

Schlussbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. 19570 N

Thema

Nutzenpotenziale intelligenter Beleuchtungssysteme für die Lagerwirtschaft am Beispiel der Kommissionierung

Berichtszeitraum

01.06.2017 - 31.10.2019

Forschungsvereinigung

Forschungsgemeinschaft Intralogistik / Fördertechnik und Logistiksysteme e.V. - IFL

Forschungsstelle(n)

Forschungsstelle 1: Technische Universität Darmstadt

Fachgebiet Produktion und Supply Chain Management

Forschungsstelle 2: RWTH Aachen

Deutsche Post Lehrstuhl für Optimierung von Distributionsnetzwerken

Intelligente Beleuchtungssysteme in der Lagerwirtschaft

Vorhaben Nr. 19570 N

Nutzenpotenziale intelligenter Beleuchtungssysteme für die Lagerwirtschaft am Beispiel der Kommissionierung

Abschlussbericht

Kurzfassung:

Die Zielsetzung des Projekts bestand in der Untersuchung von Nutzenpotenzialen intelligenter Beleuchtungssysteme in der Lagerhaltung. Intelligente Beleuchtungssysteme sind in der Lage, Gänge des Lagers nutzungsabhängig auszuleuchten, sodass die Beleuchtungsintensität und damit auch der Energieverbrauch an die tatsächliche Nutzung des Lagers angepasst werden kann. Da die Nutzungsintensität der Gänge des Lagers wiederum von der Steuerung des Lagers durch das Unternehmen abhängt und damit aktiv beeinflusst werden kann, entstehen zwischen den operativen Betriebsstrategien für das Lager und den Nutzenpotenzialen intelligenter Beleuchtungssysteme zahlreiche Wechselwirkungen. Diese Wechselwirkungen wurden im vorliegenden Projekt, insbesondere durch die Entwicklung integrierter mathematischer Optimierungsmodelle für die Kommissionierung sowie durch die Entwicklung eines Simulationsmodells, explizit untersucht. Die Bearbeitung der Themenstellung ist in enger Zusammenarbeit mit dem projektbegleitenden Ausschuss erfolgt.

Das Ziel des Forschungsvorhabens ist erreicht worden.

Berichtsumfang:	90 S., 23 Abb., 14 Tab., 101 Lit.
Laufzeit:	06.2017 - 10.2019
Zuschussgeber:	BMW/IGF-Nr. 19570 N
Forschungsstelle 1	Technische Universität Darmstadt (Abk. FS 1) Fachgebiet Produktion und Supply Chain Management Leiter: Prof. Dr. Christoph Glock
Forschungsstelle 2	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (Abk. FS 2) Deutsche Post Lehrstuhl für Optimierung von Distributionsnetzwerken Leiter: Prof. Dr. Michael Schneider
Bearbeiter und Verfasser:	Marc Füchtenhans (FS 1) Dr. Eric Grosse (FS 1) Dr. Fabian Beck (FS 1) Prof. Dr. Christoph Glock (FS 1) Maximilian Löffler (FS 2) Dr. Dominik Goeke (FS 2) Prof. Dr. Michael Schneider (FS 2)
Vorsitzender projektbegleitender Ausschuss:	Herr Andreas Scherb (VDMA)

Förderhinweis:

Die Analyse und Identifikation von Nutzenpotenzialen intelligenter Beleuchtungssysteme in der Lagerwirtschaft wurde im Rahmen des IGF-Vorhabens 19570 N „Nutzenpotenziale intelligenter Beleuchtungssysteme für die Lagerwirtschaft am Beispiel der Kommissionierung“ der Forschungsgemeinschaft Intralogistik Fördertechnik und Logistiksysteme e.V. (IFL), das über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AIF) im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung- und Entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des deutschen Bundestages gefördert wird, durchgeführt.

Danksagung:

Für die Möglichkeit der Durchführung dieses Projekts möchten wir uns recht herzlich bei der AIF und v.a. der IFL bedanken, ohne deren Unterstützung dieses Projekt nicht möglich gewesen wäre. Unser besonderer Dank gilt hierbei Herrn Rehner und Herrn Scherb. Des Weiteren gilt unser Dank den Unternehmensvertreterinnen und Unternehmensvertretern des Projektbegleitenden Ausschusses, die das Projekt mit vielen konstruktiven Ideen, praktischen Hinweisen und Erfahrungen bereichert haben. Für die Möglichkeit, die 3. Sitzung des Projektbegleitenden Ausschusses in der Unternehmenszentrale von Signify N.V. in Eindhoven, NL, durchzuführen, gilt ein besonderer Dank Herrn Schröder und Herrn Ammerich.

Inhaltsverzeichnis

1	Vorbemerkung	6
2	Einleitung	7
2.1	Problemstellung	7
2.2	Arbeitshypothese	9
3	Stand der Forschung und Entwicklung	11
3.1	Intelligente Beleuchtungssysteme	11
3.1.1	Literaturüberblick	11
3.1.2	Grundcharakteristika intelligenter Beleuchtungssysteme	13
3.1.3	Der Einfluss von Licht auf den Menschen	14
3.1.4	Einsatzmöglichkeiten für intelligente Beleuchtungssysteme in Büros, Wohngebäuden und bei der Straßenbeleuchtung	15
3.1.5	Potenziale für intelligente Beleuchtung im industriellen Umfeld	16
3.2	Steuerung von Kommissioniervorgängen	18
3.2.1	Planungsprobleme und Lösungsverfahren in der Lagerwirtschaft	18
3.2.2	Komplexe Modelle zur Optimierung der Kommissionierung	21
3.3	Integration beider Forschungsstränge und Forschungslücke	42
4	Lösungswege	43
4.1	Identifikation von Performance-Kennzahlen intelligenter Beleuchtungssysteme	43
4.2	Simulationsstudie	45
4.2.1	Nutzen von Simulationsstudien	46
4.2.2	Das Simulationsmodell	46
4.2.3	Ergebnisse	50
4.2.4	Diskussion	56
4.3	Synchronisierung von Kommissioniervorgängen zur Reduktion von Beleuchtungskosten	57
4.3.1	Problemstellung	58
4.3.2	Beispiel	60
4.3.3	Komplexität	61
4.3.4	Mathematische Modellierung	62
4.3.5	Metaheuristisches Lösungsverfahren	64
4.3.6	Numerische Studien	65
4.3.7	Fazit	67
4.4	Validierung und Ableitung von Anforderungen an den Einsatz intelligenter Beleuchtungssysteme und Quantifizierung ihres Nutzens	70
4.5	Erstellung eines Demo-Tools	70
4.5.1	Profilparameter	71
5	Verwendung der Zuwendungen	74
6	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	75
7	Bewertung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU und ihrer Anwendungsmöglichkeiten	76
8	Ergebnistransfer in die Wirtschaft	78
8.1	Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit	78

8.2 Transfermaßnahmen nach Abschluss des Vorhabens	79
9 Zusammenfassung und abschließende Bewertung	82
Anhang	83
Abbildungsverzeichnis	88
Tabellenverzeichnis	89

1 Vorbemerkung

Das Vorhaben „Nutzenpotenziale intelligenter Beleuchtungssysteme für die Lagerwirtschaft am Beispiel der Kommissionierung“ (Kurztitel: „Intelligente Beleuchtungssysteme in der Lagerwirtschaft“) wurde im Förderzeitraum von Juli 2017 bis Oktober 2019 unter der Leitung von Prof. Dr. Christoph Glock, Dr. Eric Grosse, Dr. Fabian Beck und Marc Füchtenhans am Fachgebiet Produktion und Supply Chain Management der Technischen Universität Darmstadt (FS 1) sowie Prof. Dr. Michael Schneider, Dr. Dominik Goeke und Maximilian Löffler am Deutsche Post Lehrstuhl für Optimierung von Distributionsnetzwerken der Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (FS 2) durchgeführt. Insgesamt drei studentische Hilfskräfte unterstützten die Projektbearbeitung. Im Zusammenhang mit dem Projekt entstanden außerdem fünf Prüfungsschriften. Dabei handelte es sich um drei Seminar- und eine Masterarbeit sowie um Teilschnitte einer Dissertation. Im Rahmen des Projektes wurden mit den Unternehmen des Projektbegleitenden Ausschusses sowie mit weiteren Experten aus der Praxis Interviews, Workshops und Vor-Ort-Besuche zur Datenaufnahme sowie eine Modell- bzw. Ergebnisvalidierung und Sicherstellung einer praxistauglichen und transferierbaren Zielverfolgung durchgeführt.

Das IGF-Vorhaben 19570 N der Forschungsgemeinschaft Intralogistik/Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL) e.V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Die Erforschung der im Projektantrag formulierten und zu Beginn der Laufzeit konkretisierten Aufgabenstellung erfolgte entsprechend dem Projektplan in vier Arbeitspaketen. Der vorliegende Projektbericht ist wie folgt gegliedert. Zunächst wird in Kapitel 2 eine Einleitung in die Problemstellung des Forschungsprojekts gegeben und anschließend die Zielsetzung des Projekts sowie die vier Arbeitspakete definiert. Der Stand in Forschung und Entwicklung wird in Kapitel 3 vorgestellt. In Kapitel 4 werden die Lösungswege, die für die Beantwortung der Forschungsfragen angewendet wurden, vorgestellt. In diesem Abschnitt wird insbesondere eine Simulationsstudie präsentiert sowie auf das entwickelte mathematische Planungsmodell und dessen Lösungsverfahren eingegangen. Die Verwendung der Zuwendungen sowie die Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit wird in den Kapiteln 5 und 6 dargestellt. Kapitel 7 bewertet den wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzen der erzielten Ergebnisse insbesondere für kleine und mittlere Unternehmen (KMU) und erläutert ihre Anwendungsmöglichkeiten. Der Ergebnistransfer in die Wirtschaft während und nach Abschluss des Projekts wird in Kapitel 8 dargestellt. Kapitel 9 fasst das Projekt noch einmal zusammen und bewertet abschließend die Ergebnisse.

2 Einleitung

2.1 Problemstellung

Die Lagerhaltung ist ein wichtiger Bestandteil in jeder Supply Chain und leistet einen entscheidenden Beitrag zu Liefertreue und Kundenzufriedenheit. Der hohe Kostendruck im produzierenden Gewerbe zwingt Unternehmen dabei immer mehr, interne logistische Prozesse im Allgemeinen und die Lagerhaltung im Speziellen effizienter zu gestalten, um langfristig im internationalen Wettbewerb zu bestehen. Ein Bereich der Lagerhaltung, der besonders arbeits- und zeitintensiv ist, ist die Kommissionierung, d. h. das Aufsuchen von Lagerplätzen zur Entnahme von Gütern zur Erfüllung von Kundenwünschen. Da nach wie vor bis zu 80% der Kommissionierlager manuell (allerdings oftmals unter Einsatz technischer Hilfsmittel) betrieben werden, stellt die Kommissionierung einen bedeutenden Kostenfaktor dar (de Koster et al. 2007). Studien gehen davon aus, dass über 50% der gesamten Betriebskosten von Warenlagern auf die Kommissionierung zurückzuführen sind (Tompkins et al. 2010).

Auch wenn technische Hilfsmittel bei der Kommissionierung zum Einsatz kommen können, liegt der Großteil der Arbeitsleistung nach wie vor beim Menschen. Der Mensch, und vor allem seine Kombination aus kognitiven und motorischen Fähigkeiten, lässt sich bisher nicht wirtschaftlich durch (voll-) automatisierte Kommissioniersysteme substituieren (Arnold und Furmans 2005). Zudem sind solche Systeme in der Regel mit hohen Investitionskosten verbunden, sodass viele (und hierbei insbesondere kleine und mittelgroße) Unternehmen auf eine Automatisierung der Kommissionierung verzichten. Menschliche Arbeitsleistung ist daher auch heute noch ein wichtiger Bestandteil vieler Kommissionierlager (Grosse et al. 2015). Um einen sicheren und ergonomischen Betrieb zu gewährleisten, müssen Lagereinrichtungen, in denen Menschen arbeiten, mit einer Stärke von mindestens 200 Lux beleuchtet werden (Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin 2011). Da in Lagerhallen oft fluoreszierende Leuchtstoffröhren mit hohem Energieverbrauch eingesetzt werden (vgl. U.S. Energy Information Administration 2015), macht die Beleuchtung mit bis zu 65% des gesamten Energieverbrauchs einen nicht zu unterschätzenden Anteil an den operativen (Energie-)Kosten aus (United Kingdom Warehouse Association 2010, Dhooma und Baker 2012, Richards 2014). Energiesparende Beleuchtungstechnik (wie z. B. LED) wird aufgrund hoher Investitionskosten bisher nur in geringem Umfang genutzt (vgl. U.S. Energy Information Administration 2015). Die hohen Energieverbräuche der Beleuchtung sind zudem mit negativen Umweltauswirkungen verbunden und können den CO₂-Fußabdruck von Lagerhallen deutlich erhöhen (Fichtinger et al. 2015; Ries et al. 2017).

Vor diesem Hintergrund lässt sich in der Praxis oftmals beobachten, dass Lagerparzellen während den Betriebszeiten des Lagers durchgehend beleuchtet werden, obwohl ein Teil der Lagerparzellen nur in unregelmäßigen Zeitabständen von Mitarbeitern aufgesucht wird. Insbesondere dann, wenn Bereiche des Lagers nur selten besucht werden, ist eine durchgehende Beleuchtung des gesamten Lagers unvorteilhaft, da durch unnötige Energieverbräuche vermeidbare Kosten generiert werden. Eine Regulierung der Beleuchtung in unterschiedlichen Lagerzonen durch Schalter, die manuell zu bedienen sind, ist in den meisten Lagereinrichtungen nicht praktikabel, da nicht nur mit Akzeptanzproblemen auf Seiten der Belegschaft zu rechnen wäre, sondern eine manuelle Regulierung der Beleuchtung gerade in solchen Lagern, die unter einem starken Leistungsdruck stehen, unerwünschte Verzögerungen in den Lagerprozessen verursachen würde.

In Situationen, in denen Energieverbräuche in der Lagerhaltung reduziert werden sollen, bietet sich der Einsatz sogenannter intelligenter Beleuchtungssysteme, die Lagerbereiche in Abhängigkeit der tatsächlichen Nutzung ausleuchten, an. Unter dem Begriff „intelligente Beleuchtungssysteme“ können dabei alle Systeme zusammengefasst werden, die das tatsächlich benötigte Licht zur richtigen Zeit am richtigen Ort in der ausreichenden Menge erzeugen. Dies schließt sowohl einfache (automatisierte) Systeme, wie etwa Bewegungsmelder, als auch komplexere Systeme, die die Beleuchtung beispielsweise an Handhelds oder

RFID-Systeme koppeln, ein. Obwohl intelligente Beleuchtungssysteme bereits am Markt erhältlich sind, fehlen bislang wissenschaftliche Studien, die die Kosten-Nutzen-Wirkungen solcher Beleuchtungssysteme sowie Anforderungen an einen wirtschaftlichen Betrieb (d. h. auch in Verbindung mit energiesparender Beleuchtungstechnik wie z. B. LED) systematisch untersuchen.

Eine besondere Schwierigkeit bei der Bewertung und späteren Nutzung intelligenter Beleuchtungssysteme ergibt sich dadurch, dass die Nutzungsintensität von Lagerzonen – und damit auch die Frage, ob eine temporäre Reduktion der Beleuchtung vorteilhaft ist oder nicht – von der konkreten Gestaltung des Lagerlayouts, der Lagerplatzvergabe und der Kommissionierprozesse abhängt. Die Lagerplatzvergabe ordnet hierbei die Artikel auf die zur Verfügung stehenden Lagerfächer zu; die Kommissionierprozesse umfassen insbesondere das „Order Batching“, das Kommissionieraufträge zusammenfasst oder aufsplittet, und die Routenführung, die für die Mitarbeiter Wegstrecken festlegt, auf denen sich diese durch das Lager bewegen (vgl. de Koster et al. 2007). Während das Lagerlayout, d. h. die Anordnung von Regalen und Gängen im Lager, im Allgemeinen im Rahmen strategisch-taktischer Entscheidungen zumindest mittelfristig determiniert wird und kurzfristig nicht veränderbar ist, besteht bei der Lagerplatzvergabe (Chackelson et al. 2013) und den Kommissionierprozessen mehr Handlungsspielraum. Für beide Planungsprobleme bestehen klare Wechselwirkungen mit der Nutzungsintensität von Lagerzonen. Im Rahmen der Lagerplatzvergabe werden meist einfache, heuristische Strategien wie beispielsweise ABC-, Zonen-, Korrelations- oder Zufallssortierungen verwendet, die einen großen Einfluss auf die Nutzungsmuster einzelner Lagerparzellen und damit das Nutzenpotenzial intelligenter Beleuchtungssysteme haben (vgl. für weiterführende Erläuterungen Abschnitt 3.2). Auch bei Kommissionierprozessen haben Lagerleiter die Möglichkeit, gezielt Einfluss auf die Nutzungsintensität einzelner Lagerzonen zu nehmen, und damit nicht nur die Durchlaufzeit von Kommissionieraufträgen, sondern auch die Nutzenpotenziale intelligenter Beleuchtungssysteme zu beeinflussen. Beispielsweise könnten beim Order Batching Aufträge so eingeplant werden, dass wenig frequentierte Parzellen selten, aber dann mehrmals innerhalb kurzer Zeit betreten werden. Während der Nutzungsphase könnten die betroffenen Lagerparzellen dann voll beleuchtet werden, während die Beleuchtung außerhalb dieser Nutzungsphase reduziert werden könnte, um Energie einzusparen. Bei der Routenführung könnten z. B. Möglichkeiten, die Anzahl der aktivierten Lichtquellen auf dem Weg zwischen zwei Artikelstandorten zu reduzieren, in die Planung integriert werden. Die Zusammenhänge zwischen Lagerplatzvergabe und Kommissionierprozessen und der Effizienz intelligenter Beleuchtungssysteme sind damit offensichtlich: Während durch eine benutzungsabhängige Reduktion der Beleuchtungsintensität in wenig frequentierten Lagerbereichen Energie eingespart werden kann, ist die Installation solcher Beleuchtungssysteme in einem stark frequentierten Teil eines Lagers nicht sinnvoll – ganz unabhängig davon, ob die häufige Nutzung der Lagerparzelle durch einen einzigen Kommissionierer, der für diese Parzelle zuständig ist, oder mehrere parallel im Lager arbeitende Kommissionierer verursacht wird. Die Lagerplatzvergabe beeinflusst dieses Verhältnis, da sie Einfluss darauf nimmt, in welchen Parzellen des Lagers Artikel kommissioniert werden müssen. Damit wäre zu prüfen, inwieweit die verschiedenen Lagerplatzvergabestrategien den Einsatz intelligenter Beleuchtungssysteme unterstützen. Im Rahmen von Kommissionierprozessen stellt sich die Frage, ob Waren so kommissioniert werden sollten, dass Energieeinsparpotenziale bestmöglich ausgenutzt werden. In diesem Fall wären z. B. Kommissionier Routen, die in kurzen Abständen Lichtquellen aktivieren, zu vermeiden, oder es wäre auf ein Abschalten der Lichtquellen zu verzichten. In jedem Fall wären Routenveränderungen zur Reduktion von Energieverbräuchen mit dem erhöhten Zeitbedarf, der sich durch ggf. verlängerte Wegstrecken ergibt, zu vergleichen.

Die Ausführungen verdeutlichen, dass durch eine wechselseitige, enge Abstimmung intelligenter Beleuchtungssysteme mit der Zuordnung von Artikeln zu Lagerplätzen und den Abläufen im Lager Energiekosten eingespart werden können. Vor dem beschriebenen Hintergrund bestand die Zielsetzung dieses Projekts darin, Wechselwirkungen zwischen der Lagerplatzvergabe, der Steuerung von Kommissionierprozessen und den Nutzenpotenzialen intelligenter Beleuchtungssysteme zu untersuchen. Es werden mathematische Modelle von Kommissioniersystemen entwickelt, welche die Kostenwirkung intelligenter Beleuchtungssysteme bei der Planung von Kommissionierprozessen berücksichtigen, um so Lagerabläufe zu generieren, die sowohl zu kurzen Durchlaufzeiten als auch zu einer hohen Energieeffizienz beitragen. Außerdem können intelligente Beleuchtungssysteme zur Umsetzung komplexer Gangfolgen

genutzt werden, sodass optimale Lösungen von mathematischen Planungsmodellen in der Realität sicher umgesetzt werden können (vgl. Abschnitt 3.2.2). Die entwickelten Modelle können sowohl im Rahmen von Kosten-/Nutzen-Bewertungen von intelligenten Beleuchtungssystemen, etwa bei der Investitionsplanung, als auch beim operativen Betrieb solcher Systeme eingesetzt werden. Des Weiteren wird in umfangreichen Simulationsstudien untersucht, wie unterschiedliche Lagerplatzvergabe- und Lagerbetriebsstrategien den Nutzen intelligenter Beleuchtungssysteme beeinflussen können. Dies schließt explizit auch die Simulation unterschiedlicher Lagergrößen mit ein, um etwa Aussagen zum Einfluss der zu beleuchtenden Fläche, deren Beleuchtung individuell durch das eingesetzte intelligente Beleuchtungssystem angesteuert werden kann, auf die Kosten- und Energieeffizienz des Lagers abzuleiten. Der Innovationscharakter dieses Projekts liegt mithin insbesondere in der integrierten Betrachtung der genannten Aspekte – Lageraufbau bzw. Lagerplatzvergabe, Lagerprozesse und intelligente Beleuchtungssysteme. Eine Nutzenanalyse des Projekts mit besonderem Bezug auf kleine und mittlere Unternehmen (KMU) ist im folgenden Abschnitt dargestellt.

2.2 Arbeitshypothese

Die Zielsetzung des Projekts bestand somit darin, mathematische Modelle und zugehörige Lösungsverfahren zu entwickeln, mit deren Hilfe das Kosten-Nutzen-Verhältnis intelligenter Beleuchtungssysteme (beispielsweise im Rahmen von Investitionsvorhaben) bewertet und der Betrieb solcher Systeme gesteuert werden kann. Vor dem Hintergrund des im Projektbericht beschriebenen Stands der Technik ergibt sich die Notwendigkeit, Planungsansätze zur simultanen Steuerung von Kommissionierprozessen und intelligenten Beleuchtungssystemen zu entwickeln, da solche Planungsverfahren bislang noch nicht verfügbar sind und nur eine integrierte Planung des gesamten Kommissionierprozesses eine kosten- und energieeffiziente Kommissionierung ermöglicht. Das entwickelte Planungsverfahren bildet Wechselwirkungen ab, die zwischen dem Betrieb intelligenter Beleuchtungssysteme und den im Lager umgesetzten operativen Kommissionierprozessen bestehen, und ermöglicht es damit, Lagereinrichtungen durch eine Optimierung beider Problemstellungen (d. h. der Beleuchtung und der eigentlichen Kommissionierung) kosten- und energieeffizient zu betreiben. Aus mathematischer Sicht wurde eine Optimierung der beschriebenen Problemstellung untersucht, d. h. es wurde nach einer Lösung gesucht, die zu den geringstmöglichen Betriebskosten für den Kommissioniervorgang und die Beleuchtungssysteme vor dem Hintergrund der Rahmenbedingungen des Lagers (Artikel- und Nachfragestruktur, Layout des Lagers etc.) führt (vgl. dazu auch Abschnitt 3.2.2). Um zu gewährleisten, dass das entwickelte mathematische Planungsmodell reale Zusammenhänge realistisch abbildet und in der Praxis einfach implementiert werden können, wurde die Modellentwicklung von Fallstudien begleitet, in denen praktische Anforderungen an den Betrieb intelligenter Beleuchtungssysteme im Lager sowie wichtige technische Leistungscharakteristika dieser Systeme erhoben wurden. Während des Projektverlaufs hat sich zudem herausgestellt, dass eine zusätzliche Betrachtung der Themenstellung im Rahmen einer Simulationsstudie weitere interessante Erkenntnisse liefern und die beschriebenen Wechselwirkungen auch grafisch anschaulich illustrieren könnte. Eine Simulationsstudie bietet hierbei unter anderem die Möglichkeit, verschiedene Lagergrößen, unterschiedliche Anzahl von Kommissionierern sowie verschiedene Kommissionierstrategien unter Berücksichtigung von statistischen Schwankungen im Zusammenhang mit den Beleuchtungskosten zu vergleichen. Die Entwicklung, Validierung und Anwendung eines Simulationsmodells wurde daher in Rücksprache mit den Mitgliedern des Projektbegleitenden Ausschusses in das Arbeitsprogramm aufgenommen. Das Forschungsprojekt leistet durch die integrative Fokussierung auf Prozessoptimierung und Energieeffizienz einen wichtigen Beitrag zur Realisierung von Kosten- und Energieeinsparpotenzialen bei KMU und unterstützt diese dabei, fundierte Investitionsentscheidungen zu treffen.

Das Projekt wurde jeweils hälftig durch die beiden beteiligten Forschungsstellen bearbeitet. Das Fachgebiet Produktion und Supply Chain Management der TU Darmstadt (FS 1) brachte insbesondere Expertenwissen aus den Bereichen Warehousing, Modellierung, Simulation und in Bezug auf die durchzuführenden Wirtschaftlichkeitsanalysen ein, während der Lehrstuhl Optimierung von Distributionsnetzwerken der RWTH Aachen (FS 2) umfassende Kompetenzen in Bezug auf die Entwicklung von effizienten und effektiven Lösungsverfahren beisteuerte, die wichtig waren, um im vorliegenden Fall (auch

im Rahmen eines Demo-Tools) praktisch implementierbare Lösungsverfahren zu entwickeln und die geplanten Rechenstudien sowie die Wirtschaftlichkeitsanalysen durchführen zu können. Der Mehrwert der Kooperation bestand in der Bündelung der Fachkompetenz beider Forschungsstellen, die in zahlreichen Publikationen zur Kommissionierung und zur Entwicklung mathematischer Planungsverfahren belegt sind.

Die Forschungsstelle 1 zeichnete insbesondere für die Organisation und Durchführung der Treffen des Projektbegleitenden Ausschusses, die Durchführung und Evaluation von Interviews und Fallstudien, die Aufarbeitung der wissenschaftlichen Literatur und des Stands der Technik zu intelligenten Beleuchtungssystemen sowie die Entwicklung und Auswertung des Simulationsmodells verantwortlich; diese Aktivitäten sind in den Kapitel 2.2, 3.1, 3.2.1, 3.3, 4.1, 4.2, 4.4 sowie die Kapitel 5 bis Kapitel 9 dokumentiert, die von FS 1 erarbeitet wurden. Die Forschungsstelle 2 verantwortete die Aufarbeitung der Literatur zur modellgestützten Planung von Kommissionierprozessen, die Entwicklung der mathematischen Planungsmodelle und Lösungsverfahren sowie die Umsetzung des Demo-Tools; die von FS 2 erarbeiteten Resultate sind in den Kapiteln 3.2.2, 4.3 und 4.5 dokumentiert.

3 Stand der Forschung und Entwicklung

Für das vorliegende Forschungsprojekt sind zwei Forschungsströme von besonderer Relevanz: Arbeiten, die sich mit der Steuerung von Kommissioniervorgängen beschäftigen sowie Arbeiten/Entwicklungen zu intelligenten Beleuchtungssystemen. Im Folgenden wird ein Überblick über den Stand der Forschung in beiden Forschungssträngen gegeben. Dabei beschäftigt sich das Kapitel 3.1 mit Arbeiten und Entwicklungen zu intelligenten Beleuchtungssystemen. Kapitel 3.2 erläutert Planungsprobleme in der Lagerwirtschaft und entwickelt neue Optimierungsmodelle für eine Reihe höchst relevanter Szenarien, die dem aktuellen Stand der Literatur klar überlegen sind.

3.1 Intelligente Beleuchtungssysteme

In den letzten Jahrzehnten sind die CO₂-Emissionen kontinuierlich angestiegen, was als wesentlicher Faktor für den Treibhauseffekt gilt. Produktions- und Logistikanlagen tragen aufgrund ihres hohen Energiebedarfs erheblich zu diesen Emissionen bei (Bartolini et al. 2019). Der Großteil der in solchen Einrichtungen verbrauchten Energie wird durch Heizen, Kühlen, Klimatisieren und Beleuchten verbraucht (Pérez-Lombard et al. 2008). Frühere Studien haben gezeigt, dass die Beleuchtung für bis zu 65% des Gesamtenergieverbrauchs in Lagerhäusern verantwortlich ist und somit erheblich zu den Energiekosten und dem CO₂-Fußabdruck der Einrichtung beiträgt (Richards 2014). Angesichts des starken rechtlichen und gesellschaftlichen Drucks, die Auswirkungen auch von Produktions- und Logistikaktivitäten auf die Umwelt zu verringern, suchen Unternehmen nach neuen Wegen, um ihre Einrichtungen umweltfreundlicher zu gestalten. Moderne Beleuchtungssysteme, die zu erheblichen Einsparungen beim Energieverbrauch führen können, sind in der Lage, bei der Ökologisierung zu unterstützen.

Abgesehen von der Beleuchtung von Arbeitsplätzen (die branchenunabhängig für alle Unternehmen, nicht zuletzt aufgrund von Vorschriften des Arbeitsschutzes, relevant sind) können moderne Beleuchtungssysteme das Arbeitsleben erleichtern und Arbeitnehmer auf verschiedene Weise unterstützen (Boyce 2014). Die Potenziale gehen dabei weit über Energieeinsparungen hinaus. Viele Unternehmen sind sich jedoch der Vorteile moderner, „intelligenter“ Beleuchtungssysteme noch nicht vollständig bewusst. In diesem Abschnitt soll ein Überblick über intelligente Beleuchtungssysteme und die potenziellen Vorteile dieser Systeme gegeben werden. Außerdem werden einige Anwendungsfälle vorgestellt, in denen aufgezeigt wird, wie intelligente Beleuchtung helfen kann, Energiekosten zu senken und Betriebsprozesse in industriellen Umgebungen - wie etwa Lagern - zu verbessern.

3.1.1 Literaturüberblick

Ziel der Literaturrecherche war es, das definierte Forschungsgebiet zu strukturieren und für die zuvor festgelegten Forschungsfragen relevante Forschungsnachweise und Argumente zu evaluieren, auszuwählen und zu synthetisieren (Hochrein et al. 2012). Literaturüberblicke sind ein Schlüsselinstrument für die Managementforschung, stellen aber auch ein leistungsfähiges Instrument für alle anderen Disziplinen dar, um die Vielfalt der in der akademischen Literatur vorhandenen Forschung zu bewältigen (Tranfield et al. 2003). Die systematische und transparente Identifizierung und Diskussion der vorhandenen wissenschaftlichen Literatur kann als wichtiges Instrument zur Ermittlung von Forschungslücken angesehen werden. Die in diesem Abschnitt beschriebene systematische Literaturrecherche wurde unter Bezugnahme auf Newbert (2007) und Glock und Hochrein (2011) entwickelt. Damit basiert sie auf einem strukturierten und systematischen Ansatz insbesondere in der Literatursuche und -auswahl, um ein möglichst repräsentatives Literatursample (d. h. eine repräsentative Auswahl an Veröffentlichungen zum Thema) zu generieren und die formulierten Forschungsfragen umfassend beantworten zu können (vgl. Tranfield et al. 2003 und Rhoades 2011).

Gruppe A	Gruppe B	Gruppe C
Intelligent	Light	Smart factory
Smart	Luminares	Light management
Energy efficiency	Illumination	Human centric lighting
LED		Smart city
Artificial		Smart home
Energy saving		Office light
Inverse		Smart home
Indoor		Lighting system
Interior		Lighting control
VLC (für visible light communication)		Lighting design
		Street lighting
		Light communication

Tabelle 3.1: Überblick über die verwendeten Schlüsselwortgruppen in der Literaturrecherche.

Für das Projekt und innerhalb dieses Abschnitts wird systematisch Literatur analysiert und klassifiziert, wobei der Schwerpunkt auf der Anwendung und Entwicklung intelligenter Beleuchtungssysteme liegt. Ziel dieses Abschnitts ist es, die Forschungsströme zu identifizieren, die in den verschiedenen Bereichen der intelligenten Beleuchtung aufgetreten sind, den Wissensstand in den einzelnen Bereichen zu bewerten und mögliche Lücken in der Literatur zu ermitteln, insbesondere in Bezug auf die Anwendung solcher Systeme in Produktion und Logistik. Dabei ist es notwendig, Forschung aus mehreren Disziplinen zu berücksichtigen. Die Vorgehensweise bei der Erstellung des Literaturüberblicks, die im folgenden Unterabschnitt näher erläutert wird, orientierte sich dabei an den folgenden Schritten: (a) Definieren relevanter Schlüsselwörter, (b) Durchsuchen von zwei wissenschaftlichen Datenbanken, (c) Identifizieren relevanter Artikel und (d) Durchsuchen der Literaturverzeichnis der bereits identifizierten Artikel, um weitere relevante Literatur zu identifizieren. Durch Auswertung der identifizierten Literatur wird ein konzeptionelles Rahmenwerk entwickelt, das zur Integration von intelligenten Beleuchtungssystemen in verschiedene Prozesse eines Lagers verwendet werden kann.

Diese Art der Problemformulierung definiert eine Reihe von zentralen Forschungsfragen, mit deren Hilfe einerseits alle relevanten Forschungsarbeiten während der Literaturlauswahl ermittelt und andererseits sichergestellt werden kann, dass jeder Schritt in jeder Phase der Literaturlauswahl nachvollziehbar ist. Aus diesem Grund wurden in den wissenschaftlichen Datenbanken Scopus und Business Source Premier, die die relevanten Forschungsbereiche abdecken, anhand von drei definierten Gruppen von Schlüsselwörtern, die mit intelligenten Beleuchtungssystemen und deren Anwendungsbereichen in Verbindung stehen, relevante Artikel gesucht (vgl. Tabelle 3.1). Jedes Schlüsselwort aus Gruppe A wurde mit jedem Schlüsselwort aus Gruppe B kombiniert, um den ersten Teil der endgültigen Liste von Schlüsselwörtern zu generieren, die sich auf intelligente und energieeffiziente Beleuchtungsansätze beziehen und $10 \times 3 = 30$ Schlüsselwortkombinationen enthielten. Gruppe C enthält den zweiten Teil der relevanten Begriffe, die sich auf technische Systeme oder Anwendungen beziehen. Bei der Datenbanksuche wurden Artikel abgerufen, die entweder eine Schlüsselwortkombination aus den Gruppen A und B (z. B. Energieeffizienz und Beleuchtung, Innenraum und Licht usw.) oder ausschließlich aus der Gruppe C in ihrem Titel enthielten.

In der Scopus-Datenbank können nicht relevante Themenbereiche von der Suche ausgeschlossen werden, um die Anzahl der gefundenen Artikel zu verringern, die für das zugewiesene Thema nicht relevant sind. Ausgeschlossene Themenbereiche waren im vorliegenden Fall „Chemie“, „Physik und Astronomie“, „Agrar - und Biowissenschaften“, „Biochemie, Genetik und Molekularbiologie“, „Medizin“, „Verfahrenstechnik“, „Zahnmedizin“, „Pharmakologie“, „Toxikologie und Pharmazie“, „Immunologie und Mikrobiologie“, „Veterinärmedizin“, „Krankenpflege“ sowie „Neuro- und Gesundheitswissenschaften“. Anschließend wurde für die identifizierte Literatur der Titel überprüft und, falls die Quelle relevant schien, der Abstract gelesen, um die Relevanz genauer bewerten zu können. Die in der Literaturrecherche identifizierten Artikel wurden sodann mehreren Auswahlfiltern unterzogen. Die Sprache der Beiträge

war auf Englisch und das Erscheinungsjahr auf den Zeitraum 2000 bis 2018 beschränkt. Außerdem wurden nur Arbeiten, die in begutachteten Fachzeitschriften erschienen, als relevant eingestuft, und nur solche Beiträge wurden mit einbezogen, die intelligente Beleuchtungssysteme mit Praxisbezug betrachten. Aus diesem Grund wurden wissenschaftliche Arbeiten, die sich mit Tunnelbeleuchtung oder Beleuchtung in Bergwerken, Beleuchtung in Verbindung mit Flora und Fauna, Photovoltaikanlagen, Ampeln, Automobilbeleuchtung, Start- und Landebahnbeleuchtung, Unterhaltungsbeleuchtung oder Unterwasserbeleuchtung befassten, für diesen Literaturüberblick als nicht relevant eingestuft. Insgesamt wurden 443 wissenschaftliche Arbeiten identifiziert, die diese Kriterien erfüllten, und diese Quellen wurden einer weiteren Analyse unterzogen, wobei alle identifizierten Arbeiten gelesen wurden, um ihren Inhalt zu überprüfen. Im letzten Schritt wurde ein sogenannter „Schneeball-Ansatz“ angewendet, bei dem die Literaturverzeichnis der Quellen rückwärts nach weiteren relevanter Literatur durchsucht wurde. Schlussendlich wurden 325 Artikel als für diese Literaturrecherche relevant eingestuft.¹

3.1.2 Grundcharakteristika intelligenter Beleuchtungssysteme

Mit der Entwicklung neuer Beleuchtungstechnologien wie Leuchtdioden (kurz LEDs, vom englischen light-emitting diodes) sind innovative Anwendungen für Wohngebäude, Büros und Straßenbeleuchtung auf dem Markt verfügbar geworden (siehe z. B. Chew et al. 2017). Moderne Beleuchtungssysteme setzen aufgrund ihrer Vielseitigkeit und ihres geringen Energieverbrauchs in der Regel auf LEDs. Darüber hinaus verfügen LEDs über verschiedene Steuerungsoptionen, mit denen die Beleuchtung „intelligent“ bzw. „smart“ gemacht werden kann (Park et al. 2015).

Ein intelligentes Beleuchtungssystem basiert auf der elektrischen Steuerung von LEDs. Dies ermöglicht die Vernetzung von Lichtquellen und die Verwendung von Sensoren, mit deren Hilfe die Lichtintensität an externe Faktoren wie Tageslicht oder das Verhalten der Benutzer angepasst werden kann (Karlicek 2012). Intelligente Beleuchtungssysteme sind umweltfreundlich, steigern das Wohlbefinden von Menschen und verbessern die Funktionssicherheit und Wartung der Beleuchtungseinrichtungen (Chew et al. 2017).

LEDs sind das Herzstück der meisten intelligenten Beleuchtungssysteme. Ihr großer Vorteil besteht darin, dass sie im Vergleich zu herkömmlichen Glühlampen deutlich weniger Energie benötigen. Die Lichtausbeute von LEDs liegt beispielsweise bei 100 lm/W für die Haus- oder Straßenbeleuchtung und bis zu 200 lm/W für industrielle Anwendungen. Ihre Lebensdauer reicht von 50.000 bis über 100.000 Stunden. Im Vergleich dazu haben Glühlampen ca. 15 lm/W und Leuchtstofflampen bis zu ca. 100 lm/W und daneben auch eine deutlich kürzere erwartete Lebensdauer als LEDs (Chang et al. 2015). Neben Energieeinsparungen bieten LEDs eine verbesserte Anpassungsfähigkeit von Lichtfarbe und Lichtspektrum sowie eine große Robustheit, Stabilität und Schaltfestigkeit, sodass die Lebensdauer der LED durch häufiges An- und Ausschalten nicht wesentlich beeinflusst wird (Chew et al. 2017). Gleichzeitig sind LEDs bei niedrigeren Umgebungstemperaturen effizienter und führen nicht zu Wärmestrahlung, was insgesamt zu geringeren Wartungskosten im Vergleich zu herkömmlichen Leuchtmitteln führt. LED-Leuchten können kundenspezifisch angepasst werden und werden auch für konventionelle Leuchten als sogenannte Retrofit-Lampen hergestellt, wodurch Umrüstkosten deutlich reduziert werden können (Santamouris und Dascalaki 2002).

Neben der Lichtquelle selbst hängt die Lichtqualität von mehreren Faktoren ab, wie Montagehöhe, Leuchtenabstand, Beleuchtungswinkel und Oberflächeneigenschaften (Yoomak und Ngaopitakkul 2018). Die Lichtsteuerung kann dazu beitragen, den Energieverbrauch zu senken, Energieverschwendung zu vermeiden und den Sehkomfort zu erhöhen (Cimini et al. 2015). Eine beliebte Methode zur Steuerung der Beleuchtung ist die Bewegungs- oder Belegungserfassung, die Bewegungen erfasst und dadurch feststellen kann, ob der Raum benutzt wird oder nicht und damit Beleuchtung vonnöten ist. Basierend auf diesem Signal passt das System die Beleuchtungsstärke an, indem es die Lichter ein- oder ausschaltet oder die Beleuchtungsstärke verringert oder erhöht (Chung und Burnett 2001). Ebenso wird die Tageslichterfassung verwendet, um zusätzliches künstliches Licht (falls erforderlich) bereitzustellen, um das vom Benutzer angeforderte Beleuchtungsniveau zu erreichen. Sensorgesteuertes Licht reduziert

¹Das vollständig klassifizierte Sample kann in Form einer Tabelle über die Autoren der FS 1 bezogen werden.

den Energieverbrauch und passt die Lichtverhältnisse individuell an die Bedürfnisse des Benutzers an, ohne die Sicherheit oder Funktionalität einzuschränken (Pandharipande und Caicedo 2015). Studien, die solche Systeme simulierten oder ihre Leistung in realen Anwendungen beobachteten, zeigten, dass eine belegungsabhängige Beleuchtungssteuerung zu Energieeinsparungen im Bereich von 17% bis 60% führen kann (Von Neida et al. 2001), wohingegen die tageslichtabhängige Steuerung der Beleuchtung Energieeinsparungen von über 40% (Chew et al. 2017) im Vergleich zu herkömmlicher Beleuchtung erzeugen kann. Die Verwendung beider Arten von Steuerungssystemen ermöglicht höhere durchschnittliche Energieeinsparungen von 13% (Higuera et al. 2015) bis 73,2% (Nagy et al. 2016). Weitere Faktoren, die die Energieeinsparung beeinflussen, sind unter anderem die Größe und Ausrichtung der Fenster, die verfügbaren Sonnenstunden (Chew et al. 2017) und das Nutzungsverhalten der Benutzer (Von Neida et al. 2001). Die höchsten Energieeinsparungen wurden bisher bei Bürogebäuden verzeichnet (Chew et al. 2017).

Die Fähigkeit zur Vernetzung ermöglicht die Integration intelligenter Beleuchtungssysteme in die bestehende Gebäudemanagement-Technologie, sodass diese zentral überwacht und gesteuert werden kann (Vanus et al. 2016). Dies erleichtert die Erfassung des zeitlichen Leistungsabfalls von LEDs aufgrund von Verschmutzung oder Alterung über Sensoren. Mit diesen Daten können Wartungsintervalle genauer definiert werden, was auch dazu beiträgt, ungeplante Wartungsarbeiten aufgrund von Störungen zu reduzieren (Şahin et al. 2016). Darüber hinaus können mit intelligenten Wartungstools, die das Lichtsystem ständig überwachen, Fehlerquellen und mögliche Folgen in anderen Infrastrukturen identifiziert werden (Kamsu-Foguem und Mathieu 2014).

Zusätzlich zu den oben beschriebenen Effekten ermöglichen intelligente Beleuchtungssysteme dank der VLC-Technologie (Visible Light Communication) den drahtlosen Netzwerkzugriff. VLC verwendet einen Sender (z. B. eine LED), einen Ausbreitungskanal und einen Empfänger (z. B. Smartphones oder Tablets), die die Signale mithilfe einer Fotodiode erkennen. Die LED wird nach einem Modulationsschema schnell ein- und ausgeschaltet, um Daten mithilfe der Intensitätsmodulation zu übertragen. Da die Kommunikation zwischen Sender und Empfänger nur in Sichtweite erfolgen kann, müssen die LEDs entsprechend angeordnet werden (Haas et al. 2015). Die Technologie bietet ein hohes Maß an Datenschutz, da nur Empfänger in Sichtweite das Signal empfangen können. VLC kann auch an Orten eingesetzt werden, an denen das Funksignal gestört ist, und im Gegensatz zu vergleichbaren Funktechnologien sendet VLC keine Strahlung aus (Pathak et al. 2015). Eine Anwendung, die sich unmittelbar aus dieser Technologie ergibt, sind VLC-basierte Indoor-Positionierungssysteme (IPS). Die Positionierung oder Lokalisierung in Innenräumen zielt darauf ab, die räumliche Position eines Objekts oder einer Person zu bestimmen. Eine genaue Ortung innerhalb von Gebäuden ist in diesem Kontext eine Herausforderung, und leider sind vorhandene globale Ortungssysteme (kurz GPS, vom Englischen Global Positioning System) nicht das geeignete Instrument für viele Anwendungen in Innenräumen, da das GPS-Signal oftmals durch das Gebäude abgeschirmt wird. Aus diesem Grund wurden technische Lösungen entwickelt, die Objekte mithilfe von Hochfrequenzsystemen wie beispielsweise Wi-Fi lokalisieren. VLC-basierte IPS ermöglichen eine genauere Lokalisierung unter Verwendung der Beleuchtungsinfrastruktur des Gebäudes im Vergleich zu GPS oder anderen funkfrequenzbasierten Systemen (Luo et al. 2017).

3.1.3 Der Einfluss von Licht auf den Menschen

Licht beeinflusst das Verhalten und die Leistung des Menschen. Es ermöglicht das Sehen und beeinflusst das circadiane Zeitsystem sowie die menschliche Stimmung und Motivation (Boyce 2014). Insbesondere der Einfluss von Licht auf den Tagesrhythmus (z. B. Schlaf-Wach-Zyklus, Arbeitseffizienz und Konzentration Scheiermann et al. 2013) ist für industrielle Anwendungen wichtig, da Licht verwendet werden kann, um die Effizienz einer Arbeitsaufgabe zu verbessern. Diese Faktoren können von Entscheidungsträgern bei der Erstellung von Arbeitsplänen sowie bei der Gestaltung der Organisation und des Arbeitsbereichs berücksichtigt werden.

Studien haben gezeigt, dass unterschiedliche Lichtfarbtemperaturen die Physiologie des Menschen beeinflussen (Yasukouchi und Ishibashi 2005), so dass im Wohnbereich häufig eine niedrigere Farbtemperatur verwendet wird, da diese die Entspannung fördert (Van Bommel 2006). Die Beleuchtung

könnte daher an den natürlichen biologischen Tagesrhythmus des Menschen angepasst werden, um die negativen Auswirkungen, wie bspw. Schlaf-, Magen- und Stimmungsstörungen, die auf Störungen des natürlichen Schlaf-Wach Rhythmus zurückzuführen sind, zu mildern. Ziel der Lichtplanung könnte es daher sein, den natürlichen Verlauf und die natürlichen Eigenschaften des Sonnenlichts nachzuahmen. Höhere Farbtemperaturen führen zu höherer Aufmerksamkeit und werden daher häufig in Arbeitsbereichen eingesetzt. Bei der Lichtplanung werden auch die Wahrnehmung von Licht und die Ästhetik von Licht berücksichtigt (Veitch et al. 2013). Planer müssen jedoch berücksichtigen, dass der wahrgenommene Verlust der Beleuchtungssteuerung auch negative psychologische Folgen für die Mitarbeiter haben kann (Afshari und Mishra 2015).

Neben Energieeinsparungen haben intelligente Beleuchtungssysteme damit auch das Potenzial, die Lichtqualität zu verbessern, was sich etwa in Form einer verbesserten Regulierung des Tagesrhythmus und einer Steigerung der Produktivität positiv auf die Arbeitnehmer auswirken kann (Karlicek 2012). Diese nicht-visuellen Effekte führen zu einer Steigerung des Wohlbefindens der Mitarbeiter und können Arbeitsunfälle verhindern (Veitch et al. 2013).

3.1.4 Einsatzmöglichkeiten für intelligente Beleuchtungssysteme in Büros, Wohngebäuden und bei der Straßenbeleuchtung

Bisher haben nur wenige Studien intelligente Beleuchtungssysteme in industriellen Umgebungen untersucht. Einige Erkenntnisse können jedoch aus Büro- und Wohngebäuden sowie aus der Straßenbeleuchtung (Chew et al. 2017) gewonnen werden, in denen solche Systeme heute bereits häufig eingesetzt werden.

