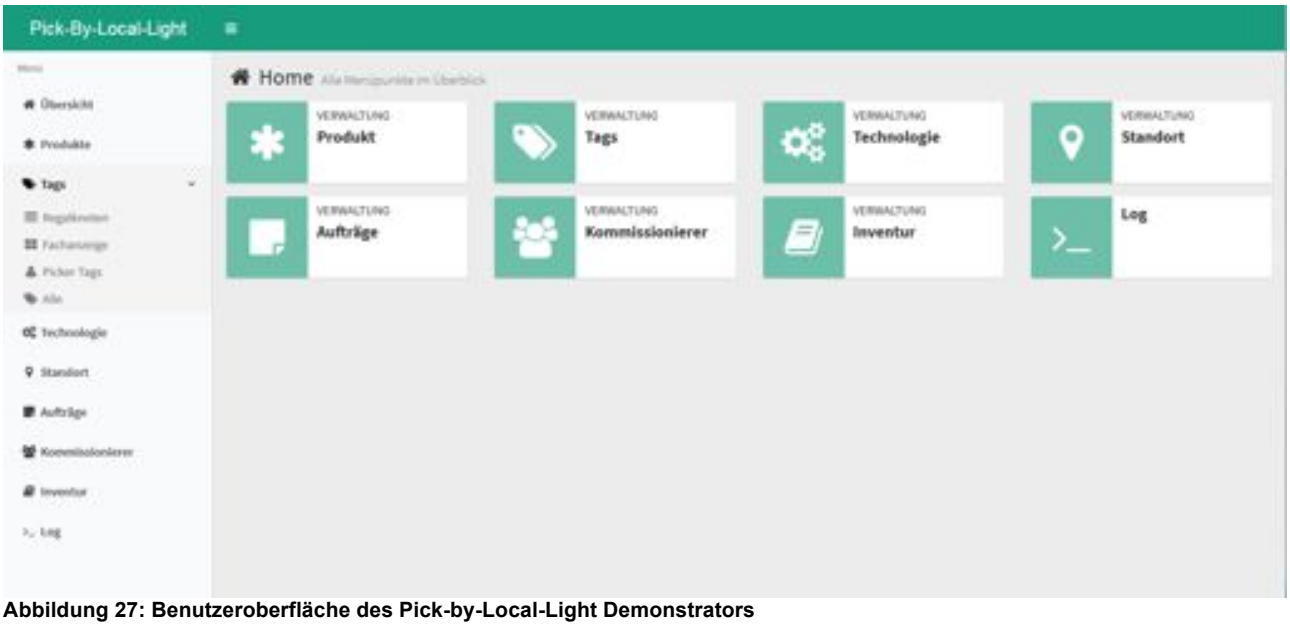


Abbildung 27: Benutzeroberfläche des Pick-by-Local-Light Demonstrators

8.3 Restriktionen, Umsetzung und Funktionen

Die software-seitigen Umsetzungen müssen mehrere Restriktionen beachten, um die Gesamtprojektziele nicht zu beeinträchtigen.

- Fokus auf Stabilität: Vorhandene Unzulänglichkeiten des s-net®-Kommunikationsprotokolls müssen durch die IAP ausgemerzt werden. Dies gilt insbesondere für die Robustheit der Datenübertragung. Es muss gewährleistet werden, dass alle Datenpakete ihr Ziel erreichen, sodass dem Kommissionierer keine Information verloren geht.
- Präventive Maßnahmen gegen Kollisionen von Paketen innerhalb des Sensornetzes: Maßnahmen wie beispielsweise das Versenden von Datenpaketen in das Sensornetz in getakteten Intervallen sollen eine „Überflutung“ des Netzes verhindern.
- Effizienz: Übertragene Daten sollten möglichst keine Redundanzen enthalten. Vor allem in das Sensornetz versendete Inhalte müssen speicher-sparend umgesetzt werden.

8.4 Schnittstellenspezifikationen des Systems

Die folgenden Schnittstellen beschreiben die grafische Aufbereitung der Abbildung 24: Kontextdiagramm Pick by Local Light IAP. Das WMS wird mittels JSON/XML-Schnittstelle angesprochen. Die Schnittstelle zur Sensornetzhardware überträgt Binärdaten mit HDLC an den Gateway. Zur besseren Verständlichkeit sind die Schnittstellen-Empfänger bzw. Versender im Folgenden nochmals auf die drei unterschiedlichen Knotentypen aufgeschlüsselt.

IAP-WMS Schnittstelle

Übertragungsrichtung	Was wird übertragen	Welche Informationen beinhaltet dies?
Von WMS an IAP	Auftragsdaten	Auftragsnummer, Artikel, Mengen, Entnahmeorte, Auftragsstatus
Von WMS an IAP	Mengeninformationen	Artikel, Ort, aktueller Bestand
Von IAP an WMS	Aktualisierung von Auftragsdaten	Auftragsnummer, Artikel, Mengen, Entnahmeorte, Auftragsstatus
Von IAP an WMS	Aktualisierung von Mengeninformationen	Artikel, Ort, aktueller Bestand

Auftragsdaten:

Vom WMS werden an die IAP Auftragsinformationen versendet. Diese umfassen die Nummer eines Auftrages samt der positionsspezifischen Informationen der zu entnehmenden Artikel, Entnahmeorte und Entnahmemengen. Der Auftragsstatus zeigt an, welche Aufträge offen sind und ob es sich dabei um hochpriorisierte Aufträge handelt.

Mengeninformationen:

Die Mengeninformationen ermöglichen es dem Pick-by-Local-Light-System die aktuellen Bestandszahlen auf den Sensorknoten anzuzeigen. Dafür werden Bestandsinformationen wie Artikel, Lagerort und Bestandsmenge vom WMS an die IAP übertragen.

Kommissioniererknoten-IAP Schnittstelle

Übertragungsrichtung	**Was wird übertragen**	**Welche Informationen beinhaltet dies?**
Von KK an IAP	Regalliste	ID KK, Liste an in der Nähe befindlichen Regalknoten

Regalliste:

Die Kommissioniererknoten oder mobilen Sensorknoten versenden Listen mit den Regalen, die von ihnen detektiert werden können, an die IAP. Diese Nachrichten bestehen neben den Listen auch noch aus der knotenindividuellen Identifikationsnummer des Knoten. Auf diese Weise kann festgestellt werden, wo sich die Knoten befinden. Dadurch können standortabhängige Funktionen für die unterschiedlichen Kommissionierer bereitgestellt werden.

Fachanzeige-IAP Schnittstelle

Übertragungsrichtung	**Was wird übertragen**	**Welche Informationen beinhaltet dies?**
Von FA an IAP	Entnahmebestätigung	ID FA, Auftragsnummer, Entnommene Menge
Von FA an IAP	Empfangsbestätigung Auftrag	ID FA, Auftragsnummer, Status
Von FA an IAP	Mengenaktualisierung	ID FA, aktueller Bestand

Von IAP an FA	Bereitstellung Auftrag	ID FA, Auftragsnummer, Entnahmemenge, RGB Wert
Von IAP an FA	Bereitstellung Menge	ID FA, aktueller Bestand
Von IAP an FA	Signalisierung Auftragsende	ID FA, Aktivierung Signal Auftragsende

Entnahmebestätigung:

Bestätigt der Kommissionierer die Entnahme eines Artikels per Knopfdruck an der Fachanzeige, so wird dies der IAP zurückgemeldet. Die Fachanzeige überträgt eine eindeutige ID, die zugehörige Auftragsnummer und die entnommene Menge.

Empfangsbestätigung Auftrag:

Empfängt die Fachanzeige einen Auftrag, so muss sie eine Empfangsbestätigung an die IAP zurückmelden. Dadurch wird gewährleistet, dass ein Auftrag alle notwendigen Fachanzeigen erreicht. Bekommt die IAP in einem definierten Intervall keine Antwort von einer Fachanzeige, so sendet sie erneut den Auftrag an die jeweilige Fachanzeige.

Mengenaktualisierung:

Wird die Menge eines Artikels an einer Fachanzeige angepasst, so meldet die Fachanzeige diese Mengenänderung samt ihrer ID zurück.

Bereitstellung Auftrag:

Die IAP sendet die Entnahmemenge samt Auftragsnummer und dem jeweiligen Kommissionierer zugeordneten RGB-Wert für die LED an die auftragsrelevante Fachanzeige.

Bereitstellung Menge:

Um einen Bestandswert bei den Fachanzeigen zu hinterlegen, sendet die IAP nach dem Start bzw. nach erfolgter Aktualisierung des Bestands diese Information an die relevante Fachanzeige.

Signalisierung Auftragsende

Nach der erfolgreichen Entnahme der letzten Position wird auf dem letzten Knoten ein Signalton ausgegeben, der dem Kommissionierer das Auftragsende signalisiert. Dafür überträgt die IAP die

knotenindividuelle ID der zu adressierenden Fachanzeige an das Sensornetz sowie den Befehl um den knoteneigenen Buzzer für eine Signaltonausgabe zu aktivieren.

Regalknoten-IAP Schnittstelle

Übertragungsrichtung	**Was wird übertragen**	**Welche Informationen beinhaltet dies?**
Von IAP an Regal	Bereitstellung Auftragsdaten	ID RK, Aktivierung RGB Wert
Von IAP an Regal	Deaktivierung	ID RK, Deaktivierung RGB Wert

Bereitstellung Auftragsdaten

Zur Aktivierung eines Regalknotens werden der relevante RGB-Wert und die ID des zu aktivierenden Regalknotens an das Sensornetz übertragen.

Deaktivierung des Regalknotens

Zur Deaktivierung des Regalknotens werden der RGB-Wert und die relevante ID des Regalknotens an das Sensornetz übertragen.

Sensornetz-IAP Schnittstelle

Übertragungsrichtung	**Was wird übertragen**	**Welche Informationen beinhaltet dies?**
Von IAP an Sensornetz	s-net Einstellungen	Klang FA, Farbe Kommissionierer

s-net®-Einstellungenändern:

Mithilfe spezieller Nachrichten ist es möglich, die LED der Fachanzeigen und Regalknoten in einer definierten Farbe blinken oder über den Klangkörper des Sensornknotens ein Klangmuster erzeugen zu lassen. Der Benutzer kann diese Einstellungen über die Nutzerschnittstelle verändern.

Benutzercharakterisierung:

Nutzer der vom System unterstützten Hardware sind vornehmlich Kommissionierer. Diese benötigen intuitive Gebrauchsgegenstände. Das Niveau des Bildungsgrads unter ihnen ist heterogen, viele Kräfte sind zudem ungelernt und häufig werden Auftragsspitzen durch Unternehmensexterne wie Zeitarbeiter aufgefangen. Das Durchschnittsalter bewegt sich bei etwa 33 Jahren. Die technische Expertise der Kommissionierer ist als niedrig bis mittelhoch einzustufen. Die Kommissionierer arbeiten in 2-3 Schichten zu jeweils 7-8 Stunden.

Benutzer der Webschnittstelle sind Nutzer mit einem höheren Bildungsgrad, ggf. sogar Akademiker. Häufig sind sie deutsche Muttersprachler zwischen 30 und 45 Jahren und haben Vorkenntnisse im Umgang mit logistischen Softwareanwendungen.

IAP-Benutzer-Webschnittstelle

Übertragungsrichtung	**Was wird übertragen**	**Welche Informationen beinhaltet dies?**
Von WS an User	Monitoring Informationen	Knoten-ID, Artikel, Standort, Knotenstatus, Akkustand
Von WS an User	Wartungsinformationen	Knoten-ID, Artikel, Standort, Knotenstatus
Von User an WS	Skalierungen Einstellungen System	Schwellenwert, Annäherungslokalisierung, Vorpufferung, Ausfallintervall, Reboot, Klang FA, Übertragungsintervall
Von User an WS	Zuweisung FA und Artikel	Artikel, Knoten-ID
Von User an WS	Zuweisung FA und Ort	Knoten-ID, Lagerort

9 Probandenversuche

Bis hierhin wurde der Demonstrator nur unter Laborbedingungen getestet. Der nächste Schritt war die Untersuchung der Funktionsfähigkeit unter praxisnahen Bedingungen. Zu diesem Zweck wurde der Demonstrator in der Versuchshalle des Lehrstuhls fml aufgebaut. Für den Versuch wurde neben der vom Fraunhofer IIS entwickelten Hard- und Software das kommerziell erhältliche WMS Prolag-World® der CIM GmbH eingesetzt. Das Ziel der Untersuchung war es herauszufinden, welche Schwachstellen das System bei der praktischen Nutzung aufzeigt. Dabei wurde nicht nur der optimale Ablauf des Kommissionierprozesses, sondern auch die subjektive Einschätzung der Probanden bezüglich des Kommissioniersystems untersucht. Als Vergleichsinstrument wurde die klassische Papierliste zur Kommissionierung verwendet. Mit dem Testlauf sollten die folgenden Fragen bezüglich des Systems beantwortet werden:

- Wie einfach ist der Umgang mit dem System (Hardware und Software)? Kann dieses auch von ungelerntem Personal bedient werden?
- Steigert es die Motivation bei der Arbeit?
- Ist es ergonomisch oder treten Schwierigkeiten bei der Handhabung auf?
- Kann Zeit bei der Bearbeitung der Aufträge durch die Verwendung des Systems eingespart werden?
- Welche Vor- und Nachteile sehen die Probanden nach der Verwendung?
- Welche Probleme treten bei der praktischen Durchführung auf?

Diese Fragen sollen nach der folgenden Versuchsvorbereitung und -durchführung in der Auswertung geklärt werden.

9.1 Versuchsvorbereitung

Nach der Definition der Ziele wurde der Versuch vorbereitet. Dazu war es notwendig, einen Fragebogen zur Erfassung der Meinung der Probanden zu erstellen und das Lager sowie die Systemkomponenten zu konfigurieren bzw. zu installieren.

9.1.1 Fragebogen

Damit Fragebögen verwertbare Ergebnisse erbringen, müssen sie methodisch korrekt geplant und ausgeführt werden.

Der Fragebogen enthält sowohl geschlossene als auch offene Fragen. Die geschlossenen Fragen dienen zur Bewertung bereits ermittelter Systemeigenschaften. Diese wurden im Projekt anhand einer Mindmap ermittelt. Aus diesen Fragestellungen wurden Zielgrößen (Ergonomie, Technik, Gesamtbewertung, Allgemeines, Persönliches, Einführung, Ablauf des Tests und Fragebogen) definiert, die an späterer Stelle zur übergeordneten Bewertung des Systems verwendet werden. Darüber hinaus dienen sie zur Strukturierung des Fragebogens in Kategorien.

Bei der Bewertung haben die Probanden die Möglichkeit, auf einer fünfstufigen, verbalisierten Skala zwischen „stimme gar nicht zu“ und „stimme voll zu“ zu entscheiden. Falls eine Frage nicht beantwortet werden kann, steht der Punkt „keine Angabe“ zu Verfügung, damit die Ergebnisse nicht verfälscht werden. Die offenen Fragen dienen zur Erweiterung der bisher ermittelten Einflussgrößen. Teilweise sind auch halboffene Fragen (geschlossene Fragen mit zusätzlicher offener Antwortmöglichkeit) im Fragebogen zu finden, um fehlende Antwortoptionen zu ergänzen.

Bei der Fragestellung wurde darauf geachtet, dass möglichst einfache Wörter und nur wenige Fachbegriffe verwendet werden, damit auch Teilnehmer den Fragebogen beantworten können, die Deutsch nicht als Muttersprache gelernt haben. Darüber hinaus wurden zur Überprüfung der Validität der Antworten Kontrollfragen hinzugefügt. Diese dienen dazu, inkonsistent beantwortete Fragebögen, z. B. bei willkürlichen Antworten eines Teilnehmers, zu identifizieren. Ein Beispiel hierfür zeigt Abbildung 28. Darauf werden zwei Fragen gezeigt, welche eine ähnliche Bedeutung haben, aber an unterschiedlicher Stelle im Fragebogen gestellt werden.

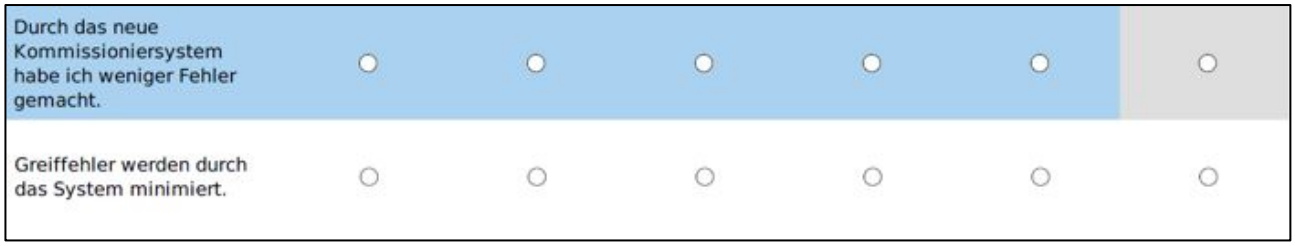


Abbildung 28: Beispiel einer Kontrollfrage

Ein weiterer Aspekt, der bei der Fragebogenerstellung beachtet wurde, ist die Vermeidung der sogenannten „Ja-Sage“-Tendenz. Dieses Problem tritt auf, wenn die Fragen stets die gleiche Auswirkung auf die Zielgröße haben. Ein Beispiel wäre bei der Zielgröße „Einfachheit“ nur Fragen zu stellen, bei denen die positive Bewertung einen positiven Einfluss auf die Einfachheit des Systems hat. Um dies zu vermeiden, wurden in jeder Kategorie negierte Fragen eingefügt.

Der Aufbau des Fragebogens (siehe Anhang C) setzt sich wie folgt zusammen:

1. Allgemein: Erfahrung des Probanden im Bereich der Logistik.

2. Einführung: Bewertung der Einführung der Teilnehmer.
3. Einfachheit: Bewertung wie einfach z. B. die Bedienung der Fachanzeige ist.
4. Sprache: Betrachtung der sprachlichen Verständlichkeit textueller Informationen des Displays
5. Motivation: Fragen zur Steigerung der Arbeitsmotivation durch das System.
6. Ergonomie: Bewertung ergonomischer Aspekte wie bspw. der Tastendruck.
7. Akustische Wahrnehmung:
   Bewertung der akustischen Ausgaben.
8. Visuelle Wahrnehmung:
   Fragen zur visuellen Signalgebung.
9. Zeit: Einschätzung der Zeitersparnis durch das System.
10. Flexibilität: Komplexität der Änderung bzw. Zuweisung von Lagerfächern bzw. Sensorknoten.
11. Verfügbarkeit:
    Angabe der Störungen, die bei den Komponenten des Systems auftreten.
12. Selbsteinschätzung:
    Bewertung des Probanden seiner eigenen Leistung.
13. Vergleich zwischen PbLL und Pickliste:
    Direkte Gegenüberstellung von PbLL mit dem Kommissionieren mittels einer Pickliste.
14. Betrachtung des Gesamtsystems:
    Offene Fragen zu den Vor- und Nachteilen des Systems.
15. Persönliches: Angaben über den Teilnehmer.

