

Schlussbericht vom 31.10.2022

zu IGF-Vorhaben Nr. 21292 N

Thema

Integration wirtschaftlicher und ergonomischer Kenngrößen in ganzheitliche Planungskonzepte von manuellen Lagerhaltungsprozesse

Berichtszeitraum

01.10.2020 bis 31.08.2022

Forschungsvereinigung

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

Forschungseinrichtung(en)

Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Produktion und Supply Chain Management (Forschungsstelle 1)

Technische Universität Darmstadt, Institut für Arbeitswissenschaft (Forschungsstelle 2)

Gefördert durch:

Planungskonzepte manueller Lagerhaltungsprozesse

Vorhaben Nr. 21292 N

Integration wirtschaftlicher und ergonomischer Kenngrößen in ganzheitliche Planungskonzepte von manuellen Lagerhaltungsprozesse

Schlussbericht

Kurzfassung:

Das Ziel des Projekts bestand in der Integration wirtschaftlicher und ergonomischer Kenngrößen in Planungs- und Optimierungskonzepte für die manuelle Lagerhaltung, insbesondere die manuelle Kommissionierung. Die Lagerhaltung ist ein grundlegender Bestandteil nahezu aller Wertschöpfungsketten und beeinflusst maßgeblich deren Flexibilität und Agilität. Gleichzeitig stellt sie einen signifikanten Kostenfaktor dar. Effizient gestaltete Lagersysteme sind daher essenziell für leistungsfähige Wertschöpfungsketten. Der überwiegende Teil von Lagersystemen wird manuell betrieben. Neben hohen Investitionskosten für automatisierte Systeme, die besonders für kleine und mittelgroße Unternehmen nicht rentabel sind, liegt der große Vorteil manueller Systeme in deren Flexibilität, die von automatisierten Systemen nicht erreicht wird und voraussichtlich auch in der nächsten Zukunft nicht erreichbar ist. Problematisch ist dabei allerdings, dass die beschäftigten ArbeiterInnen im Zuge der manuellen Arbeit häufig hohen körperlichen Belastungen ausgesetzt sind, was ihr Risiko, muskuloskelettale Erkrankungen zu entwickeln, erheblich erhöht. Neben negativen Auswirkungen auf das Wohlbefinden der ArbeiterInnen führen muskuloskelettale Erkrankungen zu Produktivitäts- und Qualitätsverlusten sowie Arbeitsausfällen, die direkte und indirekte Kosten für Unternehmen zur Folge haben. Es ist daher sinnvoll, bei der Gestaltung von Lagerhaltungssystemen ganzheitliche Planungskonzepte, die sowohl ökonomische als auch ergonomische Kenngrößen berücksichtigen, zu verwenden. Im Rahmen des Projekts wurden dazu a) Anforderungen an ganzheitliche Lagerplanungskonzepte analysiert und formuliert, b) ergonomische Kennzahlen für die Integration in die entsprechenden Planungskonzepte hergeleitet, c) konkrete Planungsmethoden auf Basis der mathematischen Optimierung entwickelt und d) mittels Rechenstudien allgemeine Handlungsempfehlungen abgeleitet. Die Bearbeitung der Themenstellung ist dabei stets in enger Zusammenarbeit mit dem Projektbegleitenden Ausschuss erfolgt.

Das Ziel des Forschungsvorhabens ist erreicht worden.

Förderhinweis:

Dieses Projekt wurde im Rahmen des IGF-Vorhabens 21292 N „Integration wirtschaftlicher und ergonomischer Kenngrößen in ganzheitliche Planungskonzepte von manuellen Lagerhaltungsprozesse“ 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 Scherb. Des Weiteren gilt unser Dank den UnternehmensvertreterInnen des Projektbegleitenden Ausschusses, die das Projekt mit vielen konstruktiven Ideen, praktischen Hinweisen und Erfahrungen bereichert haben. Ein besonderer Dank gilt den Unternehmen, die ihre Lager für projektbezogene Ergonomie- und Datenerhebungen zur Verfügung gestellt haben.

Inhaltsverzeichnis

1. Vorbemerkungen.....	7
2. Einleitung	8
2.1. Problemstellung	8
2.2. Wirtschaftlicher Nutzen der Forschungsergebnisse	10
3. Stand der Forschung und abgeleitete Forschungsfragen	13
3.1. Stand der Forschung	13
3.1.1. Betriebswirtschaftliche Planungskonzepte für die Lagerhaltung	13
3.1.2. Verfahren zur Belastungsanalyse körperlicher Tätigkeiten in manuellen Lagerprozessen	14
3.1.3. Interdisziplinäre Ansätze und Forschungslücke	16
3.2. Abgeleitete Forschungsfragen	17
3.3. Durchgeführte Arbeitsschritte zur Beantwortung der Forschungsfragen	17
4. Lösungsweg und durchgeführte Arbeiten	19
4.1. Anforderungen an Planungskonzepte für manuelle Lagerprozesse	19
4.1.1. Interviews mit den Unternehmensvertretern des Projektbegleitenden Ausschusses 19	
4.1.2. Workshop zu technischen Hilfsmitteln für die manuelle Lagerhaltung	20
4.1.3. Analyse geeigneter Belastungsbewertungsverfahren	22
4.1.4. Definition von Lagerhaltungsszenarien und Optimierungszielen	26
4.2. Ist-Analyse der körperlichen Belastungssituation in manuellen Lagern von KMU	27
4.3. Entwicklung integrativer ergonomischer Kennzahlen	29
4.3.1. Vorgehen bei der Bestimmung der Ergonomie-Kennzahlen	29
4.3.2. Berechnung der Ergonomie-Kennzahlen.....	32
4.3.3. Bestimmung der Haltungspunkte.....	34
4.3.4. Ergebnisse der Praxiserhebungen	36
4.3.4.1. Haltungspunkte	36
4.3.4.2. Einhändige Lastenhandhabung	38
4.3.4.3. Ausführungspunkte	38
4.3.4.4. Ergonomie-Kennwerte in tabellarischer Form.....	38
4.4. Entwicklung von Optimierungsmodellen und Lösungsverfahren zur ganzheitlichen Optimierung von Lagerprozessen.....	40
4.4.1. Optimierungskonzept.....	40
4.4.2. Optimierungsmodell „Palettenlager“	41
4.4.3. Optimierungsmodell „Fachboden-\ Kleinteilelager“	44
4.4.4. Lösungsverfahren	46

4.5.	Durchführung von numerischen Experimenten.....	49
4.5.1.	Numerische Experimente zum „Palettenlager“	49
4.5.1.1.	Generierung von Instanzen für das „Palettenlager“	49
4.5.1.2.	Pareto-Evaluation des „Palettenlagers“	50
4.5.1.3.	Eigenschaften optimierter „Palettenlager“	52
4.5.1.4.	Geeignete Layouts für „Palettenlager“	57
4.5.1.5.	Querlagerung von Paletten im „Palettenlager“	59
4.5.1.6.	Abgleich der entwickelten Kennzahlen mit EAWS anhand der Lösungen für das „Palettenlager“	61
4.5.2.	Numerische Experimente zum „Fachboden-\ Kleinteilelager“	62
4.5.2.1.	Generierung von Instanzen für das „Fachboden-\ Kleinteilelager“	62
4.5.2.2.	Pareto-Evaluation des „Fachboden-\ Kleinteilelagers“	63
4.5.2.3.	Eigenschaften optimierter „Fachboden-\ Kleinteilelager“	64
4.5.2.4.	Geeignete Layouts für „Fachboden-\ Kleinteilelager“	67
4.5.2.5.	Einfluss des Kommissionierwagens im „Fachboden-\ Kleinteilelager“	69
4.5.2.6.	Abgleich der entwickelten Kennzahlen mit EAWS anhand der Lösungen für das „Fachboden-/ Kleinteilelager“	69
4.6.	Ableitung von übergreifenden Handlungsempfehlung	70
4.6.1.	Spezielle Handlungsempfehlungen	71
4.6.1.1.	Handlungsempfehlungen für „Palettenlager“	71
	Routenführung bei „Palettenlagern“	71
	Lagerplatzvergabe bei „Palettenlagern“	71
	Layouts bei „Palettenlagern“	74
4.6.1.2.	Handlungsempfehlungen für „Fachboden-\ Kleinteilelager“	74
	Routenführung bei „Fachboden-\ Kleinteilelagern“	74
	Lagerplatzvergabe bei „Fachboden-\ Kleinteilelagern“	75
	Layouts bei „Fachboden-\ Kleinteilelagern“	77
4.6.2.	Allgemeine Handlungsempfehlungen	77
4.6.2.1.	Anthropometrische Gestaltung von Lagersystemen	78
	Maximale Entnahmehöhe:	78
	Vertikaler Greifraum:	78
4.6.2.2.	Empfehlungen zu maximal zulässigen Lastgewichte	81
	Maximale Gewichte in Abhängigkeit der Greifhöhe:	81
4.6.2.3.	Empfehlungen zu technischen Hilfsmitteln	83
	Kategorie 1: Ladungsträger und Regalsysteme	84
	Kategorie 2: Fahr- und Förderzeuge	85

Kategorie 3: Greif- und Hebehilfen.....	86
5. Angaben zu den aus der Zuwendung finanzierten Ausgaben für Personenmonate des wissenschaftlich-technischen Personals	87
6. Erläuterung der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	88
7. Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der erzielten Ergebnisse	89
8. Ergebnistransfer in die Wirtschaft	91
8.1. Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit.....	91
8.2. Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit.....	93
9. Zusammenfassung und Schlussbetrachtung	94
10. Anhang	95
Anhang 1: Paarvergleich der Anforderungen an die Belastungsbewertungsverfahren	95
Anhang 2: Zielerfüllungsgrade.....	96
Anhang 3: Steckbriefe der Lagerhaltungsszenarien	97
Steckbrief – „Palettenlager“:.....	97
Steckbrief – „Fachboden-/Kleinteilelager“:	97
Steckbrief – „Stollenlager“:.....	98
Anhang 4: Ergonomie-Kennzahlen in tabellarischer Form	100
11. Referenzen	101

1. Vorbemerkungen

Das Vorhaben „Integration wirtschaftlicher und ergonomischer Kenngrößen in ganzheitliche Planungskonzepte von manuellen Lagerhaltungsprozesse“ (Kurztitel: „Planungskonzepte manueller Lagerhaltungsprozesse“) wurde im Förderzeitraum von Oktober 2020 bis August 2022 unter der Leitung von Prof. Dr. Christoph Glock, Jun.-Prof. Dr. Eric Grosse und Heiko Diefenbach am Fachgebiet Produktion und Supply Chain Management (FS 1) sowie Prof. Dr.-Ing. Ralph Bruder, Dr.-Ing. Jurij Wakula und Dr.-Ing. Tim Steinebach am Institut für Arbeitswissenschaft (FS 2) der Technischen Universität Darmstadt durchgeführt. Im Rahmen des Projektes wurden mit den Unternehmen des Projektbegleitenden Ausschusses (PA) sowie mit weiteren Experten aus der Praxis Interviews, Workshops und Vor-Ort-Besuche zur Datenaufnahme durchgeführt.

Das IGF-Vorhaben 21292 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 sechs Arbeitsschritten. Der vorliegende Projektbericht ist wie folgt gegliedert. Zunächst wird in Abschnitt 2 eine Einleitung in die Problemstellung des Forschungsprojekts gegeben und anschließend die Zielsetzung des Projekts sowie die sechs Arbeitsschritte definiert. Der Stand in Forschung und Entwicklung wird in Abschnitt 3 vorgestellt. In Abschnitt 4 werden die für die Beantwortung der Forschungsfragen gewählten Lösungswege und erzielten Ergebnisse vorgestellt. Die Verwendung der Zuwendungen sowie die Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit wird in den Abschnitten 0 und 6 dargestellt. Abschnitt 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 Abschnitt 8 dargestellt. Abschnitt 9 fasst das Projekt zusammen und bewertet abschließend die Ergebnisse.

2. Einleitung

2.1. Problemstellung

Die Lagerhaltung ist ein wichtiger Bestandteil jeder Wertschöpfungskette und leistet einen entscheidenden Beitrag zu Liefertreue und Kundenzufriedenheit. Der hohe Kostendruck im produzierenden Gewerbe und im Einzelhandelssektor zwingt Unternehmen immer mehr, interne logistische Prozesse im Allgemeinen und die Lagerhaltung im Speziellen effizienter zu gestalten, um langfristig im internationalen Wettbewerb zu bestehen. Typische Prozesse der Lagerhaltung bestehen aus der Einlagerung, der Kommissionierung, der Verpackung und dem innerbetrieblichen Transport (de Koster et al., 2007). Vor allem die Entnahme und der Transport von Waren sind in vielen Unternehmen besonders arbeits- und zeitintensiv und erfolgen größtenteils manuell mit nur teilweiser technischer Unterstützung (z. B. durch Barcode-Scanner oder Pick-by-Light-Systeme). Diese Lagerhaltungsprozesse stellen daher einen bedeutenden Kostenfaktor dar (de Koster et al., 2007; Baker und Perotti, 2008; Napolitano, 2012; Behnisch et al., 2017). Die Planung der Lagerprozesse hat somit einen entscheidenden Einfluss auf Durchlaufzeiten und Servicegrade. Auch wenn durch das Voranschreiten von Industrie 4.0 und der digitalen Transformation technische Hilfsmittel und Automatisierungslösungen bei der Lagerhaltung zum Einsatz kommen (Winkelhaus und Grosse, 2020), liegt in den meisten Lagern der Großteil der Arbeitsleistung nach wie vor beim Menschen. Der Mensch, und vor allem seine Kombination aus kognitiven und motorischen Fähigkeiten und Fertigkeiten, lässt sich bisher in der innerbetrieblichen Logistik nur in Ausnahmefällen wirtschaftlich durch (voll-)automatisierte Systeme substituieren (Arnold, 2005). Automatisierte Systeme sind darüber hinaus in der Regel auch mit sehr hohen Investitionskosten und geringer Flexibilität verbunden (Emde und Boysen, 2017), sodass viele Unternehmen bisher auf eine vollständige Automatisierung der Lagerhaltung verzichten. Menschliche Arbeitsleistung ist daher auch heute noch ein wichtiger Bestandteil von Lagerprozessen (Behnisch et al., 2017; Grosse et al., 2015), die in fast jedem Unternehmen und fast jeder Branchen anfallen (Arnold und Furmans, 2005; Scholl, 2009). Es kann daher davon ausgegangen werden, dass aufgrund der hohen Flexibilitätsanforderungen auch in Zukunft viele Unternehmen, in denen Lagerprozesse notwendig sind, und hierbei insbesondere kleine und mittlere Unternehmen (KMU), grundsätzlich auf menschliche Arbeit in der Lagerhaltung setzen werden, die problembezogen durch technische Hilfsmittel unterstützt wird. Statistiken über die im Lager beschäftigten Mitarbeiter¹ bestätigen diesen Trend. So hat sich die Anzahl der sozialversicherungspflichtig beschäftigten Transport- und Lagerarbeiter in Deutschland von 1999 bis 2011 von 444.000 auf 561.000 und die Anzahl der Beschäftigten in Spedition und Logistik in Deutschland in den Jahren 2000 bis 2017 von 383.000 auf 578.000 deutlich erhöht (Statistisches Bundesamt, 2017a; DSLV, 2019).

Der hohe Anteil an manuellen Arbeitstätigkeiten in der Lagerhaltung birgt jedoch ein hohes Krankheits- und Schädigungsrisiko für die beteiligten Mitarbeiter (Waters et al., 1998). So kann sich das Risiko für muskuloskelettale Erkrankungen, wie bspw. Rückenleiden, erhöhen, wenn schwere Lasten gehoben bzw. getragen werden oder wenn die oberen Extremitäten durch repetitive, kraftvolle Bewegungen belastet werden. Arbeitsunfähigkeitsdaten bezüglich Lager- und Transporttätigkeiten in Badura et al. (2016) verdeutlichen dieses branchenbedingte Risiko. Auf 100 Versicherte kommen in Berufen der Lagerwirtschaft mit steigender Tendenz 224,0 Arbeits-

¹ Aus Gründen der verkürzten Schreibweise und besseren Lesbarkeit wird hier und im Folgenden das generische Maskulinum verwendet. Gemeint sind stets Personen jeglichen Geschlechts.

unfähigkeitsfälle pro Jahr. Der bundesdeutsche Durchschnitt liegt branchenübergreifend bei deutlich geringeren 167,6 Fällen. Die jährlichen Kosten krankheitsbedingter Fehlzeiten in deutschen Unternehmen betragen ca. 80 Mrd. Euro durch den Verlust an Arbeitsproduktivität (BAuA, 2014). Ca. 30 % der krankheitsbedingten Fehlzeiten in Unternehmen sind auf muskuloskelettale Erkrankungen zurückzuführen, im europäischen Transport- und Lagersektor sogar über 60 % (Schneider und Irastorza, 2010). Diese Entwicklung wird durch den demographischen Wandel verschärft (Statistisches Bundesamt, 2017b), sodass sich Unternehmen aufgrund demographischer Veränderungen auch in der Arbeitnehmerschaft in der Logistik zunehmend mit der sinkenden körperlichen Belastbarkeit und dem steigenden Krankenstand älterer Beschäftigter auseinandersetzen müssen (Rademacher et al., 2011; Calzavara et al., 2020).

Unternehmen stehen in der Pflicht, Vorgaben, wie z. B. das Arbeitsschutzgesetz und die Lastenhandhabungsverordnung, durch ergonomische Maßnahmen einzuhalten und das Erkrankungsrisiko gering zu halten. In vielen Industriezweigen werden für solche Zwecke Screening-Belastungsbewertungsverfahren, wie z. B. das am IAD entwickelte Expertenscreeningverfahren – Ergonomic Assessment Worksheet (EAWS) –, eingesetzt, mit dem Ziel, ein mögliches Risiko hinsichtlich der körperlichen Belastungen zu analysieren, zu beurteilen und Gestaltungsmöglichkeiten aufzuzeigen (Schaub et al., 2013). Neben den gesundheitlichen Auswirkungen der Lagertätigkeiten auf die Mitarbeiter haben auf der anderen Seite die Leistungsfähigkeit, Leistungsbereitschaft und Motivation der Mitarbeiter einen großen Einfluss auf die Produktivität und Qualität des Lagerprozesses.

Hauptsächlich aufgrund der hohen Kostenwirkung haben Wissenschaftler in den vergangenen Jahrzehnten Planungskonzepte zur Verbesserung von manuellen Lagerprozessen entwickelt (vgl. De Koster et al., 2007). Unter (ganzheitlichen) Planungskonzepten wird im Folgenden ein ganzheitlicher Ansatz verstanden, der sowohl mathematische Modelle zur Optimierung von Lagerprozessen (etwa in Bezug auf die Lagerplatzvergabe oder die Routenführung durch das Lager), Kennzahlensysteme (etwa zur Messung von Durchlaufzeiten, der Anzahl von Pickfehlern oder zur arbeitswissenschaftlichen Bewertung von Arbeitsplätzen in der Lagerhaltung) als auch Richtlinien zur Anwendung der mathematischen Modelle und der Kennzahlensysteme beinhaltet. Eine genauere Analyse der bestehenden Literatur zeigt, dass betriebswirtschaftlich orientierte Planungskonzepte für Lagerprozesse regelmäßig die Leistungsfähigkeit, Leistungsbereitschaft und Motivation der Lagermitarbeiter ausblenden, sodass auch Aspekte wie Belastungsintensitäten, Ermüdung oder das Auftreten von Fehlern unberücksichtigt bleiben (Grosse et al., 2015). So werden in der überwiegenden Anzahl der verfügbaren betriebswirtschaftlichen Planungskonzepte nur einfach messbare, wirtschaftliche Zielgrößen – wie z. B. durch den Arbeiter zurückzulegende Wegstrecken oder die für die Durchführung des Ein- oder Auslagerungs- bzw. Entnahmevergangs benötigte Zeit – optimiert. Auswirkungen, die die Gestaltung des Lagers oder der Ablauf der Prozesse auf die Arbeitsausführung und die Gesundheit der in der Lagerhaltung beschäftigten Mitarbeiter haben, bleiben unberücksichtigt. Arbeitswissenschaftliche Planungskonzepte (z. B. Kadefors und Forsman, 2000; Lavender et al., 2006; Lavender et al., 2012; Günthner, 2014) vernachlässigen hingegen in der Regel wirtschaftliche Kenngrößen bzw. nehmen üblicherweise keine Prozessoptimierung vor. Es ist jedoch leicht ersichtlich, dass zur Realisierung eines effizienten und nachhaltigen Lagerprozesses sowohl wirtschaftliche Zusammenhänge als auch die Auswirkungen des Lagervorgangs auf die beschäftigten Mitarbeiter und somit arbeitswissenschaftliche Zusammenhänge berücksichtigt werden müssen. Mithin werden ganzheitliche Planungskonzepte von manuellen Lagerprozessen benötigt, die beide Sichtweisen (betriebswirtschaftliche und arbeitswissenschaftliche) integrieren. Nur wenige Arbeiten haben bislang solche

integrierten Planungskonzepte für Lagerprozesse vorgeschlagen, die sowohl wirtschaftliche als auch arbeitswissenschaftliche Kennzahlen berücksichtigen (z. B. Battini et al., 2016; Calzavara et al., 2017; Larco et al., 2017). In den wenigen Arbeiten, die integrierte Planungskonzepte entwickeln, wurden jedoch sehr einfache arbeitswissenschaftliche Konzepte verwendet (wie etwa das Energy Expenditure Modell von Garg et al., 1978), sodass die durch den Lagervorgang bedingte Belastung der Lagermitarbeiter nicht realistisch dargestellt wird. Obwohl arbeitswissenschaftliche Methoden zur Verbesserung der Arbeitssicherheit in der Lagerlogistik zum Einsatz kommen, werden ganzheitliche Planungskonzepte bisher, auch in großen Unternehmen, nicht weit verbreitet eingesetzt. Dies liegt u.a. daran, dass kommerzielle Warehouse Management Systeme bisher keine simultane Planung bzw. Optimierung von betriebswirtschaftlichen Größen und arbeitswissenschaftlichen Kennzahlen ermöglichen.

Das identifizierte Forschungsdefizit ist daher das Fehlen ganzheitlicher Planungskonzepte für die manuelle Lagerhaltung, die sowohl betriebswirtschaftliche als auch arbeitswissenschaftliche Kenngrößen berücksichtigen, um einen nachhaltig effizienten Lagerprozess insbesondere bei KMU zu gewährleisten. Als Untersuchungsobjekte definiert wurden aufgrund ihrer besonderen Zeit- und Arbeitsintensität insbesondere die manuelle Warenentnahme und der manuelle Warentransport. Es ist offensichtlich, dass die fehlende Berücksichtigung von Faktoren wie Gewichte von Lasten, einzunehmende Körperhaltungen, Aktionskräfte, Überlastung und Belastungswechsel in (insbesondere betriebswirtschaftlich orientierten) Planungskonzepten dazu führt, dass die Ergebnisse der Planung nur bedingt mit realen Einsatzbedingungen kompatibel sind (Grosse et al., 2017). Die Konsequenz kann sein, dass geplante Prozessergebnisse und -verbesserungen nicht erzielt werden können (sog. „Phantom Profits“, vgl. Neumann, 2004) oder dass die Arbeitsqualität abnimmt, da menschliche Fehler (z. B. sog. Pickfehler, d. h. falsch kommissionierte Artikel) aufgrund von Überbeanspruchung und/ oder Ermüdung während des Arbeitsablaufs zunehmen können (z. B. Lolling, 2002). Aus den genannten Gründen werden interdisziplinäre, ganzheitliche Planungskonzepte mit summarischen Kennzahlen benötigt, die sowohl die Belastungssituation als auch betriebswirtschaftliche Faktoren, wie z. B. Durchlaufzeiten oder Kosten, im Planungsablauf berücksichtigen, um v. a. vor dem Hintergrund des demographischen Wandels langfristig sowohl die Produktivität und Qualität der Lagerhaltung als auch die Arbeitsplatzqualität zu erhöhen und das Risiko von Überbeanspruchungen und daraus resultierenden muskuloskelettalen Erkrankungen zu senken. Diese ganzheitlichen Planungskonzepte sollen v.a. KMU als Instrumente zur technischen Gestaltung (z. B. für die Layoutplanung des Lagers) und zur Steuerung von Prozessen (z. B. für die Routenführung und die Artikelzuordnung auf Lagerfächer) dienen. Eine detaillierte Nutzenanalyse des Projekts mit besonderem Bezug auf KMU ist im folgenden Abschnitt dargestellt.

2.2. Wirtschaftlicher Nutzen der Forschungsergebnisse

Trotz zunehmender Möglichkeiten der Automatisierung wird in den meisten Lagern nach wie vor manuell gearbeitet, wenngleich der innerbetriebliche Transport immer mehr automatisiert abläuft und einzelne Prozessschritte auch zunehmend technisch unterstützt werden (de Koster et al., 2007, Baker und Perotti, 2008; Napolitano, 2012; Behnisch et al., 2017; Winkelhaus et al., 2021). Gerade für KMU hat sich jedoch gezeigt, dass die Automatisierungsgrade in der Lagerhaltung oftmals sehr niedrig sind (Baker und Perotti, 2008; Behnisch et al., 2017). Die Dominanz manueller Lagersysteme in der Praxis wird zum einen dadurch bedingt, dass solche Systeme deutlich flexibler sind als automatisierte Systeme, und zum anderen sind vollautomatisierte Lager in der

Regel mit sehr hohen Investitionskosten verbunden (ten Hompel et al., 2010). Gerade KMU, bei denen die vergleichsweise geringe Anzahl der bedienten Lagerplätze keine wirtschaftliche Nutzung von automatisierten Systemen zulässt (Hohberger und Damlachi, 2014) und die nur über begrenzte personelle und finanzielle Ressourcen verfügen, werden daher auch in Zukunft verstärkt auf die manuelle Lagerhaltung setzen. Studien gehen davon aus, dass bspw. der Anteil von manuellen Kommissioniersystemen in KMU mit bis zu 74 % sehr hoch ist (Straube et al., 2005; Günthner et al., 2014). KMU verfügen in der Regel über keine eigene Logistikplanungsabteilung. Da die begrenzten Ressourcen zur Erfüllung des Kerngeschäfts genutzt werden, wird eine strategische oder ganzheitliche Planung gerade für Lagerprozesse nur selten durchgeführt (Scholl, 2009; Pfohl, 2013). Betriebswirtschaftliche Optimierungen oder ergonomische Verbesserungen der Lagerprozesse werden daher aufgrund mangelnder Ressourcen oftmals nicht im erforderlichen Maße umgesetzt. Die im Projekt entwickelten ganzheitlichen Planungskonzepte sollen daher durch gezielte Handlungsempfehlungen die Wettbewerbsfähigkeit von KMU in einem bisher so noch nicht untersuchten Feld erhöhen. Der sich aus dem Projekt ergebende Nutzen für KMU und die Erwartungshaltung an die Ergebnisse des Projektes können wie folgt zusammengefasst werden:

1. Das Projekt zeigt die Potenziale einer ganzheitlichen Planung von Lagerprozessen auf und sensibilisiert KMU für die Notwendigkeit, betriebswirtschaftliche und arbeitswissenschaftliche Zielsetzungen in der Lagerhaltung gleichermaßen zu berücksichtigen.
2. Das Projekt verdeutlicht, wie eine ganzheitliche Planung von Lagerprozessen erreicht werden kann. Es gibt damit insbesondere KMU Hilfestellung bei der Umstellung bestehender Planungskonzepte auf eine integrierte Planung.
3. Die verwendeten Ergonomie-Kennzahlen können von KMU genutzt werden, um Lagerprozesse entsprechend aktueller arbeitswissenschaftlicher Erkenntnisse zu analysieren. Sie dienen somit als Entscheidungsunterstützung für das Management.
4. KMU soll durch die ganzheitlichen Planungskonzepte eine Hilfestellung zur Abschätzung der relativen Veränderung von wirtschafts- und arbeitswissenschaftlichen Kenngrößen bei der Verwendung von technischen Assistenzsystemen/ Hilfsmitteln gegeben werden.
5. Die im Rahmen der Konzeptentwicklung erstellten mathematischen Optimierungsmodelle werden zusammen mit den zugehörigen Lösungsverfahren in einer höheren Programmiersprache implementiert, um daraus mittels einer numerischen Studie Handlungsempfehlungen und Gestaltungsvorschläge abzuleiten. Dies erlaubt es KMU, ohne Investitionen in teure, spezialisierte Softwareprodukte die Auswirkungen einer ganzheitlichen Planung von Lagerprozessen auf das eigene Unternehmen zu prüfen.

Das Projekt bietet für KMU daher Vorteile, die sich aus den integrierten Planungskonzepten ergeben. Neben den mit höherer Prozesseffizienz verbundenen Kosteneinsparungspotenzialen leistet die integrierte Planung einen wichtigen Beitrag zur Umsetzung nachhaltiger Konzepte in der Lagerhaltung, da vor dem Hintergrund des demographischen Wandels insbesondere die physische Belastung von Mitarbeitern in der Lagerhaltung weiter an Bedeutung gewinnen wird. Das Projekt trägt somit auch zur Erreichung gesellschaftlicher Ziele bei. Aufgrund des starken sozialen Interesses an derartigen nachhaltigen Initiativen ist eine positive Wirkung auch auf das Unternehmensimage zu erwarten, die sich langfristig in einer verbesserten Wettbewerbssituation niederschlagen kann. KMU können die Ergebnisse des Forschungsprojekts zur technischen Gestaltung

der Lagerprozesse nutzen, um bereits kurzfristig die Effizienz zu steigern und gleichzeitig langfristig das Risiko muskuloskelettaler Erkrankungen zu senken. Eine Verringerung bzw. Optimierung der Mitarbeiterbelastung geht hierbei explizit nicht zwingend mit einer (signifikanten) Reduktion der Mitarbeiterleistung einher, da über die ganzheitlichen Planungskonzepte ebenso Kostenminimierungsziele verfolgt werden. Dies führt dazu, dass krankheitsbedingte Fehlzeiten sowie eine Fluktuation von Arbeitskräften verringert werden können, was durch den langfristigen Erhalt erfahrener Mitarbeiter die Wettbewerbsfähigkeit von KMU nachhaltig fördert (Remdisch und Unger, 2012).

3. Stand der Forschung und abgeleitete Forschungsfragen

3.1. Stand der Forschung

Für das vorliegenden stark interdisziplinär ausgerichtete Projekt sind zwei Forschungsströme von besonderer Relevanz: betriebswirtschaftliche Arbeiten, die sich mit der Planung und Steuerung von Lagervorgängen beschäftigen, sowie arbeitswissenschaftliche Arbeiten, die ergonomische Bewertungsmethoden für physische Belastungen entwickeln und darauf basierend Gestaltungsmaßnahmen ableiten. Besonders relevant sind Arbeiten, die an der Schnittstelle zwischen der Arbeitswissenschaft und der Betriebswirtschaftslehre anzusiedeln sind und die Lagerprozesse aus einer interdisziplinären Perspektive untersuchen. Dieser interdisziplinäre Forschungszweig, zu dem auch das vorliegende Projekt beiträgt, gewinnt gerade in den letzten Jahren zunehmend an Aufmerksamkeit. Relevante Arbeiten werden im folgenden Abschnitt kurz beleuchtet.