Büro-Anwendungen haben in der Literatur bisher die höchste Aufmerksamkeit erregt. Die Bereitstellung einer optimalen Lichtbedingung ist hierbei ein komplexes Problem. In Büros verbessert eine einfache Erhöhung der Lichtmenge nicht unbedingt die Sichtbarkeit von Computerbildschirmen, während sie häufig die Lesbarkeit von (Papier-) Dokumenten verbessert (Boyce 2014). Ein automatisches Steuersystem kann je nach Tageslicht und Belegung angepasstes Licht liefern, um unterschiedliche Benutzeranforderungen zu erfüllen. In Büros ist die sensorgestützte Beleuchtung ein wichtiges Instrument zur Steuerung des Lichts, um ein angemessenes Beleuchtungsniveau zu erreichen und Energie zu sparen. Eine solche Beleuchtung kann außerdem die Konzentration, Kreativität und Leistung der Mitarbeiter steigern. Die Lichtsteuerung kann dabei den gesamten Raum oder nur einen einzelnen Arbeitsplatz betreffen. Frühere Untersuchungen haben gezeigt, dass eine belegungsabhängige Beleuchtung auf Schreibtischebene zu höheren Energieeinsparungen führen kann als eine Beleuchtungssteuerung auf Raumebene (De Bakker et al. 2018). Es hat sich auch gezeigt, dass die Anpassung der Farbtemperaturen an die Tageszeit und den „menschlichen Rhythmus“ erhebliche Produktivitätssteigerungen für Büroangestellte nach sich zieht (Sharma et al. 2018). Beispielsweise liefert eine signifikante Erhöhung des Lichtniveaus und der Farbtemperaturen für kühles, weißes Licht einen reaktivierenden Impuls für die Aufmerksamkeit und Konzentration der Mitarbeiter nach einer Pause (Van Bommel 2006).

Intelligente Beleuchtungssysteme im Wohnumfeld können helfen, Energie zu sparen, indem sie gleichzeitig die Lichtsteuerung und die Erzeugung erneuerbarer Energie berücksichtigen, beispielsweise durch Solarsysteme oder Wärmepumpen. Energiemanagementsysteme können Energieflüsse steuern, um das Energieangebot und die Energienachfrage auszugleichen. Zu diesem Zweck werden Daten aus Vorhersagemodellen und Technologien zur Erzeugung erneuerbarer Energien sowie Spitzenpreise auf dem Energiemarkt bei der Lichtsteuerung berücksichtigt (Lobaccaro et al. 2016). In einem Smart-Home-Kontext können intelligente Beleuchtungssysteme Benutzer aufgrund der verschiedenen Funktionen, die sie anbieten, in ihrem täglichen Leben unterstützen. Smart-Home-Technologien ermöglichen den drahtlosen Zugriff mehrerer Geräte (z. B. Smartphones) auf ein Heimnetzwerk und erlauben es diesen Geräten damit, miteinander zu kommunizieren. Die meisten auf dem Markt erhältlichen Smart-Home-Technologien arbeiten derzeit im Hochfrequenzbereich (RF). Nachteile dieses Systems sind Kapazitätsbeschränkungen bei hoher Benutzerzahl und mangelnder Systemsicherheit, z. B. bei Hacker-Angriffen (Tiwari et al. 2015). VLC-Systeme sind eine Alternative für die Datenübertragung und den drahtlosen Zugriff für Heimnetzwerke (Vanus et al. 2016). Da Licht nicht durch Wände dringen kann, ist diese Form der Datenkommunikation widerstandsfähiger gegen unbefugte Zugriffe von außen. Darüber hinaus bietet VLC im

Vergleich zu herkömmlichen HF-basierten Technologien höhere Datenübertragungsraten (Tiwari et al. 2015).

Neben Innenanwendungen ist die Außenbeleuchtung mit dem Schwerpunkt Straßenbeleuchtung ein vielversprechender Bereich für den Einsatz intelligenter Beleuchtungssysteme. Die Beleuchtungsverhältnisse hängen dabei von zahlreichen Faktoren ab, wie zum Beispiel der Art der verwendeten Leuchte, der Montagehöhe des Lichtspots, dem optimalen Leuchtenabstand oder der Fahrbahnbeschaffenheit (Yoomak und Ngaopitakkul 2018). Intelligente Beleuchtungssysteme können dank angepasster Beleuchtung mit Hilfe von Sensoren und Datenmessung bessere Lichtverhältnisse bieten und die visuelle Gesamtleistung und den Komfort verbessern sowie Energie sparen. In diesem Zusammenhang kann auch die Bewegungs- und Belegungserkennung verwendet werden, indem Straßenlaternen nur dann eingeschaltet werden, wenn Benutzer erkannt werden, während gleichzeitig die Helligkeit an die gegebenen Bedingungen angepasst wird (Maithili et al. 2017). Neben der Reduzierung des Energieverbrauchs kann auch eine Verringerung der Lichtverschmutzung² einen wichtigen Beitrag zur ökologischen Nachhaltigkeit leisten (Gutierrez-Escolar et al. 2017).

3.1.5 Potenziale für intelligente Beleuchtung im industriellen Umfeld

Es ist überraschend, dass die Potenziale intelligenter Beleuchtungssysteme für den industriellen Einsatz in der Literatur bisher wenig Beachtung gefunden haben. In Boyce (2014) wurde darauf hingewiesen, dass die Potenziale intelligenter Beleuchtungslösungen für branchenbezogene Probleme schwer zu verallgemeinern sind, was für Büros oder Wohngebäude aufgrund ihrer Homogenität viel einfacher ist. In der Industrie hängen optimale Lichtbedingungen von den konkreten Aktivitäten, die durch die Mitarbeiter ausgeführt werden, ab. So erfordern beispielsweise Produktionsbereiche, Qualitätskontrolle und Kommissionierung für die visuelle Arbeit teilweise hohe Beleuchtungsstärken, die in vielen Fällen deutlich über den gesetzlich vorgeschriebenen Mindestwerten liegen sollten (Boyce 2014). Für Arbeiten mit kleinen Gegenständen kann beispielsweise zusätzlich zur normalen Raumbelichtung eine spezielle Arbeitsplatzbeleuchtung eingesetzt werden, durch die der definierte Bereich der visuellen Arbeit zusätzlich beleuchtet wird. Die Arbeitsplatzbeleuchtung ist besonders wichtig für die Qualitätskontrolle, bei der die normale Raumbelichtung in der Regel nicht ausreicht und die Arbeitsplätze manchmal von Objekten wie großen Maschinen oder Werkstücken beschattet werden. Die Beleuchtung muss unter Berücksichtigung von Oberflächenstruktur, Farbe, Reflexionen, Größe und Dauer des Überprüfungsprozesses auf die zu überprüfenden Produkte zugeschnitten sein. Für die Inspektion von matten, glänzenden oder transparenten Objekten bietet die Anwendung von diffusem, gleichmäßigem und schattenfreiem Licht gute Arbeitsbedingungen, wobei gerichtetes Licht aus mehreren Winkeln das Erkennen von Kratzern und Rissen in Oberflächenstrukturen aufgrund von Schatteneffekten erleichtert. Die Anpassungsfähigkeit der LEDs ermöglicht es, die Anwendungsanforderungen je nach Anwendungsfall zu erfüllen.

Gute Sichtbedingungen erleichtern nicht nur die Arbeit mit kleinen Gegenständen, sondern tragen auch dazu bei, Unfälle in der Werkstatt zu vermeiden (Veitch et al. 2013). Es gibt Hinweise darauf, dass ein angemessenes Licht in Produktionsbereichen, das entweder durch regelmäßige Raum- oder spezielle Arbeitsplatzbeleuchtung erzeugt wird, die Arbeitsgenauigkeit und die Produktqualität erhöht (Boyce 2014). Abhängig von der jeweiligen Anwendung müssen die Leuchten robust gegen Feuchtigkeit, Staub, Vibrationen und Temperaturänderungen sein, und möglicherweise müssen sie auch den höchsten Hygienestandards genügen, insbesondere in der Lebensmittelindustrie (Chang et al. 2015).

Bei der (Neu-)Planung von Arbeitsbereichen wird oftmals das Ziel verfolgt, die Produktivität, Qualität und Sicherheit unter Berücksichtigung der spezifischen betrieblichen Anforderungen und der Personalaspekte zu steigern. Der einfachste und in vielen Fällen kostengünstigste Weg, den Energieverbrauch in Produktions- und Logistikeinrichtungen zu senken, besteht darin, ein vorhandenes Beleuchtungssystem mit LEDs nachzurüsten. Dies ist auch ein guter Ausgangspunkt für den Einsatz intelligenter Lichtsteuerungssysteme (Santamouris und Dascalaki 2002). Mit intelligenten Beleuchtungssystemen können Unternehmen die an die Bedürfnisse der Arbeitnehmer angepasste Lichtintensität bereitstellen. Abhängig

²Lichtverschmutzung (engl. Light Pollution) bezeichnet die Aufhellung des Nachthimmels durch künstliche Lichtquellen, mit der Folge dauernder Abwesenheit völliger Dunkelheit in den betroffenen Gebieten.

von der in der Produktions- und Logistikeinrichtung verfügbaren Tageslichtmenge oder der Anwesenheit der Arbeiter kann das künstliche Licht so eingestellt werden, dass die erforderliche Beleuchtungsstärke erreicht wird (Yasodha et al. 2015). Darüber hinaus ist es möglich, Beleuchtungszonen und -profile einzurichten, die den individuellen Bedürfnissen jedes Arbeitnehmers gerecht werden. Diese können problemlos an mögliche Layout- oder Prozessänderungen angepasst werden, ohne dass die Beleuchtungskomponenten gewechselt werden müssen (De Bakker et al. 2018). LEDs können unterschiedliche Beleuchtungsstärken und Farbtemperaturen erzeugen, um die Gesundheit und das Wohlbefinden der Mitarbeiter zu fördern und die Betriebsleistung zu verbessern. Durch die weitere Berücksichtigung der menschlichen Bedürfnisse ist es möglich, die negativen Auswirkungen der Schichtarbeit zu verringern, indem die Beleuchtung an den natürlichen biologischen Tagesrhythmus der Arbeitnehmer angepasst wird.

Nachfolgend werden konkrete Anwendungsmöglichkeiten für intelligente Beleuchtungssysteme in der Lagerhaltung besprochen. Im weiteren Verlauf des Berichts werden die sich ergebenden Potenziale aus den einzelnen Systemen weiter untersucht.

Herkömmliche Beleuchtungssysteme in Lagern werden sehr häufig durch einfaches Ein- und Ausschalten gesteuert. Aus diesem Grund sind die Lichter im Betrieb des Lagers normalerweise voll eingeschaltet, was dazu führen kann, dass Zonen beleuchtet werden, obwohl sie derzeit nicht von Lagerarbeitern genutzt werden, was zu unnötigen Energiekosten führt. In Lagern (ähnlich wie in Büros, in denen der Einsatz solcher Systems schon weiter verbreitet ist) könnten Bewegungs- oder Präsenzmelder in jedem Gang eingesetzt werden, um die Anwesenheit von Arbeitern zu erkennen und das Licht entsprechend anzupassen. Abhängig von äußeren Einflüssen und dem Verhalten der Arbeiter ist es möglich, die Beleuchtungsstärke anzupassen, um das erforderliche Licht bereitzustellen.

VLC ermöglicht eine energieeffiziente, stabile und schnelle Datenübertragung innerhalb von Einrichtungen. Basierend auf der vorhandenen LED-Beleuchtung kann VLC in Beleuchtungssysteme integriert und an Orten eingesetzt werden, an denen das WLAN gestört ist, z. B. durch Abschirmungen, die durch das Gebäude oder die verwendete Ausrüstung verursacht werden (Pathak et al. 2015). Letzteres ist aufgrund von Maschinen, Regalen und anderen Einrichtungen ein häufig auftretendes Problem in Produktionsbereichen oder Lagern. Ein möglicher Anwendungsfall für VLC liegt auch in Kommissionierlagern vor, in denen Handhelds beispielsweise über die VLC-Technologie Daten in vordefinierten Bereichen empfangen können. Dies garantiert, dass nur Mitarbeiter, die zum Empfang der relevanten Informationen berechtigt sind, Zugriff darauf haben, da nur Empfänger in Sichtweite, die mit den erforderlichen Zugangsmöglichkeiten ausgestattet sind, Daten empfangen können. Dadurch bietet VLC eine erhöhte Datensicherheit und gewährleistet ein hohes Maß an Datenschutz.

VLC kann auch Indoor-Positionierungsanwendungen unterstützen, um beispielsweise den Standort von Kommissionierern und Geräten zu verfolgen. Diese Informationen können verwendet werden, um Mitarbeiter durch das Lager zu führen, um angeforderte Artikel in kürzester Entfernung zu erreichen, oder um Touren in Echtzeit zu aktualisieren, falls weitere Bestellungen im Lager eintreffen. In Verbindung mit der Beleuchtungssteuerung könnten die Positionsdaten verwendet werden, um nur die Gänge (vollständig) zu beleuchten, in denen Arbeiter anwesend sind. Die Verwendung intelligenter Beleuchtungssysteme in einem Lagerkontext würde sich beispielsweise direkt in Energieeinsparungen und verbessertem Wohlbefinden der Arbeiter niederschlagen und könnte auch zu niedrigeren Betriebskosten beitragen (z. B. als Ergebnis einer besseren Routenführung für die Kommissionierer). Das Erstellen von Warehouse-Heatmaps auf der Grundlage der gesammelten Standortdaten könnte schließlich auch dazu beitragen, die Auslastung von bestimmten Lagerbereichen zu analysieren. Dies kann hilfreich sein, wenn die Gänge häufig überfüllt sind oder der Lagerverwalter an einer Änderung der Lagerplatzzuweisungen interessiert ist (Grosse et al. 2013).

Intelligente Beleuchtungssysteme haben vielfältige Vorteile und ihre Bedeutung kann von Fall zu Fall und je nach den Merkmalen der Anwendung variieren. In Büros, Produktionsstätten und Lagern können diese Systeme beispielsweise ihr volles Potenzial entfalten, etwa bei der Qualitätskontrolle von Autolacken oder Arbeiten mit hoher Präzision in Dreh- und Fräsprozessen. Neben Innenanwendungen können intelligente Außenbeleuchtungssysteme für die Navigation, Unfallverhütung und Kriminalitätsbekämpfung auf großen Fabrikgrundstücken eingesetzt werden. In anderen Bereichen, wie z. B. Liefer- und Verladestellen, die in der Regel durch eine hohe Mitarbeiterzahl und häufige Lagerbewegungen gekenn-

zeichnet sind, können die Vorteile einer intelligenten Beleuchtung geringer sein (z. B. weil in diesen Bereichen keine individuellen, arbeitsspezifischen Beleuchtungszonen erforderlich sind).

3.2 Steuerung von Kommissioniervorgängen

3.2.1 Planungsprobleme und Lösungsverfahren in der Lagerwirtschaft

Wissenschaftliche Arbeiten zur Kommissionierung beschäftigen sich überwiegend mit manuellen Kommissioniersystemen, denen in der Praxis nach wie vor eine besondere Bedeutung zukommt, auch, da in vielen Warenlagern über 50% der Betriebskosten auf die Kommissionierung zurückzuführen sind (vgl. Frazelle 2002, Tompkins et al. 2010, Grosse et al. 2015). Die Kosten der Kommissionierung werden hierbei im Wesentlichen durch vier Faktoren beeinflusst: (1) Das Lagerlayout, das die Anordnung der Warenregale und der Gänge des Lagers festlegt (siehe z. B. Roodbergen und De Koster 2001), (2) die Lagerplatzvergabe, die die Zuordnung der Produkte auf die zur Verfügung stehenden Regalplätze bestimmt, (3) das „Order Batching“, das Kommissionieraufträge zusammenfasst oder aufsplittet, sowie (4) die operativen Ausführungsstrategien, die die Route vorgeben, auf denen sich der Kommissionierer durch das Lager bewegt, um Produkte aus den Regalfächern zu entnehmen. Da das Lagerlayout in vielen Unternehmen langfristig vorgegeben ist und nicht verändert werden kann bzw. soll, sind insbesondere die Entscheidungsprobleme (2) bis (4) für das vorliegende Forschungsprojekt relevant (vgl. dazu auch de Koster et al. 2007, Chackelson et al. 2013 und Davarzani und Norrman 2015 für einen Überblick über die genannten Entscheidungsprobleme): Im Entscheidungsproblem „Lagerplatzvergabe“ wird die Zuteilung von Produkten auf die Lagerplätze des Kommissionierlagers untersucht. In der Literatur werden hierbei zwei grundlegende Lagerplatzvergabepolitiken unterschieden (siehe de Koster et al. 2007, Gu et al. 2010, Gu et al. 2007). Wird eine Zufallssortierung angewandt, so werden Produkte ohne Berücksichtigung von Produkteigenschaften auf die zur Verfügung stehenden Lagerplätze zugeteilt. Diese Politik führt zu einem hohen Grad an Lagerraumnutzung und kann einfach umgesetzt werden, resultiert aber häufig in langen zurückzulegenden Wegstrecken im Rahmen des Kommissioniervorgangs. Liegt demgegenüber eine feste Lagerplatzzuordnung vor, werden Produkte stets an der gleichen Stelle eingelagert. Bei der Zuordnung von Produkten zu Lagerplätzen wird hierbei in der Regel die Nachfragehäufigkeit als Entscheidungskriterium verwendet (vgl. Pan et al. 2014), wobei neben der reinen Nachfragehäufigkeit auch Korrelationen in der Nachfrage von Artikeln berücksichtigt werden können (vgl. z. B. Brynzér und Johansson 1996, Glock und Grosse 2012, Xiao und Zheng 2012). Produkte, die häufig benötigt werden, können z. B. nahe am Depot positioniert werden, um lange Wegstrecken zu vermeiden (vgl. Battini et al. 2015), während Artikel, die häufig gemeinsam nachgefragt werden, nebeneinander eingelagert werden sollten (Korrelationsortierung, vgl. Brynzér und Johansson 1996, Glock und Grosse 2012, Xiao und Zheng 2012). Oftmals kommt auch eine klassenbasierte Sortierung (ABC-Sortierung, vgl. Berglund und Batta 2012) zum Einsatz, bei der Produkte gemäß ihrer Umsatzhäufigkeit in meist drei Klassen eingeteilt werden, mit A=Schnelldreher, B=Mitteldreher und C=Langsamdreher. A-Produkte sollten dementsprechend nahe am Depot eingelagert werden. Eine Mischvariante stellt das sogenannte „Zoning“ (Zonensortierung, vgl. de Koster et al. 2012) dar, bei dem das Kommissionierlager in mehrere Zonen unterteilt und jeder Zone in der Regel jeweils ein Kommissionierer zugeteilt wird. Innerhalb der Zonen kann eine zufällige oder feste Lagerplatzvergabe erfolgen.

Das Entscheidungsproblem „Order Batching“ beschäftigt sich mit dem Zusammenfassen oder Aufteilen von mehreren Kundenaufträgen zu Kommissionieraufträgen (vgl. Henn 2012). Order Batching kann in der Praxis u. a. dann notwendig werden, wenn (sehr) kleine Aufträge am Kommissionierlager ankommen, die nicht wirtschaftlich abgearbeitet werden können, oder dann, wenn Aufträge zu groß sind, sodass sie von einem einzelnen Kommissionierer nicht in einer Tour abgearbeitet werden können. Verfahren des Order Batching können insbesondere zu einer Verringerung der Wegzeit bei der Kommissionierung beitragen, da bestimmt wird, welche Kundenaufträge in einer Kommissionierroute abgearbeitet werden können, um somit unnötige Wegstreckenanteile zu vermeiden. Für spezielle Ausprägungen des Order Batching-Problems wurden optimierende Verfahren entwickelt (vgl. Gademann und van de Velde 2005); die meisten Arbeiten fokussieren jedoch die Entwicklung und Anwendung von heuristischen (vgl. Bo-

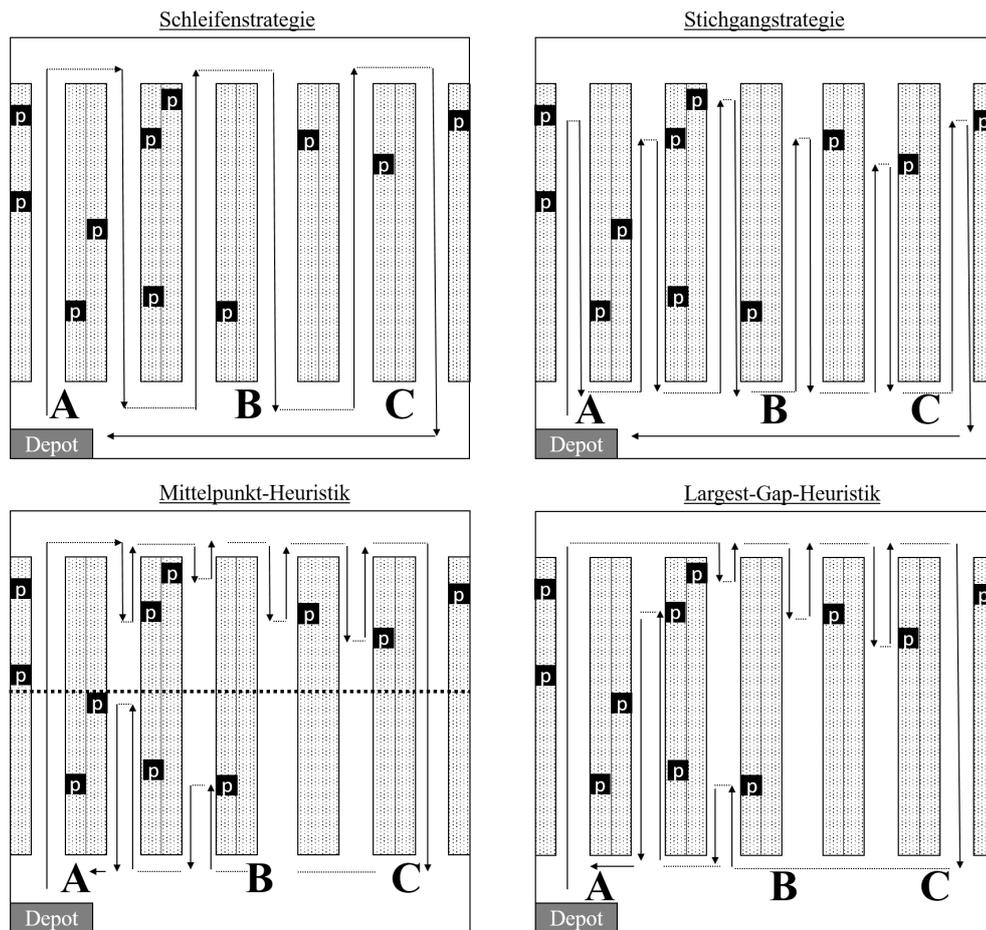


Abbildung 3.1: Schematische Darstellung von vier möglichen Routenpolitiken

zer und Kile 2008, Hsieh und Huang 2011, Hong et al. 2012) oder metaheuristischen Lösungsverfahren (vgl. Henn und Schmid 2013, Matusiak et al. 2014). Das Entscheidungsproblem „Routenplanung“ entwickelt Routenpolitiken in Kommissionierlagern und versucht, für Aufträge eine Reihenfolge für das Aufsuchen von Lagerplätzen zu ermitteln (sog. Gangfolge), die die zurückzulegende Wegstrecke (und äquivalent die dafür benötigte Zeit) minimiert. Der Schwerpunkt der Forschung lag in der Vergangenheit auf der Entwicklung einfacher heuristischer Lösungsverfahren, die zwar nicht unbedingt eine optimale Gangfolge ermitteln können, dafür in der Praxis aber einfach zu implementieren sind (siehe z. B. Petersen und Schmenner 1999, Theys et al. 2010, Grosse et al. 2014, Masae et al. 2019). Abbildung 3.1 stellt die in der Praxis am häufigsten verwendeten Routenpolitiken beispielhaft dar (vgl. Sadowsky 2007, de Koster et al. 2007, ten Hompel et al. 2011). Angenommen wurde im Beispiel eine Regalanordnung mit zwölf Regalen, sechs Gängen, jeweils vorne und hinten einem Quergang, Bedarfspunkten (p), drei Lagerklassen (ABC) und einem Depot am linken Rand des unteren Quergangs. Einige Studien zeigten, dass heuristische Routenpolitiken in vielen Fällen zu sehr guten Ergebnissen führen, sodass sie aufgrund ihrer einfachen Umsetzbarkeit in der betrieblichen Anwendung oftmals bevorzugt werden (Hwang et al. 2004, Petersen und Aase 2004, Pan et al. 2014). Heuristiken kommen daneben auch zum Einsatz, weil nicht für alle Lagerstrukturen optimale Gangfolgen effizient ermittelt werden können, und ferner auch, weil optimale Gangfolgen in manchen Fällen komplex und damit für den Kommissionierer schwer verständlich sind, sodass dieser möglicherweise von der vorgegeben Gangfolge abweicht (vgl. Gademann und van de Velde 2005 und Glock et al. 2017). Dieser Nachteil optimaler Gangfolgen tritt jedoch beim Einsatz eines intelligenten Beleuchtungssystems in den Hintergrund; die sehr genaue Positionsbestimmung erlaubt eine exakte Anweisung des Kommissionierers, wodurch sich auch komplizierte Gangfolgen umsetzen lassen.

Wie der Überblick über den Stand der Forschung zeigt, liegt bei der Lagerlogistikplanung, und insbe-

sondere bei der Planung von Kommissionierprozessen, der Schwerpunkt üblicherweise auf Verfahren, die zu einer Reduktion der Kommissionierzeit beitragen. Energieverbräuche in manuell betriebenen Lagern wurden in wissenschaftlichen Untersuchungen zur Kommissionierung bislang kaum berücksichtigt (Masae et al. 2019). Thematisch verwandte Studien beschäftigen sich größtenteils mit Energieverbräuchen in automatisierten Lagern (vgl. Tappia et al. 2015, Meneghetti und Monti 2015). Die wenigen Studien, die sich mit Energieverbräuchen in manuell betriebenen Lagern befassen, bestätigen jedoch, dass insbesondere die Beleuchtung von Lagerhallen einen erheblichen Anteil an den Energiekosten von Warenlagern ausmacht (United Kingdom Warehouse Association 2010, Dhooma und Baker 2012, Richards 2014, Fichtinger et al. 2015, Ries et al. 2017). Im Falle, dass die Energie aus fossilen Brennstoffen (v. a. aus Kohle und Gas) gewonnen wird, trägt diese nicht unerheblich zum CO₂-Fußabdruck des Unternehmens bei.

Die Reduktion unnötiger Energieverbräuche im Lager stellt vor dem Hintergrund der obigen Ausführungen einen wichtigen Hebel zur Reduktion von Kosten und zur Verbesserung ökologischer Kennzahlen dar. Ein besonderes Verbesserungspotenzial weisen die im durchgeführten Literaturüberblick in Kapitel 3.1 vorgestellten intelligenten Beleuchtungssysteme auf, da diese die Beleuchtung im Lager automatisiert an die Nutzung unterschiedlicher Lagerzonen anpassen können und daneben auch die Möglichkeit besteht, die Beleuchtungssysteme direkt in der Planung der operativen Kommissionierung (siehe Erläuterungen oben) zu berücksichtigen und Kommissionierprozesse – wo nötig – anzupassen. Wie in Kapitel 3.1 bereits angesprochen, war in der einschlägigen wissenschaftlichen Literatur das Management dieser Systeme bislang nicht Gegenstand von (hochwertigen) Forschungsarbeiten. Damit fehlen wissenschaftliche Studien, die die Kosten-Nutzen-Wirkungen solcher Beleuchtungssysteme in Zusammenhang mit weiteren Planungsparametern aus Sicht der Prozessoptimierung untersuchen. Derartige Studien sind aber dringend nötig, um verlässliche Aussagen und Empfehlungen zum Einsatz dieser Systeme für die Unternehmenspraxis zu treffen. Im folgenden Abschnitt 3.2.2 werden zunächst leistungsfähige Modelle zur Bestimmung optimaler Gangfolgen in komplexen Kommissioniersystemen vorgestellt, welche sich durch intelligente Beleuchtungssysteme in der Praxis umsetzen lassen, da diese zur präzisen Steuerung von Kommissionierern eingesetzt werden können. In Kapitel 4.3 wird gezeigt, wie sich bei vorgegebenen Gangfolgen für Kommissionierer eine Reduktion der Beleuchtungskosten erreichen lässt, ohne die Performanz des Kommissioniersystems zu beeinträchtigen. Die Forschungsergebnisse aus diesem Projekt tragen somit dazu bei, die identifizierten Forschungslücken zu schließen.

Neben der Reduktion von Kosten und Energieverbräuchen können intelligente Beleuchtungssysteme weitere moderne Anwendungen erschließen. Um Zeiten für die Kommissionierung in herkömmlichen Person-zu-Ware Lagersystemen zu reduzieren, können etwa fahrerlose Transportfahrzeuge (FTFs) zur Unterstützung von menschlichen Kommissionierern eingesetzt werden. Hierbei stellt die auf visual light communication (VLC) basierende Innenraumpositionsbestimmung (siehe Abschnitt 3.1.2) einen zentralen technologischen Baustein bei der Umsetzung solcher Systeme dar. Wenn ein FTF automatisch betrieben wird, ist die Navigation eine der wesentlichen Aufgaben, die durch geeignete Software und Sensorik gelöst werden muss. Hierbei ist die Lokalisierung ein ganz wesentlicher Faktor, um die Positionsbestimmung sowie aktuelle Fahrtrichtung und -geschwindigkeit der FTFs zu bestimmen. Lokalisation durch GPS ist keine praktikable Alternative, da es in Gebäuden nicht oder nur unzuverlässig verfügbar ist und mit heutigem technischem Stand nur eine Genauigkeit von drei bis fünf Metern aufweist, die für Anwendungen im Warenlager nicht ausreicht. Zwar stehen für die Positionsbestimmung von FTFs bereits andere Technologien, basierend auf Sensoren, Radiofrequenznetzwerktechnik und visueller Datenerkennung am FTF, zur Verfügung, jedoch erfordern diese umfangreiche Eingriffe in die existierende Infrastruktur und ziehen eine aufwendige Wartung nach sich (Ghassemlooy et al. 2017). Sollen Kommissionierer mit einem portablen Gerät ausgestattet werden, müssten diese Technologien in ein kompaktes Endgerät integriert werden. VLC hingegen ermöglicht es, den Kommissionierer unter Verwendung der verbauten Kamera mit einem gewöhnlichen Tablet oder Smartphone zum nächsten Artikel zu führen; FTFs lassen sich daneben auch leicht mit einem solchen Modul ausrüsten. Abbildung 3.2 zeigt exemplarisch ein durch FTFs unterstütztes Kommissioniersystem, welches mithilfe intelligenter Beleuchtungssysteme, insbesondere einem VLC-System, ausgestattet ist.

Wie in Abbildung 3.2 aufgezeigt, wird in einem durch FTFs unterstützten Kommissioniersystem, je-

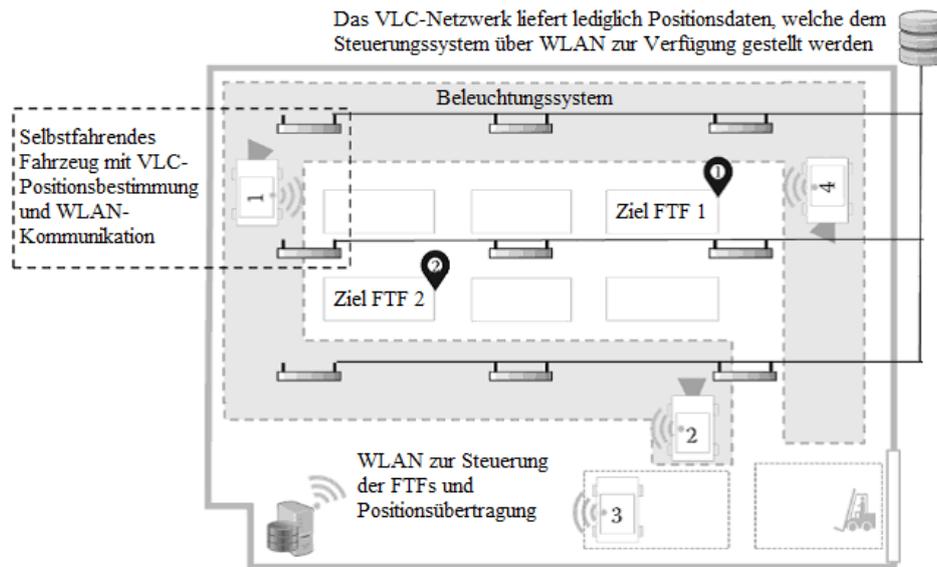


Abbildung 3.2: Beispiel für ein System zur Steuerung von FTFs durch VLC (aus Ghassemlooy et al. 2017).

der menschliche Kommissionierer während des Kommissioniervorgangs von einem FTF begleitet. FTFs übernehmen die kommissionierten Artikel und fahren, sobald ein Kommissionierauftrag abgeschlossen ist, autonom zurück in den Versandbereich. In der Zwischenzeit wird ein neues FTF angefordert, um den Kommissionierer an der ersten Lagerposition des nachfolgenden Kommissionierauftrags zu treffen. So muss der Kommissionierer nicht zum Versandbereich zurückkehren, sondern kommissioniert, geleitet durch VLC, kontinuierlich Auftrag für Auftrag. An Forschungsstelle 2 wurden dazu Lösungsverfahren zur Bestimmung von Gangfolgen für durch FTFs unterstützte Kommissionierer entwickelt (Löffler et al. 2018). Es zeigt sich, dass der Einsatz von FTFs eine Verbesserung der bei der Kommissionierung zurückgelegten Wegstrecke um bis zu 20% erlaubt.

3.2.2 Komplexe Modelle zur Optimierung der Kommissionierung

Intelligente Beleuchtungssysteme bieten mittels VLC neue Möglichkeiten bei der Implementierung von Kommissioniersystemen. Sehr präzise IPS auf der Basis von VLC erlauben die Umsetzung von neuartigen Verfahren zur Gangfolgebestimmung. In diesem Abschnitt wird zunächst ein grundlegendes mathematisches Modell zur Gangfolgebestimmung für die Kommissionierung vorgestellt, welches anschließend auf drei verschiedene komplexe Modelle erweitert wird. Dazu wird die Technik der gemischt-ganzzahligen linearen Programmierung eingesetzt, welche eine der Standardtechniken des Operations Research (OR) darstellt. Es wird vorausgesetzt, dass der Leser Basiskenntnisse der gemischt-ganzzahligen linearen Programmierung besitzt. Leser, welche weniger am theoretischen Hintergrund als an den Projektergebnissen interessiert sind, sollten bei Kapitel 4 weiterlesen.

Die Kommissionierung ist eine zentrale und arbeitsintensive Aufgabe im Warenlager. Das Ziel der Single-Picker-Routing-Probleme (SPRPs) besteht darin, für einen Kommissionierer eine Gangfolge mit minimalen Kosten zu bestimmen, so dass der Kommissionierer die Lagerorte aller in der Kommissionierliste aufgeführten Lagerhaltungseinheiten (LEs) besucht und die Gangfolge am Depot beginnt und endet (Masae et al. 2019). Die Kosten einer Gangfolge werden in der Regel als Entfernung oder Zeit gemessen. Ein-Block-SPRPs sind ein häufig betrachteter Spezialfall für rechteckige Lager, in dem die LEs in Regalen entlang beider Seiten mehrerer paralleler Regalgassen, die von einem Quergang ohne Warenbestand oben und unten umschlossen sind, gelagert werden (siehe Abbildung 3.3). Jede der Regalgassen enthält eine Reihe von Kommissionierpositionen und mehrere verschiedene LEs können sich an der gleichen Kommissionierposition befinden. Bei Ein-Block-SPRPs muss nicht zwischen einem Kommissionierauftrag aus dem Regal auf der linken oder rechten Seite oder von beiden Seiten einer Kommissionierposition

unterschieden werden. Aus Optimierungssicht werden alle diese Fälle gleich behandelt und nur die Strecke, die zurückgelegt werden muss, um die Kommissionierpositionen in den Regalgassen zu erreichen, ist von Bedeutung. Daher ist im Folgenden eine Kommissionierauftragliste als eine Menge von Kommissionierpositionen, die der Kommissionierer aufsuchen muss, charakterisiert.

Das Ein-Block-SPRP mit dedizierter Lagerung, in dem jede LE nur von einem einzelnen Lagerplatz im Lager verfügbar ist, ist die am häufigsten untersuchte Variante und wird im Folgenden als Standard-SPRP bezeichnet. In einer grundlegenden Arbeit stellen Ratliff und Rosenthal (1983) einen Algorithmus zur optimalen Lösung des Standard-SPRP vor, der Dynamische Programmierung (DP) verwendet und eine Rechenzeit besitzt, die proportional zur Anzahl der Regalgassen ist. Roodbergen und De Koster (2001) erweitern das DP auf Warenlager mit zwei Blöcken (getrennt durch einen weiteren Quergang in der Mitte) und Pansart et al. (2018) stellen ein DP vor, das für ein Lager mit beliebiger Anzahl an Blöcken anwendbar ist. Jedoch steigt in diesem Fall die Rechenzeit sehr schnell (exponentiell) mit der Anzahl der Quergänge.

SPRPs können auch durch mathematische Formulierungen beschrieben werden, die dann mit Hilfe von Optimierungssoftware (sogenannter *Solver*) gelöst werden. Um das Standard-SPRP zu lösen, reduzieren Scholz et al. (2016) die Anzahl der Knoten, die in jeder Regalgasse berücksichtigt werden müssen, basierend auf der Tatsache, dass die größte Lücke zwischen zwei Kommissionierpositionen in einer Regalgasse nie durchquert wird, wenn der Gang von oben und unten betreten wird. Diese Idee wurde ursprünglich in Ratliff und Rosenthal (1983) diskutiert. Auf dem resultierenden Graphen lösen sie eine flussbasierte Formulierung einer Variante des Traveling-Salesman-Problem (TSP), die optionale Knoten enthält, die die Richtung beim Betreten und Verlassen jeder Regalgasse spezifizieren. Auf diese Weise erhalten sie eine mathematische Formulierung, deren Größe proportional zur Anzahl der Regalgassen ist. Diese Formulierung wird mit drei auf einem vollständigen Graphen definierten TSP-Formulierungen, die die zu kommissionierenden LEs und eine für Ein-Block-Lager angepasste Steiner-TSP-Formulierung umfasst, verglichen. Die Autoren demonstrieren an einer großen Anzahl von Testinstanzen die Überlegenheit ihrer Formulierung im Vergleich zu vorherigen Arbeiten. Ihre Formulierung kann auch auf Multi-Block-Lager erweitert werden, aber sie stellen nur Ergebnisse für das Standard-SPRP dar. Pansart et al. (2018) stellen ein Modell des SPRP in Multi-Block-Lagern vor, das auf einer Single-Commodity-Formulierung des Steiner-TSP basiert. Die Autoren verwenden eine ähnliche Vorgehensweise wie die in Scholz et al. (2016) beschriebene, um die Anzahl der Knoten zu reduzieren. Die Anzahl der zu berücksichtigenden Bögen wird mittels eines kommerziellen Solvers durch das Lösen eines minimalen Spannbaumproblems, in dem die Distanz zwischen jedem Knotenpaar der Distanz im Ausgangsgraphen entspricht, verringert. Darüber hinaus werden gültige Ungleichungen unter Ausnutzung der besonderen Struktur des Lagers hinzugefügt und der Solver wird mit einer oberen Schranke, welche mit einer frei verfügbaren Version der Heuristik von Lin und Kernighan (1973) berechnet wird, initialisiert. Bei Instanzen für Ein-Block-Lager ist die Formulierung von Pansart et al. (2018) der von Scholz et al. (2016) deutlich überlegen.

In diesem Kapitel wird eine kompakte Formulierung des Standard-SPRP vorgestellt, die unmittelbar zwei Eigenschaften einer optimalen Tour nutzt, die im Algorithmus von Ratliff und Rosenthal (1983) verwendet werden: (i) zwei aufeinanderfolgende Regalgassen können nur mit vier möglichen Konfigurationen verbunden werden und (ii) um die Erzeugung von isolierten Subtours zu verhindern, genügt es sicherzustellen, dass die Tour immer verbunden ist und der Grad der Verbindungen an Eingang und Ausgang jedes Kommissioniergangs gerade ist. Somit sind keine klassischen Subtour-Eliminationsbedingungen erforderlich. Obwohl keine Vorverarbeitung der Instanzen vorgenommen oder Ungleichungen hinzugefügt werden, um die Lösung des neuen Modells zu beschleunigen, übertrifft die Formulierung die von Scholz et al. (2016) bei einer Reihe von Benchmark-Instanzen mit bis zu 30 Regalgassen und 45 erforderlichen Kommissionierpositionen mit einem vergleichbaren Computer deutlich und ist etwa sechsmal schneller als die von Pansart et al. (2018). Der neue Ansatz zeigt ein überzeugendes Skalierungsverhalten und ist in der Lage, Instanzen mit 1000 Gängen, 1000 verfügbaren Kommissionierpositionen pro Gang und 1000 benötigten Kommissionierpositionen in ungefähr zwei Minuten zu lösen. Darüber hinaus kann das Modell erweitert werden, um drei wichtige Anwendungen zu berücksichtigen, die für moderne E-Commerce-Lager relevant sind:

- **Verteilte Lagerung:** In Lagern mit verteilter Lagerung kann jede LE von mehr als einer Kom-

missionierposition aus verfügbar sein. Dieses Lagersystem spielt eine wichtige Rolle in modernen E-Commerce-Lagern von Unternehmen wie Amazon oder Zalando und findet zunehmend Beachtung in der Wissenschaftsgemeinschaft (siehe z. B. Boysen et al. 2019, Weidinger et al. 2019). Daniels et al. (1998) schlagen eine TSP-Formulierung für das SPRP mit verteilten Lagerplätzen für beliebige Lagerlayouts vor und vergleichen mehrere Heuristiken. Weidinger (2018) zeigt, dass das Ein-Block-SPRP mit verteilter Lagerung NP-schwer ist. Er schlägt eine Heuristik vor, die auf der Zerlegung des Problems in (i) die Auswahl der zu kommissionierenden Artikel und (ii) die Bestimmung der Gangfolge basiert. Als Vergleichsmethode wird die Formulierung von Daniels et al. (1998) mit Subtour-Eliminationsbedingungen nach Miller et al. (1960) in Gurobi implementiert. Bei einem Zeitrahmen von drei Stunden ist die Formulierung in der Lage, die meisten der von den Autoren erzeugten Ein-Block-Lagerinstanzen mit drei Regalgassen, 30 Kommissionierpositionen pro Gang und Kommissionierauftragslisten mit bis zu sieben angeforderten LEs zu lösen. Im Gegensatz dazu löst die Erweiterung der hier vorgestellten Formulierung auf den Fall des Ein-Block-SPRP mit verteilter Lagerung große Instanzen mit bis zu 100 Regalgassen, 180 Kommissionierpositionen pro Gang und Kommissionierlisten mit bis zu 30 LEs innerhalb kurzer Laufzeiten von höchstens drei Minuten.

- **Entkopplung von Kommissionierer und Transportwagen:** Bei der manuellen Kommissionierung werden Artikel in der Regel von einem Kommissionierer, der einen Wagen schiebt, aus dem Lager entnommen, sodass mehrere Artikel während einer Gangfolge kommissioniert werden können. Um die Kommissionierung zu beschleunigen, ermöglicht Zalando, dass die Kommissionierer den Wagen während der Ausführung der Gangfolge parken, einige Artikel ohne Wagen aufnehmen, dann zum Wagen zurückkehren und die Gangfolge fortsetzen (vergleichbar dem Einkaufsverhalten von Käufern in Supermärkten). Das Unternehmen berücksichtigt diese Option bei der Planung von Gangfolgen (Seward 2015, Seward et al. 2014); allerdings wurde noch kein mathematisches Modell oder Algorithmus veröffentlicht. Unsere neue Formulierung wird auf das Ein-Block-SPRP mit Entkopplung von Kommissionierer und Wagen erweitert und die potenzielle Zeitersparnis dieses Ansatzes in Abhängigkeit von der Tragekapazität und der Geschwindigkeit des Kommissionierers mit und ohne Wagen untersucht.
- **Mehrere Abgabestellen:** Um die zeitintensive Rückkehr zu einem zentralen Versandbereich (*Depot*) zu vermeiden, können Lagerleiter mehrere Stellen nutzen, in denen gesammelte Artikel abgegeben werden können, z. B. an bestimmten Aufgestellen eines Förderbandes. De Koster und van der Poort (1998) betrachten das Single-Block-SPRP mit dezentraler Ablage, wobei sie davon ausgehen, dass es möglich ist, Gegenstände überall entlang des oberen oder unteren Quergangs abzulegen. Scholz et al. (2016) zeigen, wie sie ihre Formulierung auf diese Problemvariante erweitern können, aber sie präsentieren nur Ergebnisse für den Fall eines einzelnen Depots. Daher wird als letzter Anwendungsfall unsere neue Formulierung zum Ein-Block-SPRP mit mehreren Abgabestellen (Enddepots) erweitert und das Kosteneinsparungspotenzial in Abhängigkeit von der Anzahl der verfügbaren Enddepots untersucht.

Obwohl die Verwendung der neuen Formulierung mit einem kommerziellen Solver nicht die Geschwindigkeit einer Implementierung des DP-Ansatzes von Ratliff und Rosenthal (1983) in einer höheren Programmiersprache erreicht, hat der beschriebene Ansatz die folgenden Vorteile:

- Die Formulierung kann von jedem, der mit einer Optimierungssoftware vertraut ist, leicht implementiert und verwendet werden. Es sind keine Kenntnisse einer höheren Programmiersprache erforderlich, und es sind keine Erfahrungen in der algorithmischen Programmierung zur Realisierung eines DP erforderlich. Dieser Punkt ist sicherlich in der Praxis relevant, wo algorithmische Programmierkenntnisse im Allgemeinen viel seltener sind als an Universitäten und anderen wissenschaftlichen Organisationen.
- Die Formulierung kann erweitert werden, um drei wichtige Anwendungsfälle (verteilte Lagerung, Entkopplung von Kommissionierer und Wagen und mehrere Enddepots) in modernen E-

Commerce Warenlagern zu realisieren und andere in der Praxis auftretende Nebenbedingungen abzubilden.

- Die Formulierung kann für integrierte Probleme verwendet werden, bei denen die übergeordnete Entscheidung vom Ergebnis der SPRP abhängt, z. B., die Zusammenstellung von Aufträgen (Gademann und van de Velde 2005, Valle et al. 2017) oder die Zuteilung von Lagerplätzen (Petersen und Schmenner 1999). So könnte beispielsweise das Problem der integrierten Auftragsbündelung und Gangfolgenbestimmung durch i) Spaltengenerierung gelöst werden, bei der das Modell so modifiziert wird, dass es das Subproblem löst, in dem die Aufträge mit Preisen verknüpft sind, und der Kommissionierer kann nur Aufträge kommissionieren, bei denen die Anzahl der gesammelten Artikel die Kapazität des Bündels nicht überschreitet, oder ii) durch eine kompakte Formulierung, die das Modell um einen Index für jedes Bündel (bis zur maximalen Anzahl der Bündel) und eine Kapazitätsnebenbedingung für jedes Bündel erweitert. Das integrierte Auftragsbündelung- und Gangfolgebestimmungsproblem könnte mit diesem Modell in einem verteilten Lager untersucht werden.