Zu Beginn des Fragebogens wird die Erfahrung des Teilnehmers im Bereich der Logistik ermittelt. Dazu zählen generelle Kenntnisse in der Logistik, mit Kommissioniersystemen und Pick-by-Light-Anlagen. Danach wird ermittelt, ob die Einführung zur Pickliste bzw. PbLL ausreichend und verständlich war. Es folgen Fragen über die Komplexität der Technik, bspw. wie einfach es bei einer Minderentnahme ist, die Menge zu korrigieren oder wie einfach die Bedienung allgemein zu bewerten ist. In der nächsten Kategorie befinden sich Fragen zum sprachlichen Verständnis der Anweisungen auf dem Display der Fachanzeige. Anschließend wird bewertet, inwiefern das PbLL-System dazu beiträgt, dass die Arbeit weniger monoton ist bzw. leichter ist. Die leichte Arbeit steht auch im Punkt „Ergonomie“ im Fokus. Dort wird abgefragt, wie handlich z. B. der mobile

Sensorknoten ist oder ob die Haptik der Tasten angenehm ist. Danach folgen Fragen über die Signalgebung der Sensorknoten, optisch und akustisch. Dazu gehören u. a. die Helligkeit der Blickfangleuchten oder die Lautstärke der Gassenwechseltöne. Die Zielgröße Flexibilität beschreibt den Schwierigkeitsgrad bei anstehenden Änderungen, z. B. der Zuordnung eines Sensorknotens zu einem neuen Lagerfach. Eventuell vorgekommene Störungen wie der Ausfall eines Displays oder fehlende Aufträge werden in der nächsten Kategorie abgefragt. Im Punkt Selbsteinschätzung bewertet der Teilnehmer, wie er mit dem System zurechtgekommen ist und ob er sich damit verbessert hat im Vergleich zur Kommissionierung mit Pickliste. Es folgt ein direkter Vergleich der Zielgrößen (Einfachheit, Flexibilität, Motivation etc.) zwischen PbLL und Pickliste. Zum Abschluss des Fragebogens folgt eine offene Frage mit der Möglichkeit Verbesserungsvorschläge oder besonders negative bzw. positive Punkte anzusprechen und persönliche Angaben zum Teilnehmer zu machen.

9.1.2 Versuchsaufbau

Das am Lehrstuhl fml zu den Versuchen verwendete Lager (siehe Abbildung 29) besteht aus vier Fachbodenregalen, die in zwei Gassen angeordnet sind. Als Bereitstellungseinheiten werden Sichtlagerkästen verwendet. Von diesen stehen auf fünf Ebenen jeweils 14 Stück nebeneinander. Dementsprechend ergeben sich für das gesamte Regal 280 Lagerfächer.

Abbildung 29: Kommissionierlager der fml-Versuchshalle

In dem beschriebenen Lager wurden jeweils 20 Fachanzeigeknoten an zufällig ausgewählten Lagerfächern durch Klettbänder unter den Sichtlagerkästen installiert (1). Zusätzlich wurde ein Regalknoten pro Gasse an der Stirnseite des Regals angebracht (2).

Systemaufbau

Der Aufbau des PbLL-Systems setzt sich aus mehreren Soft- und Hardwarekomponenten zusammen (siehe Abbildung 30) Das WMS (ProlagWorld®) ist durch ein lokales Netzwerk mit der entwickelten Integrations- und Anwendungsplattform (IAP) verbunden. Neben den Fachanzeige- und Regalknoten sollten auch die mobilen Sensorknoten zur Lokalisierung der Kommissionierer im Versuchslauf verwendet werden. Aufgrund von technischen Problemen fielen diese allerdings aus, daher wurden sie bei der späteren Auswertung nicht berücksichtigt.

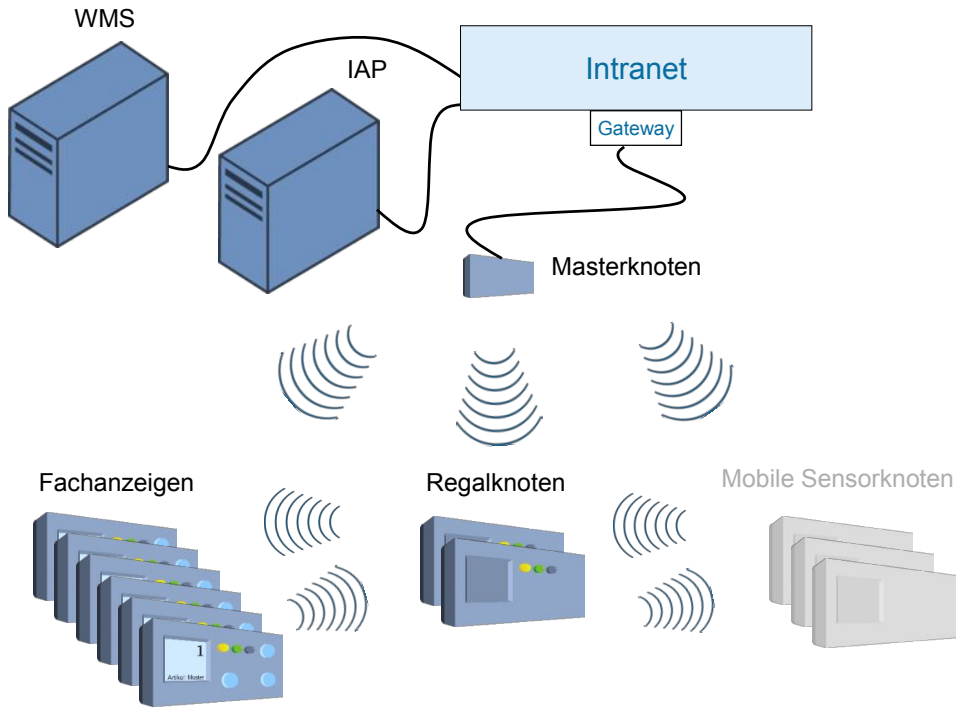


Abbildung 30: Systemaufbau für den Versuch am Lehrstuhl fml

9.2 Versuchsdurchführung

Der Versuch wurde mit insgesamt 20 Teilnehmern (35% Studenten, 65% wissenschaftliches Personal) durchgeführt. Von den Probanden hatte vor dem Versuch noch keiner Erfahrung mit dem Umgang eines PbL-Systems. Mit einer Ausnahme haben jeweils drei Probanden pro Testlauf gleichzeitig kommissioniert. Die gesamte Versuchsdurchführung dauerte durchschnittlich eine Stunde und setzte sich folgendermaßen zusammen:

1. Einführung (5 min)

2. Kommissionierung mit Pickliste (15 min)
3. Kommissionierung mit dem Pick-by-Local-Light-System (15 min)
4. Beantwortung des Fragebogens (25 min)

Bei der Einführung wurde die Kommissionierung mit der Pickliste und dem PbLL-System erklärt. Bei Letzterem sind lediglich die Bedienung – Quittierung und Änderung der Entnahmemenge bei Mindermengen – des Fachanzeige-Sensorknotens und die Bedeutung der LED erläutert worden. Danach folgte die fünfzehnminütige Kommissionierung mit einer Pickliste (siehe Abbildung 31).

Pickliste

Seite: 1/1

Datum: _____

Auftrag Nr.: 2

Kunde: fml Probandenversuch

Name des Bearbeiters:_____

Lfd. Nummer	Fach	Bezeichnungen	Menge
1	4C12	Sulprid Hexal 200	1
2	3A07	Ambroxol 30 Tab	3
3	3D06	Doneurin 25	1
4	4E09	Supra Adaptive Logistiksysteme Flyer	1

Abbildung 31: Beispiel eines Auftrags mit Pickliste

Der Aufbau der Pickliste ähnelte derer aus der Praxis, es fehlte aber z. B. der Barcode, da dieser nicht für die Kommissionierung benötigt wurde. Pro Auftrag wurden vier bis fünf Positionen kommissioniert, wobei die Menge zwischen einer und drei Entnahmeeinheiten lag. Mit denselben Aufträgen erfolgte anschließend die Kommissionierung mit dem PbLL-System, wobei die Reihenfolge der Aufträge geändert wurde, um Lerneffekte auszuschließen. Der Zeitraum für die Kommissionierung betrug ebenfalls 15 Minuten. Zum Abschluss des Testlaufs wurden die Teilnehmer direkt nach der Kommissionierung mit dem PbLL-Demonstrator in einem Fragebogen nach Ihrer Meinung befragt.

9.3 Versuchsergebnisse

Nach der Versuchsdurchführung wurden die Fragebögen zu den Testläufen ausgewertet. Als negative Bewertung werden diejenigen Antworten gezählt, welche mit „stimme nicht zu“ oder „stimme gar nicht zu“ gewertet wurden. Sofern eine Frage eine negative Auswirkung auf die Zielgröße hat, gilt dies analog für die Antwortmöglichkeiten „stimme zu“ und „stimme voll zu“. Die Bedeutung der einzelnen Kategorien aus Abbildung 32 können dem Abschnitt 9.1.1 entnommen werden.

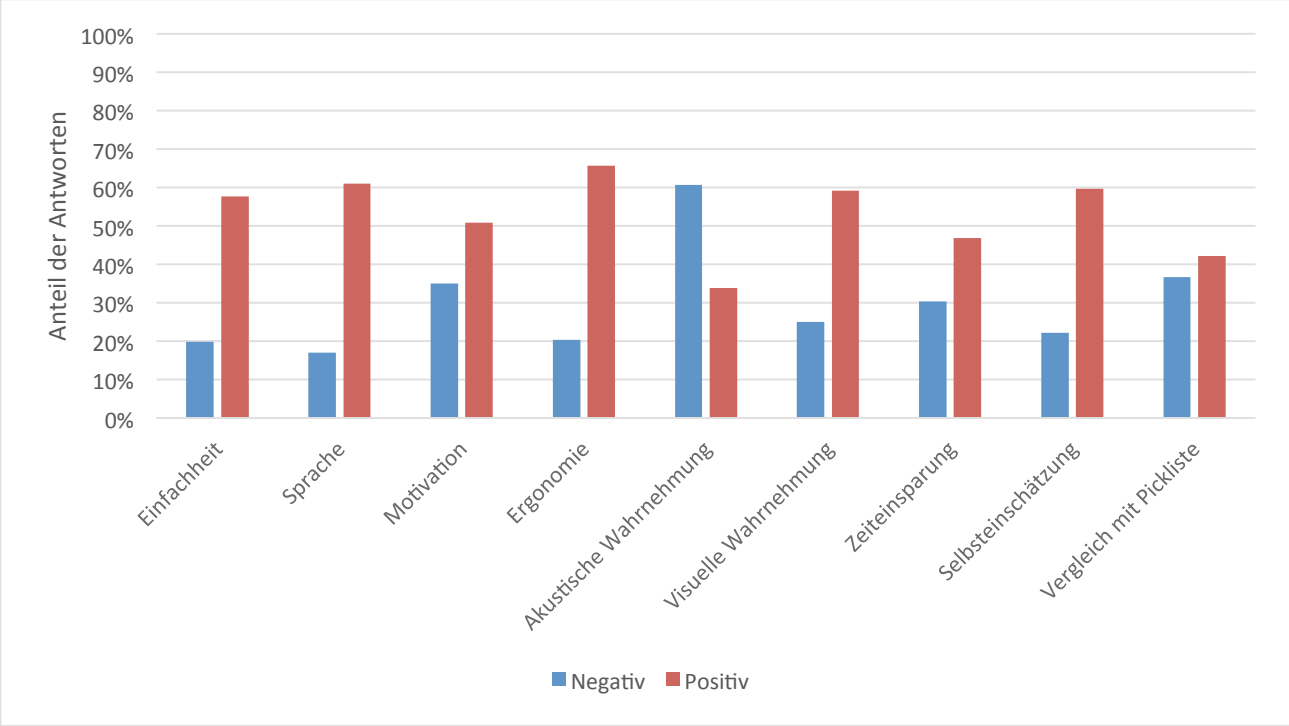


Abbildung 32: Anteil der Antworten in der jeweiligen Zielgrößen im Fragebogen.

Abbildung 32 zeigt die Auswertung der geschlossenen Fragen. Die Kategorien Einfachheit, Sprache, Ergonomie, visuelle Wahrnehmung und Selbsteinschätzung wurden überwiegend positiv aufgenommen. Die Motivation bei der Arbeit mit dem System wurde mit 35% negativen und 50% positiven Stimmen allerdings eher mittelmäßig bewertet. Ebenso verhält es sich bezüglich der Zeiteinsparung und dem Vergleich mit der Arbeit mit Pickliste. Die negativen Bewertungen resultieren vor allem aus mehreren technischen Störungen, die während der Versuche auftraten. Dies zeigt sich auch bei der akustischen Wahrnehmung, welche am schlechtesten bewertet wurde. Als Grund wurde hierfür genannt, dass das Signal, das zur Ankündigung eines bevorstehenden Gassenwechsels oder Quittierung eines Auftrags genutzt werden sollte, nicht wahrnehmbar war.

Die Auswertung der offenen Fragen ergab, dass vor allem technische Schwierigkeiten eine optimale Kommissionierung mit PbLL störten. Der häufigste Fehler, der während der Durchführung auftrat, war, dass Aufträge von der IAP teilweise nicht bei den Fachanzeigen ankamen. Dies hatte wiederum zur Folge, dass Aufträge nicht komplett abgearbeitet werden konnten und der Kommissionierer an der Weiterarbeit gehindert wurde. Darüber hinaus wurden auch die Nachrichten von den Fachanzeigen nicht immer an die IAP übermittelt. Dies hatte denselben Effekt wie die fehlerhafte Übertragung von der IAP an die Fachanzeigen.

Die Antworten in den offenen Fragen bezüglich der Vor- und Nachteile des Systems bzw. Verbesserungsvorschläge bestätigen die Bewertung der Zielgrößen. Als Vorteil wurde zusätzlich genannt, dass die Fächer gut erkannt werden und die Vorteile der PbL-Technologie gut genutzt werden. Als nachteilig wurde der durch die Störungen verursachte verzögerte Kommissioniervorgang genannt. Als verbesserungswürdig wurde zudem das Display eingestuft, welches vor allem in der unteren Ebene schlecht lesbar war. Auch die Reaktionszeit des Systems wurde bemängelt, d. h. die Aufträge wurden zu langsam an die Sensorknoten übertragen.

9.4 Fazit

Die ersten praxisnahen Versuche mit dem PbLL-System zeigten erstmals die grundsätzliche Funktionsfähigkeit des Systems im Verbund mit allen beteiligten IT- (wie z. B. dem WMS) oder Lagereinrichtungskomponenten. Es traten jedoch mehrere Schwachstellen auf, die vorher nicht bekannt waren. So konnte das Sensorknotennetzwerk nicht die Menge an Daten verarbeiten, die bei drei Kommissionierern gleichzeitig versendet wurden. Dies hatte zur Folge, dass manche Aufträge nur teilweise oder gar nicht an den Fachanzeigen oder an der IAP angekommen sind. Auch die Auswirkung des fehlenden akustischen Signals zu einem bevorstehenden Gassenwechsel oder dem Ende eines Auftrags hat den Kommissionierprozess gestört.

Die aufgedeckten Schwachstellen und Kritikpunkte wurden anschließend dazu verwendet, in einem Reengineering den Demonstrator den Bedürfnissen von Kommissionierern anzupassen und allgemein die Verfügbarkeit des Systems zu erhöhen.

10 Feldtest

Im Vorlauf des Projekts wurden bisher nur Versuche unter Laborbedingungen oder im akademischen Umfeld unternommen. Im letzten Schritt wurde der Demonstrator auf seine Praxistauglichkeit hin untersucht werden. Dazu wurde in einem Logistikzentrum der B/S/H/ Hausgeräte GmbH in Fürth der überarbeitete Demonstrator im laufenden Betrieb verwendet. Neben der Praxistauglichkeit sollte untersucht werden, in wie weit die Reengineering-Maßnahmen seit dem Probandenversuch ihre Wirkung zeigen. Ferner ist der Hintergrund des Tests bisher, unentdeckte Schwachstellen bei der längerfristigen Anwendung des Demonstrators zu identifizieren. Im Folgenden werden zuerst die Rahmenbedingungen beschrieben, unter denen der Versuch ablief, und wie der Versuch vorbereitet wurde. Abschließend werden die Ergebnisse der Durchführung vorgestellt und der Feldtest in einem Fazit zusammengefasst.

10.1 Rahmenbedingungen und Vorbereitung

Bevor eine Evaluierung durchgeführt werden kann, müssen die Rahmenbedingungen für den Versuch ermittelt werden, sodass eventuelle Anpassungen am System frühzeitig durchgeführt werden können. Dabei spielen sowohl die Technik als auch das verwendete Lager, sprich logistische Vorgaben, eine Rolle. Da das System in das laufende Tagesgeschäft eines produzierenden Unternehmens eingebunden wird, sind zugleich noch die prozesstechnischen Voraussetzungen zu betrachten.

10.1.1 Technologische Rahmenbedingungen

Die technologischen Aspekte haben sich nach dem Probandenversuch insoweit verändert, dass einerseits der Demonstrator überarbeitet wurde. Andererseits wird das System in einem anderen Umfeld verwendet. Es wird nicht mehr in einem akademischen, sondern einem praktischen Umfeld verwendet. Daher ändert sich auch der Systemaufbau wie in Abbildung 33 dargestellt.