3.1.1. Betriebswirtschaftliche Planungskonzepte für die Lagerhaltung

Wissenschaftliche Arbeiten zur Planung von manuellen Lagerprozessen, denen in der Praxis nach wie vor eine besondere Bedeutung zukommt, v.a. auch, weil diese Tätigkeiten sehr kosten- und zeitintensiv sind (vgl. Frazelle, 2002; Tompkins et al., 2010; Grosse et al., 2015), konzentrieren sich in der Regel auf die Minimierung der anfallenden Kosten. Die Kosten werden hierbei im Wesentlichen durch vier Faktoren beeinflusst: 1) Das Lagerlayout, das die Anordnung der Warenregale und der Gänge des Lagers festlegt, 2) die Lagerplatzvergabe, die die Zuordnung der Produkte auf die zur Verfügung stehenden Regalplätze bestimmt, 3) das „Order Batching“, das Lageraufträge zusammenfasst oder aufsplittet, sowie 4) die operativen Ausführungsstrategien, die die Route vorgeben, auf denen sich der Mitarbeiter durch das Lager bewegt, um Produkte aus den Regalfächern zu entnehmen (Routenführung). 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 Projekt relevant (vgl. zu den genannten Planungsproblemen auch de Koster et al., 2007; Chackelson et al., 2013 und Davarzani und Norman, 2015). Im Entscheidungsproblem „Lagerplatzvergabe“ wird die Zuteilung von Produkten auf die Lagerplätze untersucht. In der Literatur werden hierbei zwei grundlegende Lagerplatzvergabepolitiken, die Zufallssortierung (chaotische Lagerplatzvergabe) und die feste Lagerplatzzuordnung (dedizierte Lagerplatzvergabe), unterschieden (siehe de Koster et al., 2007; Gu et al. 2007, 2010). 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, dem Ort, an dem kommissionierte Artikel abgegeben werden, positioniert werden, um lange Wegstrecken zu vermeiden (vgl. Battini et al., 2015). Artikel, die häufig gemeinsam nachgefragt werden, sollten hingegen nebeneinander eingelagert werden (Korrelationssortierung, vgl. Brynzér und Johansson, 1996; Glock und Grosse, 2012; Xiao und Zheng, 2012). Zudem können weitere Eigenschaften der Artikel (wie z. B. Abmessungen oder Gewichte), die einen Einfluss auf die Entnahmezeit haben, bei der Lagerplatzvergabe berücksichtigt werden (Finnsgård und Wänström, 2013; Galka und Günthner, 2016). Da sich in vielen Betrieben regelmäßig Änderungen in Absatzstrukturdaten, Auftragsstrukturdaten und Sortimentsdaten ergeben, wurde von ten Hompel et al. (2007) ein Simulationsmodell entwickelt, das die Planung von Lagerprozessen anhand logistischer Leistungsgrößen unter Berücksichtigung veränderter Anforderungen unterstützt. In regelmäßigen Abständen sollte zudem

die Lagerplatzvergabe daraufhin überprüft werden, ob durch Änderungen in der Nachfragestruktur der Artikel Reorganisationsmaßnahmen nötig werden. Im IGF-Projekt „ReKom“ wurde daher eine Methodik entwickelt, welche die mit der Durchführung von Reorganisationsmaßnahmen verbundenen Kosten mit dem Mehraufwand, der durch eine ineffiziente Lagerplatzbelegung verursacht wird, abgleicht und entsprechende Entscheidungsunterstützung bietet (Korte et al., 2017). Neben Absatzveränderungen unterliegt die Lagerhaltung Auslastungsschwankungen, die bspw. saison- oder lebenszyklusbedingt sind, wofür entsprechende Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung entwickelt wurden (Scholl, 2009). 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 kleine Aufträge am Lager ankommen, die nicht wirtschaftlich abgearbeitet werden können, oder dann, wenn Aufträge zu groß sind, sodass sie von einem einzelnen Mitarbeiter nicht in einer Tour abgearbeitet werden können. Verfahren des Order Batching können insbesondere zu einer Verringerung der Wegzeit beitragen, da bestimmt wird, welche Kundenaufträge in einer Tour 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 konzentrierten sich jedoch auf die Entwicklung und Anwendung von heuristischen (vgl. Bozer und Kyle, 2008; Hsieh und Huang, 2011; Hong et al., 2012) bzw. metaheuristischen Lösungsverfahren (vgl. Henn und Schmid, 2013; Matusiak et al., 2014; Grosse et al., 2014). Das Entscheidungsproblem „Routenplanung“ entwickelt Routenpolitiken in Lagern und versucht, für Aufträge eine Reihenfolge für das Aufsuchen von Lagerplätzen zu ermitteln, die die zurückzulegende Wegstrecke (und äquivalent die dafür benötigte Zeit) minimiert (für einen Überblick siehe Masae et al., 2020a). Obwohl für bestimmte rechtwinklige Lagerlayoutvarianten optimale Routen berechnet werden können (de Koster und van der Poort, 1998), lag der Schwerpunkt der Forschung in der Vergangenheit auf der Entwicklung einfacher heuristischer Lösungsverfahren, die zwar nicht unbedingt eine optimale Route 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). Einige Studien zeigten, dass heuristische Routenpolitiken in vielen Fällen zu sehr guten Ergebnissen führen, sodass sie aufgrund ihrer einfachen Umsetzbarkeit in der betrieblichen Anwendung bevorzugt werden (Hwang et al., 2004; Petersen und Aase, 2004; Pan et al., 2014).

Es existieren zudem Arbeiten, die verschiedene Entscheidungsprobleme kombinieren. Beispielfhaft kann hier das IGF-Forschungsvorhaben von ten Hompel et al. (2010) genannt werden, in welchem mittels Simulation die Lagerplatzvergabe, das „Order Batching“ und die Routenplanung kombiniert durchgeführt wurden. Zudem wurde neben der reinen Betrachtung der Performance (d. h. Wegstreckenminimierung) die Qualität (d. h. Fehlervermeidung) als zweites Zielkriterium betrachtet. Für einen tiefergehenden Überblick über weitere Arbeiten, die Entscheidungsprobleme der Lagerhaltung kombinieren, wird auf den Literaturüberblick von van Gils et al. (2018) verwiesen.

3.1.2. Verfahren zur Belastungsanalyse körperlicher Tätigkeiten in manuellen Lagerprozessen

In der Vergangenheit konnten diverse Wirkungszusammenhänge zwischen möglichen Gesundheitsrisiken und ergonomischen Gestaltungsmaßnahmen bezüglich der Arbeitsumgebungsfaktoren bei der manuellen Materialhandhabung in der Lagerhaltung identifiziert werden (Denis et al., 2006; Lavender et al., 2010). Zur Quantifizierung und Bewertung von vorwiegend physischen Belastungen liefert die arbeitswissenschaftliche Forschung eine Vielzahl verschiedener Ansätze

und Methoden (Kugler et. al., 2010; Ditchen und Brandstädt, 2015). Die Auswahl und Weiterentwicklung von u. a. am IAD entwickelten Belastungsbewertungsverfahren, die sich zur Analyse von Lagertätigkeiten eignen, ist daher ein notwendiger Schritt zur Erweiterung der derzeit überwiegend betriebswirtschaftlich orientierten Planung von Lagerprozessen um Erkenntnisse und Instrumente der Arbeitswissenschaft/ Ergonomie.

In Bezug auf die summarische Gesamtbewertung einer Belastungssituation unter Berücksichtigung aller in der arbeitswissenschaftlichen Literatur (Schaub et al., 2012) genannten physischen Belastungsarten wie der manuellen Lastenhandhabung, Körperhaltungen/ Zwangshaltungen, Aktionskräfte und repetitive Bewegungen der oberen Extremitäten gibt es noch Handlungsbedarf. Die entsprechenden etablierten Verfahren sollen im vorliegenden Projekt durch die Bildung von Ergonomie-Kennzahlen an die Anforderungen der Lagerhaltung angepasst werden. Im Fokus sollen hierbei manuelle Tätigkeitsmuster während typischer Lagertätigkeiten stehen. Eine Berechnungsmethode zur Belastungsermittlung wurde bspw. von Walch (2011) auf der Grundlage der BAuA-Leitmerkmalmethode „Heben, Tragen, Halten“ (LMM) (BAUA, 2001) entwickelt, um eine altersgerechte Logistikgestaltung im Lager zu erzielen. Hierfür wurde die LMM auf die Anforderungen der Lagerhaltung angepasst und eine sog. „adaptierte LMM“ erarbeitet. Dabei wurde der Schwerpunkt auf die Inter- sowie Extrapolation der Zeit- und Lastwichtung der LMM gelegt. Die repetitiven Handhabungen von kleineren Gewichten (< 5 kg) und damit hohe Belastungen für obere Extremitäten und Risiken für muskuloskeletale Erkrankungen des Hand-Arm-Schulter-Bereichs bleiben jedoch unberücksichtigt. Zusätzlich berücksichtigen alle in Walch (2011) verwendeten Verfahren keine Anforderungen bezüglich höheren Aktionskräften. Obwohl Interdependenzen mit der Lagerplanung angesprochen wurden, lag der Fokus dieser Arbeit auf der Belastungsermittlung mit vorwiegend screeningbasierten Verfahren und nicht auf der integrierten Optimierung von Belastungs- und operativen Planungsparametern. Eine betriebswirtschaftliche Optimierung unter Berücksichtigung von Auftragsstrukturen, Order Batching und Routenführung erfolgte nicht.

Die durch die IGF geförderten Projekte „ErgoKom“ (Günthner, 2014), „ErgoWMS“ (Günthner und Koch, 2014) und „Ganzheitliche Bewertung und Optimierung manueller Arbeitsplätze in Kommissioniersystemen“ (ten Hompel et al., 2005) haben bereits untersucht, inwieweit jeweils eine der insgesamt vier physischen Belastungsarten in der Lagerhaltung bewertet werden können, ohne hierbei auf weitere Tätigkeiten der manuellen Materialhandhabung im Lager einzugehen. Im Projekt „ErgoKom“ erfolgte eine Bewertung unter Zuhilfenahme des am IAD entwickelten MultipLen-Lasten Tools (MultiPLa), und weiterhin wurden dabei im Rahmen einer Machbarkeitsstudie auch Wege zur digitalisierten Belastungsbewertung aufgezeigt. Hierbei erfolgte die Prozessplanung rein manuell und es wurde keine Optimierung der Planungsparameter (wie Lagerplatzvergabe, Routenführung, Auftragszuordnung) vorgenommen. Ebenfalls erfolgte keine Berücksichtigung technischer Hilfsmittel zur Belastungsreduzierung. Im Projekt „ErgoWMS“ (Günthner und Koch, 2014) erfolgte die Belastungsermittlung für Lagerarbeiter ebenfalls mit Hilfe des MultiPLa (Kugler et al., 2010) und zusätzlich mit der „erweiterten Leitmerkmalmethode“ (Walch, 2011). Obwohl die Autoren erwähnen, dass die Ergebnisse der Belastungsermittlung in ein Optimierungsverfahren zur Lagerplatzvergabe aufgenommen werden, wird angenommen, dass die Positionen des Kommissionierauftrags bereits in wegeoptimierter Reihenfolge sortiert sind, sodass keine integrierte Routenplanung erfolgt. Mithin wird in Bezug auf die Routenplanung nur auf durchschnittlich zurückzulegende Wegstrecken abgestellt - eine echte Optimierung erfolgt nicht. Zur Lösung des Optimierungsproblems bzgl. der Lagerplatzvergabe schlagen die Autoren eine Metaheuristik auf

Grundlage genetischer Algorithmen vor, um „eine möglichst gute Lagerplatzzuordnung“ zu erzielen. Eine exakte Lösung des Optimierungsproblems erfolgt jedoch nicht, sodass die Lösungsgüte der entwickelten Heuristiken nicht abschätzbar ist. Die Auftragszuweisung erfolgt ebenfalls mit Hilfe einer nicht näher spezifizierten Heuristik. Im Allgemeinen wird im Projekt „ErgoWMS“ lediglich eine einzelne Zielfunktion berücksichtigt, in die die ergonomische und die wegstreckenorientierte Zielgröße gewichtet eingehen. Eine Berücksichtigung des Order Batching erfolgt nicht.

In ten Hompel et al. (2005) wurde die Belastungsanalyse lediglich über die einfache Leitmerkmal-methode (Steinberg, 1998) bei Experimenten im Labor und Befragung von Firmen mittels Fragebogen durchgeführt. Die belastungsreduzierende Wirkung von Gestaltungsmaßnahmen wurde nur über einen Soll-Ist-Vergleich vorgenommen. Für den Fall einer wahrscheinlichen Überbelastung wurden zudem die drei Verfahren REFA-FAC-1987, Schätzverfahren des Arbeitsenergieumsatzes (Laurig, 1994) und das Mainzer-Dortmunder Dosismodell (Jäger, 2002) empfohlen. Dieses Vorgehen ist jedoch als sehr aufwendig einzuschätzen und erfordert zahlreiche ergonomische Kenntnisse auf Seiten der Analytiker sowie entsprechende Berechnungstools. Zugleich bleibt die bei manuellen Lagertätigkeiten vorhandene Belastungsart „Ziehen und Schieben von Lasten“ unberücksichtigt. Bei der Identifikation von verschiedenen Produktivitätskennzahlen wurden weiterhin grundsätzliche Zusammenhänge zwischen Produktivität, Belastung und Qualität aufgezeigt, es wurden dabei jedoch wiederum nur einfache Wechselwirkungen zwischen den Kennzahlen verdeutlicht und keine Optimierung der Planungsparameter vorgenommen.

Das vorliegende Projekt knüpft mithin an bereits abgeschlossenen IGF-Projekten an und führt diese problembezogen fort. Im vorliegenden Forschungsprojekt werden, sowohl Experten-Screening-Verfahren als auch objektive Methoden zur Bewegungsanalyse „standardisierter“ Bewegungssequenzen zur Analyse und Belastungsbewertung eingesetzt. Eine entsprechende Studie zur Akkuratheit und Anwendbarkeit von zur Verfügung stehenden Motion Capture-Verfahren (Captiv und Kinect V2) in der Intralogistik wurde bereits in Kooperation der beiden Forschungsstellen durchgeführt (Steinebach et al., 2020).

3.1.3. Interdisziplinäre Ansätze und Forschungslücke

Wie der Überblick über den Stand der Forschung zeigt, liegt bei der Planung von Lagerprozessen der Schwerpunkt üblicherweise auf Planungskonzepten, die zu einer Reduzierung der Arbeitszeit (und somit der Kosten) beitragen sollen. Es existieren bisher nur sehr wenige Arbeiten, die ergonomische und betriebswissenschaftliche Aspekte simultan in ganzheitlichen Planungskonzepten berücksichtigen. Dazu zählen bspw. Arbeiten, die kognitive menschliche Eigenschaften berücksichtigen, indem die Performance-Auswirkungen von menschlichem Lernen bei der Zuteilung von Mitarbeitern auf Lagerzonen (Grosse und Glock, 2013; 2015; Stinson und Wehking, 2016) oder menschliches Verhalten bei der Ausführung und Umsetzung von Lageraufgaben (Elbert et al., 2017; de Vries et al., 2016) untersucht werden. Zudem existieren Ansätze, bei denen mitarbeiterspezifische Leistungswerte bei der Personaleinsatzplanung in der Intralogistik genutzt werden, um die Bearbeitungszeiten der Aufträge genauer prognostizieren zu können und Durchlaufzeiten zu reduzieren (Stinson et al., 2014; Matusiak et al., 2017). Ein Konzept zur Bestimmung der zeitlichen Auslastung von Mitarbeitern in der Produktionslogistik unter gleichzeitiger Bewertung der Mitarbeiterbelastung aufgrund von Lasthandhabung für wiederkehrende Tätigkeitsfolgen wurde von Kelterborn (2017) entwickelt. Die physischen Belastungen bei der Entwicklung von Lagerplatzvergabe-konzepten wurden bisher entweder über den metabolischen Energieaufwand, der bei der Ausübung von Lagertätigkeiten anfällt und zu Ermüdung führt (Battini et al., 2016; Calzavara et al., 2017, 2019; Diefenbach und Glock, 2019), oder durch Nutzung einer einfachen

Borg-Skala, mit der subjektives Belastungsempfinden erhoben wird (Larco et al., 2017), berücksichtigt. Eine integrierte Optimierung ist bisher jedoch auch in den interdisziplinären Ansätzen nicht erfolgt.

Obwohl aktuelle und aufgrund ihres Innovationscharakters mehrfach ausgezeichnete Arbeiten mit der Integration arbeitswissenschaftlicher Aspekte in Planungskonzepte der manuellen Lagerhaltung eine große Forschungslücke identifiziert haben (Grosse et al., 2015; Grosse et al., 2017), wurde die gleichzeitige und ganzheitliche Optimierung von wirtschaftlichen und ergonomischen Kenngrößen bisher nur ungenügend erforscht. An dieser Forschungslücke setzte das erfolgreich durchgeführte Projekt mit den im folgenden Abschnitt definierten Forschungsfragen an.

3.2. Abgeleitete Forschungsfragen

Aus dem Stand der Forschung ergaben sich die folgenden Forschungsfragen, die im Projekt erfolgreich beantwortet werden konnten:

1. Welche ergonomischen Kennwerte bezogen auf die körperlichen Belastungen müssen in die Planungskonzepte von manuellen ungetakteten Lagerprozessen integriert werden? Wie lassen sich mithilfe von Belastungsbewertungsverfahren, unter Berücksichtigung von ungetakteten Ausführungsbedingungen, Modelle zur Bildung ergonomischer Kennzahlen ableiten?
2. Wie lassen sich wirtschaftlich nachhaltige, interdisziplinäre und ganzheitliche Planungskonzepte für die Lagerhaltung, unter Berücksichtigung verfügbarer technischer Lösungen, entwickeln, die eine Reduktion von Belastungen bzw. eine Erhöhung der Effizienz und Qualität der Lagerprozesse anstreben? Welche Wechselwirkungen und Zielkonflikte bestehen zwischen einer Verbesserung der Belastungssituation und einer Steigerung der Prozesseffizienz?
3. Welche konkreten Gestaltungsempfehlungen (wie z. B. Gewichtsgrenzen, anthropometrische Gestaltung, Einsatz technischer Hilfsmittel) lassen sich für Lagerprozesse (wie z. B. Lagerplatzvergabe und Routenplanung) und die Lagerorganisation in Betrieben – speziell in KMU – ableiten?

3.3. Durchgeführte Arbeitsschritte zur Beantwortung der Forschungsfragen

Um die drei aufgeworfenen Forschungsfragen zu beantworten, wurden sechs Arbeitsschritte definiert und im Rahmen des Projekts bearbeitet. Diese sind nachfolgend beschrieben:

1. Die Analyse der Anforderungen an Planungskonzepte für manuelle Lagerprozesse in KMU und die Ableitung von KMU-spezifischen Lagerhaltungsszenarien inkl. der Aufnahme typischerweise verwendeter Assistenzsysteme und technischer Hilfsmittel.
2. Die Durchführung einer Ist-Analyse der körperlichen Belastungssituation in manuellen Lagern von KMU inkl. der Datenaufnahme durch Anwendung arbeitswissenschaftlicher Ansätze und Instrumente.

3. Die Entwicklung integrativer ergonomischer Kennzahlen aufbauend auf den zuvor definierten Lagerhaltungsszenarien und erhobenen arbeitswissenschaftlichen Daten.
4. Die Entwicklung von mathematischen Optimierungsmodellen und zugehöriger Lösungsverfahren zur ganzheitlichen Optimierung von Lagerprozessen unter Berücksichtigung der zuvor definierten Lagerhaltungsszenarien und ergonomischen Kennzahlen.
5. Die Durchführung von numerischen Experimenten mittels der Optimierungsmodelle auf Basis der bei den Unternehmen erhobenen empirischen Daten.
6. Die Ableitung und Veröffentlichung von übergreifenden Handlungsempfehlung und Richtlinien auf Grundlage der durchgeführten numerischen Experimente und entwickelten ergonomischen Kennzahlen.

4. Lösungsweg und durchgeführte Arbeiten

Nachfolgend werden der Lösungsweg und die im Rahmen des Projekts durchgeführten Arbeiten vorgestellt. Die Gliederung folgt dabei den in Kapitel 3.3 definierten Arbeitsschritten.

4.1. Anforderungen an Planungskonzepte für manuelle Lagerprozesse

Zur Beantwortung der in Abschnitt 3.2 aufgeworfenen Forschungsfragen müssen zunächst die relevanten Anforderungen an Planungskonzepte für manuelle Lagerprozesse herausgearbeitet und definiert werden. In diesem Zug stellt eine Ist-Analyse der Lagersysteme bei KMU die Ausgangsbasis dar. Hierfür wurden Interviews mit Unternehmensvertretern aus dem Projektbegleitenden Ausschuss geführt. Diese wurden durch einen Workshop ergänzt, in dem auf technische Hilfsmittel für den Einsatz in der Lagerhaltung eingegangen wurde. Hierauf aufbauend wurden Belastungsbewertungsverfahren identifiziert, die für die Analyse der körperlichen Belastungssituation in manuellen Lagern im nächsten Arbeitsschritt (siehe Abschnitt 4.2) geeignet sind. Ferner wurden die Ergebnisse der Ist-Analyse genutzt, um KMU-typische Lagerhaltungsszenarien und Optimierungsziele zu definieren, die die Grundlagen der im vierten Arbeitsschritt durchgeführten Optimierung darstellen. Die einzelnen Teilschritte sind nachfolgend im Detail beschreiben.

4.1.1. Interviews mit den Unternehmensvertretern des Projektbegleitenden Ausschusses

Im Zeitraum November 2020 bis Februar 2021 wurden insgesamt acht Interviews mit Unternehmensvertretern aus dem Projektbegleitenden Ausschuss geführt. Die beteiligten Unternehmen umfassten sowohl Handels- als auch produzierende Unternehmen verschiedener Branchen und Größen, wobei vier KMU darstellen. Den Unternehmensvertretern wurden zunächst Interviewbögen zugesandt und von diesen ausgefüllt. Die ausgefüllten Bögen wurden anschließend ausgewertet. Darauf aufbauend wurden mit den Unternehmensvertretern gesprächsbasierte Interviews geführt, um verbleibende Fragen zu klären und interessante Aspekte intensiver zu beleuchten.

Die zentralen Themen und Erkenntnisse der Interviews sind nachfolgend aufgeführt:

1. Lagersysteme und -prozesse: Bei den befragten Unternehmen gab es insgesamt acht manuelle Lager und zwei automatisierte Lager. Insbesondere bei KMU dominieren erstere.
2. Mitarbeiter: Durchschnittlich sind etwa 60 % der im Lager beschäftigten Mitarbeiter zwischen 30 und 40 Jahre alt. Etwa 25 % sind jünger und etwa 15 % sind älter. Bei fast allen Unternehmen lag der Anteil weiblicher Lagermitarbeiter bei 0 % bis 5 %; nur in einem Unternehmen lag der Anteil bei ca. 60 %.
3. Artikel: Die Anzahl von im Lager gelagerten Artikeln variiert stark zwischen den Unternehmen und liegt zwischen 120 bis 17.500. Gleichwohl folgt die Artikelbedarfsverteilung typischerweise einer Pareto-Verteilung, bei der im Mittel 20 % der Artikel für 73 % des Bedarfs verantwortlich sind. Die Gewichtsverteilung der Artikel lässt sich sehr gut über eine logarithmische Normalverteilung mit $\sigma = 1,255$ und $\mu = 1.046$ beschreiben. Damit machen Artikel von über 30 kg nur ca. 1,5 % der Artikel aus.

4. Lagerlayout: Es dominieren klassische Layouts, bei denen die Lagerregale in parallelen Reihen angeordnet sind, die durch Zwischengänge in ein oder zwei Blöcke (nachfolgend Ein- bzw. Zweiblocklayout genannt) unterteilt werden. Alternative Layouts, wie Chevron- oder Fishbone-Layouts², kamen nicht vor.
5. Routing: Es dominieren einfache Routenstrategien, insbesondere die Schleifengang-/ Traversal-Strategie und die Stichgang-/ Return-Strategie. Eine optimierte Routenführung gab es nur in einem Fall. Teilweise wurde die Routenbestimmung den Kommissionierern ohne Vorgabe frei überlassen.
6. Batching und Zonierung des Lagers: Typischerweise umfasst ein Kommissionierauftrag etwa 5 bis 20 Artikel, seltener aber auch bis zu 100. Zumeist findet kein Batching statt. Stattdessen werden Kundenbestellungen direkt in Kommissionieraufträge überführt. Innerhalb eines Lagers gab es nur vereinzelt Zonierungen. Stattdessen wurden teilweise mehrere separate Lager – z. B. ein Paletten- und ein Kleinteilelager – geführt.
7. Technische Hilfsmittel: Bei allen Unternehmen wurden Gabelstapler, Kommissionierwagen, Flurförderzeuge oder Hubwagen als technische Hilfsmittel zur Warenbeförderung eingesetzt. Hebehilfen kamen nur bei zwei, Palettenauszugsvorrichtungen nur bei einem Unternehmen zu Einsatz. Zur Informationsverarbeitung haben sechs Unternehmen Barcodescanner und Papierlisten eingesetzt. Tablets kamen bei zwei Unternehmen zum Einsatz. Gleiches gilt für Pick-by-Voice-Systeme. Andere Pick-by-Systeme kamen nicht zum Einsatz.
8. Ergonomie und körperliche Belastung: Bei sechs Unternehmen haben Mitarbeiter in der Vergangenheit über Rückenleiden geklagt, bei fünf über Schulterprobleme. Bei zwei Unternehmen haben Mitarbeitern über Schmerzen in den unteren Extremitäten geklagt, bei einem über Schmerzen in den oberen Extremitäten. Nur bei zwei der befragten Unternehmen waren keine Berichte von Mitarbeitern über körperliche Leiden bekannt. Als besonders belastend wurden Hebetätigkeiten eingestuft. Im Mittel sind die Unternehmen bereit, Investitionen zur Verbesserung der Ergonomie in kleinerem bis mittlerem Umfang zu leisten, ohne dass dies genauer spezifiziert wurde.
9. Planungs- und Gestaltungsprobleme: Die Unternehmen messen insbesondere der Optimierung des Lagerlayouts und der Lagerplatzvergabe einen hohen Stellenwert zu. Der Routenplanung und dem Batching messen sie eine mittlere bis niedrigere Relevanz zu. Die Zonierung wird als ein wenig relevantes Problem angesehen. Bei einem Zielkonflikt zwischen den Optimierungszielen „Effizienz“ und „Ergonomie“ wird ersteres stärker gewichtet bzw. priorisiert.
10. Lagerhaltungssoftware: Sechs Unternehmen nutzen spezielle Lagerhaltungssoftware. Die Hauptfunktionen der verwendeten Software liegt dabei in den Bereichen Bestandsmanagement, Bestellmanagement, Lagerplatzmanagement und dem Management von Kommissionieraufträgen.

4.1.2. Workshop zu technischen Hilfsmitteln für die manuelle Lagerhaltung

Der Ist-Stand typischer in KMU eingesetzter technischer Hilfsmittel wurde mittels der in Abschnitt 4.1.1 beschriebenen Interviews erfasst. Im Rahmen des Projekts sollten jedoch auch bisher nicht

² Siehe dazu z. B. Pohl et al. 2000 oder Masae et al., 2020b.

oder nur selten eingesetzte technische Hilfsmittel hinsichtlich ihres zukünftigen Einsatzes erörtert werden. Zu diesem Zweck wurde einerseits eine Literaturrecherche durchgeführt, um weitere technische Hilfsmittel zu identifizieren. Andererseits wurde ein Workshop mit drei Unternehmen des Projektbegleitenden Ausschusses durchgeführt, die als Anbieter von Lager- und Fördertechnik über umfangreiche Expertise verfügen. Eine nach Funktionen gegliederte Übersicht der im Workshop erörterten Hilfsmittel ist in Tabelle 1 dargestellt.

Klassifizierung		diskutierte Hilfsmittel				
Ladungsträger und Regalsysteme		Kleinladungsträger		Schichtlagerkästen, „leise“ Behälter für Rollbahnen (BITO, 2022)		
		Großladungsträger		Paletten, Gitterboxen		
		Regale		Durchlaufregale, Aufsatzrahmen, Palettenauszüge		
Fahr- und Förderzeuge		ohne Antrieb		Gitterwagen, Etagenwagen, Tischwagen		
		angetrieben		konventionell	Niederhubkommissionierer, elektrische Hubwagen, Gabelstapler	
				fernsteuerbar	„QuickPick“ (Crown, 2022)	
				autonom	„GridPick“ (Gebhardt, 2022)	
		horizontale und vertikale Beförderung		ohne Antrieb		Rolleitern, Rollpodeste
				angetrieben		konventionell
fernsteuerbar	-					
autonom		„Stretch“ (Boston Dynamics, 2022)				
Greif- und Hebehilfen		ortsfest		ohne Antrieb	-	
				angetrieben		Kräne, Manipulatoren
		beweglich		ohne Antrieb	Greif-/ Schiebestäbe (engl. „pick sticks“), passive Exoskelette	
				angetrieben		„Ergopick“ (Still, 2015)

Tabelle 1: Übersicht technischer Hilfsmittel

Einige der in Tabelle 1 aufgeführten technischen Hilfsmittel, wie z. B. Paletten, Tischwagen oder Gabelstapler sind bereits bei einem Großteil von KMU im Einsatz. Andere Hilfsmittel, wie Schmalgangkommissionierer oder Manipulatoren, sind nur in speziellen Situationen geeignet. Ihre Nutzung wurde daher innerhalb des Projekts nicht weiter vertieft.

Ein Hilfsmittel, das dagegen bisher kaum eingesetzt wird (vgl. Abschnitt 4.1.1), jedoch aus Sicht der Workshopteilnehmer großes Potenzial und hohe Universalität bietet, sind Palettenauszugsvorrichtungen (oder kurz Palettenauszüge). Dabei handelt es sich um Unterbauten für einzelne Paletten, die ein schubladenartiges Ausziehen der Palette aus dem Regal ermöglichen. Obgleich auch Palettenauszüge für höhere Regalebenen existieren, sind Auszüge für die Bodenebene am weitesten verbreitet, da sie einfach nachrüstbar und hinsichtlich des maximalen Beladungsge-

wichts weniger restriktiv sind. Typischerweise erfolgt das Ausziehen der Paletten manuell. Automatisierte bzw. angetriebene Systeme existieren zwar, sind aber weitaus weniger gebräuchlich und mit deutlich höheren Investitionskosten verbunden.

Der grundlegende Gedanke bei der Verwendung von Palettenauszügen liegt darin, dass durch das Ausziehen von Paletten die auf dem gangabgewandten Teil der Palette gelagerten Artikel besser zugänglich werden. Dies kann sowohl die Zeitdauer als auch die physische Belastung der Artikelentnahme beim Kommissionieren reduzieren. Demgegenüber stehen eine zusätzliche Dauer und ein zusätzlicher Aufwand für das Ausziehen selbst, sodass Palettenauszüge nur situationsbedingt einen Nettomehrwert bieten – z. B. dann, wenn pro Kommissionierauftrag eine Vielzahl von Artikeln von der gleichen Palette entnommen werden müssen. Wann der Einsatz von Palettenauszügen sinnvoll ist, wird in Abschnitt 4.6.2.3 näher untersucht.

4.1.3. Analyse geeigneter Belastungsbewertungsverfahren

Um eine Ist-Analyse der körperlichen Belastungen in manuellen Lagern von KMU durchführen zu können, war es notwendig, evaluierte arbeitswissenschaftliche Instrumente zu nutzen. Diese mussten zunächst auf ihre Eignung für die einzelnen Lagertätigkeiten hin analysiert werden. Zudem wurde das identifizierte Instrument anschließend genutzt, um integrative ergonomische Kennzahlen zur Optimierung abzuleiten. Der Auswahl eines geeigneten Verfahrens kam im Projekt somit eine zentrale Bedeutung zu.

Grundsätzlich lassen sich die durch die Arbeitswissenschaft bereitgestellten Methoden, mit deren Hilfe sich vornehmlich physische Belastungen quantifizieren und bewerten lassen, in fünf verschiedene Methodenebenen einordnen (Kugler et. al., 2010; Ellegast, 2010): Grob-Screening-Verfahren, Spezielle Screening-Verfahren, Experten-Screening-Verfahren, Betriebliche Messungen und Labormessungen. Jeder Ebene können zahlreiche Verfahren zugeordnet werden, siehe Tabelle 2. Die einzelnen Verfahren unterscheiden sich insbesondere bezüglich ihres Detaillierungsanspruchs sowie dem Erhebungs- und dem Schulungsaufwand. Ferner sind Verfahren häufig für bestimmte Belastungsarten entwickelt worden, wie z. B. die manuelle Lastenhandhabung.