Dieses Kapitel ist wie folgt gegliedert: Zuerst wird die kompakte Formulierung für das Standard-SPRP in Abschnitt 3.2.2.1 vorgestellt. Die folgenden Abschnitte beschreiben die Erweiterungen des Modells für die Anwendung im Lager mit verteilten Lagerplätzen (Abschnitt 3.2.2.2), der Entkopplung von Kommissionierer und Wagen (Abschnitt 3.2.2.3) und mit mehreren Enddepots (Abschnitt 3.2.2.4). In Abschnitt 3.2.2.5 werden die numerischen Studien diskutiert, die durchgeführt wurden, um die Geschwindigkeit und Grenzen der Formulierung und den Nutzen der betrachteten Erweiterungen zu beurteilen. Abschnitt 3.2.2.6 schließt das Kapitel.

3.2.2.1 Mathematische Formulierung des Standard-SPRP

Um eine Instanz des Standard-SPRP zu lösen, kann das Lager auf seinen relevanten Teil beschränkt werden, d. h., alle Gänge, die links von dem letzten Gang liegen, der entweder das Depot oder eine zu kommissionierende LE enthält, und analog dazu können alle Gänge entfernt werden, die rechts vom letzten Gang liegen, der eine LE oder das Depot enthält. Der verbleibende Ausschnitt des Lagers wird durch eine Menge von Gängen $\mathcal{J} = \{0, \dots, m-1\}$ beschrieben, wobei die m Gänge von links nach rechts nummeriert sind. Jeder Gang $j \in \mathcal{J}$ hat n verfügbare Kommissionierpositionen, nummeriert von oben nach unten, aus denen $\mathcal{I}_j \subseteq \{0, \dots, n-1\}$ vom Kommissionierer besucht werden müssen, um die Auftragsliste zu erfüllen. Das Depot kann sich an den Eingängen zu den Regalgassen im oberen oder unteren Quergang befinden. Die Regalgasse über/unter dem sich das Depot befindet, wird als Gang l bezeichnet. Der Koeffizient θ wird auf 1 gesetzt, wenn sich das Depot im oberen Quergang befindet, ansonsten auf 0.

Das Beispiel in Abbildung 3.3 veranschaulicht die eingeführten Konzepte: Es existieren acht Regalgassen mit $n = 10$ verfügbaren Kommissionierpositionen pro Gang. Die LEs müssen aus den neun schwarz markierten Kommissionierpositionen entnommen werden. Es müssen nur die $m = 6$ Gänge mit zu besuchenden Kommissionierpositionen berücksichtigt werden, d. h. $\mathcal{J} = \{0, \dots, 5\}$. Die Kommissionierpositionen in den Gängen werden durch $\mathcal{I}_0 = \{1\}$, $\mathcal{I}_1 = \{9\}$, $\mathcal{I}_2 = \{2, 3, 7\}$, $\mathcal{I}_3 = \{3\}$, $\mathcal{I}_4 = \{5, 6\}$, und $\mathcal{I}_5 = \{7\}$ angegeben. Das Depot befindet sich am unteren Ende von Gang 3, d. h. $l = 3$ und $\theta = 0$.

Wie in Ratliff und Rosenthal (1983) beschrieben, gibt es vier mögliche Konfigurationen, um Gang j und Gang $j+1$ über die Quergänge oben und unten im Lager zu verbinden. Wir stellen diese Konfigurationen mit Hilfe der folgenden binären Entscheidungsvariablen dar:

- \bar{x}_j ist gleich 1, wenn der obere Quergang zweimal durchquert wird (hin und zurück), ansonsten 0,
- \underline{x}_j ist gleich 1, wenn der untere Quergang zweimal durchquert wird (hin und zurück), ansonsten 0,
- \bar{x}_j ist gleich 1, wenn der untere und der obere Quergang beide einmal durchquert werden, ansonsten 0, und

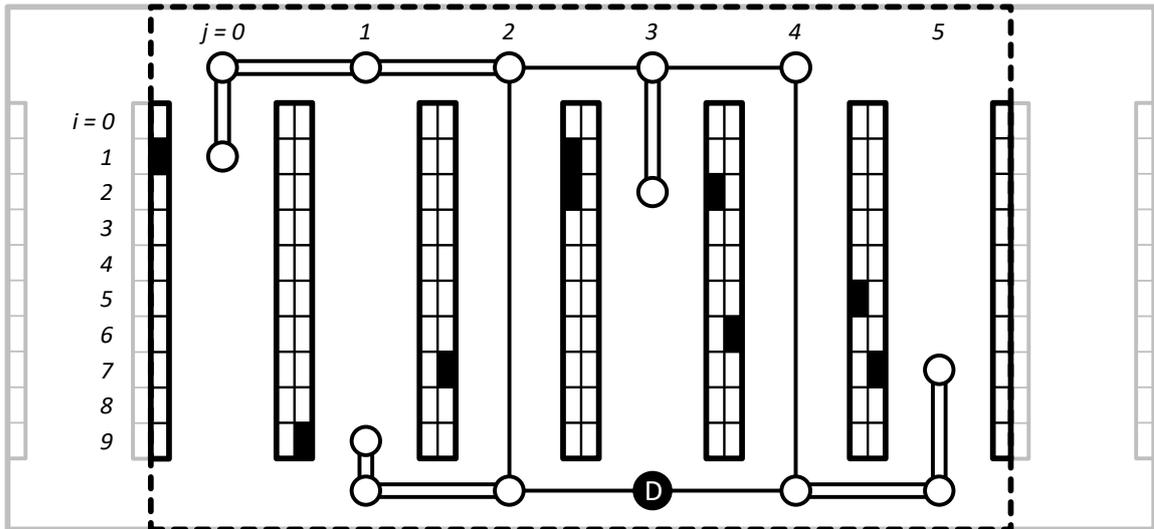


Abbildung 3.3: Optimale Lösung einer Beispielinstante des Standard-SPRP.

- \bar{x}_j ist gleich 1, wenn sowohl der obere als auch der untere Quergang zweimal durchquert werden, ansonsten 0.

Im Hinblick auf die Durchquerung von Regalgassen werden die binären Entscheidungsvariablen x_j^i verwendet, um anzuzeigen, dass der Gang j einmal vollständig (in beliebiger Richtung) durchquert wird. Wenn die Kosten für das Durchqueren der Regalgassen unterschiedlich sind, kann es vorteilhaft sein, einen Gang j zweimal zu durchqueren: In diesem Fall ist x_j^i gleich 1. Wenn die Kosten für das Durchqueren der Regalgassen alle gleich sind, gibt es immer eine optimale Lösung, bei der kein Gang zweimal durchlaufen wird (siehe Ratliff und Rosenthal 1983). Darüber hinaus gibt die binäre Entscheidungsvariable \check{x}_{ji} (\check{x}_{ji}) an, dass die Kommissionierposition i in Regalgasse j und alle Kommissionierpositionen, die sich zwischen dem oberen (unten) Quergang und der Kommissionierposition i befinden, über einen Stichgang von oben (unten) besucht werden, d. h., die Regalgasse wird vom gleichen Quergang aus betreten und verlassen. Für jede der beschriebenen Entscheidungsvariablen werden Kostenkoeffizienten c vorbereitet, die den zusätzlichen Kosten des Kommissionierers entsprechen, wenn die jeweilige Entscheidungsvariable gleich 1 ist, so hat zum Beispiel \bar{x}_j einen Koeffizienten \bar{c}_j , der dem Vierfachen der Kosten entspricht, die zwischen Gasse j und $j+1$ anfallen. Abbildung 3.3 veranschaulicht die Bedeutung der Entscheidungsvariablen: $\check{x}_{01}, \bar{x}_0, \check{x}_{19}, \bar{x}_1, x_2^1, \bar{x}_2, \check{x}_{32}, \bar{x}_3, x_4^1, \bar{x}_4, \check{x}_{57}$ sind im Beispiel gleich 1.

Um die Erzeugung von isolierten Subtours zu verhindern, ist es hinreichend, wie in Ratliff und Rosenthal (1983) erläutert, dass i) der Grad der (die Summe aller) Verbindungen am Eingang und Ausgang einer Regalgasse gerade ist und ii) die Gangfolge zusammenhängt. Die erste Bedingung kann realisiert werden, indem die Eigenschaft ausgenutzt wird, dass ein gerader Grad geteilt durch zwei eine ganze Zahl ist. Hierzu wird für jede Regalgasse j eine ganzzahlige Variable $\hat{\pi}_j$ ($\hat{\pi}_j$) eingeführt, deren Wert dem Grad der Verbindungen oberhalb (unterhalb) der Gasse j geteilt durch zwei entspricht. In Abbildung 3.3 ist beispielsweise $\hat{\pi}_2 = 2$ und $\hat{\pi}_3 = 1$. Um sicherzustellen, dass die Gangfolge verbunden ist, wird eine zusätzliche binäre Variable τ_j für jede Regalgasse j definiert, die gleich 0 ist, wenn die Gangfolge an Gasse j mit der am weitesten links gelegenen relevanten Gasse im Lager verbunden ist, und gleich 1, wenn die Gangfolge aus zwei Komponenten besteht. Zwei Komponenten entstehen immer dann, wenn (i) die Konfiguration \bar{x}_j an der am weitesten links gelegenen Gasse auftritt, oder (ii) ein Wechsel von Konfiguration \bar{x}_{j-1} oder \underline{x}_{j-1} zu Konfiguration \bar{x}_j stattfindet, ohne dass oberer und unterer Quergang durch die Regalgasse j verbunden werden.

Mit den obigen Definitionen kann das Standard-SPRP formuliert werden. Um die Übersichtlichkeit zu verbessern und die Wiederholung sehr ähnlicher Nebenbedingungen für verschiedene Indexmengen zu vermeiden, wird die Notation wie folgt angepasst: (i) Es werden bedingte Anweisungen verwendet, um die relevante Indexmenge zu definieren oder sie auf einen relevanten Teil zu begrenzen und (ii) die Schreibweise $[\dots]$ wird verwendet, um zu definieren, dass ein Teil eines Ausdrucks nur für einen einge-

Bereich

schränkten Bereich der Indexmenge relevant ist (und andernfalls gleich 0 ist).

$$\min \sum_{j \in \mathcal{J}} \underline{c}_j \underline{x}_j + \bar{c}_j \bar{x}_j + \underline{\bar{c}}_j \bar{x}_j + \bar{\bar{c}}_j \bar{\bar{x}}_j + c_j^l x_j^l + c_j^u x_j^u + \sum_{j \in \mathcal{J}} \sum_{i \in \mathcal{I}_j} (c_{ji} \check{x}_{ji} + \check{c}_{ji} \check{x}_{ji}) \quad (3.1)$$

so dass,

$$\underline{x}_j + \bar{x}_j + \bar{x}_j + \bar{\bar{x}}_j = 1 \quad j \in \mathcal{J} \setminus \{m-1\} \quad (3.2)$$

$$x_j^l + x_j^u + \sum_{i' \in \mathcal{I}_j; i' \geq i} \check{x}_{ji'} + \sum_{i' \in \mathcal{I}_j; i' \leq i} \check{x}_{ji'} \geq 1 \quad j \in \mathcal{J}, i \in \mathcal{I}_j \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} & [\underline{x}_{j-1} + \bar{x}_{j-1} + \bar{\bar{x}}_{j-1}] + \underline{x}_j + \bar{x}_j + \bar{\bar{x}}_j \geq \check{x}_{ji} && \text{wenn } (\overset{\circ}{\theta} = 1) \{j \in \mathcal{J}\} \\ & \text{sonst } \{j \in \mathcal{J} \setminus \{l\}\}, i \in \mathcal{I}_j && \end{aligned} \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned} & [\bar{x}_{j-1} + \bar{x}_{j-1} + \bar{\bar{x}}_{j-1}] + \bar{x}_j + \bar{x}_j + \bar{\bar{x}}_j \geq \check{x}_{ji} && \text{wenn } (\overset{\circ}{\theta} = 0) \{j \in \mathcal{J}\} \\ & \text{sonst } \{j \in \mathcal{J} \setminus \{l\}\}, i \in \mathcal{I}_j && \end{aligned} \quad (3.5)$$

$$\bar{x}_{j-1} + \underline{x}_j \leq x_j^u + 1 \quad j \in \mathcal{J} \setminus \{0\} \quad (3.6)$$

$$\underline{x}_{j-1} + \bar{x}_j \leq x_j^u + 1 \quad j \in \mathcal{J} \setminus \{0\} \quad (3.7)$$

$$2x_l^u + x_l^l + [\bar{x}_{l-1} + \bar{\bar{x}}_{l-1}] + \bar{x}_l + \bar{\bar{x}}_l \geq [\underline{x}_{l-1}] + \underline{x}_l \quad \text{wenn } (\overset{\circ}{\theta} = 1) \quad (3.8)$$

$$2x_l^u + x_l^l + [\underline{x}_{l-1} + \bar{\bar{x}}_{l-1}] + \underline{x}_l + \bar{\bar{x}}_l \geq [\bar{x}_{l-1}] + \bar{x}_l \quad \text{wenn } (\overset{\circ}{\theta} = 0) \quad (3.9)$$

$$\begin{aligned} & [\bar{x}_{j-1} + 2\bar{\bar{x}}_{j-1} + 2\bar{x}_{j-1}] + && \\ & \bar{x}_j + 2\bar{\bar{x}}_j + 2\bar{x}_j + x_j^l + 2x_j^u = 2\overset{\circ}{\pi}_j && j \in \mathcal{J} \quad (3.10) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & [\bar{x}_{j-1} + 2\bar{\bar{x}}_{j-1} + 2\bar{x}_{j-1}] + && \\ & \bar{x}_j + 2\bar{\bar{x}}_j + 2\bar{x}_j + x_j^l + 2x_j^u = 2\pi_j && j \in \mathcal{J} \quad (3.11) \end{aligned}$$

$$\bar{\bar{x}}_j + \underline{x}_{j-1} + \bar{x}_{j-1} - x_j^u \leq \tau_j + 1 \quad j \in \mathcal{J} \setminus \{0\} \quad (3.12)$$

$$\bar{\bar{x}}_j + [-\bar{\bar{x}}_{j-1} - \bar{x}_{j-1} - \underline{x}_{j-1}] - x_j^u - x_j^l \leq \tau_j \quad j \in \mathcal{J} \quad (3.13)$$

$$\tau_{j-1} - x_j^l - x_j^u \leq \tau_j \quad j \in \mathcal{J} \setminus \{0\} \quad (3.14)$$

$$\tau_j \leq \bar{\bar{x}}_j \quad j \in \mathcal{J} \quad (3.15)$$

$$\bar{x}_j, \bar{\bar{x}}_j, \underline{x}_j, \bar{x}_j, \tau_j \in \{0, 1\} \quad j \in \mathcal{J} \setminus \{m-1\} \quad (3.16)$$

$$x_j^l, x_j^u \in \{0, 1\} \quad j \in \mathcal{J} \quad (3.17)$$

$$\check{x}_{ji}, \check{x}_{ji} \in \{0, 1\} \quad j \in \mathcal{J}, i \in \mathcal{I}_j \quad (3.18)$$

$$\overset{\circ}{\pi}_j, \pi_j \in \mathcal{N}_0 \quad j \in \mathcal{J} \quad (3.19)$$

$$\bar{x}_{m-1}, \bar{\bar{x}}_{m-1}, \underline{x}_{m-1}, \bar{x}_{m-1}, \tau_{m-1} = 0 \quad (3.20)$$

Das Ziel (3.1) besteht darin, die Gesamtkosten der Gangfolge zu minimieren. Die Nebenbedingungen (3.2) garantieren, dass der relevante Teil des Lagers vom Kommissionierer mit einer der vier für Quergänge erlaubten Konfigurationen besucht wird. Die Bedingungen (3.3) stellen sicher, dass der Kommissionierer alle erforderlichen Kommissionierpositionen besucht. Die Nebenbedingungen (3.4) und (3.5) garantieren, dass ein Stichgang von unten (oben) in die Regalgasse j nur stattfinden kann, wenn j mit dem vorherigen (linken) oder nachfolgenden (rechten) Quergang durch eine Konfiguration verbunden ist, die den unteren (oben) Quergang verwendet. Die eckigen Klammern schließen den links liegenden Gang aus, wenn die Bedingungen für die erste Regalgasse gelten. Die Nebenbedingungen (3.6) und (3.7) garantieren, dass bei einem Wechsel zwischen dem oberen und unteren Quergang, diese auf eine zuläs-

sige Weise verbunden sind. Die Nebenbedingungen (3.8) und (3.9) stellen sicher, dass das Depot in die Gangfolge einbezogen wird. Wenn sich das Depot beispielsweise oberhalb ($\theta = 1$) befindet und der Gang, der das Depot enthält, über $\underline{x}_l = 1$ und $\underline{x}_{l-1} = 1$ verbunden ist, muss das Depot in die Gangfolge eingebunden werden, indem $x_l^{\parallel} = 1$ gesetzt wird. Wenn stattdessen $\underline{x}_l = 1$ und $\underline{x}_{l-1} = 0$ gilt, muss das Depot einbezogen werden, indem $x_l^{\parallel} = 1$, $\bar{x}_{l-1} = 1$, oder $\bar{x}_l = 1$ gesetzt werden. Die Bedingungen (3.10) und (3.11) legen fest, dass der Grad aller Verbindungen oben und unten an jeder Regalgasse gerade ist, d. h. jede Kreuzung muss so oft verlassen werden, wie sie betreten wird. Die Nebenbedingungen (3.12) setzen die Anzahl der Komponenten auf zwei (d. h. $\tau_j = 1$), wenn es einen Übergang von Konfiguration $\underline{x}_{j-1} = 1$ oder $\bar{x}_{j-1} = 1$ zu $\bar{x}_j = 1$ gibt, ohne Ober- und Unterseite direkt durch $x_j^{\parallel} = 1$ zu verbinden. Die Bedingungen (3.13) setzen die Anzahl der Komponenten auf zwei, wenn Ober- und Unterseite nicht durch eine Durchquerung der Regalgasse verbunden sind und der links gelegene Teil des Lagers nicht besucht wird. Die Bedingungen (3.14) propagieren die Anzahl der Komponenten. Nebenbedingungen (3.15) stellen sicher, dass die Konfiguration \bar{x}_j verwendet wird, solange es zwei Komponenten gibt. Zuletzt definieren Bedingungen (3.16)–(3.20) die Entscheidungsvariablen.

Die Größe des Modells könnte zusätzlich reduziert werden, indem für jeden Gang j die Variablen x_{ji} , \check{x}_{ji} , $i \in \mathcal{I}_j$ durch drei neue Variablen \mathfrak{x}_j , $\check{\mathfrak{x}}_j$, $\hat{\mathfrak{x}}_j$ ersetzt werden. Diese stellen die drei Stichgänge dar, die alternativ Teil einer optimalen Tour sein können, d. h., vom unteren Quergang bis zur obersten LE, vom oberen Quergang bis zur untersten LE, und vom oberen und unteren Quergang bis zu den beiden benachbarten LEs mit dem größten Zwischenabstand. Um eine allgemeinere Formulierung als Grundlage für die in den folgenden Abschnitten vorgestellten Erweiterungen zu erhalten, wurde auf die Umsetzung dieser Verbesserung verzichtet.

3.2.2.2 Das Ein-Block-SPRP mit verteilter Lagerung

Im Folgenden wird eine Erweiterung von Formulierung (3.1)–(3.20) auf das Ein-Block-SPRP mit verteilter Lagerung vorgestellt, d. h., jede LE kann an mehreren Positionen verfügbar sein. Abbildung 3.4 zeigt die optimale Lösung einer Beispielinstantz dieser Problemvariante. Sie ist durch die Annahme charakterisiert, dass mehrere Artikel jeder LE nachgefragt werden können und dass die Verfügbarkeit von Artikeln einer LE an einer bestimmten Kommissionierposition begrenzt ist. Die Menge \mathcal{H} enthält alle LEs, die entnommen werden müssen und b_h gibt die Anzahl der Artikel von LE $h \in \mathcal{H}$ an, die angefordert werden. Die Menge \mathcal{I}_{jh} enthält alle Kommissionierpositionen, von denen LE h in Regalgasse j verfügbar ist, und q_{jih} bezeichnet die Anzahl der Artikel von LE h , die in Gasse h an Position i verfügbar sind. Die Menge \mathcal{I}_j wird redefiniert und enthält alle Kommissionierpositionen an denen LEs der Kommissionierliste in Gasse j verfügbar sind: mehrere Positionen, an denen die gleiche LE verfügbar ist, können enthalten sein und nicht alle Positionen müssen besucht werden. Um abzubilden, dass die Kommissionierposition i in Gasse j besucht wird, werden zusätzliche binäre Variablen x_{ji} verwendet. Das Beispiel in Abbildung 3.4 geht davon aus, dass $\mathcal{H} = \{a, b, c, d, e, f, g, h, i\}$, $q_{jih} = 1$, $h \in \mathcal{H}$, $j \in \mathcal{J}$, $i \in \mathcal{I}_j$, und $b_h = 1$, $h \in \mathcal{H}$. Die Gangfolge ist gegeben durch \mathfrak{x}_{17} , \underline{x}_1 , \underline{x}_2 , x_3^{\parallel} , \bar{x}_3 , \mathfrak{x}_{49} , \bar{x}_4 , x_5^{\parallel} gleich 1 und $x_{38} = 1$ bedeutet beispielsweise, dass Artikel von LE 'a' in Gang 3 an Position 8 entnommen werden.

Um die Entscheidung über die Auswahl der zu besuchenden Kommissionierpositionen zu modellieren, werden die Nebenbedingungen (3.3) durch die Nebenbedingungen (3.21)–(3.23) ersetzt:

$$\sum_{j \in \mathcal{J}} \sum_{i \in \mathcal{I}_{jh}} q_{jih} x_{ji} \geq b_h \quad h \in \mathcal{H} \quad (3.21)$$

$$x_j^{\parallel} + x_j^{\parallel} + \sum_{i' \in \mathcal{I}_j: i' \geq i} \check{x}_{ji'} + \sum_{i' \in \mathcal{I}_j: i' \leq i} \mathfrak{x}_{ji'} \geq x_{ji} \quad j \in \mathcal{J}, i \in \mathcal{I}_j \quad (3.22)$$

$$x_{ji} \in \{0, 1\} \quad j \in \mathcal{J}, i \in \mathcal{I}_j \quad (3.23)$$

Die Nebenbedingungen (3.21) stellen sicher, dass die gewünschte Anzahl von Artikeln jeder LE von den Kommissionierpositionen, an denen die LE verfügbar ist, kommissioniert wird. Die Nebenbedingungen (3.22) garantieren, dass die ausgewählten Positionen von der Gangfolge besucht werden.

Da bei verteilter Lagerung nicht alle Kommissionierpositionen, die die angeforderten LEs enthalten,

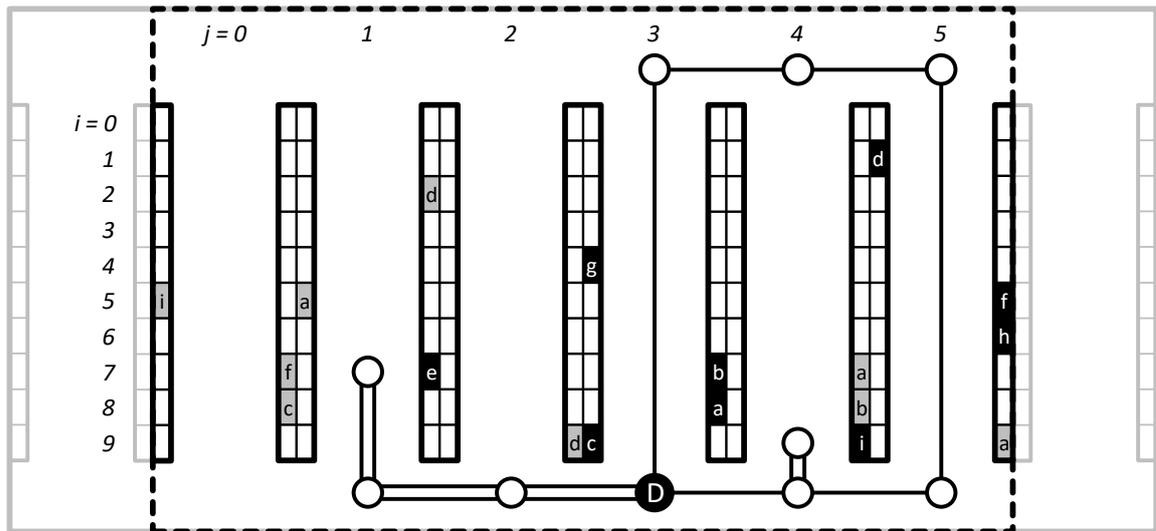


Abbildung 3.4: Optimale Lösung einer exemplarischen Instanz des Ein-Block-SPRP mit verteilter Lagerung. Kommissionierpositionen, von denen Artikel einer benötigte LE aufgenommen werden, sind schwarz markiert.

besucht werden müssen, ist es nicht möglich, den relevanten Teil des Lagers über diese Positionen und den Standort des Depots wie im Standard-SPRP zu definieren. Stattdessen werden zusätzliche binäre Variablen \tilde{x}_j benötigt, die angeben, ob der Gang j vom Kommissionierer erreicht wird oder nicht, in Abbildung 3.4 sind beispielweise $\tilde{x}_1, \dots, \tilde{x}_5$ gleich 1. Daher werden die Nebenbedingungen (3.2) durch die folgenden Nebenbedingungen ersetzt:

$$\tilde{x}_j \geq x_{ji} \quad j \in \mathcal{J}, i \in \mathcal{I}_j \quad (3.24)$$

$$\tilde{x}_l = 1 \quad (3.25)$$

$$\underline{x}_j + \bar{x}_j + \bar{\bar{x}}_j + \bar{\bar{\bar{x}}}_j = \tilde{x}_{j+1} \quad j \in \mathcal{J} \setminus \{m-1\} : j \geq l \quad (3.26)$$

$$\underline{x}_j + \bar{x}_j + \bar{\bar{x}}_j + \bar{\bar{\bar{x}}}_j = \tilde{x}_j \quad j \in \mathcal{J} : j < l \quad (3.27)$$

$$\tilde{x}_j \geq \tilde{x}_{j+1} \quad j \in \mathcal{J} \setminus \{m-1\} : j \geq l \quad (3.28)$$

$$\tilde{x}_j \leq \tilde{x}_{j+1} \quad j \in \mathcal{J} : j < l \quad (3.29)$$

$$\tilde{x}_j \in \{0, 1\} \quad j \in \mathcal{J} \quad (3.30)$$

Die Nebenbedingungen (3.24) und (3.25) garantieren, dass alle Regalgassen, die die ausgewählten Kommissionierpositionen für die benötigten LEs enthalten, sowie der Gang mit dem Depot erreicht werden. Nebenbedingungen (3.26) definieren die zulässigen Konfigurationen um die Regalgassen rechts vom Depot zu erreichen und (3.27) das Entsprechende für die Regalgassen links vom Depot. Die Nebenbedingungen (3.28) und (3.29) beschreiben, wie die Variablen \tilde{x} propagiert werden.

3.2.2.3 Das Ein-Block-SPRP mit Entkopplung

Dieser Abschnitt zeigt auf, wie das Modell um die Möglichkeit erweitert werden kann, dass der Kommissionierer den Wagen parkt, die Gangfolge für eine gewisse Zeit ohne den Wagen fortsetzt, und dann zum Wagen zurückkehrt. Die Abbildung 3.5 zeigt ein Beispiel für eine optimale Lösung des resultierenden Ein-Block-SPRP mit Entkopplung. Die folgenden Modellierungsannahmen werden getroffen:

- Die Geschwindigkeit des Kommissionierers ohne Wagen unterscheidet sich von der Geschwindigkeit beim Schieben des Wagens. Die Kostenkoeffizienten c stellen nun die Fahrzeiten des Kommissionierers beim Schieben des Wagens dar, die Koeffizienten c^p die Zeiten des Kommissionierers ohne Wagen.
- Wie bei den vorherigen Modellen wird die Kommissionierliste so generiert, dass die Kapazität des

Parkpositionen in den Quergängen an den Eingängen zu den Regalgassen.

Um den Weg des Kommissionierers ohne Wagen zu modellieren, werden zusätzliche Binärvariablen eingeführt: Die Variablen \bar{x}_j^p geben an, ob der Kommissionierer den oberen Quergang vom Eingang der Regalgasse j bis zum Eingang der Gasse $j + 1$ durchquert und der Wagen an einer (beliebigen) Stelle links von ihm geparkt ist, d. h., der Kommissionierer geht nach rechts. Die Variablen \underline{x}_j^p sind analog für den unteren Quergang definiert. Dementsprechend bedeuten die Variablen \bar{x}_j^p und \underline{x}_j^p , dass der Kommissionierer vom Eingang von Gasse $j + 1$ zum Eingang von Gasse j geht und der Wagen zu seiner Rechten geparkt ist. Die Variablen \check{x}_{ji}^p (\check{x}_{ji}^p) geben an, dass die Regalgasse j von oben (unten) ohne Wagen betreten wird und alle erforderlichen Kommissionierpositionen unten (oben) bis zu Position i besucht werden. Diese Variablen werden nur für die Kommissionierpositionen i definiert, für die die Kommissionierkapazität ausreicht, um die Anzahl von Artikeln aller gewünschten LEs zu tragen, die in dem vom Kommissionierer passierten Abschnitt lagern. Im Beispiel aus Abbildung 3.5 sind die Variablen \check{x}_{03} , \bar{x}_0 , x_1 , \bar{x}_1 , \check{x}_{22} , \bar{x}_2 , x_3 gleich 1 und definieren den Teil der Gangfolge mit Wagen (zwei Stichgänge werden teilweise ohne Wagen durchgeführt). Zusätzlich haben die Variablen \bar{x}_3^p , \check{x}_{44}^p , \underline{x}_3^p , \underline{x}_{49}^p den Wert 1 und beschreiben die beiden horizontalen Abzweige ab Gang 3.

Formulierung (3.1)–(3.20) wird folgendermaßen geändert: Zunächst wird die Zielfunktion (3.1) geändert, um die Gesamtreisezeit zu minimieren, die als Summe aus der Zeit, die der Kommissionierer alleine und aus der Zeit, die der Kommissionierer mit dem Wagen zurücklegt, definiert ist:

$$\begin{aligned} \min \sum_{j \in \mathcal{J}} \underline{c}_j \underline{x}_j + \underline{c}_j^p (\underline{x}_j^p + \underline{x}_j^p) + \bar{c}_j \bar{x}_j + \bar{c}_j^p (\bar{x}_j^p + \bar{x}_j^p) + \bar{c}_j \bar{x}_j + \bar{c}_j \bar{x}_j + c_j^l x_j^l + c_j^u x_j^u + \\ \sum_{j \in \mathcal{J}} \sum_{i \in \mathcal{I}_j} (\underline{c}_{ji} \underline{x}_{ji} + \check{c}_{ji} \check{x}_{ji}) + (\underline{c}_{ji}^p \underline{x}_{ji}^p + \check{c}_{ji}^p \check{x}_{ji}^p) \end{aligned} \quad (3.31)$$

Nebenbedingungen (3.3) werden durch die Nebenbedingungen (3.32) ersetzt, um die Kommissionierung ohne Wagen zu berücksichtigen:

$$x_j^l + x_j^u + \sum_{i' \in \mathcal{I}_j: i' \geq i} (\check{x}_{ji'} + \check{x}_{ji'}^p) + \sum_{i' \in \mathcal{I}_j: i' \leq i} (\underline{x}_{ji'} + \underline{x}_{ji'}^p) \geq 1 \quad j \in \mathcal{J}, i \in \mathcal{I}_j \quad (3.32)$$

Um den Teil des Lagers zu bestimmen, in dem der Wagen verwendet wird, werden Nebenbedingungen (3.2) durch Nebenbedingungen (3.25)–(3.30) ersetzt, und zusätzlich die folgenden Bedingungen ergänzt:

$$\tilde{x}_j \geq x_j^l \quad j \in \mathcal{J} \quad (3.33)$$

Um zulässige Abzweige des Kommissionierers ohne Wagen zu modellieren, fügen wir die folgenden

Nebenbedingungen hinzu:

$$\underline{x}_j^p + \underline{x}_j^p + \underline{x}_j + \bar{x}_j + \bar{x}_j \leq 1 \quad j \in \mathcal{J} \setminus \{m-1\} \quad (3.34)$$

$$\bar{x}_j^p + \bar{x}_j^p + \bar{x}_j + \bar{x}_j + \bar{x}_j \leq 1 \quad j \in \mathcal{J} \setminus \{m-1\} \quad (3.35)$$

$$[\bar{x}_{j-1}^p + \bar{x}_{j-1} + \bar{x}_{j-1}] + x_j^l + x_j^u \geq \bar{x}_j^p \quad j \in \mathcal{J} \setminus \{m-1\} \quad (3.36)$$

$$[\underline{x}_{j-1}^p + \underline{x}_{j-1} + \bar{x}_{j-1}] + x_j^l + x_j^u \geq \underline{x}_j^p \quad j \in \mathcal{J} \setminus \{m-1\} \quad (3.37)$$

$$\bar{x}_{j+1}^p + \bar{x}_{j+1} + \bar{x}_{j+1} + x_{j+1}^l + x_{j+1}^u \geq \bar{x}_j^p \quad j \in \mathcal{J} \setminus \{m-1\} \quad (3.38)$$

$$\underline{x}_{j+1}^p + \underline{x}_{j+1} + \bar{x}_{j+1} + x_{j+1}^l + x_{j+1}^u \geq \underline{x}_j^p \quad j \in \mathcal{J} \setminus \{m-1\} \quad (3.39)$$

$$[\bar{x}_{j-1}^p] + \bar{x}_j^p \geq \bar{x}_{ji}^p \quad j \in \mathcal{J}, i \in \mathcal{I}_j \quad (3.40)$$

$$[\underline{x}_{j-1}^p] + \bar{x}_j^p \geq \bar{x}_{ji}^p \quad j \in \mathcal{J}, i \in \mathcal{I}_j \quad (3.41)$$

$$\underline{x}_j^p, \bar{x}_j^p, \bar{x}_j^p, \bar{x}_j^p \in \{0, 1\} \quad j \in \mathcal{J} \setminus \{m-1\} \quad (3.42)$$

$$\underline{x}_{m-1}^p, \bar{x}_{m-1}^p, \bar{x}_{m-1}^p, \bar{x}_{m-1}^p = 0 \quad (3.43)$$

$$\bar{x}_{ji}^p \in \{0, 1\} \quad j \in \mathcal{J}, i \in \mathcal{I}_j \quad (3.44)$$

$$\bar{x}_{ji}^p \in \{0, 1\} \quad j \in \mathcal{J}, i \in \mathcal{I}_j \quad (3.45)$$

Die Nebenbedingungen (3.34) und (3.35) verhindern Überschneidungen von horizontalen Abzweigen mit anderen horizontalen Abzweigen und den Teilen der Gangfolge, die mit Wagen durchgeführt werden. Die Nebenbedingungen (3.36)–(3.41) definieren zulässige Fälle für das Starten oder Fortsetzen von horizontalen Abzweigen. Die Nebenbedingungen (3.42)–(3.45) definieren den Wertebereich der Variablen.

Um sicherzustellen, dass die Tragekapazität des Kommissionierers nicht überschritten wird, werden zusätzliche Variablen λ_j (λ_j) eingeführt, um die kumulierte Anzahl von Artikeln zu erfassen, die der Kommissionierer während eines horizontalen Abzweigs bis zu demjenigen Zeitpunkt entnommen hat, zu dem er das untere (obere) Ende der Regalgasse j passiert. In Abbildung 3.5 ist beispielsweise $\lambda_4 = 2$ und $\lambda_4 = 1$. Sei \check{u}_{ji} (\check{u}_{ji}) definiert als die Anzahl der benötigten Artikel aller LEs, die zwischen dem oberen (unteren) Gang und der Kommissionierposition i gelagert sind, d. h. $\check{u}_{ji} = \sum_{i' \in \mathcal{I}_j: i' < i} \sum_{h \in \mathcal{H}} b_{ji'h}$ und $\check{u}_{ji} = \sum_{i' \in \mathcal{I}_j: i' > i} \sum_{h \in \mathcal{H}} b_{ji'h}$. Dann lässt sich die Kapazitätsbeschränkung durch folgende Nebenbedingungen ausdrücken:

$$\lambda_{j+1} + \sum_{i \in \mathcal{I}_{j+1}} \check{u}_{j+1i} \bar{x}_{j+1i}^p - C(1 - \bar{x}_j^p) \leq \lambda_j \quad j \in \mathcal{J} \setminus \{m-1\} \quad (3.46)$$

$$\lambda_{j+1} + \sum_{i \in \mathcal{I}_{j+1}} \check{u}_{j+1i} \underline{x}_{j+1i}^p - C(1 - \underline{x}_j^p) \leq \lambda_j \quad j \in \mathcal{J} \setminus \{m-1\} \quad (3.47)$$

$$\lambda_j + \sum_{i \in \mathcal{I}_j} \check{u}_{ji} \bar{x}_{ji}^p - C(1 - \bar{x}_j^p) \leq \lambda_{j+1} \quad j \in \mathcal{J} \setminus \{m-1\} \quad (3.48)$$

$$\lambda_j + \sum_{i \in \mathcal{I}_j} \check{u}_{ji} \underline{x}_{ji}^p - C(1 - \underline{x}_j^p) \leq \lambda_{j+1} \quad j \in \mathcal{J} \setminus \{m-1\} \quad (3.49)$$

$$\lambda_j + \sum_{i \in \mathcal{I}_j} \check{u}_{ji} \bar{x}_{ji}^p \leq C \quad j \in \mathcal{J} \quad (3.50)$$

$$\lambda_j + \sum_{i \in \mathcal{I}_j} \check{u}_{ji} \underline{x}_{ji}^p \leq C \quad j \in \mathcal{J} \quad (3.51)$$

$$\lambda_j, \lambda_j \geq 0 \quad j \in \mathcal{J} \quad (3.52)$$

Nebenbedingungen (3.46)–(3.49) propagieren die vom Kommissionierer von Regalgasse zu Regalgasse

getragene Menge und Nebenbedingungen (3.50) und (3.51) begrenzen die Ladung auf die maximale Tragekapazität.

Letztendlich kann der beschriebene Modellierungsansatz auch verwendet werden, um für bestimmte Regalgassen den Zugang mit dem Wagen auszuschließen, beispielsweise weil diese zu schmal sind.

3.2.2.4 Das Ein-Block-SPRP mit mehreren Enddepots

Als letzter Anwendungsfall wird das Ein-Block-SPRP mit mehreren Enddepots betrachtet, bei dem der Kommissionierer nicht zum Startdepot zurückkehren muss, sondern aus einer Reihe von möglichen Kandidaten ein beliebiges Enddepot auswählen kann. Das Startdepot ist immer in der Menge der Kandidaten enthalten und zusätzliche Depots können in beiden Quergängen an den Eingängen zu allen Regalgassen vorhanden sein. Zunächst kann der relevante Teil des Lagers, d. h. die Menge der Gänge \mathcal{J} , auf den Bereich beschränkt werden, der zwischen der am weitesten links gelegenen Depot bzw. Kommissionierposition und dem am weitesten rechts gelegenen Depot bzw. Kommissionierposition liegt.

Abbildung 3.6 zeigt ein Beispiel mit Startdepot 'D' und vier möglichen Enddepots, die durch die schwarz gefüllten Knoten gegeben sind. Das Depot 'E' wird in der angegebenen Optimallösung als Ende der Gangfolge ausgewählt. Wie in der Abbildung dargestellt, besteht die Idee unseres Modellierungsansatzes darin, gleichzeitig eine Gangfolge gemäß Formulierung (3.1)–(3.20) und einen einfachen Pfad (eingezeichnet mit punkt-gestrichelten Kanten) zu bestimmen, auf dem der Kommissionierer *nicht* vom ausgewählten Enddepot zum vorgegebenen Startdepot zurückkehrt. Die Kanten dieses Pfades werden von den Kanten der geschlossenen Gangfolge entfernt, die am Startdepot beginnt und endet und das ausgewählte Enddepot beinhaltet. Um sicherzustellen, dass die resultierende Gangfolge zusammenhängt, darf der einfache Pfad nur Kanten enthalten, die in der geschlossenen Gangfolge zweimal durchlaufen werden, d. h. solche, bei denen $\bar{x}_j, \bar{x}_j, \underline{x}_j$ oder x_j^u gleich 1 sind.

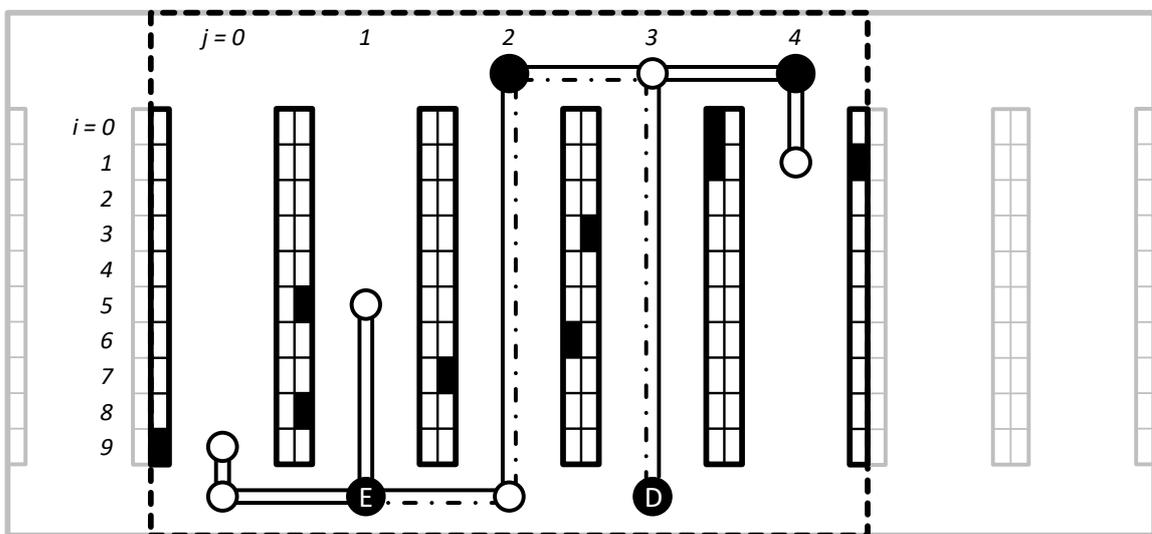


Abbildung 3.6: Optimale Lösung einer Beispielinstantz des Ein-Block-SPRP mit mehreren Enddepots.

Um den Pfad zu definieren, werden Binärvariablen \bar{y}_j, y_j, y_j^l und \bar{y}_j verwendet, die analog zu den Variablen x_j in Abschnitt 3.2.2.1 definiert sind. Die Binärvariablen $\hat{\omega}_j$ und ω_j geben an, ob das Depot oberhalb (unterhalb) der Regalgasse j als Enddepot ausgewählt wird. Um die Notation einfach zu halten, setzen wir $\hat{\omega}_j$ und ω_j auf null, wenn an der jeweiligen Position kein potenzielles Endlager verfügbar ist. Die Binärvariablen $\hat{\rho}_j$ (ρ_j) sind gleich 0, wenn der Grad des Pfades am oberen (unteren) Ende der Regalgasse j 0 oder ungerade ist, und gleich 1, wenn der Grad gerade ist. In Abbildung 3.6 wird der Pfad zwischen dem Start-Depot 'D' und dem ausgewählten End-Depot 'E' ($\omega_1 = 1$) durch $y_3^l, \bar{y}_2, y_2^l, \underline{y}_1 = 1$ beschrieben. Der Grad des Pfades am Start- und Enddepot ist ungerade ($\hat{\rho}_1, \rho_3 = 0$) und die Grade oben und unten in Gang 2 und oben in Gang 3 sind gerade ($\hat{\rho}_2, \rho_2, \hat{\rho}_3 = 1$).

Die Zielfunktion (3.1) wird modifiziert, indem die mit dem Pfad verbundenen Kosten subtrahiert werden:

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{j \in \mathcal{J}} \underline{c}_j(\underline{x}_j - \underline{y}_j) + \bar{c}_j(\bar{x}_j - \bar{y}_j) + \underline{c}_j \bar{x}_j + \bar{c}_j(\bar{x}_j - \bar{y}_j) + c_j^l x_j^l + c_j^r(x_j^r - y_j^r) + \\ & \sum_{j \in \mathcal{J}} \sum_{i \in \mathcal{I}_j} (\underline{c}_{ji} \underline{x}_{ji} + \check{c}_{ji} \check{x}_{ji}) \end{aligned} \quad (3.53)$$

Nebenbedingungen (3.3)–(3.20) werden beibehalten und Nebenbedingungen (2) durch die Nebenbedingungen (3.25)–(3.30) und die zusätzliche Nebenbedingung (3.54) ersetzt, um den relevanten Teil des Lagers einzuschränken:

$$\tilde{x}_j \geq 1 \quad j \in \mathcal{J} : \mathcal{I}_j \neq \emptyset \quad (3.54)$$

Folgenden Nebenbedingungen charakterisieren den Pfad:

$$\bar{x}_j + \underline{x}_j \geq \bar{y}_j \quad j \in \mathcal{J} \quad (3.55)$$

$$\underline{x}_j + \bar{x}_j \geq \underline{y}_j \quad j \in \mathcal{J} \quad (3.56)$$

$$\bar{x}_j \geq \bar{y}_j \quad j \in \mathcal{J} \quad (3.57)$$

$$x_j^r \geq y_j^r \quad j \in \mathcal{J} \quad (3.58)$$

$$\bar{y}_j + \underline{y}_{j+1} \leq y_{j+1}^l + 1 \quad j \in \mathcal{J} \setminus \{m-1\} \quad (3.59)$$

$$\underline{y}_j + \bar{y}_{j+1} \leq y_{j+1}^r + 1 \quad j \in \mathcal{J} \setminus \{m-1\} \quad (3.60)$$

$$\bar{y}_j + \underline{y}_j + \bar{y}_j \geq \bar{y}_{j+1} + \underline{y}_{j+1} + \bar{y}_{j+1} \quad j \in \mathcal{J} \setminus \{m-1\} : j \geq l \quad (3.61)$$

$$\bar{y}_j + \underline{y}_j + \bar{y}_j \geq \bar{y}_{j-1} + \underline{y}_{j-1} + \bar{y}_{j-1} \quad j \in \mathcal{J} \setminus \{0\} : j < l \quad (3.62)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{J}} \omega_j + \hat{\omega}_j \leq 1 \quad (3.63)$$

$$(3.64)$$

$$\begin{aligned} [\bar{y}_{j-1} + \underline{y}_{j-1}] + \bar{y}_j + \underline{y}_j + y_j^l = 2\hat{\rho}_j + \hat{\omega}_j \quad & \text{wenn } (\hat{\theta} = 0) \{j \in \mathcal{J}\} \\ & \text{sonst } \{j \in \mathcal{J} \setminus \{l\}\} \end{aligned} \quad (3.65)$$

$$\begin{aligned} [\bar{y}_{j-1} + \underline{y}_{j-1}] + \bar{y}_j + \underline{y}_j + y_j^l = 2\rho_j + \omega_j \quad & \text{wenn } (\hat{\theta} = 1) \{j \in \mathcal{J}\} \\ & \text{sonst } \{j \in \mathcal{J} \setminus \{l\}\} \end{aligned} \quad (3.66)$$

$$\bar{y}_j + \underline{y}_j + \underline{y}_j \leq 1 \quad j \in \mathcal{J} \quad (3.67)$$

$$y_j, \bar{y}_j, \underline{y}_j, y_j^l, \omega_j, \hat{\omega}_j, \hat{\rho}_j, \rho_j \in \{0, 1\} \quad j \in \mathcal{J} \quad (3.68)$$

Nebenbedingungen (3.55)–(3.58) beschränken den Pfad auf die Kanten der geschlossenen Gangfolge, die zweimal durchquert werden. Nebenbedingungen (3.59)–(3.62) garantieren, dass der Pfad verbunden ist. Nebenbedingung (3.63) garantiert, dass höchstens ein Enddepot ausgewählt wird. Schließlich stellen die Nebenbedingungen (3.65)–(3.68) sicher, dass der Pfad einfach ist und Start- und Enddepot verbindet.