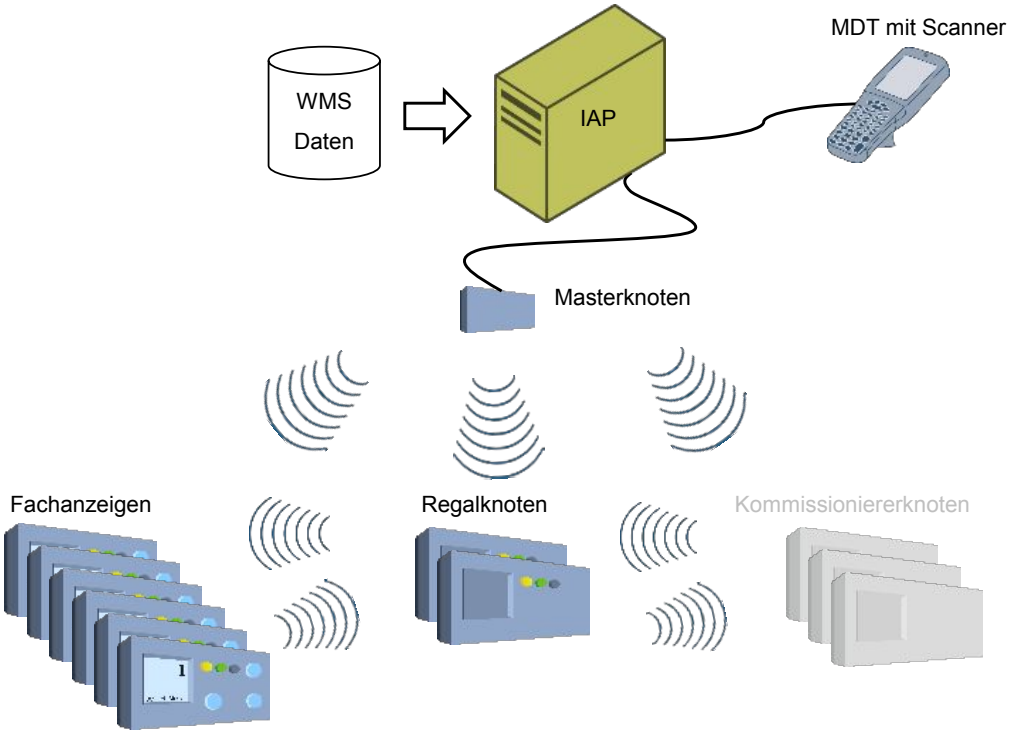


Abbildung 33: Systemaufbau Feldtest

Das WMS, welches von der B/S/H/ verwendet wird, stammt von SAP, wodurch die in „ProlagWorld®“ erstellte Schnittstelle zu der IAP obsolet wurde. Eine weitere Schnittstelle konnte aus Sicherheitsgründen nicht implementiert werden. Abhilfe schaffte der direkte Zugriff auf die Oracle-Datenbank, in welcher die Aufträge gespeichert sind. Die Auftragsdaten wurden daher vor der Inbetriebnahme des PbLL-Systems von der IAP importiert. Durch den Wegfall der direkten Anbindung des WMS entfällt die Nutzung eines lokalen Netzwerks. Der Masterknoten wurde direkt an den Computer der IAP angeschlossen. Darüber hinaus war ein MDT mit dem Rechner verbunden. Die Notwendigkeit eines zusätzlichen MDTs folgte aus dem Datenbankexport, da die IAP in diesem Fall keine aktuellen Informationen vom WMS darüber hatte, welche Aufträge zur Zeit von Kommissionierern bearbeitet oder gestartet werden mussten. Das MDT hatte somit die Aufgabe, Aufträge zu starten. Damit auch mehrere Kommissionierer mit dem System gleichzeitig arbeiten konnten, mussten außerdem Barcodes für verschiedene Kommissionierer an der Basisstation angebracht werden. Durch das Abscannen dieses Barcodes leuchten die Fachanzeigen in der jeweiligen Farbe, die dem Barcode zugewiesen wurde. Auf Abbildung 34 sind die jeweiligen Barcodes mit einem pinken und gelben Pfeil zu sehen.

Abbildung 34: Barcodes zur Auswahl der Kommissionierfarbe.

10.1.2 Logistische Rahmenbedingungen

Die logistischen Rahmenbedingungen setzen sich zusammen aus dem Aufbau des Lagers und dessen Materialflusssystems. Das Lager der B/S/H/ enthält mehrere Kommissionierzonen, welche nach A-, B- und C-Teilen untergliedert sind. Da das PbLL auf hohe Kommissionierleistungen spezifiziert wurde, wurde es in der Zone für A-Teile eingesetzt.

Die A-Teile befinden sich vorwiegend in schwerkraftbetriebenen Einschubregale (siehe Abbildung 35 a), welche nach dem LIFO-Prinzip bestückt werden. In der oberen Ebene der Durchlaufregale wurden die Fachanzeige-Knoten unterhalb des Lagerfachs mit einem Klettband befestigt. In der Ebene unter dem Rollenförderer wurden die Knoten oberhalb der Lagereinheiten angebracht. Dabei wurden im Abstand von jeweils fünf Lagerfächern Regalknoten auf die Kommissionierzeile verteilt.

In der Kommissionierzone werden neben den Durchlaufregalen Artikel in Gitterboxen bereitgestellt. An diesen wurden die Sensorknoten mittels zusätzlicher Metallplatten befestigt (siehe Abbildung 35 c).

Zusätzlich werden in der Zone einige C-Teile bedarfsorientiert an der Kommissionierstation in einem Fachbodenregal bereitgestellt. An diesem Regal wurde je Ebene und je Seite eine Fachanzeige angebracht (siehe Abbildung 35 d). Die Regalknoten befinden sich am oberen Ende des Regals.

Abbildung 35: Lagerung der A-Teile in a) Durchlaufregal obere Ebene, b) Durchlaufregal untere Ebene, c) Gitterbox und d) der C-Teile in Fachbodenregal

Das Materialflusssystem kann nach dem in Abschnitt 4.2 vorgestellten morphologischen Kasten beschrieben werden (siehe Tabelle 8). Die Bereitstellung erfolgt in Durchlauf-, Fachbodenregalen und Gitterboxen, daher ist sie statisch und dezentral. Die gelagerten Güter sind in den Bereitstelleinheiten (Kartonagen) nicht geordnet. Wie bei Person-zu-Ware-Systemen üblich, muss sich der Kommissionierer auch hier ohne technische Hilfsmittel fortbewegen, wobei er sich dabei in mehreren Gassen bewegt. Da das Fachbodenregal eine Höhe von 2,5 m aufweist und das Einschubregal niedriger ist, kann von einer eindimensionalen Bewegung ausgegangen werden. Die Entnahme erfolgt ebenfalls ohne technische Unterstützung und die Abgabe erfolgt statisch und zentral an einer Förderstrecke.

Materialflusssystem				
Vorgang	**Realisierungsmöglichkeiten**			
Bereit-stellung	statisch		dynamisch	
	zentral		dezentral	
	geordnet		ungeordnet	
Fortbe-wegung	eindimensional o. Gassenwechsel	eindimensional m. Gassenwechsel	zweidimensional o. Gassenwechsel	zweidimensional m. Gassenwechsel
	manuell		mechanisch	
Entnahme	manuell		mechanisch	
	ein Teil pro Zugriff		mehrere Einzelteile pro Zugriff	
Abgabe	statisch		dynamisch	
	zentral		dezentral	

Tabelle 8: Schematische Darstellung des Materialflusssystems der untersuchten Kommissionierung

10.1.3 Prozesstechnische Rahmenbedingungen

Die Integration des PbLL-System in das Tagesgeschäft des Industriepartners musste für einen reibungslosen Ablauf im Vorfeld geplant werden. Daher wurde zuerst der aktuelle Kommissionierprozess in der betrachteten Zone aufgenommen, der sich wie folgt gestaltet (siehe Abbildung 36). An der Kommissionierstation stellt ein Rollenförderer mehrere Sammelbehälter entlang der Kommissionierzone bereit. Der Kommissionierer entnimmt einen beliebigen Sammelbehälter, wobei sich in diesem bereits Artikel durch vorhergehende Kommissionierungen befinden können. In dem Behälter befindet sich ein Lieferauftrag bzw. eine Pickliste. Diese entnimmt der Mitarbeiter und kommissioniert die darauf gelisteten Artikel. Anschließend begibt sich der Mitarbeiter wieder zur Basisstation, an der er den Sammelbehälter zur Weitergabe wieder auf die Förderstrecke legt.

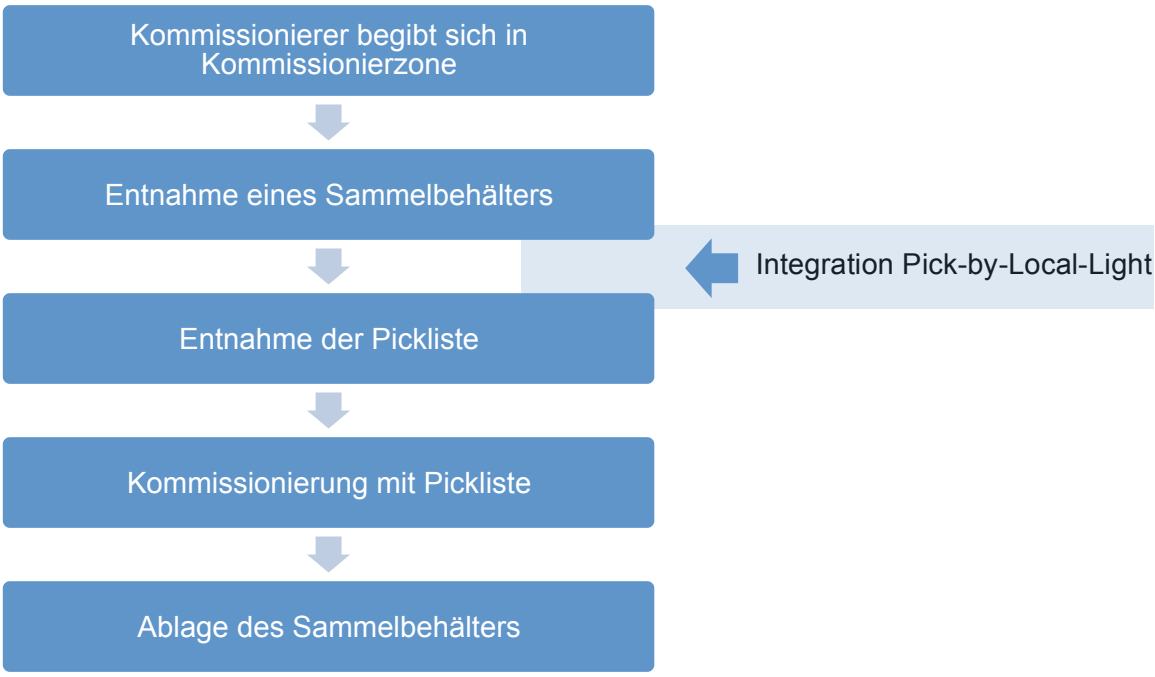


Abbildung 36: Bestehender Kommissionierprozess des Unternehmens in der ausgewählten Zone.

Aus dem bestehenden Prozess wurde anschließend ein neuer Prozess definiert (siehe Abbildung 37), der das PbLL-System integriert. Um die Kommissionierung im Unternehmen sicher zu gewährleisten, wurde der Prozess derart festgelegt, dass bei einem eventuellen Ausfall der Technik trotzdem mit der Pickliste weiter kommissioniert werden konnte. Der Kommissionierprozess gestaltete sich demnach wie folgt.

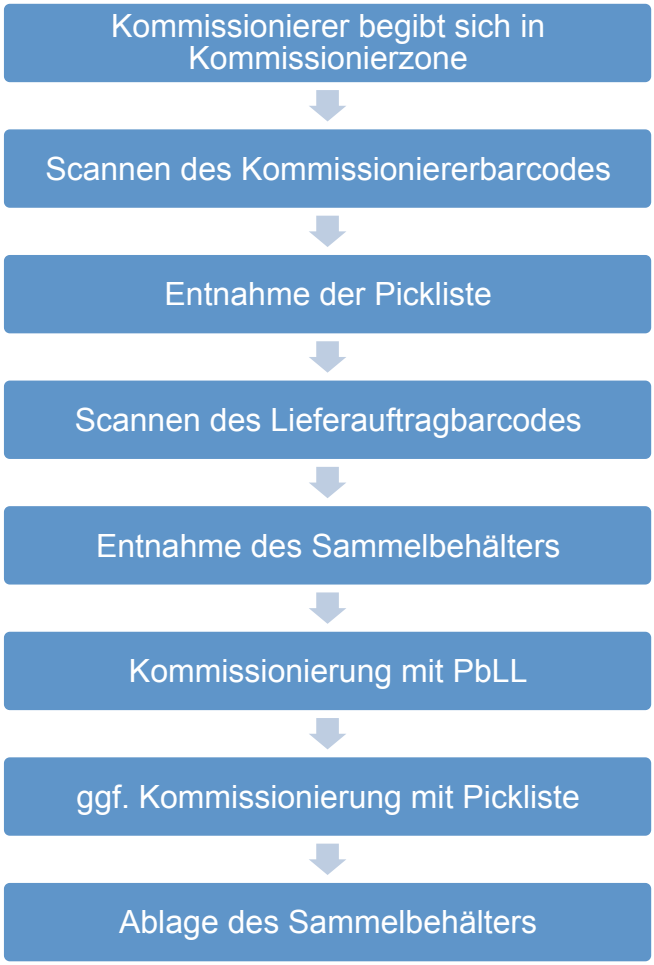


Abbildung 37: Neuer Kommissionierprozess

Der Mitarbeiter geht als erstes an die Basisstation der Kommmissionierzone. Dort scannt er mit einem MDT den Kommissioniererbarcode (vgl. Abbildung 34). Anschließend entnimmt er die Pickliste aus dem Sammelbehälter und scannt den Barcode, welcher die Lieferauftragsnummer enthält. Daraufhin leuchten die jeweiligen Anzeigen des PbLL-Systems, und der Mitarbeiter kann mit der Kommissionierung beginnen. Falls die Anzeigen nicht funktionieren sollten, kann auf die konventionelle Pickliste zurückgegriffen werden. Nach der Bearbeitung der letzten Position legt der Kommissionierer den Sammelbehälter auf der Förderstrecke ab und der Prozess wiederholt sich.

Ein Sonderfall ist in Abbildung 37 nicht dargestellt. Wenn sich bei der Bearbeitung eines Kommissionierauftrags zu wenige Artikel in einem Lagerfach befinden, gibt der Mitarbeiter über die Mengenkorrekturtasten der Fachanzeige die Minderentnahme an. Der Auftrag wird danach auf Wunsch der B/S/H/ Hausgeräte GmbH allerdings nicht als teilweise abgeschlossen, sondern als abgebrochen deklariert.

10.2 Versuchsdurchführung

Der Feldtest wurde in Absprache mit der B/S/H/ Hausgeräte GmbH innerhalb von vier Tagen durchgeführt, wobei pro Tag jeweils eine Schicht durch das PbLL-System unterstützt wurde. Insgesamt waren sieben Mitarbeiter an dem Test beteiligt.

Die Teilnehmer wurden vor der ersten Nutzung – ähnlich wie bei den Probandenversuchen – über das System aufgeklärt. Die Einweisung dauerte etwa eine Minute, sodass das Tagesgeschäft nicht weiter verzögert wurde. Es wurde die Funktionsweise der Tasten erklärt und wie die Signale der LEDs zu deuten sind. Anschließend wurde die Kommissionierung über eine ganze Schicht hinweg kontinuierlich mit dem Demonstrator durchgeführt. Auftretende Störungen wurden vom wissenschaftlichen Personal vor Ort aufgenommen und dokumentiert. Bei einem Mitarbeiter- oder Schichtwechsel teilten die jeweiligen Probanden ihre Erfahrungen mittels eines Fragebogens mit. Der Fragebogen basierte zum Zwecke der besseren Vergleichbarkeit auf jenem aus Kapitel 9.1.1 Er wurde lediglich sprachlich überarbeitet und minimal an den Versuch bei der B/S/H/ Hausgeräte GmbH angepasst.

Über die vier Tage hinweg wurden insgesamt 462 Aufträge bzw. 503 Positionen (~1,1 Positionen pro Auftrag) mit PbLL kommissioniert, wobei nicht alle Positionen durch das System abgedeckt waren. Grundsätzlich verlief die Kommissionierung ohne schwerwiegende Probleme. Während des Tests gab es lediglich einen Hardware-Defekt, der aber durch den einfachen Austausch des Moduls behoben wurde und daher nicht weiter von Belang war. Darüber hinaus reagierte das System gelegentlich zu langsam. Genauere Daten zu den Störungen sind dem Kapitel 10.3 zu entnehmen.

Die Robustheit des Systems wurde zusätzlich hinsichtlich der Anfälligkeit gegenüber RFID-Strahlung untersucht. Die Funktechnologie RFID wurde deshalb als Störfaktor gewählt, weil sie in der Industrie verwendet wird und im gleichen Frequenzband (868 MHz) arbeitet. Zu diesem Zweck wurde auf eine Fachanzeige im Fachbodenregal (vgl. Abbildung 35) ein UHF-RFID-Tag geklebt. Darauf gerichtet war eine RFID-Antenne, die mit maximal erlaubter Leistung (2 Watt) von einem Reader betrieben wurde.

10.3 Versuchsergebnisse

Anhand der beschriebenen Durchläufe werden in diesem Abschnitt die Ergebnisse zusammengefasst und ausgewertet. Zuerst werden die Störungen vorgestellt, die sich während des Versuchs ergaben. Anschließend werden die subjektiven Einschätzungen der Probanden, die über den Fragebogen ermittelt wurden, dargestellt.

10.3.1 Störungen während des Feldtests

Während des Feldtests traten verschiedene Störungen auf, die in diesem Abschnitt analysiert werden sollen. Es werden zuerst die kumulierten Ergebnisse dargestellt, welche anschließend auf ihre Ursache hin aufgeschlüsselt werden. Die Analyse ist zudem getrennt in die Versuche ohne RFID und mit RFID als Störquelle. Zuerst folgt die Auswertung der Versuche ohne RFID-Einfluss.

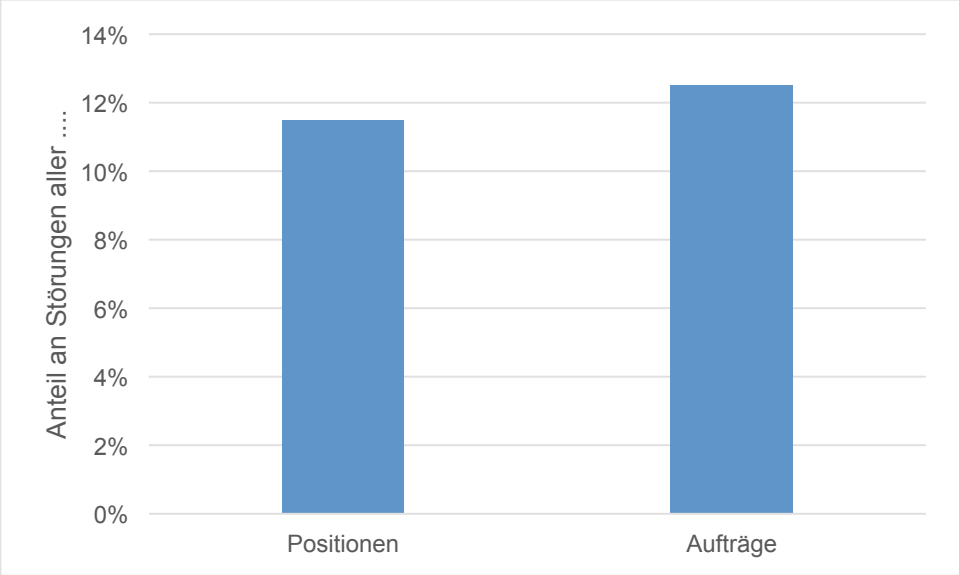


Abbildung 38: Anteil nicht fehlerfrei verlaufener Positionen bzw. Aufträgen ohne RFID.