Insofern galt es, unter den zahlreichen Verfahren diejenigen zu identifizieren, die für die ausgewählten Lagertätigkeiten aufgrund der untersuchten Belastungsarten geeignet sind und gleichzeitig einen hohen Detaillierungsgrad aufweisen, um Unterschiede zwischen bestimmten belastungsrelevanten Gestaltungsaspekten in der Optimierung widerspiegeln zu können. Zu diesem Zweck wurde ein Expertenworkshop durchgeführt, an dem insgesamt fünf Ergonomie-Experten teilnahmen. Um eine Entscheidungsfindung für ein bestimmtes Verfahren zu objektivieren, wurde eine Nutzwertanalyse durchgeführt. Vorab wurden mittels KO-Kriterien Belastungsbewertungsverfahren vorselektiert. Verfahren, die die folgenden Kriterien nicht erfüllen, wurden in der Nutzwertanalyse nicht berücksichtigt:

- keine Grob-Screenings
- Verfahren muss publiziert worden sein
- quantitative Eingangswerte (z. B. Gewichte, Häufigkeiten)
- quantitative Belastungsbewertung bzw. quantitativer Risikoscore

Kategorie	Verfahrensname	Belastungsart				
		Manuelle Lastenhandhabung		Statische Körperhaltungen	Aktionskräfte	Obere Extremitäten durch rep. Tätigkeiten
		Heben, Halten, Tragen	Ziehen, Schieben			
Grob-Screening-Verfahren	BGI 504-46	(X)		(X)	(X)	(X)
	AWS light	(X)		(X)	(X)	(X)
Spezielle Screening-Verfahren	LMM-HHT	X				
	LMM-Z/S		X			
	LMM-MA					X
	LMM-GK				X	
	LMM-KH			X		
	LMM-KB	(X)				
	eLMM	X				
	OCRA-Checkliste					(X)
	RULA			X		(X)
	REBA			X		(X)
	AAWS	X	X	X	X	
	IAD-BkB	X	X	X	X	
	Multiple-Lasten-Tool	X	X			
Experten-Screening-Verfahren	OCRA					X
	OWAS			X		
	NIOSH Lifting Eq.	X				
	AAWS+	X	X	X	X	X
	EAWS	X	X	X	X	X

Tabelle 2: Übersicht und Kategorisierung von Screening-Verfahren (Quelle: Steinebach 2022; Kugler et al., 2010)

Für die Nutzwertanalyse konnten im Workshop acht Anforderungskriterien an die Belastungsbewertungsverfahren identifiziert werden.

- **Anforderung 1 (0,19):**
Alle relevanten Belastungsarten werden abgedeckt (Manuelle Lastenhandhabung, Repetitive Belastungen der oberen Extremitäten, Körperhaltungen).

- **Anforderung 2 (0,05):**
Eine einfache Anwendbarkeit für Praktiker ist gegeben.
- **Anforderung 3 (0,18):**
Die für das Verfahren benötigten Eingabedaten sind in der Regel vorhanden oder können erhoben werden.
- **Anforderung 4 (0,14):**
Die Anwendbarkeit des Verfahrens ist auch bei ungetakteten Tätigkeiten gegeben.
- **Anforderung 5 (0,09):**
Das Verfahren erlaubt die Bewertung körperlicher Belastungen auch bei hoher Tätigkeitsvariabilität.
- **Anforderung 6 (0,05):**
Die Philosophie des Verfahrens ergibt sich aus der Ableitung des Risikos anhand der Belastungsdosis (Belastungsintensität x Belastungsdauer).
- **Anforderung 7 (0,14):**
Ein hoher Detaillierungsgrad liegt vor (klare Differenzierung möglich, z. B. zwischen verschiedenen Körperhaltungen und Lastgewichten).
- **Anforderung 8 (0,14):**
Das Verfahren ermöglicht eine Ableitung von ergonomischen Maßnahmen im Lager.

In Klammern ist jeweils die Gewichtung der einzelnen Anforderungen notiert, die durch einen Paarvergleich (siehe Anhang 1) der jeweiligen Anforderungen kalkuliert wurde. Um eine möglichst objektive und standardisierte Bewertung vornehmen zu können, wurden quantitative bzw. qualitative Anforderungserreichungsgrade tabellarisch festgelegt. Diese sind in Anhang 2 zu finden. Im Anschluss nahmen alle fünf Experten die Bewertung der einzelnen Anforderungen getrennt voneinander für insgesamt 20 Verfahren vor.

Ein Blick auf Tabelle 3 zeigt, dass das EAWS (Schaub et al., 2013) in der Nutzwertanalyse am besten abschneidet. Es wird von den Experten bis auf Anforderung 2 (Einfache Anwendbarkeit durch Praktiker) in allen Kategorien mit mindestens 0,5 Punkten bewertet. Da das Tool in diesem Projekt nicht von Praktikern eingesetzt werden soll, ist der hohe Schulungsaufwand und die Komplexität des Tools vernachlässigbar. Im Folgenden werden Belastungsanalysen sowie die Herleitung der ergonomischen Kennzahlen auf Basis des EAWS durchgeführt.

Das EAWS-Verfahren ist ein international anerkannter Standard zur Bewertung ergonomischer Risiken bei Tätigkeiten an verschiedenen Arbeitsplätzen, wobei es häufig auch für Arbeitstätigkeiten im Lager angewendet wird und auch für nicht getaktete Tätigkeiten genutzt werden kann. Die Ermittlung des Risikowerts erfolgt über die Bewertung der Belastungsarten „statische Körperhaltungen“ (Sektion 1), „Aktionskräfte“ (Sektion 2), „Manuelle Lastenhandhabung“ (Sektion 3) und „repetitive Belastungen der oberen Extremitäten“ (Sektion 4). Zusätzlich können Extrapunkte vergeben werden (Sektion 0). Eine Ampeldarstellung (grün, gelb, rot) ermöglicht eine Einordnung in Risikoklassen.

		Anforde- rung 1	Anforde- rung 2	Anforde- rung 3	Anforde- rung 4	Anforde- rung 5	Anforde- rung 6	Anforde- rung 7	Anforde- rung 8		
Verfahren/ mögliche Ausprägungen		[0;1]	[0; 0,25; 0,5; 0,75; 1]	[0; 0,25; 0,5; 0,75; 1]	[0;0,5;1]	[0; 0,25; 0,5; 0,75; 1]	[0;0,5;1]	[0; 0,25; 0,5; 0,75; 1]	[0; 0,25; 0,5; 0,75; 1]	Gesamt	Rang
Screening-Verfahren	LMM - Heben, Halten, Tragen	0	0,75	0,75	0,5	0	1	0,25	0,75	0,442	8
	LMM - Ziehen, Schieben	0	0,75	0,75	0,5	0	1	0,25	0,75	0,442	8
	LMM - manuelle Arbeitsprozesse	0	0,75	0,75	0,5	0	1	0,25	0,75	0,442	8
	LMM - Ganzkörperkräfte	0	0,75	0,75	0,5	0	1	0,25	0,75	0,442	8
	LMM - Körperfortbewegung	0	0,75	0,75	0,5	0	1	0,25	0,75	0,442	8
	LMM – Körperzwangshaltungen	0	0,75	0,75	0,5	0	1	0,25	0,75	0,442	8
	erweiterte LMM - HHT	0	0,5	0,75	1	0	1	0,75	0,75	0,571	6
	RULA	0	0,5	0,5	0,5	0,25	1	0,5	0,5	0,406	18
	REBA	0	0,5	0,5	0,5	0,25	1	0,5	0,5	0,406	18
	OCRA-Checkliste	0	0,5	1	1	0	1	0	0,25	0,438	14
	AAWS	0,5	0,5	0,75	0	0,5	1	0,25	0,75	0,5	7
	IAD-BkB	0,5	0,5	0,75	0,5	0,75	1	0,5	0,75	0,629	4
	Multiple-Lasten-Tool	0,5	0,75	0,75	1	0,5	1	0,75	0,5	0,692	2
Experten-screenings	OWAS	0	0,75	0,75	0,5	0,25	0,5	0,5	0,5	0,438	14
	AAWS+	1	0,25	0,5	0	0,75	1	0,5	0,75	0,598	5
	MonKras	0	0,25	0,5	0	0,5	1	0,75	0,5	0,379	20
	NIOSH Lifting Eq.	0	0,5	0,5	1	0	0,5	0,5	0,5	0,429	16
	EAWS	1	0,25	0,5	1	1	1	0,5	0,75	0,763	1
	OCRA-Verfahren	0	0,25	0,5	0,5	0,5	1	0,5	0,5	0,415	17
Messverfahren/ Simulation	CUELA-Messsystem biomechanische Simulation (z. B. Dortmund) ema (MTM & EAWS)	0,5	0,25	0,5	1	0,75	1	1	0,5	0,679	3
	Motion Capture Elektromyographie Herzschlagfrequenz										

Tabelle 3: Ergebnisse der Nutzenwertanalyse

4.1.4. Definition von Lagerhaltungsszenarien und Optimierungszielen

Aus den in Abschnitt 4.1.1 beschriebenen Interviews und unter Berücksichtigung der in Abschnitt 4.1.2 erörterten technischen Hilfsmittel wurden Lagerhaltungsszenarien abgeleitet, die im Rahmen des Projekts als Grundlage für die Formulierung von Optimierungsproblemen (vgl. Abschnitt 4.4) dienen. Die Lagerhaltungsszenarien sollen dazu möglichst generisch für KMU typische Lagertypen und -systeme umfassen. Es wurden insgesamt vier Lagerhaltungsszenarien definiert und zur einfachen Unterscheidbarkeit prägnant benannt. Diese sind 1.) das „Palettenlager“, 2.) das „Fachboden-/ Kleinteilelager“, 3.) das „Stollenlager“ und 4.) automatisierte Lager, die nachfolgend kurz konzeptionell vorgestellt werden. Ausführlichere Steckbriefe der ersten drei Lagerhaltungsszenarien können im Anhang 3 eingesehen werden.

1. „Palettenlager“: Das „Palettenlager“ ist einer der weitest verbreiteten Lagertypen in KMU. Es besteht aus mehreren parallel angeordneten Regalen, die in ein oder zwei durch einen Zwischengang getrennte Blöcke gegliedert sind. Ein Regal hat dabei üblicherweise drei bis sieben Regalebenen. Die Artikel werden im „Palettenlager“ auf sortenreinen Paletten gelagert und beim Kommissionieren direkt von den Paletten entnommen. Auf der untersten Regalebene, also der Bodenebene, gelagerte Paletten sind dabei ohne Hilfsmittel erreichbar. Um höhere Regalebenen zu erreichen, sind technische Hilfsmittel notwendig, wobei typischerweise zwei Systeme Einsatz finden. Entweder nutzt der Kommissionierer einen Gabelstapler oder Hochhubwagen, um die Palette aus dem Regal zu heben, die benötigten Artikel zu entnehmen und die Palette wieder zurückzubefördern. Alternativ nutzt der Kommissionierer einen Vertikal- bzw. Hochhubkommissionierer, um sich selbst auf die Höhe der Palette zu bewegen.

Im „Palettenlager“ werden die Paletten teilweise dediziert, also auf fest vorgegebenen Regalplätzen, und teilweise chaotisch, also auf zufällig ausgewählten Regalplätzen, gelagert. Auch Mischformen innerhalb eines Lagers sind möglich. Eine Besonderheit ist dabei, dass im „Palettenlager“ nicht nur Paletten gelagert werden, von denen aktiv kommissioniert wird, sondern auch Paletten dem Nachschub dienen. Typischerweise wird pro Artikelsorte immer nur eine Palette gleichzeitig zum Kommissionieren genutzt. Erst nachdem diese leer ist, wird eine Palette aus dem Nachschub zur neuen Palette für die Kommissionierung deklariert.

Das Routing des Kommissionierers folgt in „Palettenlagern“ einfachen Strategien. Dominant sind die Schleifen- und Stichgangstrategie. Der Kommissionierer führt dabei einen (meistens angetriebenen) Wagen, z. B. in Form eines Niederhubkommissionierers, mit sich, auf dem er kommissionierte Artikel ablegt. Seltener wird für diesen Zweck auch ein mit einer Palette bestückter Gabelstapler verwendet. Als weiteres technisches Hilfsmittel bieten sich bei diesem Lagertyp Palettenauszüge (vgl. Abschnitt 4.1.2) an.

2. „Fachboden-/ Kleinteilelager“: Das „Fachboden-/ Kleinteilelager“ beschreibt ein low-level Person-zu-Ware Lager, bei dem alle Artikel (meistens durch Ladungsträger gebündelt) auf Fachbodenregalen gelagert werden, die ohne Hilfsmittel vom Kommissionierer erreichbar sind. Wie auch beim „Palettenlager“, sind die Regale in parallelen Reihen in einem Ein- oder Zweiblocklayout angeordnet. Ein Regal hat in etwa drei bis zehn Regalebenen.

In diesem Lagertyp werden zumeist alle Artikel dediziert, also auf fest zugewiesenen Plätzen, gelagert, wobei Nachschub in einem separaten Lager – manchmal auch in Paletten in Regalebenen über dem eigentlichen „Fachboden-/ Kleinteilelager“ – gelagert wird.

Tendenziell erfolgt das Routing des Kommissionierers nach den gleichen einfachen Stich-

und Schleifengangstrategien, wie im „Palettenlager“. Der Kommissionierer führt dabei einen antriebslosen Wagen, z. B. einen Tischwagen, oder einen angetriebenen Wagen, z. B. einen Niederhubkommissionierer, mit sich, auf dem er kommissionierte Artikel ablegt.

3. „Stollenlager“: Das „Stollenlager“ kann als Hybrid aus „Palettenlager“ und „Fachboden-/ Kleinteilelager“ aufgefasst werden. In ihm werden Artikel auf sortenreinen Paletten auf zwei (seltener auch drei) Regalebenen gelagert, die jedoch alle ohne zusätzliche Hilfsmittel erreichbar sind. Die Anordnung der Regale entspricht dem von „Palettenlager“ bzw. „Fachboden-/ Kleinteilelager“, wobei der Nachschub ähnlich wie bei letzterem gelagert wird. Gleiches gilt für die Routenführung und die genutzten technischen Hilfsmittel, wobei sich abermals Palettenauszüge als Ergänzung anbieten. Die Lagerplatzvergabe erfolgt im „Stollenlager“ üblicherweise dediziert.
4. Automatisierte Lager: Automatisierte Lager standen nicht im Fokus dieses Projekts und werden daher hier nur aus Gründen der Vollständigkeit kurz beschrieben. Das zentrale Merkmal automatisierter Lager ist, dass sich nicht der Kommissionierer durch das Lagerhaus bewegt, sondern Artikel über automatisierte Fördersysteme zum Kommissionierer befördert werden. Dies wird auch als Ware-zu-Person System bezeichnet. Klassische automatisierte Lager nutzen für den Warentransport automatische Ein- und Auslagersysteme in Kombination mit Rollen- oder Bandfördersystemen. Neuere Ansätze nutzen autonom fahrende Fahrzeuge, die eigenständig Ladungsträger oder ganze Regale bewegen können. In KMU sind automatisierte Lager selten bzw. werden nur in kleinem Umfang genutzt.

Von allen vorgestellten Lagertypen besitzen „Palettenlager“ und „Fachboden-/ Kleinteilelager“ mit Abstand die größte Relevanz für KMU. Sie wurden daher innerhalb dieses Projekts näher betrachtet und als Grundlage für Optimierungsansätze verwendet (siehe Abschnitt 4.4).

4.2. Ist-Analyse der körperlichen Belastungssituation in manuellen Lagern von KMU

Zur Ermittlung der Ergonomie-Kennzahlen sind praxisrelevante Daten von höchster Bedeutung, damit in der späteren Optimierung möglichst realitätsnahe physische Belastungen ermittelt bzw. korrekte Entscheidungsempfehlungen abgeleitet werden können. Diese Daten wurden im vorliegenden Projekt in Lagern der Unternehmen des Projektbegleitenden Ausschusses erhoben. Insgesamt konnten vier Unternehmen gewonnen werden, in denen Motion Capture Aufzeichnungen an Mitarbeitenden in verschiedenen Lagerbereichen durchgeführt werden durften. Die Unternehmen sind verschiedenen Branchen zuzuordnen: Automatisierungstechnik, Großhandel und zwei Unternehmen aus dem Automobil-Bereich.

In den Unternehmen wurden 12 verschiedene Kommissionierzonen, die auf dem Prinzip „Person-zur-Ware“ basieren, betrachtet. Demnach wurden vollautomatisierte Lager und Systeme nach dem Prinzip „Ware-zur-Person“ nicht berücksichtigt. Bei acht der betrachteten Bereiche wurde von Paletten kommissioniert. Hierbei waren insbesondere solche Kommissioniertätigkeiten interessant, die manuell stattfanden und bei denen gerade nicht nur volle Paletten per Gabelstapler kommissioniert werden. In den betrachteten Fällen wurden die Paletten entweder aus höheren Ebenen abgesenkt oder es wurden direkt einzelne Artikel von auf dem Boden stehenden Paletten

kommissioniert. Diese Kommissionierbereiche konnten dem Lagerhaltungsszenario 1 „Palettenlager“ (siehe Kapitel 4.1.4) zugeordnet werden. In den restlichen vier Zonen wurde ohne Hilfsmittel, wie z. B. Gabelstapler, direkt aus Fachbodenregalen kommissioniert. Meist handelte es sich hierbei um Kleinteile bzw. eher leichte Artikel bis zu einem Gewicht von maximal 10 kg. Diese Zonen können dem Lagerhaltungsszenario 2 „Fachboden-/ Kleinteilelager“ zugeordnet werden.

Insgesamt erklärten sich 17 Kommissionierer (13 männlich, 4 weiblich) freiwillig bereit, sich während ihrer Arbeitstätigkeit für etwa ein bis zwei Stunden beobachten zu lassen. Zudem wurden die Kommissionierer mit einem IMU-basierten Motion Capture System ausgerüstet, sodass zu jedem Zeitpunkt der Beobachtung die Körperhaltung der Kommissionierer erfasst werden konnte. Bei dem verwendeten System handelt es sich um das Captiv L7000 Premier des Herstellers TEA, welches eine gute Akkuratheit bei Tätigkeiten in der Logistik besitzt (Steinebach et al., 2020). Das Captiv-Messsystem besteht aus insgesamt 15 Motion-Sensoren (siehe Abbildung 1). Jeder Sensor verfügt über einen 3-Achsen Beschleunigungssensor, ein Gyroskop sowie ein Magnetometer. Mit einer Frequenz zwischen 32 bis 128 Hz (einstellbar) werden diese Werte erfasst, intern verarbeitet und drahtlos zu einem Empfänger übermittelt. Die Sensoren werden mittels Gurten an den entsprechenden Körperteilen fixiert.



Abbildung 1: Motion Capture Sensor (vorne) und Empfänger (hinten)

Die erhobenen Daten wurden anonymisiert weiterverarbeitet, sodass sie im Anschluss nicht einzelnen Kommissionierern zuzuordnen sind. Insgesamt konnten auf diese Art und Weise über 1000 individuelle Artikelentnahmen analysiert und die entsprechenden Körperhaltungen ausgewertet werden. Zusätzlich wurde Bild- und Videomaterial erstellt, welches genutzt wurde, um die mit Captiv ermittelten Körperhaltungen später konkreten Belastungsfällen bzw. Lagertätigkeiten zuordnen zu können.

Die vorkommenden Belastungsarten sollen im Folgenden am Beispiel der Kommissionierung skizziert werden. Nach Grosse et al. (2015) können Kommissioniertätigkeiten in vier verschiedene Schritte eingeteilt werden: Set up, Travel, Search und Pick. Die Ist-Analyse der körperlichen Belastungssituation in den manuellen Lagern hat gezeigt, dass vor allem während den Schritten „Travel“ und „Pick“ körperliche Belastungen auftreten, siehe Abbildung 2. Während beim Schritt

„Travel“ vor allem Belastungen durch „Tragen“ und „Ziehen/ Schieben“ auftreten, sind während dem Pick-Vorgang häufig Belastungen durch „Umsetzen von Lasten“ vorzufinden. Besonders hohe körperliche Belastungen traten in den Erhebungen auf, wenn sehr schwere Artikel aus niedrigen Entnahmehöhen kommissioniert werden mussten, da dies meist mit sehr ungünstigen Körperhaltungen einherging. Ebenso führen sehr sperrige Artikel häufig zu suboptimalen Körperhaltungen während der Lasthandhabung, da die unhandlichen Gegenstände z. B. umständlich ausbalanciert werden müssen.

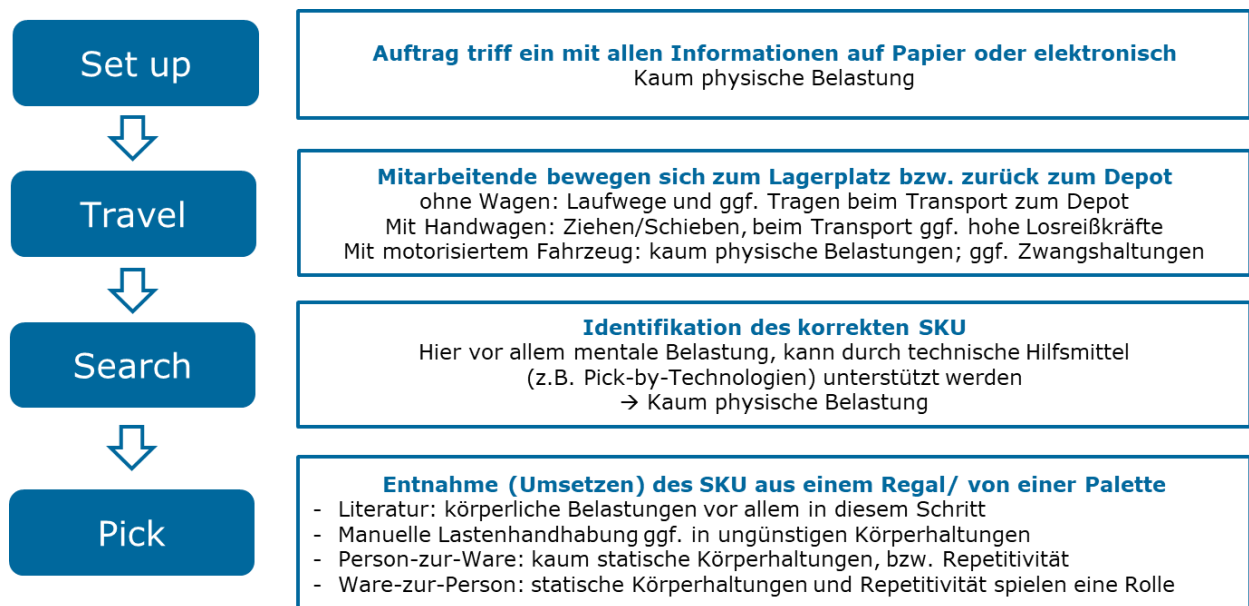


Abbildung 2: Körperliche Belastungen während der einzelnen Kommissionierschritte nach Grosse et al. (2015)

Die auftretenden Belastungen können nun entsprechend der Charakteristika der Lastenhandhabung, wie die zu handhabenden Lastgewichte, die eingenommene Körperhaltungen und etwaigen Ausführungsbedingungen ergonomisch mithilfe von Belastungsbewertungsverfahren bewertet werden. Die Ableitung ergonomischer Kennzahlen wird im folgenden Kapitel vorgestellt.

4.3. Entwicklung integrativer ergonomischer Kennzahlen

4.3.1. Vorgehen bei der Bestimmung der Ergonomie-Kennzahlen

Ziel des durchgeführten Projektes war die Integration von ergonomischen und wirtschaftlichen Parametern in ganzheitliche Planungskonzepte für manuelle Lagerprozesse. Somit waren Kennzahlen notwendig, die physische Belastungen von einzelnen Arbeitsverrichtungen, z. B. einem Umsetzvorgang eines Artikels mit definiertem Gewicht aus einer bestimmten Höhe mit einer entsprechenden Körperhaltung, quantifizieren. Zunächst mussten daher diesbezüglich Anforderungen an die Kennzahlen definiert werden:

- Quantitative Werte (je höher der Wert, desto höher die körperliche Belastung)
- Möglichkeit zur Bündelung in Tätigkeitsklassen

- Belastungswerte mehrerer Arbeitsverrichtungen addieren sich zu einem Gesamtwert
- Nichtlinearitäten bei der Quantifizierung einzelner Kennwerte sind möglich
- Bewertung von einzelnen Arbeitsverrichtungen anstatt der Gesamtheit an manueller Arbeit, die über eine vollständige Arbeitsschicht anfällt

Die letztgenannte Anforderung stellt eine zentrale Limitation der meisten etablierten Belastungsbewertungsverfahren (siehe Kapitel 4.1.3) dar, da diese darauf ausgelegt sind, Arbeitsbelastungen über eine gesamte Arbeitsschicht zu quantifizieren. Ein solches Vorgehen ist jedoch nicht zielführend, wenn die Kennzahlen in kombinatorischen Optimierungsmodellen (wie sie in dieser Arbeit betrachtet werden) eingesetzt werden sollen. Dies kann wie folgt veranschaulicht werden. Bei kombinatorischen Optimierungsmodellen müssen eine Vielzahl elementarer Entscheidungen getroffen werden. Die elementaren Entscheidungen sind voneinander abhängig und bestimmen in ihrer Kombination, wie gut eine Lösung ausfällt. Ein veranschaulichendes Beispiel stellt die dedizierte (d. h., Festplatz-)Lagerplatzvergabe dar, bei der eine Menge an Artikeln einer Menge an Lagerplätzen zugewiesen werden soll. Die Entscheidungen, welche Artikel welchen Lagerplätzen zugewiesen werden sollen, sind die elementaren Entscheidungen. Diese sind voneinander abhängig, da nicht mehr als ein Artikel dem gleichen Lagerplatz zugewiesen werden kann. Problematisch ist, dass die Anzahl an Kombinationsmöglichkeiten mit der Anzahl an Artikeln und Lagerplätzen explosionsartig ansteigt. Sollen z. B. 10 Artikel 10 Lagerplätzen zugewiesen werden, gibt es $10! = 1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot \dots \cdot 10 \approx 3,6$ Mio. Kombinationsmöglichkeiten. Bei 20 Artikeln und Lagerplätzen gibt es bereits $20! \approx 2,4 \cdot 10^{18}$ Möglichkeiten – das sind über fünfeinhalbmal mehr Möglichkeiten als das Alter des Universums in Sekunden. Können die Ergonomie-Kennzahlen nur die Gesamtbelastung während einer Arbeitsschicht bewerten, müsste jede dieser Möglichkeiten einzeln ausgewertet werden, um eine optimale Lösung zu finden. Selbst bei Verwendung der weltbesten Hochleistungsrechner kann dies bei praxisnahen Anzahlen an Artikeln und Lagerplätzen nicht gehandhabt werden. Das beschriebene Problem kann jedoch umgangen werden, wenn bereits die Auswirkungen einzelner elementarer Entscheidungen quantifiziert werden können. Dazu müssen die Ergonomie-Kennzahlen jedoch in der Lage sein, einzelne Arbeitsverrichtungen bewerten zu können.

Die arbeitswissenschaftliche Herausforderung liegt nun darin, Ergonomie-Parameter für einzelne Arbeitsverrichtungen zu entwickeln, die sich additiv zu einem Gesamtwert zusammensetzen und sowohl auf biomechanischen als auch energetischen Untersuchungen basieren, um Belastungen während Lagertätigkeiten möglichst akkurat abbilden zu können. Außerdem sollen die Kennzahlen auf konkreten arbeitswissenschaftlichen Untersuchungen in der Praxis basieren, um körperliche Belastungen möglichst realitätsnah zu quantifizieren. Das entsprechende Vorgehen wird im Folgenden mithilfe von Abbildung 3 erläutert.

Zunächst wurden verschiedene Lagerhaltungstätigkeiten, die im Rahmen des Projekts betrachtet wurden, in Klassen eingeteilt. Diese beinhalten die in der Praxis am häufigsten anzutreffenden sowie in den Interviews (siehe Kapitel 4.1.1) erwähnten stark belastenden manuellen Lagertätigkeiten. Anzumerken ist, dass diejenigen Lagertätigkeiten ausgewählt wurden, die maßgeblich zur körperlichen Belastung beitragen. Administrative Tätigkeiten oder beispielsweise das Kommissionieren ganzer Paletten mit einem Gabelstapler wurden demnach nicht berücksichtigt.

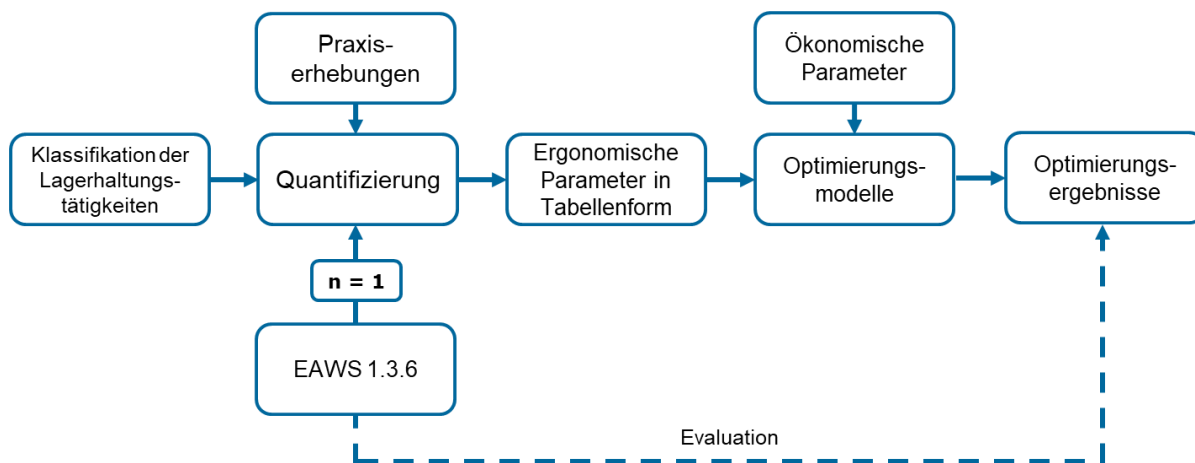


Abbildung 3: Vorgehen zur Bestimmung der Ergonomie-Kennzahlen

Das entsprechende Klassifikationssystem ist in Tabelle 4 dargestellt. Zwei übergeordnete Arten der Person-zur-Ware Kommissionierung wurden in den verschiedenen Lagern regelmäßig angetroffen: Das manuelle Kommissionieren von Paletten sowie die Kommissionierung von Kleinteilen aus Fachbodenregalen (siehe Kapitel 4.2). Bei der Kommissionierung von Paletten wurde ferner unterschieden, ob die Palette freistehend ist, also von mehreren Seiten ohne Hindernisse erreichbar, oder ob sie in einem Palettenregal verblieben ist. In diesem Fall wurde weiterhin unterschieden, ob die Palette längs (Eingriff über die kurze Seite der Palette) bzw. quer (Eingriff über die lange Seite der Palette) eingelagert wurde. Diese Unterscheidung wurde getroffen, da dies insbesondere die Eingrifftiefe in das Regal determiniert und somit einen Einfluss auf die Körperhaltung bei der Lastenhandhabung hat.

Ergonomische Parameter bzgl.		Bild	Spezif. Einflussfaktoren
Kommissionierung von Paletten	freistehend		<ul style="list-style-type: none"> max. Ladehöhe der Palette Standhöhe der Palette
	Längslagerung		
	Querlagerung		
Kommissionierung aus Regalen			<ul style="list-style-type: none"> Entnahme-/Ablagehöhen der Regalebene
Ziehen/Schieben von Transportfahrzeugen			<ul style="list-style-type: none"> Art des Transportwagens Rollwiderstand

Tabelle 4: Klassifikationssystem von betrachteten Lagerhaltungstätigkeiten

Um die spezifische körperliche Belastung verschiedener Ausführungsarten auch innerhalb der Klassen bestimmen zu können, müssen Einflussfaktoren bestimmt werden. So wurde jede Klasse an Lagertätigkeiten in Abhängigkeit von dem umzusetzenden bzw. zu ziehenden/schiebenden Lastgewicht aufgezeichnet. Außerdem wurden jeweils das Geschlecht und die Ausführung mit nur einer oder beiden Händen unterschieden. Zusätzlich wurden für jede Klasse spezifische Einflussfaktoren auf die physische Belastung definiert, die bei der Bestimmung von Ergonomie-Kennzahlen gezielt berücksichtigt und in entsprechenden Tabellen unterschieden werden sollten. Im Falle der Kommissionierung von Paletten war dies z. B. die maximale Ladehöhe sowie die Standhöhe der Palette. Beide spezifischen Einflussfaktoren bestimmen die durchschnittlich zu erwartende Entnahmehöhe eines Artikels von der Palette und damit unmittelbar die eingenommene Körperhaltung der Kommissionierer.