3.2.2.5 Numerische Studien

Dieser Abschnitt stellt die numerischen Studien vor, die dazu dienen die Modelle zu beurteilen und die Vorteile von (i) einer Entkopplung von Kommissionierer und Wagen und (ii) mehreren möglichen Enddepots aufzuzeigen. Ergebnisse werden diskutiert für das Standard-SPRP (Abschnitt 3.2.2.5.1) und die Anwendungsfälle mit verteilter Lagerung (Abschnitt 3.2.2.5.2), Entkopplung von Wagen (Abschnitt 3.2.2.5.3)

und mehreren Enddepots (Abschnitt 3.2.2.5.4).

In der Testumgebung wird Gurobi 6.5.0 mit nur einem Thread und Standardeinstellungen verwendet, um die neue Formulierung zu lösen. Alle Studien wurden auf einem Desktop-PC mit einem AMD FX-6300 Prozessor mit 3.5 GHz, 8 GB RAM und Windows 10 Pro durchgeführt.

3.2.2.5.1 Ergebnisse für das Standard-SPRP Im Folgenden wird unsere neue Formulierung (bezeichnet als GS) mit den beiden leistungsstärksten Formulierungen aus der Literatur: SHSW (Scholz, Henn, Stuhlmann, und Wäscher (2016)) und PCC (Pansart, Catusse, und Cambazard (2018)) verglichen. Der Vergleich zwischen GS und SHSW wird auf dem Benchmark mit 900 Instanzen von Scholz et al. (2016) durchgeführt, der aus Gruppen von 30 Instanzen mit jeweils gleicher Anzahl von Regalgassen $m \in \{5, 10, 15, 20, 25, 30\}$ und zu besuchenden Kommissionierpositionen $a \in \{30, 45, 60, 75, 90\}$ besteht. Die Anzahl n der Kommissionierpositionen pro Regalgasse beträgt 45 für alle Instanzen und die zu besuchenden Kommissionierpositionen sind gleichmäßig über das Lager verteilt. Das Depot befindet sich unten links im Lager. Der Vergleich zwischen GS und PCC erfolgt für den Benchmark von Pansart et al. (2018), der analog zu dem von Scholz et al. (2016) erzeugt wurde, aber nur 10 Instanzen pro Gruppe enthält. Da Pansart et al. (2018) keine Teilmenge des Scholz et al. (2016) Benchmarks betrachtet, sondern neue Instanzen mit einem anderen Zufallszahlengenerator erzeugt hat, sind die Ergebnisse zwischen SHSW und PCC nicht direkt vergleichbar. Die beiden Benchmarks sind verfügbar unter http://www.mansci.ovgu.de/Forschung/Materialien/2016+_+_I_-p-534.html bzw. https://pagesperso.g-scop.grenoble-inp.fr/~pansart1/en/en_picking.html.

Tabelle 3.2 zeigt die Ergebnisse des Vergleichs: Spalte (m, a) bezeichnet die Instanzgruppe, die durch die Kombination aus der Anzahl der Regalgassen m und der Anzahl der benötigten Kommissionierpositionen a definiert ist. Die Spalte $\#opt$ gibt die Anzahl der Instanzen an, die innerhalb der Rechenzeit von 30 Minuten mit jeder Formulierung optimal gelöst wurden. Die Spalte t_{avg} enthält die durchschnittliche Rechenzeit in Sekunden, die basierend auf allen Instanzen in der jeweiligen Gruppe berechnet wird, die durch die jeweilige Methode innerhalb des Zeitlimits gelöst wurden. Spalte t_{max} enthält entsprechend die maximale Rechenzeit, die für eine der Instanzen in der betrachteten Gruppe beobachtet wurde. Der Vergleich der Rechenzeit kann als relativ fair angesehen werden: Die Geschwindigkeit des Prozessors mit dem GS getestet wurde und des Prozessors, der von Pansart et al. (2018) verwendet wurde (ein Intel Xeon E5-2440 v2 mit 1,9 GHz), sind aufgrund ihrer Passmark Single-Thread-Scores ungefähr vergleichbar; Scholz et al. (2016) gibt nur an, dass ein 3,4 GHz Pentium-Prozessor verwendet wurde, aber im Allgemeinen haben Modelle, die dieser Beschreibung entsprechen, ähnliche oder sogar bessere Passmark Single-Thread-Scores als die anderen beiden Prozessoren.

Wenn man GS mit SHSW vergleicht, stellt man fest, dass GS in der Lage ist, alle Instanzen zu lösen, während SHSW 22 der 210 Instanzen mit einer Anzahl von Regalgassen $m \geq 25$ und einer Anzahl von Kommissionierpositionen $a \geq 75$ nicht löst. Die Rechenzeit von SHSW wächst stark mit einer größeren Anzahl von Regalgassen und ab 10 Regalgassen auch mit einer steigenden Anzahl von Kommissionierpositionen. Im Gegensatz dazu wächst die Rechenzeit von GS nur moderat mit der Anzahl an Regalgassen und die Anzahl an zu besuchenden Kommissionierpositionen scheint keinen eindeutigen Einfluss auf die Rechenzeit zu haben. Die durchschnittliche Rechenzeit von GS ist etwa 4500 mal niedriger als die von SHSW. Der Unterschied zwischen GS und PCC ist kleiner: Beide Formulierungen sind in der Lage, alle Instanzgruppen in weniger als 10 Sekunden zu lösen. Dennoch ist GS im Durchschnitt etwa sechsmal schneller, und die höchste Rechenzeit auf den Instanzgruppen ist bis zu 40-mal niedriger als die von PCC.

Um das Skalierungsverhalten von GS zu beurteilen, wurden zusätzliche große Instanzen generiert: 30 Instanzen für jede Kombination von $m, a, n \in \{100, 250, 500, 750, 1000\}$. Auch hier sind die zu besuchenden Kommissionierpositionen gleichmäßig über das Lager verteilt und das Depot befindet sich in der linken unteren Ecke des Lagers. Tabelle 3.3 zeigt Ergebnisse, die über die Instanzen in einer Gruppe aggregiert sind. Zusätzlich zu den in Tabelle 3.2 angegebenen Werten, wird in den Zeilen t_{avg}^a die durchschnittliche Rechenzeit über verschiedene Werte von a innerhalb einer Gruppe (definiert durch einen festen Wert für m und n) angegeben. Die Spalte t_{avg}^n gibt die durchschnittliche Rechenzeit über

(m, a)	SHSW		GS			PCC			GS		
	#opt.	t_{avg}	#opt.	t_{avg}	t_{max}	#opt.	t_{avg}	t_{max}	#opt.	t_{avg}	t_{max}
(5,30)	30/30	0.09	30/30	0.01	0.02	10/10	0.03	0.08	10/10	0.00	0.02
(5,45)	30/30	0.09	30/30	0.01	0.02	10/10	0.06	0.09	10/10	0.01	0.02
(5,60)	30/30	0.09	30/30	0.01	0.02	10/10	0.08	0.10	10/10	0.02	0.03
(5,75)	30/30	0.09	30/30	0.01	0.02	10/10	0.08	0.11	10/10	0.02	0.03
(5,90)	30/30	0.10	30/30	0.01	0.02	10/10	0.08	0.13	10/10	0.03	0.03
(10,30)	30/30	1.60	30/30	0.02	0.05	10/10	0.05	0.13	10/10	0.03	0.06
(10,45)	30/30	1.03	30/30	0.02	0.03	10/10	0.08	0.19	10/10	0.03	0.05
(10,60)	30/30	1.42	30/30	0.02	0.05	10/10	0.13	0.20	10/10	0.02	0.05
(10,75)	30/30	1.36	30/30	0.02	0.05	10/10	0.09	0.17	10/10	0.02	0.05
(10,90)	30/30	0.62	30/30	0.02	0.03	10/10	0.10	0.20	10/10	0.02	0.05
(15,30)	30/30	2.29	30/30	0.02	0.10	10/10	0.06	0.13	10/10	0.04	0.08
(15,45)	30/30	5.28	30/30	0.03	0.06	10/10	0.11	0.20	10/10	0.04	0.05
(15,60)	30/30	10.64	30/30	0.03	0.08	10/10	0.14	0.32	10/10	0.05	0.08
(15,75)	30/30	15.10	30/30	0.03	0.08	10/10	0.15	0.41	10/10	0.04	0.08
(15,90)	30/30	19.41	30/30	0.04	0.08	10/10	0.23	0.45	10/10	0.05	0.08
(20,30)	30/30	10.57	30/30	0.04	0.16	10/10	0.09	0.31	10/10	0.06	0.08
(20,45)	30/30	27.32	30/30	0.03	0.13	10/10	0.10	0.21	10/10	0.07	0.11
(20,60)	30/30	114.33	30/30	0.04	0.08	10/10	0.26	0.49	10/10	0.06	0.11
(20,75)	30/30	216.63	30/30	0.04	0.08	10/10	0.84	5.21	10/10	0.07	0.13
(20,90)	30/30	485.71	30/30	0.05	0.11	10/10	0.39	1.64	10/10	0.09	0.13
(25,30)	30/30	54.46	30/30	0.04	0.14	10/10	0.11	0.24	10/10	0.05	0.06
(25,45)	30/30	85.46	30/30	0.05	0.13	10/10	0.24	0.50	10/10	0.06	0.10
(25,60)	30/30	258.92	30/30	0.06	0.13	10/10	0.71	2.34	10/10	0.08	0.17
(25,75)	29/30	527.39	30/30	0.07	0.19	10/10	0.76	2.34	10/10	0.09	0.15
(25,90)	24/30	646.59	30/30	0.07	0.18	10/10	1.01	4.41	10/10	0.09	0.18
(30,30)	30/30	204.18	30/30	0.05	0.11	10/10	0.08	0.21	10/10	0.06	0.13
(30,45)	30/30	406.19	30/30	0.06	0.17	10/10	0.19	0.49	10/10	0.08	0.11
(30,60)	30/30	508.80	30/30	0.07	0.17	10/10	0.39	0.59	10/10	0.10	0.13
(30,75)	24/30	638.89	30/30	0.07	0.16	10/10	0.99	6.69	10/10	0.11	0.19
(30,90)	21/30	786.29	30/30	0.08	0.22	10/10	1.63	6.69	10/10	0.15	0.30
Avg.		167.70		0.04			0.31			0.05	

Tabelle 3.2: Vergleich der Formulierungen SHSW, PCC und GS mit Standard-SPRP-Instanzen aus der Literatur.

verschiedene Werte von n für eine feste Kombination aus m und a an.

(m, a)	$n = 100$		$n = 250$		$n = 500$		$n = 750$		$n = 1000$		t_{avg}^n
	t_{avg}	t_{max}									
(100,100)	1.03	2.38	1.33	5.50	1.87	13.47	1.23	6.49	1.30	4.63	1.35
(100,250)	1.67	8.87	2.08	7.11	1.79	5.06	1.54	4.82	2.22	6.44	1.86
(100,500)	2.50	10.20	1.35	4.49	1.30	4.60	1.13	2.13	1.14	1.87	1.49
(100,750)	1.38	5.09	1.32	3.81	1.65	6.05	1.42	6.29	1.16	1.57	1.39
(100,1000)	1.46	6.12	1.65	4.80	1.27	2.79	1.27	2.87	1.45	2.86	1.42
t_{avg}^a	1.61		1.54		1.58		1.32		1.45		
(250,100)	2.42	5.21	3.58	17.52	3.43	12.50	5.60	23.89	4.79	32.91	3.96
(250,250)	5.55	22.54	7.52	24.61	10.98	29.25	9.93	28.51	9.14	26.16	8.62
(250,500)	8.26	29.42	6.07	32.26	10.10	26.03	7.59	26.32	8.97	29.03	8.20
(250,750)	11.06	44.55	12.77	33.40	14.10	36.57	12.35	30.44	14.21	35.33	12.90
(250,1000)	14.99	34.76	15.03	35.66	9.96	32.23	11.32	31.41	9.22	25.84	12.10
t_{avg}^a	8.45		8.99		9.71		9.36		9.27		
(500,100)	4.32	15.45	6.78	18.43	8.82	31.58	11.46	47.96	15.22	68.86	9.32
(500,250)	14.44	63.67	12.81	37.21	22.07	68.54	28.85	54.87	26.87	87.59	21.01
(500,500)	11.43	56.09	18.99	66.95	23.75	59.27	29.56	64.88	34.35	75.92	23.62
(500,750)	17.86	55.94	21.56	66.74	26.19	71.22	25.35	68.96	30.05	79.15	24.20
(500,1000)	16.03	64.74	18.64	62.14	23.48	71.43	30.40	83.83	24.12	63.57	22.53
t_{avg}^a	12.81		15.75		20.86		25.12		26.13		
(750,100)	8.68	41.81	8.70	55.56	12.67	77.53	16.09	114.41	16.18	117.38	12.46
(750,250)	19.75	56.34	29.74	95.73	44.66	107.42	55.18	125.61	50.61	120.86	39.99
(750,500)	24.11	73.18	56.25	134.75	64.34	161.30	72.61	211.40	68.02	166.36	57.06
(750,750)	31.09	112.22	44.27	156.87	60.81	140.97	68.15	130.10	68.59	154.34	54.58
(750,1000)	23.09	106.81	34.24	104.50	50.49	130.80	52.78	127.16	72.75	173.93	46.67
t_{avg}^a	21.34		34.64		46.59		52.96		55.23		
(1000,100)	10.40	74.06	26.68	300.07	22.36	98.25	23.42	141.61	22.77	154.93	21.12
(1000,250)	24.25	84.93	47.38	174.19	74.49	257.29	82.95	371.27	89.06	617.04	63.63
(1000,500)	25.07	72.91	70.79	227.91	83.98	181.89	110.82	287.68	90.04	291.63	76.14
(1000,750)	33.60	127.68	117.88	310.40	161.87	338.99	122.89	239.56	102.21	242.78	107.69
(1000,1000)	35.62	134.22	96.56	261.85	127.16	307.27	106.87	226.21	122.96	251.78	97.83
t_{avg}^a	25.79		71.86		93.97		89.39		85.41		

Tabelle 3.3: Ergebnisse der neuen Formulierung auf zusätzlich generierten großen Standard-SPRP-Instanzen.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Rechenzeit für eine größere Anzahl von Regalgassen konsistent steigt, während die Beziehung zwischen der Rechenzeit und der Anzahl der zu besuchenden (a) oder verfügbaren Kommissionierpositionen (n) nicht einheitlich ist: Es lässt sich nur die Tendenz feststellen, dass die Rechenzeit für größere Werte der beiden Parameter höher ist. Insgesamt ist das Skalierungsverhalten der neuen Formulierung sehr überzeugend, selbst die größten Instanzen mit $m, a, n = 1000$ können mit einer durchschnittlichen Rechenzeit von etwa zwei Minuten gelöst werden und die schwierigste Instanz wurde in etwa 10 Minuten gelöst.

3.2.2.5.2 Ergebnisse für das Ein-Block-SPRP mit verteilten Lagerplätzen Da die von Weidinger (2018) verwendeten Benchmark-Instanzen nicht vom Autor archiviert wurden, wurden neue Instanzen in einer Weise generiert, die der im Originalartikel beschriebenen Vorgehensweise entspricht. Um einen fairen Vergleich zu ermöglichen, wurde das mathematische Modell von Weidinger (2018) mit Gurobi (im Folgenden als Formulierung W bezeichnet) neu implementiert.

In den Instanzen werden Lager unterschiedlicher Größe betrachtet, indem unterschiedliche Werte für die Anzahl der Regalgassen $m \in \{5, 25, 100\}$ und die Anzahl der Kommissionierpositionen

$n \in \{30, 60, 180\}$ getestet werden. Es wird die Annahme getroffen, dass in jeder Kommissionierposition eine LE gelagert ist. Um den Einfluss des Duplikationsgrades der LEs im Lager zu untersuchen, wird die Anzahl der verschiedenen LEs ξ , die im Lager gelagert werden, variiert. Die Variation ist abhängig von (i) der Lagerkapazität des Lagers (entspricht $m \cdot n$), (ii) einem Faktor $\alpha \in \{1, 5, 10, 50\}$, der die Häufigkeit bestimmt, mit der LEs mehreren Lagerpositionen zugeordnet sind, und (iii) der Anzahl der verschiedenen LEs in der Kommissionierliste a und wird wie folgt bestimmt:

$$\xi = \max(a, \lceil m \cdot n / \alpha \rceil).$$

Wenn beispielsweise $\alpha = 1$ gewählt wird, entsteht ein Standardlager, in dem jede Kommissionierposition mit einer anderen LE belegt ist. Das Maximum garantiert, dass bei höherem Duplizierungsgrad mindestens so viele verschiedene LEs, wie laut Kommissionierliste benötigt werden, im Lager verfügbar sind.

Die LEs im Lager werden entsprechend ihrer Zugriffshäufigkeit in drei Klassen A, B und C eingeteilt. Der Klasse A werden 20% der LEs zugewiesen, der Klasse B 30% und der Klasse C 50%. Um sicherzustellen, dass jede LE mindestens an einer Kommissionierposition verfügbar ist, wird jede LE zunächst einer zufällig ausgewählten Kommissionierposition zugeordnet. Danach werden allen verbleibenden Kommissionierpositionen eine zufällig gezogene LE aus der Klasse A mit einer Wahrscheinlichkeit von 80%, aus der Klasse B mit einer Wahrscheinlichkeit von 15% und aus der Klasse C mit einer Wahrscheinlichkeit von 5% zugewiesen. Die Anzahl der Artikel der ausgewählten LE, die an einer Kommissionierposition verfügbar ist, wird zufällig ausgewählt aus $\mathbb{N} \cap [1, 3]$. Im nächsten Schritt werden Kommissionierlisten mit $a \in \{3, 7, 15, 30\}$ LEs generiert. Jede LE wird aus den Klassen A, B und C entsprechend den Wahrscheinlichkeiten 80%, 15% und 5% ausgewählt. Die Nachfrage b_h nach jeder LE h wird zufällig aus $\mathbb{N} \cap [1, \min(6, \bar{q}_h)]$ mit dem Gesamtangebot \bar{q}_h von h gezogen. Auf die beschriebene Weise wurden $3 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 4 = 144$ Instanzen erzeugt.

Beiden Formulierungen wurde eine maximale Rechenzeit von einer Stunde gewährt, nach welcher der Lösungsvorgang abgebrochen wird. In Tabelle 3.4 wurden die Ergebnisse differenziert nach unterschiedlichen Lagergrößen (m, n) , der Anzahl der LEs in der Kommissionierliste a und dem Duplikationsgrad α dargestellt. Für Formulierung W ist die benötigte Rechenzeit in Spalte t_W aufgeführt (TL bedeutet, dass das Zeitlimit erreicht wurde, OOM, dass das Speicherlimit erreicht wurde). In Spalte Δ_{ub} ist die Differenz zwischen der gefundenen oberen Schranke und der optimalen Lösung berechnet (wenn keine gültige obere Schranke gefunden wird, wird dies mit einem “-” markiert). GS findet für alle Instanzen die optimale Lösung und daher wird nur die Rechenzeit in Spalte t_{GS} aufgeführt. Wenn alle Instanzen einer Gruppe durch die jeweilige Formulierung optimal gelöst wurden, werden zusätzlich Durchschnittswerte für die Rechenzeit der jeweiligen Gruppe angegeben.

Für Formulierung W lässt sich beobachten, dass die Instanzen sowohl für eine größere Anzahl von LEs in der Kommissionierliste als auch einen höherem Duplikationsgrad schwieriger zu lösen sind. Von 144 Instanzen können 95 nicht innerhalb des Zeitlimits nachweislich optimal gelöst werden (in 24 Fällen wird keine gültige obere Schranke gefunden und in 8 Fällen tritt ein OOM-Fehler auf). Im Gegensatz dazu ist GS in der Lage alle Instanzen zu lösen und die durchschnittliche Rechenzeit für die schwierigste Instanzgruppe beträgt ca. 21 Sekunden. Die höchste für eine Instanz beobachtete Rechenzeit liegt bei etwa 155 Sekunden. Das Verhältnis zwischen der Anzahl der LEs in der Kommissionierliste oder dem Duplikationsgrad und der Rechenzeit von GS ist nicht ganz einheitlich: Auch hier ist nur die grobe Tendenz zu beobachten, dass die Rechenzeit bei größeren Werten höher ist.

3.2.2.5.3 Ergebnisse für das Ein-Block-SPRP mit Entkopplung Um zu beurteilen, wie sich unsere neue Formulierung für den Anwendungsfall der Entkopplung von Kommissionierer und Wagen verhält, wird der Standard SPRP-Benchmark von Scholz et al. (2016) als Ausgangsbasis verwendet. Da die Auswirkung unterschiedlicher Kapazitäten und Geschwindigkeiten des Kommissionierers beim Schieben ohne Wagen von Bedeutung für die Beurteilung ist, werden drei Werte für die Kommissionierkapazität $C \in \{2, 4, 6\}$ und zwei Werte für die vom Kommissionierer ohne Wagen benötigten Zeit angenommen. Für die Fahrzeiten ohne Wagen werden die ursprüngliche Fahrzeit mit Wagen mit den Faktoren $\beta \in \{0.5, 0.75\}$ multipliziert, z. B., $\bar{c}_j^p = \beta \cdot \bar{c}_j$, um einen relativen Vergleich zu ermöglichen.

(m, n)	$a = 3$			$a = 7$			$a = 15$			$a = 30$		
	Δ_{ub}	t_W	t_{GS}	Δ_{ub}	t_W	t_{GS}	Δ_{ub}	t_W	t_{GS}	Δ_{ub}	t_W	t_{GS}
$\alpha = 1$												
(5,30)	0.0	0.00	0.01	0.0	0.02	0.00	0.0	0.88	0.01	0.0	98.92	0.02
(5,60)	0.0	0.00	0.01	0.0	0.01	0.00	0.0	0.93	0.01	0.0	3.73	0.01
(5,180)	0.0	0.03	0.00	0.0	0.04	0.01	0.0	0.14	0.01	0.0	14.41	0.01
(25,30)	0.0	0.01	0.08	0.0	0.03	0.14	0.0	3.04	0.07	0.0	570.42	0.14
(25,60)	0.0	0.01	0.03	0.0	0.03	0.02	0.0	9.98	0.15	0.0	TL	0.05
(25,180)	0.0	0.01	0.15	0.0	0.04	0.06	0.0	0.23	0.03	0.0	114.35	0.10
(100,30)	0.0	0.01	0.21	0.0	0.03	0.93	0.0	56.99	0.15	0.4	TL	0.15
(100,60)	0.0	0.00	0.53	0.0	0.03	0.28	0.0	15.22	0.12	0.2	TL	0.44
(100,180)	0.0	0.01	0.67	0.0	0.04	0.30	0.0	0.23	0.13	0.0	1761.86	0.17
Avg.		0.01	0.19		0.03	0.19		9.74	0.07			0.12
$\alpha = 5$												
(5,30)	0.0	1.09	0.03	0.0	TL	0.05	1.2	TL	0.10	16.0	TL	0.06
(5,60)	0.0	2.63	0.05	0.0	TL	0.02	6.8	TL	0.07	86.9	TL	0.10
(5,180)	0.0	1.54	0.01	12.3	TL	0.52	106.1	TL	0.18	-	TL	0.75
(25,30)	0.0	TL	0.39	3.9	TL	0.20	86.1	TL	0.16	320.3	TL	0.16
(25,60)	0.0	1.59	0.10	3.4	TL	0.31	34.7	TL	0.98	-	TL	2.24
(25,180)	0.0	2.68	0.25	0.0	128.34	0.07	26.5	TL	0.39	-	TL	1.59
(100,30)	0.0	TL	0.27	15.3	TL	0.19	72.8	TL	1.99	-	TL	3.18
(100,60)	0.0	28.33	0.30	1.6	TL	1.24	13.7	TL	0.55	-	TL	0.48
(100,180)	0.0	15.84	3.37	12.1	TL	1.72	148.5	TL	1.83	105.8	TL	1.13
Avg.			0.53			0.48			0.69			1.08
$\alpha = 10$												
(5,30)	0.0	TL	0.02	0.0	TL	0.04	3.0	TL	0.05	14.9	TL	0.02
(5,60)	0.0	17.35	0.02	0.0	TL	0.20	83.0	TL	0.07	37.8	TL	0.19
(5,180)	0.0	TL	0.07	68.9	TL	0.32	77.0	TL	0.36	-	TL	0.64
(25,30)	0.0	92.49	0.19	10.7	TL	0.33	28.6	TL	0.72	-	TL	0.27
(25,60)	0.0	447.62	4.24	32.7	TL	0.44	375.0	TL	1.00	-	TL	0.87
(25,180)	0.0	86.79	0.47	74.7	TL	0.36	525.8	TL	30.94	-	TL	3.11
(100,30)	0.0	TL	0.51	12.6	TL	0.82	412.1	TL	1.43	-	TL	2.79
(100,60)	0.0	418.16	0.33	15.9	TL	11.69	310.9	TL	3.21	-	TL	6.04
(100,180)	0.0	849.48	1.69	38.3	TL	22.58	-	TL	93.84	-	OOM	29.07
Avg.			0.84			4.09			14.62			4.78
$\alpha = 40$												
(5,30)	0.0	TL	0.38	2.1	TL	0.19	0.0	TL	0.03	7.1	TL	0.04
(5,60)	0.0	TL	0.39	50.9	TL	1.00	20.6	TL	0.12	84.5	TL	0.10
(5,180)	0.0	TL	0.76	333.9	TL	2.07	-	TL	1.26	-	TL	0.74
(25,30)	0.0	TL	0.12	607.9	TL	0.35	-	TL	1.28	-	TL	0.49
(25,60)	29.2	TL	0.47	-	TL	0.68	-	TL	4.74	-	TL	5.31
(25,180)	178.0	TL	0.88	-	OOM	0.79	-	TL	1.20	-	TL	8.98
(100,30)	439.5	TL	0.78	-	OOM	2.41	-	TL	3.25	-	OOM	4.90
(100,60)	0.0	193.97	0.11	-	OOM	81.39	-	TL	21.61	-	TL	12.63
(100,180)	0.0	245.70	1.76	-	OOM	1.30	-	OOM	4.75	-	OOM	155.13
Avg.			0.63			10.02			4.25			20.92

Tabelle 3.4: Vergleich der Formulierungen W und GS für das Ein-Block-SPRP mit verteilter Lagerung.

Auf diese Weise werden $6 \cdot 900 = 5400$ Instanzen generiert. Tabelle 3.5 enthält aggregierte Werte für die 30 Instanzen in jeder Gruppe (m, a) : die durchschnittliche Abweichung Δ zwischen der mit der jeweiligen Kombination aus C und β erreichten Lösung zu der Lösung ohne Entkopplung von Kommissionierer und Wagen, die durchschnittliche (t_{avg}) und die maximale Rechenzeit (t_{max}). In der letzten Zeile wird der Durchschnitt der Abweichungen und der durchschnittlichen Rechenzeit für alle Kombinationen von Kapazität und relativer Geschwindigkeit berechnet.

Tendenziell erhöht sich die durchschnittliche und maximale Rechenzeit, wenn entweder die Zeit, die der Kommissionierer alleine benötigt, sinkt, d. h. für kleine Werte von β , oder wenn die Kapazität C steigt. Dennoch können alle Instanzen innerhalb sehr kurzer Rechenzeit von maximal 50 Sekunden optimal gelöst werden. Die durchschnittliche Rechenzeit über alle Instanzen einer bestimmten Kombination aus Geschwindigkeit und Kapazität liegt zwischen 0.25 und 5.66 Sekunden. Aus Managementperspektive lässt sich festhalten, dass die Entkopplung zu erheblichen Kosteneinsparungen führt, die mit zunehmender Geschwindigkeit ohne Wagen und Kapazität der Kommissionierer wachsen. Selbst unter Annahme der konservativen Werte $C = 2$ und $\beta = 0.75$ werden die Kosten im Durchschnitt deutlich um rund 6% reduziert. Für die optimistischste Annahme mit $C = 6$ und $\beta = 0.5$ steigen die Einsparungen auf mehr als 28%.

3.2.2.5.4 Ergebnisse für das Ein-Block-SPRP mit mehreren Enddepots Um die Wirkung mehrerer Enddepots zu untersuchen, werden $3 \cdot 900 = 2700$ neue Instanzen ausgehend von den Standard-SPRP-Instanzen von Scholz et al. (2016) generiert, indem Enddepots oberhalb oder unterhalb (unabhängig voneinander) jeder Regalgasse mit einer Wahrscheinlichkeit von $\sigma \in \{0.1, 0.5, 1.0\}$ platziert werden. Somit entsprechen die Instanzen mit $\sigma = 1$ dem Ein-Block-SPRP mit dezentraler Abgabe, das in de Koster und van der Poort (1998) eingeführt wurde. Tabelle 3.6 enthält aggregierte Ergebnisse für jede Instanzgruppe. Die Spalten Δ geben die durchschnittliche Abweichung zwischen der optimalen Lösung mit mehreren Enddepots und dem Standardfall, in dem der Kommissionierer zum Startdepot zurückkehren muss, an. Die Spalten t_{avg} und t_{max} geben die durchschnittliche und maximale Rechenzeit für jede Instanzgruppe an.

Unsere neue Formulierung ist in der Lage, alle Instanzen innerhalb einer maximalen Rechenzeit von ca. sieben Sekunden optimal zu lösen. Es lässt sich beobachten, dass die Rechenzeit im Allgemeinen mit σ leicht steigt, im Durchschnitt von 1.13 Sekunden auf 2.09 Sekunden. In Bezug auf die Lösungsqualität, lassen sich nur moderate durchschnittliche Einsparungen zwischen 2% für $\sigma = 0.1$ und 3.4% für $\sigma = 1.0$ realisieren. Dies deutet darauf hin, dass in einem Ein-Block-Lager die Vorteile mehrerer Enddepots eher begrenzt sind. Dieses Ergebnis kann sich jedoch ändern, wenn bei der Erstellung der Kommissionierliste bereits die Verfügbarkeit mehrerer Enddepots berücksichtigt wird. Die Ergebnisse deuten auch darauf hin, dass bereits wenige zusätzliche Enddepots einen großen Teil der möglichen Vorteile erzielen.

3.2.2.6 Fazit

In diesem Kapitel wurde eine kompakte Formulierung des Standard-SPRP vorgestellt, die direkt zwei Eigenschaften einer optimalen Gangfolge ausnutzt, die im Algorithmus von Ratliff und Rosenthal (1983) verwendet werden und somit keine klassischen Eliminationsbedingungen für Subtouren erfordern. Die neue Formulierung übertrifft bestehende Formulierungen aus der Literatur und ist fähig, große Instanzen innerhalb kurzer Rechenzeit zu lösen. Die Erweiterung der Formulierung um verteilte Lagerung, die Entkopplung von Kommissionierer und Wagen und mehrere Enddepots lassen sich ebenfalls für realistisch große Instanzen mit geringem Rechenaufwand lösen. Große Einsparungen sind möglich, wenn man die Entkopplung von Kommissionierer und Wagen zulässt: Bei einer Kommissionierkapazität von nur zwei Artikeln und einer Reduzierung der Reisezeit von 25%, wenn der Kommissionierer allein reist, sind Kosteneinsparungen von 6% möglich, und bis zu 28% werden mit einer Kommissionierkapazität von sechs Artikeln und einer Verdoppelung der Geschwindigkeit erreicht. Im Gegensatz dazu sind die Kosteneinsparungen durch mehrerer Enddepots eher begrenzt.

Ein interessantes zukünftiges Forschungsgebiet ist die Erweiterung oder Verwendung der neuen Formulierung für integrierte Probleme im Lager, bei denen die Bestimmung optimaler Gangfolgen ein Teilproblem darstellt. In Kapitel 4.3 wird gezeigt, wie auf Basis von Lösungen des SPRP die Beleuch-

(m, a)	$C = 2$			$C = 4$			$C = 6$											
	$\beta = 0.75$	$\beta = 0.5$	$\beta = 0.25$	$\beta = 0.75$	$\beta = 0.5$	$\beta = 0.25$	$\beta = 0.75$	$\beta = 0.5$	$\beta = 0.25$									
	Δt_{avg}	t_{max}	Δ	Δt_{avg}	t_{max}	Δ	Δt_{avg}	t_{max}	Δ									
(5,30)	-2.14	0.01	0.03	-6.01	0.01	0.02	-4.39	0.02	0.03	-17.02	0.03	0.12	-5.77	0.02	0.03	-20.51	0.13	0.22
(5,45)	-1.88	0.02	0.03	-4.25	0.01	0.03	-4.00	0.02	0.03	-11.36	0.02	0.06	-5.03	0.02	0.03	-17.52	0.07	0.22
(5,60)	-1.40	0.02	0.05	-3.14	0.02	0.05	-3.17	0.03	0.06	-7.11	0.02	0.05	-4.66	0.03	0.06	-13.06	0.03	0.09
(5,75)	-0.96	0.03	0.05	-2.19	0.03	0.05	-2.87	0.03	0.05	-6.66	0.03	0.05	-4.30	0.03	0.05	-9.80	0.03	0.06
(5,90)	-0.79	0.04	0.05	-1.66	0.03	0.05	-2.03	0.03	0.06	-4.51	0.03	0.06	-3.36	0.03	0.06	-7.53	0.03	0.05
[0.5ex](10,30)	-7.43	0.06	0.14	-18.24	0.15	0.62	-12.25	0.11	0.37	-29.06	0.55	2.37	-12.95	0.11	0.37	-30.23	1.19	2.68
(10,45)	-3.83	0.05	0.09	-10.47	0.08	0.28	-7.31	0.07	0.26	-23.85	0.46	1.95	-8.40	0.07	0.26	-27.80	1.66	5.08
(10,60)	-2.26	0.05	0.13	-6.81	0.07	0.22	-5.59	0.07	0.18	-20.25	0.28	3.77	-6.89	0.07	0.18	-25.97	0.71	4.23
(10,75)	-1.30	0.04	0.06	-3.73	0.06	0.16	-3.27	0.06	0.11	-13.92	0.13	0.36	-4.48	0.06	0.11	-21.74	0.36	2.06
(10,90)	-0.64	0.05	0.12	-1.92	0.06	0.22	-1.67	0.07	0.14	-8.57	0.12	0.38	-2.51	0.07	0.14	-16.39	0.25	0.66
[0.5ex](15,30)	-9.84	0.17	0.99	-22.38	0.78	4.05	-14.18	0.29	1.18	-31.72	2.15	5.09	-14.50	0.29	1.18	-32.49	3.28	6.13
(15,45)	-7.48	0.12	0.33	-18.60	0.34	1.01	-12.02	0.17	0.42	-30.73	1.92	5.59	-12.80	0.17	0.42	-32.44	3.16	6.04
(15,60)	-4.82	0.09	0.17	-12.73	0.24	0.66	-9.84	0.17	0.50	-28.41	1.00	5.81	-11.00	0.17	0.50	-31.65	3.37	7.56
(15,75)	-3.22	0.10	0.20	-9.99	0.19	0.55	-6.98	0.12	0.28	-23.74	0.41	3.63	-8.02	0.12	0.28	-28.63	3.08	8.39
(15,90)	-2.07	0.07	0.13	-6.33	0.12	0.38	-4.86	0.12	0.25	-18.58	0.29	0.58	-6.08	0.12	0.25	-25.48	2.61	9.02
[0.5ex](20,30)	-11.78	0.46	4.81	-26.11	2.09	8.49	-15.34	1.08	3.58	-33.11	4.49	7.99	-15.55	1.08	3.58	-33.65	5.44	9.76
(20,45)	-9.11	0.17	0.47	-21.80	1.13	6.78	-13.85	0.57	4.81	-33.09	4.86	16.42	-14.52	0.57	4.81	-34.40	6.55	16.95
(20,60)	-7.71	0.18	0.66	-19.10	0.74	4.52	-12.68	0.29	0.82	-32.32	3.57	9.36	-13.33	0.29	0.82	-34.14	6.23	12.20
(20,75)	-5.15	0.15	0.30	-13.87	0.75	4.37	-10.16	0.22	0.66	-29.27	2.30	9.15	-11.03	0.22	0.66	-32.26	5.76	15.64
(20,90)	-3.98	0.14	0.37	-11.00	0.30	0.56	-8.03	0.23	0.45	-25.50	1.47	6.16	-9.17	0.23	0.45	-30.44	5.09	16.37
[0.5ex](25,30)	-11.69	0.83	4.99	-25.91	3.46	12.47	-14.92	1.73	7.21	-32.17	6.35	18.22	-15.19	1.73	7.21	-32.73	7.74	13.89
(25,45)	-10.87	0.32	2.69	-24.38	2.55	15.51	-15.11	0.74	2.64	-33.76	7.01	14.90	-15.58	0.74	2.64	-34.65	9.75	20.71
(25,60)	-9.18	0.25	0.51	-21.57	2.13	8.09	-14.12	0.45	1.82	-33.82	6.46	20.65	-14.75	0.45	1.82	-35.23	9.11	26.48
(25,75)	-7.32	0.23	0.48	-18.44	1.69	5.01	-12.50	0.35	0.92	-32.56	8.07	27.64	-13.34	0.35	0.92	-34.55	8.80	19.91
(25,90)	-6.22	0.22	0.41	-15.82	0.71	3.38	-11.02	0.35	0.81	-30.33	4.66	26.77	-12.15	0.35	0.81	-33.83	10.51	26.92
[0.5ex](30,30)	-12.51	2.18	8.97	-26.66	7.53	29.84	-15.54	3.31	11.85	-32.30	11.95	34.28	-15.73	3.31	11.85	-32.81	13.30	34.73
(30,45)	-11.26	0.41	2.07	-25.20	3.93	29.24	-15.55	1.08	7.44	-34.21	11.48	28.04	-15.81	1.08	7.44	-34.80	14.30	37.37
(30,60)	-10.57	0.43	1.24	-24.26	3.36	10.33	-15.50	1.08	4.66	-35.18	9.84	24.00	-15.85	1.08	4.66	-36.01	16.53	49.18
(30,75)	-8.36	0.43	1.55	-20.66	4.33	14.04	-13.94	0.75	2.88	-33.98	8.92	28.41	-14.65	0.75	2.88	-35.54	11.87	26.38
(30,90)	-7.62	0.27	0.59	-18.57	2.80	7.31	-12.78	0.55	1.73	-32.59	12.17	50.15	-13.68	0.55	1.73	-35.16	18.77	35.48
Avg.	-6.11	0.25		-14.73	1.32		-9.85	0.47		-25.32	3.70		-10.70	0.47		-28.38	5.66	

Tabelle 3.5: Ergebnisse für das Ein-Block-SPRP mit Entkopplung für verschiedene Werte des Reisezeitfaktors β und der Kommissionierkapazität C .

(m, a)	$\sigma = 0.1$			$\sigma = 0.5$			$\sigma = 1.0$		
	Δ	t_{avg}	t_{max}	Δ	t_{avg}	t_{max}	Δ	t_{avg}	t_{max}
(5,30)	-1.25	0.02	0.05	-2.78	0.03	0.09	-3.24	0.03	0.08
(5,45)	-1.68	0.03	0.09	-3.82	0.03	0.08	-4.22	0.03	0.09
(5,60)	-3.21	0.03	0.09	-6.85	0.02	0.05	-7.26	0.02	0.06
(5,75)	-3.75	0.04	0.12	-6.47	0.03	0.13	-7.48	0.03	0.05
(5,90)	-3.87	0.04	0.12	-7.46	0.03	0.05	-7.67	0.03	0.05
(10,30)	-1.25	0.11	0.38	-2.51	0.26	0.51	-2.83	0.28	0.53
(10,45)	-1.55	0.11	0.31	-2.50	0.17	0.46	-2.76	0.21	0.42
(10,60)	-1.31	0.10	0.25	-2.39	0.17	0.47	-2.55	0.17	0.36
(10,75)	-1.27	0.08	0.16	-2.47	0.13	0.45	-2.59	0.18	0.58
(10,90)	-1.86	0.08	0.19	-3.06	0.12	0.30	-3.22	0.11	0.36
(15,30)	-1.96	0.32	1.53	-2.71	0.70	3.27	-2.97	0.80	2.62
(15,45)	-1.32	0.29	0.75	-2.45	0.73	2.90	-2.58	0.98	3.68
(15,60)	-1.65	0.29	0.93	-2.40	0.59	2.14	-2.48	0.76	3.54
(15,75)	-1.68	0.22	0.60	-2.56	0.30	0.79	-2.68	0.39	1.36
(15,90)	-1.98	0.19	0.63	-2.68	0.20	0.39	-2.74	0.22	0.53
(20,30)	-2.53	0.75	2.70	-3.42	1.69	4.55	-3.57	2.10	4.94
(20,45)	-2.27	0.70	2.66	-2.92	1.73	3.81	-3.08	1.98	5.08
(20,60)	-1.45	1.18	3.15	-2.33	1.81	4.31	-2.37	2.68	6.07
(20,75)	-1.49	0.76	3.37	-2.16	1.51	4.73	-2.27	1.69	4.97
(20,90)	-1.74	0.72	1.96	-2.52	1.12	3.96	-2.65	1.30	5.47
(25,30)	-3.23	1.31	4.36	-4.31	2.95	6.46	-4.48	3.77	7.49
(25,45)	-2.44	1.97	5.48	-3.06	3.57	9.39	-3.24	4.10	8.78
(25,60)	-1.77	2.09	5.88	-2.44	3.81	8.29	-2.60	3.62	7.23
(25,75)	-1.79	1.73	6.34	-2.40	3.26	8.60	-2.53	3.08	7.40
(25,90)	-2.02	1.56	5.23	-2.63	2.43	5.67	-2.69	3.06	9.80
(30,30)	-3.16	3.65	8.22	-4.20	5.01	11.12	-4.43	5.50	12.12
(30,45)	-2.53	3.74	8.93	-3.04	5.54	12.90	-3.19	6.63	17.93
(30,60)	-2.13	4.30	9.40	-2.55	5.92	10.22	-2.62	7.05	11.18
(30,75)	-2.09	3.67	10.50	-2.48	5.32	13.70	-2.62	5.90	14.82
(30,90)	-1.77	3.77	12.93	-2.16	5.36	14.52	-2.24	5.89	14.15
Avg.	-2.07	1.13		-3.19	1.82		-3.39	2.09	

Tabelle 3.6: Ergebnisse für verschiedene Wahrscheinlichkeiten σ , dass ein Gang oben oder unten ein Enddepot enthält.

tungskosten in einem intelligenten Beleuchtungssystem ohne Vergrößerung der gelaufenen Wegstrecke minimiert werden können.

3.3 Integration beider Forschungsstränge und Forschungslücke

In Unterkapitel 3.1 wurde ein Überblick über intelligente Beleuchtungssysteme und ihre Potenziale im industriellen Kontext unter Berücksichtigung einiger Erkenntnisse aus gut erforschten Bereichen, wie etwa Anwendungen in Büro- oder Wohngebäuden oder der Straßenbeleuchtung, gegeben. Im Literaturüberblick wurde festgestellt, dass der Einsatz intelligenter Beleuchtungssysteme in industriellen Umgebungen in der Literatur bisher nicht viel Beachtung gefunden hat, obwohl die Verbesserung der Lichtverhältnisse ein wichtiges Ziel der Führungskräfte sein sollte, da dies zu höherer Produktivität, höherer Arbeitsqualität und weniger Unfällen führen kann. Intelligente Beleuchtungssysteme tragen außerdem zu den Nachhaltigkeitszielen eines Unternehmens bei, indem sie den Energiebedarf senken und das Wohlbefinden der Mitarbeiter bei der Verbesserung der Beleuchtungsqualität steigern. Außerdem unterstützen sie Anwendungen, die über die Beleuchtung hinausgehen. Trotz ihrer Vorteile werden intelligente Beleuchtungssysteme in der Industrie wenig beachtet und nur selten eingesetzt, sodass im industriellen Umfeld immer noch häufig herkömmliche Beleuchtung eingesetzt wird. Dies kann auf die Tatsache zurückzuführen sein, dass die Vorteile intelligenter Beleuchtungssysteme nicht transparent sind und von Fall zu Fall individuell beurteilt werden müssen. Angesichts der Tatsache, dass die Installation einiger Beleuchtungssysteme teuer ist, bieten Elektronikhersteller seit einiger Zeit auch Licht als Dienstleistung an. Dies bedeutet, dass Gerätehersteller den erstmaligen Kauf und die Installation sowie die Wartung des Systems (z. B. den Austausch von Lampen) finanzieren. Benutzer mieten diese Dienste und zahlen monatlich für einen vordefinierten Mindestzeitraum. Dies könnte eine interessante Option für Unternehmen sein, die große Investitionen vermeiden möchten, jedoch auf die Vorteile intelligenter Beleuchtungssysteme nicht verzichten wollen. Neben intelligenten Beleuchtungssystemen wurde im Abschnitt 3.2 ein Überblick über allgemeine Planungsprobleme und Lösungsverfahren in der Lagerwirtschaft sowie grundlegende Modelle zur Optimierung der Kommissionierung gegeben. Da bislang in der wissenschaftlichen Literatur keine Planungsprobleme existieren, die intelligente Beleuchtungssysteme und die damit in Verbindung stehenden Potentiale zur Steuerung von Kommissioniersystemen betrachten, werden in Kapitel 3.2.2 mathematische Modelle für neuartige Kommissioniersysteme vorgestellt, bei deren Implementierung diese Möglichkeiten der Steuerung Grundvoraussetzung sind. In Kapitel 4.3 wird gezeigt, wie sich Freiheitsgrade bei der Festlegung von Gangfolgen in der Kommissionierung zur Reduktion von Beleuchtungskosten nutzen lassen. Außerdem werden Lagerplatzvergabestrategien auf ihre Eignung in Bezug auf einen Betrieb intelligenter Beleuchtungssysteme untersucht. Das im Rahmen dieses Projektes erstellte Demo-Tool bietet Praktikern erste Orientierungshilfen. Das Demo-Tool basiert auf den in Abschnitt 3.2.2 vorgestellten Optimierungsmodellen und kann verwendet werden, um Kosteneinsparungen und Amortisationszeiten für individuelle Lagerprofile durchzurechnen. Der Link zum internet-basierten Demo-Tool, sowie eine Erläuterung zu den Funktionalitäten, werden in Kapitel 4.5 aufgeführt. Neben der Entwicklung eines mathematischen Planungsmodells wurde ein Simulationsmodell entwickelt, das in Kapitel 4.2 beschrieben wird. Hierbei bestand die Möglichkeit, praxisrelevante Einsatzszenarien, wie in Kapitel 3.2.1 aufgezeigt, in einem grafischen Interface abzubilden und dabei die Einsparmöglichkeiten durch intelligente Beleuchtungssysteme zu untersuchen. Die Simulationsstudie bietet in diesem Kontext die Möglichkeit, ohne Vorkenntnisse in der Entwicklung und Lösung von Optimierungsmodellen verschiedene praxisrelevante Einsatzszenarien zu simulieren und gleichzeitig über ein grafisches Interface zu visualisieren. Ergebnisse sind damit gut nachvollziehbar und Entscheidungen finden eine hohe Akzeptanz.

4 Lösungswege

4.1 Identifikation von Performance-Kennzahlen intelligenter Beleuchtungssysteme

Bevor auf die genaue Umsetzung der Simulationsstudie und des mathematischen Planungsmodells eingegangen wird, präsentieren wir eine kurze Fallstudie, die eine erfolgreiche Implementierung eines intelligenten Beleuchtungssystems veranschaulicht und die Vorteile für das betrachtete Unternehmen hervorhebt. Die Fallstudien Daten wurden bei einem italienischen Unternehmen gesammelt, das Messingventile für den Wasser- und Gassektor herstellt. Die Betriebsfläche des Unternehmens beträgt $4.300m^2$, davon entfallen $800m^2$ auf die Produktion bzw. die Montage (einschließlich Büros) und $3.500m^2$ auf Lagerflächen. Das Lager hat eine rechteckige Form mit den Maßen $75m \times 45m$ mit parallelen Gängen von Palettenregalen (das in Abbildung 4.1 dargestellte Lager visualisiert dieses Lager schematisch), in denen die Kommissionierung manuell durchgeführt wird. In der Produktions- und Montageabteilung werden die Aktivitäten normalerweise in drei Schichten von acht Stunden pro Tag und fünf Tagen pro Woche organisiert, während der Lagerbetrieb in zwei Schichten von acht Stunden pro Tag und fünf Tagen pro Woche ausgeführt wird.