Die Mitarbeiter haben gemeinsam 376 Aufträge bzw. 409 Positionen abgearbeitet. Bei diesen traten 48 Störungen auf, wobei ein Auftrag mit einer Position zwei Störungen aufwies. Demzufolge waren insgesamt 47 Aufträge bzw. Positionen mit Störungen behaftet. Entsprechend Abbildung 38 waren somit 11,5% der Positionen bzw. 12,5% der Aufträge von Störungen betroffen. Im Folgenden werden entsprechend Abbildung 39 die Störungen nach ihrer Entstehungsursache aufgeschlüsselt, wobei die relativen Werte nur noch bezüglich der Aufträge angegeben werden.

Bei den Fachanzeigen war die häufigste Störung mit 5,6% die zu langsame Übermittlung der Auftragsdaten von der IAP an die Sensorknoten. Die insgesamt vier Sekunden zum Transfer der Aufträge waren vor allem dort kritisch, wo die zu greifende Position in der Nähe der Basisstation (des Kommissioniererbarcodes) war. Nach dem Scannen des Barcodes müsste die Fachanzeige sofort leuchten, damit der Kommissionierer ohne Verzögerung zum Lagerfach gehen kann. Dieser Fehler führt besonders in dem Falle zu Verzögerungen, wenn der Kommissionierer in einem Bereich arbeitet, der überwiegend kurze Laufwege enthält.

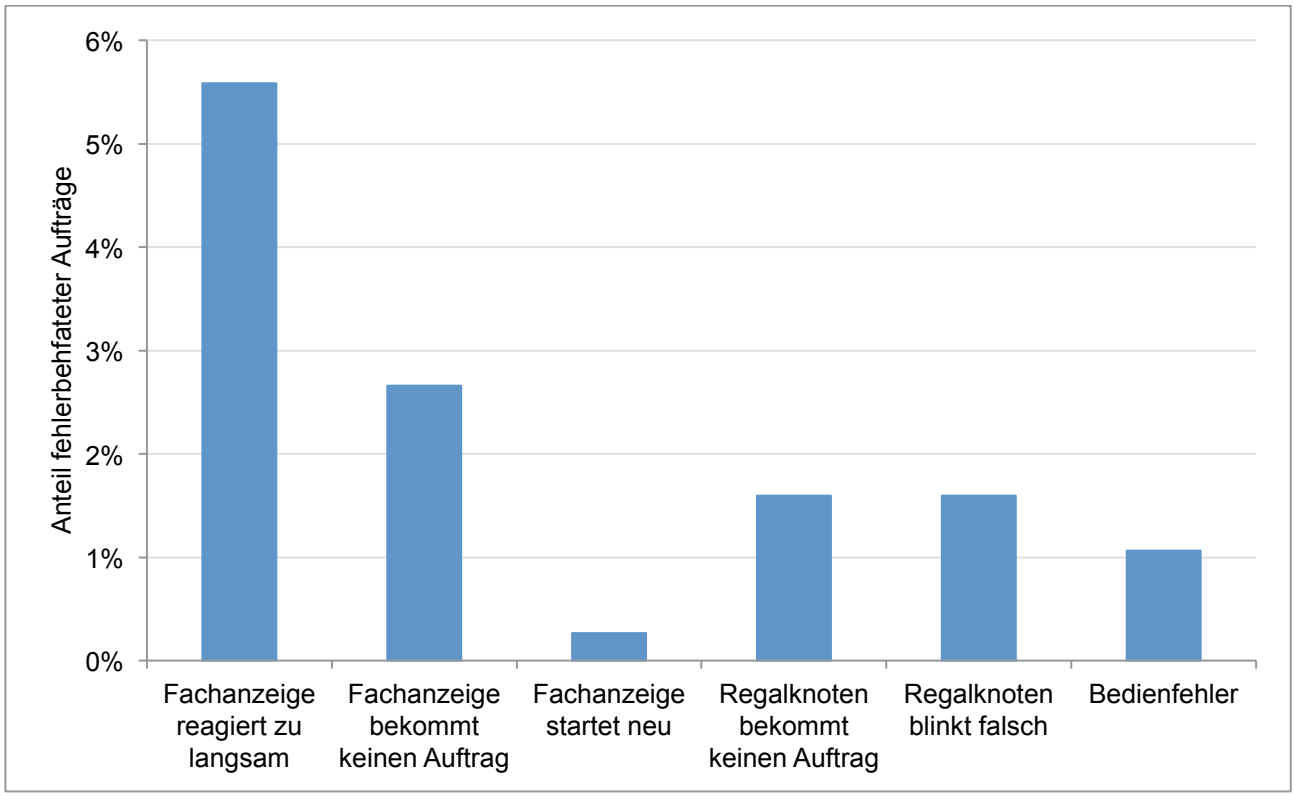


Abbildung 39: Auflistung der verschiedenen Störungsarten in Bezug auf die Aufträge.

Der zweithäufigste Fehler trat bei 2,7% aller Aufträge auf. In diesem Fall bekam die Fachanzeige keinen Auftrag von der IAP. Wenn diese Störung auftrat, musste der Mitarbeiter auf die Pickliste zurückgreifen und mit dieser den Auftrag vervollständigen. Die fehlende Quittierung des Auftrags führte jedoch nicht zum Stillstand des Systems, da mit dem Scannen des nächsten Auftrags alle nicht verarbeiteten Positionen gelöscht wurden.

Bei einem Auftrag startete sich eine Fachanzeige neu. Der Artikel dieses Fachs konnte allerdings trotzdem kommissioniert werden, da die Fachanzeigen die Aufträge persistieren, wodurch Aufträge auch nach einem Neustart weiter vorhanden sind.

Die Regalknoten waren ebenso von nur wenigen Ausfällen bezüglich der Übertragung betroffen, sodass in 1,6% der Fälle kein Auftrag ankam. Hierbei ist die Verzögerung der Kommissionierung allerdings nicht so schwerwiegend, da der Mitarbeiter trotzdem die aktiven Fachanzeigen erkennen kann. In der gleichen Häufigkeit gab es falsch blinkende Regalknoten. Der Grund war die fehlende Deaktivierung der Regalknoten nach der erfolgreichen Quittierung des letzten Auftrags.

Neben den technischen Störungen traten in 1% der Aufträge durch den Menschen vermeidbare Fehler – die Bedienfehler – auf. Diese haben die Ursache in der unzureichenden Betätigung der Quittierungstaste. Dadurch wurden die jeweiligen Positionen nicht als beendet markiert, sondern blinkten weiter bis zum Start des nächsten Auftrags. Dieser Mangel könnte z. B. durch eine bessere Haptik der Quittierungstaste oder audiovisuelle Bestätigung der erfolgreichen Quittierung gemindert werden.

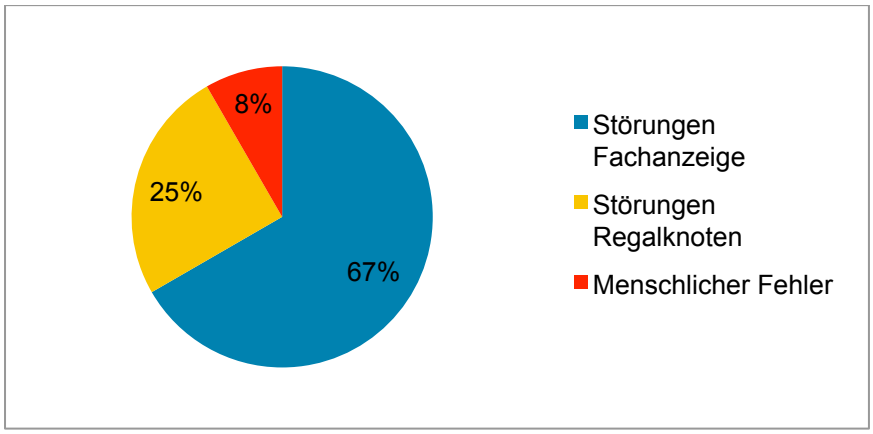


Abbildung 40: Aufteilung der Störungen nach ihrer Fehlerquelle.

Die meisten Störungen gab es nach Abbildung 40 bei den Fachanzeigen. Zwei Drittel aller Störungen traten an diesem Modul auf. Die restlichen Störungen verteilen sich mit einem Viertel auf die Regalknoten und mit 8% auf durch Menschen vermeidbare Fehler. Der geringere Ausfall der Regalknoten könnte dadurch erklärt werden, dass einem Regalknoten mehrere Fachanzeigen zugewiesen sind. Werden mehrere Fachanzeigen angesprochen, die einem Regalknoten zugeordnet sind, werden multiple Nachrichten zur Aktivierung desselben versendet. Dadurch wird die Fehleranfälligkeit deutlich verringert.

Stresstest RFID

Nachfolgend werden der Versuche dargestellt, bei denen ein RFID-System als Störquelle aktiviert war.

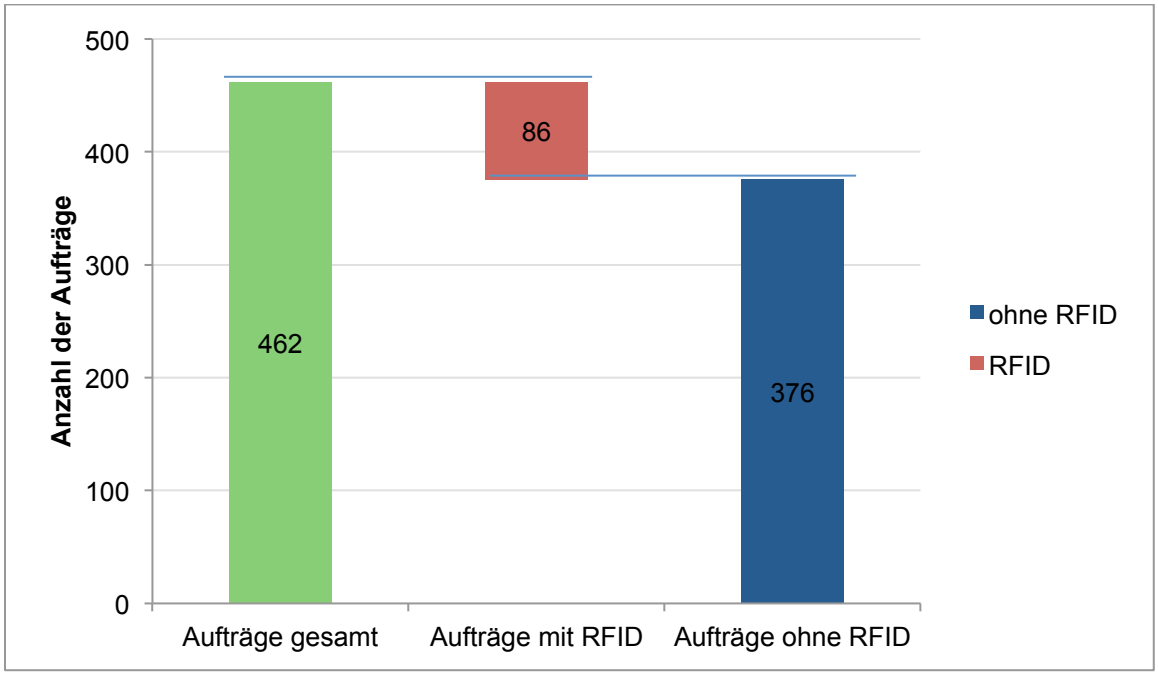


Abbildung 41: Anteil der Aufträge mit / ohne RIFD.

Die Anzahl der Aufträge, die mit aktivem RFID abgearbeitet wurden, belief sich auf 86 Stück. Das entspricht einem Anteil von 18,6%. Bei einer Gesamtanzahl von 65 Fehlern während des Feldversuchs traten davon 17 im Zeitraum der RFID-Versuche auf, wobei die Position eines Auftrags von zwei Fehlern betroffen war. In Relation zu der Anzahl der abgearbeiteten Positionen (bzw. Aufträge) mit aktiviertem RFID, ergibt das entsprechend Abbildung 42 einen Anteil von 17,0% (bzw. 18,6%). Die kumulierten Störungen sind demnach um die Hälfte gestiegen.

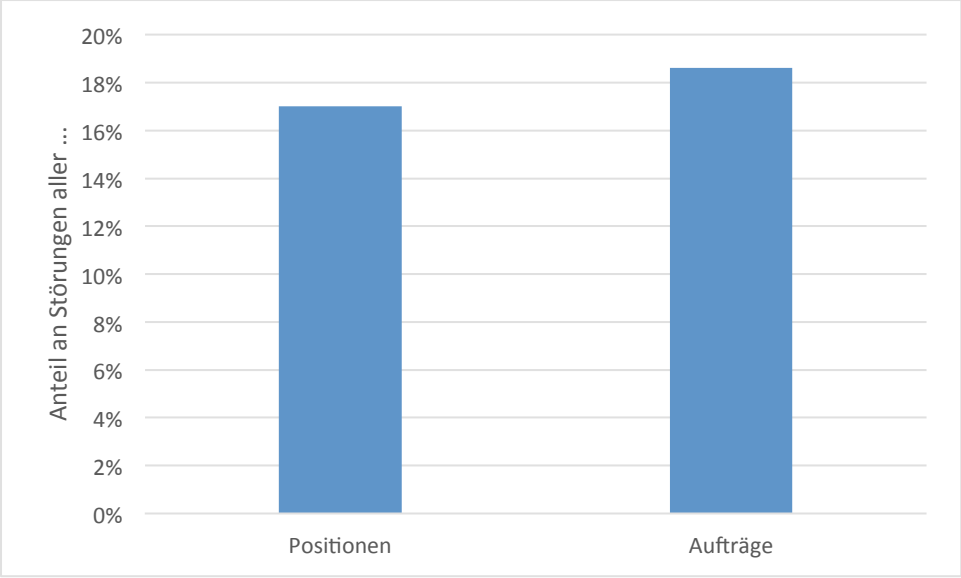


Abbildung 42: Anteil nicht fehlerfrei verlaufener Positionen bzw. Aufträgen mit RFID.

Die Analyse der Störungen zeigt, dass sich nicht alle Störungsarten im gleichen Maße durch RFID erhöhten (siehe Abbildung 43). Die Kommunikationsgeschwindigkeit blieb unverändert, wie am untersuchten Faktor „Fachanzeige reagiert zu langsam“ zu sehen ist. Im Gegensatz dazu haben sich die Störungen bezüglich der Verlässlichkeit der Übertragung von Aufträgen deutlich erhöht, genau genommen ist sie auf den dreifachen Wert (8,1%, vorher: 2,7%) angestiegen. Analog gilt dies für den Regalknoten. Bei diesem hat sich die Übertragungsrate mehr als halbiert; der Anteil fehlerbehafteter Aufträge lag hier bei 3,5% (vorher 1,6%). Die Verteilung auf die verschiedenen Verursacher ist ähnlich derer in Abbildung 40:Die Fachanzeigen hatten einen Anteil von 68%, die Regalknoten 26% und der Mensch mit 6%.

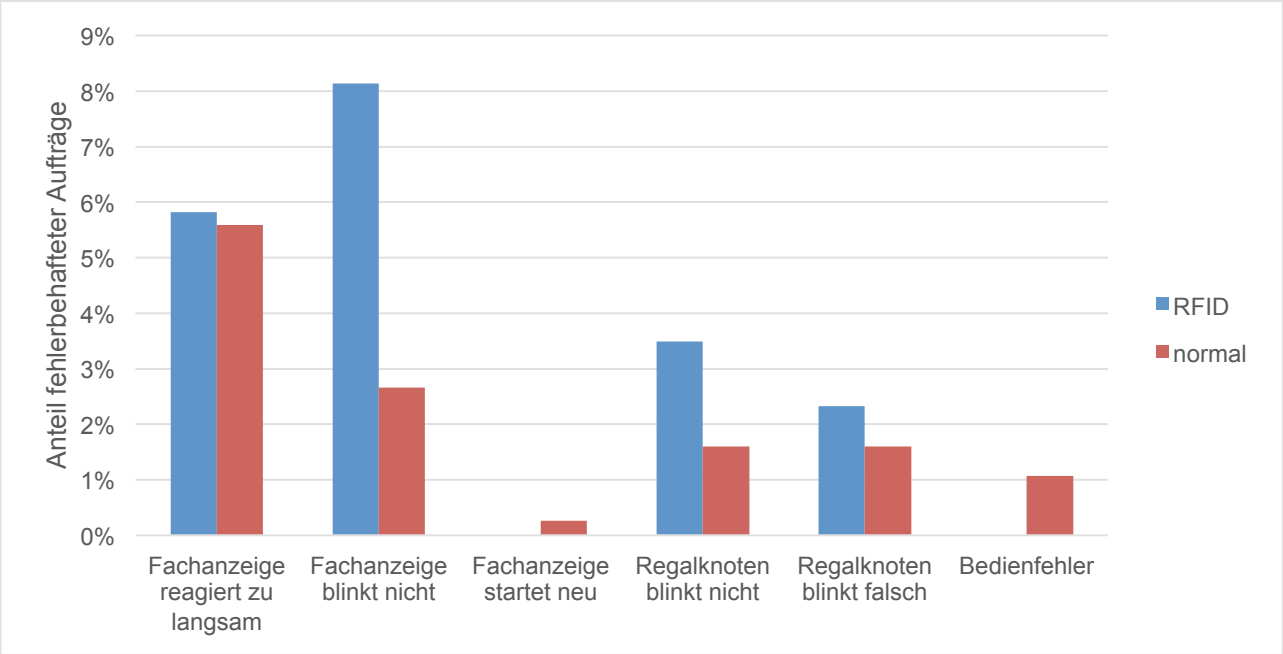


Abbildung 43: Auflistung der verschiedenen Störungsarten in Bezug auf die Aufträge mit / ohne RFID.

10.3.2 Beurteilung durch die Probanden

Die von den Versuchsteilnehmern ausgefüllten Fragebögen wurden auf die gleiche Verfahrensweise ausgewertet wie jene in Kapitel 9.1. Eingangs werden die negativen Bewertungen vorgestellt, anschließend die positiven und letztlich werden die Erkenntnisse aus den zwei Evaluierungsläufen gegenübergestellt.