Neben diesen beiden Kommissionierarten wurde außerdem der manuelle innerbetriebliche Transport, in Form des Ziehens bzw. Schiebens von Transportmitteln, analysiert. Dieser tritt in allen untersuchten Lagern der Praxispartner auf und ist deshalb zwingend zu beachten. Spezifische Einflussfaktoren sind die Art des Transportwagens (z. B. mit/ ohne feste Bockrollen) sowie der Rollwiderstand des Fahrzeuges auf dem vorliegenden Untergrund (Bodenbeschaffenheit).

Nachdem verschiedene Lagertätigkeiten definiert und klassifiziert sind, müssen diese in Abhängigkeit der Einflussfaktoren hinsichtlich ihrer körperlichen Belastung quantifiziert werden. Wie bereits beschrieben, soll zu diesem Zweck das etablierte Bewertungsverfahren EAWS (Version 1.3.6) genutzt werden. Das exakte Vorgehen wird in Kapitel 4.3.2 erläutert. Um realitätsnahe Daten zur Bewertung mit EAWS zu erhalten, werden Ist-Analysen in Praxisunternehmen genutzt. Die nun quantifizierten Ergonomie-Parameter werden anschließend gebündelt in Tabellenform dargestellt und können anschließend für Optimierungszwecke herangezogen werden. Hier findet die Integration mit ökonomischen Parametern statt, die ebenfalls in entsprechende Optimierungsmodelle eingehen.

Im Anschluss an etwaige Optimierungen war es entscheidend, die entwickelten Ergonomie-Kennzahlen sowie die Optimierungsverfahren zu evaluieren. Dazu wurde mit dem EAWS-Verfahren in einem Vorher-Nachher Vergleich geprüft, ob die durch die Optimierung gefundenen Entscheidungen tatsächlich zu einer Reduzierung der körperlichen Belastung geführt haben.

4.3.2. Berechnung der Ergonomie-Kennzahlen

Die Bestimmung der Ergonomie-Kennzahlen folgt zu großen Teilen den Regeln der EAWS-Version 1.3.6 – das Verfahren besteht aus insgesamt vier Sektionen, welche einzelne Belastungsarten abbilden, sowie einer Sektion für Extrapunkte.

Die Sektionen 1 und 2 sind bei manuellen Lagertätigkeiten eher selten anzutreffen. So wird selten in statischen Körper- bzw. Zwangshaltungen für einen längeren Zeitraum als vier Sekunden verharrt (Sektion 1) sowie kaum Aktionskräfte (Finger-Hand- bzw. Ganzkörperkräfte) ohne zu bewegend Lasten ausgeübt.

Bei den beobachteten Lagertätigkeiten handelte es sich vor allem um manuelle Lastenhandhabung, welche in EAWS-Sektion 3 bewertet wird. Hierzu gehören entsprechend EAWS die Handhabungsarten Heben bzw. Umsetzen, Halten, Tragen, Ziehen und Schieben von Lastgewichten ab 3 kg. Auf diese Sektion wird sich im Folgenden fokussiert.

Weiterhin gibt es Tätigkeitsmuster im Lager, z. B. an Ware-zur-Person Stationen, bei denen Sektion 4 dringend zu berücksichtigen ist, da repetitive Belastungen der oberen Extremitäten vorliegen (Wakula et al., 2021). In diesem Projekt wird sich jedoch auf Person-zur-Ware Systeme beschränkt, bei denen „Zykluszeiten“ (hier definiert als Entnahme- und Ablagevorgang des SKU inklusive des Ortswechsels zum nächsten Lagerplatz) von meist über 30 Sekunden auftreten, sodass nicht von repetitiven Tätigkeiten ausgegangen wird (Silverstein et al., 1986; Kuhlant et al., 2015). Mathematisch könnte es somit ab etwa 120 Picks/h grundsätzlich zu Repetitivität kommen. Allerdings sind die durchgeführten Bewegungen kaum gleichförmig wiederkehrend – je nach Lagerplatz und Artikel entstehen unterschiedliche Bewegungen. Die Belastung der oberen Extremitäten durch Repetitivität ist bei Person-zur-Ware Lagertätigkeiten in der Regel als eher gering einzustufen, sollte im Einzelfall allerdings immer überprüft werden (Steinebach et al., 2022).

In Sektion 3 werden Punkte für verschiedene Charakteristika der Arbeitsaufgabe vergeben, siehe Abbildung 4:

- Lastpunkte für das zu handhabende Lastgewicht
- Haltungspunkte für die bei der Lasthandhabung eingenommen Körperhaltung
- Ausführungspunkte für den Rollwiderstand beim Ziehen und Schieben
- Dauerpunkte für die Häufigkeit der Lasthandhabung









Manuelles Handhaben von Lasten (pro Schicht)										Lasten		
Lastgewichte [kg] beim Umsetzen (Heben / Absetzen), Tragen und Halten sowie Ziehen und Schieben												
Umsetzen, Tragen & Halten	Männer (Kg)	3	10	15	20	25	30	35	≥40			
	Lastpunkte	1	1,5	2	3	4	5,5	7	25			
Frauen (Kg)	2	5	7	10	12	15	20	>25				
	Lastpunkte	1	1,5	2	3	4	5,5	7	25			
+	Ziehen und Schieben	M1  Karren	Männer (Kg)	<50	75	100	150	200	≥250			
			Frauen (Kg)	<40	60	80	115	155	≥195			
	M2  Trolleys und Transportwagen	Männer (Kg)	<50	75	100	150	250	350	≥550			
		Frauen (Kg)	<40	60	80	115	195	270	≥425			
	M3  Schienenwagen, Hubwagen	Männer (Kg)	<50	75	150	250	350	500	600	800	≥1250	
		Frauen (Kg)	<40	60	115	195	270	385	460	615	≥960	
Lastpunkte	Transportmittel	0,5	1	1,5	2	3	4	5	6	8		
Körperhaltung, Position der Last (charakteristische Körperhaltung wählen)												
+												
	Oberkörper aufrecht und nicht verdreht, Last am Körper		geringes Rumpfeigen oder -drehen; Last am Körper oder körpermah		tiefes Beugen oder weites Vorneigen; geringe Vorneigung mit gleichzeitigem Verdrehen des Oberkörpers; Last körperfem o. über Schulterhöhe		Asymmetrische Körperhaltungen (Rumpf weit nach vorne beugen und verdrehen; Last körperfem; eingeschränkte Haltbarkeit beim Stehen oder Hocke) oder kniend					
Haltungspunkte	1	2	4	8								
Ausführungsbedingungen (nur bei Ziehen und Schieben von Wagen)												
(+)	sehr geringer Rollwiderstand	Wagen ziehen/schieben auf glattem Boden	auf rauem Boden, über kleine Fugen/Kanten	auf Riffelblech, in/aus Gleis bzw. Spur	Wagen müssen b. Anfahren losgeriss. werden, stark beschädigter Fahrweg						sehr hoher Rollwiderstand	
	Ausführungspunkte	1	3	5	6						8	
Häufigkeit der Lastenhandhabung [Häufigkeit/Schicht], Haltedauer [min/Schicht] oder Wegstrecke [Meter/Schicht]												
x	n = 1											
Manuelles Handhaben von Lasten (Ergebnis)												
19	(Last + Haltung + (Ausführung)) x Dauerpunkte	Umsetzen 1)	() +)	Halten 1)	() +)	Tragen 1)	() +)	Zieh & Schieb kurz 1)	() +)	Zieh & Schieb lang 1)	() +)	
Handhaben Lasten = Σ Zeile 19		1) Summe der Dauerpunkte für Umsetzen, Halten, Tragen, Ziehen & Schieben maximal = 15									=	

Abbildung 4: Sektion 3 „Manuelles Handhaben von Lasten“ aus dem EAWS-Verfahren

Entsprechend des EAWS-Verfahrens werden für jede Handhabungsart die Last-, Haltungs-, und Ausführungspunkte addiert und anschließend mit den Dauerpunkten multipliziert (siehe Zeile 19 in Abbildung 7). Wie bereits beschrieben, sind für die Optimierung zwingend Kennwerte für Einzelverrichtungen notwendig, die sich additiv zusammensetzen. Aus diesem Grund wird der Wert für die Dauerpunkte konstant auf „1“ gesetzt und die Werte der einzelnen Verrichtungen addiert. Demnach wird hier von dem EAWS-Verfahren abgewichen. Die spätere Evaluierung der optimierten Ergebnisse zeigt jedoch, dass die Kennzahlen dennoch gut geeignet sind, um die ursprüngliche EAWS-Evaluierung widerzuspiegeln – lediglich die absolute Höhe des Gesamtpunktwertes ist ohne Aussage (der Vergleich unterschiedlich hoher Gesamtpunkte aber sehr wohl). Eine Kategorisierung in Risikoklassen auf Basis der Kennzahlen ist somit nicht möglich, für die Optimierung jedoch auch nicht notwendig. Die Ergonomie-Kennzahlen ergeben sich schließlich aus folgender Formel:

$$\text{Ergo – Kennzahl} = (\text{Lastpunkte} + \text{Haltungspunkte} + \text{Ausführungspunkte}) * 1 \quad (1)$$

Die Lastpunkte werden direkt aus den jeweiligen Lastgewichten, dem Geschlecht der Lagermitarbeiter sowie der Ausführung mit einer oder beiden Händen ermittelt. Die Haltungs- und Ausführungspunkte werden hingegen aus den Praxiserhebungen abgeleitet.

Zudem wurde im Vergleich zum EAWS eine weitere Änderung vorgenommen. In Sektion 3 werden nach dem Regelwerk lediglich Lastenhandhabungen ab einem Lastgewicht von 3 kg bewertet. Im Lager werden teilweise jedoch auch leichtere Artikel umgesetzt. Diese Umsetzungsvorgänge jedoch mit einer physischen Belastung von „0“ zu bewerten wäre mathematisch ungünstig – bei der Optimierung der Lagerplatzvergabe würden so z. B. auch Schnelldreher in schlecht erreichbaren Positionen eingelagert, da bei strikter Regelbeachtung so keine Belastung in Sektion 3 entsteht. Um dies zu verhindern, wird in diesem Projekt vorgeschlagen, Ergonomie-Kennwerte bei Lastgewichten unterhalb von 3 kg zu bis zu einem Wert von „0“ bei 0 kg zu interpolieren.

Eine weitere Annahme wurde bei der Ermittlung der Ergonomie-Kennzahlen bezüglich des Ziehens und Schiebens von Lasten getroffen: alle Zieh-/ bzw. Schiebevorgänge werden in der Optimierung als „kurz“ bewertet. Ursächlich hierfür ist, dass in der großen Mehrheit aller Fälle im Lager keine manuellen Zieh-/ Schiebevorgänge über 20 m auftreten, ohne dass angehalten oder eine Kurve gefahren wird. So müssen erneut „Losreißkräfte“ überwunden werden, welche die höchste biomechanische Belastung beim Ziehen/ Schieben darstellt (Jung et al., 2005). Bei der Nutzung von angetriebenen Fahrzeugen wird hingegen angenommen, dass die Belastung durch Ziehen bzw. Schieben gänzlich entfällt.

4.3.3. Bestimmung der Haltungspunkte

Um mithilfe der Motion Capture-Erhebungen in der Praxis die ermittelten Gelenkwinkel automatisiert in Haltungspunkte übersetzen zu können, musste zunächst eine Taxonomie entwickelt werden, die bestimmten Körperhaltungen (zusammengesetzt aus einzelnen Gelenkwinkeln) definierte Haltungspunkte zuweist. Die Piktogramme aus EAWS-Sektion 3 (siehe Abbildung 7) sind für sich genommen hierzu nicht in der Lage, da keine exakten Körperwinkel angegeben werden und bestimmte Kombinationen aus Lastabstand, Rumpfbeugung bzw. -torsion unberücksichtigt bleiben.

Aus diesem Grund wurde ein Fragebogen (siehe Abbildung 5) entwickelt, in dem Ergonomie-Experten insgesamt 43 Körperhaltungen, die bei Lagertätigkeiten vorkommen können, mit einem Haltungspunktwert belegen. Die verschiedenen relevanten Körperwinkel wurden dabei gezielt permutiert. So wurde zunächst zwischen den beiden Körperstellungen bzw. Grundhaltungen „Stehen“ und „Hocken“ unterschieden.

Ferner wurde bei der Rumpfbeugung und Rumpftorsion bzw. der Lateralflexion zwischen „keiner“, „geringer“, „mittlerer“ und „starker“ Ausprägung unterschieden. Die Last kann dabei „körpernah“ oder „körperfern“ gehandhabt werden. Entsprechende Bilder der verschiedenen Körperhaltungen unterstützen die Experten bei der Einstufung.





Nr.	Grundhaltung	Beschreibung	Bild	Haltungspunkte
1	stehen	Rumpfbeugung: 0-20° (keine) Rumpftorsion bzw. Lateralflexion: 0-10° (keine) Last: körpernah		
2	stehen	Rumpfbeugung: 20-40° (gering) Rumpftorsion bzw. Lateralflexion: 0-10° (keine) Last: körpernah		
3	stehen	Rumpfbeugung: 40-60° (mittel) Rumpftorsion bzw. Lateralflexion: 0-10° (keine) Last: körpernah		
4	stehen	Rumpfbeugung: > 60° (stark) Rumpftorsion bzw. Lateralflexion: 0-10° (keine) Last: körpernah		

Abbildung 5: Ausschnitt aus dem Fragebogen zur objektivierten Ermittlung von Haltungspunkten

Insgesamt füllten sieben Experten den Fragebogen aus. Durch Berechnung der Mittelwerte liegen nun definierte Haltungspunkte für jede Körperhaltung vor. Die Einstufung konnte anschließend automatisiert und mittels des Motion Capture-Systems objektiviert ermittelt werden.

4.3.4. Ergebnisse der Praxiserhebungen

4.3.4.1. Haltungspunkte

Im Folgenden werden die mittels Motion Capture bestimmten Haltungspunkte in Abhängigkeit vom Kommissioniersystem (Kommissionierung von freistehenden Paletten oder aus Fachbodenregalen) sowie von der Entnahmehöhe in Abbildung 6 dargestellt. Anzumerken ist, dass in dieser Darstellung von einer optimalen Artikelabgabe – z. B. auf der Abgabefläche eines Transportfahrzeug – ausgegangen wird.

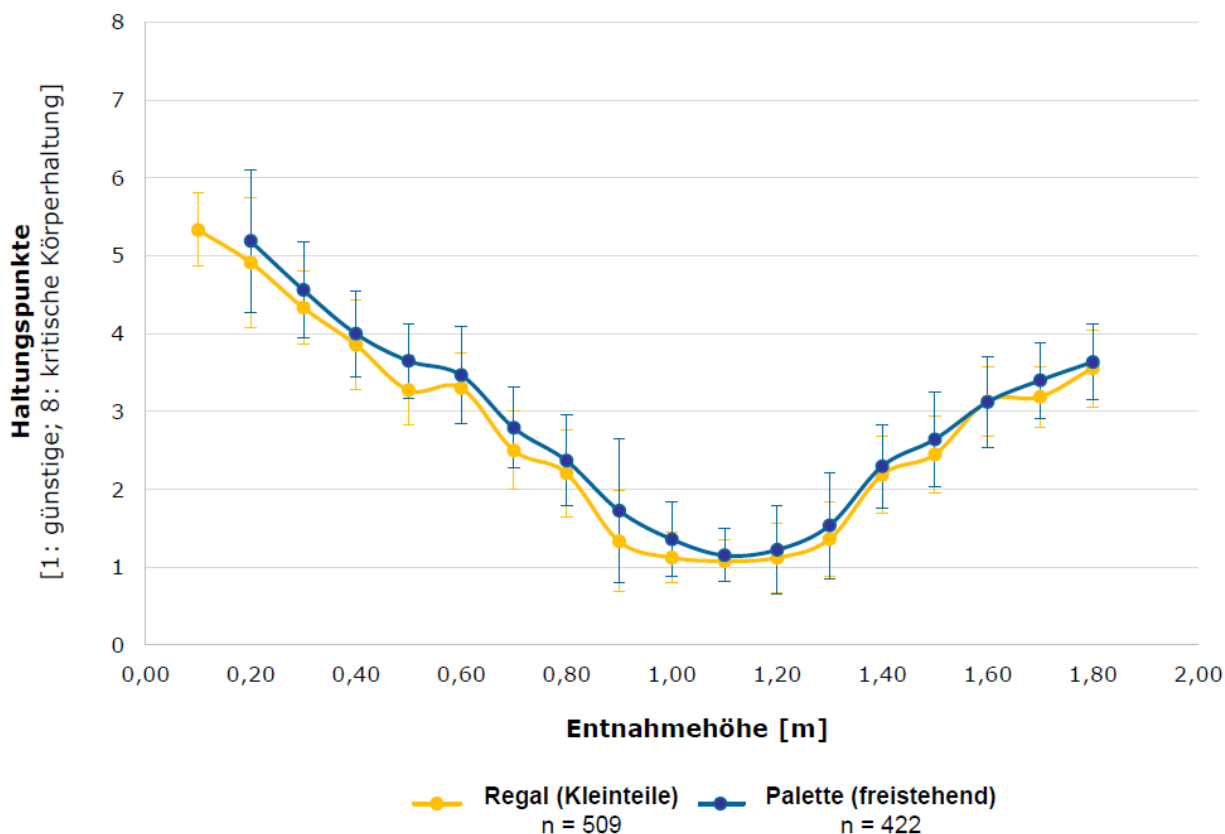


Abbildung 6: Haltungspunkte in Abhängigkeit von der Entnahmehöhe

Wie zu erwarten war, liegen bei Kommissioniervorgängen aus niedrigen bzw. sehr hohen Entnahmehöhen ungünstigere Körperhaltungen vor. Besonders ungünstig ist die Entnahme von Artikeln aus Höhen < 0,4 m – es liegen Haltungspunkte von über 4 Punkten vor. Optimale Entnahmebereiche liegen hingegen zwischen 0,9 und 1,3 m. Dies stimmt gut mit den in der VDI-Norm 3657 genannten optimalen Ablage- bzw. Entnahmehöhen von 0,9 m bzw. 1,1 m überein.

Bei Betrachtung der Werte von Einzelpersonen fällt ferner auf, dass individuelle Körperhaltungen abhängig von der Körpergröße und individuellen Bewegungsabläufen sind – die Fehlerbalken zeigen die Schwankungsbreite der Haltungspunkte. Im Folgenden wird jedoch mit Durchschnittswerten von allen 17 beobachteten Kommissionierenden gerechnet. In Zukunft könnte die Körpergröße mit einbezogen werden, um beispielsweise Kommissionieraufträge gezielt an bestimmte Mitarbeiter zu vergeben.

Die Daten der Praxiserhebung wurden außerdem hinsichtlich der Unterschiede zwischen einer Längseinlagerung bzw. Quereinlagerung von Paletten analysiert. Wenn von Paletten in der untersten Ebene eines Palettenregals kommissioniert wird, so wird diese in aller Regel nicht von einem Gabelstapler entnommen, sondern verbleibt im Regal. Dies hat zur Folge, dass sich die Kommissionierer teilweise deutlich in das Palettenregal hineinbeugen müssen, wenn die zu greifenden Artikel auf dem hinteren Teil der Palette liegen. Dies ist mit höheren Haltungspunkten bei der Lastaufnahme verbunden, wie Abbildung 7 zeigt. Aus ergonomischer Sicht ist somit eine Quereinlagerung etwas günstiger, da die Entnahmetiefen geringer sind. Jedoch sind diese in der Praxis selten anzutreffen, da die Entnahme mit dem Gabelstapler aus dem Regal so aufgrund der Querverstrebungen der Palette erschwert ist und außerdem die Wege zwischen zwei Entnahmeorten im Lager verlängert werden.

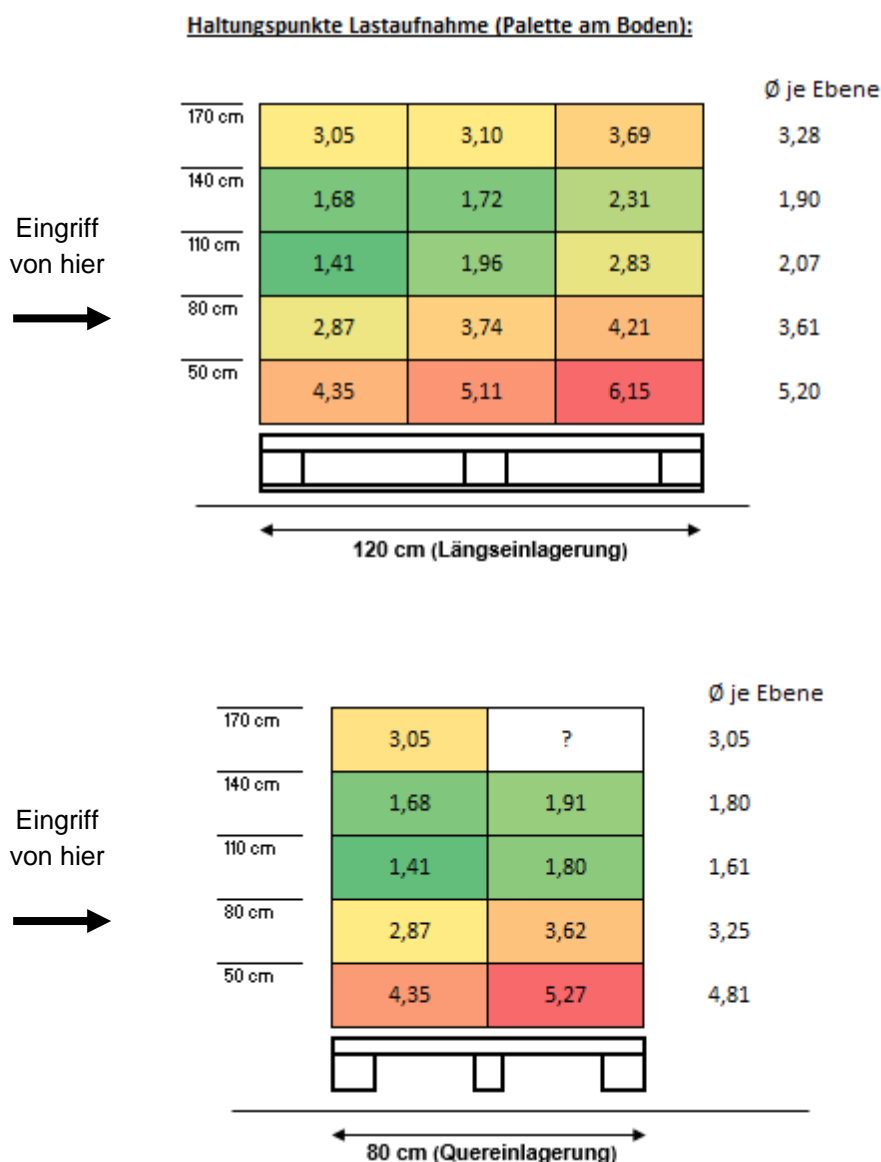


Abbildung 7: Haltungspunkte bei der Artikelentnahme von quer- und längsgelagerten Paletten

Anzumerken ist, dass die farbliche Kodierung nur zu Visualisierungszwecken dient – sie besitzt noch keine ergonomische Beurteilungskraft, da diese nur inklusive der entsprechenden Lastgewichte und Häufigkeiten möglich ist. Ferner ist der fehlende Wert bei der Quereinlagerung durch eine zu geringe Datenmenge zu erklären, sodass für diesen Fall keine valide Aussage getroffen werden kann. Der fehlende Wert kann jedoch auf Basis der Ergebnisse bei längs gelagerten Paletten behelfsmäßig auf 3,10 abgeschätzt werden.

Zuletzt kann festgehalten werden, dass die durchschnittlichen Haltungspunkte beim Ziehen und Schieben von Transportmitteln bei 1,2 Punkten liegt.

4.3.4.2. Einhändige Lastenhandhabung

Die biomechanische Belastung (z. B. auf die Wirbelsäule) hängt davon ab, ob Lasten mit einer bzw. beiden Händen gehandhabt werden. Entsprechend den EAWS-Regeln werden Lastgewichte bei der Bestimmung der Lastpunkte mit 1,7 multipliziert, sofern sie mit nur einer Hand gehandhabt werden. Folglich wurde im Rahmen der Praxiserhebungen versucht, eine empirische Regel aufzustellen, wann ein- bzw. beidhändig umgesetzt wird. Analog zu Goldscheid (2008) wurden hierfür die Abmessungen und das Gewicht als Einflussfaktoren gewählt. Es konnte festgestellt werden, dass Lasten häufig dann einhändig umgesetzt werden, wenn folgende Bedingungen gegeben sind:

- Lastgewicht ≤ 3 kg
- eine der relevanten Abmessungen < 10 cm
- keine der relevanten Abmessungen > 50 cm

Diese Regel ist, wie zu erwarten, stark von der Person des Kommissionierers abhängig und gilt im Einzelfall nicht zwingend, kann jedoch als gute Näherung für die Optimierungszwecke dieses Projekts angenommen werden.

4.3.4.3. Ausführungspunkte

Die Ausführungspunkte beim Ziehen oder Schieben von Lasten wurden in den analysierten Lagern des Projektbegleitenden Ausschusses mit 0 bis 1 Punkten versehen. Insgesamt hatten die eingesetzten Transportmittel sehr geringe Rollwiderstände und die Beschaffenheit des Bodens war in einem guten Zustand. Für Lager, in denen diese Ausführungsbedingungen nicht zutreffen, müssten entsprechend höhere Punktzahlen vergeben werden. Dies könnte beispielsweise bei beschädigten Fahrwegen oder dem Ziehen und Schieben auf einem Riffelblech der Fall sein.

4.3.4.4. Ergonomie-Kennwerte in tabellarischer Form

Mithilfe von Formel (1) wurden schließlich Ergonomie-Kennzahlen für alle Tätigkeitsklassen erstellt; hierbei wurden die Umsetz-/ Zieh-/ Schiebevorgänge jeweils für ein breites Spektrum an Lastgewichten erstellt und tabellarisch zusammengefasst. Im Folgenden ist ein Überblick über alle Ergonomie-Kennzahlentabellen gegeben – Einflussfaktoren, die berücksichtigt werden, sind zusätzlich angegeben.

- **Umsetzen von Artikeln aus Fachbodenregalen (Kleinteile):**
Einflussfaktoren:
 - Geschlecht (männlich/ weiblich)
 - Lastgewicht (0 kg – 30 kg)
 - Ein- bzw. Beidhändigkeit
 - Entnahmehöhe (20 cm – 180 cm)
 - Ablagehöhe (20 cm, 40 cm, 90 cm)

- **Umsetzen von freistehenden Paletten:**
Einflussfaktoren:
 - Geschlecht (männlich/ weiblich)
 - Lastgewicht (0 kg – 40 kg)
 - Ein- bzw. Beidhändigkeit
 - Maximale Ladehöhe der Palette (50 cm, 80 cm, 110 cm, 140 cm, 170 cm)
 - Standhöhe der Palette (0 cm, 50 cm, 80 cm)

- **Umsetzen von längsgelagerten Paletten:**
Einflussfaktoren:
 - Geschlecht (männlich/ weiblich)
 - Lastgewicht (0 kg – 40 kg)
 - Maximale Ladehöhe der Palette (50 cm, 80 cm, 110 cm, 140 cm, 170 cm)
 - Standhöhe = Boden (0 cm)

- **Umsetzen von quergelagerten Paletten:**
Einflussfaktoren:
 - Geschlecht (männlich/ weiblich)
 - Lastgewicht (0 kg – 40 kg)
 - Maximale Ladehöhe der Palette (50 cm, 80 cm, 110 cm, 140 cm, 170 cm)
 - Standhöhe = Boden (0 cm)

- **Ziehen oder Schieben von Transportmitteln:**
Einflussfaktoren:
 - Geschlecht (männlich/ weiblich)
 - Lastgewicht (40 kg – 750 kg)
 - Art des Transportmittels (Karren, Transportwagen mit/ ohne Bockrollen)

Für die Umsetzvorgänge von Paletten ist zu beachten, dass die entsprechenden Haltungspunkte für das Umsetzen aus verschiedenen Entnahmehöhen gemittelt wurden, da bei der Planung der Lagertätigkeiten nicht bekannt ist, wie der aktuelle Füllstand der Paletten zum Zeitpunkt der Entnahme ist. Durch die Angabe der maximalen Palettenladehöhe sowie der Standhöhe der Palette werden die durchschnittlichen Haltungspunkte beeinflusst. *Alle Tabellen sind im Anhang dieses Berichts gegeben.*

Zudem werden in den Tabellen biomechanisch kritische Lastfälle, die bereits bei einmaliger Ausführung ein ergonomisches Risiko beinhalten, gelb hinterlegt. Analog zum MultiPLa (Schaub et al., 2012) werden diese definiert als Lastfälle, bei denen die Haltungspunkte bei der Lastaufnahme oder Lastabgabe ≥ 4 sind und gleichzeitig das Lastgewicht ≥ 20 kg beträgt.

4.4. Entwicklung von Optimierungsmodellen und Lösungsverfahren zur ganzheitlichen Optimierung von Lagerprozessen

Im Folgenden werden die im Rahmen des Projekts entwickelten Optimierungsmodelle und zugehörigen Lösungsverfahren vorgestellt. Abschnitt 4.4.1 stellt das generelle Optimierungskonzept vor. Abschnitte 4.4.2 und 4.4.3 beschreiben unterschiedliche entwickelte Optimierungsmodelle. Abschnitt 4.4.4 stellt das für beide Modelle anwendbare Lösungsverfahren vor.

4.4.1. Optimierungskonzept

Bei der Gestaltung von Lagerprozessen müssen verschiedene Planungsprobleme beachtet und gelöst werden. Zu den wichtigsten Planungsproblemen zählen die Gestaltung des Lagerlayouts, die Lagerplatzvergabe, das Order Batching und die Routenführung der Kommissionierer (vgl. Abschnitt 3.1). Entscheidend ist dabei, dass die verschiedenen Planungsprobleme keineswegs isoliert sind, sondern sich gegenseitig beeinflussen. So hat z. B. die Lagerplatzvergabe einen erheblichen Einfluss darauf, welche Routenpolitiken zu möglichst kurzen Laufwegen führen. Problematisch ist allerdings, dass die simultane Betrachtung aller Planungsprobleme eine zu hohe Komplexität birgt, um mit derzeit bekannten Optimierungsverfahren zielführende Lösungen zu finden. Für die Definition von Optimierungsansätzen gilt es daher abzuwägen, welche Planungsprobleme in welcher Art und Weise simultan betrachtet werden sollen, um möglichst zufriedenstellende Resultate zu erhalten.

Unter Berücksichtigung der Einschätzungen der Unternehmen des Projektbegleitenden Ausschusses, welche Planungsprobleme besonders relevant für KMU sind (vgl. Abschnitt 4.1.1), und der Einschätzung der Autoren, welche Planungsprobleme sinnvoll kombiniert werden können, wurde das in Abbildung 8 schematisch dargestellte grundlegende Optimierungskonzept gewählt.