Nach einer umfassenden Analyse der Energieverbräuche, die alle Bereiche, Einrichtungen und Aktivitäten des Unternehmens umfasste, wurde festgestellt, dass der durch Beleuchtung verursachte Energieverbrauch für bis zu 30 % des Gesamtenergiebedarfs der Einrichtung verantwortlich ist. Aus diesem Grund hat das Unternehmen beschlossen, die Beleuchtungsinfrastruktur aufgrund der erheblichen Kosteneinflüsse zu verbessern. Darüber hinaus war sich das Unternehmen der Auswirkungen der guten Lichtverhältnisse auf die Arbeitsqualität und das Wohlbefinden der Kommissionierer bewusst, was als zusätzlicher Vorteil einer neuen Beleuchtungsinfrastruktur gewertet wurde.

Vor der Umrüstung betrieb das Unternehmen Leuchtstofflampen in den Produktions- und Montagebereichen sowie Halogen-Metaldampflampen im Lager. Die Änderung des Beleuchtungssystems wurde unter Bezugnahme auf die EN-Norm 12464-1 geplant. Die erste Phase umfasste eine Untersuchung und Analyse der derzeit installierten Beleuchtungseinrichtungen, um nach Möglichkeit einen 1:1-Austausch durch neue Lampen zu realisieren, sodass die Kosten für die Implementierung der neuen Infrastruktur möglichst gering ausfallen (dies wird häufig als Nachrüstung (engl. retrofitting) bezeichnet). Das Ziel der Neugestaltungsphase bestand darin, die vorhandenen Positionen der Lampen wiederzuverwenden, auch wenn die gesamte Installation an die gesetzlichen Vorschriften zur Beleuchtung angepasst werden musste und gleichzeitig eine energieeffiziente Lösung realisiert werden sollte. Im Lagerbereich wurden Lampen in einem einfachen Raster installiert, ohne dabei die Unterschiede zwischen den verschiedenen Lager-

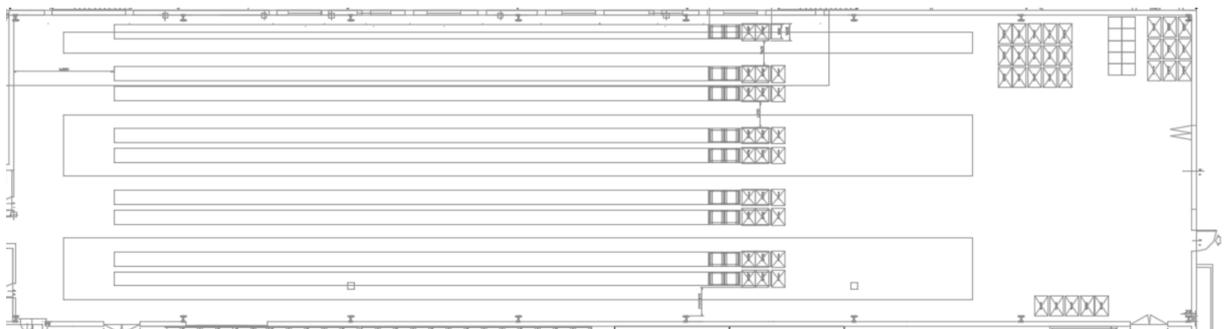


Abbildung 4.1: Layout des betrachteten Lagers in der Fallstudie

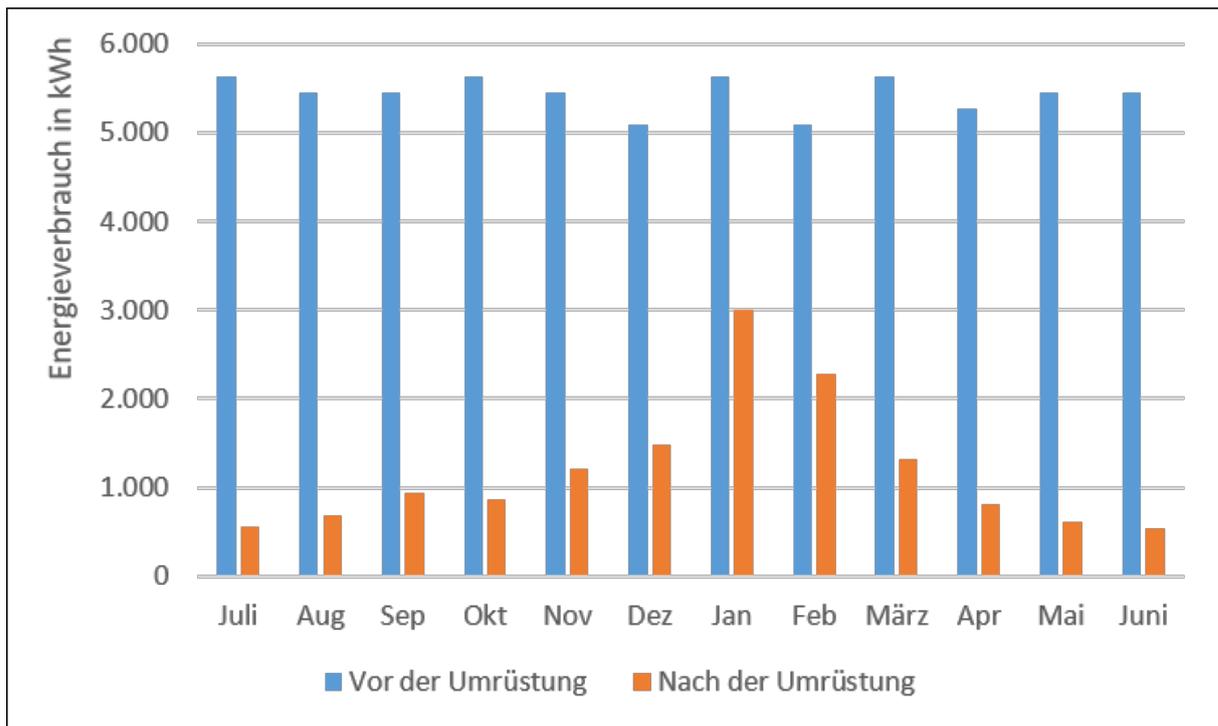


Abbildung 4.2: Energieverbrauch [kWh] der Beleuchtung im Lager

bereichen (Regale, Gänge usw.) zu berücksichtigen, da die Lampenkonfiguration vor der eigentlichen Lageranordnung festgelegt worden war. Da für jeden Bereich unterschiedliche Beleuchtungsstärken erforderlich waren, die den verschiedenen visuellen Aufgaben gemäß Norm EN 12464-1 entsprechen, wurde die Lampenkonfiguration unter Berücksichtigung unterschiedlicher Einschränkungen bereichsweise durchgeführt. Das intelligente Beleuchtungssystem bestehend aus Tageslichtsensoren und Bewegungsmeldern wurde installiert, um eine angemessene Automatisierung des Beleuchtungssystems und dessen ordnungsgemäße Anpassung an die erforderlichen Beleuchtungsniveaus und unter Berücksichtigung unterschiedlicher natürlicher Lichtkomponenten zu gewährleisten. Das System ermöglicht es somit, die Beleuchtungsstärke ganzer Gänge an ihre Nutzung anzupassen. Befindet sich beispielsweise ein Kommissionierer im Gang, wird das Licht entsprechend gesteuert, um die bestmöglichen Lichtverhältnisse zu gewährleisten. Wenn kein Kommissionierer anwesend ist, wird die Beleuchtungsstärke in den jeweiligen Gängen reduziert.

Nach der Installation des intelligenten Beleuchtungssystems wurden bei dem Unternehmen 12 Monate lang Daten gesammelt, um die Vorteile des Systems zu bewerten. Die Ergebnisse waren hinsichtlich des reduzierten Energieverbrauchs signifikant. Der Beleuchtungsverbrauch in der endgültigen Elektrizitätsbilanz verringerte sich in den Produktions- und Montagebereichen um durchschnittlich 60% und im Lager um durchschnittlich 80%. Die tatsächlichen Daten zum Energieverbrauch (in kWh) vor und nach der Installation des intelligenten Beleuchtungssystems für die beiden Bereiche sind in den Abbildungen 4.2 und 4.3 dargestellt. Insbesondere für das Lager ist ersichtlich, dass beispielsweise die Tageslichterfassung für größere Einsparungen in der Sommerperiode sorgt. Die Installation des intelligenten Beleuchtungssystems verbesserte die Beleuchtungsqualität um rd. 50 Lux in den Gängen des Lagers (auf Bodenhöhe) und ca. 80 Lux für Arbeitsplätze (auf der Ebene der Arbeitsfläche). Die Gesamtkosten der Modifikation betragen rd. 18.000 EUR (2.500 EUR pro kWh installierter Beleuchtungsleistung). Die Amortisation der Investition betrug 1,1 Jahre für den Produktions- und Montagebereich und 1,9 Jahre für das Lager. Aufgrund der Vorteile, die durch die Installation des intelligenten Beleuchtungssystems erzielt wurden, plant das Unternehmen, ein entsprechendes System auch in Außenbereichen zu installieren, die Parkplätzen und Gehwegen vorbehalten sind.

Die in der Fallstudie erzielten Ergebnisse wurden, soweit möglich, bei der Entwicklung eines Simula-

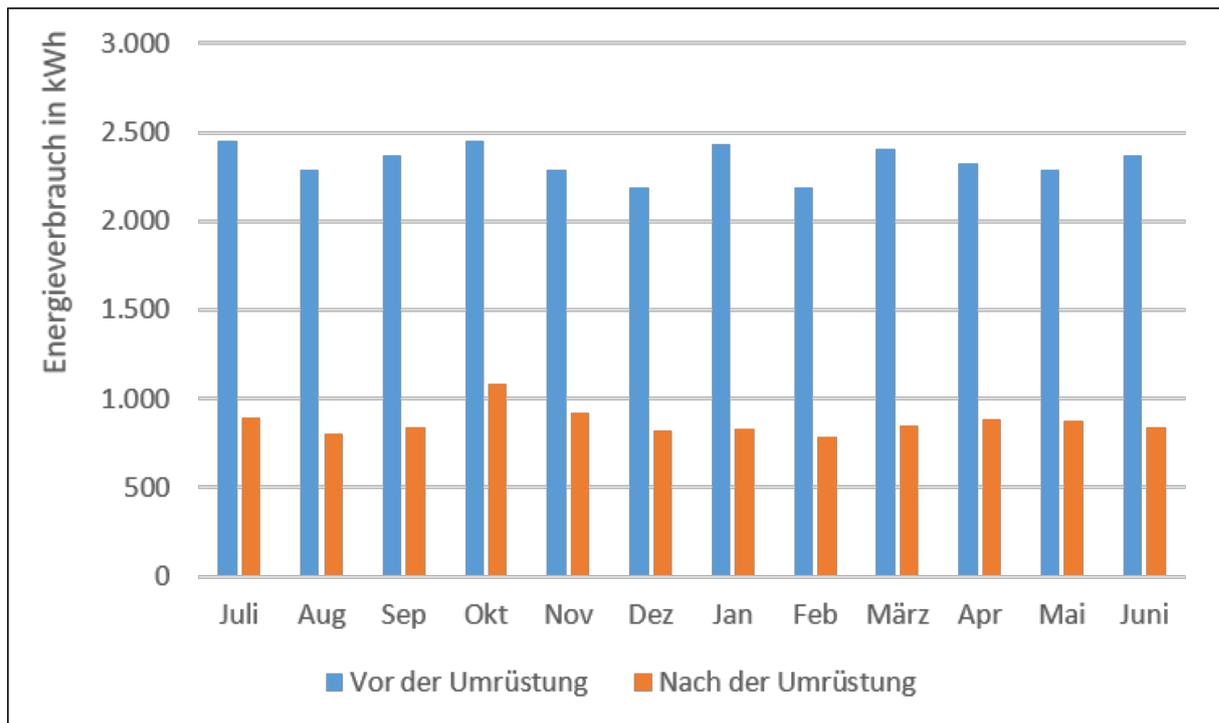


Abbildung 4.3: Energieverbrauch [kWh] der Beleuchtung in der Produktion und im Büro

tionsmodells zur Bewertung des Nutzens von intelligenten Beleuchtungssystemen in Lagern berücksichtigt. Das Simulationsmodell wird im folgenden Kapitel 4.2 genauer beschrieben.

4.2 Simulationsstudie

Lager sind wichtige Bestandteile in jeder Lieferkette. Innerhalb dieser wurde die Kommissionierung häufig als wesentlicher Faktor für die internen Logistikkosten angesehen (Tompkins et al. 2010). Für einige Unternehmen, insbesondere im Bereich des E-Commerce, kann dies insgesamt einer der größten Kostentreiber sein (Boysen et al. 2019). In vielen Branchen ist die effiziente Ausführung von Kommissionierprozessen ein wesentlicher Faktor für die Leistung und den Wettbewerbserfolg von Unternehmen (Van Gils et al. 2018). Um die Effizienz der Kommissionierung zu verbessern, lag der Schwerpunkt der bisherigen Forschung auf der Entwicklung mathematischer Modelle. Damit können Produkte möglichst optimalen Lagerorten zugeordnet und Kundenaufträge in sogenannte Batches umstrukturiert werden, die dann in einzelnen Touren kommissioniert werden können (siehe z. B. de Koster et al. 2007). Das Ziel dieser Modelle besteht normalerweise darin, die kürzest möglichen Routen für einen bestimmten Auftragsatz zu generieren, sodass die Kommissionierer den Auftrag so schnell wie möglich ausführen können (und gleichzeitig zur Maximierung des Lagerdurchsatzes beitragen können).

In der Literatur wurde bislang wenig beachtet, dass weitere Kosten (die direkt mit den Kosten der Kommissionierung in Verbindung stehen) davon abhängen, wie die Lagerprozesse organisiert sind. Die Beleuchtungskosten sind hierfür ein sehr gutes Beispiel, da diese bis zu 65% der gesamten Stromkosten der Einrichtung ausmachen können und daher einen wesentlichen Beitrag zu den Energiekosten eines Lagers leisten (Dhooma und Baker 2012, Richards 2014). Während herkömmliche Beleuchtungssysteme es häufig erforderlich machten, die Beleuchtung während der Betriebsstunden des Lagers vollständig einzuschalten, können Unternehmen mit intelligenten Beleuchtungssystemen jetzt genau die Beleuchtungsstärke bereitstellen, die die Kommissionierer im Lager benötigen. Künstliches Licht, das im Lager bereitgestellt wird, kann daher basierend auf der Menge des in der Einrichtung verfügbaren Tageslichts oder basierend auf Benutzerpräferenzen oder der Anwesenheit der Kommissionierer im Kommissionier-

bereich angepasst werden (Yasodha et al. 2015, Liu et al. 2016). Die Präsenz der Kommissionierer im Lager hängt jedoch von der Organisation der Lagerprozesse ab und unterliegt daher der Kontrolle der Geschäftsführung. Der Einsatz von intelligenten Beleuchtungssystemen könnte zu einer signifikanten Senkung des Energieverbrauchs sowie der Kosten führen und somit auch zu einer Verringerung der lagerungsbedingten Emissionen beitragen, die zur ökologischen Nachhaltigkeit beitragen (vgl. für einen Überblick über die Literatur zur „grünen Lagerhaltung“ (Bartolini et al. 2019)).

Da die Installation von intelligenten Beleuchtungssystemen häufig zu hohen Investitionskosten führt, muss die Rentabilität solcher Systeme vor der Investition sorgfältig bewertet werden. Im industriellen Kontext ist eine solche Bewertung jedoch nicht einfach, da die Funktionsweise des Beleuchtungssystems und die betrieblichen Abläufe in der Anlage zuweilen komplexe Wechselwirkungen aufweisen. Wenn beispielsweise ein Lagerverwalter beschließt, die Lagerhaltung so zu organisieren, dass die Kommissionierer des Lagers fast permanent in den Gängen des Lagers anwesend sind, würde die Verwendung von Anwesenheitssensoren zur Anpassung der Beleuchtung nicht zu einer wesentlichen Verringerung der erforderlichen Beleuchtungsenergie führen. In dem Fall, dass Kommissionierer bestimmte Zonen des Lagers nur relativ selten besuchen würden, könnte dagegen das automatische Dimmen des Lichts in den betroffenen Zonen in Zeiten, in denen Kommissionierer nicht anwesend sind, zur Senkung des Energieverbrauchs und zur Kosteneinsparung beitragen. Lagerverwalter könnten sich sogar dazu entschließen, Lagerzuweisungen, Chargen und Kommissionier Routen zu ändern, um absichtlich Zonen zu generieren, in denen eine Verringerung der Beleuchtungsintensität für das Unternehmen vorteilhaft sein kann, obwohl dies den Durchsatz des Lagers beeinträchtigen kann. Wie bereits erwähnt, wurden die genannten Zusammenhänge jedoch bisher nicht in einer wissenschaftlichen Studie untersucht. In diesem Kapitel werden die Kosteneinsparungspotenzial von intelligenten Beleuchtungssystemen im Lagerkontext untersucht.

4.2.1 Nutzen von Simulationsstudien

Für die oben beschriebenen Zwecke wurde ein Simulationsmodell in der Software Plant Simulation von Siemens PLM Software implementiert. Das Simulationsmodell ermöglicht die Variation der Prozessparameter für Lagerdesign und Kommissionierung, z. B. der Länge und Anzahl der Gänge und Quergänge oder der Anzahl der Kommissionierer, die gleichzeitig im Lager arbeiten. Zusätzlich wurden vier verschiedene Betriebsstrategien für das Beleuchtungssystem implementiert. Eine strukturierte Simulationsstudie ermöglicht Einblicke in die Wechselwirkungen von intelligenten Beleuchtungssystem mit Systementwurf und Prozessparametern und wie beide zusammen die Lagerbetriebskosten beeinflussen. Dazu wird im nächsten Abschnitt ein kurzer Überblick zu Simulationsstudien und deren Bedeutung gegeben. Abschnitt 4.2.2 beschreibt dann das Simulationsmodell und Abschnitt 4.2.3 präsentiert die Ergebnisse der Simulationsstudie. Das Kapitel schließt mit einer Diskussion der wichtigsten Erkenntnisse und einem Ausblick auf zukünftige Forschungsmöglichkeiten in Abschnitt 4.2.4.

4.2.2 Das Simulationsmodell

Die Simulation ist ein leistungsstarkes Tool zur Analyse verschiedener Entwurfsalternativen oder Steuerungsstrategien mit praktischem Feedback für reale Systeme. Sie ermöglicht die Bewertung der Richtigkeit und Effizienz einer Entwurfs- oder Steuerungsstrategie, bevor das System tatsächlich eingerichtet oder in Betrieb ist. Simulationsmodelle werden daher häufig verwendet, um die Leistung von Lagern unter verschiedenen Layouts und Betriebsrichtlinien zur Bewertung von Prozessen zu bestimmen (Verriet et al. 2013). Das zu diesem Zweck entwickelte Simulationsmodell zielt darauf ab, das Energieeinsparungspotenzial von intelligenten Beleuchtungssystemen in Lagern für verschiedene Lagergrößen und Betriebspolitiken zu bewerten. Das entwickelte Modell geht zu diesem Zweck von einem konventionellen rechteckigen Lager mit parallelen Gängen und mehreren Blöcken aus (vgl. dazu Abbildung 4.5), da dies das in der Literatur am häufigsten analysierte Lagerlayout ist (vgl. z. B. Masae et al. 2019) und auch in der Praxis sehr häufig beobachtet werden kann. Die Abmessungen des Lagers (Anzahl der Regale und Ebenen pro Regal, Breite der Gänge, Höhe der Regale usw.) und verschiedene Prozessparameter können im Simulationsmodell flexibel angepasst werden. Basierend auf den ausgewählten Lagerabmessungen

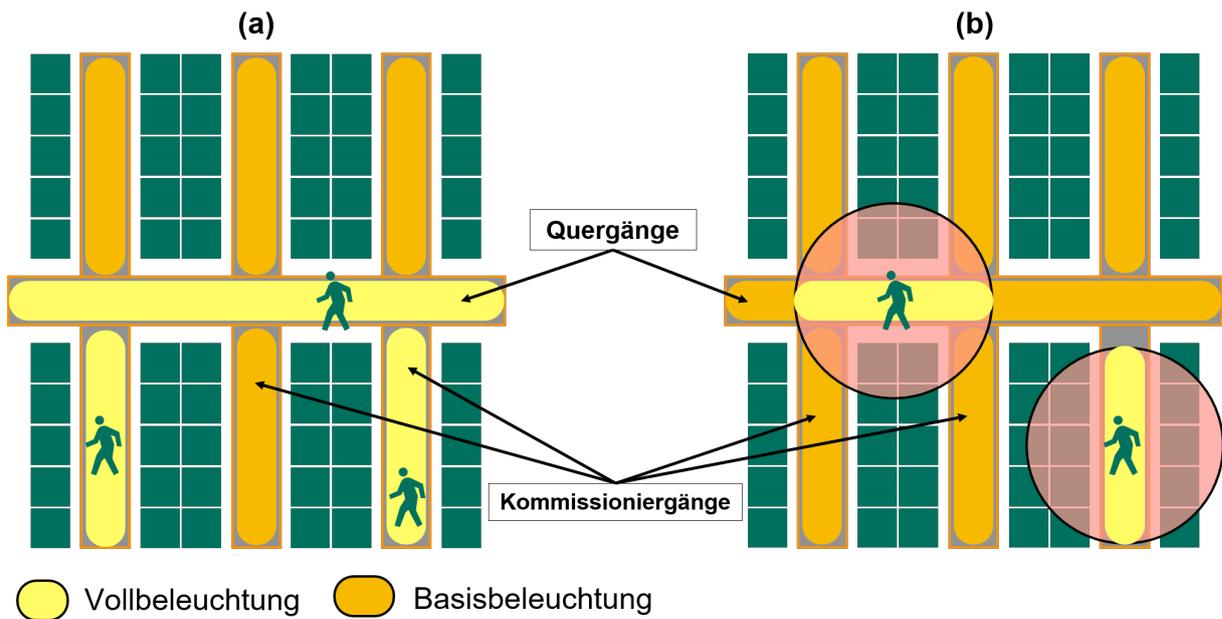


Abbildung 4.4: Sensorbasierte intelligente Beleuchtungssysteme, die im Simulationsmodell berücksichtigt werden (links: SFI, rechts: SAZ)

ermittelt das Simulationsmodell die Anzahl der Lagerorte und die daraus resultierende Anzahl der im Lager gelagerten Artikel. Das Modell berücksichtigt drei verschiedene Beleuchtungsstrategien (b-d) zur Bewertung der Vorteile von intelligenten Beleuchtungssystemen und vergleicht diese Strategien mit einem herkömmlichen Beleuchtungssystem (a):

- Herkömmliches Beleuchtungssystem (CL)*: Bei dieser Strategie wird davon ausgegangen, dass alle Gänge (Kommissionier- und Quergänge) des Lagers während des Lagerbetriebs vollständig beleuchtet sind, unabhängig davon, ob die Gänge belegt sind oder nicht. Bei dieser Strategie werden herkömmlichen Lichtquellen (Leuchtstofflampen) angenommen, die noch häufig in Lagern verwendet werden (Ries et al. 2017).
- LED-Beleuchtung (LED)*: Diese Strategie ist identisch mit der CL-Strategie mit dem Unterschied, dass Leuchtdioden (LEDs) verwendet werden, die als Basistechnologie für jedes moderne Beleuchtungssystem gelten.
- Sensorbasierte Beleuchtung mit vollständig beleuchteten Quergängen (SFI)*: Kommissioniergänge sind nur dann voll beleuchtet, wenn ein Kommissionierer in einem Gang arbeitet. Gänge, die leer sind, werden mit 20% der regulären Beleuchtungsstärke betrieben, wozu in den Kommissioniergängen Bewegungsmelder installiert sind. Dagegen sind die Quergänge immer voll beleuchtet. Diese Beleuchtungsstrategie entspricht dem in Abschnitt 4.1 beschriebenen Fall und ist in Abbildung 4.4 a dargestellt.
- Sensorbasierte Beleuchtung mit Aktivitätszone (SAZ)*: Mithilfe eines Indoor Positioning Systems kann jedem Kommissionierer ein Aktivitätszone mit einem Radius von 10 m zugewiesen werden. Innerhalb dieser Aktivitätszone kann jedem Kommissionierer individuell die geforderte Beleuchtungsstärke zur Verfügung gestellt werden. Alle Bereiche des Lagers, die nicht von einer Aktivitätszone abgedeckt werden, werden erneut mit 20% der regulären Beleuchtungsstärke betrieben. Diese Beleuchtungsstrategie ist in Abbildung 4.4 b dargestellt. Die Umsetzung der intelligenten Beleuchtungsstrategien (c) und (d) erfolgt mit LED-Lichtquellen.

Bei Bestellungen, die im Lager eingehen, wird davon ausgegangen, dass sie jeweils aus 20 Artikeln bestehen (siehe Pan und Wu 2012 und Franzke et al. 2017 für ähnliche Annahmen). Es wird angenom-

men, dass die Nachfrage nach den im Lager gelagerten Artikeln entweder pareto oder gleichverteilt ist. Um die Leistung der vier Beleuchtungsstrategien für alternative Lagerbetriebsrichtlinien zu bewerten, wurden die folgenden Managemententscheidungen in das Simulationsmodell implementiert:

- a) *Lagerplatzzuweisung*: Durch die Zuweisung von Artikeln zu den Lagerorten des Lagers nach einem bestimmten Muster können Zonen im Lager entstehen, die vom Kommissionierer des Lagers häufiger besucht werden als andere, wodurch es vorteilhaft sein kann, die Beleuchtungsstärke in weniger frequentierten Zonen zu verringern. Wir betrachten zwei unterschiedliche Lagerplatzvergabe-strategien, nämlich I) eine zufällige Lagerplatzzuweisung und II) eine nachfragebasierte Lagerplatzzuweisung. Wenn die Richtlinie für die zufällige Lagerung verwendet wird, werden die Artikel den Lagerorten im Lager zufällig zugewiesen. Wenn stattdessen die nachfragebasierte Lagerrichtlinie verwendet wird, werden häufig angeforderte Artikel in unmittelbarer Nähe des Depots gespeichert, und nur selten angeforderte Artikel werden Lagerorten zugeordnet, die weiter vom Depot entfernt sind.
- b) *Kommissionierart*: Es wurden zwei verschiedene Kommissionierarten implementiert, nämlich Pick-by-Order und Pick-by-Batch. Bei Auswahl der Kommissionierart "Pick-by-Order" wird jede im Lager eingehende Bestellung einem Kommissionierer zugewiesen, der dann alle in der Bestellung enthaltenen Artikel sammelt. Wenn stattdessen "Pick-by-Batch" verwendet wird, werden die Bestellungen aus den verfügbaren Aufträgen entsprechend ihrer Entfernung zum Depot generiert. Die letztgenannte Kommissionierart sieht vor, dass Kommissionierer nur in bestimmten Zonen des Lagers arbeiten und Fälle vermieden werden, in denen (viele) Kommissionierer große Teile des Lagers durchqueren müssen. Wenn Bestellungen gebatcht werden, werden die Picks in verschiedenen Bereichen des Lagers zu einer Bestellung zusammengefasst, um Aktivitätszonen zu generieren, in denen im Idealfall nur ein einziger Kommissionierer arbeitet. Dies kann dazu beitragen, die Aktivität der Kommissionierer auf bestimmte Zonen des Lagers zu konzentrieren, sodass jeder Kommissionierer nach Erreichen der betreffenden Zone weniger Gänge passieren muss. Dies könnte es dem System ermöglichen, die Beleuchtungsintensität aufgrund einer kürzeren Gesamtarbeitszeit und einer höheren Wahrscheinlichkeit, dass die Kommissionierer nur Gänge durchqueren, in denen eine Kommissionierung erforderlich ist, zu verringern. Abbildung 4.5 zeigt das in der Simulationsstudie angewandte Batching-Prinzip.
- c) *Anzahl der Kommissionierer*: Wenn mehrere Kommissionierer parallel im Lager arbeiten, kann dies dazu führen, dass in mehreren Gängen gleichzeitig gearbeitet wird, so dass die Lichtintensität nur in wenigen Gängen reduziert werden kann. Wir betrachten daher den Fall, dass mehrere Kommissionierer parallel im Lager arbeiten.

Tabelle 4.1 fasst alle in dieser Studie berücksichtigten Simulationsparameter und ihre jeweiligen Attribute / Werte zusammen und führt zu insgesamt 72 Kombinationen (Szenarien), die analysiert werden, um den Einfluss der verschiedenen Beleuchtungsstrategien auf die Energiekosten zu bewerten.

Simulationsparameter	Attribute / Werte
Lagerplatzzuweisung	Zufällige oder Nachfrage-basierte Lagerung
Kommissionierart	Pick-by-Batch oder Pick-by-Order
Anzahl Kommissionierer	1, 3, 5
Anzahl Picklisten je Kommissionierer	20
Größe des Lagers	Klein, Mittel, Groß
Nachfragestruktur	Gleichverteilt, Pareto-verteilt

Tabelle 4.1: Verwendete Simulationsparameter

Die drei Lagergrößen sind in Tabelle 4.2 näher spezifiziert. Für alle Simulationsläufe wird das gleiche Lagerlayout verwendet, nämlich ein Lager mit rechteckiger Form und mehreren Blöcken, wobei sich das Depot in der oberen linken Ecke des Lagers neben dem ersten Kommissioniergang befindet.

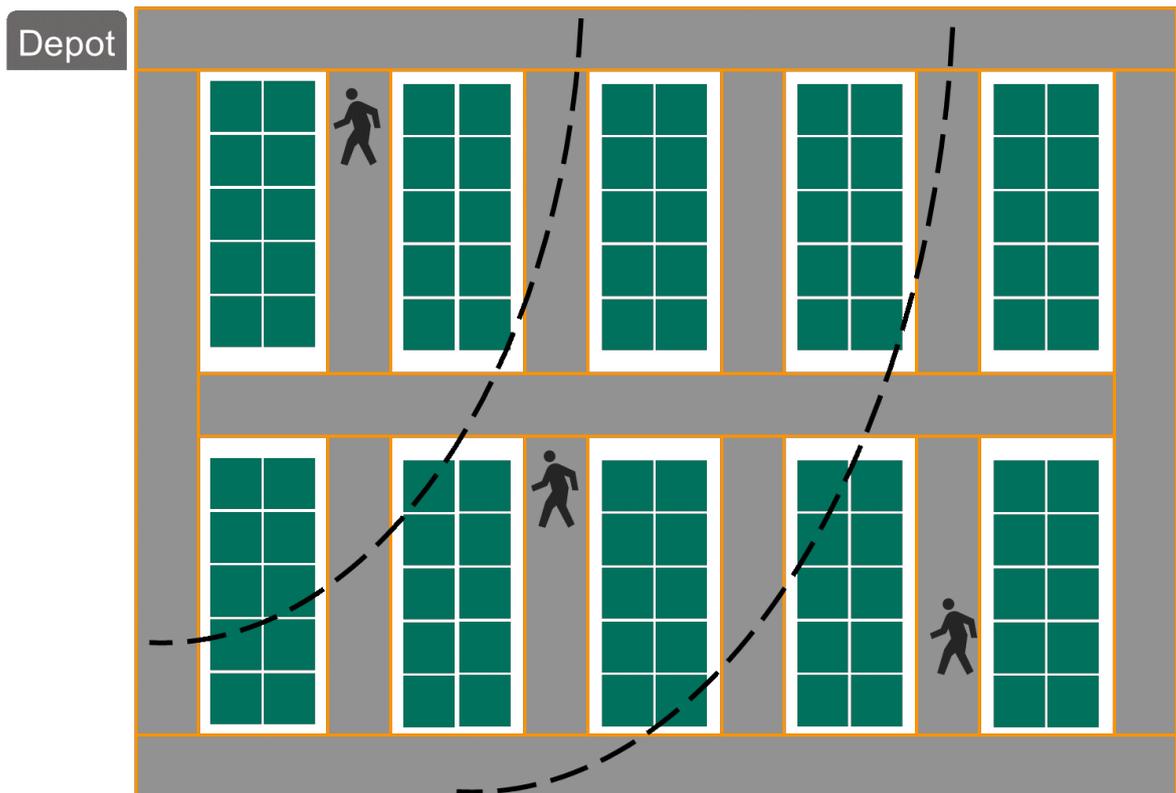


Abbildung 4.5: Batching- und Zoning-Prinzip bei drei Kommissionierern

	Klein	Mittel	Groß
Anzahl Regale	16	30	80
Anzahl Regelebenen	4	5	6
Anzahl Quergänge	2	3	5
Anzahl Kommissioniergänge	8	15	40
Anzahl Produkte (Lagerplätze)	1280	3000	9600
Zu beleuchtende Gangflächen in m ²	392	728	1936

Tabelle 4.2: Verwendete Lagergröße und Layoutparameter für die Simulationsstudie

In Tabelle 4.3 sind die in der Simulationsstudie angenommenen Parameter zusammengefasst, die für jedes Szenario festgelegt wurden. Eine umfangreiche Anzahl von Läufen wurde durchgeführt, um das Modell zu validieren und sicherzustellen, dass es gemäß den in diesem Abschnitt angegebenen Annahmen und Beschreibungen funktioniert. In drei Workshops mit dem Projektbegleitenden Ausschuss wurde das Simulationsmodell diskutiert, die Ergebnisse sowie die zugrunde liegenden Annahmen und Parameter (insbesondere die in den Tabellen 4.1, 4.2 und 4.3 zusammengefassten) mit Lagerexperten aus der Industrie analysiert und angepasst, um die praktische Anwendbarkeit des Modells sicherzustellen. Die Definition des Stromverbrauchs und der reduzierten Lichtintensität für leere Gänge basiert ebenfalls auf den Erfahrungen der Experten. Abhängig von den örtlichen Gegebenheiten ist der Energieverbrauch für unterschiedliche Lichtintensitäten sehr unterschiedlich. Gründe hierfür können die Montagehöhen von Lichtquellen, die Eigenschaften gebrauchter Glühlampen oder die Lichtabsorptionseigenschaften von Oberflächen und Lagereinrichtungen sein. Basierend auf den Erläuterungen zur SAZ-Beleuchtungsstrategie und Abbildung 4.4 wird der Beleuchtungsradius mit 10 m definiert. Die Experten stimmten dem Gesamtaufbau des Simulationsmodells zu und es wurden nur geringfügige Änderungen vorgeschlagen und in die endgültige Version des Simulationsmodells aufgenommen (z. B. die Anzahl

der Produkte im Verhältnis zur Lagergröße).

Lagerparameter	Beschreibung
Breite von Regal- und Quergängen	2m
Höhe, Länge und Breite jedes Regals	6m hoch, 20m lang, 1m tief
Durchschnittliche Gehgeschwindigkeit der Kommissionierer	1m/s
Erwartungswert für die Pickzeit	10s (Level 1), +15s (+1 Level) ²
Standardabweichung für die Pickzeit	2.5s (Level 1), +5s (+1 Level)
Beleuchtungsparameter	
Energieverbrauch Beleuchtung (reguläre Beleuchtungsintensität)	7W/m ² für CL, 4W/m ² für LED, SFI, SAZ
Beleuchtungsintensität in leeren Gängen (für intelligente Beleuchtungssysteme)	20% der regulären Beleuchtungsintensität
Stromkosten	0.18 Euro/kWh
Beleuchtungsradius	10m

³ Für jede weitere Ebene im Regal werden 15s zum Erwartungswert addiert.

Tabelle 4.3: Angenommene Parameter in der Simulationsstudie

Die in dieser Simulationsstudie verwendete Routingstrategie funktioniert wie folgt: Nach Eingang einer Bestellung geht der Kommissionierer zu dem Artikel, der am weitesten von dem in der Kommissionierliste enthaltenen Depot entfernt ist. Der Kommissionierer geht dann zu dem Artikel, der am zweitweitesten vom Depot entfernt ist, und fährt auf diese Weise fort, bis der letzte Artikel auf der Kommissionierliste abgerufen wurde. Jede Tour beginnt und endet am Depot. Das Simulationsmodell wählt automatisch die kürzeste Route zwischen zwei Picks oder zwischen einem Pick und dem Depot aus.

Offensichtlich gibt es Abhängigkeiten zwischen den im Simulationsmodell implementierten Managemententscheidungen, die in Abschnitt 4.2.3 näher untersucht werden. Um die Leistung der vier oben definierten Beleuchtungssysteme zu bewerten, verfolgt das Modell während der Simulationsläufe die folgenden drei Leistungsgrößen: I) Stromverbrauch in kWh, II) Stromkosten in Euro und III) die Zeit, die die Kommissionierer benötigen, um die angegebenen Aufträge auszuführen.

Zu Beginn jedes Simulationslaufs werden jedem in diesem Lauf berücksichtigten Kommissionierer 20 Kommissionierlisten mit jeweils 20 zu kommissionierenden Artikeln zugewiesen. Dabei wird davon ausgegangen, dass ein Kommissionierer, der alle ihm zugewiesenen Kommissionierlisten vor anderen Kommissionierern beendet, die anderen nicht unterstützt. Auf diese Weise nimmt die Anzahl der aktiven Kommissionierer im Lager gegen Ende jedes Simulationslaufs ab und die Simulation wird beendet, wenn der letzte Kommissionierer alle 20 Kommissionierlisten abgeschlossen hat. Das Simulationsmodell wurde in die Software Plant Simulation von Siemens PLM Software implementiert und auf einer Intel Core i5-6300HQ CPU mit 2,30 GHz und 16 GB RAM Arbeitsspeicher ausgeführt.

Nachdem überprüft wurde, ob die Simulation wie beabsichtigt funktioniert, wurden Experimente durchgeführt, um die Simulation betrieblich zu validieren. Anschließend wurde die Simulation durchgeführt, um herauszufinden, wie sich die oben definierten Managemententscheidungen auf den Energieverbrauch der verschiedenen Beleuchtungssysteme auswirken. Wie bereits erwähnt, wurden das konzeptionelle Simulationsmodell und alle während der Simulation verwendeten Parameterwerte in erster Linie in Gesprächen mit Lagerexperten in Workshops zu intelligenten Beleuchtungssystemen validiert.

4.2.3 Ergebnisse

Diese Simulationsstudie analysiert den Einfluss verschiedener Managemententscheidungen auf den Energieverbrauch, die Energiekosten und die Kommissionierzeit in einem Lager. Die wichtigsten Ergebnisse einer systematischen Analyse aller Simulationsparameter werden im Folgenden vorgestellt. Zunächst untersuchen wir die Auswirkungen verschiedener Lagergrößen und Lagerzuordnungen (Abschnitt 4.2.3.1) und analysieren dann den Einfluss der Anzahl der Kommissionierer auf die Leistung der Beleuchtungssysteme (Abschnitt 4.2.3.2). Wir fahren mit einer Analyse der verschiedenen Kommissionierarten fort (Abschnitt 4.2.3.3) und schließen mit einer Bewertung der Auswirkungen der Nachfrageverteilung auf

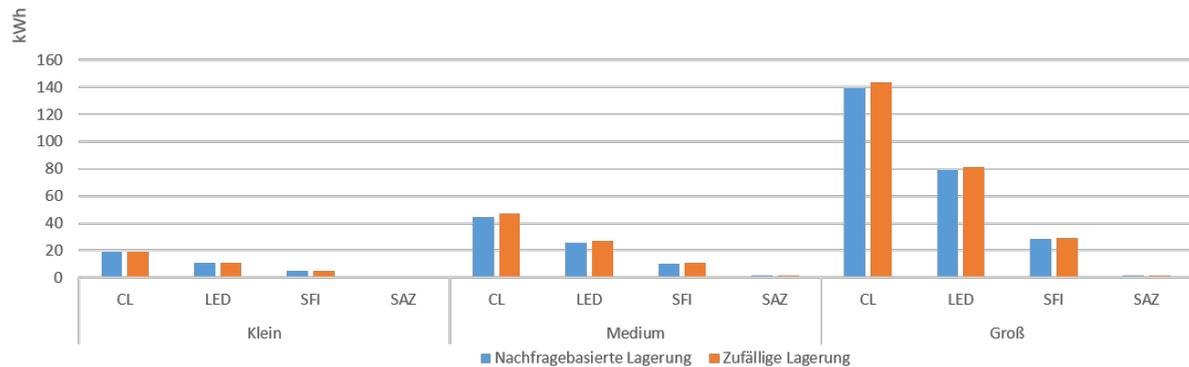


Abbildung 4.6: Energieverbrauch der Beleuchtungsstrategien für unterschiedliche Lagergrößen und Lagerplatzzuordnungen

den Energieverbrauch (Abschnitt 4.2.3.4). Abschnitt 4.2.3.5 zeigt dann die durchschnittlichen Energieeinsparungen, die in allen Szenarien erzielt wurden, und berücksichtigt auch die Korrelation von Arbeitszeit und Energieverbrauch.

4.2.3.1 Die Auswirkungen von Lagergröße und Lagerzuordnung

Wir beginnen mit der Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Lagergrößen und Lagerzuordnungen auf den Energieverbrauch. Wir gehen zunächst davon aus, dass nur ein einziger Kommissionierer im Lager arbeitet.

Abbildung 4.6 zeigt den Energieverbrauch der vier Beleuchtungsstrategien für verschiedene Lagergrößen und Lagerzuordnungen. Wie zu sehen ist, sind die absoluten Energieeinsparungen (diese entsprechen den Unterschieden zwischen dem Energieverbrauch der Beleuchtungsstrategie CL und dem Energieverbrauch der anderen drei Beleuchtungsstrategien) für größere Lager aufgrund der größeren zu beleuchtenden Fläche höher. Für den Fall eines großen Lagers und einem bedarfsorientierten Lagerplatz ergab das Simulationsmodell, dass der Energieverbrauch mit SFI um 79% und mit SAZ um 98% im Vergleich zu CL gesenkt werden kann. Diese Ergebnisse stimmen gut mit denen der in Abschnitt 4.1 beschriebenen Fallstudie überein, in der eine Reduktion des Energieverbrauchs um rund 80% beschrieben wurde. Bei einem in Tabelle 4.3 angenommenen Energiepreis von 0,18 EUR/kWh können die Energiekosten für einen durchschnittlichen Arbeitstag von zwölf Stunden von 29,51 EUR mit CL auf 16,78 EUR mit LED, auf 7,48 EUR mit SFI und auf 1,79 EUR mit SAZ gesenkt werden (jeweils für das große Lager). Für SFI und SAZ sind 43% der Reduktion des Energieverbrauchs auf die Nachrüstung von Leuchtstofflampen mit LED-Beleuchtung zurückzuführen. Eine bemerkenswerte (weitere) Reduktion von 36% bzw. 55% ergibt sich aus der zusätzlichen intelligenten Beleuchtung von Lagerräumen. Bei der bedarfsgerechten Lagerplatzzuweisung ist die Reduktion des Energieverbrauchs für die verschiedenen Beleuchtungsstrategien um bis zu 5,5% höher als bei der zufälligen Lagerplatzzuweisung. Der Grund für dieses Ergebnis ist, dass die Kommissionierer mehr Zeit benötigen, um alle Produkte abzurufen, wenn eine zufällige Lagerplatzzuweisung verwendet wird, was zu längeren Betriebszeiten führt, die von einer Verringerung der Beleuchtungsstärke profitieren können. Es ist anzumerken, dass die durchschnittliche Zeit, die für die Ausführung eines bestimmten Satzes von Bestellungen benötigt wird, mit der Größe des Lagers zunimmt. Da Gänge, die nicht von einem Kommissionierer belegt sind, mit einer Beleuchtungsstärke von 20% beleuchtet werden, führte eine längere Gesamtkommissionierungszeit zu einem höheren (Gesamt-) Energieverbrauch. Tatsächlich benötigten die Kommissionierer im Durchschnitt rund 7 Stunden, um die Bestellungen im kleinen Lager zu erledigen, rund 9,5 Stunden im mittleren Lager und rund 11,5 Stunden im großen Lager. Die gesamte Kommissionierzeit in Kombination mit der zu beleuchtenden Fläche erklärt die enormen Unterschiede im Energieverbrauch der verschiedenen Lagergrößen.

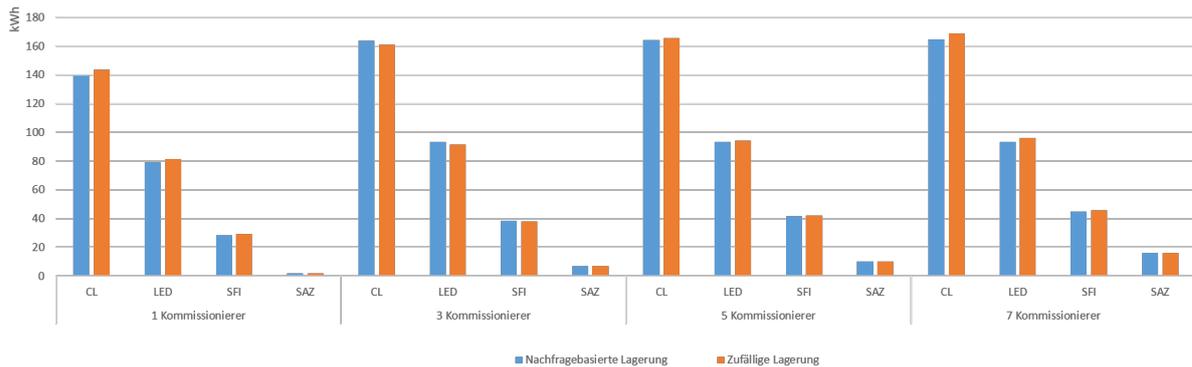


Abbildung 4.7: Energieverbrauch für ein großes Lager mit bedarfsgerechter und zufälliger Lagerzuordnung mit unterschiedlich vielen Kommissionierern

4.2.3.2 Die Auswirkung der Lagerzuweisung und die Anzahl der Kommissionierer

In diesem Abschnitt wird untersucht, welchen Einfluss die Anzahl der gleichzeitig im Lager beschäftigten Kommissionierer auf den Energieverbrauch bei unterschiedlichen Lagerzuordnungen hat. Abbildung 4.7 zeigt den Energieverbrauch eines großen Lagers für alle vier Beleuchtungsstrategien und einen einzelnen, drei, fünf und sieben Kommissionierer. Generell führt eine Erhöhung der Kommissionieranzahl zu einem höheren Energieverbrauch für beide Lagerplatzvergabe-strategien, da immer mehr Gänge gleichzeitig voll ausgeleuchtet werden müssen. Darüber hinaus führt die zufällige Lagerplatzzuweisung zu einem höheren Energieverbrauch für einen Einzelnen, fünf oder sieben Kommissionierer. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die zufällige Lagerzuordnung in den Lagern keine eindeutigen Cluster erzeugt, in denen Kommissionierer während der Auftragsabwicklung mehrmals kommissionieren müssen. Infolgedessen ist ihr Betätigungsfeld größer, was dazu führt, dass mehr Gänge gleichzeitig vollständig beleuchtet werden und folglich ein höherer Energieverbrauch entsteht. Eine Ausnahme bildet der Fall von drei Kommissionierern, da in diesem Fall die Zufalls-lagerung die bedarfsgerechte Lagerplatzzuweisung übertrifft. Dies kann auf die in der Simulation verwendete Routingstrategien zurückzuführen sein, die angibt, dass die Kommissionierer zuerst den Artikel abrufen, der am weitesten vom Depot entfernt ist, und dann die Kommissionierung der Artikel näher am Depot fortsetzen. Obwohl bedarfsorientierte Lagerzuweisung Zonen um das Depot generiert, in denen durchschnittlich mehr Artikel kommissioniert werden müssen, kann nicht verhindert werden, dass Kommissionierer auch entfernte Zonen im Lager aufsuchen müssen, um die angeforderten Artikel dort abzurufen. Bei drei Kommissionierern scheint die Energie, die zur Beleuchtung entfernter Zonen zu Beginn des Kommissioniervorgangs benötigt wird, nicht durch Energieeinsparungen ausgeglichen zu werden, die sich aus der konzentrierten Ansammlung der Kommissionierer in der Nähe des Depots zum Ende der Auftragsbearbeitung ergeben.