Am schlechtesten wurde die *akustische Wahrnehmung* bewertet. Nach Abbildung 44 gaben 75% der Teilnehmer an, dass die Signale zum Gassenwechsel oder Auftragsende zu leise sind oder gar

nicht hörbar sind. In der Durchführung dieses Tests führte dies allerdings aufgrund der hybriden Benutzung von Pickliste und PbLL zu keinen bzw. nur geringen Verzögerungen.

Etwa ein Fünftel war der Meinung, dass die *Ergonomie* nicht optimal ist. Als Hauptkritikpunkt wurde hierbei genannt, dass man sich an den Fachanzeigen durch deren Dicke z. B. am Fuß stoßen kann.

Bezüglich der *Sprache* waren 18% der Antworten negativ. Als Grund hierfür wurde die zu kleine Darstellung der Anweisungen im Display der Fachanzeige angegeben. Dieses Problem wirkt sich auch auf die Bewertung der *visuellen Wahrnehmung* aus, demzufolge wurden 13% der Antworten mit einer negativen Tendenz gegeben.

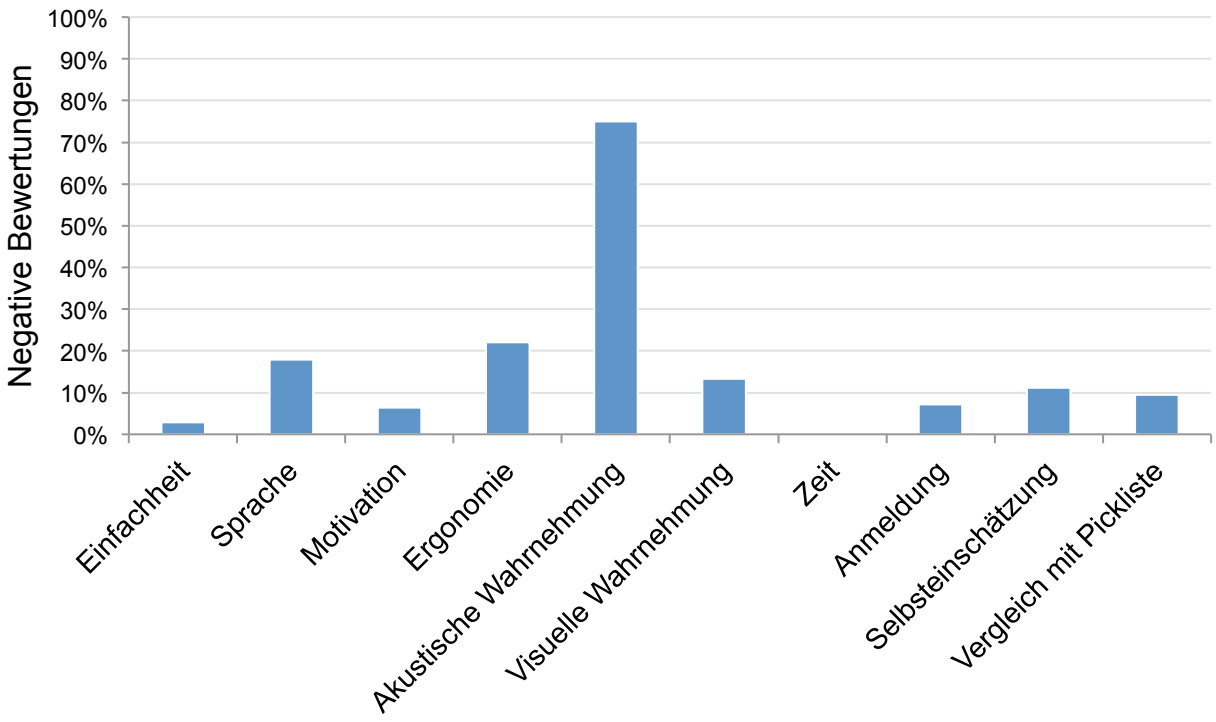


Abbildung 44: Negative Antworten im Fragebogen des Feldtests.

Im Gegensatz zu den Probandenversuchen in der fml-Versuchshalle, war die *Motivationssteigerung* durch das PbLL-System mit 81% Zustimmung die am besten bewertete Zielgröße. Ebenso überzeugte die Technologie bei der *Einfachheit* und beim *Vergleich mit der Kommissionierung mit Pickliste* mit über 84% positiven Stimmen. Aber auch die anderen Größen wurden deutlich besser bewertet als in den Probandenversuchen (siehe Abbildung 45).

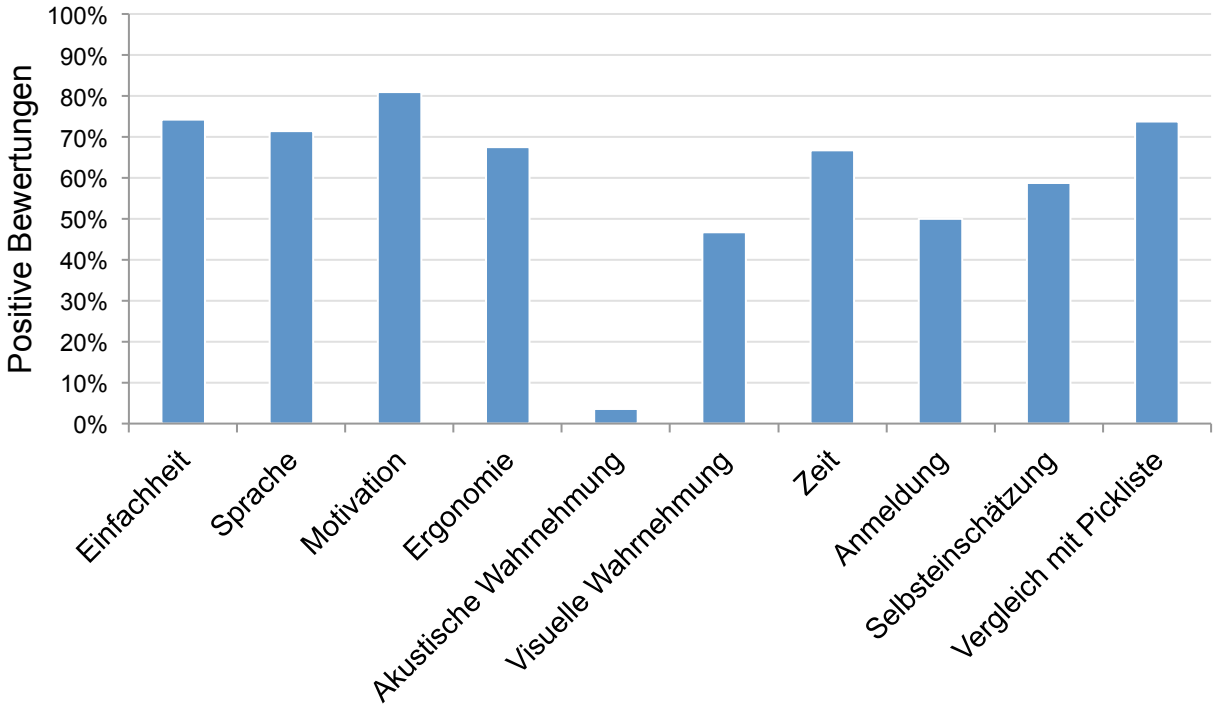


Abbildung 45: Positive Antworten im Fragebogen des Feldtests.

10.4 Fazit

Die finale Version des Demonstrators wurde bei der B/S/H/ Hausgeräte GmbH unter Einbindung in das Tagesgeschäft getestet. Während der vier Versuchstage wurde die Kommissionierung in keiner Weise negativ beeinträchtigt bzw. gestört. Während der Versuche traten zwar noch kleinere technische Schwierigkeiten auf, die aber in Anbetracht der zur Verfügung stehenden Entwicklungszeit schwer zu vermeiden sind.

Die eingangs definierten Ziele der Überprüfung der generellen Funktionsfähigkeit, der Praxistauglichkeit und der Verbesserung hinsichtlich des Standes zu den vorhergehenden akademischen Versuchen wurden erreicht. Wie in Abbildung 46 ersichtlich ist, wurden die positiv bewerteten Aspekte deutlich gestärkt und die negativen minimiert. Besonders die Praxistauglichkeit wurde von in der Kommissionierung erfahrenen Probanden mit einhundertprozentiger Zustimmung bestätigt. Vor dem Reengineering lag dieser Wert noch bei 40%.

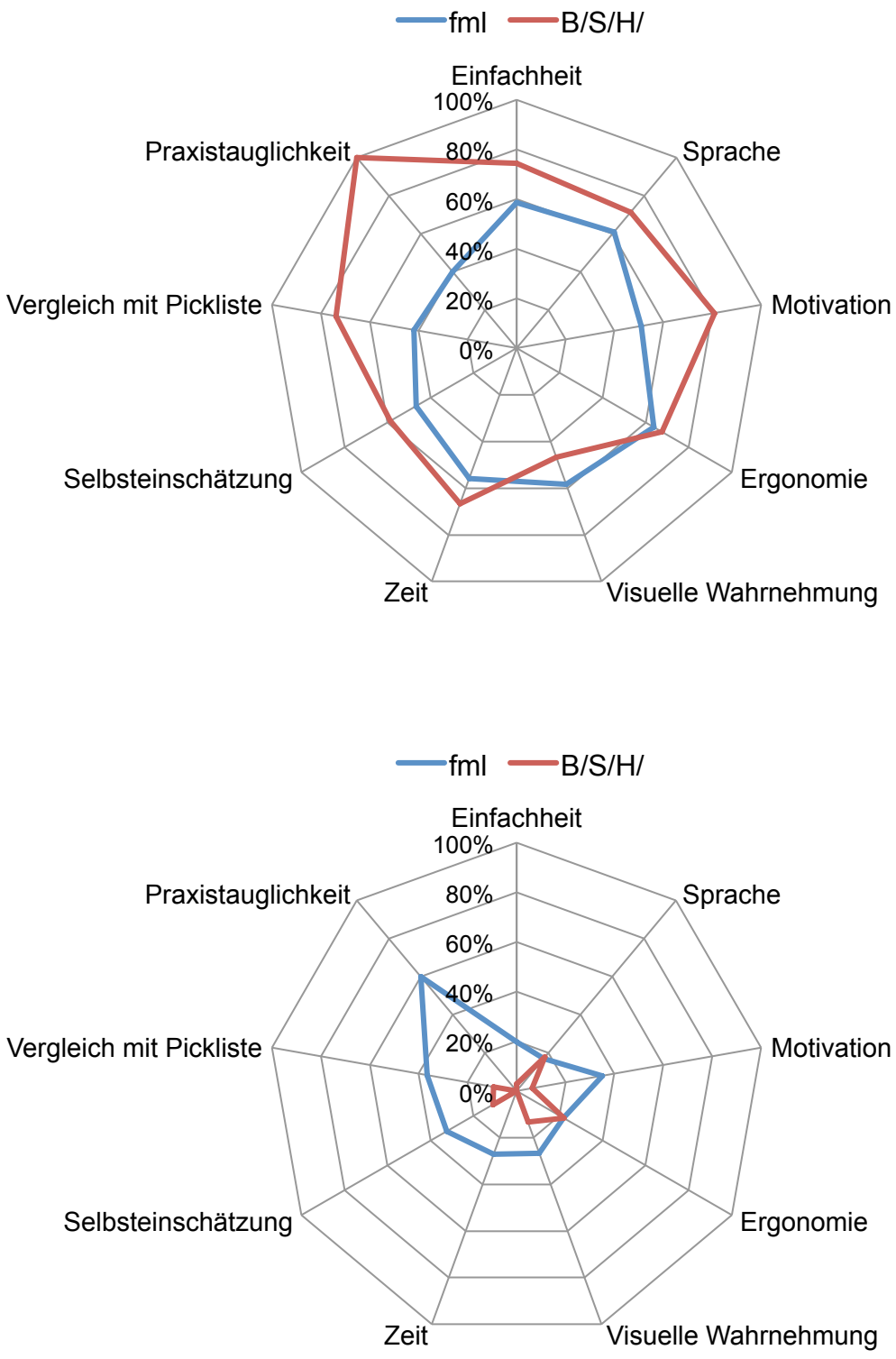


Abbildung 46: Vergleich der Fragebogenergebnisse (oben: Positive Bewertungen, unten: Negative Bewertungen)

11 Zusammenfassung und Ausblick

Wie beantragt wurde im Vorhaben ein Demonstrator eines drahtlosen Pick-by-Light-Systems mit standortabhängigen Funktionen entwickelt. Einige der Komponenten und Funktionen entsprachen der Vision des Antrags, andere mussten gemäß den Anforderungen der Anwender sowie Restriktionen der technischen Machbarkeit angepasst werden. Im Folgenden werden die Ergebnisse auf Einzelkomponenten- und im Anschluss auf Gesamtsystemebene zusammengefasst.

Auf Ebene der Hardware konnten drei Typen von Knoten entworfen und umgesetzt werden. Diese Hardware entspricht der skizzierten Vision im Antrag. Die Fachanzeigen umfassen ein Display zur Anzeige der Menge, Taster zur Bestätigung bzw. Anpassung der Auftragsinformationen und mehrfarbige LEDs. Durch den USB-C Anschluss kann die Hardware auch kabelgebunden betrieben werden. Die verwendeten Batterien gewährleisten einen einfachen Austausch und somit eine hohe Verfügbarkeit. Durch die mehrfarbigen LEDs können mehrere Kommissionierer vom System unterstützt werden.

Die s-net®-Technologie wurde im Projekt zielgerichtet weiterentwickelt. Die Vision sah vor, dass neben einer langen Batterielaufzeit sowohl eine hohe Skalierbarkeit, hohe Übertragungsgeschwindigkeiten als auch vielfältige standortabhängige Funktionen realisiert werden sollten. Die vier Ziele wiesen jedoch im Laufe des Projektes ein hohes Konfliktpotenzial auf. Daher wurden diese Ziele im Projekt priorisiert und die in der Anforderungsaufnahme wichtigeren Ziele vorgezogen. Es bestand ein Zielkonflikt zwischen einer langen Batterielaufzeit und einer hohen Lokalisierungsgenauigkeit bzw. Lokalisierungsrate. Denn es gilt: je genauer Objekte lokalisiert werden sollen, desto höher ist die Anzahl an Datenpaketen, die versendet werden müssen und desto niedriger ist in Folge auch die Batterielaufzeit. Aufgrund der niedrigen Priorisierung der Lokalisierungsfunktionalitäten wurde eine Annäherungslokalisierung umgesetzt, die erkennt, wenn ein mobiler Sensorknoten des Kommissionierers sich innerhalb einer Kommissionierzone befindet. Daneben bestand im Vorhaben ein Konflikt zwischen Skalierbarkeit und Übertragungsgeschwindigkeiten. In großen Netzen nehmen Latenzen zu, da zum einen mehr Pakete versendet werden müssen und zum anderen tiefere hierarchische Strukturen existieren. Daher wurden drei Leistungsprofile für die Konfiguration von s-net® umgesetzt, die es Unternehmen ermöglichen, dass sie das Funkprotokoll an ihre Bedarfe anpassen.

Die Umsetzung der Integrations- und Anwendungsplattform erfolgte gemäß der Vision aus dem Antrag. Die IAP besteht aus einer Integrationskomponente, die Warehouse Management System

und Sensornetz miteinander verbindet, sowie einer Anwendungskomponente. Auf der Anwendungskomponente können Auftragsdaten überwacht sowie Einstellungen des Gesamtsystems vorgenommen werden. Neben den beantragten Inhalten wurden noch einige zusätzliche Funktionalitäten umgesetzt. Beispielsweise mussten für die Feldtests bei B/S/H Hausgeräte Handscanner in das Gesamtsystem miteingebunden werden, um die Aufträge zu initialisieren. Diese wurden ebenfalls über die IAP eingebunden.

Neben den Entwicklungsschritten fanden über das ganze Projekt betriebswirtschaftlich geprägte Tätigkeiten statt. Eine extensive Anforderungsaufnahme gewährleistete eine zielgerichtete Entwicklung des Demonstrators. Dank Probandentests und eines Feldtests konnte diese Entwicklung schrittweise verfeinert werden. Leider gelang es nicht innerhalb der Projektlaufzeit einen zweiten Feldtest durchzuführen, da Anpassungen für die Integration des Systems in einen Live-Betrieb die beantragten Aufwände überstiegen.

12 Nutzen der Forschungsergebnisse für Unternehmen (insbesondere KMU)

In Zukunft sollen weitere KMU von den Projektergebnissen profitieren können. Dazu zählen unmittelbar Anbieter von Logistiksystemen und Hersteller der dafür notwendigen Hardware, die ihr Produktportfolio um ein innovatives Pick-by-Light-System erweitern können. Mittelständige Unternehmen als Anwender schlüsselfertiger Logistiksysteme profitieren ebenfalls von dem System, denn es garantiert ihnen die Freiheit, das Zusammenspiel zwischen physischer und digitaler Welt selbst konfigurieren zu können. Durch die Anwendung können Unternehmen ohne Zutun Dritter ihre Unterstützungssysteme auf ihre Bedarfe hin anpassen. Dies betrifft nicht nur lagerbetreibende Unternehmen, sondern auch Unternehmen, die anspruchsvolle Montagetätigkeiten mit einer prozesskritischen Materialzuführung verrichten müssen. Die erhöhte Flexibilität beim Einsatz technischer Hilfsmittel macht es den Unternehmen einfacher ihre Artikelstruktur saisonalen Bedarfen anzupassen. Dadurch können Effizienzpotenziale von den Unternehmen gehoben werden, die mit einem verkabelten Pick-by-Light-System nicht realisiert werden können. Die Möglichkeit temporäre Bereitstelleinheiten wie beispielsweise Gitterboxen in technische Unterstützungssysteme für die Kommissionierung einzubinden, senkt Fehlerquote und verbessert die Orientierung und damit die Geschwindigkeit von Kommissionierern.

Die drahtlose Kommunikation ermöglicht darüber hinaus weitere Anwendungen. Dank des Wegfalls der Verkabelung ist der Einsatz von Pick-by-Light-Modulen auf einem

Kommissionierwagen sehr leicht realisierbar. Darüber hinaus können diese Module auch an mobilen Arbeitsplätzen, bei Routenzügen, in der Verpackung von Waren sowie direkt am Behälter eingesetzt werden. Sie ermöglichen bei unternehmensübergreifendem Einsatz eine Übergabe und können damit gerade in Montageumgebungen zusätzliche Einsatzpotenziale für Pick-by-Light-Systeme heben.