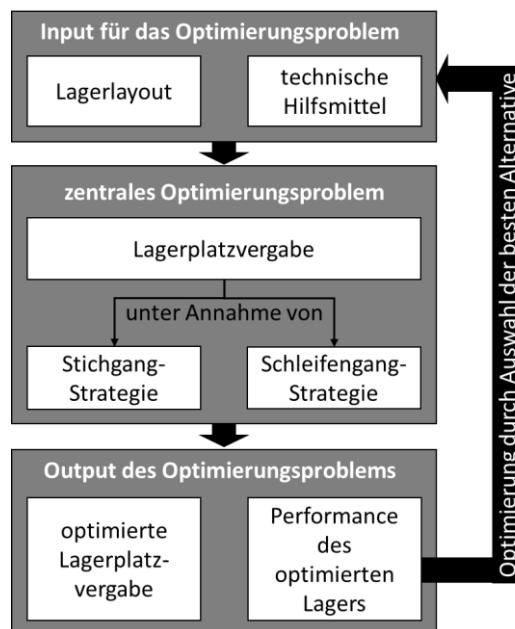


Abbildung 8: Optimierungskonzept

Den Kern des Optimierungskonzepts bildet die Optimierung der Lagerplatzvergabe für ein gegebenes Lagerlayout. Die Lagerplatzvergabe wurde von den Unternehmen des Projektbegleitenden

Ausschusses und von den Autoren als eines der relevantesten Planungsprobleme betrachtet. Die Lagerplatzvergabe hat einerseits einen erheblichen Einfluss auf den effizienten Betrieb des Lagers. Andererseits ist sie aber auch der Haupteinflussfaktor für die körperliche Belastung, die beim Kommissionieren aufkommt. Entscheidend ist dabei, dass die Lagerplatzvergabe nicht isoliert betrachtet werden sollte, da sie stark von der Routenpolitik abhängt, die beim Kommissionieren Verwendung findet. Die beiden verbreitetsten Routenpolitiken sind die Stichgang- und die Schleifengangstrategie. Diese beiden Strategien wurden daher für die Optimierung der Lagerplatzvergabe zugrunde gelegt.

Neben der Lagerplatzvergabe schätzten die Unternehmen die Planung des Lagerlayouts als besonders relevant ein. Um diesen Aspekt zu berücksichtigen, kann das Optimierungsmodell genutzt werden, um alternativenbasierte Vergleiche auszuführen. Die Idee ist dabei folgende: Für ein Lager soll ein geeignetes Layout gefunden werden. Es werden folglich verschiedene Layoutalternativen erstellt, die sich in der Blockstruktur, der Platzierung des Depots sowie der Anzahl an Regalen und Gängen unterscheiden können. Jede dieser Alternativen wird nacheinander als Grundlage für die Optimierung der Lagerplatzvergabe zugrunde gelegt. Anschließend können die resultierenden Ergebnisse verglichen werden, um so die beste Alternative zu bestimmen. Damit kann zwar nicht sichergestellt werden, dass es nicht außerhalb der untersuchten Alternativen noch besser geeignete Layouts gäbe, aber es können Empfehlungen abgeleitet werden, welche Layouts besser geeignet sind als andere. In gleicher Weise kann durch den Vergleich verschiedener Alternativen untersucht werden, welche technischen Hilfsmittel sich für den Einsatz im Lager eignen.

Ferner unterschieden sich die Arten, wie Artikel gelagert werden, erheblich zwischen den unterschiedlichen Lagerhaltungsszenarien, die in Abschnitt 4.1.4 definiert wurden. Es ist daher nicht zielführend, ein einziges Optimierungsmodell zu entwickeln. Stattdessen gilt es, für jedes Lagerhaltungsszenario ein eigenes Modell zu entwerfen. Innerhalb dieses Projekts wurden daher zwei unterschiedliche Optimierungsmodelle entwickelt – eines für „Palettenlager“ und eines für „Fachboden-/ Kleinteilelager“, die die beiden relevantesten Lager bei KMU darstellen. Die Optimierungsmodelle werden in den Abschnitten 4.4.2 und 4.4.3 definiert.

4.4.2. Optimierungsmodell „Palettenlager“

Für die Definition des Optimierungsmodells „Palettenlager“ wird die in Tabelle 5 gegebene Notation verwendet. „Basisparameter“ kennzeichnen hierbei, welche Daten den Input des Optimierungsmodells darstellen und entsprechend im Unternehmen erfasst werden müssen, um das Modell für einen konkreten Anwendungsfall zu verwenden.

Mit I wird die Menge der unterschiedlichen Artikel i bezeichnet, die in den Lagern gelagert werden sollen. Jede Stückeinheit eines Artikels i hat ein bekanntes Gewicht g_i . Die Kommissionierung erfolgt auftragsbasiert. Die Artikel eines einzelnen Auftrags werden in einer gemeinsamen Tour kommissioniert. Dabei bezeichnet θ_j einen Auftrag (also eine Liste bzw. Menge an Artikeln) und θ die Menge aller möglichen Aufträge, wobei f_j die relative Häufigkeit angibt, mit der Auftrag j bearbeitet werden muss. Es sei hierbei darauf hingewiesen, dass θ_j nur die Artikelnummern der Artikel beinhaltet, nicht jedoch die benötigte Stückzahl. Stattdessen gibt der Parameter s_i an, wie viele Stück eines Artikels im Durchschnitt pro Auftrag benötigt werden. Werden in einem Lager z. B. 10000 Kommissionieraufträge in einem Monat bearbeitet und dabei 357 Stück von Artikel i kommissioniert, so ergibt sich $s_i = \frac{357}{10000} = 0,0357$.

Symbole	Bedeutungen
\hat{b}, b	Basisparameter: Anzahl der Lagerblöcke, Index eines Lagerblocks
I, i	Basisparameter: Menge aller Artikel, Artikelindex
c_j	Basisparameter: Einheiten auf einer vollen Palette von Artikel i
f_j	Basisparameter: relative Häufigkeit, mit der der Kommissionierauftrag f_j vorkommt
g_j	Basisparameter: Gewicht einer Einheit von Artikel i
h, \hat{h}	Basisparameter: Anzahl der Regalplätze pro Reihe, Index eines Regalplatzes
P	erwartete physische Belastung pro individuellem Kommissionierauftrag
q_i	Basisparameter: Anzahl an Paletten, die von Artikel i gelagert werden
r, \hat{r}	Basisparameter: Anzahl der Regalreihen, Index einer Regalreihe
s_i	Basisparameter: durchschnittlich pro Kommissionierauftrag benötigte Einheiten von Artikel i
T	erwartete Zeit pro individuellem Kommissionierauftrag
v, \hat{v}	Basisparameter: Anzahl der Regalebenen pro Regalplatz, Index einer Regalebene
w	Basisparameter: Gewichtungsfaktor
Z	Zielfunktionswert
θ, θ_j, j	Basisparameter: Menge aller Kommissionieraufträge, Basisparameter: j -ter Kommissionierauftrag, Index eines Kommissionierauftrags

Tabelle 5: Notation des Optimierungsmodells „Palettenlager“

Annahmegemäß werden alle Artikel auf standardisierten, gleichgroßen Paletten gelagert, die im Lager jeweils einen Lagerplatz belegen. Eine Artikelnummer kann dabei auch auf mehreren Paletten gelagert werden, wobei q_i die Anzahl der Paletten angibt. Es wird dabei jedoch angenommen, dass pro Artikelnummer stets nur eine Palette zum Kommissionieren von Artikeln verwendet wird, während die übrigen $q_i - 1$ Paletten dem Nachschub dienen. Erst wenn die aktuelle Kommissionier-Palette von einer Artikelnummer i leer ist, wird eine der vorherigen Nachschub-Paletten zur neuen Kommissionier-Palette deklariert. Gleichermaßen werden verbrauchte Nachschub-Paletten durch frische Paletten aus dem Wareneingang ersetzt. Die Anzahl an Einheiten, die eine volle Palette der Artikelnummer i enthält, wird mit c_i bezeichnet.

Die Paletten werden in einem Lager gelagert, in dem die Regale in parallelen Gängen angeordnet sind. Das Lager kann dabei annahmegemäß als Ein- oder Zweiblocklager ausgelegt sein, wobei \hat{b} die Anzahl der Blöcke b , \hat{r} die Anzahl der Regalreihen r und \hat{h} die Anzahl an Lagerplätzen h in der Horizontalen pro Regalreihe angibt. Ferner haben die Regale \hat{v} Regalebenen v in der vertikalen, wobei nur die unterste Regalebene ($v = 1$) ohne Hilfsmittel erreichbar ist. Zum Erreichen der anderen Regalebenen ist ein Hilfsmittel erforderlich – annahmegemäß ein Gabelstapler oder Hochhubkommissionierer. Zum besseren Verständnis zeigt Abbildung 9 verschiedene schematische Lageraufbauten in der Vogelperspektive, die dieser Definition entsprechen. Mit „D“ ist dabei das Depot bezeichnet, bei dem die kommissionierten Artikel abgegeben werden. Es kann annahmegemäß an den in Abbildung 9 eingezeichneten Positionen verortet sein. Die dargestellten Layouts werden im Rahmen der Arbeit als Typ „A“, „B“ und „C“ bezeichnet, um sie eindeutig zu unterscheiden.

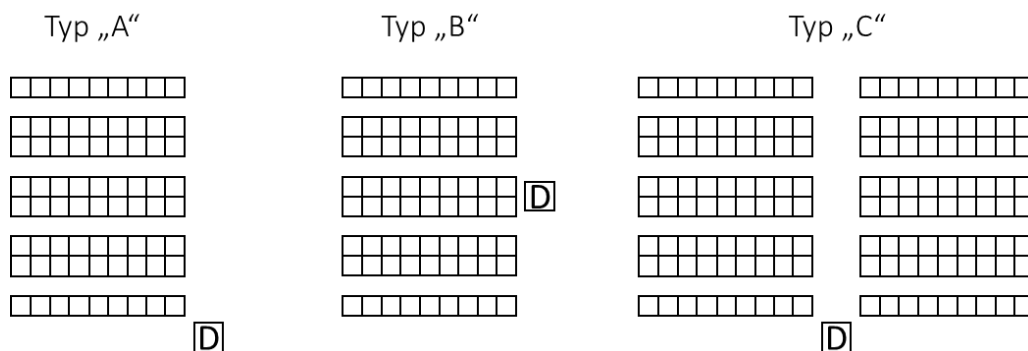


Abbildung 9: Den Optimierungsmodellen zugrundeliegende Layouttypen

Für das Lager werden drei Arten der Lagerung unterschieden: dediziert, semi-dediziert und chaotisch. Dabei kann für jede Regalreihe separat entschieden werden, für welche Art der Lagerung sie verwendet werden soll. Wird eine Regalreihe für die dedizierte Lagerung (auch Festplatzlagerung genannt) verwendet, kann jeder Regalposition (h, r, b) genau eine Artikelnummer zugewiesen werden. Dabei wird angenommen, dass sich die Kommissionier-Palette dieses Artikels immer in der untersten Regalebene ($v = 1$) befindet, da diese ohne Hilfsmittel erreichbar ist. Die Nachschub-Paletten werden entsprechend in den Regalreihen darüber gelagert. Wird eine Regalreihe für die chaotische Lagerung verwendet, können alle Regalebenen auf allen Lagerpositionen der Regalreihe verwendet werden, um Artikel chaotisch, also ohne fest zugewiesenen Platz, zu lagern. Die semi-dedizierte Lagerung stellt einen Kompromiss dar. Wird eine Regalreihe für die semi-dedizierte Lagerung verwendet, kann jeder Lagerposition ebenfalls eine Artikelnummer zugewiesen werden. Allerdings wird nur die unterste Regalebene ($v = 1$) der Position dediziert zugewiesen. Alle anderen Regalebenen werden dem chaotischen Lagerbereich zugerechnet.

Gleichermaßen kann für jede Artikelnummer entschieden werden, auf welche der drei Arten die zugehörigen Paletten gelagert werden sollen. Wird ein Artikel dediziert gelagert, so ist er einer festen Regalposition (r, h, b) zugewiesen. Die Kommissionier-Palette wird in der untersten Regalebene ($v = 1$) der Regalposition gelagert. Die Nachschubpaletten werden in den darüberliegenden Regalebenen ($v = 2, \dots, \hat{v}$) gelagert. Wird ein Artikel semi-dediziert gelagert, so ist seine Kommissionier-Palette fest der untersten Regalebenen einer bestimmten Regalposition (r, h, b) zugewiesen. Seine Nachschubpaletten haben dagegen keine feste Zuweisung und können auf beliebigen Lagerplätzen im chaotischen Lagerbereich gelagert werden. Bei chaotisch gelagerten Artikeln werden alle Paletten im chaotischen Bereich des Lagers gelagert, ohne dass eine feste Lagerplatzzuordnung existiert.

Bei dedizierter und semi-dedizierter Lagerung ist es folglich notwendig, eine Nachschub-Palette umzulagern, sobald die Kommissionier-Palette leer wird. Dieser Aufwand entfällt bei chaotischer Lagerung. Dafür ist bei dedizierter und semi-dedizierter Lagerung die Kommissionier-Palette jederzeit ohne Hilfsmittel zugänglich. Bei chaotischer Lagerung kann es dagegen notwendig sein, die Kommissionier-Palette zunächst zugänglich zu machen, da diese nicht immer in der untersten Regalebenen gelagert wird. Je nach Zugriffshäufigkeit einer Artikelnummer können damit unterschiedliche Varianten der Lagerung vorteilhaft sein. Ferner hat die chaotische Lagerung den Vorteil, dass sie die vorhandene Lagerplatzkapazität effizienter ausnutzt, was besonders dann relevant ist, wenn viele Artikel bei geringer Lagerkapazität gelagert werden sollen.

Aus ergonomischer Sicht ist die chaotische Lagerung den beiden anderen Lagerungsarten vorzuziehen. Dies ist dadurch begründet, dass bei (semi-)dedizierter Lagerung Kommissionier-Paletten stets auf dem Boden stehen, was ungünstiges tiefes Bücken (vgl. Abschnitt 4.2) bei der Entnahme von Artikeln bedingt, wenn sich die Palette allmählich leert. Bei der chaotischen Lagerung sind Kommissionier-Paletten mitunter auch in höheren Regalebenen gelagert und müssen mittels technischer Hilfsmittel (z. B. Gabelstapler, Hubwagen oder Vertikalkommissionierer) zugänglich gemacht werden. Dies kostet zwar mehr Zeit, erlaubt es aber auch, die Palette so zu positionieren, dass kein tiefes Bücken bei der Artikelentnahme notwendig ist – z. B., indem eine Palette, die mit einem Gabelstapler entnommen wird, nicht komplett bis zum Boden abgesenkt wird. Außerdem ist in letzterem Fall die Rückseite der Palette besser, also mit geringerer physischer Belastung, zugänglich (vgl. Abschnitt **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

Bei der Kommissionierung fallen sowohl ein zeitlicher Aufwand T als auch eine physische Belastung P für den Kommissionierer an, die davon abhängen, auf welche Art und Weise die Artikel gelagert werden. Das Ziel des Optimierungsmodells ist es daher, zu bestimmen,

- welche Lagerregale für die dedizierte, semi-dedizierte und chaotische Lagerung genutzt werden sollen;
- welche Artikel dediziert, semi-dediziert und chaotisch gelagert werden sollen;
- auf welchen Lagerplätzen dediziert und semi-dediziert gelagerte Artikel einzulagern sind;

sodass die gewichtete Summe

$$Z = w \cdot P + (1 - w) \cdot T \quad (2)$$

aus durchschnittlichem zeitlichem Aufwand T und durchschnittlicher physischer Belastung P pro Kommissionierauftrag minimiert wird. Hierbei stellt w einen vom Lagerplaner generell frei wählbaren Gewichtungsfaktor dar. In Abschnitt 4.5.1.2 wird untersucht, welche Auswirkungen der Gewichtungsfaktor auf das Ergebnis hat.

Der zeitliche Aufwand T setzt sich zusammen aus dem zeitlichen Aufwand, um verbrauchte Paletten durch neue aus dem Wareneingang zu ersetzen, dem zeitlichen Aufwand, um bei dediziert und semi-dediziert gelagerten Artikeln leere Kommissionier-Paletten durch Nachschub-Paletten zu ersetzen, dem zeitlichen Aufwand für die Entnahme von Artikel während des Kommissionierens (was auch das Erreichen der Paletten beinhaltet, wenn sie nicht in der untersten Regalebene gelagert werden) und dem zeitlichen Aufwand für die Fortbewegung des Kommissionierers. Die ersten beiden Komponenten werden dabei auf ihren Anteil pro Kommissionierauftrag heruntergerechnet. Für die Bestimmung des zeitlichen Aufwands für die Fortbewegung kann entweder die Stichgang- oder die Schleifengangstrategie zugrunde gelegt werden.

Die physische Belastung P setzt sich zusammen aus der Belastung für die Entnahme von Artikeln von Paletten und für die Fortbewegung des Kommissionierers. Beide Belastungskomponenten werden dabei entsprechend der in Abschnitt 4.3 entwickelten Kennzahlen bestimmt.

4.4.3. Optimierungsmodell „Fachboden-\ Kleinteilelager“

Für die Definition des Optimierungsmodells „Fachboden-\ Kleinteilelager“ wird die in Tabelle 6 gegebene Notation verwendet. „Basisparameter“ kennzeichnen hierbei, welche Daten den Input

des Optimierungsmodells darstellen und entsprechend im Unternehmen erfasst werden müssen, um das Modell für einen konkreten Anwendungsfall zu verwenden.

Symbole	Bedeutungen
\hat{b}, b	Basisparameter: Anzahl der Lagerblöcke, Index eines Lagerblocks
I, i	Basisparameter: Menge aller Artikel, Artikelindex
f_j	Basisparameter: relative Häufigkeit, mit der der Kommissionierauftrag f_j vorkommt
g_j	Basisparameter: Gewicht einer Einheit von Artikel i
h, \hat{h}	Basisparameter: Anzahl der Regalplätze pro Reihe, Index eines Regalplatzes
P	erwartete physische Belastung pro individuellem Kommissionierauftrag
r, \hat{r}	Basisparameter: Anzahl der Regalreihen, Index einer Regalreihe
s_i	Basisparameter: durchschnittlich pro Kommissionierauftrag benötigte Einheiten von Artikel i
T	erwartete Zeit pro individuellem Kommissionierauftrag
v, \hat{v}	Basisparameter: Anzahl der Regalebenen pro Regalplatz, Index einer Regalebene
w	Basisparameter: Gewichtungsfaktor
Z	Zielfunktionswert
θ, θ_j, j	Basisparameter: Menge aller Kommissionieraufträge, Basisparameter: j -ter Kommissionierauftrag, Index eines Kommissionierauftrags

Tabelle 6: Notation des Optimierungsmodells „Fachboden-/Kleinteilelager“

Mit I wird die Menge der unterschiedlichen Artikel i bezeichnet, die im Lager gelagert werden sollen. Jede Stückerinheit eines Artikels i hat ein bekanntes Gewicht g_i . Die Kommissionierung erfolgt auftragsbasiert. Die Artikel eines einzelnen Auftrags werden in einer gemeinsamen Tour kommissioniert. Dabei bezeichnet θ_j einen Auftrag (also eine Liste bzw. Menge an Artikeln) und θ die Menge aller möglichen Aufträge, wobei f_j die relative Häufigkeit angibt, mit der Auftrag j bearbeitet werden muss. Es sei hierbei darauf hingewiesen, dass θ_j nur die Artikelnummern der Artikel beinhaltet, nicht jedoch die benötigte Stückzahl. Stattdessen gibt der Parameter s_i an, wie viele Stück eines Artikels im Durchschnitt pro Auftrag benötigt werden.

Die Artikel werden in einem Lager gelagert, in dem die Regale in parallelen Gängen angeordnet sind. Das Lager kann dabei annahmegemäß als Ein- oder Zweiblocklager ausgelegt sein, wobei \hat{b} die Anzahl der Blöcke b , \hat{r} die Anzahl der Regalreihen r und \hat{h} die Anzahl an Lagerplätzen h in der Horizontalen pro Regalreihe angibt (vgl. Abbildung 9). Ferner haben die Regale \hat{v} Regalebenen v in der Vertikalen, wobei alle Regalebenen ohne Hilfsmittel erreichbar sind. Jede Artikelnummer belegt bei der Lagerung annahmegemäß genau einen Lagerplatz (r, h, v, b) und wird dediziert gelagert. Abhängig davon, auf welcher Regalhöhe ein Artikel gelagert wird, kann sowohl die Zeit als auch die physische Belastung für die Entnahme während der Kommissionierung variieren, wobei für beide Faktoren mittlere Höhen von etwa 0,9 bis 1,3 m günstig sind (vgl. Abschnitt 4.3.4.1).

Bei der Kommissionierung innerhalb des Lagers fallen sowohl ein zeitlicher Aufwand T als auch eine physische Belastung P für den Kommissionierer an, die davon abhängen, an welchem Lagerplatz die Artikel gelagert werden. Das Ziel des Optimierungsmodells ist es daher, zu bestimmen, welcher Artikel auf welchem Lagerplatz gelagert werden soll, sodass die gewichtete Summe

$$Z = w \cdot P + (1 - w) \cdot T \quad (3)$$

aus durchschnittlichem zeitlichem Aufwand T und durchschnittlicher physischer Belastung P pro Kommissionierauftrag minimiert wird. Hierbei stellt w einen frei wählbaren Gewichtungsfaktor dar. In Kapitel 4.5.2.2 wird untersucht, welche Auswirkung der Gewichtungsfaktor auf das Ergebnis hat.

Der zeitliche Aufwand T setzt sich zusammen aus dem zeitlichen Aufwand für die Entnahme von Artikeln während des Kommissionierens und dem zeitlichen Aufwand für die Fortbewegung des Kommissionierers. Für letzteres kann entweder die Stichgang- oder die Schleifengangstrategie zugrunde gelegt werden.

Die physische Belastung P setzt sich zusammen aus der Belastung für die Entnahme von Artikeln aus Regalen und für die Fortbewegung des Kommissionierers. Beide Belastungskomponenten werden dabei entsprechend der in Abschnitt 4.3 entwickelten Kennzahlen bestimmt.

4.4.4. Lösungsverfahren

Die in den Abschnitten 4.4.2 und 4.4.3 definierten Optimierungsmodelle können als NP-schwer klassifiziert werden. Aus anwendungsorientierter Hinsicht ergibt sich aus dieser Klassifikation, dass der Rechenaufwand zur Lösung der Probleme so hoch ist, dass diese bei einer realitätsnahen Anzahl an Artikeln, faktisch nicht exakt – also garantiert optimal – gelöst werden können. Stattdessen ist der übliche Ansatz, Heuristiken zur Lösung der Optimierungsmodelle zu verwenden. Heuristiken garantieren nicht, dass die optimale Lösung des Optimierungsproblems gefunden werden kann, sind aber so gestaltet, dass mit hoher Wahrscheinlichkeit eine sehr gute Lösung gefunden wird, die im Idealfall sogar der optimalen Lösung entspricht. Zur Lösung der vorliegenden Probleme wird daher das heuristische Verfahren der Tabu-Suche (TS) als Lösungsverfahren angesetzt, das nachfolgend konzeptionell und auch für Nichtfachkundige nachvollziehbar erläutert wird. Für eine formelle Erläuterung sei auf die Literatur, z. B. Zäpfel (2010), verwiesen.

Bei der TS handelt es sich um eine sogenannte Metaheuristik, ein heuristisches Verfahren, das allgemeingehalten formuliert ist und durch Anpassung auf konkrete Probleme zugeschnitten werden kann. Die Grundlage der TS bildet die sogenannte Nachbarschaftssuche. Bei der Nachbarschaftssuche wird eine Lösung – im vorliegenden Fall also die Zuordnung von Artikeln zu Lagerplätzen – ausgehend von einer initialen Startlösung sukzessiv verbessert. Die Verbesserung der Lösung erfolgt dabei iterativ (d.h. schrittweise) durch Züge, also kleine Änderungen der Lösung. In jeder Iteration wird dazu zunächst die Nachbarschaft der aktuellen Lösung bestimmt. Bei der Nachbarschaft handelt es sich um alle alternativen Lösungen, die von der aktuellen Lösung durch das Ausführen genau eines Zuges erreichbar sind. Aus der Nachbarschaft wird anschließend die beste Lösung ausgewählt, um die aktuelle Lösung zu überschreiben.

In der beschriebenen Art und Weise führt die Nachbarschaftssuche allerdings dazu, dass nur lokale Optima eines Optimierungsproblems gefunden werden, das globale Optimum aber meistens nicht erreicht wird, was anschaulich an folgender Analogie nachvollzogen werden kann: Eine

Person befindet sich inmitten einer nebeligen Hügellandschaft, in der sie nur ihre nächste Umgebung sehen kann, und möchte das tiefste Tal der Landschaft finden. Sie schaut sich dazu ihre Umgebung an und läuft Schritt für Schritt in Richtung des steilsten Abstiegs. Nach einigen Schritten kommt sie im nächstgelegenen Tal an. Dieses ist allerdings im Regelfall nicht das tiefste Tal der Landschaft, sondern nur ein lokales Tal. Wird die Hügellandschaft mit der Lösungsgüte eines Optimierungsproblem gleichgesetzt (wobei tiefere Täler besseren Lösungen entsprechen) und wird das schrittweise Voranschreiten der Person auf das iterative Verbessern der Lösung übertragen, wird die Problematik ersichtlich.

Die Analogie deutet aber auch bereits eine mögliche Lösung an. Ist die Person im lokalen Tal angekommen, kann sie ihre Suche nach dem tiefsten Tal der gesamten Landschaft fortführen, indem sie einen weiteren Hügel erklimmt und von dort aus ihre Suche auf gleiche Weise fortsetzt. Um dabei nicht wieder denselben Hügel zu erklimmen, von dem sie gerade herabgestiegen ist, merkt sie sich stets ihre zuletzt ausgeführten Schritte und schließt diese für ihr Vorankommen aus. Dieselbe Idee macht sich die TS zunutze. Wenn bei der Nachbarschaftssuche keine Lösung gefunden werden kann, die zu einer Verbesserung der Lösung führt, wird eine Lösung gewählt, die (temporär) zu einer Verschlechterung – im Sinne der Analogie also bergauf – führt. Um zu vermeiden, dass dies der vorangegangenen Lösung entspricht, werden alle Züge, die kürzlich ausgeführt wurden, verboten – also tabu gesetzt (was dem Verfahren seinen Namen gibt). Dies entspricht der Person, die ihre kürzlich vollzogenen Schritte ausschließt. Formell ist der Ablauf der TS in Abbildung 10 dargestellt. Dabei sei darauf hingewiesen, dass es keine universell gültige Definition der TS gibt, sondern verschiedene Ausprägungen existieren, die auf dem gleichen grundlegenden Gedanken aufbauen.

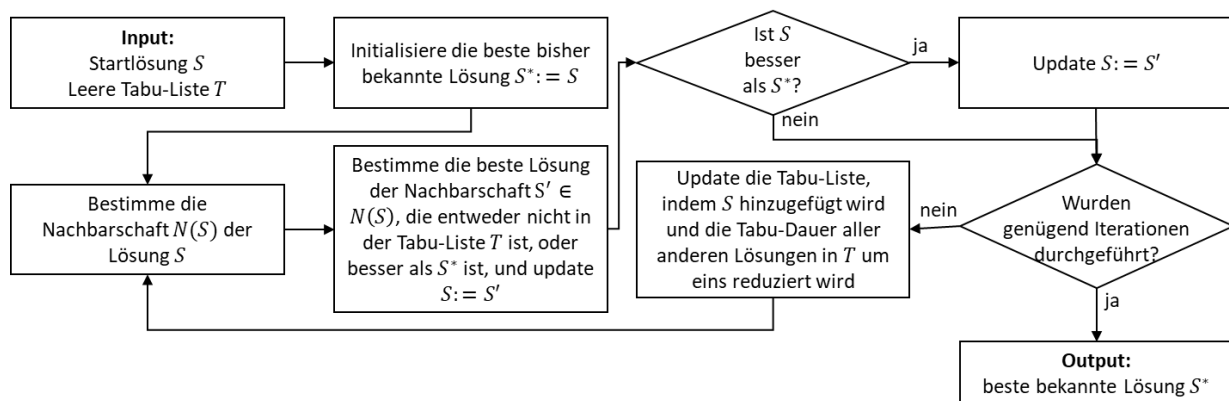


Abbildung 10: Ablaufdiagramm der TS

Um die TS auf die beiden vorliegenden Optimierungsprobleme anzuwenden, gilt es, die Züge zu definieren, die durchgeführt werden können. Beim Optimierungsproblem „Palettenlager“ werden folgende Züge genutzt:

- Tausch der Lagerplätze zweiter Artikel.
- Verschiebung eines Artikels auf einen freien (semi-)dedizierten Lagerplatz (falls vorhanden).

- Verschiebung eines (semi-)dediziert gelagerten Artikels in den chaotischen Lagerbereich.
- Änderung der Art (dediziert, semi-dediziert oder chaotisch), wie Artikel in einer Regalreihe gelagert werden können.

Beim Optimierungsproblem „Fachboden-\ Kleinteilelager“ werden folgende Züge genutzt:

- Tausch der Lagerplätze zweiter Artikel.
- Verschiebung eines Artikels auf einen freien Lagerplatz (falls vorhanden).

Ferner ist es notwendig, zur Anwendung der TS eine initiale Lösung des Problems zu finden, da die TS lediglich eine vorhandene Lösung verbessern, diese jedoch nicht von Grund auf generieren kann. Dabei gilt typischerweise, dass die TS eine bessere Performance hat, je besser die initiale Lösung ausfällt. Für beide betrachteten Optimierungsprobleme wird dabei ausgenutzt, dass sie sich zu sogenannten linearen Zuweisungsproblemen vereinfachen lassen, sofern der Aspekt der Routenführung vernachlässigt wird und, im Falle des Optimierungsproblems „Palettenlager“, festgelegt wird, welche Regalreihen für welche Art der Lagerung verwendet werden sollten. Die sich damit ergebenden linearen Zuordnungsprobleme können effizient gelöst werden (beispielsweise mittels der sogenannten Ungarischen Methode, vgl. Kuhn, 1995). Die Lösung des linearen Zuordnungsproblems kann dann als initiale Lösung für die TS genutzt werden, die nun wieder den Aspekt der Routenführung berücksichtigt.

Um das Optimierungsproblem „Palettenlager“ zu einem linearen Zuweisungsproblem zu vereinfachen, muss festgelegt werden, welche Regalreihen für welche Art der Lagerung verwendet werden sollten. Dies kann a priori nicht optimal entschieden werden, weshalb ein Genetischer Algorithmus (GA) verwendet wird, um eine möglichst gute Variante zu bestimmen. Beim GA handelt es sich um eine Metaheuristik, die das Konzept der biologischen Evolution auf die Optimierung überträgt (Zäpfel, 2010). Vereinfacht gesprochen, setzen sich in der Natur bevorzugt solche Individuen durch, die ihrer Umgebung am besten angepasst sind. Die Evolutionsbiologie spricht in diesem Zusammenhang von evolutionärer Fitness. Fittere Individuen pflanzen sich mit höherer Wahrscheinlichkeit fort und vererben ihren Nachkommen dabei zentrale Eigenschaften ihrer selbst. Die Eigenschaften eines Individuums sind wiederum in Genen codiert. Die Vererbung von Eigenschaften entspricht daher vereinfacht dargestellt der Übergabe von Genen, die die jeweiligen Informationen tragen. Über mehrere Generationen entwickeln sich damit besonders fitte Individuen.

Der GA setzt nun Lösungen eines Optimierungsproblems – im vorliegenden Fall also mögliche Festlegungen, welche Regalreihen für welche Art der Lagerung genutzt werden sollen – mit Individuen gleich. Die Fitness eines Individuums entspricht der Güte dieser Festlegung. Zu Beginn des GA wird eine Menge zufälliger Festlegungen generiert, die der Population entsprechen. Anschließend werden über mehrere Iterationen Festlegungen mit besonders hoher Güte ausgewählt und zu neuen Lösungen rekombiniert und zur Population hinzugefügt, während schlechte Festlegungen aus der Population ausscheiden. Über mehrere Iterationen wird die Population damit zunehmend fitter – sie enthält zunehmend besser Festlegungen. Um im vorliegenden Fall die Güte einer Festlegung zu bestimmen, wird aufbauend auf dieser ein lineares Zuweisungsproblem definiert und gelöst. Am Ende des Ablaufs des GA kann schließlich die beste Festlegung aus der Population ausgewählt werden, um damit die Initiallösung für die TS zu generieren.