In Abbildung 4.8 ist der durchschnittliche Energieverbrauch für eine alternative Anzahl von Kommissionierern für die vier Beleuchtungsstrategien für das große Lager dargestellt. Die Mittelwerte wurden über alle Simulationsläufe für die jeweilige Anzahl der Kommissionierer und die jeweilige Beleuchtungsstrategie berechnet. Die Abbildung zeigt, dass eine Zunahme der Anzahl von Kommissionierern, die parallel im Lager arbeiten, zu einem höheren Energieverbrauch für alle Beleuchtungsstrategien führt. Die für SFI und SAZ entstehenden Energieeinsparungen verringern die Anzahl der Kommissionierer, da immer mehr Gänge beleuchtet werden müssen. Beim LED-System ist die prozentuale Energieeinsparung gegenüber dem CL unabhängig von der Anzahl der im Lager beschäftigten Kommissionierer und beträgt 43%. SFI erzielt Einsparungen im Bereich von 52% bis 64%, und SAZ erzielt Einsparungen im Bereich von 64% bis 94% im Vergleich zu CL.

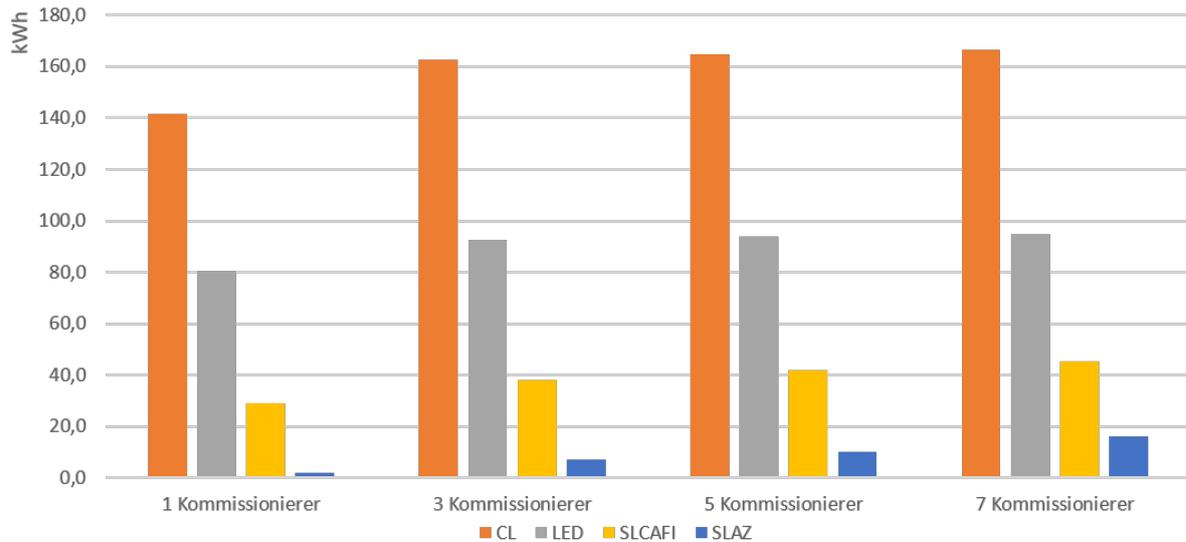


Abbildung 4.8: Durchschnittlicher Energieverbrauch der vier Beleuchtungsstrategien für eine alternative Anzahl von Kommissionierern

4.2.3.3 Die Auswirkungen der Kommissionierart

Wir untersuchen nun den Einfluss der beiden Kommissionierarten auf den Energieverbrauch, wiederum für das große Lager. In Abbildung 4.9 wird die Kommissionierart für die Kommissionierung nach Bestellung mit der Kommissionierart für die Kommissionierung nach Charge (Batch) für die bedarfsorientierte Lagerplatzzuweisung und die zufällige Lagerplatzzuweisung sowie für die unterschiedliche Anzahl von Kommissionierern für die LED- und SFI-Beleuchtungssysteme verglichen. Interessanterweise haben wir festgestellt, dass die Pick-by-Order-Strategie die Pick-by-Batch-Strategie für bedarfsorientiertes Lagern übertroffen hat, während bei der Zufallslagerungsstrategie die entgegengesetzte Performance beobachtet wurde. Wir führen diese Ergebnisse auf die Implementierung der Kommissionierart zur Batchauswahl zurück. Obwohl eine bedarfsgerechte Lagerplatzzuweisung sicherstellt, dass die meisten Picks näher am Depot erfolgen, können Bestellungen (einige) weiter vom Depot entfernte Picks enthalten, die im Falle der Batchverarbeitung zu über das Lager verteilten Aktivitätszonen führen, die es erforderlich machen können, viele Gänge auf einmal zu beleuchten. Die Pick-by-Order-Kommissionierart würde wiederum dazu führen, dass die meisten Kommissionierer in der Nähe des Depots arbeiten und die Verwendung von Gängen häufig überlappt, wodurch der Energieverbrauch gesenkt werden kann. Die Ergebnisse ändern sich für die zufällige Lagerplatzzuweisung, bei der die Picks gleichmäßiger über das Lager verteilt werden. In diesem Fall übertrifft die chargenweise Entnahme die auftragsbezogene Entnahme der Produkte.

4.2.3.4 Die Auswirkungen der Nachfrageverteilung

Wir untersuchen nun den Einfluss der Bedarfsverteilung auf die relative Leistung der Beleuchtungsstrategien sowohl für den Fall der zufälligen als auch der bedarfsorientierten Lagerplatzvergabe. Abbildung 4.10 zeigt den durchschnittlichen Energieverbrauch der vier Beleuchtungsstrategien für alle Kommissionierer. Wir betrachten ein mittelgroßes Lager, um zu zeigen, dass die Auswirkungen auch für kleinere Einrichtungen auftreten. Wie zu sehen ist, profitiert die bedarfsgesteuerte Lagerplatzvergabe von einem Pareto-verteilten Bedarf, da der höhere Bedarf an mehreren Artikeln zu Zonen im Lager führt (in diesem Fall in der Nähe des Depots), in denen die Kommissionierer am häufigsten anwesend sind, während weiter vom Depot entfernte Zonen immer weniger frequentiert werden. Diese letzteren Zonen profitieren insbesondere von intelligenten Beleuchtungssystemen. Wie erwartet kann die zufällige Lagerplatzvergabe die höhere Nachfrage nach einer Reihe von Artikeln, die die Pareto-Verteilung verursacht,

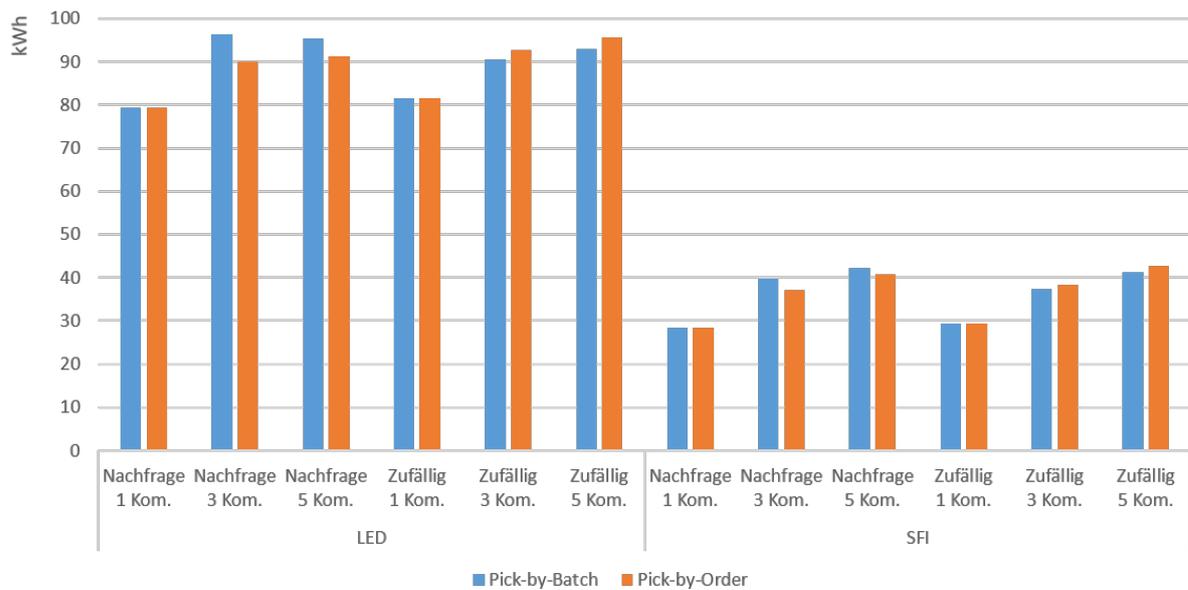


Abbildung 4.9: Energieverbrauch von zwei Beleuchtungsstrategien für ein großes Lager und unterschiedliche Kommissionierarten und Lagerplatzvergabe

nicht in eine Verringerung des Energieverbrauchs umwandeln. Die Ergebnisse sind daher in diesem Fall denen, die für eine gleichverteilte Nachfrage ermittelt wurden, recht ähnlich.

4.2.3.5 Durchschnittliche Energieeinsparung

Abschließend geben wir einen Überblick über die Energieeinsparungen, die die verschiedenen Beleuchtungssysteme durchschnittlich in den verschiedenen von uns analysierten Szenarien erzielt haben. Ziel dieser Analyse ist es, das Kosteneinsparungspotenzial von intelligenten Beleuchtungssystemen aufzuzeigen. Abbildung 4.11 zeigt den durchschnittlichen Energieverbrauch pro Stunde für die verschiedenen in dieser Studie untersuchten Lagergrößen, gemittelt über alle in der Simulation berücksichtigten Szenarien. Auf diese Weise ist der angezeigte Energieverbrauch unabhängig von der Zeit, die erforderlich ist, um alle Kommissionieraufträge abzuschließen. Dies macht es möglich, die durchschnittlichen Einsparungen durch intelligente Beleuchtungssysteme in verschiedenen Lagergrößen zu ermitteln und Schlussfolgerungen für nicht terminierende Vorgänge zu ziehen. In Kombination mit den vorherigen Ergebnissen zeigen diese Durchschnittswerte, dass die Einsparungen auch für gemischte Szenarien gelten. Bei allen Lagergrößen führt die Einführung der LED-Technologie zu einer Energieeinsparung von rund 43% im Vergleich zur CL-Strategie. Die Energieeinsparung durch SFI im Vergleich zu CL liegt zwischen 61% und 77%, und SAZ führt zu Energieeinsparungen zwischen 70% und 85% im Vergleich zu CL. Die absoluten Energieeinsparungen hängen von der Lagergröße ab.

Schließlich analysieren wir den Zusammenhang zwischen der durchschnittlichen Kommissionierzeit und dem Energieverbrauch der verschiedenen Beleuchtungsstrategien in allen Szenarien. Tabelle 4.4 zeigt, dass die Korrelation für CL und LED gleich ist, da der einzige Unterschied im Verbrauchsfaktor der Lichttechnik liegt. SAZ weist eine geringere Korrelation auf, da der Energieverbrauch in der Kommissionierzeit nicht linear ansteigt wie im Fall von SFI. Das Beleuchten einer kleinen Aktivitätszone um jeden Kommissionierer herum erfordert nicht so viel Energie wie das Beleuchten eines ganzen Quergangs oder eines Kommissioniergangs. Bei SAZ scheinen neben der Kommissionierzeit auch die Position der Kommissionierer im Lager und mögliche Überschneidungen in ihren Aktivitätszonen für den Energiebedarf der Beleuchtungsanlage von Bedeutung zu sein.

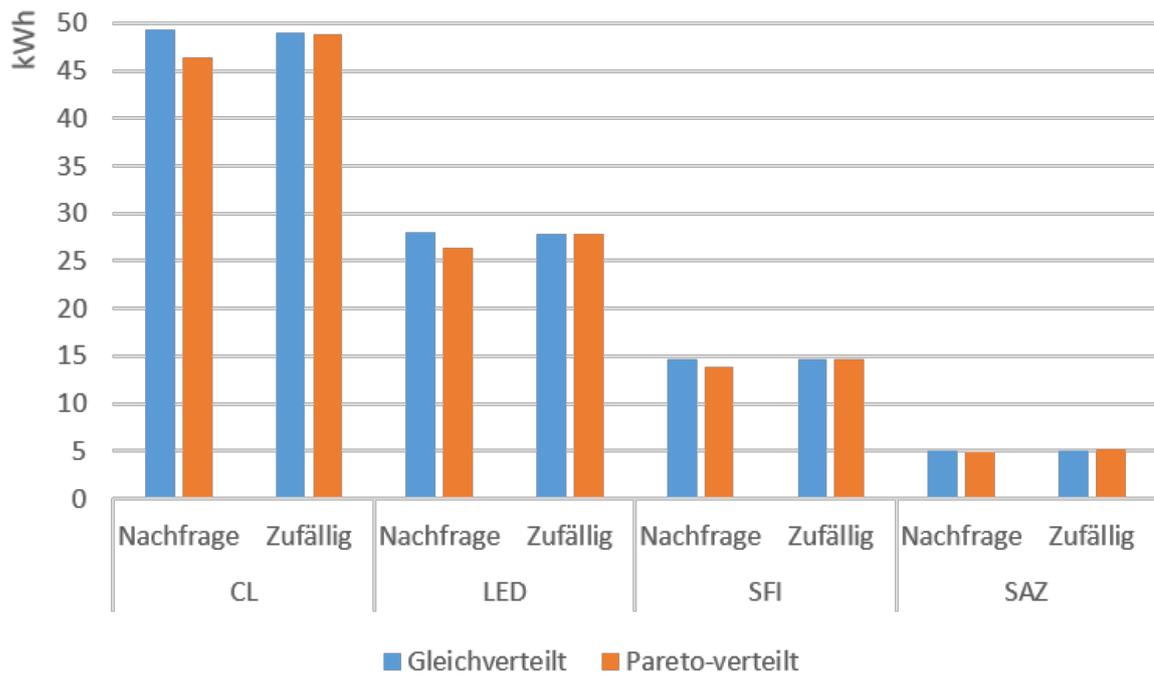


Abbildung 4.10: Energieverbrauch für alternative Nachfragestrukturen und Lagerplatzvergabe

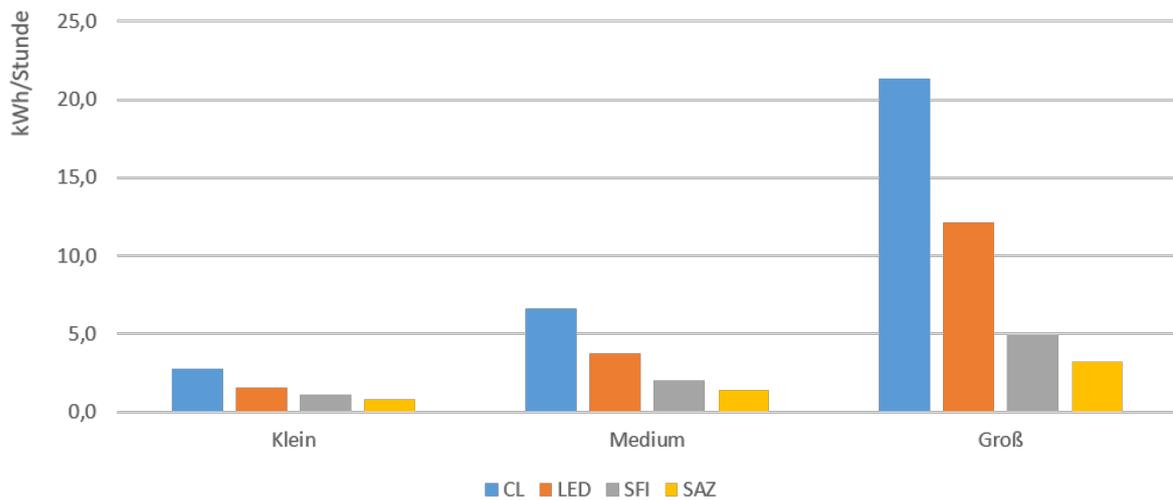


Abbildung 4.11: Durchschnittlicher Energieverbrauch der Beleuchtungsstrategien für alternative Lagergrößen

CL	LED	SFI	SAZ
0,914	0,914	0,942	0,549

Tabelle 4.4: Zusammenhang zwischen Arbeitszeit und Energieverbrauch für alle Kombinationen

4.2.4 Diskussion

Diese Untersuchung ist die erste wissenschaftliche Untersuchung, die das Energie- und Kosteneinsparungspotenzial von intelligenten Beleuchtungssystemen im Lagerkontext bewertet. Zu diesem Zweck wurde ein Simulationsmodell für ein Kommissionierlager entwickelt, um die Vorteile von intelligenten Beleuchtungssystemen durch Variation der Lagerkonstruktionsmerkmale und Betriebsstrategien zu bewerten. Insbesondere berücksichtigten wir unterschiedliche Lagergrößen und Nachfragestrukturen, eine variable Anzahl an Kommissionierern, unterschiedliche Lagerzuordnungen und alternative Kommissionierart. Im Modell wurden vier verschiedene Beleuchtungsstrategien implementiert, die unterschiedliche Grade an „Intelligenz“ aufweisen: Neben zwei Systemen, die die Gänge während des Lagerbetriebs vollständig beleuchten, haben wir ein System in Betracht gezogen, das die Beleuchtungsintensität von Kommissioniergängen verringert, die derzeit nicht von Kommissionierern verwendet werden ein viertes System, das einzelne Aktivitätsbereiche der Kommissionierer berücksichtigt. Die Ergebnisse des Simulationsmodells zeigten, dass intelligente Beleuchtungssysteme den Energieverbrauch im Vergleich zur herkömmlichen Vollzeitbeleuchtung von Lagern um bis zu 90% senken können. Neben einer erheblichen Energie- und Kostenreduzierung können intelligente Beleuchtungssysteme die Kohlendioxidemissionen senken und zur Verringerung des ökologischen Fußabdrucks von Lagern beitragen.

Die in der Simulationsstudie erhaltenen Ergebnisse bestätigen die Ergebnisse der vorgestellten Fallstudie, die ein aktuelles Beispiel eines intelligenten Beleuchtungssystemes zeigt, das in einem Lagerkontext implementiert wurde. Die Studie kann Entscheidungsträger dabei unterstützen, eine (schrittweise) Umstellung von herkömmlicher Beleuchtung auf intelligente Beleuchtung in der Lagerpraxis erfolgreich umzusetzen. Diese Arbeit unterstützt Entscheider auch beim Betrieb solcher Systeme sowie bei der Entscheidung, ob sie in intelligenten Beleuchtungssystemen investieren oder nicht. Es ist wichtig zu beachten, dass die erforderlichen Investitionen abhängig von der Technologie des intelligenten Beleuchtungssystemes und der Größe des Lagers sowie der gewünschten Beleuchtungsstärke recht hoch sein können. Daher ist es nicht verwunderlich, dass Entscheidungsträger häufig nach dem Return-on-Investment fragen, wenn sie sich für die Implementierung solcher Systeme interessieren. Basierend auf unseren Simulationsergebnissen, den Fallstudien und den Diskussionen im Expertenworkshop kann eine mögliche Amortisation von zwei verschiedenen intelligenten Beleuchtungssystemen wie folgt aussehen. Nehmen wir ein Lager mit einer Fläche von 7.500 Quadratmetern und einer jährlichen Leuchtdauer von 7.000 Stunden an. Der durchschnittliche jährliche Gesamtenergieverbrauch mit alten Leuchtstofflampen liegt bei 1.792 MWh, und bei einem Energiepreis von 0,18 Euro/kWh würden sich die Gesamtenergiekosten auf 322.560 Euro pro Jahr belaufen. Durch eine Umrüstung von Leuchtstofflampen auf LED-Leuchtmittel kann dieser Verbrauch auf 1.174 MWh und bei Stromkosten von 211.320 Euro pro Jahr gesenkt werden. Diese Einsparungen ergeben sich auch dann, wenn ein besseres durchschnittliches Beleuchtungsniveau erreicht werden kann. Durch die Integration von Tageslichtsensoren (unter der Annahme von 4,4 Stunden Sonnenschein pro Tag) und einer Lichtsteuerung in Kombination mit einer dimmbaren Beleuchtungsstärke ist eine Senkung des Energieverbrauchs auf 987 MWh und Stromkosten von 177.660 Euro pro Jahr möglich. Es kann eine durchschnittliche Lebensdauer von 15.000 Stunden für jede Leuchtstofflampe und 50.000 Stunden für jede LED angenommen werden. Somit fallen innerhalb von zehn Jahren für das Beleuchtungssystem mit Leuchtstofflampen Wartungskosten von rund 576.000 Euro an. Die Investitionskosten für den Umbau und/oder die Neugestaltung des LED-Beleuchtungssystems betragen inklusive Material- und Montagekosten rund eine Million Euro. Aufgrund der längeren Lebensdauer von LED-Leuchten sind in diesem Fall keine Wartungskosten zu berücksichtigen. Unter diesen Voraussetzungen amortisierte sich das hypothetische Beleuchtungssystem ohne Sonnenstunden nach 5,9 Jahren und mit 4,4 Stunden täglichem Sonnenschein nach 4,9 Jahren.

Die oben beschriebenen potenziellen Vorteile von intelligenten Beleuchtungssystemen gehen jedoch über die Reduzierung von Energieverbrauch, Energiekosten und Emissionen hinaus. Licht ermöglicht im Allgemeinen das Sehen, beeinflusst das Verhalten und die Leistung des Menschen und beeinflusst den Schlaf-Wach-Rhythmus sowie die Stimmung und Motivation des Menschen (Boyce 2014). LEDs in Kombination mit einer intelligenten Lichtsteuerung können zu einer Erhöhung der Lichtqualität, einer verbesserten Regulation des Tagesrhythmus und einer Steigerung der Produktivität führen (Oh et al. 2014, Karlicek 2012). Es hat sich gezeigt, dass unterschiedliche Lichtfarbtemperaturen die Physiologie

des Menschen beeinflussen (Yasukouchi und Ishibashi 2005), sodass höhere Farbtemperaturen zu einer höheren Aufmerksamkeit führen und daher häufig in Arbeitsbereichen eingesetzt werden. Studien zum Human Centric Lighting (HCL) berichteten darüber hinaus, dass an die Bedürfnisse der Arbeitnehmer angepasste Beleuchtung zum Wohlbefinden der Arbeitnehmer und zur Vermeidung von Arbeitsunfällen beitragen (Pandharipande und Caicedo 2015). Intelligente Beleuchtungssysteme können so zur Verbesserung der ergonomischen Arbeitsbedingungen in Lagern beitragen und zu einer Steigerung von Leistung und Qualität führen.

Die hier vorgestellte Simulationsstudie hat einige Einschränkungen. Zunächst haben wir nur ein Standard-Lagerlayout mit einem festen Standort des Depots betrachtet. Die Analyse verschiedener Lagerlayouts oder alternativer Lagerorte wäre interessant, um Einblicke zu gewinnen, ob Änderungen der Lagergestaltungsparameter den Energieverbrauch und die Kosten senken können. Darüber hinaus werden in dieser Studie des Simulationsmodells die genauen Wege der Kommissionierer zwischen den einzelnen Kommissionierplätzen innerhalb der Routing-Strategie für die Kommissionierer nicht kontrolliert ermittelt, weshalb deren Auswirkungen aufgrund unterschiedlicher Routing-Strategien nicht Bestandteil dieser Simulationsstudie waren. Das vorgeschlagene Simulationsmodell könnte daher in künftigen Forschungsarbeiten um weitere Lagerlayouts und Routingstrategien erweitert werden, z. B. Traversal-Heuristik oder Largest-Gap (für weitere Informationen siehe de Koster et al. 2007), die derzeit nicht in der Modelimplementierung behandelt werden. Darüber hinaus haben wir sowohl die Anzahl der Artikel in einer Kommissionierliste als auch die Anzahl der Bestellungen, die einem Kommissionierer zugewiesen wurden, festgelegt und zwei Kommissionierarten implementiert. Eine Aufhebung dieser Annahmen wäre ein interessanter Weg für die zukünftige Forschung.

Eine weitere vielversprechende Richtung für die zukünftige Forschung ist die Entwicklung eines auf VLC basierenden Indoor-Positioning-Systems, mit dessen Hilfe Headmaps erstellt und Aktivitätszonen identifiziert werden können, um Entscheidungen des Managements hinsichtlich der Neuzuweisung von Artikeln auf Lagerfächer zu unterstützen. Darüber hinaus müssen HCL und VLC genauer untersucht werden, insbesondere in empirischen Ansätzen, um die Vorteile von intelligenten Beleuchtungssystemen bei der Verbesserung des Lagerbetriebs anhand fundierter Daten umfassend bewerten zu können. Diese und andere vielversprechende Ideen, die die Anwendung intelligenter Beleuchtung in industriellen Umgebungen berücksichtigen, können in einer Erweiterung dieser Arbeit diskutiert werden. Es ist festzuhalten, dass intelligente Beleuchtungssysteme ein Beispiel dafür sind, wie digitale Technologien die Betriebsleistung und die Umweltbelastung verbessern sowie die menschliche Arbeit positiv beeinflussen und zu mehr Nachhaltigkeit beitragen können.

4.3 Synchronisierung von Kommissioniervorgängen zur Reduktion von Beleuchtungskosten

Im Vergleich zu klassischen Leuchtstofflampen erlaubt der Einsatz von LEDs einen um etwa 80% geringeren Energieverbrauch. Dies ist jedoch nicht der einzige Vorteil, welchen der Einsatz von LEDs mit sich bringt; kurze Schaltzeiten und eine hohe Anzahl an Schaltzyklen erlauben die Beleuchtung einer Regalgasse im Lager nur genau dann, wenn sich ein Kommissionierer in ihr aufhält. Falls mehrere Kommissionierer im Lager aktiv sind, ergibt sich dadurch ein zusätzliches Optimierungspotenzial hinsichtlich der Beleuchtungskosten, falls sich durch eine geeignete Festlegung der Gangfolgen für jeden Kommissionierer immer möglichst viele Kommissionierer gleichzeitig in einer Regalgasse des Lagers befinden. In diesem Abschnitt wird aufgezeigt, wie sich eine solche Synchronisierung der Kommissionierer ohne Erhöhung der gelaufenen Distanz erreichen lässt. Das resultierende Optimierungsproblem wird als Picker Synchronisation Problem, kurz PSP, bezeichnet. Numerische Studien anhand einer einfachen Metaheuristik, basierend auf der Idee der iterierten lokalen Suche, zeigen, dass die Synchronisierung der Kommissionierer auf realistischen Instanzen eine Reduktion der Beleuchtungskosten um ca. 20% erlaubt.

4.3.1 Problemstellung

In diesem Abschnitt wird ein Lager mit r Regalgassen betrachtet, welches dem gleichen Layout wie in Abschnitt 3.2.2 folgt. Zu Beginn seien mehrere Kommissionierer, im Folgenden durch die Menge K bezeichnet, am Depot stationiert. Jedem Kommissionierer $k \in K$ ist eine Liste von Aufträgen O^k zugeordnet, wobei jeder Auftrag $o \in O^k$ eine Liste von zu kommissionierenden Artikeln beinhaltet. Alle Kommissionierer beginnen zum gleichen Zeitpunkt damit, den ersten Auftrag auf ihrer jeweiligen Liste zu kommissionieren. Sobald ein Auftrag vollständig kommissioniert wurde, kehrt der Kommissionierer zum Depot zurück, um die Artikel abzuliefern. Danach beginnt er direkt mit der Kommissionierung des nächsten Auftrags.

Für einen einzelnen Auftrag kann mit Hilfe des Algorithmus von Ratliff und Rosenthal (1983) eine kürzestmögliche Tour über alle zu kommissionierenden Artikel berechnet werden. Die Berechnung erfolgt dabei in zwei Schritten, wobei im ersten Schritt zunächst ein ungerichteter Graph (sog. *Tour Subgraph*, kurz TS, siehe Ratliff und Rosenthal 1983) konstruiert wird, welcher die gelaufenen Wege des Kommissionierers darstellt. Da es sich bei dem TS um einen ungerichteten Graphen handelt, wird durch diesen jedoch noch keine eindeutige Gangfolge definiert. Dies erfolgt in einem zweiten Schritt, in welchem aus dem TS ein gerichteter Graph gewonnen wird, der die tatsächliche Gangfolge des Kommissionierers festlegt. Zwei beispielhafte TS sind in Abbildung 4.12 abgebildet. Ein TS enthält drei Arten von Knoten: einen Depotknoten (d im Beispiel), zweitens Knoten, welche die Positionen der zu kommissionierenden Artikel darstellen (v_i) und drittens Knoten, welche den Anfang (e_a) oder das Ende (e'_a) einer Regalgasse a darstellen. Es sei vorausgesetzt, dass ein TS die in Definition 1 genannten Eigenschaften besitzt.

Definition 1 (Eigenschaften eines TS). *Ein ungerichteter TS besitzt folgende Eigenschaften:*

1. *Es gibt zwischen zwei Knoten nicht mehr als zwei Kanten.*
2. *Alle Knotengrade sind gerade Zahlen.*
3. *Es existieren keine zwei Zyklen, die beide jeweils eine Kante aus dem gleichen parallelen Kantenpaar enthalten.*

Ein gerichteter Graph zur Festlegung der Gangfolge kann mit folgendem Algorithmus von Ratliff und Rosenthal (1983) aus einem TS konstruiert werden:

Theorem 1 (Konstruktion der Gangfolge). *Gegeben ein TS nach Ratliff und Rosenthal (1983).*

1. *Beginne am Depotknoten.*
2. *Falls zum momentanen Knoten bisher ungenutzte parallele Kantenpaare inzident sind, benutze eine beliebige Kante aus einem der Kantenpaare, um zum nächsten Knoten zu gelangen. Dann wiederhole Schritt 2.*
3. *Wenn zum momentanen Knoten einzelne ungenutzte Kanten inzident sind, welche nicht zu einem parallelen Kantenpaar gehören, benutze eine beliebige von diesen, um zum nächsten Knoten zu gelangen. Fahre fort mit Schritt 2.*
4. *Falls zum momentanen Knoten ein paralleles Kantenpaar inzident ist, von welchem eine Kante bereits genutzt wurde, benutze diese, um zum nächsten Knoten zu gelangen. Fahre fort mit Schritt 2.*
5. *Stop. Der momentane Knoten ist der Depotknoten und die Tour ist vollständig.*

Hierbei ist anzumerken, dass dieses Verfahren auf beliebige TS angewendet werden kann, Optimalität bezüglich der Gesamtlänge der gelaufenen Distanz ist keine Voraussetzung. Dies ermöglicht die Anwendung aller in diesem Kapitel vorgestellten Techniken z. B. auf TS, welche durch Heuristiken wie Largest Gap oder der Schleifenstrategie gebildet werden.

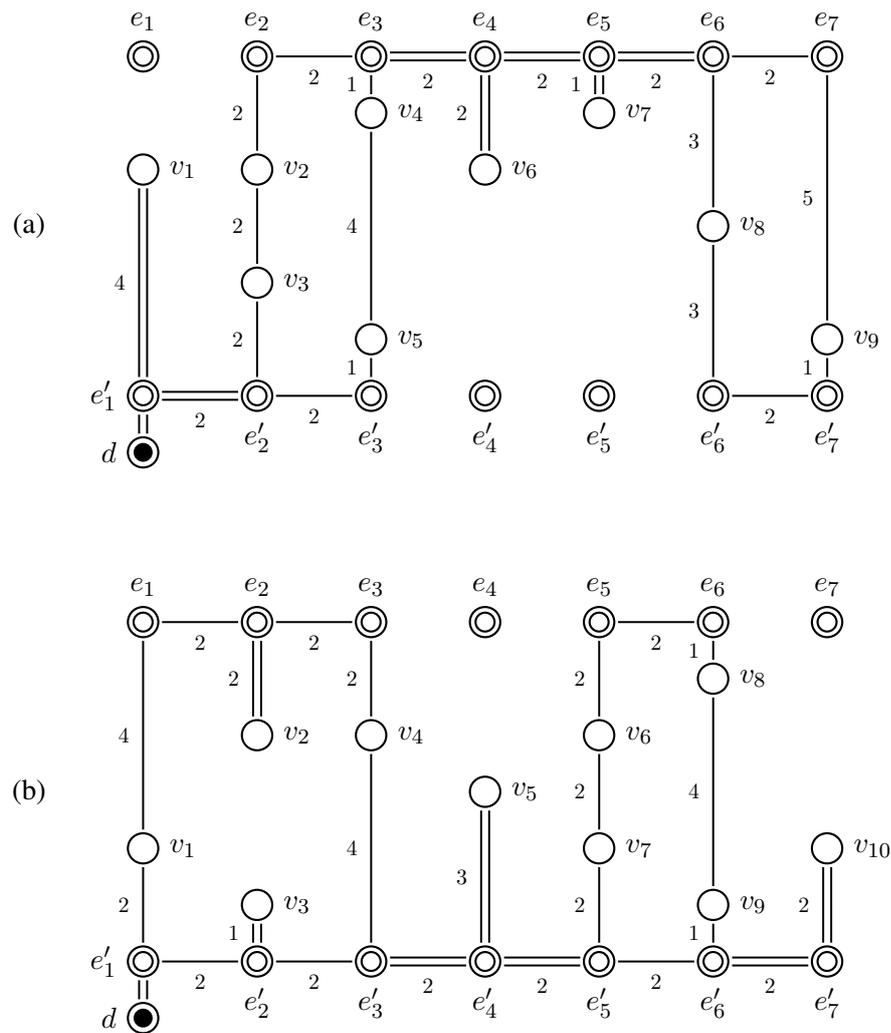


Abbildung 4.12: Zwei Beispielhafte TS.

Theorem 1 besitzt Freiheitsgrade in den Schritten 2 und 3, welche durch das Wort „beliebig“ angezeigt werden. Für das hier untersuchte Lagerlayout entsprechen diese Freiheitsgrade den in Abbildung 4.13 gezeigten Kantenkonfigurationen. Es gibt in beiden Kantenkonfigurationen zwei Möglichkeiten, die nächste zu traversierende Kante auszuwählen, welche als 0 und 1 gekennzeichnet sind. Sie treten ausschließlich am Anfang oder Ende einer Regalgasse auf und der Kommissionierer erreicht den Knoten über das gerichtet eingezeichnete Kantenpaar.

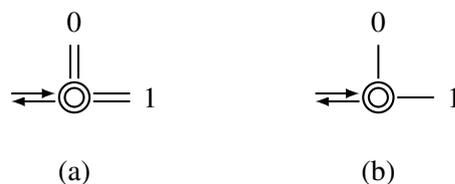


Abbildung 4.13: Die beiden Freiheitsgrade des Konstruktionsverfahrens aus Theorem 1.

Bei der in Abbildung 4.13 (a) gezeigten Konfiguration kann der Kommissionierer entscheiden, welches der mit 0 bzw. 1 gekennzeichneten Kantenpaare er zuerst traversiert. Da aufgrund von Eigenschaft 3 aus Definition 1 beide zur Auswahl stehenden Kantenpaare zu verschiedenen Zyklen gehören, wird der Kommissionierer beide Kanten eines parallelen Kantenpaares traversieren, bevor er die Kanten des je-

weils anderen Kantenpaares traversiert.

Bei der in Abbildung 4.13 (b) dargestellten Kantenkonfiguration gehören beide zur Auswahl stehenden Kanten zum gleichen Zyklus. In diesem Fall kehrt der Kommissionierer über die jeweils nicht ausgewählte Kante zum Ausgangsknoten zurück.

Die für diesen Abschnitt wesentliche Feststellung ist, dass der Kommissionierer durch seine Entscheidung in beiden Situationen beeinflusst, zu welchem Zeitpunkt er sich in welchen Regalgassen des Lagers aufhält, ohne dabei die Länge der gelaufenen Gesamtstrecke zu verändern. Dieser Umstand soll nun dahingehend ausgenutzt werden, dass sich zu jedem Zeitpunkt möglich viele Kommissionierer gleichzeitig in einer Regalgasse aufhalten, um dadurch die Gesamtbeleuchtungsdauer zu reduzieren.

Die Entscheidungen bei der Festlegung der Gangfolge nach Theorem 1 werden im Folgenden als $\pi_i^k \in \{0, 1\}$ bezeichnet, wobei k der Kommissionierer und $i = 1, \dots, n_k$ ein fortlaufender Index ist, welcher den jeweiligen Auftrag und Knoten identifiziert, bei dem der Freiheitsgrad auftritt. Es sei festgelegt, dass $\pi_i^k = 0$ die Entscheidung für Kommissionierer k bezeichnet, bei i als erstes die angrenzende Regalgasse zu traversieren. Dementsprechend bezeichne $\pi_i^k = 1$ die Entscheidung, bei i zunächst über den Quergang fortzufahren. Dies bedeutet, dass es für den Kommissionierer k genau 2^{n_k} mögliche Entscheidungsvektoren gibt. Ziel des Picker Synchronization Problems (PSP) ist es, für alle Kommissionierer Entscheidungsvektoren zu wählen, welche die Gesamtbeleuchtungsdauer minimieren. Eine Auswahl von Entscheidungsvektoren für jeden Kommissionierer wird im Folgenden als Lösung bezeichnet. Eine Lösung, welche minimale Beleuchtungskosten besitzt, wird als optimale Lösung bezeichnet. Eine Besonderheit im Vergleich zu vielen anderen Optimierungsproblemen ist, dass es keine unzulässigen Entscheidungsvektoren gibt.

4.3.2 Beispiel

Die Problemstellung soll nun anhand eines Beispiels veranschaulicht werden. Betrachtet wird eine Instanz des PSP mit zwei Kommissionierern, die zwei verschiedene Aufträge bearbeiten. Die beiden zu den Aufträgen gehörigen TS sind in Abbildung 4.12 (a) und (b) dargestellt, wobei Kommissionierer 1 den zu (a) gehörigen Auftrag und Kommissionierer 2 den zu (b) gehörigen Auftrag bearbeitet. Abbildung 4.14 (a) und (b) zeigen die beiden TS mit den jeweiligen Freiheitsgraden, welche sich bei der Anwendung von Theorem 1 ergeben. Die Positionen von Artikeln, an denen der Kommissionierer vorbei geht, sind in Abbildung 4.14 nicht eingezeichnet. Die beiden Entscheidungsvektoren der Kommissionierer sind $\pi^1 = (\pi_1^1, \pi_2^1, \pi_3^1, \pi_4^1, \pi_5^1)$ und $\pi^2 = (\pi_1^2, \pi_2^2, \pi_3^2)$. Es sei nun zunächst $\pi^1 = (0, 1, 0, 1, 1)$ und $\pi^2 = (1, 1, 0)$. Die Gangfolge für Kommissionierer 1 wird damit nach Theorem 1 folgendermaßen festgelegt:

Der Kommissionierer startet am Depotknoten d . Von dort aus gibt es nur ein paralleles Kantenpaar zu Knoten e'_1 , an welchem der erste Freiheitsgrad π_1^1 auftritt (zwei ausgehende parallele Kantenpaare, vgl. Abbildung 4.13 a). Da nun $\pi_1^1 = 0$ gesetzt ist, geht der Kommissionierer als nächstes entlang der ersten Regalgasse bis zur Artikelposition v_1 und kehrt daraufhin zu e'_1 zurück. Von dort aus geht er nach e'_2 , und wegen $\pi_2^1 = 1$ (vgl. Abbildung 4.13 b) direkt weiter zu e'_3 , von wo aus er die Regalgasse komplett hindurch nach e_3 geht. Entsprechend der restlichen Werte des Entscheidungsvektors geht er bei e_4 zunächst durch die Regalgasse und bei e_5 und e_6 als erstes über den Quergang. Ab diesem Punkt ist die gesamte Gangfolge eindeutig bestimmt.

Abbildung 4.15 (a) zeigt die zeitliche Verteilung der benötigten Gangbeleuchtung für beide Kommissionierer. Die Zeit verläuft in der Darstellung horizontal nach rechts. Die Blöcke geben an, in welcher Regalgasse sich der jeweilige Kommissionierer zu einem gegebenen Zeitpunkt aufhält. Wie aus der Grafik ersichtlich ist, gibt es nur in der Zeitspanne von 54 bis 56 einen Synergieeffekt, weil sich hier beide Kommissionierer zur gleichen Zeit in Regalgasse 2 befinden. Dieser Synergieeffekt kann von der Gesamtsumme der Beleuchtungsdauer von Kommissionierer 1 (38 Zeiteinheiten) und Kommissionierer 2 (40 Zeiteinheiten) abgezogen werden. Es ergeben sich damit Gesamtkosten für die Beleuchtung von 76 Zeiteinheiten.

Nun werden für die beiden Kommissionierer die Entscheidungsvektoren $\pi^1 = (1, 0, 1, 0, 0)$ und $\pi^2 = (1, 1, 0)$ angenommen. Das Resultat ist in Abbildung 4.15 (b) dargestellt. In diesem Fall ergibt

sich ein Synergieeffekt von 28 Zeiteinheiten, sodass sich im Vergleich zu vorher eine Reduktion der Gesamtkosten um 34,21% auf 50 Zeiteinheiten ergibt.

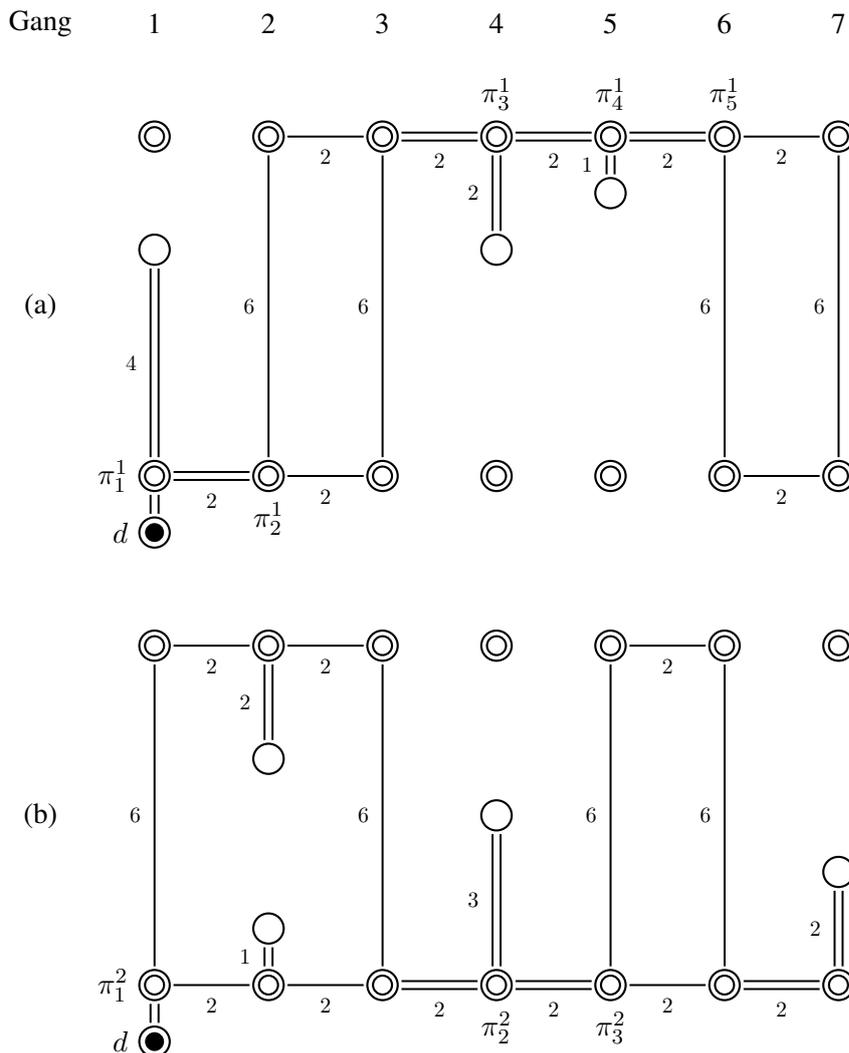


Abbildung 4.14: Die Freiheitsgrade der beiden Beispiel-TS.

4.3.3 Komplexität

Theorem 2. *Das PSP ist NP-schwer im starken Sinne. Dies gilt auch dann, wenn alle Regalgassen und Quergänge gleiche Länge haben.*

Der Beweis wird über eine Polynomialzeitreduktion des Knotenüberdeckungsproblems (engl. Vertex Covering Problem) auf das PSP geführt. Das Knotenüberdeckungsproblem ist ein klassisches NP-schweres graphentheoretisches Problem.

Beweis. Gegeben sei eine Instanz I des Knotenüberdeckungsproblems auf einem Graphen $G(V, E)$ mit Knotenmenge $V = 1, \dots, n$ und Kantenmenge $E \subseteq \{\{i, j\} \mid i, j \in V\}$. Die Konstruktion einer Instanz I' des PSP in Polynomialzeit geschieht wie folgt: setze $|K| = |E|$ mit einer bijektiven Funktion $\epsilon : K \rightarrow E$ welche eine eindeutige Zuordnung von Kommissionierern zu Kanten aus G festlegt. Um die Notation zu vereinfachen, sei Kommissionierer k mit der Kante $\epsilon(k) = \{i_k, j_k\}$ assoziiert. Das Lager habe

$$r = 1 + \sum_{k \in K} 2 + i_k + j_k \quad (4.1)$$

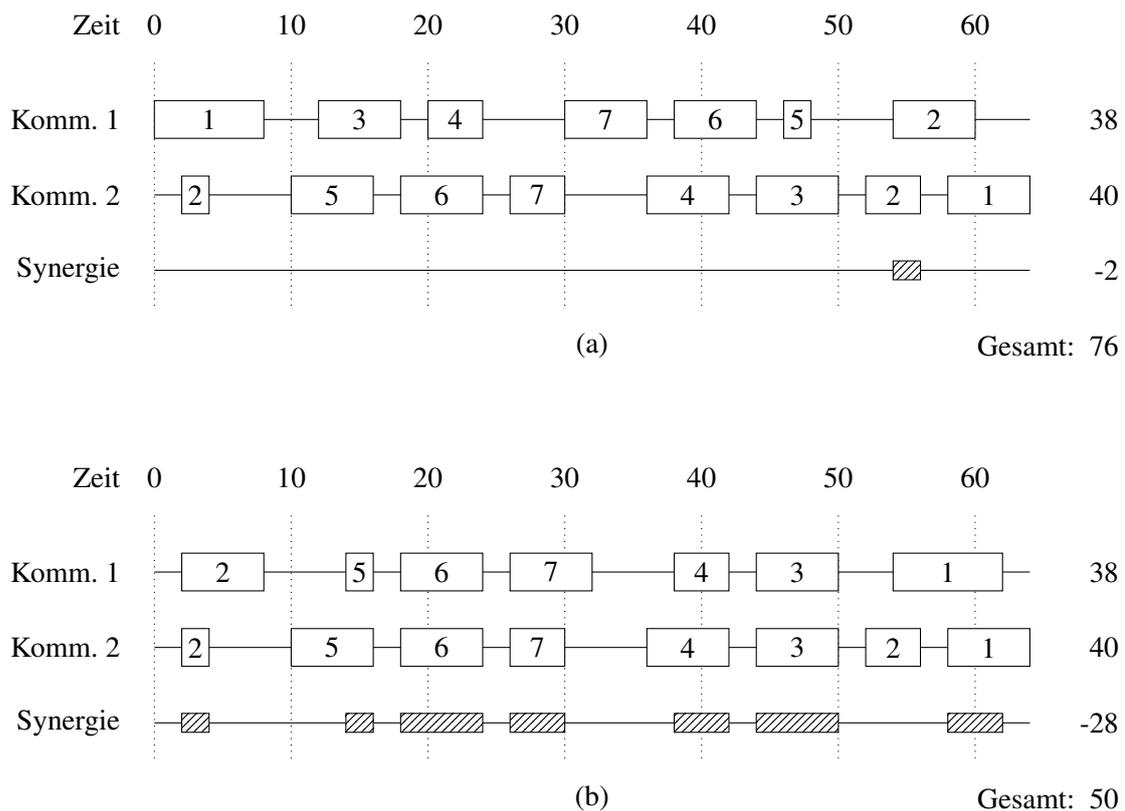


Abbildung 4.15: Verteilung der Beleuchtungszeiten für das Beispiel in Abschnitt 4.3.2. Die Entscheidungsvektoren der beiden Kommissionierer in (1) sind $\pi^1 = (0, 1, 0, 1, 1)$, $\pi^2 = (1, 1, 0)$ und in (2) $\pi^1 = (1, 0, 1, 0, 0)$, $\pi^2 = (1, 1, 0)$.