Mittelbar liefern weitere Projektergebnisse Möglichkeiten für eine Verwertung bei KMU. Dazu zählen die Aussagen zu Hardwarekomponenten wie beispielsweise der Verwendung von Matrix-LC-Displays bei stromsparenden Anwendungen. Außerdem können die Aussagen zu Anforderungen an die Neuentwicklung von Kommissioniersystemen von Anwendern und Anbietern eine wertvolle Basis für zukünftige Entwicklungen darstellen. Projektteilergebnisse wie die angehängten Fragebögen können ebenso eine Grundlage für zukünftige Untersuchungen auf diesem Gebiet bilden und bieten die Möglichkeit zu überprüfen, inwieweit eine ganzheitliche Sichtweise bei der Implementierung von Unterstützungssystemen in der Kommissionierung eingenommen wurde.

Im Anschluss an das Projekt sollen weitere Entwicklungen dafür sorgen, dass die Industrietauglichkeit des Pick-by-Local-Light-Systems sichergestellt werden kann. Gemeinsam mit Partnern aus dem Projekt treiben Fraunhofer IIS und SCS diese Entwicklung. Dabei steht die Integration des Systems in Montageumgebungen im Vordergrund. Erste Gespräche wurden vor diesem Hintergrund bereits während der Projektlaufzeit geführt, und es ist davon auszugehen, dass bis 2018 eine industrietaugliche Version von Pick-by-Local-Light käuflich zu erwerben sein wird.

Im Zuge der zukünftigen Entwicklungen sollen vornehmlich Hardware-Komponenten überarbeitet, die Stabilität des Funkprotokolls weiter verbessert und Anpassungen vorgenommen werden, die das Zusammenspiel mit anderen Informationsbereitstellungstechnologien ermöglichen. Bereits hier profitieren KMU von den Projektergebnissen. Gemeinsam mit einem mittelständischen Unternehmen werden die Hardware-Platinen gefertigt, auf Basis derer Pick-by-Local-Light aufsetzt. Zukünftige Systemaufbauten und Tests sollen mit weit ausgedehnten Netzen mit deutlich mehr Knoten stattfinden. Die Ergebnisse von Pick-by-Local-Light münden darüber hinaus in Weiterentwicklungen in anderen Forschungsvorhaben.

So wird das erarbeitete Wissen z.B. im AiF-IGF Forschungsvorhaben ValidKomm eingesetzt, um eine fehlerfreie Kommissionierung zu ermöglichen. In der Forschungsinitiative „Digitale Wertschöpfung“ existiert darüber hinaus eine Leitanwendung „Unterstützung der Montage durch den Einsatz von Cyber-Physischen-Systemen“, bei der Inhalte von Pick-by-Local-Light zur

Anwendung kommen sollen. Das Konzept sieht es vor, dass die drahtlosen Fachanzeigen ebenfalls in diesem Vorhaben eingesetzt werden sollen, allerdings wird dabei eine dezentrale Einspeisung der Auftragsdaten über mobile Sensorknoten vorgenommen, die sich am Werkstück befinden.

Die Hardware- und Software-Entwicklungen aus dem Vorhaben Pick-by-Local-Light sollen darüber hinaus eine Plattform für eine Vielzahl von weiteren Entwicklungen im Bereich Logistik und Produktion bilden. Damit trägt Pick-by-Local-Light dazu bei, dass die Intralogistik erste Schritte hin zu der Vision einer Industrie 4.0 nehmen kann. Es stärkt damit nachhaltig Deutschland als innovativen Standort für Produktion und Logistik und verhilft sowohl anwendenden als auch anbietenden Unternehmen zu Wettbewerbsvorteilen gegenüber Wettbewerbern in einer globalisierten Welt.

13 Ergebnistransfer in Wirtschaft und Forschung

Während der Projektlaufzeit wurden umfangreiche Transfermaßnahmen durchgeführt. Diese sind in der folgenden Tabelle aufgeführt. Veröffentlichungen in dieser Liste, deren Veröffentlichungsdatum später als 06/2016 ist, wurden während der Projektlaufzeit eingereicht.

Maßnahme A: Projektbegleitender Ausschuss (PA)	Der Projektbegleitende Ausschuss (PA) stellt ein tragendes Element in der Konzeption dieses Forschungsvorhabens dar. Er sichert den engen Praxisbezug und sorgt gleichzeitig für eine frühzeitige Weitergabe von Untersuchungsergebnissen bereits während der Projektlaufzeit.	**A1**	Vorstellung des Projekts und Einbringung bedarfsbezogener Anforderungen der KMU	24.07.2014
		A2	Vorstellung und Diskussion des erarbeiteten Konzepts, Vorstellung der s-net Technologie	11.06.2015
		A3	Vorstellung und Diskussion der Projektergebnisse	06/2016
Maßnahme B: Vorträge	Präsentation von (Teil-)Ergebnissen des Projekts auf Fachtagungen vor Industrie und Wissenschaft	**B1**	Präsentation auf der Messe. „Transport und Logistik“	Mai 2015
		B2	Vortrag auf den „MHCL – Material Handling and Construction Logistics Conference	Vorstellung auf MHCL (23-25.09.)

		B3 Präsentation auf der „ZIO-Abschlusskonferenz“ sowie dem „Logistikforum“	25.-27.11.2015
Maßnahme C: Internetdarstellung	Elektronische Verbreitung der Forschungsinhalte und -ergebnisse Gewinnung weiterer interessierter Unternehmen	**C1** Vorstellung des Projekts über den Newsletter des Logistik-Innovations-Zentrums (liz) des Lehrstuhls fml sowie das Fraunhofer SCS Spezial	13.11.2014 und 10/2016
		C2 Internetauftritt des Forschungsvorhabens unter http://www.fml.mw.tum.de/fml/index.php?Set_ID=1029	Seit Juni 2014
Maßnahme D: Messepräsentationen	Ergebnistransfer in die Wirtschaft	**D1** Vorstellung des Projekts und des Demonstrators am „Forum schlanker Materialfluss“, der „Electronica“ und der „Embedded World“ sowie auf der Eröffnung des PULS-Zentrums in Landshut	Oktober 2015 (Deutscher Logistik Kongress), HMI April 2016 und Fachpack, September 2016, Vorstellung auf der RFID Tomorrow im September 2015 und 2016. Präsentation auf der PULS Eröffnung im April 2016
Maßnahme E: Veröffentlichungen	Präsentation von (Teil-)Ergebnissen des Projekts in Fachzeitschriften	**E1** Publikation in einschlägigen Fachzeitschriften wie „Fördern+Heben“, „Logistik heute“ und „Ident“	Hebezeuge und Fördermittel 01/2016 Ident: 04/2016 Logistik Heute.: 09/2016
Maßnahme F: Übernahme in die Lehre	Einbringung der erarbeiteten Ergebnisse in den Lehrbetrieb	**F1** Mitarbeit studentischer Hilfskräfte	Juni 2014 bis Juni 2016
		F2 Anfertigung von qualifizierenden studentischen Arbeiten und Durchführung von Praktika	März-November 2015 (zu WMS-Schnittstelle) November 2015 bis April 2016 (zu Probanden-versuchen)

Maßnahme G: Standardisierung	Einbringung der Erkenntnisse in Standardisierungsorganisationen für Sensornetze	**G1**	Vorstellung des anwendungsspezifischen Sensornetzprotokolls für die Standardisierungsaktivitäten in der JTC1 – WG 7 Sensor Networks	12/2015

Tabelle 9: Transfermaßnahmen

Im Anschluss an die Projektlaufzeit laufen zusätzlich umfangreiche Transfermaßnahmen. Im Forschungsvorhaben „Digitale Wertschöpfung“ werden die Projektergebnisse in eine industrielle Reife überführt sowie zusätzliche Funktionen und Einsatzmöglichkeiten erprobt. Gemeinsam mit Unternehmen werden weitere Pilotinstallationen geplant. Dafür wird das System vor Ort bei Unternehmen präsentiert, es werden gemeinsam Anforderungen für die Weiterentwicklung erhoben und Umsetzungen konzeptioniert sowie angestoßen. Im Zuge dieser Entwicklungen wird unter Anderem eine weitere Abschlussarbeit zu dem Thema ab Dezember 2016 betreut.

Die Demonstratoren verbleiben in der Forschungseinrichtung und werden auf logistik- und produktionsnahen Messen präsentiert. Die Projektergebnisse wurden darüber hinaus beim VW Logistik-Innovationsscouting eingereicht. Dort befinden sie sich nun unter den besten 18 Einreichungen und werden Ende November 2016 Entscheidern aus dem Volkswagen-Konzern präsentiert.

Erfolgte Veröffentlichungen:

Hölczli, A.; Lang, A.; Rögnitz, A.:

Pick-by-Light 2.0
Logistik Heute 09/16, S. 40-41. Huss Verlag, München 2016.

Hölczli, A.; Lang, A.; Dr. Evers, F.:

Pick-by-Local-Light: Drahtloses Pick-by-Light mit standortabhängigen Funktionen
ident, 21 (2016), 3, S. 46-49, ISSN 1432-3559

Hölczli, A.; Lang, A.; Dr. Evers, F.:

Knoten sind auch eine Lösung
Hebezeuge Fördermittel, 2016 (2016), 1-2, S. 28-30, ISSN 0017-9442

Lang, A.; Hölczli, A.; Günthner, W.A.:

Conception of an innovative order picking system by using a wireless sensor network In: Kartnig,G.; Zrnic, N.; Bosnjack, S., MHCL Tagungsband, Universität Belgrad, 2015, S. 129-132, ISBN 978 86 7083 863 5

14 Literaturverzeichnis

[Arn-03] Arnold, D.: Materialfluss in Logistiksystemen, Springer, Berlin, 2003

[Dla-06] Deutsche Logistik Akademie: Unterlagen zum Seminar Analyse und Bewertung von Kommissio-niersystemen. München, 9.-10. Mai 2006.

[Föl-05] Föller, J.: Vergleichsstudie „Pick-by-Voice“-Systeme. Teil II. F+H Fördern und Heben, 9/2005, S. 468-472.

[Fra-01] Frazelle, E.: Word-class warehousing and material handling, McGraw-Hill, New York, 2001

[Gün-12] Günthner, W. A.; Rammelmeier T.: Vermeidung von Kommissionierfehlern mit Pick-by-Vision. Forschungsbericht zum IGF-Vorhaben 16398 N der AiF-Forschungsvereinigung Bundesvereinigung Logistik (BVL) e.V., München, 2012

[Grü-16] Grün Software AG: Vorstellung Smartphone Arm-Scanner mLogiMore von Grün. Aufrufbar un-ter: https://www.gruen.net/intralogistik/hardware/mlogimore/. Zuletzt eingesehen am 01.08.2016.

[IEEE-03] IEEE Standard for Information Technology: IEEE 802.15.4 Telecommunications and information exchange between systems - Local and metropolitan area networks - Specific requirements Part 15.04.2003

[IEEE-07] IEEE Standard for Information technology --Telecommunications and information exchange between systems -- Local and metropolitan area networks -- Specific requirements. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, 2007

[Kai-10] Kaiser, T.: Welches Kommissionierverfahren darf´s denn sein?, http://www.ipl-mag.de/scm-daten/130-scm-daten-10, Aufruf am 12. 02.2013

[Kla-08] Klaus, P.; Krieger, W.: Gabler Lexikon Logistik – Management logistischer Netzwerke und Flüsse, Gabler, Wiesbaden, 2008

[Lan-01] Langen, K.-H.: Strategien für die Kommissionierung mit Regalbediengeräten, Karussellägern und Sortern, Jahrbuch der Logistik, Verlagsgruppe Handelsblatt, Düsseldorf, 2001

[Lan-15] Lang, A.; Hölczli, A.; Günthner, W.A. : Conception of an innovative order picking system by us-ing a wireless sensor network. In: Kartnig, G.; Zrnic, N.; Bosnjack, S., MHCL Tagungsband, Uni-versität Belgrad, 2015, S. 129-132.

[Lol-03] Lolling, A.: Analyse der menschlichen Zuverlässigkeit bei Kommissioniertätigkeiten. Dissertation, Universität Dortmund. Shaker Verlag, Aachen 2003.

[Luc-16] Luca Logistik Lösungen: Produkt Vorstellung Pick by Point. Aufrufbar unter:

http://www.luca.eu/de/pick-by-point/8-pick-by-point. Zuletzt eingesehen am 01.08.2016

[Mat-04] Materialfluss: Benchmarks für’s Order Picking. Materialfluss Markt 2004, S. 34-37.

[Mil-04] Miller, A. – Order Picking for the 21st Century – Voice vs. Scanning Technology. Whitepaper by Tompkins Associates. Raleigh, USA, 2004.

[Mue-12] Münch, U.; Hupp, J.: Drahtlose Sensornetze, State of the Art einer zukunftsträchtigen Auto-ID Technologie, Ident Verlag & Service GmbH, Dortmund, 2012

[Pan-11] Pan, J.C., Wu, M.: Throughput analysis for order picking system with multiple pickers and aisle congestion considerations, Computers & Operations Research, Volume 39, Issue 7, Juli 2012, Seiten 1661-1672,

[Pri-04] Pinkster, I., et al. Successful test management: an integral approach. Springer Science & Business Media, 2006.

[Rei-09] Reif, R.: Entwicklung und Evaluierung eines Augmented Reality unterstützten Kommissioniersys-tems. Dissertation am Lehrstuhl für Fördertechnik, Materialfluss und Logistik der Technischen Universität München, München, 2009.

[Rot-02] Roth, J.: Mobile Computing – Grundlagen, Technik, Konzepte, dpunkt, Heidelberg, 2002

[Saa-01] Thomas L. Saaty: Decision Making for Leaders – The Analytic Hierarchy Process for Decisions in a Complex World. 3. Auflage. RWS Publishing, Pittsburgh 2001

[Saf-16] Meta-Regalbau GmbH & Co. KG: Produktvorstellungen von Beamer Shuttle und Beamer Frame. Aufrufbar unter: http://www.meta-online.com/produkte/kommissioniersysteme/. Zuletzt eingese-hen am 01.08.2016.

[Sce-97] Scheid, W.-M.: Bedeutung und Entwicklung der Kommissionierung, Osnabrücker Logistik-Tag, Osnabrück, 1997

[SCS-16] Kile, C.; Schwemmer, M.: Die Top 100 der Logistik: Marktgrößen, Marktsegmente und Marktführer in der Logisitkdienstleistungswirtschaft,DVV Media Group, 2016

[Str-05] Straube, F.; Pfohl, H.-C.; Günthner, W. A.; Dangelmaier, W.: Trends und Strategien in der Logistik – Ein Blick auf die Agenda des Logistik-Managements 2010, Deutscher Verkehrsverlag, Bremen, 2005

[Str-08] Straube, F.; Pfohl, H.-C.: Trends und Strategien in der Logistik 2008: Globale Netzwerke im Wandel: Umwelt, Sicherheit, Internationalisierung, Menschen, DVV, Bremen, 2008

[Ten-04] ten Hompel, M.; Schmidt, T.: Warehouse Management - Automatisierung und Organisation von Lager- und Kommissioniersystemen. Springer Verlag, 2. Auflage, Berlin 2004.

[Ten-10] ten Hompel, M.; Sadowsky, V.; Beck, M.: Kommissionierung: Materialflusssysteme 2 – Planung und Berechnung der Kommissionierung in der Logistik, Springer Verlag, Berlin/ Heidelberg 2010.

[VDI3311] VDI 3311: Beleglose Kommissioniersysteme, Verein Deutscher Ingenieure e.V., Beuth, Düsseldorf, 1998

[VDI3590] VDI 3590: Blatt 1: Kommissioniersysteme – Grundlagen, Verein Deutscher Ingenieure e.V., Beuth, Düsseldorf, 1994

[Wea-10] Weaver, K. A. et al.: An Empirical Task Analysis of Warehouse Order Picking Using Head-Mounted Displays. Conference for Human Computer Interaction: Interactions in the World. Atlanta, USA, 2010.

[Yic-08] Yick, J., Mukherjee, B.; Ghosal, D.: “Wireless Sensor Network Survey”, Elsevier Computer Networks, April 2008

15 Anhang A – Fragebogen Industriebefragung

Fragebogen zur Analyse von Kommissioniersystemen in der Praxis

Unternehmen:
Branche:

Interviewpartner:

Position (Kommissionierer/ Lagerleiter/ Logistiker…):

Kontaktdaten:

Datum:

1. Art der Kommissionierung (Mehrfachnennung möglich Anteile in Prozent):

☐ Manuell ☐ Manuell/Mechanisch ☐ Automatisch (Kommissionierroboter)

2. Mit Hilfe welches Kommissioniersystems wird kommissioniert:

☐ Belegkommissionierung (Zettel)
☐ Pick-by-Light
☐ Pick-by-Scan
☐ Pick-by-Voice
☐ Anderes: _____

3. Genaue Beschreibung des Kommissioniersystems:
(Wie sieht der Beleg aus? (Beispielexemplar); Wie viele Farben werden (gleichzeitig) verwendet?; Welches Modell wird benutzt?...)