4.5. Durchführung von numerischen Experimenten

Die in Abschnitt 4.4.4 vorgestellten Optimierungsverfahren können genutzt werden, um bei konkret vorliegenden Lagern optimierte Lagerplatzzuweisungen zu bestimmen und die Auswirkung unterschiedlicher technischer Hilfsmittel und Lagerlayouts zu untersuchen. Darüber hinaus können die Optimierungsverfahren genutzt werden, um mittels numerischer Experimente zu allgemeingültigeren Erkenntnissen zu gelangen, aus denen Handlungsempfehlungen abgeleitet werden können. Die Grundidee bei der Durchführung numerischer Experimente besteht darin, auf Basis praxisnaher statistischer Daten verschiedene Lager zu simulieren und diese mittels Optimierungsverfahren zu lösen. Aus den Ergebnissen der Optimierung lassen sich anschließend Schlussfolgerungen ziehen. Ein einzelnes simuliertes Lager wird in diesem Zusammenhang als Instanz bezeichnet. Nachfolgend werden die numerischen Experimente für beide Optimierungsprobleme getrennt voneinander vorgestellt. Dabei wird auch explizit die Generierung von Instanzen beschreiben.

4.5.1. Numerische Experimente zum „Palettenlager“

Nachfolgend werden die Durchführung und die Ergebnisse der numerischen Experimente zum Optimierungsproblem „Palettenlager“ beschrieben.

4.5.1.1. Generierung von Instanzen für das „Palettenlager“

Bei der Generierung von Instanzen werden verschiedene Parameter, wie z. B. die Bedarfswahrscheinlichkeiten der unterschiedlichen Artikel, zufällig festgelegt. Das bedeutet nicht, dass die entsprechenden Werte willkürlich gewählt werden, sondern entsprechend realistischer Annahmen oder statistischer Kennzahlen aus einem bestimmten Wertebereich per Zufall ausgewählt werden. Dies ist ein übliches Vorgehen, um realitätsnahe Szenarien abzubilden. Um hieraus schließlich wieder allgemeine Aussagen ableiten zu können, werden mehrere Instanzen auf diese Art und Weise generiert, gelöst und anschließend die Ergebnisse statistisch – z. B. über Mittelwertbildung – ausgewertet. Im Rahmen der hier durchgeführten Rechenstudie werden zehn Instanzen auf die beschriebene Art und Weise gebildet, wobei dies eine übliche Anzahl für diesen Zweck darstellt.

Zur Festlegung der Bedarfshäufigkeiten und Gewichte der Artikel werden die in Abschnitt 4.1.1 berechneten statistischen Verteilungen zugrunde gelegt. Zudem wird angenommen, dass pro Kommissionierauftrag durchschnittlich zehn unterschiedliche Artikel in Mengen von durchschnittlich je vier Stück zu kommissionieren sind. Pro Artikel müssen annahmegemäß zwischen zwei bis fünf Paletten im Lager gelagert werden. Es wird angenommen, dass alle Paletten Standardmaße von 80 cm auf 120 cm haben, im vollen Zustand eine Füllhöhe von 150 cm aufweisen und – je nach Artikel – zwischen 20 und 30.000 Stück an Artikeln fassen können. Außerdem wird bei den grundlegenden Experimenten davon ausgegangen, dass die Paletten so gelagert werden, dass ihre kurze Seite Richtung Gang zeigt (Längslagerung). Eine davon abweichende Querlagerung, bei der die Paletten um 90° gedreht gelagert werden, wird in Abschnitt 4.5.1.5 separat untersucht.

Für die Kommissionierung wird annahmegemäß ein angetriebener Wagen genutzt. Ferner wird davon ausgegangen, dass Paletten aus oberen Regalreihen stets mit einem Gabelstapler entnommen werden, wenn sie zur Artikelentnahme zugänglich gemacht, ein- oder umgelagert werden müssen.

Für alle grundlegenden Instanzen wird ein Lager mit einem Block ($\hat{b} = 1$), acht Regalreihen ($\hat{r} = 8$), 20 horizontalen Plätzen pro Regalreihe ($\hat{h} = 20$) und fünf vertikalen Regalebenen ($\hat{v} = 5$) angenommen, wobei sich das Depot an der Ecke des Lagerblocks befindet. Diese Annahme wird später im Rahmen der Untersuchung verschiedener Layoutoptionen in Abschnitt 4.5.1.4 noch verändert, dient jedoch für die übrigen numerischen Experimente als Standardlayout. Das Lager kann folglich 800 Paletten fassen und zählt damit im Vergleich mit der Praxis zu den kleineren Lagern. Diese Lagergröße wurde gewählt, da sie dennoch an praktisch relevante Lagergrößen heranreicht und gleichzeitig noch in vertretbarer Rechenzeit optimiert werden kann. Letzteres ist insofern relevant, da die Berechnungszeit zur Optimierung mit steigender Lagergröße zunimmt und im Rahmen der numerischen Experimente eine Vielzahl an Optimierungen durchgeführt werden müssen.

Würden im angenommenen Lager alle Artikel (semi-)dediziert gelagert, könnten maximal 160 Artikel gelagert werden. Würden im Lager alle Artikel chaotisch gelagert, könnte es maximal 228 Artikel fassen. Realistischer sind jedoch Artikelanzahlen, die zwischen diesen beiden Kennwerten liegen. Daher werden für die Instanzen unterschiedliche Artikelanzahlen aus dem Bereich zwischen 185 und 210 angenommen.

4.5.1.2. Pareto-Evaluation des „Palettenlagers“

Wie in Abschnitt 4.4.2 beschrieben, besteht die Zielstellung des Optimierungsproblems „Palettenlager“ aus der Minimierung von zwei Aspekten, der Zeit für die Kommissionierung und der physischen Belastung während der Kommissionierung, die gewichtet addiert werden. Dabei existiert keine universale Gewichtung w , die zu dem „besten“ Ergebnis führt. Stattdessen ist die Gewichtung frei vom Lagerplaner wählbar. Je nachdem, wie die Gewichtung gewählt wird, wird das Ergebnis der Optimierung eher die Minimierung der Zeit oder der physischen Belastung priorisieren. Um zu bestimmen, welche Gewichtung sinnvoll sein kann und wie der Trade-Off zwischen den beiden Zielkriterien ausgeprägt ist, bietet sich eine sogenannte Pareto-Evaluation an. Hierbei wird über Variation der Gewichtungen die sogenannte Paretokurve bestimmt. Sie enthält die Menge aller Lösungen, die Pareto-effizient sind. Eine Pareto-effiziente Lösung ist dadurch gekennzeichnet, dass bei ihr nur eine Verbesserung eines der beiden Zielkriterien möglich wäre, wenn das andere verschlechtert wird. Vereinfacht gesprochen handelt es sich bei den Pareto-effizienten Lösungen um die „besten“ Lösungen für alle möglichen Gewichtungen.

Beide Zielgrößen haben unterschiedliche physikalische Einheiten und bewegen sich in unterschiedlichen Größenordnungen. Um die Zielgrößen innerhalb der Pareto-Evaluation besser vergleichen zu können, ist daher eine Normierung sinnvoll. Es ist dabei üblich, die beiden Zielgrößen mit ihren Utopie-Werten zu normieren (vgl., Battini et al., 2016). Der Utopie-Wert einer Zielgröße ist der beste Wert, den diese Zielgröße annehmen kann. Er kann bestimmt werden, indem das Optimierungsproblem jeweils nur nach der entsprechenden Zielgröße optimiert wird, während die andere vernachlässigt wird. Es sei mit T^U der Utopie-Wert der Zielgröße Zeit und mit P^U der Utopie-Wert der Zielgröße physische Belastung bezeichnet. Die Normierung erfolgt dann mittels folgender Vorschriften:

$$T^{norm} = \frac{T - T^U}{T^U} \quad (4)$$

$$P^{norm} = \frac{P - P^U}{P^U} \quad (5)$$

Mittels der Gewichtungsfaktoren $w \in \{0, 0,2, 0,4, 0,6, 0,8, 1\}$ und unter Normierung der Zielgrößen ergibt sich die in Abbildung 11 dargestellte Pareto-Kurve für den Fall, dass der Kommissionierer stets der Schleifengangstrategie folgt. Die beiden Zielgrößen sind dabei jeweils prozentual angegeben und beziehen sich auf eine durchschnittliche Lösung, die bestimmt wurde, indem der Mittelwert über 5000 zufällig generierte, nicht-optimierte Lösungen gebildet wurde. Wird die durchschnittliche, nicht-optimierte Lösung als in der Praxis vorherrschender Status quo interpretiert, lässt sich damit direkt die Verbesserung ablesen, die durch die Optimierung ermöglicht werden kann.

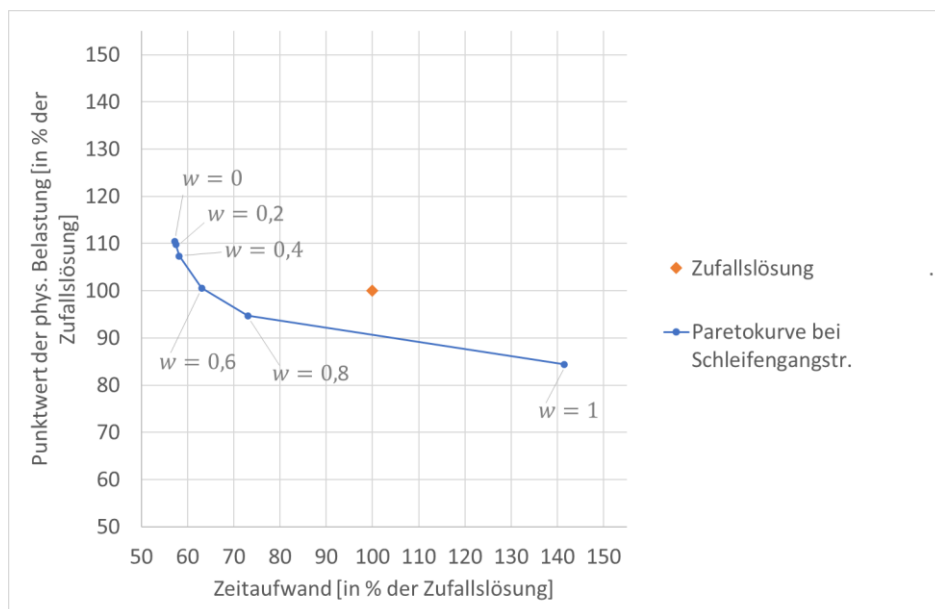


Abbildung 11: Pareto-Evaluation des „Palettenlagers“ bei Annahme der Schleifengangstrategie

Wird Punkt $w = 0$ betrachtet, bei dem ausschließlich nach der Zeit optimiert wurde, ist ersichtlich, dass eine Reduktion der Kommissionierzeit um 43 % gegenüber dem Status quo möglich ist. Diese geht allerdings mit einer Zunahme der physischen Belastungskennwerts um 10 % einher. Wie Punkt $w = 1$ zeigt, ist es auf der anderen Seite möglich, den physische Belastungskennwert um 16 % zu senken, wenn dafür eine Zunahme der Kommissionierzeit von 41 % in Kauf genommen wird. Dieser klare Trade-Off zwischen Zeit und physischer Belastung kann wie folgt erklärt werden. Werden Paletten von Artikeln, die häufig benötigt werden, dediziert gelagert, können die Artikel mit geringem Zeitaufwand entnommen werden, da die Kommissionier-Paletten auf dem Boden stehen und damit direkt zugänglich sind. Gleichzeitig hat dies allerdings eine negative Auswirkung auf die physische Belastung bei der Entnahme, die in Abschnitt 4.4.2 erläutert wurde. Werden Paletten von Artikeln, die häufig benötigt werden, chaotisch gelagert, verhält es sich gerade umgekehrt.

Neben diesen beiden extremen Gewichtungen sind jedoch auch Kompromisse möglich. Beispielsweise werden bei einer Gewichtung von $w = 0,6$ Lösungen gefunden, die gegenüber dem Status quo zu nahezu keiner Zunahme des physischen Belastungskennwerts führen, aber gleichzeitig die Zeit um 37 % reduzieren können. Bei einer Gewichtung von $w = 0,8$ können sowohl die Zeit (um 27 %) als auch der physische Belastungskennwert (um 5 %) reduziert werden. Durch entsprechende Wahl der Gewichtung sind letztlich alle Lösungen auf der Pareto-Kurve erzielbar.

Wie eingangs bereits erwähnt, kann jedoch keine universelle Empfehlung für eine bestimmte Gewichtung ausgesprochen werden. Die Entscheidung muss vom Lagerplaner getroffen werden, der dabei z. B. den aktuellen Krankenstand oder angestrebte Lagerdurchsätze berücksichtigen kann. Es ist jedoch darauf zu achten, dass bestimmte Belastungsobergrenzen (z. B. kann dies durch Anwendung des EAWS ermittelt werden) nicht überschritten werden.

Bisher wurde die Paretokurve lediglich für den Fall betrachtet, dass der Kommissionierer einer Schleifengangstrategie folgt. Für den Fall, dass er einer Stichgangstrategie folgt, ist die Paretokurve in Abbildung 12 ergänzt. Es ist ersichtlich, dass die Paretokurven für beide Routingstrategien nahezu deckungsgleich sind. Folglich können für beide Strategien gleichgute Lösungen gefunden werden. Es sei jedoch ausdrücklich darauf hingewiesen, dass gleichgute Lösungen nicht mit gleichartigen Lösungen zu verwechseln sind. Je nachdem, welche Strategie verwendet wird, sind andere Lagerplatzvergaben vorteilhaft, was nachfolgend noch genauer betrachtet wird.

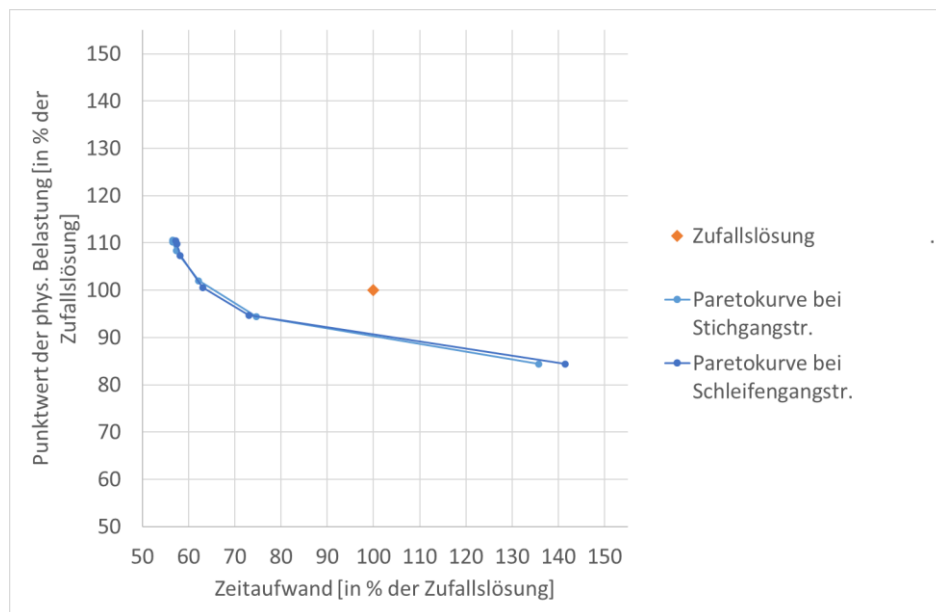


Abbildung 12: Pareto-Evaluation des „Palettenlager“ bei Annahme der Stichgangstrategie

4.5.1.3. Eigenschaften optimierter „Palettenlager“

Neben der Verbesserung, die durch die Optimierung erreicht werden kann, ist die Art und Weise, wie optimierte Lösungen ausfallen, von hohem Interesse. Nachfolgend werden daher verschiedene optimierte Lager grafisch analysiert. Abbildung 13 a) zeigt für eine beispielhaft herausgegriffenen Instanz, welche Regalplätze für welche Art der Lagerung (dediziert, semi-dediziert oder chaotisch) genutzt werden, wenn ausschließlich nach der Kommissionierzeit optimiert wird ($w = 0$) und die Schleifengangstrategie für die Routenführung verwendet wird. Weiße Kästchen stellen Regalplätze dar, die für die dedizierte Lagerung genutzt werden, hellgraue Kästchen werden für die semi-dedizierte Lagerung genutzt. Eine dunkelgraue Färbung würde bedeuten, dass der Lagerplatz für eine chaotische Lagerung genutzt wird; dies ist aber in der dargestellten Lösung nicht der Fall. Zu beachten ist dabei, dass ein Regalplatz mehrere Regalebenen hat. Bei Lagerplätzen für die dedizierte Lagerung werden alle Regalebenen für den gleichen Artikel im Sinne einer Festplatzlagerung reserviert. Die Kommissionier-Palette des Artikels wird auf der untersten Ebene

gelagert und die Nachschub-Paletten darüber. Bei Lagerplätzen, die für die semi-dedizierte Lagerung genutzt werden, wird nur die unterste Regalebene für einen Artikel für eine Festplatzlagerung reserviert, auf der dann die Kommissionier-Palette des Artikels gelagert wird. Die darüber liegenden Regalebenen sind keinem festen Artikel zugewiesen und werden dem Lagerbereich für die chaotische Lagerung zugerechnet. Der Lagerbereich für die chaotische Lagerung ergibt sich folglich aus allen Regalebenen aller Regalplätze, die für die chaotische Lagerung genutzt werden (die im vorliegenden Fall nicht vorhanden sind), und allen Regalebenen ausgenommen der untersten Ebene aller Regalplätze, die für die semi-dedizierte Lagerung genutzt werden. Zur besseren Nachvollziehbarkeit zeigt Abbildung 13 b) in einer dreidimensionalen Ansicht, welche Regalplätze und -ebenen bei der betrachteten Lösung für die chaotische Lagerung zur Verfügung stehen (dunkelgrau hervorgehoben).

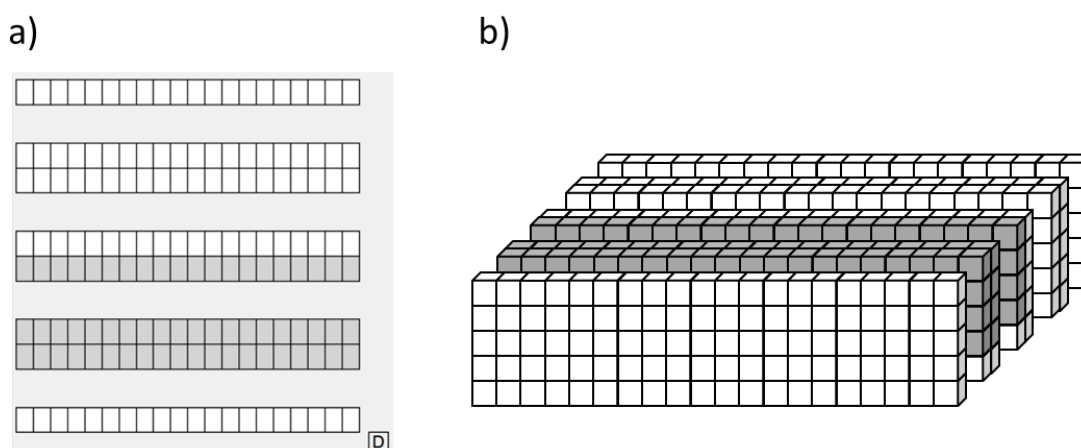


Abbildung 13: Aufteilung eines für $w = 0$ für die Schleifengangstrategie optimierten „Palettenlagers“ in Lagerzonen

Neben der Aufteilung des Lagers in dedizierte, semi-dedizierte und chaotische Bereiche interessiert vor allem, wie das Artikelportfolio verschiedenen Lagerplätzen zugewiesen wird. Um dabei ein Muster erkennen zu können, sind die Artikel in den folgenden Darstellungen entsprechend ihrer Bedarfshäufigkeit (also der Häufigkeit, mit der mindestens eine Einheit des Artikels in einem Kommissionierauftrag kommissioniert werden muss) gefärbt. Rot indiziert eine hohe Bedarfshäufigkeit, gelb eine mittlere und blau eine geringe. Abbildung 14 a) zeigt, welche Artikel welchen dedizierten und semi-dedizierten Lagerplätzen zugewiesen werden. Abbildung 14 b) zeigt, welche Artikel chaotisch gelagert werden, wofür der in Abbildung 13 b) grau gekennzeichnete Bereich dient. Zu beachten ist, dass die in Abbildung 14 b) gezeigten Artikel keiner bestimmten Sortierung folgen. Es wird hier lediglich die Menge der Artikel dargestellt, die chaotisch gelagert werden sollen. Soll die dargestellte Lösung also in der Praxis implementiert werden, würden alle in Abbildung 14 b) dargestellten Artikel zufällig den in Abbildung 13 b) grau gekennzeichneten Plätzen zugewiesen.

Abbildung 14 a) zeigt dagegen konkrete Zuweisungen von Artikeln zu Lagerplätzen entsprechend einer Festplatzlagerung. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Bedarfshäufigkeit der Artikel einen hohen Einfluss auf die optimierte Lagerplatzvergabe hat. Je häufiger Artikel benötigt werden, desto eher werden sie in Regalreihen gelagert, die nahe am Depot liegen. Der Lagerplatz inner-

halb der Regalreihe ist dabei nebensächlich, da bei der Schleifengangstrategie ohnehin die gesamte Regalreihe durchschritten wird. Artikel, die eine sehr geringe Bedarfshäufigkeit aufweisen, werden dagegen stets chaotisch gelagert (siehe Abbildung 14 b)).

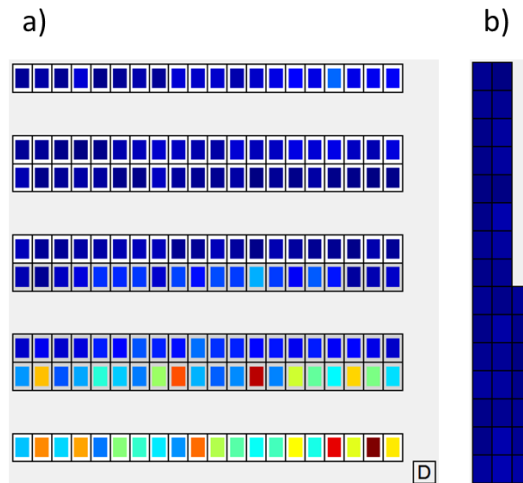


Abbildung 14: Lagerplatzvergabe eines für $w = 0$ für die Schleifengangstrategie optimierten „Palettenlagers“

Abbildung 15 stellt die Lösung der gleichen Instanz dar, wenn ausschließlich nach der physischen Belastung optimiert wird ($w = 1$). Zunächst ist ersichtlich, dass sämtliche Regalplätze für die semi-dedizierte Lagerung genutzt werden, allerdings werden nur wenige Artikel semi-dedizierten Lagerplätzen zugewiesen. Der Großteil der Artikel wird chaotisch gelagert, wobei für die chaotische Lagerung aller Regalebene ausgenommen der ersten Ebene auf allen Regalplätzen zur Verfügung stehen. Dies ist schlüssig, da die chaotische Lagerung eines Artikels zu geringeren physischen Belastungen bei der Artikelentnahme führt. Es ist daher auch nicht verwunderlich, dass Artikel, die besonders häufig nachgefragt werden – bei denen also durchschnittlich mehr Einheiten entnommen werden müssen – chaotisch gelagert werden.

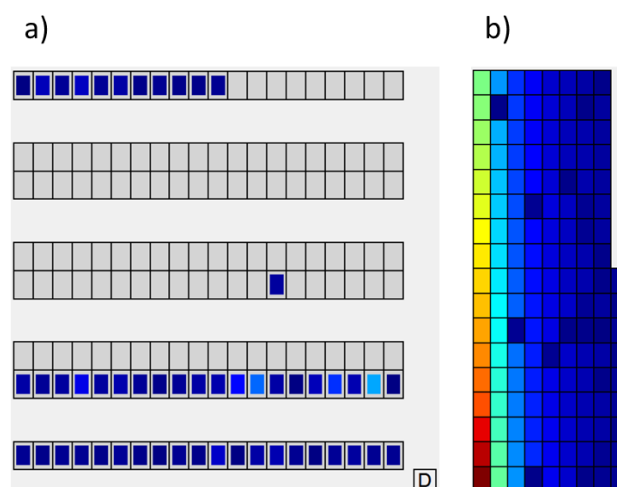


Abbildung 15: Lagerplatzvergabe eines für $w = 1$ für die Schleifengangstrategie optimierten „Palettenlagers“

Zum Vergleich stellt Abbildung 16 die gleiche Lösung dar, bei der die Artikel allerdings nach dem Produkt aus Gewicht pro Stück und durchschnittlich zu kommissionierender Stückzahl ($g_i \cdot s_i$) gefärbt wurden. Hier wird noch einmal deutlich ersichtlich, dass Artikel, die in großer Stückzahl benötigt werden und/ oder ein hohes Gewicht haben, präferiert chaotisch gelagert werden, wenn das Ziel die Optimierung der physischen Belastung darstellt.

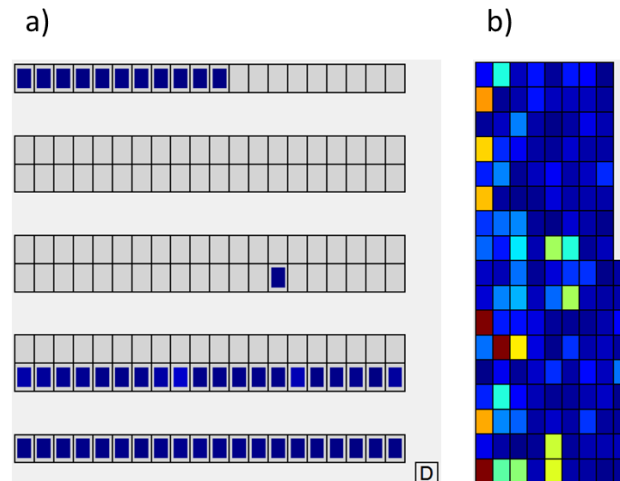


Abbildung 16: Lagerplatzvergabe eines für $w = 1$ für die Schleifengangstrategie optimierten „Palettenlagers“ bei Artikelgefärbung nach dem Produkt aus Stückbedarf und Gewicht

Für eine Gewichtung von $w = 0,6$ ergibt sich die in Abbildung 17 dargestellte Lösung, wobei die Färbung der Artikel wieder anhand der Bedarfshäufigkeiten durchgeführt wurde. Es ist ersichtlich, dass die Lösung einen Kompromiss aus den zuvor betrachteten Lösungen darstellt, was schlüssig ist, da bei einer Gewichtung von $w = 0,6$ eine Kompromisslösung verfolgt wird.

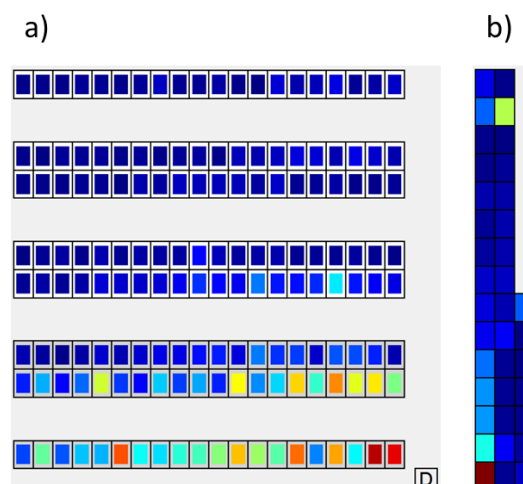


Abbildung 17: Lagerplatzvergabe eines für $w = 0,6$ für die Schleifengangstrategie optimierten „Palettenlagers“

Bisher wurden nur Lösung vorgestellt, bei denen angenommen wurde, dass der Kommissionierer einer Schleifengangstrategie folgt. Für den Fall, dass er einer Stichgangstrategie folgt, sind die

Lösungen für $w = 0$, $w = 1$ und $w = 0,6$ in Abbildung 18, Abbildung 19 und Abbildung 20 gegeben, wobei die Artikel jeweils entsprechend der Bedarfshäufigkeit gefärbt sind.

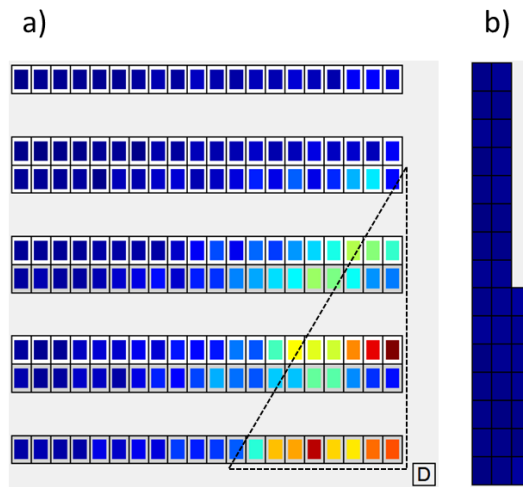


Abbildung 18: Lagerplatzvergabe eines für $w = 0$ für die Stichgangstrategie optimierten „Palettenlagers“

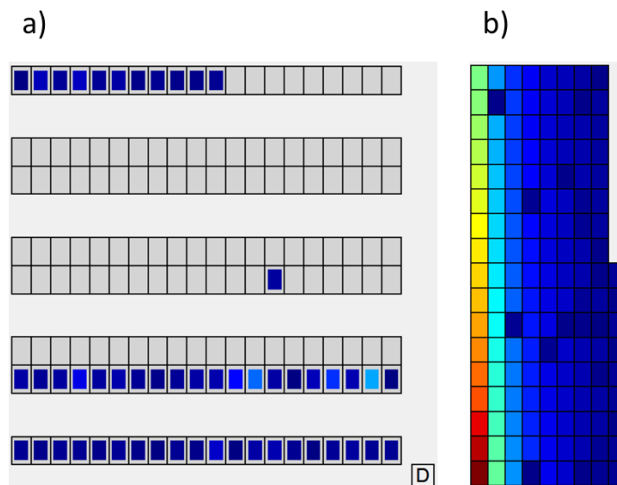


Abbildung 19: Lagerplatzvergabe eines für $w = 1$ für die Stichgangstrategie optimierten „Palettenlagers“

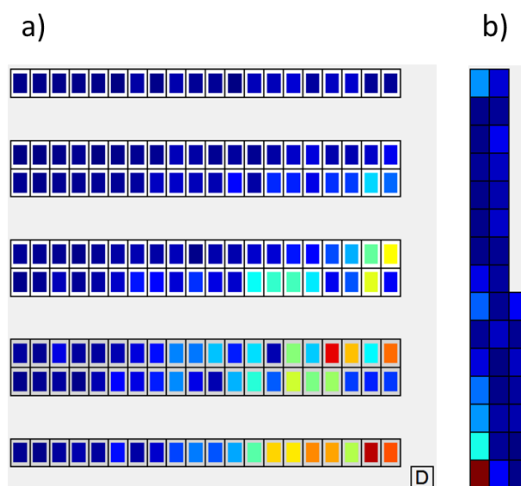


Abbildung 20: Lagerplatzvergabe eines für $w = 0,6$ für die Stichgangstrategie optimierten „Palettenlagers“

Konzeptionell können bei den Lösungen für die Stichgangstrategie ähnliche Beobachtungen angestellt werden wie bei denen für die Schleifengangstrategie. Für $w = 1$, also die Optimierung ausschließlich nach dem Kriterium der Minimierung des physischen Belastungskennwerts, ergeben sich sogar die exakt gleichen Lösungen. Dies ist schlüssig, da bei der Kommissionierung annahmegemäß ein angetriebener Kommissionierwagen verwendet wird. Folglich hat die Fortbewegung durch das Lager – und damit die Routenführung – keine Auswirkung auf die physische Belastungskennzahl. Dies führt dazu, dass die optimale Lösung bei $w = 1$ unabhängig von der Routenführung ist. Für $w \neq 1$ besteht der wesentliche Unterschied zwischen den beiden Routenstrategien darin, dass besonders häufig nachgefragte Artikel nicht in den Regalreihen gelagert werden, die am nächsten zum Depot liegen, sondern an Regalpositionen, deren Abstand zum Depot möglichst kurz ist, sodass sich eine dreiecksförmige Struktur erkennen lässt, die in Abbildung 18 gestrichelt angedeutet ist. Zusammenfassend lässt sich ferner folgern, dass die Lagerplatzvergabe stets auf die Routenführung der Kommissionierer abgestimmt sein sollte.