Regalgassen mit Länge 1. Die Länge des oberen und unteren Quergangs betrage λ . Der Depotknoten befinde sich unterhalb der ersten Regalgasse (wie oben). Für jeden Kommissionierer k wird nun ein TS konstruiert, in welchem der Kommissionierer die letzte Regalgasse vollständig traversiert. Zusätzlich gibt es genau $2 + i_k + j_k$ Regalgassen, welche ausschließlich von Kommissionierer k betreten werden. Der erste dieser dedizierten Regalgassen wird vollständig traversiert. $1 + i_k$ Regalgassen werden unten bis zur Mitte und zurück und j_k Regalgassen von Oben bis zur Mitte und zurück traversiert.

Damit hat jeder Kommissionierer am Depot genau einen Freiheitsgrad, welcher in der Entscheidung liegt, ob er seine Tour im Uhrzeigersinn oder gegen den Uhrzeigersinn läuft. In letzterem Fall befindet er sich im Zeitraum von $1 + \lambda + i_k$ bis $2 + \lambda + i_k$ innerhalb der letzten Regalgasse. Läuft er im Uhrzeigersinn, befindet er sich in der Zeit $1 + \lambda + j_k$ bis $2 + \lambda + j_k$ in der letzten Regalgasse.

Es existiert eine Lösung von I' mit Zielfunktionswert $n + \sum_{k \in K} 2 + i_k + j_k$ genau dann, wenn eine Lösung von I mit n Knoten existiert. Wird das zum Knotenüberdeckungsproblem gehörige Optimierungsproblem betrachtet, welches nach einer minimalen Anzahl an überdeckenden Knoten fragt, so kann diese direkt am Zielfunktionswert einer optimalen Lösung von I' abgelesen werden. Die in der Überdeckung enthaltenen Knoten ergeben sich ebenfalls direkt aus den Entscheidungen an den Freiheitsgraden in I' . \square

Ein Beispiel für die Überführung einer Instanz des Knotenüberdeckungsproblems in eine Instanz des PSP ist in Abbildung 4.3.3 dargestellt.

4.3.4 Mathematische Modellierung

In diesem Abschnitt wird das PSP als einfach strukturiertes gemischt-ganzzahliges lineares Programm (MIP) formuliert. Bei der Formulierung wird auf eine Abbildung der einzelnen Freiheitsgrade durch

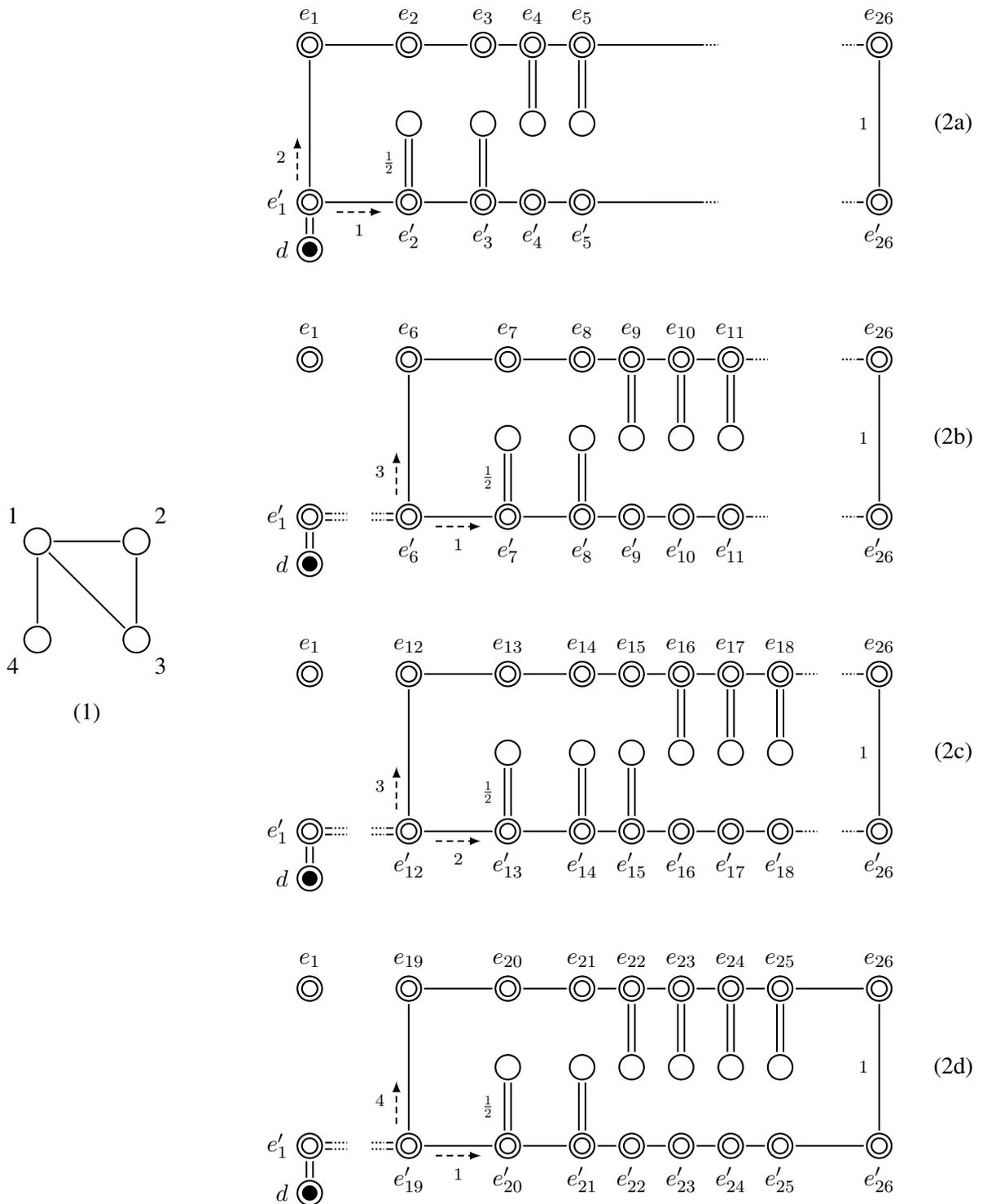


Abbildung 4.16: Beispiel für die Überführung einer Instanz des Knotenüberdeckungsproblems (1) in eine Instanz des PSP. Die gezeigten TS entsprechen den Kanten $\{1, 2\}$ (2a), $\{1, 3\}$ (2b), $\{2, 3\}$ (2c) und $\{1, 4\}$ (2d). Gänge, welche der mit der jeweiligen Kante assoziierte Kommissionierer nicht betritt, sind nicht dargestellt.

dedizierte Entscheidungsvariablen verzichtet, da sich dieser Ansatz aufgrund der komplizierten Zielfunktion nur schwer in einem MIP formulieren lässt. Des Weiteren werden bei der Formulierung nur diskrete Zeitpunkte $t = 1, \dots, T$ betrachtet.

Die Menge Π_o^k bezeichne die möglichen Entscheidungsvektoren für alle Freiheitsgrade, die einen Auftrag $o \in O^k$ des Kommissionierers k betreffen. Die Zeitpunkte, zu denen die Regalgasse a bei der Wahl des Entscheidungsvektors $\pi \in \Pi_o^k$ beleuchtet werden muss, seien als $L_a(\pi)$ bezeichnet. Die binäre Entscheidungsvariable x_{at} gibt an, ob Regalgasse a zum Zeitpunkt t beleuchtet wird, während die Binärvariable $\sigma_\pi, \pi \in \Pi_o^k$ anzeigt, ob für den Auftrag o von Kommissionierer k der Entscheidungsvektor π gewählt wurde. Auf Grundlage dieser Definitionen wird nun folgendes MIP formuliert:

$$\min f = \sum_{a=1}^r \sum_{t=1}^T x_{at} \quad (4.2)$$

unter den Nebenbedingungen

$$x_{at} \geq \sigma_\pi \quad \forall t \in L_a(\pi), \pi \in \Pi_o^k, o \in O^k, k \in K, a = 1, \dots, r \quad (4.3)$$

$$\sum_{\pi \in \Pi_o^k} \sigma_\pi = 1 \quad \forall o \in O^k, k \in K \quad (4.4)$$

$$x_{at} \in \{0, 1\} \quad \forall t = 1, \dots, T, a = 1, \dots, r \quad (4.5)$$

$$\sigma_\pi \in \{0, 1\} \quad \forall \pi \in \Pi_o^k, o \in O^k, k \in K \quad (4.6)$$

Die Zielfunktion (4.2) drückt die Minimierung der gesamten Beleuchtungsdauer aus. Nebenbedingungen (4.3) koppeln die Beleuchtungszeitpunkte an die Wahl der Entscheidungsvektoren. Durch Nebenbedingungen (4.4) wird sichergestellt, dass für jeden Auftrag eines Kommissionierers genau ein Entscheidungsvektor gewählt wird. Obige Formulierung ist nicht kompakt, da die Menge Π exponentiell mit der Anzahl der Freiheitsgrade wächst. Dennoch können, wie in Abschnitt 4.3.6 demonstriert wird, mit der gewählten Formulierung Instanzen des PSP von durchaus realistischer Größe gelöst werden.

4.3.5 Metaheuristisches Lösungsverfahren

Um größere Instanzen des PSP effizient lösen zu können, wird auf einen metaheuristischen Ansatz zurückgegriffen, welcher in diesem Abschnitt vorgestellt wird. Dabei handelt es sich um ein Verfahren, welches dem Schema der iterierten lokalen Suche folgt. Die Grundidee lässt sich wie folgt beschreiben: auf einer gegebenen Initiallösung erfolgt zunächst ein lokaler Abstieg in einer gegebenen Nachbarschaft. Die aus dem Abstieg gewonnene Lösung wird daraufhin in einem Verwirbelungsschritt durch einen Zufallsprozess geringfügig randomisiert. Daraufhin erfolgt ein weiterer lokaler Abstieg. Ergibt sich durch diesen ein besserer Zielfunktionswert als im vorherigen Abstieg, wird die Verwirbelung mit gleicher Intensität auf der verbesserten Lösung wiederholt, und die resultierende Lösung wird als neue Ausgangslösung für den lokalen Abstieg verwendet. Ergibt sich nach dem lokalen Abstieg jedoch keine Verbesserung, so wird die Intensität der Verwirbelung fortlaufend erhöht. Ist eine Maximalzahl an Durchläufen ohne Verbesserung des besten gefundenen Zielfunktionswertes erfolgt, terminiert der Algorithmus. Die grundlegende Struktur des Algorithmus ist als Pseudocode in Algorithmus 1 angegeben.

Die Initiallösung verwendet einen zufällig gewählten Entscheidungsvektor für jeden Kommissionierer. Im Verwirbelungsschritt werden in Iteration κ genau $\frac{\kappa}{\kappa_{\max}} \sum_{k \in K} |\Pi^k|$ zufällig gewählte Entscheidungsvariablen invertiert.

Die Nachbarschaft, welche im lokalen Abstieg verwendet wird, besteht aus allen Lösungen, welche sich von der Ausgangslösung lediglich in einer einzigen Entscheidung unterscheiden. Gegeben eine Ausgangslösung S lässt sich somit jede Lösung der Nachbarschaft S' eindeutig durch eine Entscheidung π_i^k identifizieren, welche in S' invertiert ist. Die Entscheidung π_i^k , deren Invertierung S in S' überführt, wird dabei als generierende Entscheidung bezeichnet. Die Reihenfolge L , in welcher die generierenden

Entscheidungen durchsucht werden, wird zu Beginn einmalig festgelegt. Die Versuche bei der Entwicklung des Verfahrens haben gezeigt, dass die Reihenfolge selbst keinen signifikanten Einfluss auf die Geschwindigkeit des Verfahrens hat, wichtig ist nur, dass eine solche Reihenfolge existiert. In unserer Implementierung werden die Entscheidungen nach Kommissionierer und Auftrag in zeitlicher Reihenfolge sortiert, wobei die Sortierung der Entscheidungen innerhalb eines Auftrags ihrer zeitlichen Abfolge im TS bei einem zufällig gewählten Entscheidungsvektor folgt. Sobald eine verbessernde Lösung gefunden wird, stellt diese die neue Ausgangslösung dar. Danach wird mit der Evaluation der Nachbarlösung fortgefahren, welche durch die nächste Entscheidung in L generiert wird.

Algorithm 1 Pseudocode für das metaheuristische Lösungsverfahren.

```

 $S \leftarrow \text{InitialLösung}()$ 
 $\kappa \leftarrow 1$ 
while  $\kappa \leq \kappa_{\max}$  do
   $S' \leftarrow \text{Verwirbelung}(S, \kappa)$ 
   $S' \leftarrow \text{LokalerAbstieg}(S')$ 
  if  $f(S') < f(S)$  then
     $S \leftarrow S'$ 
  end if
   $\kappa \leftarrow \kappa + 1$ 
end while
return  $S$ 

```

4.3.6 Numerische Studien

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der numerischen Studien vorgestellt. Das in den Studien betrachtete Lager besitzt 10 Regalgassen mit jeweils 45 möglichen Artikelpositionen, welche mit einheitlichem Abstand entlang der Regalgasse verteilt sind. Jeder Auftrag besitzt eine für den jeweiligen Auftrag zufällig gewählte Gesamtzahl an Artikelpositionen zwischen 2 und 25. Für die Anzahl an Kommissionierern und der Anzahl an Aufträgen je Kommissionierer wurde eine Vorauswahl von 34 Kombinationen getroffen. Für jede Kombination wird eine Instanz mit gleichmäßiger Artikelverteilung (Uniformly Distributed Demands, kurz UDD) erstellt, in welcher jede Position im Lager die gleiche Wahrscheinlichkeit besitzt, in einem Auftrag enthalten zu sein, sowie eine Instanz mit klassenbasierter Artikelverteilung (Class Based Demands, kurz CBD). In letzterem Fall befinden sich 52% der Auftragspositionen in der ersten Regalgasse, 36% in Regalgasse 2–4 und 12% in den restlichen Regalgassen. Damit ergibt sich eine Gesamtzahl von 68 Instanzen, welche für die numerischen Studien verwendet wurden. Die Zeitdiskretisierung im mathematischen Modell stellt keine Einschränkung der Genauigkeit dar, da alle Abstände im Lager ganzzahlig und die Zeitauflösung T hoch genug für eine genaue Abbildung gewählt wurde.

Zur Lösung des mathematischen Modells wird der kommerzielle MIP-Solver Gurobi verwendet. Die Berechnungen wurden auf einem Rechencluster mit Intel Xeon E5-2430v2 2.50GHz CPUs und 64Gb RAM ausgeführt. Jedem Prozess stand eine gesamte CPU zur Verfügung (6 Kerne), sodass der Solver den Lösungsvorgang parallelisieren konnte. Der Solver wurde dabei mit Standardeinstellungen und einem Zeitlimit von einer Stunde konfiguriert. Dieses Zeitlimit wird aufgrund der operativen Natur der gegebenen Problemstellung, welche kurzfristige Planungsentscheidungen fordert, als sinnvoll angenommen. Für das heuristische Verfahren stand ebenfalls eine CPU je Instanz zur Verfügung, jedoch wurde hier ausschließlich ein Rechenkern verwendet.

Die Ergebnisse sind in Tabellen 4.5 und 4.6 dargestellt. Die ersten beiden Spalten geben die Anzahl der Kommissionierer ($|K|$) und Aufträgen je Kommissionierer ($|O^k|$) in der jeweiligen Instanz an. Als Referenz dienen die durchschnittlichen Zielfunktionswerte von 5 Lösungen mit rein zufällig gewählten Entscheidungsvektoren, welche in Spalte f_0 angegeben sind. Die Spalte Δ_s gibt die erreichten Kosteneinsparungen gegenüber dem Referenzwert auf den mit dem Solver gefundenen Lösungen in Prozent an. Unterstrichene Zielfunktionswerte sind bewiesenermaßen optimal. In Spalte t_s steht die vom Solver benötigte Rechenzeit in Sekunden. Ein Wert von 3600 Sekunden zeigt an, dass der Lösungsprozess

aufgrund des Zeitlimits beendet wurde, bevor eine bewiesene optimale Lösung gefunden wurde.

Da es sich bei der verwendeten Heuristik um ein nichtdeterministisches Verfahren handelt, werden auf jeder Instanz fünf komplette Durchläufe der Heuristik ausgeführt. Dies erlaubt eine Untersuchung der Stabilität des Verfahrens, ein Maß für die Streuung der Zielfunktionswerte zwischen mehreren Durchläufen. Die Kosteneinsparungen der besten in den fünf Durchläufen gefundenen Lösung stehen in Spalte Δ_b . Spalte Δ_a zeigt jeweils die durchschnittlichen Kosteneinsparungen auf allen fünf Lösungen. In Spalte t_a ist die durchschnittliche Rechenzeit der Heuristik in Sekunden angegeben.

Ergebnisse des Solvers

Die Leistungsfähigkeit des Solvers hängt stark von sowohl der Anzahl an Kommissionierern als auch der Anzahl an Aufträgen ab. So besitzen die größten im Fall UDD optimal gelösten Instanzen 10 Kommissionierer mit jeweils 10 Aufträgen, und 20 Kommissionierer mit jeweils 2 Aufträgen. Es wird deutlich, dass die Berechnungsdauer bei 20 Kommissionierern wesentlich stärker mit der Auftragsanzahl steigt als bei 10 Kommissionierern. Bei 20 Kommissionierern mit 5 Aufträgen wird bereits das Zeitlimit erreicht. Den Ergebnissen zufolge ist der Solver am ehesten für Instanzen mit bis zu 10 Kommissionierern und 5 Aufträgen geeignet, da die benötigte Berechnungsdauer andernfalls zu lang wird, um auf kurzfristige Änderungen von äußeren Einflüssen reagieren zu können.

Im Fall CBD ergibt sich jedoch ein anderes Bild. Hier konnten alle Instanzen bis 20 Kommissionierer und 5 Aufträge optimal gelöst werden. Bei 10 Kommissionierern lassen sich sogar Instanzen mit bis zu 100 Aufträgen je Kommissionierer lösen. Bei dieser Instanzgröße erscheint auch die benötigte Berechnungsdauer von ca. einer Stunde vertretbar, da die Betrachtung von 100 Aufträgen einen erheblich längeren Planungszeitraum überdeckt.

Ergebnisse des heuristischen Verfahrens

Auf den Instanzen, welche optimal durch den Solver gelöst werden konnten, weisen die mit der Heuristik gefundenen Lösungen einen Abstand von ca. 1–2% auf. Da die Kosteneinsparungen auf den meisten Instanzen deutlich mehr als 10% betragen, lässt sich daraus schließen, dass der Großteil des Optimierungspotentials von der Heuristik ausgeschöpft wurde. Der Abstand zwischen Δ_a und Δ_b beträgt durchschnittlich ca. 0.3%, was von einer hohen Stabilität des heuristischen Verfahrens zeugt. Die höchste Rechendauer der Heuristik wurde bei 40 Kommissionierern mit je 100 Aufträgen mit UDD erreicht. Sie beträgt knapp unter 20 Minuten, was bei 100 Aufträgen als absolut vertretbar betrachtet werden kann. Bei kleineren Instanzen liegt die Rechendauer der Heuristik im Bereich weniger Minuten, was einen Einsatz des Verfahrens in Echtzeit erlaubt.

Vergleicht man die Lösungsqualität der Heuristik mit der des Solvers im UDD-Fall, so stellt man fest, dass schon ab $|K| = 10, |O^k| = 60$ bzw. $|K| = 20, |O^k| = 20$ die von der Heuristik erreichte Lösungsqualität die des Solvers erheblich übersteigt. Hinzu kommt noch die Tatsache, dass die Heuristik nur einen Bruchteil der Berechnungsdauer des Solvers benötigt. Im CBD-Fall ist dieser Effekt weniger stark ausgeprägt. Hier ergibt sich ein Vorteil für die Heuristik erst ab $|K| = 30, |O^k| = 40$, welcher allerdings von einem noch stärkeren Vorteil bei der Berechnungsdauer begleitet wird. Insgesamt fällt der Unterschied in der Lösungsqualität im CBD-Fall bei größeren Instanzen erheblich kleiner aus als im UDD-Fall.

Einsparungen bei Beleuchtungskosten

Die Höhe der Kosteneinsparungen beträgt zwischen knapp 6% auf den kleinsten Instanzen und 20% auf den mittleren Instanzen. Auf der überwiegenden Mehrheit der Instanzen im UDD-Fall liegen die Einsparungen jedoch über 15%, bei CBD knapp darunter. Die Kosteneinsparungen im UDD-Fall liegen im Allgemeinen etwa 1–3% über denen des CBD-Falls, ausgenommen bei der kleinsten Instanzgruppe mit $|K| = 2$. Es lässt sich außerdem feststellen, dass der Einfluss der Anzahl an Kommissionierern auf die Einsparungen erheblich größer ist als die Anzahl an Aufträgen pro Kommissionierer. Dies bedeutet auch, dass die Länge des Planungszeitraumes nur geringen Einfluss auf die Kosteneinsparungen hat. Zudem

besitzt der Verlauf der Kosteneinsparungen in Abhängigkeit von der Anzahl an Kommissionierern keinen einheitlichen Trend. Für beide Arten von Artikelverteilungen ergeben sich die höchsten Kosteneinsparungen bei einer Anzahl von 20 Kommissionierern. Dies kann damit erklärt werden, dass die Größe des Lagers in allen Experimenten konstant gehalten wurde. So ergeben sich bei wenigen Kommissionierern zu wenige Freiheitsgrade in den TS, um eine gute Überlappung der Gangfolgen in den Regalgassen zu erreichen. Bei mehr Kommissionierern hingegen lässt es sich nicht mehr vermeiden, die Regalgassen häufig beleuchten zu müssen.

4.3.7 Fazit

In diesem Abschnitt wurde gezeigt, wie sich Gangfolgen der Kommissionierer synchronisieren lassen, um Beleuchtungskosten zu reduzieren, ohne die gelaufene Gesamtstrecke zu verändern. Dazu wurden Experimente anhand eines einfachen mathematischen Modells sowie einem heuristischen Verfahren durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass in den meisten Fällen eine Einsparung bei den Beleuchtungskosten von deutlich über 15% möglich ist. Bei kleineren Probleminstanzen ist eine optimale Lösung durch einen kommerziellen MIP-Solver in kurzer Zeit möglich. Mit dem heuristischen Verfahren können auch größere Probleminstanzen in kurzer Zeit optimiert werden, wobei die Kosteneinsparungen auf vergleichbar hohem Niveau bleiben. Eine wichtige Feststellung ist, dass die Länge des betrachteten Planungszeitraums nur einen geringen Einfluss auf die erreichte Kostenreduktion hat. Damit lässt sich der Großteil des Optimierungspotentials auch bei kurzfristigen Änderungen der Planungsparameter nutzen, welche z. B. durch Änderungen der Auftragsreihenfolge der Kommissionierer ausgelöst werden können.

Instanz		f_0	Solver		Heuristik		
$ K $	$ O^k $		Δ_s	t_s	Δ_b	Δ_a	t_a
2	2	569,2	-6,19	0,24	-6,19	-6,19	0,00
2	5	1630,4	-5,59	7,86	-5,51	-5,21	0,01
2	10	3412,4	-5,80	18,10	-5,76	-5,61	0,05
2	20	6369,2	-5,77	42,31	-5,42	-5,12	0,12
∅			-5,83	17,13	-5,72	-5,53	0,05
5	2	1212,0	-17,53	5,95	-17,53	-17,37	0,02
5	5	3444,8	-14,65	15,99	-14,53	-14,46	0,07
5	10	7304,4	-14,72	96,70	-13,70	-13,70	0,17
5	20	14886,8	-15,81	327,00	-14,43	-14,43	0,45
∅			-15,67	111,41	-15,05	-14,99	0,18
10	2	1957,2	-15,48	10,28	-15,48	-15,25	0,06
10	5	5449,6	-15,76	92,79	-15,66	-15,50	0,19
10	10	11465,6	-16,69	3176,11	-16,02	-15,54	0,60
10	20	23704,8	-17,12	3600,00	-15,83	-15,33	2,75
10	40	48965,2	-17,91	3600,00	-16,72	-16,34	9,91
10	60	71607,6	-8,01	3600,00	-16,96	-16,70	21,98
10	80	98297,6	-7,53	3600,00	-16,51	-16,29	44,11
10	100	118400,0	-8,32	3600,00	-16,39	-16,34	70,54
∅			-13,35	2659,90	-16,20	-15,91	29,86
20	2	3141,2	-21,02	36,68	-21,02	-20,70	0,28
20	5	8152,4	-17,77	3600,00	-17,17	-16,83	0,68
20	10	16867,6	-19,49	3600,00	-18,59	-18,34	2,43
20	20	34159,6	-8,77	3600,00	-17,86	-17,57	12,48
20	40	68504,4	-7,59	3600,00	-18,45	-18,29	44,98
20	60	101568,0	-8,91	3600,00	-18,67	-18,45	88,88
20	80	137001,0	-9,22	3600,00	-18,22	-17,91	181,32
20	100	170182,0	-8,80	3600,00	-18,33	-18,12	284,17
∅			-12,70	3154,59	-18,54	-18,28	122,37
30	20	38745,2	-8,37	3600,00	-16,79	-16,49	31,39
30	40	77449,6	-8,37	3600,00	-17,41	-17,10	111,04
30	60	115054,0	-8,51	3600,00	-17,20	-17,13	229,93
30	80	155014,0	-9,05	3600,00	-17,20	-16,97	409,80
30	100	193531,0	-8,94	3600,00	-17,72	-17,37	624,25
∅			-8,65	3600,00	-17,26	-17,01	281,28
40	20	40986,0	-7,29	3600,00	-15,07	-14,88	58,90
40	40	82404,0	-7,82	3600,00	-15,26	-14,92	169,12
40	60	122055,0	-8,00	3600,00	-16,02	-15,66	379,37
40	80	164344,0	-7,73	3600,00	-15,11	-14,98	624,54
40	100	204138,0	-8,36	3600,00	-15,75	-15,64	1155,61
∅			-7,84	3600,00	-15,44	-15,22	477,51

Tabelle 4.5: Numerische Ergebnisse auf den UDD-Instanzen. Durchschnittswerte beziehen sich jeweils auf eine Instanzgruppe mit gleicher Anzahl an Kommissionierern.

Instanz		f_0	Solver		Heuristik		
$ K $	$ O^k $		Δ_s	t_s	Δ_b	Δ_a	t_a
2	2	982,8	-6,54	0,04	-6,54	-5,76	0,00
2	5	2563,2	-8,00	0,77	-6,65	-6,65	0,01
2	10	5159,2	-9,10	1,15	-8,63	-7,55	0,03
2	20	9746,0	-7,56	1,29	-6,42	-6,42	0,06
∅			-7,80	0,81	-7,06	-6,60	0,03
5	2	1823,6	-10,56	0,56	-10,56	-9,67	0,01
5	5	5312,0	-13,84	1,99	-13,14	-12,75	0,04
5	10	10989,2	-12,05	7,68	-10,99	-10,79	0,12
5	20	22069,6	-11,55	15,09	-10,40	-10,37	0,24
∅			-12,00	6,33	-11,27	-10,90	0,10
10	2	3225,2	-17,84	4,31	-17,84	-16,76	0,04
10	5	8814,8	-16,43	9,22	-16,07	-15,28	0,14
10	10	17965,6	-16,83	60,95	-15,87	-15,62	0,31
10	20	36185,6	-16,62	169,43	-14,68	-14,41	1,16
10	40	71876,4	-16,13	911,38	-14,80	-14,18	3,56
10	60	107538,0	-16,96	2422,08	-15,21	-14,99	7,12
10	80	145082,0	-16,69	3539,19	-15,13	-14,81	14,12
10	100	176796,0	-17,29	3309,39	-15,89	-15,39	20,18
∅			-16,85	1303,24	-15,69	-15,18	9,23
20	2	4958,0	-20,09	12,41	-19,46	-18,32	0,14
20	5	12980,8	-18,21	262,03	-17,52	-17,03	0,43
20	10	26244,8	-17,36	3600,00	-16,34	-16,15	1,07
20	20	52476,4	-18,28	3600,00	-16,87	-16,58	5,49
20	40	106912,0	-17,35	3600,00	-16,06	-15,85	16,28
20	60	157841,0	-17,00	3600,00	-16,10	-15,72	34,34
20	80	212258,0	-16,40	3600,00	-15,55	-15,10	52,18
20	100	262187,0	-15,84	3600,00	-15,48	-15,35	87,47
∅			-17,57	2734,31	-16,67	-16,26	39,15
30	20	60655,2	-16,92	3600,00	-16,02	-15,75	14,05
30	40	122419,0	-14,55	3600,00	-15,06	-14,64	39,90
30	60	182692,0	-14,19	3600,00	-15,07	-14,81	72,33
30	80	245279,0	-13,13	3600,00	-14,42	-14,21	120,90
30	100	304976,0	-12,75	3600,00	-14,69	-14,59	210,11
∅			-14,31	3600,00	-15,05	-14,80	91,46
40	20	65275,2	-13,26	3600,00	-13,44	-13,23	21,46
40	40	130484,0	-11,88	3600,00	-13,21	-12,95	66,45
40	60	195710,0	-12,50	3600,00	-13,55	-13,39	142,44
40	80	260888,0	-11,90	3600,00	-13,24	-13,05	236,78
40	100	323469,0	-11,40	3600,00	-13,24	-13,15	390,20
∅			-12,19	3600,00	-13,34	-13,15	171,47

Tabelle 4.6: Numerische Ergebnisse auf den CBD-Instanzen. Durchschnittswerte beziehen sich jeweils auf eine Instanzgruppe mit gleicher Anzahl an Kommissionierern.

4.4 Validierung und Ableitung von Anforderungen an den Einsatz intelligenter Beleuchtungssysteme und Quantifizierung ihres Nutzens

Nach Abschluss der Entwicklung von Simulationsstudie und Planungsmodell wurden diese mit dem Projektbegleitenden Ausschuss validiert und in Bezug auf die praktische Anwendbarkeit überprüft. Auf diese Art und Weise konnten logische Fehler in den Simulationsergebnissen aufgedeckt, die grundsätzliche Stimmigkeit und Anwendbarkeit der Ergebnisse bewertet und – wo nötig – Änderungen am mathematischen Modell und der Simulationsstudie vorgenommen werden. Zu diesem Zweck wurden die erhobenen Daten verwendet, um die vorgestellten numerischen Studien in Kapitel 4.2 und Kapitel 4.3 durchzuführen. Damit konnten Aussagen über den Nutzen bzw. mögliche Einsparungen durch intelligente Beleuchtungssysteme im Kommissionierprozess abgeleitet werden. In der Simulationsstudie konnten, wie oben bereits beschrieben, u.a. unterschiedliche Lagerplatzvergabestrategien und Kommissionierarten untersucht werden, um Aussagen darüber abzuleiten, welche Lagerplatzvergabestrategien gut mit intelligenten Beleuchtungssystemen zusammenwirken und wie stark die Nutzung intelligenter Beleuchtungssysteme durch den Einsatz maßgeschneiderter Verfahren für die Gangfolgebestimmung verbessert werden kann. Daneben wurde eine konventionelle Beleuchtung betrachtet, deren Kosten und Energieverbräuche als Referenzwerte dienen.

Mithilfe der entwickelten Modelle und Verfahren allgemeine Aussagen zu Amortisationszeiten abzuleiten, ist auch bei Vorliegen realistischer Planungsdaten nicht einfach. Es ist jeweils im Einzelfall zu prüfen, welche Anforderungen erfüllt werden müssen und welche Systeme für die jeweilige Anwendung notwendig und angemessen sind (vgl. Kapitel 4.2.4). Dies wurde auch von den Praxispartnern aus dem Projektbegleitenden Ausschuss bestätigt. Die entwickelten Modelle und Lösungsverfahren können im Einzelfall aber angepasst und weiterentwickelt werden, um spezifische Lösungen zu finden.

Der Nutzen der vorgestellten intelligenten Beleuchtungssysteme wurde im Rahmen der Simulationsstudie sowie mit dem mathematischen Planungsmodell belegt. Auch die Fallstudie in Kapitel 4.1 bestätigt dies eindrucksvoll.

4.5 Erstellung eines Demo-Tools

Zur Demonstration der Vorteile intelligenter Beleuchtungssysteme wurde im Rahmen des Forschungsprojekts eine browserbasierte Online-Anwendung (Demo-Tool) entwickelt, welche als Ausgangspunkt für eine Abschätzung der Betriebskosten eines intelligenten Beleuchtungssystems dienen soll. Der Schwerpunkt der Anwendung liegt auf dem Zusammenspiel von dynamischer Beleuchtung und der Gangfolgebestimmung bei der Kommissionierung.

Das Demo-Tool erlaubt die Erstellung verschiedener Lagerprofile, wobei jedes Profil Parameter der Lagergeometrie und des Kommissionierungs- und Beleuchtungssystems beinhaltet. Alle Parameter eines Lagerprofils können vom Benutzer frei gewählt werden. Hat der Benutzer alle Parameter eines Lagerprofils eingegeben, kann dieser eine Kostenberechnung starten, welche serverseitig ausgeführt wird. Zur Bestimmung der Kosten wird eine große Anzahl zufällig generierter Instanzen mit den vorgegebenen Parametern erstellt, auf welchen anhand der gewählten Methode die Gangfolgen für einen oder mehrere Kommissionierer bestimmt werden. Auf diese Weise wird der Durchsatz in Artikeln pro Stunde sowie die Beleuchtungskosten pro Stunde berechnet.

Abbildung 4.17 zeigt einen Screenshot des Demo-Tools. Die Schaltfläche „Bedienungsanleitung“ in der oberen Navigationsleiste blendet eine Bedienungsanleitung ein, welche bei erstmaligem Besuch der Seite automatisch angezeigt wird. Über die Schaltflächen „Sitzung Speichern“ und „Sitzung Laden“ kann der Benutzer die gesamte Sitzung auf seinem lokalen Rechner speichern, bzw. eine lokal gespeicherte Sitzung in das Demo-Tool laden.

Im Abschnitt „Vergleichsübersicht“ wird die Performance der einzelnen Profile mittels Balkendiagrammen gegenübergestellt. Standardmäßig werden für jedes Profil drei Performance-Attribute dargestellt:

1. die im Mittel durch das Beleuchtungssystem verursachten Energiekosten pro Stunde,
2. die Anzahl von kommissionierten Artikeln pro Stunde,
3. die durchschnittlichen Energiekosten der Beleuchtung pro kommissioniertem Artikel (Quotient aus 1 und 2).

Durch einen Mausklick auf die Beschriftungen in der Legende des Übersichtsdiagramms können einzelne Attribute aus- und eingeblendet werden. Die Schaltfläche „Exportieren“ erzeugt eine Export-Datei im ausgewählten Format (PDF, LaTeX oder CSV).

Im Abschnitt „Profileigenschaften“ kann der Benutzer die Lagerprofile verwalten und ihre Parameter eingeben. Beim erstmaligen Öffnen der Seite wird ein Profil namens „Unbenannt“ mit voreingestellten Parametern angelegt. Das momentan aktive Profil wird über die Dropdown-Box „Profilauswahl“ selektiert. Über die Schaltfläche „Umbenennen“ kann der Name des ausgewählten Profils geändert werden. Durch einen Klick auf die Schaltfläche „Neues Profil“ wird ein weiteres Profil angelegt. Dazu wird der Benutzer zunächst nach einem Namen für das neu zu erstellende Profil gefragt. Ein Klick auf „Entfernen“ löscht nach einer weiteren Bestätigung das momentan ausgewählte Profil. Über die beiden Schaltflächen „←“ und „→“ kann die Position des Profils in der Profilliste sowie der Vergleichsübersicht verschoben werden.

Das Layout des Lagers entspricht dem aus Abschnitt 3.2.2, d.h. alle Regalgassen besitzen gleiche Länge und alle Regalgassen sind über zwei Quergänge miteinander verbunden.

4.5.1 Profilparameter

Im Folgenden werden die einzelnen Profilparameter erläutert:

Anzahl Regalgassen: Anzahl der Regalgassen im Lager, in welchen die Artikel gelagert werden.

Anzahl Fächer pro Gasse: Gegenüberliegende Fächer in einer Gasse werden lediglich einfach gezählt.

Auftragsgröße: Die Anzahl von Artikeln pro Kommissionierliste. Größere Kommissionierlisten erlauben einen höheren Artikeldurchsatz, da der Kommissionierer seltener zur Abgabestelle (Depot) zurückkehren muss.

Depotgang: Nummer der Regalgasse, an deren unteren Ende sich die Abgabestelle befindet.

Artikelverteilung: Mit diesem Parameter wird die Verteilung der Kommissionierpositionen auf die Regalgassen festgelegt. Die Artikeldichte ist im Diagramm unterhalb des Eingabefeldes grafisch dargestellt. Die Höhe der Balken gibt die relative Häufigkeit an, mit der eine Position auf der Kommissionierliste im jeweiligen Gang liegt. Es steht eine Vorauswahl von Verteilungen zur Verfügung, für die ein Formparameter eingestellt werden kann. Ein Formparameter von 0 führt immer zu einer Gleichverteilung.

Anzahl Kommissionierer: Legt die Zahl der Kommissionierer fest, welche gleichzeitig im Lager Artikel kommissionieren. Ein größerer Wert führt damit zu einem höheren Artikeldurchsatz. Bei dynamischer Beleuchtung (Dimmfaktor < 100%) führt ein größerer Wert zu einer Erhöhung der Energiekosten pro Stunde, da sich Kommissionierer häufiger in verschiedenen Gassen befinden. Die Energiekosten pro Artikel nehmen in der Regel jedoch ab.

Geschwindigkeit Kommissionierer: Legt die Geschwindigkeit fest, mit welcher sich ein Kommissionierer durch das Lager bewegt.

Länge Regalgasse: Legt die Länge einer Regalgasse in Metern fest. Gemessen wird von der Mitte des oberen Quergangs bis zur Mitte des unteren Quergangs.

Länge Quergang: Legt die Länge der Quergänge in Metern fest. Gemessen wird von der Mitte der ersten Regalgasse bis zur Mitte der letzten Regalgassen.

Gangfolgebestimmung: Wählt das Verfahren zur Bestimmung der Gangfolge. Zur Auswahl stehen „Optimal“ (siehe Abschnitt 3.2.2), sowie die beiden Heuristiken „Largest Gap“ und „Schleifenstrategie“ (siehe Abschnitt 3.2.1).

Leistung Regalgasse: Die ungedimmte Leistung des Beleuchtungssystems innerhalb einer Regalgasse.

Leistung Quergang: Die Leistung des Beleuchtungssystems innerhalb eines Quergangs.

Dimmfaktor: Anteil der Leistung in Prozent, auf den das Beleuchtungssystem in einer Regalgasse heruntergedimmt wird, während sich kein Kommissionierer in der Gasse aufhält.

Energiekosten: Strompreis je Kilowattstunde in Euro.

Ein Klick auf „Berechnen“ startet die Kostenberechnung. Wenn die Parameter eines Profils nach der Kostenberechnung geändert werden, muss diese erneut ausgeführt werden. Bei der Kostenberechnung über die Schaltfläche „Berechnen“ werden ausschließlich die Kosten des momentan ausgewählten Profils berechnet.

Hinweis: Bei großen Werten für die Anzahl der Regalgassen und Anzahl der Kommissionierer kann die Berechnung einige Zeit in Anspruch nehmen. Daher sollten vor der Berechnung großer Instanzen die eingegebenen Parameter nochmals überprüft werden.

Das Demo-Tool ist unter apps.dpo.rwth-aachen.de verfügbar. Bei weitergehenden Fragen wenden Sie sich bitte an den Deutsche Post Lehrstuhl (info@dpo.rwth-aachen.de).



Deutsche Post Lehrstuhl
für Optimierung von
Distributionsnetzwerken



RWTH AACHEN
UNIVERSITY

SERVERSTATUS: ONLINE

AiF Forschungsprojekt Intelligente Beleuchtungssysteme
Demonstrations-Tool

BEDIENUNGSANLEITUNG SITZUNG SPEICHERN SITZUNG LADEN

VERGLEICHSÜBERSICHT



Szenario	Energiekosten / Stunde [€]	Artikel / Stunde	Energiekosten / Artikel [€]
Basis	13,34 €	1.158	0,01 €
Basis 2	10,02 €	716,73	0,01 €
LED Optimal	9,95 €	898,69	0,01 €
LED S-Shape	0,31 €	1.086	0,01 €
LED Largest Gap	8,98 €	1.269	0,01 €

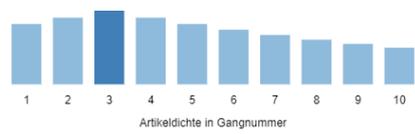
Exportieren PDF

PROFILEIGENSCHAFTEN

Profilauswahl: LED Optimal

Umbenennen Neues Profil Entfernen Berechnen

Anzahl Regalgassen: 10	Länge Regalgasse [m]: 50
Anzahl Fächer pro Gasse: 100	Länge Quergang [m]: 50
Auftragsgröße [Artikel]: 20	Gangfolgebestimmung: Optimal
Depotgang: 3	Leistung Regalgasse [kW]: 3
Artikelverteilung [Typ, Form]: Exponential, 2	Leistung Quergang [kW]: 5
	Dimmfaktor [%]: 60
	Energiekosten [€/kWh]: 0,3



Anzahl Kommissionierer: 8	Energiekosten pro Stunde [€]: 9,95 €
Geschw. Kommissionierer [m/s]: 0,7	Artikel pro Stunde: 898,69
	Energiekosten pro Artikel [€]: 0,01 €

POWERED BY

- Bootstrap
- Chart.js
- Apache HTTP Server

KONTAKT

- info@dpo.rwth-aachen.de
- www.dpo.rwth-aachen.de

Abbildung 4.17: Screenshot des Demo-Tools.

5 Verwendung der Zuwendungen

Die Projektbearbeitung erfolgte im Zeitraum von Juni 2017 bis Oktober 2019, der eine siebenmonatige kostenneutrale Laufzeitverlängerung beinhaltet, durch jeweils zwei wissenschaftliche Mitarbeiter an den FS 1 und 2. Aufgrund einer längeren Stellenvakanz ab Projektfreigabe und einem Personalwechsel während der Projektbearbeitung wurde eine entsprechende kostenneutrale Laufzeitverlängerung durch die Forschungsstelle 1 beantragt. Wie im Projektantrag festgelegt, wurden bei der FS 1 während der Projektlaufzeit 11 Mann-Monate für wiss.-techn. Personal (A.1 des Finanzierungsplans) sowie 4,4 Mann-Monate für Hilfskräfte (A.3 des Finanzierungsplans) eingesetzt. Die Forschungsstelle 2 hat ebenfalls 11 Mann-Monate für wiss.-tech. Personal (A.1 des Finanzierungsplans) eingesetzt und zusätzlich die 4,4 Mann-Monate für Hilfskräfte (A.3 des Finanzierungsplans) zur Aufstockung des wiss.-techn. Personals genutzt. Die Mitarbeiter haben über den jeweiligen angegebenen Bearbeitungszeitraum auf beiden Forschungsstellen, wie im Antrag beschrieben, mit jeweils 50% an dem Projekt gearbeitet. Durch ihr abgeschlossenes Hochschulstudium (M.Sc.) sind die Mitarbeiter dem wissenschaftlich-technischen Personal (Einsatz A.1 des Finanzierungsplans) zuzuordnen. Durch den notwendigen, anspruchsvollen Methodeneinsatz war das vorliegende Qualifikationsniveau der Mitarbeiter im Vorhaben unabdingbar.

Die angefallenen Tätigkeiten entsprechen den Arbeitsschwerpunkten der beteiligten Forschungsstellen, die auf die entsprechenden Mitarbeiter angemessen aufgeteilt wurden. Zur besseren Projektabstimmung nahmen die Mitarbeiter einzelne Projektaufgaben gemeinsam wahr. Die Aufgaben für die wissenschaftlichen Mitarbeiter innerhalb der Arbeitspakete waren die Durchführung von Interviews und die Organisation und Moderation von Besprechungen mit den Unternehmen des Projektbegleitenden Ausschusses, die Entwicklung eines Simulationsmodells sowie die Entwicklung eines mathematischen Planungsmodells, die Validierung der Modellergebnisse, die Ableitung von Anforderungen an den Einsatz intelligenter Beleuchtungssysteme und die Quantifizierung ihres Nutzens. Die Aufgaben der wissenschaftlichen Mitarbeiter umfassten auch die praxisnahe Aufbereitung und Präsentation der Projektergebnisse.

Die wissenschaftlichen Mitarbeiter wurden ab dem Arbeitsschritt 2 an der Forschungsstelle 1 während der Projektbearbeitung durch drei studentische Hilfskräfte (A.3 des Finanzierungsplans) über die Projektlaufzeit unterstützt. Die Hilfskräfte übernahmen insbesondere Aufgaben zur Datenaufbereitung im Rahmen der Identifikation von Performance-Kennzahlen intelligenter Beleuchtungssysteme sowie zur Aufbereitung von Daten der Fallstudie und der Simulationsstudie. Außerdem unterstützten Sie bei der Durchführung von Sitzungen mit dem Projektbegleitenden Ausschuss. Forschungsstelle 2 hat die zur Verfügung stehenden Finanzmittel für eine studentische Hilfskraft zur Aufstockung des wiss.-techn. Personals genutzt. Ausgaben für Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans) und Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans) waren im Finanzierungsplan nicht vorgesehen und sind dementsprechend im vorliegenden IGF-Vorhaben nicht angefallen.

6 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die durchgeführten Arbeiten im Forschungsprojekt sowie die dafür aufgewandten Ressourcen waren notwendig und angemessen, da sie der im Projektantrag formulierten Planung unter Berücksichtigung der zeitlichen Verzögerungen entsprachen und die im Arbeitsplan formulierten Aufgaben bearbeitet wurden. Die geleistete Arbeit sowie die erzielten Ergebnisse entsprechen in Umfang und Qualität den Vorgaben aus dem Projektantrag. Um ein realitätsnahes Simulations- sowie Planungsmodell erstellen zu können, musste zunächst ein umfassendes Verständnis über die Einsatzmöglichkeiten intelligenter Beleuchtungssysteme erarbeitet werden. Zusätzlich war es notwendig, die angesprochenen Themenfelder in Hinblick auf die vorhandene Literatur aufzuarbeiten. Aus diesen Gründen wurde eine umfassende wissenschaftliche und praxisorientierte Literaturrecherche durchgeführt. Diese ermöglichte es, einerseits die verschiedenen Anwendungsmöglichkeiten intelligenter Beleuchtungssysteme zu identifizieren und andererseits Forschungslücken in der wissenschaftlichen Literatur aufzudecken. Zur Datenerhebung kamen neben der Literaturrecherche Interviews und Workshops mit Unternehmensvertretern aus dem Projektbegleitenden Ausschuss sowie Fallstudien zur Anwendung, die für die Entwicklung der Simulationsstudie unabdingbar waren. Dieser Projektschritt war notwendig, um den Stand der Forschung vollständig aufzubereiten und Einsichten in Anforderungen, die Unternehmen an den Einsatz intelligenter Beleuchtungssysteme stellen, zu gewinnen. Aufbauend auf diesen Projektergebnissen war es möglich, Modelle und Konzepte in den folgenden Projektschritten so zu entwickeln, dass gezielt ein Mehrwert für unternehmerische Fragestellungen entsteht. Die neuartigen Modelle von Kommissioniersystemen, sowie der vorgestellte Ansatz zur Reduktion von Beleuchtungskosten zeigen Möglichkeiten auf, die Potentiale von intelligenten Beleuchtungssystemen bei der Steuerung von Kommissioniersystemen auszunutzen.