1

4. Wie erfolgte die Einweisung in das System? Gibt es Trainings? Wie oft?

5. Morphologischer Kasten Informationssystem nach VDI 3590
(entsprechendes ankreuzen/markieren)

INFORMATIONSSYSTEM					
Vorgang	Realisierungsmöglichkeiten				Beispiele
Vorbereitung der Kommissionierung					
Auftrags-erfassung	1 manuell	2 manuell automatisch	3 automatisch		1 Telefonische Auftrags-Annahme, manueller Übertrag in Auftragsformular 2 Eintippen Auftrags-Daten, automatische Erstellung des Auftragsformulars 3 On-line-EDV-Verbindung
Auftrags-aufbereitung	1 Teilauftrag	2 Einzelauftrag	3 Auftragsgruppen		1 Teilauftrag 2 Unveränderter Auftragsdurchlauf 3 Mehrere Aufträge mit gleichen Artikeln
	1 keine	2 manuell	3 manuell/ automatisch	4 automatisch	1 Direkte Weitergabe von Auftrags-erfassung zur Kommissionierung 2 Manuelle Beleg-Bearbeitung 3 Manuelle Parameter-Eingabe mit anschließender automatischer DV 4 Rechnergesteuerte Bearbeitung, z. B. abhängig von Systemauslastung
Weitergabe	1 ohne Beleg		2 mit Beleg		1 EDV-Terminal in Kommissionierzone 2 Kommissionierliste
	1 Einzelposition		2 mehrere Positionen		1 Abruf durch Kommissionierpersonal 2 Kommissionierliste
Durchführung der Kommissionierung					
Quittierung	1 je Entnahme-einheit	2 je Position	3 alle Positionen		1 Automatische Quittierung bei Kommissionierroboter 2 Positionsweises Abhaken auf Kommissionierliste 3 Endkontrolle; Quittierung Gesamtauftrag
	1 manuell	2 manuell/ automatisch	3 automatisch		1 Abhaken auf Kommissionierliste 2 Eintippen in BDE-Terminal 3 Automatische Artikelidentifikation durch Bar-Code nach Entnahme

6. Zusätzliche Anmerkungen/ Beschreibungen/ Erklärungen:

7. Morphologischer Kasten Materialflusssystem nach VDI 3590
(zutreffendes ankreuzen/markieren)

MATERIALFLUSS-SYSTEM							
Vorgang	Realisierungsmöglichkeiten					Materialfluß-einheit	Beispiele
Transport der Güter zur Bereitstellung	findet nicht statt	findet statt				Beschickungs-einheit	Palette Behälter Tray/Tablar
		eindimensional	zweidimensional	dreidimensional			
		manuell	mechanisch	automatisch			
Bereitstellung	statisch		dynamisch			Bereitstell-einheit	Palette Behälter, Schachtel Tray/Tablar
	zentral		dezentral				
	geordnet		ungeordnet				
Bewegung des Kommissionierers zur Bereitstellung	findet nicht statt	findet statt				Sammel-einheit	Palette Behälter, Schachtel Tray/Tablar
		eindimensional	zweidimensional	dreidimensional			
		manuell	mechanisch	automatisch			
Entnahme der Güter durch den Kommissionierer	manuell	mechanisch		automatisch		Entnahme-einheit	Schachtel Bündel, Packung Einzelteil
	ein Teil pro Zugriff		mehrere Einzelteile je Zugriff				
Transport der Güter zum Abgabeort	findet nicht statt	findet statt				Sammel-einheit	Palette/Behälter Schachtel Tray/Tablar
		eindimensional	zweidimensional	dreidimensional			
		manuell	mechanisch	automatisch			
Abgabe	statisch		dynamisch			Sammel-einheit Versandeinheit	Palette Behälter, Schachtel Tray/Tablar
	zentral		dezentral				
	geordnet		ungeordnet				
Rücktransport der angebrochenen Ladeeinheiten	findet nicht statt	findet statt				Beschickungs-einheit	Palette Behälter Tray/Tablar
		eindimensional	zweidimensional	dreidimensional			
		manuell	mechanisch	automatisch			

8. Zusätzliche Anmerkungen/ Beschreibungen/ Erklärungen:

9. Gesamtzahl der Kommissionierer im Kommissioniersystem
(manuell und manuell/ mechanisch): _____

10. Wie oft wechseln die Kommissionierer (Neueinstellung/ Ruhestand/ Aushilfen)**?**

_____

11. Wie groß ist das Kommissionierlager?
(Anzahl der Lagerfächer & Stellplätze) _____

12. Wartungsintervall/-aufwand und wer wartet oder stellt um?

13. Installationsaufwand

14. Was sind die grundsätzlichen Aufgaben des Kommissioniersystems?

15. Was sind die größten Herausforderungen dabei?

16. Was sind die Stärken und Schwächen des Kommissioniersystems?

17. Welches Inventurverfahren wird angewandt (Zeitintervall)**?**

18. Warum wurde das derzeitige Kommissioniersystem ausgewählt?

Artikelanalyse

19. Wie viele unterschiedliche Artikel zur Kommissionierung beinhaltet das Lager?

_____

20. Art der Artikel (viele ähnliche; kleine; handliche, durchschn. Wert…):

21. Kennt der Kommissionierer die Artikel im Lager?
(Erkennt er Unterschiede?; Kann er die Artikel unterscheiden?)

22. Wie hoch ist die Umschlagshäufigkeit der Artikel? (Wie oft kommen neue Artikel dazu, werden andere aus dem Sortiment genommen?)

Lagerlayout

23. Wie ist das Lager aufgebaut und warum bzw nach welchen Vorgaben wurde es optimiert (im manuellen Kommissionierbereich)**?**

24. Wie ist das Lager ausgestattet (Anzahl an Hubwagen/Rollwagen/Ameise/Stapler etc.; Stockwerke, Ebenen des Lagers, Außenbereich, etc.)**?**

25. Verändert sich das Layout des Lagers (Art der Veränderung, ggf. warum diese Veränderung → Bsp.: Palette am Boden als Bereitstelleinheit)**?**

26.1 Wie oft verändert sich das Lagerlayout (fixe Zeitpunkte/ Zeitabstände; Ereignis…)**?**

26.2. Wie und wann werden diese Veränderungen im Unternehmen kommuniziert?
(Wie lange vorher?; Über mündliche/ schriftliche Information des Lager-/Schichtleiters?
→Weitergabe der Informationen an die Mitarbeiter über Aushänge/ interne Memos…)

27. Subjektive Empfindung zur Belegungsstrategie? (Anordnung der Artikel: zu viele ähnliche Artikel nah beieinander→Verwechslung?; Kein logischer Aufbau? Artikel pro Lagerfach …)

Kommissionierung

28. Wie wird ein Kommissionierauftrag gestartet?
(Abscannen eines Barcodes mit MDT, über Tastendruck)

29. Erfolgt die Kommissionierung auftragsweise oder artikelorientiert?
(Zerlegen in Teilaufträge→ z.B. Batch; Aufteilung des Lagers in Zonen→ zonenparallele Kommissionierung)

30. Wie ist die Entnahmestrategie?
(FIFO, LIFO, chaotisch....)

31. Wie ist die Belegungsstrategie?
(statische/dynamische Pickplatzanordnung)

32. Wie ist die Bewegungsstrategie?
(Durchgangs-/Stichgangstrategie mit/ohne Gassenwechsel, Optimierung durch WMS?)

33. Wie ist die Leergutstrategie?
(Mitnahme leerer Bereitstelleinheiten / Abtransport über Fördertechnik)

34. Wie ist die Nachschubstrategie ?
(Starres/Dynamisches FlipFlop-Verfahren, Nachfüllverfahren, Steuerung durch WMS?)

35. Wie werden Eilaufträge gehandhabt?
(Spezielle Kennzeichnung von priorisierten Aufträgen vorhanden bzw. notwendig? Anteil von Eilaufträgen)

36. Komplette Auftragsbearbeitung (Kommissionierung nach Aufträgen):

Bearbeitung von mehreren Aufträgen gleichzeitig?
(Wie viele Abgabebehälter nach dem Picken gibt es?)
→ nur für mehrstufige Kommissionierung relevant!

☐ 1 ☐ 2 ☐ >2

37. Teilaufträge (artikelorientierte Kommissionierung)

☐ **Komplette Auftragsbearbeitung**

Wie viele Positionen enthält ein (Teil-)Auftrag?
Mittelwert (falls vorhanden): _____
Schwankungen (Min/Max): _____

In welcher Anzahl wird jeder Artikel benötigt?
Mittelwert: _____
Schwankungen (Min/Max): _____

38. Wie werden die kommissionierten Artikel transportiert?
(Pick-to-Box → mitgeführter Behälter; Pick-to-Belt → Förderband)

39. Wie hoch ist die Kommissionierleistung?
(Picks pro Stunde; Auftragsbearbeitungszeit zu Anzahl der Positionen…)

Kennzahl: _____

Mittelwert: _____

Min: _____

Max: _____

40. Wo und wie finden in der Kommissionierung Kontrollen statt? (Stichproben?; Wareneingang/ -ausgang?; Vor der Versendung zum Abnehmer?; jeder Abgabebehälter)

Fehlererfassung

41. Wie hoch ist Fehlerquote? Wie wird sie erfasst?
(Schätzungen-basierend worauf?; Reklamation?; feste Kontrollpunkte?…)

42. Kontrollpunkte:
Wer macht das?

☐ **Interner** (Kommissionierer)

☐ **Externer** (Wer?) _____

Lagereigenschaften

43. Art der Regale (Blocklager etc.) inkl. Werkstoffe der Lager/Oberflächen

44. Lager-/Regalabmessungen, Flächen-/Raumnutzungsgrad

45. Anteil der Kommissionierfläche an Gesamtfläche / Abmessungen des Kommissionierbereichs

46. Anzahl der Sendungen pro Monat

47. Anzahl der Rückläufer pro Monat

48. Art der Behälter, aus denen kommissioniert wird

49. Ggf. Art der Anbringung des PbL-Systems

50. Temperaturbereich im Lager

51. Beleuchtung außerhalb der Betriebszeiten

52. Anzahl der Lagerfächer und Lagerfachgröße

Wirtschaftliche Aspekte

53. Anschaffungskosten

54. Installationskosten

55. Wartungskosten

56. Wieviel darf eine Fachanzeige maximal Kosten?

Faktor Mensch

57. Wie sieht der typische Kommissionierer im Lager aus?
(Alter, Geschlecht, Bildung...)

58. Was sind die Aufgaben der Kommissionierer

59. Wie zufrieden sind die Mitarbeiter mit dem derzeitigen Kommissioniersystem? Was sind typische Kritikpunkte daran?

60. Wie lang sind die Betriebszeiten, Schichten der Kommissionierer?

Lagerverwaltungssystem

61. Was für ein WMS wird eingesetzt?

62. Wie werden erfolgreiche Aufträge verbucht? (Stichwort: WMS)

Technische Anforderungen

63. Was ist der aktuelle Energieverbrauch für das Kommissioniersystem? Gibt es Restriktionen?

64. Wie robust muss ein neues System sein? Welchen äußeren Einwirkungen sind die unterschiedlichen Komponenten ausgesetzt?

65. Welche Informationen sollen auf den Sensorknoten im Regal gespeichert werden?

66. Welche Informationen sollen auf den Displays am Kommissionierplatz angezeigt werden?

67. Welche Prämissen gelten für die Lesbarkeit der Displays?
(Höhe höchstes&niedrigstes Regal, Beleuchtung?)

68. Welchen Funksignalen wird ein solches System perspektivisch ausgesetzt sein?
(Wlan, etc...)

69. Wie hoch muss die Verfügbarkeit eines einzusetzen Systems sein?

Ausblick

70. Welche Trends haben Einfluss auf die Kommissionierung und das Kommissioniersystem?

71. Wird die Kommissionierung in Zukunft an Bedeutung gewinnen oder verlieren, mit Begründung.

16 Anhang B – AHP Konzepte

AHP - Analysis

Alternatives Ranking:

	Name	Value
1.	Konzept 2	31,81%
2.	Konzept 4	24,93%
3.	Konzept 1	23,78%
4.	Konzept 3	19,48%

Alternative-Main Criterion-Matrix:

	Anforderungseignung	Szenarieneignung
Konzept 1	23,12%	24,45%
Konzept 2	28,79%	34,82%
Konzept 3	18,45%	20,51%
Konzept 4	29,65%	20,21%

Consistency ratio: 0,00 (Critical consistency ratio: 0.1)

Main Criteria Weighting:

	Name	Value
1.	Szenarieneignung	50,00%
2.	Anforderungseignung	50,00%

Alternatives Summary

Name	Description
Konzept 2	Mobiler Sensorknoten
Konzept 4	Wearable Device
Konzept 1	Pick-by-Light
Konzept 3	Terminal

Criteria Summary

1. Main Criterion: Szenarieneignung

Parent(s): -

Description:

Weighting Matrix:

	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Szenario 1	1	6,00	8,00
Szenario 2	0,17	1	3,00
Szenario 3	0,12	0,33	1

Consistency ratio: 0,06 (Critical consistency ratio: 0.1)

Result (Ranking):

	Name	Value
1.	Konzept 2	34,82%
2.	Konzept 1	24,45%
3.	Konzept 3	20,51%
4.	Konzept 4	20,21%

1.1. Sub Criterion: Szenario 1

Parent(s): Szenarieneignung

Description:

Weighting Matrix:

	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4	Variante 5	keine Variation
Variante 1	1	4,00	2,00	1,00	0,50	0,25
Variante 2	0,25	1	0,50	0,25	0,17	0,12
Variante 3	0,50	2,00	1	0,50	0,25	0,17
Variante 4	1,00	4,00	2,00	1	0,50	0,25
Variante 5	2,00	6,00	4,00	2,00	1	0,50
keine Variation	4,00	8,00	6,00	4,00	2,00	1

Consistency ratio: 0,01 (Critical consistency ratio: 0.1)

Result (Ranking):

	Name	Value
1.	Konzept 2	35,36%
2.	Konzept 3	23,57%
3.	Konzept 4	22,54%
4.	Konzept 1	18,53%

1.1.1. Sub Criterion: keine Variation

Parent(s): Szenarieneignung.Szenario 1

Description:

Weighting Matrix:

	Konzept 1	Konzept 2	Konzept 3	Konzept 4
Konzept 1	1	0,33	1,00	1,00
Konzept 2	3,00	1	3,00	3,00
Konzept 3	1,00	0,33	1	1,00
Konzept 4	1,00	0,33	1,00	1

Consistency ratio: 0,00 (Critical consistency ratio: 0.1)

Result (Ranking):

	Name	Value
1.	Konzept 2	50,00%
2.	Konzept 1	16,67%
3.	Konzept 3	16,67%
4.	Konzept 4	16,67%

1.1.2. Sub Criterion: Variante 1

Parent(s): Szenarieneignung.Szenario 1

Description:

Weighting Matrix:

	Konzept 1	Konzept 2	Konzept 3	Konzept 4
Konzept 1	1	0,50	0,33	0,25
Konzept 2	2,00	1	0,50	0,50
Konzept 3	3,00	2,00	1	0,50
Konzept 4	4,00	2,00	2,00	1

Consistency ratio: 0,02 (Critical consistency ratio: 0.1)

Result (Ranking):

	Name	Value
1.	Konzept 4	43,48%
2.	Konzept 3	28,63%
3.	Konzept 2	18,20%
4.	Konzept 1	9,69%

1.1.3. Sub Criterion: Variante 2

Parent(s): Szenarieneignung.Szenario 1

Description:

Weighting Matrix:

	Konzept 1	Konzept 2	Konzept 3	Konzept 4
Konzept 1	1	1,00	1,00	1,00
Konzept 2	1,00	1	1,00	1,00
Konzept 3	1,00	1,00	1	1,00
Konzept 4	1,00	1,00	1,00	1

Consistency ratio: 0,00 (Critical consistency ratio: 0.1)

Result (Ranking):

	Name	Value
1.	Konzept 1	25,00%
2.	Konzept 2	25,00%
3.	Konzept 3	25,00%
4.	Konzept 4	25,00%

1.1.4. Sub Criterion: Variante 3

Parent(s): Szenarieneignung.Szenario 1

Description:

Weighting Matrix:

	Konzept 1	Konzept 2	Konzept 3	Konzept 4
Konzept 1	1	1,00	0,33	3,00
Konzept 2	1,00	1	0,33	3,00
Konzept 3	3,00	3,00	1	5,00
Konzept 4	0,33	0,33	0,20	1

Consistency ratio: 0,02 (Critical consistency ratio: 0.1)

Result (Ranking):

	Name	Value
1.	Konzept 3	52,22%
2.	Konzept 1	19,98%
3.	Konzept 2	19,98%
4.	Konzept 4	7,81%

1.1.5. Sub Criterion: Variante 4

Parent(s): Szenarieneignung.Szenario 1

Description:

Weighting Matrix:

	Konzept 1	Konzept 2	Konzept 3	Konzept 4
Konzept 1	1	0,33	1,00	1,00
Konzept 2	3,00	1	1,00	1,00
Konzept 3	1,00	1,00	1	1,00
Konzept 4	1,00	1,00	1,00	1

Consistency ratio: 0,06 (Critical consistency ratio: 0.1)

Result (Ranking):

	Name	Value
1.	Konzept 2	33,10%
2.	Konzept 3	24,07%
3.	Konzept 4	24,07%
4.	Konzept 1	18,76%

1.1.6. Sub Criterion: Variante 5

Parent(s): Szenarieneignung.Szenario 1

Description:

Weighting Matrix:

	Konzept 1	Konzept 2	Konzept 3	Konzept 4
Konzept 1	1	1,00	1,00	1,00
Konzept 2	1,00	1	1,00	1,00
Konzept 3	1,00	1,00	1	1,00
Konzept 4	1,00	1,00	1,00	1

Consistency ratio: 0,00 (Critical consistency ratio: 0.1)

Result (Ranking):

	Name	Value
1.	Konzept 1	25,00%
2.	Konzept 2	25,00%
3.	Konzept 3	25,00%
4.	Konzept 4	25,00%

1.2. Sub Criterion: Szenario 2

Parent(s): Szenarieneignung

Description:

Weighting Matrix:

	Konzept 1	Konzept 2	Konzept 3	Konzept 4
Konzept 1	1	1,00	7,00	8,00
Konzept 2	1,00	1	2,00	7,00
Konzept 3	0,14	0,50	1	2,00
Konzept 4	0,12	0,14	0,50	1

Consistency ratio: 0,05 (Critical consistency ratio: 0.1)

Result (Ranking):

	Name	Value
1.	Konzept 1	49,14%
2.	Konzept 2	34,48%
3.	Konzept 3	11,09%
4.	Konzept 4	5,29%

1.3. Sub Criterion: Szenario 3

Parent(s): Szenarieneignung

Description:

Weighting Matrix:

	Konzept 1	Konzept 2	Konzept 3	Konzept 4
Konzept 1	1	1,00	3,00	1,00
Konzept 2	1,00	1	3,00	1,00
Konzept 3	0,33	0,33	1	0,33
Konzept 4	1,00	1,00	3,00	1

Consistency ratio: 0,00 (Critical consistency ratio: 0.1)

Result (Ranking):

	Name	Value
1.	Konzept 1	30,00%
2.	Konzept 2	30,00%
3.	Konzept 4	30,00%
4.	Konzept 3	10,00%

2. Main Criterion: Anforderungseignung

Parent(s): -

Description:

Weighting Matrix:

	Akzeptanz	Einfachheit	Energieverbrauch	Entwicklungsaufwand	Fehlerquote	Flexibilität	Innovation	Inventureignung
Akzeptanz	1	0,33	0,20	1,00	0,20	0,25	0,25	0,33
Einfachheit	3,00	1	0,33	3,00	0,33	1,00	1,00	3,00
Energieverbrauch	5,00	3,00	1	5,00	3,00	3,00	4,00	4,00
Entwicklungsaufwand	1,00	0,33	0,20	1	0,25	0,33	4,00	1,00
Fehlerquote	5,00	3,00	0,33	4,00	1	3,00	4,00	4,00
Flexibilität	4,00	1,00	0,33	3,00	0,33	1	1,00	4,00
Innovation	4,00	1,00	0,25	0,25	0,25	1,00	1	3,00
Inventureignung	3,00	0,33	0,25	1,00	0,25	0,25	0,33	1
Kommissionierzeit	6,00	4,00	0,33	5,00	1,00	4,00	3,00	6,00
Vereinbarkeit	0,33	0,33	0,25	1,00	0,33	0,25	0,33	1,00
Verfügbarkeit	5,00	4,00	1,00	5,00	3,00	5,00	3,00	7,00