Abschließend ist darauf hinzuweisen, dass neben Bedarfshäufigkeit, durchschnittlichem Stückbedarf und Gewicht auch andere Eigenschaften einen Einfluss auf die Lagerplatzvergabe haben können – z. B. die Anzahl an zu lagernden Paletten oder die Anzahl an Einheiten eines Artikels, die eine Palette fassen kann. Dies ist auch daran ersichtlich, dass die vorgestellten Lösungen keine ideale Ordnung aufweisen, sondern immer eine gewisse Unordnung in der Färbung erkennbar ist, da die Färbung diese Eigenschaften nicht berücksichtigt. Gleichzeitig verdeutlicht dies aber auch, dass allein auf Basis der drei näher betrachteten Artikeleigenschaften bereits zu einem hohen Maß bestimmt werden kann, wie Artikel Lagerplätzen zugewiesen werden sollten. Diese Erkenntnis wird in Abschnitt 4.6.1.1 verwendet, um einfache Regeln zu formulieren, die auch ohne komplexe Optimierung bereits zu einer sehr guten Lagerplatzvergabe führen können und damit eine gute Alternative für die praktische Anwendung darstellen.

4.5.1.4. Geeignete Layouts für „Palettenlager“

Wie in Abschnitt 4.4.1 beschrieben, kann das entwickelte Optimierungskonzept genutzt werden, um mittels alternativenbasierter Vergleiche geeignete Layoutalternativen für das „Palettenlager“ ausfindig zu machen. Die Grundidee ist dabei folgende: Für eine gegebene Problem Instanz können verschiedene Layoutalternativen angenommen werden, während alle anderen Parameter

unverändert bleiben. Für jede Layoutalternative wird anschließend das eigentliche Optimierungsproblem der Lagerplatzvergabe gelöst. Schließlich kann die Güte der Lösungen der verschiedenen Alternativen verglichen werden, um unter den untersuchten Alternativen die beste ausfindig zu machen.

Im Rahmen dieses Projekts wurden entsprechend dieses Vorgehens drei verschiedene Layouttypen untersucht. Dabei handelt es sich um Ein- und Zweiblocklayouts, wie sie konzeptionell in Abbildung 9 dargestellt sind. Zur eindeutigen Identifizierung sind die Layouttypen mit Typ „A“, „B“ und „C“ bezeichnet. Für jeden Layouttyp wurde darüber hinaus das Verhältnis von Regalreihenanzahl zu Plätzen pro Regalreihe in drei verschiedenen Ausprägungen variiert. Insgesamt ergeben sich damit neun untersuchte Layoutalternativen.

Abbildung 21 zeigt, welchen Einfluss die Layoutalternativen bei einer Gewichtung von $w = 0,6$ und unter Annahme der Schleifengangstrategie auf das Ergebnis haben; Abbildung 22 zeigt den Einfluss bei der Stichgangstrategie. Die Bezeichnungen der Layouts in Abbildung 21 und Abbildung 22 sind dabei als „Layouttyp“ - „Regalreihenanzahl“ x „Plätze pro Regalreihe“ zu lesen. Das mit einer quadratischen Markierung gekennzeichnete Layout entspricht dem Layout, das bei den vorangegangenen Experimenten verwendet wurde. Die in Abbildung 22 vergrößerte Markierung bei „A-10x16 Stichgangstr.“ dient lediglich der besseren Übersicht, hat darüber hinaus aber keine Bedeutung. Außerdem sei darauf hingewiesen, dass sich die Achsenskalierungen in beiden Abbildungen gegenüber den vorangegangenen Abbildungen der ParetoKurven verändert haben.

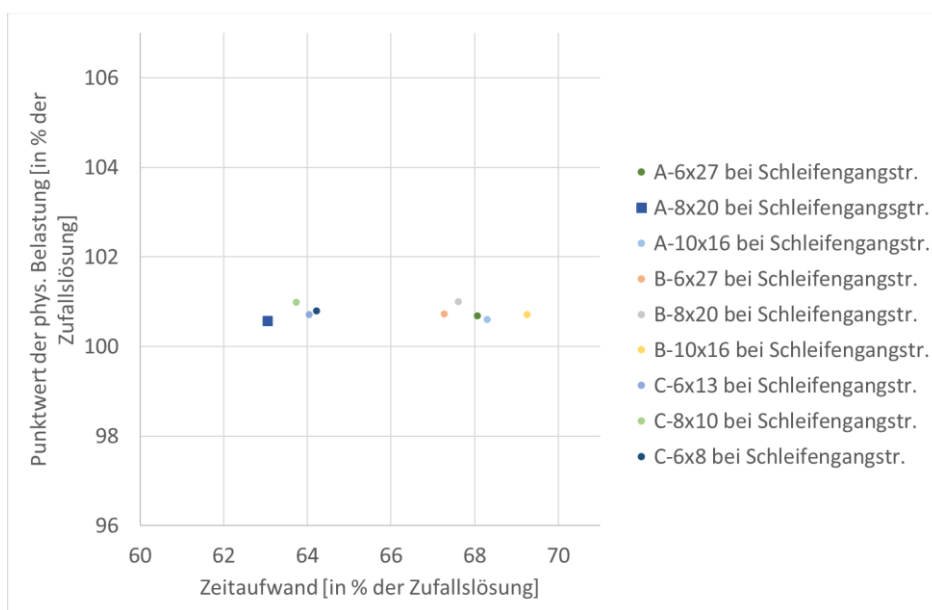


Abbildung 21: Evaluation verschiedener Layouts für das Palettenlager für die Schleifengangstrategie

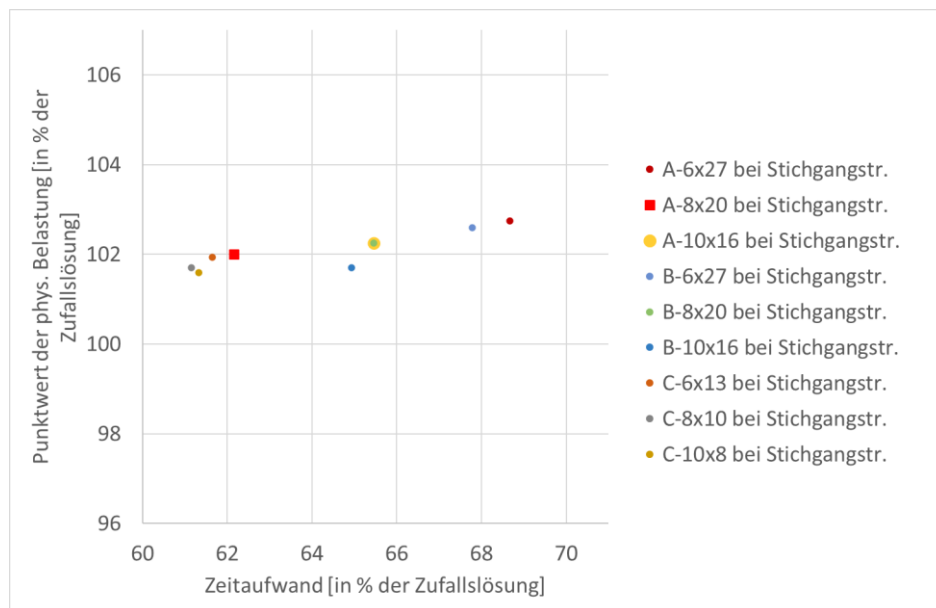


Abbildung 22: Evaluation verschiedener Layouts für das Palettenlager für die Stichgangstrategie

Es ist ersichtlich, dass sich der Einfluss des Layouts vorwiegend auf die Kommissionierzeit auswirkt. Der physische Belastungskennwert wird kaum durch das Layout beeinflusst. Unabhängig vom Verhältnis der Regalreihenanzahl zu den Plätzen pro Regalreihe und unabhängig von der gewählten Routenführung des Kommissionierers können mit Layouts vom Typ „C“ stets sehr gute Resultate gefunden werden.

4.5.1.5. Querlagerung von Paletten im „Palettenlager“

Bisher wurde bei allen numerischen Experimenten davon ausgegangen, dass die Paletten in konventioneller Weise gelagert werden, d. h., dass ihre kurzen Seiten parallel zu den Regalgängen liegen. Dies führt allerdings dazu, dass bei der Entnahme von Artikeln, die auf der dem Gang abgewandten Palettenseite gelagert sind, höhere physische Belastungen entstehen können, da sich der Kommissionierer weit und tief nach vorne beugen bzw. in das Palettenregal hineintreten muss. Würden die Paletten quer (also um 90° rotiert) gelagert, könnte die physische Belastung bei der Entnahme reduziert werden (vgl. Abschnitt 4.3). Nachteilig ist bei der Querlagerung von Paletten allerdings, dass sich die Länge der Regalgänge – und damit die potenziell benötigte Laufzeit beim Kommissionieren – erhöht, sofern pro Regalreihe die gleiche Anzahl an Paletten gelagert werden soll. Nachfolgend wird daher untersucht, welche Auswirkungen die Querlagerung im Vergleich zur konventionellen Lagerung von Paletten hat.

Um die Auswirkung der Querlagerung zu untersuchen, wurde abermals ein alternativenbasierter Vergleich durchgeführt, indem alle zuvor betrachteten Probleminstanzen für quer gelagerte Paletten optimiert wurden. Unter der Annahme, dass der Kommissionierer einer Schleifengangstrategie folgt, sind die Ergebnisse in Abbildung 23 gegeben; unter Annahme der Stichgangstrategie in Abbildung 24.

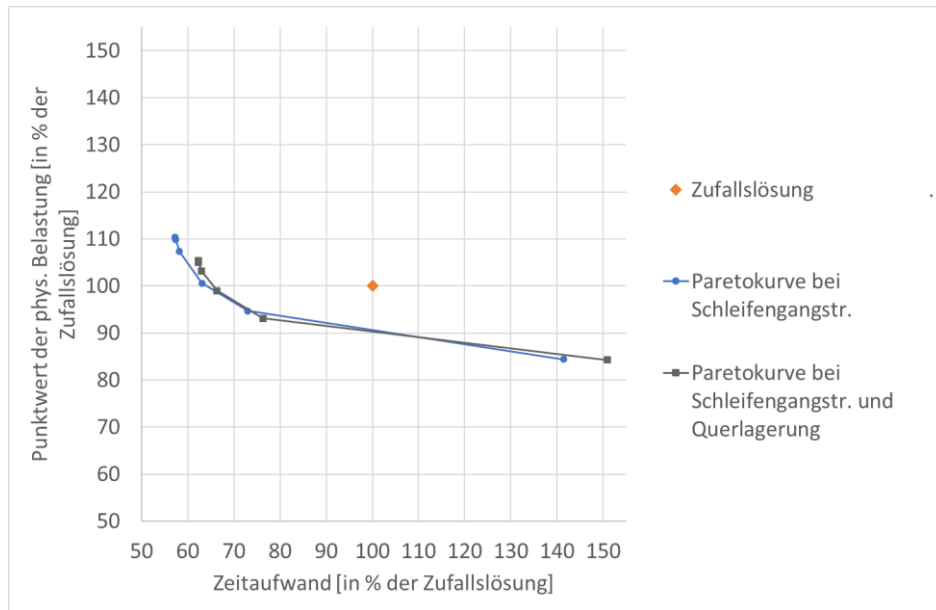


Abbildung 23: Pareto-Evaluation des „Palettenlagers“ bei Annahme der Schleifengangstrategie und Querlagerung von Paletten

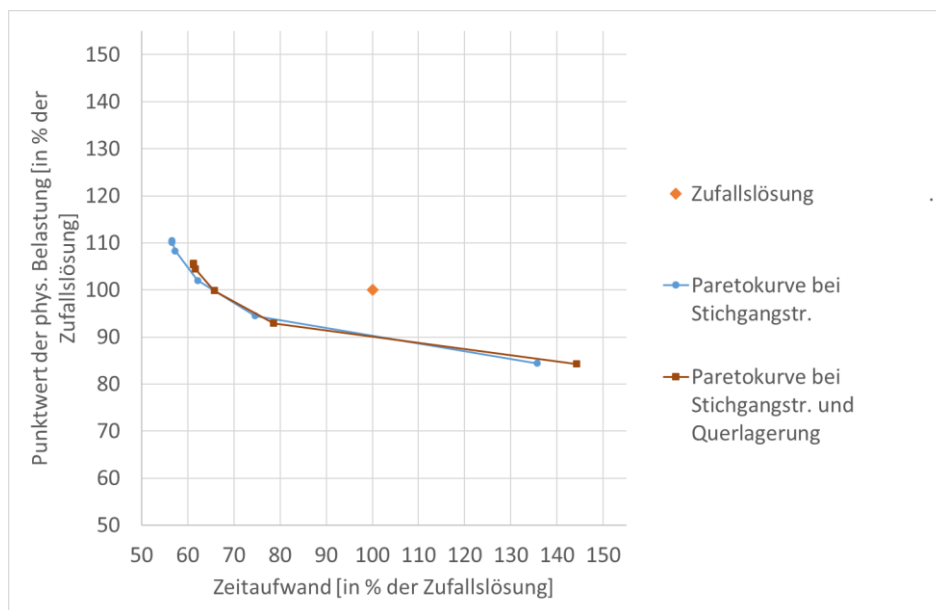


Abbildung 24: Pareto-Evaluation des „Palettenlagers“ bei Annahme der Stichgangstrategie und Querlagerung von Paletten

Beide Abbildungen zeigen die Paretokurven bei konventioneller und bei Querlagerung. Wird ein einzelner Punkt auf der Paretokurve betrachtet, ist zu erkennen, dass die Querlagerung zu Ergebnissen führt, die einen geringeren physische Belastungskennwert verursachen, aber etwas zeitineffizienter sind. Dies entspricht der anfänglichen Erwartung. Interessant ist jedoch, dass die Paretokurven bei Querlagerung in etwa Deckungsgleich mit den Paretokurven bei konventioneller Lagerung sind. Das bedeutet, dass für jedes Ergebnis, das bei Querlagerung erreicht wird, durch Anpassung der Gewichtung w ein alternatives Ergebnis bei konventioneller Lagerung gefunden

werden kann, das diesem annähernd gleichwertig ist. Anders betrachtet heißt dies, dass bei konventioneller Lagerung durch eine Anpassung der Lagerplatzvergabe das gleiche Resultat erzielt werden kann, wie durch die Querlagerung von Paletten.

4.5.1.6. Abgleich der entwickelten Kennzahlen mit EAWS anhand der Lösungen für das „Palettenlager“

Zum Abschluss der Betrachtung des Palettenlagers sollen die Optimierungsergebnisse, die mithilfe der Ergonomie-Kennzahlen errechnet wurden, mit dem unveränderten EAWS-Verfahren (Version 1.3.6) abgeglichen werden. Ziel ist es, zu überprüfen, ob die additive Bewertung von Einzelverrichtungen – wie sie für die Ergonomie-Kennzahlen angenommen wurde – zu ähnlichen Ergebnissen führt, wie die Nutzung von Dauerpunkten im EAWS. Hierbei ist vor allem der Vergleich zwischen verschiedenen Alternativlösungen sinnvoll, da der Absolutwert der Ergonomie-Kennzahlen nicht im Sinne einer Risikoklasse interpretiert werden kann.

Die EAWS-Evaluierung erfolgt anhand der zuvor genutzten Datensätze. Hierbei werden entsprechend der EAWS-Regeln zur Berechnung der Belastung durch die manuelle Lastenhandhabung alle Lastgewichte < 3 kg vernachlässigt – hier liegt ebenfalls ein Unterschied zu den Ergonomie-Kennzahlen, bei der alle Lastgewichte in der manuellen Lastenhandhabung berücksichtigt werden. Ferner werden für die Berechnung Gewichtscluster gebildet, der entsprechende Mittelwert bestimmt und die Häufigkeiten innerhalb dieser Cluster addiert. Um Tätigkeiten mit verschiedenen Lastgewichten und Häufigkeiten innerhalb einer Handhabungsart zu verrechnen, wird EAWS-Regel 3.7 genutzt. Die Lastpunkte sind für weibliche Lagermitarbeiterinnen bestimmt, um eine konservative Betrachtung zu gewährleisten. Ferner wird für beide Fälle angenommen, dass die Artikel in optimaler Greifhöhe abgegeben werden können.

In Abbildung 25 sind die Ergebnisse dargestellt – es zeigt sich, dass die Optimierung auch bei einer Ermittlung der körperlichen Belastung mit EAWS 1.3.6 deutliche Unterschiede mit den erwarteten Wirkungszusammenhängen aufweist (die ermittelten EAWS-Werte sind an den Punkten der blauen Kurve eingetragen). So ergeben sich bei einer höheren Gewichtung des Faktors w geringere physische Belastungen. Der Kurvenverlauf ist jedoch etwas abweichend. Die Ergonomie-Kennzahlen reagieren im Randbereich etwas sensibler auf Veränderungen des Gewichtungsfaktors w .

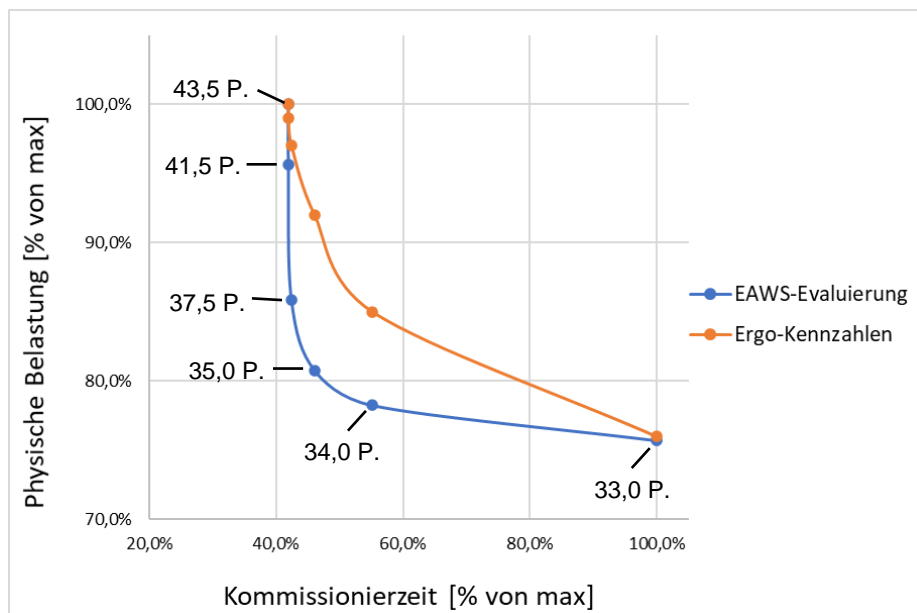


Abbildung 25: Abgleich der entwickelten Kennzahlen mit EAWS anhand der Lösungen für das „Palettenlager“

Die EAWS-Werte liegen in diesem Beispiel zwischen 33,0 Punkten ($w = 1$) und 43,5 Punkten ($w = 0$), also im niedrigen bis hohen gelben Risikobereich. Es gelingt somit, durch die Optimierung maximal 10,5 Punkte im EAWS zu reduzieren – eine solche Belastungsreduzierung sollte angestrebt werden. In diesem Fallbeispiel wurde von einer Pickfrequenz von 100 Picks/h ausgegangen. Bei abweichenden Pickfrequenzen kann der Risiko-Score entsprechend höher oder niedriger liegen. Jedoch ist bei diesen alternativen Anwendungsfällen mit ähnlichen Unterschieden zwischen den einzelnen Gewichtungen zu rechnen.

4.5.2. Numerische Experimente zum „Fachboden-\ Kleinteilelager“

Nachfolgend werden die Durchführung und die Ergebnisse der numerischen Experimente zum Optimierungsproblem „Fachboden-\ Kleinteilelager“ beschrieben.

4.5.2.1. Generierung von Instanzen für das „Fachboden-\ Kleinteilelager“

Wie auch beim „Palettenlager“ werden zur Festlegung der Bedarfshäufigkeiten und Gewichte der Artikel der Instanzen für das „Fachboden-\ Kleinteilelager“ die in Abschnitt 4.1.1 berechneten statistischen Verteilungen zugrunde gelegt. Zudem wird angenommen, dass pro Kommissionierauftrag durchschnittlich zehn unterschiedliche Artikel in Mengen von durchschnittlich je vier Stück zu kommissionieren sind. Es wird angenommen, dass alle Artikel in Bündeln (z. B. Kartons, Boxen oder Stapeln) gelagert werden, die jeweils in ein Regalfachboden von 50 cm auf 50 cm passen und eine Höhe von durchschnittlich 30 cm haben. Für die Kommissionierung wird annahmegemäß ein nicht angetriebener Tischwagen genutzt.

Für alle grundlegenden Instanzen wird ein Lager mit einem Block ($\hat{b} = 1$), acht Regalreihen ($\hat{r} = 8$), 20 horizontalen Plätzen pro Regalreihe ($\hat{h} = 20$) und fünf vertikalen Regalebenen ($\hat{v} = 5$) angenommen, wobei sich das Depot an der Ecke des Lagerblocks befindet. Diese Annahme wird später im Rahmen der Untersuchung verschiedener Layoutoptionen noch verändert, dient jedoch für die übrigen numerischen Experimente als Standardlayout. Das Lager kann folglich 800 Artikelbündel fassen und zählt damit im Vergleich mit der Praxis zu den kleineren Lagern. Diese

Lagergröße wurde gewählt, da sie dennoch an praktisch relevante Lagergrößen heranreicht und gleichzeitig noch in vertretbarer Rechenzeit optimiert werden kann. Letzteres ist insofern relevant, da die Berechnungszeit zur Optimierung mit steigender Lagergröße zunimmt und im Rahmen der numerischen Experimente eine Vielzahl an Optimierungen durchgeführt werden müssen.

4.5.2.2. Pareto-Evaluation des „Fachboden-\ Kleinteilelager“

Analog zum „Palettenlager“ wird für das „Fachboden-\ Kleinteilelager“ eine Pareto-Evaluation durchgeführt. Dabei erfolgt die Normierung der beiden Zielkriterien nach dem bereits in Abschnitt 4.5.1.2 vorgestellten Vorgehen. Abbildung 26 zeigt für beide innerhalb dieser Arbeit untersuchten Routenführungen die Paretokurven.

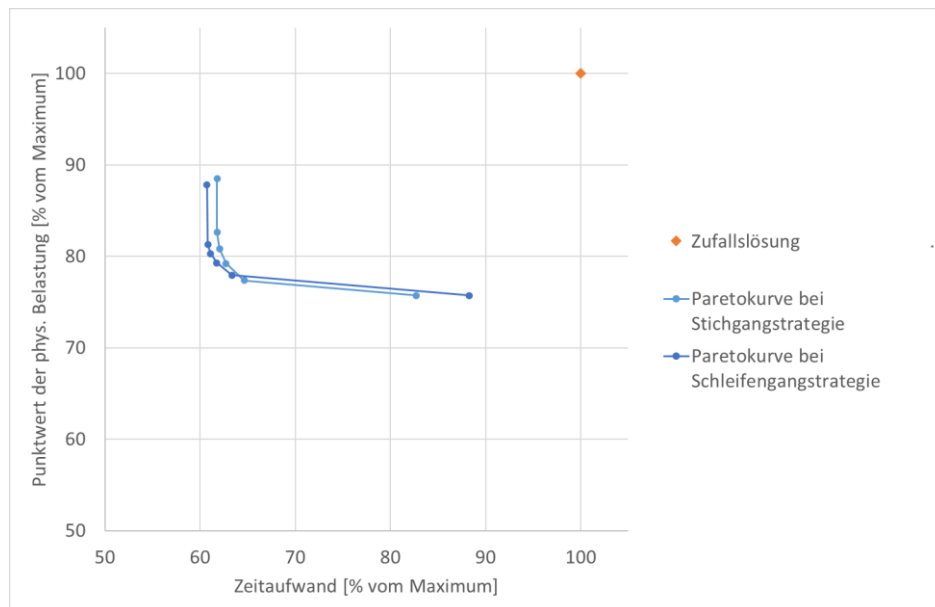


Abbildung 26: Pareto-Evaluation des „Fachboden-\ Kleinteilelager“

Es ist zu erkennen, dass auch beim „Fachboden-\ Kleinteilelager“ beide untersuchten Routenführungsstrategien zu nahezu gleichguten Lösungen führen können. Wird ausschließlich nach dem Ziel der Reduktion der Kommissionierzeit optimiert ($w = 0$), kann eine Reduktion der Zeit auf ca. 61 % und des physischen Belastungskennwerts auf etwa 88 % verglichen mit dem Status quo erreicht werden. Wird ausschließlich nach dem Ziel der Reduktion der physischen Belastung optimiert, kann eine Reduktion der Zeit auf ca. 85 % und des physischen Belastungskennwerts auf etwa 76 % erreicht werden. Interessant ist, dass – anders als beim „Palettenlager“ – beide Zielkriterien teilweise komplementär sind. Das heißt, eine Verbesserung hinsichtlich eines Kriteriums geht bis zu einem gewissen Grad auch mit einer Verbesserung hinsichtlich des anderen Kriteriums einher. Dies liegt darin begründet, dass die Entnahmen von Artikel, die auf Regalhöhen zwischen Hüft- und Schulterhöhe gelagert werden, einerseits mit einer geringeren physischen Belastung einhergeht und andererseits schneller ist, als wenn die Artikel auf anderen Regalhöhen gelagert werden. Die Lagerung besonders häufig und in großer Stückzahl nachgefragter Artikel auf den entsprechenden Regalebenen kann daher beide Zielkriterien verbessern.

Die Komplementarität der beiden Zielkriterien führt ferner dazu, dass bei Gewichtungen von $w = 0,2$ bis $w = 0,8$ Lösungen gefunden werden können, die hinsichtlich beider Kriterien sehr nahe an

das jeweilige Optimum heranreichen. Bei von $w = 0,6$ kann beispielsweise eine Reduktion der Zeit auf ca. 62 % und der physischen Belastung auf etwa 79 % erzielt werden, was nur 1 Prozentpunkt bzw. 3 Prozentpunkte vom jeweiligen Optimum entfernt ist.

4.5.2.3. Eigenschaften optimierter „Fachboden-\ Kleinteilelager“

Nachfolgend werden ausgewählte Lösungen des optimierten „Fachboden-\ Kleinteilelagers“ grafisch analysiert. Abbildung 27, Abbildung 28 und Abbildung 29 zeigen für $w = 0$, $w = 1$ und $w = 0,6$ die optimierte Lagerplatzvergabe für den Fall, dass der Kommissionierer der Schleifengangstrategie folgt. In Abbildung 27 ist dazu zusätzlich eingezeichnet, wie die Darstellungen zu interpretieren sind: Jedes Kästchen entspricht einem Regalplatz auf einer bestimmten Ebene. Kästchen, die näher am Gang liegen, stellen die unteren Regalebenen dar, Kästchen, die weiter weg liegen, die oberen. Die Artikel wurden abermals entsprechend ihrer Bedarfshäufigkeit gefärbt (vgl. Abschnitt 4.5.1.3).

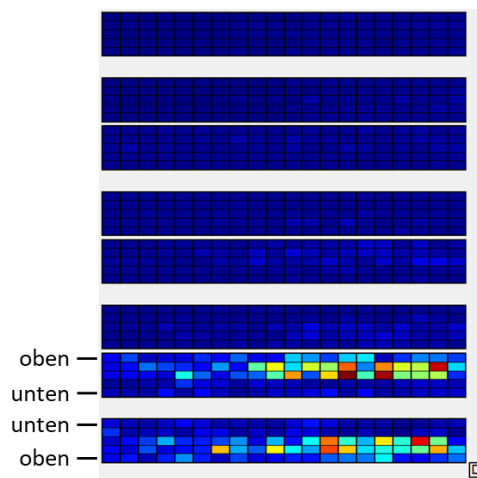


Abbildung 27: Lagerplatzvergabe eines für $w = 0$ für die Schleifengangstrategie optimierten „Fachboden-\ Kleinteilelagers“

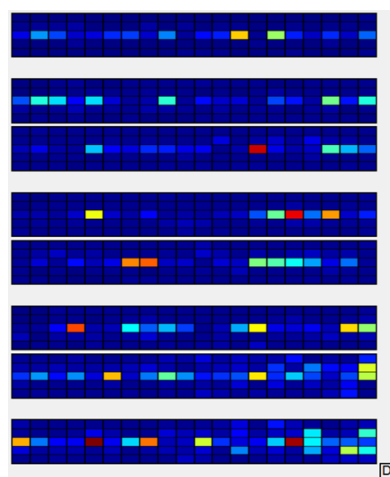


Abbildung 28: Lagerplatzvergabe eines für $w = 1$ für die Schleifengangstrategie optimierten „Fachboden-\ Kleinteilelagers“

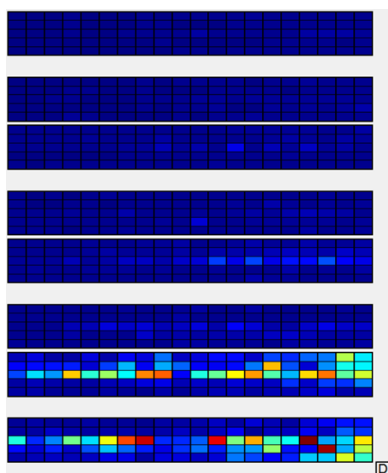


Abbildung 29: Lagerplatzvergabe eines für $w = 0,6$ für die Schleifengangstrategie optimierten „Fachboden-\ Kleinteilelagers“

Für alle drei Gewichtungen ist ersichtlich, dass besonders häufig nachgefragte Artikel bevorzugt auf der mittleren (und teilweise den höheren) Regalebenen gelagert werden, da dies sowohl die Zeit als auch die physische Belastung für die Artikelentnahme reduziert. Die unteren Regalebenen werden gemieden. Bei Fokus auf dem Kriterium der Kommissionierzeit ($w = 0$) ist ferner zu erkennen, dass besonders häufig nachgefragte Artikel bevorzugt in Regalreihen nahe dem Depot gelagert werden. Dies war auch beim „Palettenlager“ der Fall. Die Lagerplatzvergabe bei $w = 0,6$ entspricht abermals einer Kombination der Lagerplatzvergabe bei $w = 0$ und $w = 1$.

Abbildung 30 stellt für $w = 1$ die Lagerplatzvergabe bei Färbung der Artikel entsprechend dem Produkt aus Gewicht pro Stück und durchschnittlich zu kommissionierenden Stückzahl ($g_i \cdot s_i$) dar. Dies verdeutlicht noch einmal, dass zur Reduktion der physischen Belastung besonders schwere und/ oder häufig zu entnehmende Artikel auf der mittleren Regalebene gelagert werden. Mit einer angenommenen Regalebenehöhe des mittleren Regals von 85 cm und einer angenommenen Bündelhöhe von 30 cm werden die Artikel dabei durchschnittlich auf einer Höhe von 100 cm gegriffen, was mit günstigen Körperhaltungen und damit einer verringerten physischen Belastung einhergeht (vgl. Abschnitt 4.3).

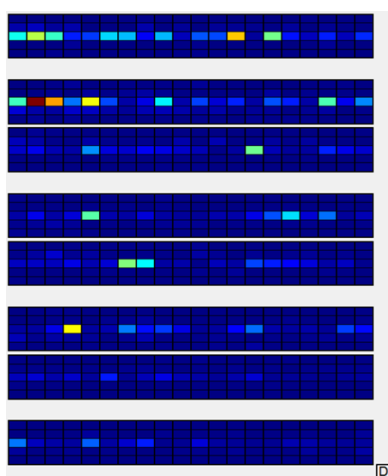


Abbildung 30: Lagerplatzvergabe eines für $w = 1$ für die Schleifengangstrategie optimierten „Fachboden-\ Kleinteilelagers“ bei Artikelfärbung nach dem Produkt aus Stückbedarf und Gewicht

Bisher wurden die Lösungen vorgestellt, bei denen angenommen wurde, dass der Kommissionierer einer Schleifengangstrategie folgt. Für den Fall, dass er einer Stichgangstrategie folgt, sind die Lösungen für $w = 0$, $w = 1$ und $w = 0,6$ in Abbildung 31, Abbildung 32 und Abbildung 33 gegeben, wobei die Artikel jeweils entsprechend der Bedarfshäufigkeit gefärbt sind.