Als erste Methodik zur Untersuchung von Energieeinsparungen in der Kommissionierung durch intelligente Beleuchtungssysteme wurde eine Simulationsstudie gewählt. Simulationsstudien stellen eine moderne, anspruchsvolle Forschungsmethodik dar, mit der - bezogen auf die vorliegende Anwendung - unterschiedliche Beleuchtungsszenarien praxisnah und für genau definierten Lagerszenarien untersucht werden können. Durch die zuvor durchgeführte, umfassende Datenaufnahme konnten geeignete, praxisnahe Simulationsszenarien definiert werden. Weiterhin mussten zur Validierung der Simulationsergebnisse Realdaten bei den Praxispartnern erhoben und in einem mehrstufigen Prozess Anpassungen am Simulationsmodell zur Erhöhung der Realitätsnähe vorgenommen werden. Anschließend wurden die Ergebnisse der Simulationsstudie mit den Mitgliedern des Projektbegleitenden Ausschusses detailliert besprochen, um Nutzenpotenziale für die Praxis zu identifizieren. Darauf aufbauend konnte ein mathematisches Planungsverfahren entwickelt werden, das die Kostenwirkung intelligenter Beleuchtungssystem bei der Planung von Kommissionierprozessen berücksichtigt, um so Lagerabläufe zu generieren, die sowohl zu kurzen Durchlaufzeiten als auch zu einer hohen Energieeffizienz beitragen. Die entwickelten Modelle und Verfahren sowohl im Rahmen von Kosten-/Nutzen-Bewertungen von intelligenten Beleuchtungssystemen, etwa bei der Investitionsplanung, als auch beim operativen Betrieb solcher Systeme, eingesetzt werden. Die Ergebnisse und die weiteren geplanten Maßnahmen schaffen die Voraussetzung für einen anwendungsorientierten Ergebnistransfer in die Wirtschaft.

7 Bewertung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU und ihrer Anwendungsmöglichkeiten

Wie in Gliederungspunkt 2 beschrieben, bestand die Zielsetzung des Forschungsprojekts darin, ein integriertes mathematisches Planungsmodell und ein zugehöriges Lösungsverfahren zu entwickeln, die Unternehmen bei der simultanen Planung von Kommissionierprozessen und dem Einsatz intelligenter Beleuchtungssysteme unterstützen. Ergänzt wurde die mathematische Modellierung durch die Entwicklung eines Simulationsmodells, dessen Nützlichkeit bei der Beantwortung der Forschungsfragen des Projekts sowie im Rahmen des Ergebnistransfers durch Besprechungen mit dem Projektbegleitenden Ausschuss offensichtlich geworden war. Darüber hinaus wurden Lagerplatzvergabestrategien auf ihre Eignung in Bezug auf einen Betrieb intelligenter Beleuchtungssysteme untersucht. Das Forschungsprojekt beschränkte sich nicht auf einzelne Wirtschaftszweige, sondern sollte für alle Unternehmen, die umfangreiche Kommissionierleistungen zu erbringen haben, gleichermaßen relevant sein. Die Forschungsergebnisse unterstützen Unternehmen auf vielfältige Weise und schließen explizit einen Transfer in die praktische Anwendung mit ein (siehe dazu Abschnitt 4.3).

Zunächst ermöglicht es das integrierte Planungsmodell, eine effiziente Routenführung durch das Lager zu ermitteln, wobei die entwickelten Routenverfahren für beliebige Artikelzuordnungen stets eine möglichst effiziente Routenführung erzeugen. Unabhängig von der Nutzung intelligenter Beleuchtungssysteme trägt das Planungsmodell dazu bei, Durchlaufzeiten von Kommissionieraufträgen zu reduzieren, wodurch die Performance des Kommissionierlagers insgesamt verbessert wird, da regelmäßig über 50% der für die Kommissionierung insgesamt benötigten Zeit nur auf die Fortbewegung des Kommissionierers (d. h. auf die sogenannte Wegzeit) zurückzuführen ist (Tompkins et al. 2010). Durch Vermeidung unnötiger, durch die Kommissionierer zurückzulegender Wegstrecken können so die anteiligen Personalkosten je Kommissionierauftrag deutlich reduziert werden, wodurch die Wettbewerbsfähigkeit von Lagereinrichtungen gerade in Hochlohnländern verbessert wird. Insbesondere erlaubt das Planungsmodell, Abläufe im Lager auf die Anforderungen intelligenter Beleuchtungssysteme abzustimmen, sodass dies einen bestmöglichen Beitrag zur Reduktion von Energieverbräuchen leisten kann. Durch eine simultane Planung von Routenführung und Beleuchtung wird es auch möglich, das Zu- und Abschalten der Beleuchtung zu automatisieren, etwa indem die Steuerung der Beleuchtung an die Nutzung von Handhelds, über die sich die Position des Kommissionierers im Lager und damit der Beleuchtungsbedarf ermitteln lassen, Terminalen oder Transportmitteln gekoppelt wird. Damit entfällt die Notwendigkeit, die Beleuchtung im Lager manuell zu regulieren. Daneben ermöglicht es das Simulationsmodell, die Energieverbräuche und -kosten für verschiedene Prozessparameter und unterschiedliche Betriebsstrategien für das Beleuchtungssystem zu analysieren. Die Simulationsstudie erlaubt auch ohne Grundkenntnisse in der Optimierung, über ein grafisches Interface praxisrelevante Einsatzszenarien, wie unterschiedliche Lagerdesigns, also etwa in Bezug auf die Länge und Anzahl der Gänge und Quergänge, oder die Anzahl der Kommissionierer, die gleichzeitig im Lager arbeiten, zu simulieren und Einschätzungen über Ersparnisse zu treffen.

Neben einer reinen Reduktion von Energiekosten tragen intelligente Beleuchtungssysteme damit auch zur Verbesserung der Öko-Bilanz des Lagers und einer Reduktion des CO₂-Fußabdrucks bei, wobei die konkrete Reduktion von CO₂-Äquivalenten in einem Anwendungsfall vom verwendeten Strommix abhängt. Da die Simulationsstudie und das Planungsmodell Grundlage für einen möglichst optimalen Einsatz von intelligenten Beleuchtungssystemen sind, unterstützt dieses Projekt wesentliche gesellschaftliche Ziele in den Bereichen Klima und Energie. Darüber hinaus ermöglicht der effiziente Einsatz intelligenter Beleuchtungssysteme die Erfüllung potenzieller zukünftiger gesetzlicher Auflagen zum Ener-

gieverbrauch in Lägern. Auch bietet der effektive Einsatz von intelligenten Beleuchtungssystemen die Möglichkeit, die Beleuchtungsintensität im Lager punktuell zu erhöhen, um den Lagermitarbeitern damit eine optimale Lichtversorgung für die Erfüllung von Kommissionieraufgaben zu bieten, die deutlich über die gesetzlichen Vorgaben hinaus geht. Dadurch kann die Sicherheit der Arbeiter erhöht werden, wobei aufgrund von Energieeinsparungen durch Lichtreduktion an anderer Stelle nicht zwingend Kostensteigerungen zu erwarten sind. Neben der Realisierung von Kosteneinsparpotenzialen bei der Nutzung intelligenter Beleuchtungssysteme leistet das Projekt weitere Beiträge zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit von KMU: Aufgrund des starken öffentlichen Interesses an Initiativen zur Reduktion von Energieverbräuchen ist bei entsprechender Kommunikation auch eine positive Wirkung auf das Unternehmensimage zu erwarten, die sich langfristig in einer verbesserten Wettbewerbssituation niederschlagen kann.

Zuletzt unterstützen die Simulationsstudie und das Planungsmodell, die im Rahmen des Forschungsprojekts entwickelt wurden, KMU bei Investitionsentscheidungen im Bereich intelligenter Beleuchtungssysteme. Noch bevor solche Systeme angeschafft werden, kann mithilfe der Simulationsstudie und das Planungsmodell überprüft werden, wie intelligente Beleuchtungssysteme Abläufe im Lager verändern würden und ob die zu erwartende Reduktion der Energiekosten eine Anschaffung dieser Systeme rechtfertigt. Das Demotool, welches in Kapitel 4.5 beschrieben wurde, kann hierzu als erste Orientierungshilfe genutzt werden. Damit haben Unternehmen, v.a. KMU, die über eine Investition in intelligente Beleuchtungssysteme nachdenken, die Möglichkeit, einfach zu evaluieren, welche Einsparpotenziale intelligente Beleuchtungssysteme für das eigene Lager haben kann. Dabei ist zu beachten, dass die dort berechneten Werte als grobe Orientierungshilfen zu verstehen sind, und dies keine verbindlichen Einsparungen darstellen. Dies muss jeweils für jeden Einzelfall geprüft werden. Da intelligente Beleuchtungssysteme wie oben beschrieben auch Abläufe im Lager verändern können, wirken sie auf vielfältige Art und Weise auf die Kosten der Lagerhaltung, sodass ihre Kostenwirkung nur durch eine umfassende, modellgestützte Analyse der Ist- und Soll-Zustände im Lager unter Berücksichtigung der weiter oben beschriebenen komplexen Interdependenzen zwischen den verschiedenen Systemkomponenten bewertet werden kann. Die Entwicklung integrierter mathematischer Planungs- und Simulationsmodelle, die exakt dieses Planungsproblem unterstützen, war Gegenstand des Forschungsprojekts. Damit tragen die Forschungsergebnisse des Projekts dazu bei, Fehlinvestitionen in der Praxis zu vermeiden, da bereits im Vorfeld der Investition abgeschätzt werden kann, ob und wenn ja unter welchen Bedingungen sich Investitionen in intelligente Beleuchtungssysteme amortisieren.

Das Forschungsprojekt ist insbesondere für KMU relevant, da diese zum einen wichtige Innovations-träger sind (hier insb. Hersteller von Beleuchtungssystemen), die als Prozessinnovatoren fungieren, zum anderen aber durch ihre begrenzten personellen und finanziellen Ressourcen auf Prozess- und Energieeffizienz (hier insb. Nutzer von Beleuchtungssystemen in Lagerhallen) angewiesen sind. Gerade KMU, die aufgrund des größer werdenden Kosten- und internationalen Wettbewerbsdrucks immer stärker veranlasst sind, Rationalisierungspotenziale auszuschöpfen, können von den Ergebnissen des Forschungsprojekts profitieren. Zum einen wurden Möglichkeiten zur Prozessoptimierung in Verbindung mit Energieeinsparpotenzialen aufgezeigt, und zum anderen wurden Investitionsentscheidungen in Beleuchtungssysteme evaluiert, um Fehlinvestitionen, die für KMU gravierende Folgen haben können, zu vermeiden. Das Projekt setzt daher wichtige forschungspolitische Impulse für innovierende KMU. Die hohe praktische Relevanz und wirtschaftliche Bedeutung des Forschungsprojekts gerade für KMU wird auch durch die Vielzahl der Praxispartner belegt, die durch ihre Teilnahme am Forschungsprojekt mitgewirkt haben. Vor dem Hintergrund der adressierten Zielgruppe (KMU) ergibt sich somit mit 1) Anbietern von Beleuchtungssystemen, 2) allen Unternehmen, die Lagerhallen betreiben und 3) Software- / Lagerautomatisierungsanbietern ein überaus breiter potenzieller Nutzerkreis für die Ergebnisse des Projekts.

8 Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Der Transfer der im Projekt erzielten Ergebnisse erfolgte in Teilen bereits während der Projektlaufzeit und wurde im Projektverlauf weiter entsprechend des Zwischenberichts konkretisiert. Die Transferstrategie stützte sich auf Workshops, Veranstaltungen mit den Unternehmensvertretern des Projektbegleitenden Ausschuss, Publikationen in praxisnahen und wissenschaftlichen Fachzeitschriften sowie die Vorstellung der Ergebnisse auf Konferenzen und Fachtagungen. Ziel war es, fortlaufend Feedback von Unternehmensvertretern zu erhalten, um die Praxistauglichkeit der Ergebnisse zu erhöhen. Zunächst werden im folgenden Abschnitt 8.1 die Transfermaßnahmen beschrieben, die während der Projektlaufzeit durchgeführt wurden. Im Abschnitt 8.2 werden die noch geplanten Transfermaßnahmen aufgeführt.

8.1 Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit

Während der Projektlaufzeit wurden Maßnahmen in sechs Bereichen zum Transfer der Forschungsergebnisse in die Wirtschaft durchgeführt. In Tabelle 8.1 werden die durchgeführten Transfermaßnahmen dargestellt. Zusätzliche Detailinformationen finden sich unterhalb der Tabelle mit entsprechenden Verweisen.

Maßnahmen	Ziele	Ort/Rahmen
Veröffentlichung von Fachaufsätzen in praxisrelevanten Zeitschriften	Publikation von Projektergebnissen	A1: Fabriksoftware, A2: MM Logistik
Veröffentlichung von Projektergebnissen auf den Webseiten der Forschungsstellen	Updates zum Projektstand	B: Webseiten
Sitzung des Projektbegleitenden Ausschusses	Diskussion und Validierung von Projektergebnissen	C: Sitzungen
Präsentation der Projektergebnisse auf Konferenzen	Diskussionen mit Wissenschaftlern und Unternehmensvertretern; Ergebnisvalidierung	D1: CoDIT 2019 Paris D2: EuroYoung 2019 Sevilla D3: Gesellschaft für Operations Research 2019 D4: ISL 2019 Würzburg D5: IFAC MIM 2019 Berlin D6: Route 2018 Snekersten D7: Euro 2018 Valencia

Tabelle 8.1: Während der Projektlaufzeit durchgeführte Maßnahmen zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft.

A: Veröffentlichung von Fachaufsätzen in praxisrelevanten Zeitschriften Folgende Veröffentlichungen mit einem Schwerpunkt auf intelligenten Beleuchtungssystemen für die Lagerwirtschaft wurden während der Projektlaufzeit durch die Forschungsstellen in praxisrelevanten Fachzeitschriften veröffentlicht:

A1: M. Füchtenhans, K. Schmidt, E. H. Grosse, C. H. Glock (2019): *Nutzenpotenziale intelligenter Beleuchtungssysteme für Fabrikbetriebe*, in Fabriksoftware 24 (1).

A2: M. Füchtenhans, E. H. Grosse, C. H. Glock, K. Schmidt (2019): *Intelligente Beleuchtung mit Anwendungspotenzial*, in MM Logistik (4/2019).

B: Veröffentlichung von Projektergebnissen auf den Webseiten der Forschungsstellen

Während der Projektlaufzeit wurde über die Webseiten der beiden Forschungsstellen über das Projekt und dessen Ziele informiert. Der Link zur Webseite der FS 1 lautet:

https://www.pscm.tu-darmstadt.de/forschung_im/nutzenpotenziale_intelligenter_beleuchtungssysteme/intelligente_beleuchtungssysteme_.de.jsp

Der Link zur Webseite der FS 2 lautet:

<https://www.dpo.rwth-aachen.de/cms/DPO/Forschung/~nkcw/Projekte/>.

C: Sitzung des Projektbegleitenden Ausschusses Für die Dauer des Projektlaufzeit wurden vier Sitzungen mit dem Projektbegleitenden Ausschuss durchgeführt. Die Treffen des Projektbegleitenden Ausschusses fanden am 10.10.2017, 18.07.2018 sowie 30.09.2019 an der TU Darmstadt statt. Die dritte Sitzung fand am 21.11.2018 am Hauptsitz der Signify N.V. in Eindhoven, Niederlande, statt.

D: Präsentation der Projektergebnisse auf Konferenzen Während der Projektlaufzeit wurden die erzielten (Zwischen-) Ergebnisse auf sieben wissenschaftlichen Konferenzen mit entsprechenden Schwerpunkten präsentiert:

D1: Herr Füchtenhans hat am 25.04.2019 bei der CoDIT 2019 in Paris einen Vortrag gehalten: *Literature review on smart lighting systems and their application in industrial settings*.

D2: Herr Löffler hat am 02.05.2019 bei der EuroYoung 2019 in Sevilla einen Vortrag gehalten: *Synchronizing Picking Tours to Reduce Lighting Costs*.

D3: Herr Löffler hat am 17.05.2019 bei der Gesellschaft für Operations Research e. V. einen Vortrag gehalten: *Picker routing in AGV-assisted order picking systems*.

D4: Herr Dr. Grosse hat am 16.07.2019 bei der ISL 2019 in Würzburg einen Vortrag gehalten: *Reducing energy cost in warehouses via smart lighting systems: a simulation study*.

D5: Herr Dr. Grosse hat am 28.08.2019 bei der IFAC MIM 2019 in Berlin einen Vortrag gehalten: *Applications for smart lighting systems in production and logistics: a structured literature review*.

D6: Herr Prof. Dr. Schneider hat am 28.05.2018 bei der Route 2018 in Snekkersten einen Vortrag gehalten: *Picker routing in AGV-assisted order picking systems*.

D7: Herr Löffler hat am 09.07.2018 bei der Euro 2018 in Valencia einen Vortrag gehalten: *Picker routing in AGV-assisted order picking systems*.

8.2 Transfermaßnahmen nach Abschluss des Vorhabens

Nach Abschluss des Projekts sind weitere Transfermaßnahmen geplant. Diese sind in Tabelle 8.2 aufgeführt. Bereits durchgeführte Maßnahmen sind in Tabelle 8.2 schwarz markiert. Weitere für das Jahr 2020 vorgesehene Maßnahmen sind in Tabelle 8.2 rot markiert. Unter der Tabelle werden die Transfermaßnahmen im Detail beschrieben.

Maßnahmen	Ziele	Ort/Rahmen
Veröffentlichung von Projektergebnissen auf den Webseiten der Forschungsstellen	Updates zum Projektstand	E: Webseiten
Veröffentlichung eines internet-basierten Demo-Tools	Visualisierung der Projektergebnisse	F: Demo-Tool
Veröffentlichung von Fachaufsätzen in internationalen wiss. Fachzeitschriften	Beitrag zur Erweiterung des Forschungsstandes	G1: IEEE EMR G2: IJPR Simulation G3: IJPR Review G4: IJOC AGV G5: IJOC SPRP
Veröffentlichung von Fachaufsätzen in praxisrelevanten Zeitschriften	Publikation von Projektergebnissen	H: ZWF

Tabelle 8.2: Geplante Maßnahmen zum Ergebnistransfer nach Abschluss des Vorhabens.

E: Veröffentlichung von Projektergebnissen auf den Webseiten der Forschungsstellen

Während der Projektlaufzeit wurde über die Webseiten der beiden Forschungsstellen über das Projekt und dessen Ergebnisse informiert, sowie der Link zu diesem Abschlussbericht und zum Demo-Tool zur Verfügung gestellt. Für die FS 1 lautet der Link:

https://www.pscm.tu-darmstadt.de/forschung_im/nutzenpotenziale_intelligenter_beleuchtungssysteme/intelligente_beleuchtungssysteme_.de.jsp.

Der Link zur Webseite der FS 2 lautet:

<https://www.dpo.rwth-aachen.de/cms/DPO/Forschung/~nkcw/Projekte/>.

F: Veröffentlichung eines internet-basierten Demo-Tools Im Rahmen des Projekts wurde ein internet-basiertes Demo-Tool entwickelt, wie in Kapitel 4.5 erläutert. Das Demo-Tool ist unter folgendem Link abrufbar: [apps.dpo.rwth-aachen.de](https://www.dpo.rwth-aachen.de).

G: Veröffentlichung von Fachaufsätzen in internationalen wiss. Fachzeitschriften Folgende Veröffentlichungen sind mit Schwerpunkt auf intelligente Beleuchtungssysteme für die Lagerwirtschaft während der Projektlaufzeit durch die Forschungsstellen in internationalen wissenschaftlichen Fachzeitschriften erfolgt/geplant:

G1: M. Füchtenhans, E. H. Grosse, C. H. Glock (2019): *Use cases and potentials of smart lighting systems in industrial settings*, in IEEE Engineering Management Review 47(4).

G2: M. Füchtenhans, E. H. Grosse, C. H. Glock: *Using smart lighting systems to reduce energy costs in warehouses: A simulation study*, unter Begutachtung bei International Journal of Production Research.

G3: M. Füchtenhans, E. H. Grosse, C. H. Glock: *Smart lighting systems in industrial settings: framework and research opportunities on the example of order picking activities*, unter Begutachtung bei International Journal of Production Research.

G4: M. Löffler, N. Boysen, M. Schneider: *Picker routing in AGV-assisted order picking systems*, unter Begutachtung bei INFORMS Journal on Computing.

G5: D. Goeke, M. Schneider: *Modeling Single Picker Routing Problems in Classical and Modern Warehouses*, unter Begutachtung bei INFORMS Journal on Computing.

H: Veröffentlichung von Fachaufsätzen in praxisrelevanten Zeitschriften Folgende Veröffentlichungen werden mit Schwerpunkt auf zu intelligente Beleuchtungssysteme für die Lagerwirtschaft nach der Projektlaufzeit durch die Forschungsstellen in einer praxisrelevanten Fachzeitschriften erfolgen:

M. Füchtenhans, E. H. Grosse, C. H. Glock (2020): *Einsparungen von Energiekosten im Lager- und Fabrikbetrieb durch intelligente Beleuchtungssysteme: Eine Simulationsstudie*, zur Einreichung vorgesehen in der Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb.

9 Zusammenfassung und abschließende Bewertung

Die Evaluation von Nutzenpotenzialen intelligenter Beleuchtungssysteme in der Lagerwirtschaft am Beispiel der Kommissionierung stand im Zentrum des Projekts. Im Rahmen einer Literaturrecherche wurde ein Überblick über den aktuellen Stand der Technik in Wissenschaft und Praxis in den verschiedenen Anwendungsgebieten gegeben. Hierbei wurden Forschungslücken im Bereich der Anwendung intelligenter Beleuchtungssysteme im industriellen Kontext identifiziert. Um möglichst realistische, praxisnahe Annahmen für die Simulationsstudie und das entwickelte Planungsmodell zu definieren, fand eine umfangreiche Datenaufnahme statt. Die Projektergebnisse stützen sich daher auf mehrere von den Forschungsstellen durchgeführten Workshops, Experteninterviews und Fallstudien. Insbesondere durch die durchgeführten Workshops und Fallstudien konnte ein vielschichtiger Einblick in die Praxisanforderungen ermöglicht und gleichzeitig die verschiedenen Potenziale derartiger Systeme identifiziert werden. Mithilfe einer Simulationsstudie konnten mögliche Energieeinsparungen und Wechselwirkungen mit anderen Zielgrößen der Kommissionierung detailliert analysiert und insbesondere für kleine und mittlere Unternehmen transparent dargestellt werden. Das entwickelte mathematische Planungsmodell ermöglicht es, die Gangfolgen der Kommissionierer unter Berücksichtigung von Energiekosten zu planen, indem die Eigenschaften intelligenter Beleuchtungssysteme ausgenutzt werden.

Durch die Veröffentlichung der Ergebnisse in mehreren praxisnahen Fachzeitschriften, der Präsentation von Ergebnissen in Konferenzvorträgen sowie durch die online zugänglichen zentralen Ergebnisse und das implementierte Demo-Tool wird ein umfangreicher Transfer der Ergebnisse in die Wirtschaft sichergestellt. Die während des Projekts durchgeführten Workshops mit den Unternehmensvertretern aus dem Projektbegleitenden Ausschuss stellten eine an aktuellen Anforderungen orientierte und praxisrelevante Projektausrichtung bei gleichzeitiger Anwendung wissenschaftlich fundierten Methoden sicher. So konnten neue Erkenntnisse hinsichtlich der Nutzenpotenziale intelligenter Beleuchtungssysteme in der Lagerwirtschaft und insbesondere im Rahmen der Kommissionierung gewonnen werden. Die Ziele des Forschungsvorhabens wurden nach Einschätzung der Wissenschaftler aus beiden Forschungsstellen und der beteiligten Praxispartner uneingeschränkt erreicht.

Anhang

Literaturverzeichnis

- S. Afshari und S. Mishra. A plug-and-play realization of decentralized feedback control for smart lighting systems. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 24(4):1317–1327, 2015.
- D. Arnold und K. Furmans. *Materialfluss in Logistiksystemen*, volume 6. Springer, 2005.
- M. Bartolini, E. Bottani, und E. H. Grosse. Green warehousing: Systematic literature review and bibliometric analysis. *Journal of Cleaner Production*, 226:242–258, 2019.
- D. Battini, M. Calzavara, A. Persona, und F. Sgarbossa. Order picking system design: the storage assignment and travel distance estimation (sa&tde) joint method. *International Journal of Production Research*, 53(4):1077–1093, 2015.
- P. Berglund und R. Batta. Optimal placement of warehouse cross-aisles in a picker-to-part warehouse with class-based storage. *IIE Transactions*, 44(2):107–120, 2012.
- P. R. Boyce. *Human factors in lighting*. Crc Press, 2014.
- N. Boysen, R. de Koster, und F. Weidinger. Warehousing in the e-commerce era: A survey. *European Journal of Operational Research*, 277(2):396–411, 2019.
- Y. A. Bozer und J. W. Kile. Order batching in walk-and-pick order picking systems. *International Journal of Production Research*, 46(7):1887–1909, 2008.
- H. Brynzér und M. I. Johansson. Storage location assignment: Using the product structure to reduce order picking times. *International Journal of Production Economics*, 46:595–603, 1996.
- Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. Technische regeln für arbeitsstätten: Beleuchtung. ASR A3.4. Ausgabe April, 2011. zuletzt geändert GMBI 2014, S. 287.
- C. Chackelson, A. Errasti, D. Ciprés, und F. Lahoz. Evaluating order picking performance trade-offs by configuring main operating strategies in a retail distributor: A design of experiments approach. *International Journal of Production Research*, 51(20):6097–6109, 2013.
- M.-H. Chang, P. Sandborn, M. Pecht, W. K. Yung, und W. Wang. A return on investment analysis of applying health monitoring to led lighting systems. *Microelectronics Reliability*, 55(3-4):527–537, 2015.
- I. Chew, D. Karunatilaka, C. P. Tan, und V. Kalavally. Smart lighting: The way forward? reviewing the past to shape the future. *Energy and Buildings*, 149:180–191, 2017.
- T. Chung und J. Burnett. On the prediction of lighting energy savings achieved by occupancy sensors. *Energy engineering*, 98(4):6–23, 2001.
- G. Cimini, A. Freddi, G. Ippoliti, A. Monteriu, und M. Pirro. A smart lighting system for visual comfort and energy savings in industrial and domestic use. *Electric Power Components and Systems*, 43(15):1696–1706, 2015.
- R. L. Daniels, J. L. Rummel, und R. Schantz. A model for warehouse order picking. *European Journal of Operational Research*, 105(1):1–17, 1998.
- H. Davarzani und A. Norrman. Toward a relevant agenda for warehousing research: literature review and practitioners’ input. *Logistics Research*, 8(1):1, 2015.
- C. De Bakker, T. Van de Voort, und A. Rosemann. The energy saving potential of occupancy-based lighting control strategies in open-plan offices: The influence of occupancy patterns. *Energies*, 11(1):2, 2018.
- R. de Koster und E. S. van der Poort. Routing orderpickers in a warehouse: a comparison between optimal and heuristic solutions. *IIE Transactions*, 30(5):469–480, 1998.
- R. de Koster, T. Le-Duc, und K. J. Roodbergen. Design and control of warehouse order picking: A literature review. *European journal of operational research*, 182(2):481–501, 2007.
- R. B. de Koster, T. Le-Duc, und N. Zaerpour. Determining the number of zones in a pick-and-sort order picking system. *International Journal of Production Research*, 50(3):757–771, 2012.
- J. Dhooma und P. Baker. An exploratory framework for energy conservation in existing warehouses. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 15(1):37–51, 2012.
- J. Fichtinger, J. M. Ries, E. H. Grosse, und P. Baker. Assessing the environmental impact of integrated inventory and warehouse management. *International Journal of Production Economics*, 170:717–729, 2015.

- T. Franzke, E. H. Grosse, C. H. Glock, und R. Elbert. An investigation of the effects of storage assignment and picker routing on the occurrence of picker blocking in manual picker-to-parts warehouses. *The International Journal of Logistics Management*, 28(3):841–863, 2017.
- E. Frazzelle. *World-class warehousing and material handling*, volume 1. McGraw-Hill New York, 2002.
- N. Gademann und S. van de Velde. Order batching to minimize total travel time in a parallel-aisle warehouse. *IIE Transactions*, 37(1):63–75, 2005.
- Z. Ghassemlooy, L. Alves, S. Zvanovec, und M. Khalighi, editors. *Visible Light Communications*. CRC Press, Boca Raton, US, 2017.
- C. H. Glock und E. H. Grosse. Storage policies and order picking strategies in u-shaped order-picking systems with a movable base. *International Journal of Production Research*, 50(16):4344–4357, 2012.
- C. H. Glock und S. Hochrein. Purchasing organization and design: a literature review. *Business Research*, 4(2): 149–191, 2011.
- C. H. Glock, E. H. Grosse, R. M. Elbert, und T. Franzke. Maverick picking: the impact of modifications in work schedules on manual order picking processes. *International Journal of Production Research*, 55(21):6344–6360, 2017.
- E. H. Grosse, C. H. Glock, und M. Y. Jaber. The effect of worker learning and forgetting on storage reassignment decisions in order picking systems. *Computers & Industrial Engineering*, 66(4):653–662, 2013.
- E. H. Grosse, C. H. Glock, R. Ballester-Ripoll, et al. A simulated annealing approach for the joint order batching and order picker routing problem with weight restrictions. *International Journal of Operations and Quantitative Management*, 20(2):65–83, 2014.
- E. H. Grosse, C. H. Glock, M. Y. Jaber, und W. P. Neumann. Incorporating human factors in order picking planning models: framework and research opportunities. *International Journal of Production Research*, 53(3):695–717, 2015.
- J. Gu, M. Goetschalckx, und L. F. McGinnis. Research on warehouse operation: A comprehensive review. *European journal of operational research*, 177(1):1–21, 2007.
- J. Gu, M. Goetschalckx, und L. F. McGinnis. Research on warehouse design and performance evaluation: A comprehensive review. *European Journal of Operational Research*, 203(3):539–549, 2010.
- A. Gutierrez-Escolar, A. Castillo-Martinez, J. M. Gomez-Pulido, J.-M. Gutierrez-Martinez, E. P. D. González-Seco, und Z. Stacic. A review of energy efficiency label of street lighting systems. *Energy Efficiency*, 10(2): 265–282, 2017.
- H. Haas, L. Yin, Y. Wang, und C. Chen. What is lifi? *Journal of lightwave technology*, 34(6):1533–1544, 2015.
- S. Henn. Algorithms for on-line order batching in an order picking warehouse. *Computers & Operations Research*, 39(11):2549–2563, 2012.
- S. Henn und V. Schmid. Metaheuristics for order batching and sequencing in manual order picking systems. *Computers & Industrial Engineering*, 66(2):338–351, 2013.
- J. Higuera, W. Hertog, M. Perálvarez, J. Polo, und J. Carreras. Smart lighting system iso/iec/ieee 21451 compatible. *IEEE Sensors Journal*, 15(5):2595–2602, 2015.
- S. Hochrein, C. H. Glock, et al. Systematic literature reviews in purchasing and supply management research: a tertiary study. *International Journal of Integrated Supply Management*, 7(4):215–245, 2012.
- S. Hong, A. L. Johnson, und B. A. Peters. Large-scale order batching in parallel-aisle picking systems. *IIE Transactions*, 44(2):88–106, 2012.
- L.-F. Hsieh und Y.-C. Huang. New batch construction heuristics to optimise the performance of order picking systems. *International Journal of Production Economics*, 131(2):618–630, 2011.
- H. Hwang, Y. Oh, und Y. Lee. An evaluation of routing policies for order-picking operations in low-level picker-to-part system. *International Journal of Production Research*, 42(18):3873–3889, 2004.
- B. Kamsu-Foguem und Y. Mathieu. Software architecture knowledge for intelligent light maintenance. *Advances in Engineering Software*, 67:125–135, 2014.
- R. F. Karlicek. Smart lighting-beyond simple illumination. In *2012 IEEE Photonics Society Summer Topical Meeting Series*, pages 147–148. IEEE, 2012.
- M. Löffler, N. Boysen, und M. Schneider. Picker routing in agv-assisted order picking systems. Working Paper DPO-2018-01, Deutsche Post Chair – Optimization of Distribution Networks, 2018.
- S. Lin und B. W. Kernighan. An effective heuristic algorithm for the traveling-salesman problem. *Operations Research*, 21:498–516, 1973.

- J. Liu, W. Zhang, X. Chu, and Y. Liu. Fuzzy logic controller for energy savings in a smart led lighting system considering lighting comfort and daylight. *Energy and Buildings*, 127:95–104, 2016.
- G. Lobaccaro, S. Carlucci, and E. Löfström. A review of systems and technologies for smart homes and smart grids. *Energies*, 9(5):348, 2016.
- J. Luo, L. Fan, and H. Li. Indoor positioning systems based on visible light communication: State of the art. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19(4):2871–2893, 2017.
- P. Maithili, D. Sharmitha, R. Vigneshwaran, R. Jeganath, and M. Suresh. Energy efficient and eco-friendly street lighting. In *2017 International Conference on Innovations in Green Energy and Healthcare Technologies (IGEHT)*, pages 1–5. IEEE, 2017.
- M. Masae, C. H. Glock, and E. H. Grosse. Order picker routing in warehouses: A systematic literature review. *International Journal of Production Economics*, 2019. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.107564>.
- M. Matusiak, R. de Koster, L. Kroon, and J. Saarinen. A fast simulated annealing method for batching precedence-constrained customer orders in a warehouse. *European Journal of Operational Research*, 236(3):968–977, 2014.
- A. Meneghetti and L. Monti. Greening the food supply chain: an optimisation model for sustainable design of refrigerated automated warehouses. *International Journal of Production Research*, 53(21):6567–6587, 2015.
- C. E. Miller, A. W. Tucker, and R. A. Zemlin. Integer programming formulation of traveling salesman problems. *Journal of the ACM*, 7(4):326–329, 1960.
- Z. Nagy, F. Y. Yong, and A. Schlueter. Occupant centered lighting control: a user study on balancing comfort, acceptance, and energy consumption. *Energy and Buildings*, 126:310–322, 2016.
- S. L. Newbert. Empirical research on the resource-based view of the firm: an assessment and suggestions for future research. *Strategic management journal*, 28(2):121–146, 2007.
- J. H. Oh, S. J. Yang, and Y. R. Do. Healthy, natural, efficient and tunable lighting: four-package white leds for optimizing the circadian effect, color quality and vision performance. *Light: Science & Applications*, 3(2):e141, 2014.
- J. C.-H. Pan and M.-H. Wu. Throughput analysis for order picking system with multiple pickers and aisle congestion considerations. *Computers & Operations Research*, 39(7):1661–1672, 2012.
- J. C.-H. Pan, M.-H. Wu, and W.-L. Chang. A travel time estimation model for a high-level picker-to-part system with class-based storage policies. *European Journal of Operational Research*, 237(3):1054–1066, 2014.
- A. Pandharipande and D. Caicedo. Smart indoor lighting systems with luminaire-based sensing: A review of lighting control approaches. *Energy and Buildings*, 104:369–377, 2015.
- L. Pansart, N. Catusse, and H. Cambazard. Exact algorithms for the order picking problem. *Computers & Operations Research*, 100:117–127, 2018.
- J. Park, H. Lee, and Y. Kim. A study on the appropriate position for an illumination sensor for lighting control based on actual residence environments. *International Journal of Applied Engineering Research*, 10:26769–26776, 2015.
- P. H. Pathak, X. Feng, P. Hu, and P. Mohapatra. Visible light communication, networking, and sensing: A survey, potential and challenges. *IEEE communications surveys & tutorials*, 17(4):2047–2077, 2015.
- L. Pérez-Lombard, J. Ortiz, and C. Pout. A review on buildings energy consumption information. *Energy and buildings*, 40(3):394–398, 2008.
- C. G. Petersen and G. Aase. A comparison of picking, storage, and routing policies in manual order picking. *International Journal of Production Economics*, 92(1):11–19, 2004.
- C. G. Petersen and R. W. Schmenner. An evaluation of routing and volume-based storage policies in an order picking operation. *Decision Sciences*, 30(2):481–501, 1999.
- H. D. Ratliff and A. S. Rosenthal. Order-picking in a rectangular warehouse: A solvable case of the traveling salesman problem. *Operations Research*, 31(3):507–521, 1983.
- E. A. Rhoades. Literature reviews. *The Volta Review*, 111(3):353, 2011.
- G. Richards. *Warehouse Management: A Complete Guide to Improving Efficiency and Minimizing Costs in the Modern Warehouse*. Kogan Page Ltd, 2014.
- J. M. Ries, E. H. Grosse, and J. Fichtinger. Environmental impact of warehousing: a scenario analysis for the united states. *International Journal of Production Research*, 55(21):6485–6499, 2017.
- K. J. Roodbergen and R. De Koster. Routing order pickers in a warehouse with a middle aisle. *European Journal of Operational Research*, 133(1):32–43, 2001.

- V. Sadowsky. *Beitrag zur analytischen Leistungsermittlung von Kommissioniersystemen*. Verlag Praxiswissen Dortmund, 2007.
- M. Şahin, Y. Oğuz, und F. Büyüktürk. Ann-based estimation of time-dependent energy loss in lighting systems. *Energy and Buildings*, 116:455–467, 2016.
- M. Santamouris und E. Dascalaki. Passive retrofitting of office buildings to improve their energy performance and indoor environment: the office project. *Building and Environment*, 37(6):575–578, 2002.
- C. Scheiermann, Y. Kunisaki, und P. S. Frenette. Circadian control of the immune system. *Nature Reviews Immunology*, 13(3):190, 2013.
- A. Scholz, S. Henn, M. Stuhlmann, und G. Wäscher. A new mathematical programming formulation for the single-picker routing problem. *European Journal of Operational Research*, 253(1):68–84, 2016.
- C. Seward. Optimizing warehouse operations with machine learning on GPUs. <https://devblogs.nvidia.com/optimizing-warehouse-operations-machine-learning-gpus/>, 2015. accessed: 2018-10-26.
- C. Seward, R. Vollgraf, und U. Bergmann. Defeating the travelling salesman problem for warehouse logistics. https://jobs.zalando.com/tech/blog/defeating-the-travelling-salesman-problem-for-warehouse-logistics/?gh_src=4n3gxh1#id3, 2014. accessed: 2018-10-26.
- R. Sharma, A. C. Kumari, M. Aggarwal, und S. Ahuja. Optimal led deployment for mobile indoor visible light communication system: Performance analysis. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 83:427–432, 2018.
- E. Tappia, G. Marchet, M. Melacini, und S. Perotti. Incorporating the environmental dimension in the assessment of automated warehouses. *Production Planning & Control*, 26(10):824–838, 2015.
- M. ten Hompel, V. Sadowsky, und M. Beck. *Kommissionierung: Materialflusssysteme 2-Planung und Berechnung der Kommissionierung in der Logistik*. Springer-Verlag, 2011.
- C. Theys, O. Bräysy, W. Dullaert, und B. Raa. Using a tsp heuristic for routing order pickers in warehouses. *European Journal of Operational Research*, 200(3):755–763, 2010.
- S. V. Tiwari, A. Sewaiwar, und Y.-H. Chung. Smart home technologies using visible light communication. In *2015 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*, pages 379–380. IEEE, 2015.
- J. A. Tompkins, J. A. White, Y. A. Bozer, und J. M. A. Tanchoco. *Facilities planning*. John Wiley & Sons, 2010.
- D. Tranfield, D. Denyer, und P. Smart. Towards a methodology for developing evidence-informed management knowledge by means of systematic review. *British journal of management*, 14(3):207–222, 2003.
- United Kingdom Warehouse Association. Save energy, cut costs: Energy efficient warehouse, 2010. London.
- U.S. Energy Information Administration. Commercial buildings energy consumption survey (cbeccs), 2015. URL <http://www.eia.gov/consumption/commercial/data/2012>.
- C. A. Valle, J. E. Beasley, und A. S. da Cunha. Optimally solving the joint order batching and picker routing problem. *European Journal of Operational Research*, 262(3):817–834, 2017.
- W. J. Van Bommel. Non-visual biological effect of lighting and the practical meaning for lighting for work. *Applied ergonomics*, 37(4):461–466, 2006.
- T. Van Gils, K. Ramaekers, A. Caris, und R. B. de Koster. Designing efficient order picking systems by combining planning problems: State-of-the-art classification and review. *European Journal of Operational Research*, 267(1):1–15, 2018.
- J. Vanus, T. Stratil, R. Martinek, P. Bilik, und J. Zidek. The possibility of using vlc data transfer in the smart home. *IFAC-PapersOnLine*, 49(25):176–181, 2016.
- J. A. Veitch, M. G. Stokkermans, und G. R. Newsham. Linking lighting appraisals to work behaviors. *Environment and Behavior*, 45(2):198–214, 2013.
- J. Verriet, R. Hamberg, J. Caarls, und B. van Wijngaarden. Warehouse simulation through model configuration. In *ECMS*, pages 629–635, 2013.
- B. Von Neida, D. Maniccia, und A. Tweed. An analysis of the energy and cost savings potential of occupancy sensors for commercial lighting systems. *Journal of the Illuminating Engineering Society*, 30(2):111–125, 2001.
- F. Weidinger. Picker routing in rectangular mixed shelves warehouses. *Computers & Operations Research*, 95: 139–150, 2018.
- F. Weidinger, N. Boysen, und M. Schneider. Picker routing in the mixed-shelves warehouses of e-commerce retailers. *European Journal of Operational Research*, 274(2):501–515, 2019.

- J. Xiao und L. Zheng. Correlated storage assignment to minimize zone visits for bom picking. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 61(5-8):797–807, 2012.
- K. Yasodha, D. S. Sumathi, und P. Sheela. A smart energy efficient lighting system based on intelligent controller and sensors. *International Journal of Applied Engineering Research*, 10(3):5427–5434, 2015.
- A. Yasukouchi und K. Ishibashi. Non-visual effects of the color temperature of fluorescent lamps on physiological aspects in humans. *Journal of physiological Anthropology and Applied Human Science*, 24(1):41–43, 2005.
- S. Yoomak und A. Ngaopitakkul. Optimisation of lighting quality and energy efficiency of led luminaires in roadway lighting systems on different road surfaces. *Sustainable cities and society*, 38:333–347, 2018.

Abbildungsverzeichnis

3.1	Schematische Darstellung von vier möglichen Routenpolitiken	19
3.2	Beispiel für ein System zur Steuerung von FFTs durch VLC (aus Ghassemlooy et al. 2017).	21
3.3	Optimale Lösung einer Beispielinstantz des Standard-SPRP.	25
3.4	Optimale Lösung einer exemplarischen Instanz des Ein-Block-SPRP mit verteilter Lagerung, Kommissionierpositionen, von denen Artikel einer benötigte Lagerhaltungseinheit (LE) aufgenommen werden, sind schwarz markiert.	28
3.5	Optimale Lösung einer Beispielinstantz des Ein-Block-SPRP mit Entkopplung. An jeder Kommissionierposition wird nur eine LE gelagert und von jeder LE wird nur eine Position angefordert. Die Kapazität des Kommissionierers beträgt zwei Artikel und die Geschwindigkeit des Kommissionierers ohne Wagen ist doppelt so schnell wie in Begleitung eines Wagens. Die Abschnitte der Gangfolge, die der Kommissionierer ohne Wagen durchführt, werden durch gestrichelte Kanten gekennzeichnet.	29
3.6	Optimale Lösung einer Beispielinstantz des Ein-Block-SPRP mit mehreren Enddepots.	32
4.1	Layout des betrachteten Lagers in der Fallstudie	43
4.2	Energieverbrauch [kWh] der Beleuchtung im Lager	44
4.3	Energieverbrauch [kWh] der Beleuchtung in der Produktion und im Büro	45
4.4	Sensorbasierte intelligente Beleuchtungssysteme, die im Simulationsmodell berücksichtigt werden (links: SFI, rechts: SAZ)	47
4.5	Batching- und Zoning-Prinzip bei drei Kommissionierern	49
4.6	Energieverbrauch der Beleuchtungsstrategien für unterschiedliche Lagergrößen und Lagerplatzzuordnungen	51
4.7	Energieverbrauch für ein großes Lager mit bedarfsgerechter und zufälliger Lagerzuordnung mit unterschiedlich vielen Kommissionierern	52
4.8	Durchschnittlicher Energieverbrauch der vier Beleuchtungsstrategien für eine alternative Anzahl von Kommissionierern	53
4.9	Energieverbrauch von zwei Beleuchtungsstrategien für ein großes Lager und unterschiedliche Kommissionierarten und Lagerplatzvergabe	54
4.10	Energieverbrauch für alternative Nachfragestrukturen und Lagerplatzvergabe	55
4.11	Durchschnittlicher Energieverbrauch der Beleuchtungsstrategien für alternative Lagergrößen	55
4.12	Zwei Beispielhafte TS.	59
4.13	Die beiden Freiheitsgrade des Konstruktionsverfahrens aus Theorem 1.	59
4.14	Die Freiheitsgrade der beiden Beispiel-TS.	61
4.15	Verteilung der Beleuchtungszeiten für das Beispiel in Abschnitt 4.3.2. Die Entscheidungsvektoren der beiden Kommissionierer in (1) sind $\pi^1 = (0, 1, 0, 1, 1)$, $\pi^2 = (1, 1, 0)$ und in (2) $\pi^1 = (1, 0, 1, 0, 0)$, $\pi^2 = (1, 1, 0)$	62
4.16	Beispiel für die Überführung einer Instanz des Knotenüberdeckungsproblems (1) in eine Instanz des PSP. Die gezeigten TS entsprechen den Kanten $\{1, 2\}$ (2a), $\{1, 3\}$ (2b), $\{2, 3\}$ (2c) und $\{1, 4\}$ (2d). Gänge, welche der mit der jeweiligen Kante assoziierte Kommissionierer nicht betritt, sind nicht dargestellt.	63
4.17	Screenshot des Demo-Tools.	73

Tabellenverzeichnis

3.1	Überblick über die verwendeten Schlüsselwortgruppen in der Literaturrecherche.	12
3.2	Vergleich der Formulierungen SHSW, PCC und GS mit Standard-SPRP-Instanzen aus der Literatur.	35
3.3	Ergebnisse der neuen Formulierung auf zusätzlich generierten großen Standard-SPRP-Instanzen.	36
3.4	Vergleich der Formulierungen W und GS für das Ein-Block-SPRP mit verteilter Lagerung.	38
3.5	Ergebnisse für das Ein-Block-SPRP mit Entkopplung für verschiedene Werte des Reisezeitfaktors β und der Kommissionierkapazität C	40
3.6	Ergebnisse für verschiedene Wahrscheinlichkeiten σ , dass ein Gang oben oder unten ein Enddepot enthält.	41
4.1	Verwendete Simulationsparameter	48
4.2	Verwendete Lagergröße und Layoutparameter für die Simulationsstudie	49
4.3	Angenommene Parameter in der Simulationsstudie	50
4.4	Zusammenhang zwischen Arbeitszeit und Energieverbrauch für alle Kombinationen	55
4.5	Numerische Ergebnisse auf den UDD-Instanzen. Durchschnittswerte beziehen sich jeweils auf eine Instanzgruppe mit gleicher Anzahl an Kommissionierern.	68
4.6	Numerische Ergebnisse auf den CBD-Instanzen. Durchschnittswerte beziehen sich jeweils auf eine Instanzgruppe mit gleicher Anzahl an Kommissionierern.	69
8.1	Während der Projektlaufzeit durchgeführte Maßnahmen zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft.	78
8.2	Geplante Maßnahmen zum Ergebnistransfer nach Abschluss des Vorhabens.	80