	Kommissionierzeit	Vereinbarkeit	Verfügbarkeit
Akzeptanz	0,17	3,00	0,20
Einfachheit	0,25	3,00	0,25
Energieverbrauch	3,00	4,00	1,00
Entwicklungsaufwand	0,20	1,00	0,20
Fehlerquote	1,00	3,00	0,33
Flexibilität	0,25	4,00	0,20
Innovation	0,33	3,00	0,33
Inventureignung	0,17	1,00	0,14
Kommissionierzeit	1	5,00	0,33

	Kommissionierzeit	Vereinbarkeit	Verfügbarkeit
Vereinbarkeit	0,20	1	0,33
Verfügbarkeit	3,00	3,00	1

Consistency ratio: 0,09 (Critical consistency ratio: 0.1)

Result (Ranking):

	Name	Value
1.	Konzept 4	29,65%
2.	Konzept 2	28,79%
3.	Konzept 1	23,12%
4.	Konzept 3	18,45%

2.1. Sub Criterion: Verfügbarkeit

Parent(s): Anforderungseignung

Description:

Weighting Matrix:

	Konzept 1	Konzept 2	Konzept 3	Konzept 4
Konzept 1	1	1,00	2,00	0,50
Konzept 2	1,00	1	2,00	0,50
Konzept 3	0,50	0,50	1	0,33
Konzept 4	2,00	2,00	3,00	1

Consistency ratio: 0,00 (Critical consistency ratio: 0.1)

Result (Ranking):

	Name	Value
1.	Konzept 4	42,36%
2.	Konzept 1	22,70%
3.	Konzept 2	22,70%
4.	Konzept 3	12,23%

2.2. Sub Criterion: Energieverbrauch

Parent(s): Anforderungseignung

Description:

Weighting Matrix:

	Konzept 1	Konzept 2	Konzept 3	Konzept 4
Konzept 1	1	0,50	0,50	0,25
Konzept 2	2,00	1	1,00	0,25
Konzept 3	2,00	1,00	1	0,25
Konzept 4	4,00	4,00	4,00	1

Consistency ratio: 0,02 (Critical consistency ratio: 0.1)

Result (Ranking):

	Name	Value
1.	Konzept 4	56,65%
2.	Konzept 2	16,64%
3.	Konzept 3	16,64%
4.	Konzept 1	10,06%

2.3. Sub Criterion: Flexibilität

Parent(s): Anforderungseignung

Description:

Weighting Matrix:

	Konzept 1	Konzept 2	Konzept 3	Konzept 4
Konzept 1	1	1,00	3,00	1,00
Konzept 2	1,00	1	3,00	1,00
Konzept 3	0,33	0,33	1	0,33
Konzept 4	1,00	1,00	3,00	1

Consistency ratio: 0,00 (Critical consistency ratio: 0.1)

Result (Ranking):

	Name	Value
1.	Konzept 1	30,00%
2.	Konzept 2	30,00%
3.	Konzept 4	30,00%
4.	Konzept 3	10,00%

2.4. Sub Criterion: Fehlerquote

Parent(s): Anforderungseignung

Description:

Weighting Matrix:

	Konzept 1	Konzept 2	Konzept 3	Konzept 4
Konzept 1	1	1,00	1,00	2,00
Konzept 2	1,00	1	1,00	4,00
Konzept 3	1,00	1,00	1	3,00
Konzept 4	0,50	0,25	0,33	1

Consistency ratio: 0,02 (Critical consistency ratio: 0.1)

Result (Ranking):

	Name	Value
1.	Konzept 2	32,44%
2.	Konzept 3	29,86%
3.	Konzept 1	27,29%
4.	Konzept 4	10,41%

2.5. Sub Criterion: Kommissionierzeit

Parent(s): Anforderungseignung

Description:

Weighting Matrix:

	Konzept 1	Konzept 2	Konzept 3	Konzept 4
Konzept 1	1	0,50	1,00	1,00
Konzept 2	2,00	1	1,00	5,00
Konzept 3	1,00	1,00	1	3,00
Konzept 4	1,00	0,20	0,33	1

Consistency ratio: 0,07 (Critical consistency ratio: 0.1)

Result (Ranking):

	Name	Value
1.	Konzept 2	39,67%
2.	Konzept 3	29,51%
3.	Konzept 1	19,19%
4.	Konzept 4	11,63%

2.6. Sub Criterion: Innovation

Parent(s): Anforderungseignung

Description:

Weighting Matrix:

	Konzept 1	Konzept 2	Konzept 3	Konzept 4
Konzept 1	1	0,33	0,33	0,33
Konzept 2	3,00	1	1,00	0,50
Konzept 3	3,00	1,00	1	0,50
Konzept 4	3,00	2,00	2,00	1

Consistency ratio: 0,02 (Critical consistency ratio: 0.1)

Result (Ranking):

	Name	Value
1.	Konzept 4	41,46%
2.	Konzept 2	24,36%
3.	Konzept 3	24,36%
4.	Konzept 1	9,82%

2.7. Sub Criterion: Entwicklungsaufwand

Parent(s): Anforderungseignung

Description:

Weighting Matrix:

	Konzept 1	Konzept 2	Konzept 3	Konzept 4
Konzept 1	1	3,00	4,00	3,00
Konzept 2	0,33	1	2,00	1,00
Konzept 3	0,25	0,50	1	0,50
Konzept 4	0,33	1,00	2,00	1

Consistency ratio: 0,01 (Critical consistency ratio: 0.1)

Result (Ranking):

	Name	Value
1.	Konzept 1	51,58%
2.	Konzept 2	18,94%
3.	Konzept 4	18,94%
4.	Konzept 3	10,54%

2.8. Sub Criterion: Akzeptanz

Parent(s): Anforderungseignung

Description:

Weighting Matrix:

	Konzept 1	Konzept 2	Konzept 3	Konzept 4
Konzept 1	1	2,00	3,00	4,00
Konzept 2	0,50	1	2,00	3,00
Konzept 3	0,33	0,50	1	2,00
Konzept 4	0,25	0,33	0,50	1

Consistency ratio: 0,01 (Critical consistency ratio: 0.1)

Result (Ranking):

	Name	Value
1.	Konzept 1	46,73%
2.	Konzept 2	27,72%
3.	Konzept 3	16,01%
4.	Konzept 4	9,54%

2.9. Sub Criterion: Inventureignung

Parent(s): Anforderungseignung

Description:

Weighting Matrix:

	Konzept 1	Konzept 2	Konzept 3	Konzept 4
Konzept 1	1	1,00	2,00	8,00
Konzept 2	1,00	1	2,00	8,00
Konzept 3	0,50	0,50	1	6,00
Konzept 4	0,12	0,12	0,17	1

Consistency ratio: 0,01 (Critical consistency ratio: 0.1)

Result (Ranking):

	Name	Value
1.	Konzept 1	37,45%
2.	Konzept 2	37,45%
3.	Konzept 3	20,84%
4.	Konzept 4	4,25%

2.10. Sub Criterion: Einfachheit

Parent(s): Anforderungseignung

Description:

Weighting Matrix:

	Konzept 1	Konzept 2	Konzept 3	Konzept 4
Konzept 1	1	0,33	2,00	4,00
Konzept 2	3,00	1	4,00	7,00
Konzept 3	0,50	0,25	1	0,33
Konzept 4	0,25	0,14	3,00	1

Consistency ratio: 0,16 (Critical consistency ratio: 0.1)

Result (Ranking):

	Name	Value
1.	Konzept 2	55,37%
2.	Konzept 1	24,19%
3.	Konzept 4	11,72%
4.	Konzept 3	8,72%

2.11. Sub Criterion: Vereinbarkeit

Parent(s): Anforderungseignung

Description:

Weighting Matrix:

	Konzept 1	Konzept 2	Konzept 3	Konzept 4
Konzept 1	1	1,00	4,00	8,00
Konzept 2	1,00	1	4,00	6,00
Konzept 3	0,25	0,25	1	4,00
Konzept 4	0,12	0,17	0,25	1

Consistency ratio: 0,04 (Critical consistency ratio: 0.1)

Result (Ranking):

	Name	Value
1.	Konzept 1	42,27%
2.	Konzept 2	39,88%
3.	Konzept 3	12,96%
4.	Konzept 4	4,90%

17 Anhang C – Fragebogen

Dieser Fragebogen besteht sowohl aus offenen als auch aus geschlossenen Fragen.

- Offene Fragen: Bitte beantworten Sie diese Fragen leserlich und verständlich.

- Geschlossene Fragen:

    - Teil 1 und 3: hier werden Ihnen jeweils mehrere Antwortmöglichkeiten angeboten. Bitte kreuzen Sie bei jeder Frage nur **eine** Antwort an.

    - Teil 2: hier erhalten Sie Aussagen, die Sie bitte Ihrer Meinung nach anhand **eines** Kreuzes in der entsprechenden Spalte bewerten.

Bitte nehmen Sie sich für diesen Fragebogen (bestehend aus drei Teilen) die benötigte Zeit um diesen nach Ihren persönlichen Einschätzungen und eigenem Wissen auszufüllen.

Teil 1:

I. Allgemein

1. Kennen Sie sich mit Kommissionieren aus? ☐ Ja ☐ Nein
2. Wie viel Erfahrung haben Sie bereits im Bereich Kommissionieren? ☐ < 5 Jahre ☐ 5-10 Jahre ☐ 11-25 Jahre ☐ 26- 40 Jahre ☐ ≥ 41 Jahre
3. Haben Sie Erfahrung im Kommissionierverfahren Pick-by-Light? ☐ Ja ☐ Nein
4. Haben Sie bereits an anderen Versuchen teilgenommen? ☐ Ja ☐ Nein

Teil 2:

II. Einfachheit

	Stimme voll zu	Stimme eher zu	Teils/ teils	Stimme eher nicht	Stimme gar nicht	Keine Aussage

				zu	zu	
Das Kommissioniersystem Pick-by-Local-Light ist einfach zu bedienen.						
Die Funktionsweise des Kommissioniersystem ist schwer zu verstehen.						
Das Kommissioniersystem ist einfach umzusetzen.						
Die Mengenkorrektur (+ und -) ist einfach zu bedienen.						
Die Einarbeitung ist aufwendig.						

III. Sprache

	Stimme voll zu	Stimme eher zu	Teils/ teils	Stimme eher nicht zu	Stimme gar nicht zu	Keine Aussage
Das Kommissioniersystem ist gut verständlich.						
Die Erklärung des neuen Kommissioniersystem war gut zu verstehen.						
Die Anweisungen am Display sind sprachlich gut beschrieben.						
Die Einführung war zu detailliert erklärt.						

IV. Motivation

	Stimme	Stimme	Teils/	Stimme	Stimme	Keine

	voll zu	eher zu	teils	eher nicht zu	gar nicht zu	Aussage
Wegen dem drahtlosen Kommissionieren habe ich Angst vor Strahlungen.						
Das neue Kommissioniersystem motiviert mich bei der Arbeit.						
Das System Pick-by-Local-Light macht die Arbeit interessant.						
Die Tätigkeit ist angemessen für die Länge der Arbeitszeit.						
Das Erlernen vom Pick-by-Local-Light System fördert mein eigenes Interesse am Kommissionieren.						
Das neue System demotiviert mich bei der Arbeit als Kommissionierer.						
Die Arbeit wird durch das System Pick-by-Local-Light interessant.						
Pick-by-Local-Light beugt Kommissionierfehler vor.						
Das Kommissioniersystem funktioniert besser als erwartet.						

V. Ergonomie

	Stimme voll zu	Stimme eher zu	Teils/ teils	Stimme eher nicht zu	Stimme gar nicht zu	Keine Aussage
Die Tasten an der Fachanzeige sind gut angeordnet.						
Die Tasten haben eine ausreichende Größe.						
Beim Betätigen der Tasten rutsche ich von der Taste ab.						
Die Tasten sind zu groß.						
Die Tasten sind zu klein.						
Es ist unklar, welche Fach-anzeige zu welcher Box gehört.						
Die Position der Fachanzeige ist gut gewählt.						
Die Position der Fachanzeige ist zu hoch.						
Die Position der Fachanzeige ist zu niedrig.						
Die Quittierungstaste ist gut hervorgehoben.						
Bei der Fachanzeige ist es gut ersichtlich welche Taste für welche Funktion steht.						

Was wäre die bevorzugte Position der Fachanzeige bezogen auf den Behälter:

☐ oberhalb ☐ unterhalb ☐ links ☐ rechts

☐ auf dem Behälter ☐ andere Position

VI. Akustische Wahrnehmung

	Stimme voll zu	Stimme eher zu	Teils/ teils	Stimme eher nicht zu	Stimme gar nicht zu	Keine Aussage
Der Ton bei Auftragsende ist gut zu hören.						
Ist ein Auftrag zu Ende, so ertönt immer ein Piepton.						
Es ist eindeutig welche Fachanzeige piepst, wenn gerade zwei Aufträge gleichzeitig zu Ende sind.						
Bei mehreren Kommissionierern in einer Zone ist der Ton gut zuzuordnen.						

VII. Visuelle Wahrnehmung

	Stimme voll zu	Stimme eher zu	Teils/ teils	Stimme eher nicht zu	Stimme gar nicht zu	Keine Aussage
Gleichzeitiges Kommissionieren wird durch die unterschiedlichen Lichterfarben ermöglicht.						
Fachanzeige						
Die unterschiedlichen Lichterfarben an den Fachanzeigen sind eindeutig erkennbar.						
Die zugeteilte Farbe ist schwer zu erkennen.						
Die Anzeige am Display der Fachanzeige ist zu hell.						
Die Blickfangleuchte an der						

Fachanzeige ist zu hell.						

	Stimme voll zu	Stimme eher zu	Teils/ teils	Stimme eher nicht zu	Stimme gar nicht zu	Keine Aussage
Die unterschiedlichen Farben sind gut zuzuordnen.						
Die Entnahmemenge an der Fachanzeige ist gut lesbar.						
Die Mengenkorrekturtasten (+ und -) sind einfach zu erkennen.						
Die verschiedenen Farben in einer Gasse verwirren mich beim Kommissionieren.						
Gassenknoten						
Die für den Gassenwechsel angebrachte Lichter an den Regalen sind gut erkennbar.						
Das Aufblinken des Gassenknotens macht deutlich, dass nun ein Gassenwechsel stattfindet.						
Die unterschiedlichen Farben am Gassenknoten sind auch bei weiter Entfernung gut zu erkennen.						
Die Lichter an den Regalen sind zu hell.						
Das dauerhafte blinken des Gassenknotens an der Regalfront ist störend.						
Das Blinken an den Regalen lenkt mich beim						

Kommissionieren ab.						

VIII. Zeit

	Stimme voll zu	Stimme eher zu	Teils/ teils	Stimme eher nicht zu	Stimme gar nicht zu	Keine Aussage
Die Einarbeitung in das neue System ist zeitintensiv.						
Da ein Kommissionierer seinen eigenen Weg zwischen den Regalen wählen darf, wird dadurch Zeit gespart.						
Es kostet viel Zeit die ideale Route in den Gassen zu finden, da alle Fachanzeigen leuchten.						

IX. Anmeldung

	Stimme voll zu	Stimme eher zu	Teils/ teils	Stimme eher nicht zu	Stimme gar nicht zu	Keine Aussage
Die Anmeldung in dem Kommissionierbereich verläuft reibungslos.						
Der erste Auftrag wurde direkt bei der Anmeldung erteilt.						
Sobald der vorherige Auftrag beendet ist, wird sofort ein neuer Auftrag gestartet.						
Die Zuteilung der Farbe						

dauert extrem lange bei der Anmeldung.						

X. Selbsteinschätzung

	Stimme voll zu	Stimme eher zu	Teils/ teils	Stimme eher nicht zu	Stimme gar nicht zu	Keine Aussage
Das Kommissionieren mit dem neuen System verläuft reibungslos.						
Es werden keine Vorteile zum Pick-by-Light System gesehen.						
Mit dem Pick-by-Local-Light wird Zeit gespart.						
Ich bin mit dem neuen System sehr zufrieden.						
Durch das neue Kommissioniersystem passieren weniger Fehler.						
Die Fachanzeige ist selbsterklärend.						
Es macht mir Spass den eigenen Weg beim Kommissionieren wählen zu dürfen.						
Da ich den Weg selber wählen kann, passieren weniger Zusammenstöße mit anderen Mitarbeitern.						
Ich bevorzuge, jeden Tag die selbe Farbe zugeteilt zu						

bekommen.						

XI. Vergleich mit herkömmlichen Systemen

In dieser Rubrik wird das Kommissioniersystem Pick-by-Local-Light mit der Pickliste verglichen.

	Stimme voll zu	Stimme eher zu	Teils/ teils	Stimme eher nicht zu	Stimme gar nicht zu	Keine Aussage
Pick-by-Local-Light ist einfacher zu bedienen als eine manuelle Pickliste.						
Das neue Kommissioniersystem ist genauer als die manuelle Pickliste.						
Pick-by-Local-Light ist zeitaufwändiger als die Pickliste.						
Das Kommissionieren macht mit dem Pick-by-Local-Light Verfahren mehr Spass.						
In der gleichen Zeit werden mehr Kommissionieraufträge beim Pick-by-Local-Light Verfahren abgearbeitet als mit einer Pickliste.						
Es passieren weniger Kommissionierfehler beim Pick-by-Local-Light als bei der manuellen Pickliste.						

Teil 3:

XII. Betrachtung des Gesamtsystems

1. Was ist besonders gut an diesem System:

2. Was sind die Nachteile des Systems:

3. Was könnten Ihrer Meinung nach die Anwendungsgebiete dieses Kommissioniersystems sein?

4. Ist dieses Kommissioniersystem Ihrer Meinung nach praxistauglich?

☐ Ja ☐ Nein ☐ Keine Aussage

XIII. Fragebogen

1. Beinhaltet dieser Fragebogen Ihrer Meinung nach zu viele Fragen?

☐ Ja ☐ Nein ☐ Keine Aussage

2. Ist dieser Fragebogen gut verständlich?

☐ Ja ☐ Nein ☐ Keine Aussage

3. Ist dieser Fragebogen vollständig?

☐ Ja ☐ Nein ☐ Keine Aussage

Falls nein, welche Bereiche/ Rubriken fehlen?

XIV. Persönliche Angaben

1. Geschlecht: ☐ Weiblich ☐ Männlich

2. Alter: ☐ ≤ 21 Jahre ☐ 21-30 Jahre ☐ 31-40 Jahre ☐ 41-50 Jahre ☐ ≥ 51 Jahre

3. Herkunftsland:

4. Ausbildung: ☐ Lagerwirtschaft ☐ Logistik ☐ Lagerist ☐ Keine Ausbildung ☐ Andere Ausbildung

Vielen Dank für Ihre Teilnahme!