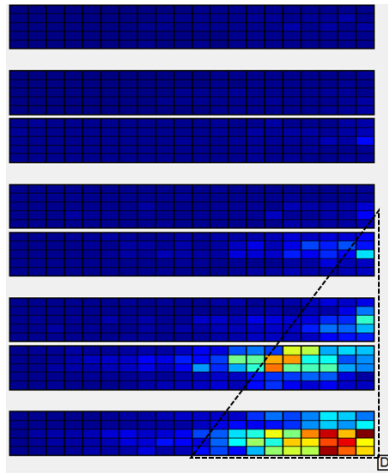


Abbildung 31: Lagerplatzvergabe eines für $w = 0$ für die Stichgangstrategie optimierten „Fachboden-\ Kleinteilelagers“

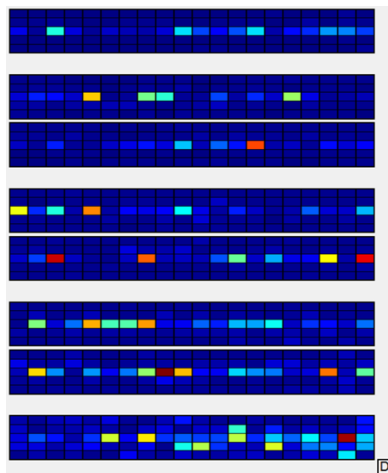


Abbildung 32: Lagerplatzvergabe eines für $w = 1$ für die Stichgangstrategie optimierten „Fachboden-\ Kleinteilelagers“

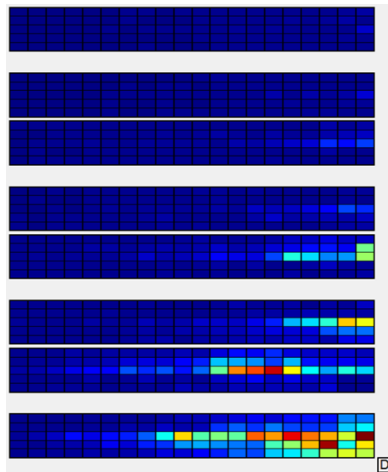


Abbildung 33: Lagerplatzvergabe eines für $w = 0,6$ für die Stichgangstrategie optimierten „Fachboden-\ Kleinteilelagers“

Konzeptionell können bei den Lösungen für die Stichgangstrategie ähnliche Beobachtungen angestellt werden wie bei denen für die Schleifengangstrategie. Der wesentliche Unterschied besteht darin, dass besonders häufig nachgefragte Artikel nicht in den Regalreihen gelagert werden, die am nächsten zum Depot liegen, sondern an Regalpositionen, deren Abstand zum Depot möglichst gering ist, sodass sich eine dreiecksförmige Struktur erkennen lässt, die in Abbildung 31 gestrichelt angedeutet ist. Zusammenfassend lässt sich ferner folgern, dass die Lagerplatzvergabe stets auf die Routenführung der Kommissionierer abgestimmt sein sollte. Dies wurde äquivalent auch beim „Palettenlager“ beobachtet.

Wie auch beim „Palettenlager“, werden die in diesem Kapitel gewonnen Erkenntnisse verwendet, um in Abschnitt 4.6.1.2 vereinfachte Regeln zu formulieren, die auch ohne komplexe Optimierung bereits zu einer guten Lagerplatzvergabe führen können und damit eine nützliche Alternative für die praktische Anwendung darstellen.

4.5.2.4. Geeignete Layouts für „Fachboden-\ Kleinteilelager“

Wie in Abschnitt 4.4.1 beschrieben, kann das entwickelte Optimierungskonzept genutzt werden, um mittels alternativenbasierter Vergleiche geeignete Layoutalternativen für das „Fachboden-\ Kleinteilelager“ ausfindig zu machen. Das Konzept wurde äquivalent für das „Palettenlager“ in Abschnitt 4.5.1.4 vorgestellt. Die nachfolgend untersuchten Layouts stimmen mit den zuvor untersuchten überein.

Abbildung 34 zeigt, welchen Einfluss die Layoutalternativen bei einer Gewichtung von $w = 0,6$ und unter Annahme der Schleifengangstrategie auf das Ergebnis haben; Abbildung 35 zeigt den Einfluss bei der Stichgangstrategie. Die Bezeichnungen der Layouts in Abbildung 34 und Abbildung 35 sind dabei als „Layouttyp“ - „Regalreihenanzahl“ x „Plätze pro Regalreihe“ zu lesen. Das mit einer quadratischen Markierung gekennzeichnete Layout entspricht dem Layout, das bei den vorangegangenen Experimenten verwendet wurde. Außerdem sei darauf hingewiesen, dass sich die Achsenskalierungen gegenüber den vorangegangenen Abbildungen verändert haben.

Es ist ersichtlich, dass das Layout sowohl auf die Zeit als auch auf die physische Belastung einen Einfluss hat. Ersterer fällt in den durchgeführten Experimenten etwas stärker aus als letzterer. Wird allerdings die Festlegung der Anzahl und Höhen der Regalebenen ebenfalls als Bestandteil der Layoutplanung aufgefasst (was an dieser Stelle nicht getan wurde), ist zu erwarten, dass auch die physische Belastung nochmals stärker vom Layout beeinflusst werden kann. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass für beide untersuchten Routenführungen Layouts vom Typ „C“ zu sehr guten Resultaten führen.

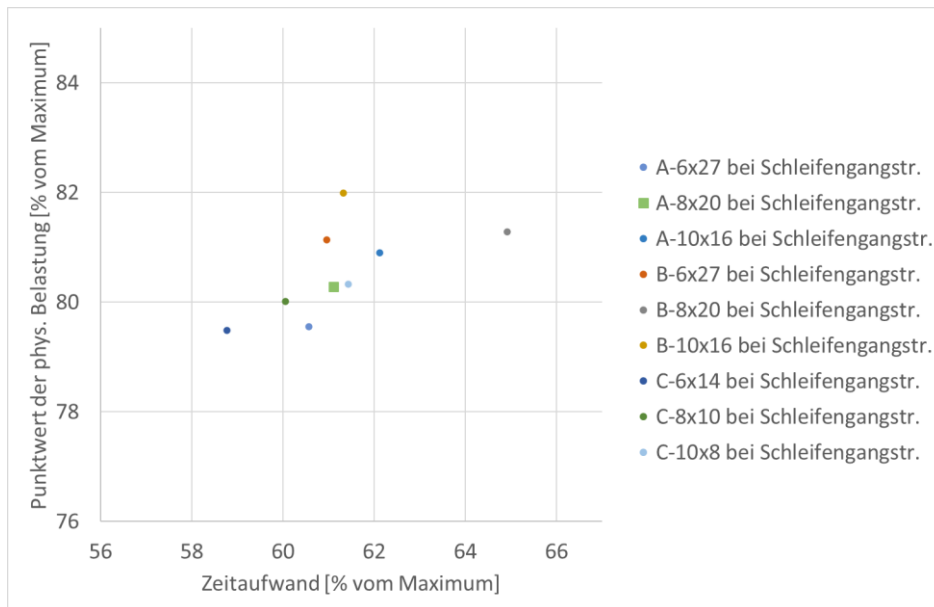


Abbildung 34: Evaluation verschiedener Layouts für das „Fachboden-Kleinteilelager“ für die Schleifengangstrategie

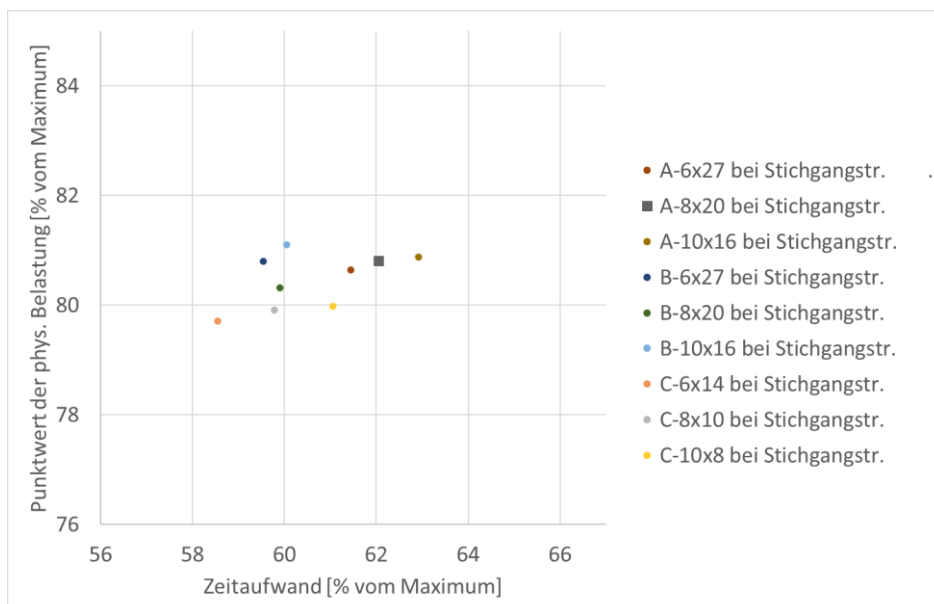


Abbildung 35: Evaluation verschiedener Layouts für das „Fachboden-Kleinteilelager“ für die Stichgangstrategie

4.5.2.5. Einfluss des Kommissionierwagens im „Fachboden-\ Kleinteilelager“

Bisher wurde bei allen numerischen Experimenten davon ausgegangen, dass der Kommissionierer beim Kommissionieren einen nicht-angetriebenen Tischwagen mit sich führt, mit dem er die kommissionierten Artikel transportiert. Eine häufig genutzte Alternative stellen (elektrisch) angetriebene Wagen dar. Diese haben zwar höhere Investitions- und Betriebskosten, verringern aber auch die physische Belastung, die beim Transport der Artikel anfällt, da kein manuelles Schieben und Ziehen erforderlich ist (vgl. Abschnitt 4.3).

Um die Auswirkung des Wagentyps zu untersuchen, wurde abermals ein alternativenbasierter Vergleich durchgeführt, indem alle zuvor betrachteten Probleminstanzen bei Verwendung eines angetriebenen Wagens optimiert wurden. Die Ergebnisse sind in Abbildung 36 gegeben.

Abbildung 36 zeigt die Pareto kurven bei Verwendung eines nicht-angetriebenen bzw. angetriebenen Kommissionierwagens bei der Annahme, dass der Kommissionierer einer Schleifen- bzw. Stichgangstrategie folgt. Für beide Routenführungsstrategien ist ersichtlich, dass die Verwendung eines angetriebenen Wagens die physische Belastung deutlich reduziert. Die Reduktion ist in etwa gleich und beträgt ca. 28 % bzw. ca. 20 bis 25 Prozentpunkte über die Gesamtheit der Pareto kurven bei beiden Routenführungsstrategien.

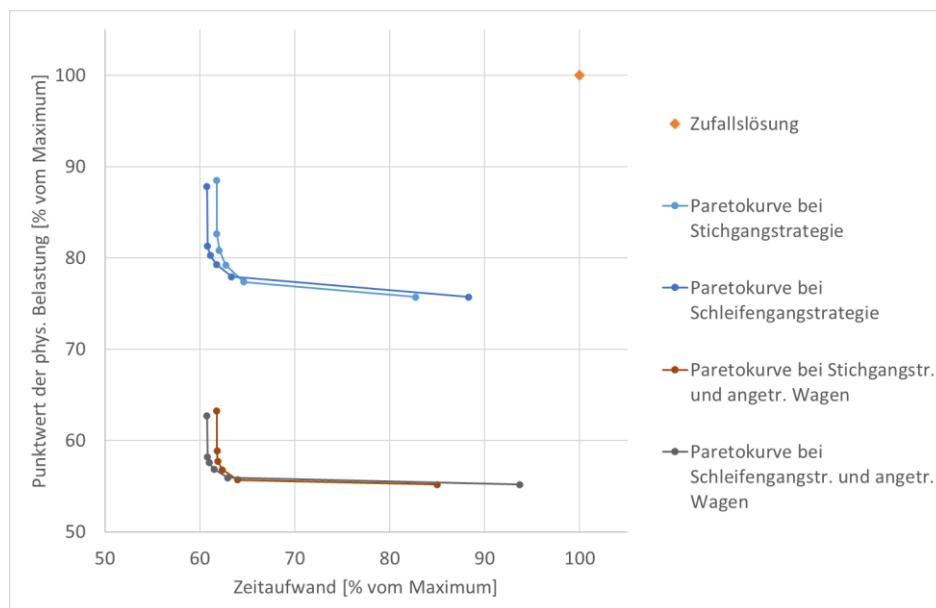


Abbildung 36: Pareto-Evaluation des „Fachboden-Kleinteilelagers“ bei Verwendung eines (elektrisch) angetriebenen Wagens

4.5.2.6. Abgleich der entwickelten Kennzahlen mit EAWS anhand der Lösungen für das „Fachboden-/ Kleinteilelager“

Analog zum „Palettenlager“ wird auch für das „Fachboden-/ Kleinteilelager“ eine Evaluierung der entwickelten Kennzahlen anhand des EAWS 1.3.6 durchgeführt. Im Vergleich zum „Palettenlager“ kommen in diesem Fallbeispiel auch bei der EAWS-Bewertung physische Belastungen durch

das Ziehen bzw. Schieben des Wagens (40 kg Eigengewicht) hinzu – die Ausführungsbedingungen werden dabei als optimal angenommen. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass der Wagen nach jedem Pickvorgang geschoben (< 20 m) werden muss. Wie in Kap. 4.5.1.6 werden Artikel mit einem Lastgewicht < 3 kg für die Bestimmung der Belastung durch manuelle Lastenhandhabung nicht berücksichtigt und für höhere Lasten Gewichtskluster gebildet.

Die Ergebnisse sind in Abbildung 37 gegeben. Die Wirkungszusammenhänge scheinen auch im „Fachboden-/ Kleinteilelager“ durch die Ergonomie-Kennzahlen gut abgebildet zu werden – die Kurven besitzen einen ähnlichen Verlauf. Mit höherem Gewichtungsfaktor w sinken die physischen Belastungen. Sie fallen von 42,0 Punkten (bei $w = 0$) auf 35,5 Punkte (bei $w = 1$). Die tatsächliche Reduzierung der körperlichen Belastung um 16,0 % durch die EAWS-Berechnung bei $w = 1$ ist sogar etwas höher, als dies durch die Ergonomie-Kennzahlen prognostiziert wurde (15,0 %).

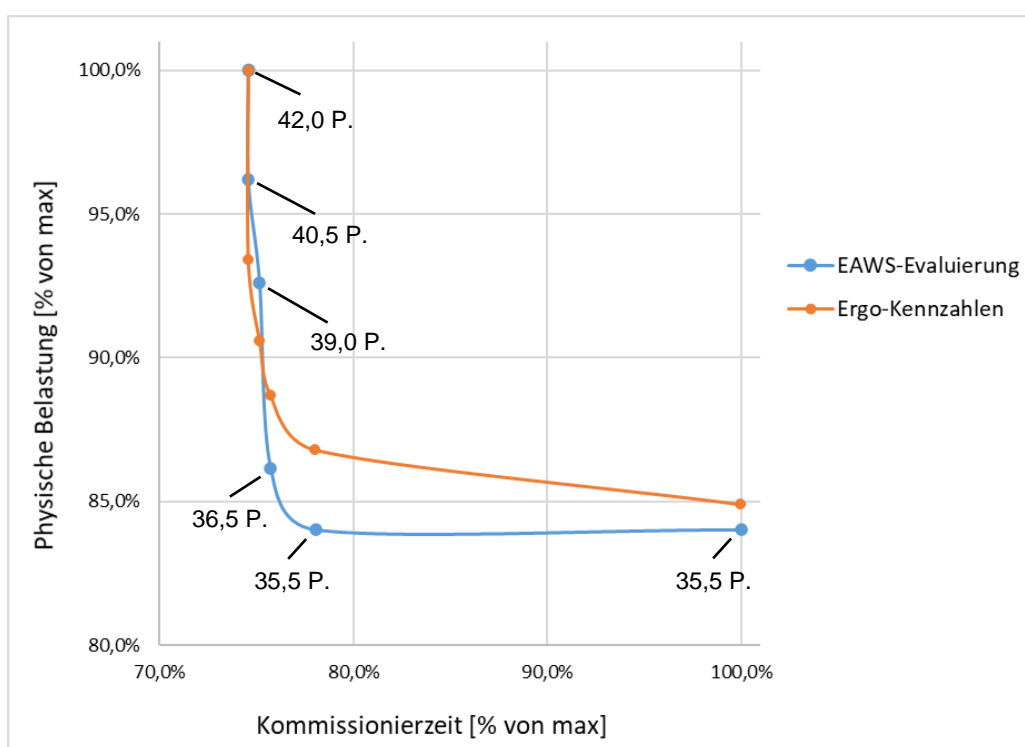


Abbildung 37: Abgleich der entwickelten Kennzahlen mit EAWS anhand der Lösungen für das „Fachboden/Kleinteilelager“

4.6. Ableitung von übergreifenden Handlungsempfehlung

Mittels der in Abschnitt 4.3 erarbeiteten ergonomischen Kennzahlen, auf Basis der in Abschnitt 4.5 durchgeführten numerischen Experimente und unter Zuhilfenahme weiterer Aspekte, wie z. B. anthropometrischen Statistiken, werden in diesem Kapitel übergreifende Handlungsempfehlungen abgeleitet, die Praktiker bei der Planung und dem Betrieb von Lagern unterstützen sollen. In Abschnitt 4.6.1 werden spezielle Handlungsempfehlungen vorgestellt, die sich auf die in den Optimierungsproblemen untersuchten Lagerhaltungsszenarien beziehen. Darüber hinausgehende allgemeine Handlungsempfehlungen werden in Kapitel 4.6.2 erörtert.

4.6.1. Spezielle Handlungsempfehlungen

Nachfolgend werden spezielle Handlungsempfehlungen für die Planung und den Betrieb von „Palettenlagern“ und „Fachboden-\ Kleinteilelagern“ vorgestellt. Die Handlungsempfehlungen basieren auf den Ergebnissen der numerischen Experimente.

4.6.1.1. Handlungsempfehlungen für „Palettenlager“

Routenführung bei „Palettenlagern“

Im Rahmen der durchgeführten numerischen Experimente hat sich gezeigt, dass die Resultate, die erzielt werden können, wenn die Kommissionierer einer Schleifen- oder Stichgangstrategie folgen, ähnlich gut sind. Dies gilt sowohl für die zu erwartende Zeit als auch die physische Belastung, die für die Kommissionierung anfällt. Es kann folglich keine Empfehlung für oder gegen eine der beiden Strategien ausgesprochen werden. Wichtig ist jedoch, dass die Lagerplatzvergabe-strategie stets mit der Routenführung abgestimmt wird.

Lagerplatzvergabe bei „Palettenlagern“

Die optimierte Lagerplatzvergabe weist gewisse Strukturen auf, die mittels einfacher Regeln nachgebildet werden können. Werden die einfachen Regeln angewandt, resultieren daraus Lagerplatzvergaben, die zu sehr guten Lösungen führen, ohne dass eine aufwändige Optimierung notwendig ist. Da bei „Palettenlagern“ ein gewisser Zielkonflikt zwischen Reduktion der Zeit und der physischen Belastung besteht, werden zwei Regeln vorgestellt.

Wird als Ziel ausschließlich fokussiert, dass die Kommissionierzeit minimiert werden soll, kann folgende Regel angewandt werden:

1. Nutze das erste Drittel der Regale für semi-dedizierte Lagerung, die übrigen für dedizierte Lagerung.
2. Falls die Kommissionierer der Schleifengangstrategie folgen, wähle a), falls sie der Stichgangstrategie folgen, wähle b):
 - a) Sortiere die Lagerplätze aufsteigend nach Distanz zum Depot.
 - b) Sortiere die Lagerplätze aufsteigend nach Distanz ihrer Regalreihe zum Depot.
3. Sortiere die Artikel absteigen nach der Häufigkeit, mit der sie in Kommissionieraufträgen vorkommen.
4. Weise Artikel zu Lagerplätzen entsprechend der Sortierung zu.
5. Weise alle Artikel, die nicht mehr auf (semi-)dedizierte Plätze passen, dem chaotischen Bereich zu, der sich in den oberen Regalebenen der für die semi-dedizierte Lagerung genutzten Regale befindet.

Die Lagerplatzvergaben, die sich entsprechend der Regel ergeben, sind in Abbildung 38 und Abbildung 39 dargestellt.

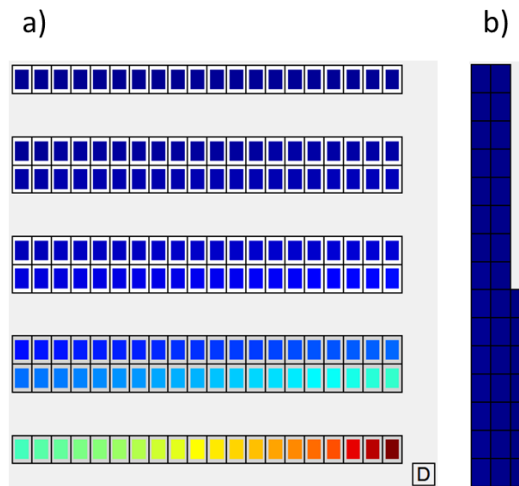


Abbildung 38: Lagerplatzvergabe für das „Palettenlager“ nach der effizienzfokussierten Regel bei Annahme der Schleifengangstrategie

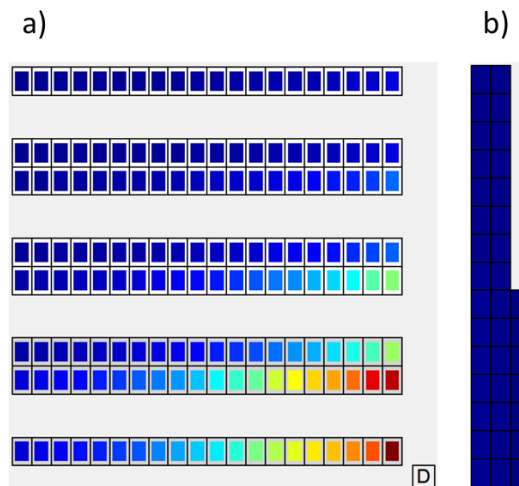


Abbildung 39: Lagerplatzvergabe für das „Palettenlager“ nach der effizienzfokussierten Regel bei Annahme der Stichgangstrategie

Wird als Ziel eine hybride Zielstellung verfolgt, die sowohl die benötigte Zeit als auch die physische Belastung bei der Kommissionierung reduziert, sollte der dritte Schritt der oben beschriebenen Regel wie folgt angepasst werden:

3. Schließe alle Artikel, bei denen

$$\text{Gewicht (in kg)} \cdot \text{durchschnittlicher Stückbedarf pro Kommissionierauftrag} > 3$$

ist, aus der Sortierung aus und weise diese Artikel immer dem chaotischen Bereich zu. Sortiere die übrigen Artikel absteigend nach der Häufigkeit, mit der sie in Kommissionieraufträgen vorkommen.

Abbildung 40 und Abbildung 41 zeigen die sich nach der abgewandelten Regel ergebenden Lagerplatzvergaben.

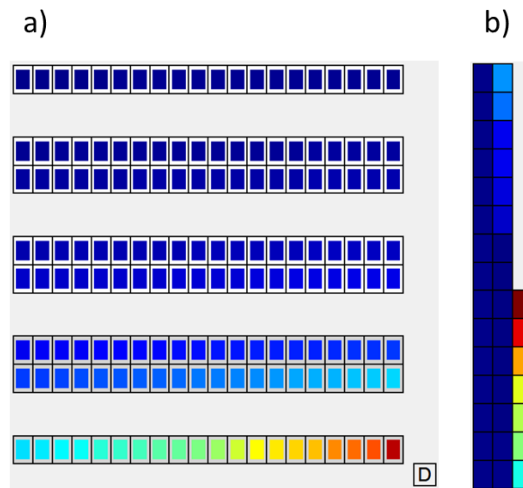


Abbildung 40: Lagerplatzvergabe für das „Palettenlager“ nach der hybriden Regel bei Annahme der Schleifengangstrategie

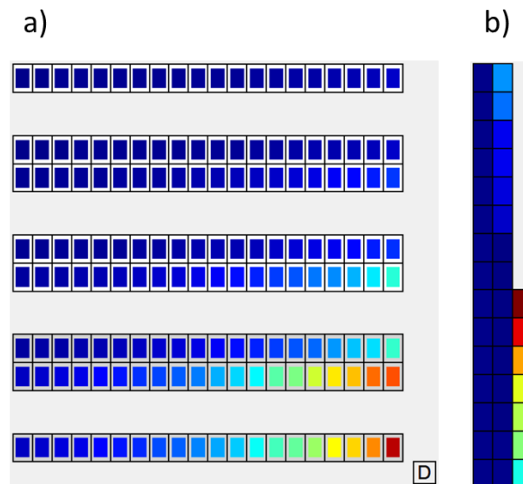


Abbildung 41: Lagerplatzvergabe für das „Palettenlager“ nach der hybriden Regel bei Annahme der Stichgangstrategie

Die Resultate, die mit den Regeln erzielt werden können, sind in Abbildung 42 dargestellt. Die vergrößerte Markierung der hybriden Regel bei der Schleifengangstrategie dient lediglich der besseren Übersicht, hat aber keine tiefere Bedeutung. Insgesamt ist zu erkennen, dass die Resultate der Regeln nahe der Paretokurve liegen, also fast an die Güte der optimierten Lösungen heranreichen.

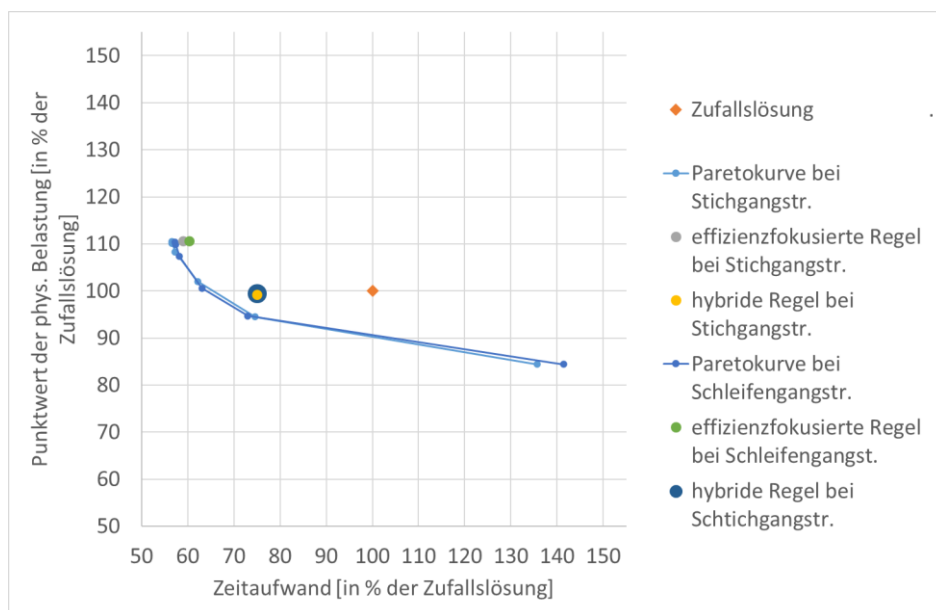


Abbildung 42: Resultate der Regeln zur Lagerplatzvergabe in „Palettenlagern“

Abschließend sei einschränkend darauf hingewiesen, dass bei allen vorgenommenen Untersuchungen nicht berücksichtigt wurde, dass sich mehrere Kommissionierer gegenseitig blockieren können. Sofern dieser Aspekt in einem zu planenden Lager eine große Relevanz aufweist, kann es sinnvoll sein, die Lagerplatzvergabe zu „entzerren“ – beispielsweise indem nach den vorgeschlagenen Schemata abwechselnd stark und weniger stark nachgefragte Artikel gelagert werden.

Layouts bei „Palettenlagern“

Die Ergebnisse der numerischen Experimente legen nahe, dass Zweiblocklayouts im Allgemeinen Einblocklayouts vorzuziehen sind. Wenn die Möglichkeit besteht, sollten also erstere genutzt werden. Ferner hat das Verhältnis von Anzahl an Regalen zu Länge der Regale einen Einfluss, der jedoch fallspezifisch ausfällt. Die Wahl des Layouts beeinflusst ferner vor allem die für das Kommissionieren benötigte Zeit; die physische Belastung wird kaum beeinflusst. Im Rahmen der in dieser Arbeit untersuchten Variationen ist der Einfluss des Layouts insgesamt eher gering.

4.6.1.2. Handlungsempfehlungen für „Fachboden- Kleinteilelager“

Routenführung bei „Fachboden- Kleinteilelagern“

Im Rahmen der durchgeführten numerischen Experimente hat sich gezeigt, dass die Resultate, die erzielt werden können, wenn die Kommissionierer einer Schleifen- oder Stichgangstrategie folgen, ähnlich gut sind. Dies gilt sowohl für die zu erwartende Zeit als auch die physische Belastung, die für die Kommissionierung anfällt. Es kann folglich keine Empfehlung für oder gegen eine der beiden Strategien ausgesprochen werden. Wichtig ist jedoch, dass die Lagerplatzvergabe-strategie stets mit der Routenführung abgestimmt wird.

Ferner können elektrisch angetriebene Kommissionierwagen eingesetzt werden, um die physische Belastung gegenüber dem Einsatz nicht-angetriebener Wagen deutlich zu senken. Insbesondere in Lagern, in denen schwere Artikel kommissioniert werden müssen und/ oder Mitarbeiter über hohe physische Belastungen klagen, ist der Einsatz elektrisch angetriebener Kommissionierwagen zu empfehlen. Werden nicht-angetriebene Wagen eingesetzt, ist auf eine gute Wartung und Schmierung der Wagen zu achten, damit sie leichtgängig sind und wenig Rollwiderstand aufweisen, um die für das Schieben und Ziehen der Wagen aufzubringende Kraft nicht unnötig zu erhöhen.

Lagerplatzvergabe bei „Fachboden-\ Kleinteilelagern“

Die optimierte Lagerplatzvergabe weist gewisse Strukturen auf, die mittels einfacher Regeln nachgebildet werden können. Werden die einfachen Regeln angewandt, resultieren daraus Lagerplatzvergaben, die zu guten Lösungen führen, ohne dass eine aufwändige Optimierung notwendig ist. Da bei „Fachboden-\ Kleinteilelagern“ weitestgehende Komplementarität zwischen einer Reduktion der Zeit und einer Verringerung der physischen Belastung besteht, wird eine einzelne, universale Regel vorgestellt:

1. Bestimme R_{hoch} , die Anzahl an Regalplätzen, die 90 cm oder höher sind. Bestimme R_{tief} , die Anzahl an Regalplätzen, die niedriger als 90 cm sind.
2. Teile die Artikel in zwei Gruppen auf. Gruppe G_1 enthält den Anteil $\frac{R_{hoch}}{R_{hoch}+R_{tief}}$ der Artikel, bei denen pro Kommissionierauftrag durchschnittlich am meisten Stück entnommen werden. Gruppe G_2 enthält die übrigen Artikel.
3. Sortiere die Artikel in beiden Gruppen absteigend nach der Häufigkeit, mit der sie in Kommissionieraufträgen vorkommen.
4. Falls die Kommissionierer der Schleifengangstrategie folgen, wähle a), fall sie der Stichgangstrategie folgen, wähle b):
 - a) Sortiere die Lagerplätze aufsteigend nach Distanz zum Depot.
 - b) Sortiere die Lagerplätze aufsteigend nach Distanz ihrer Regalreihe zum Depot.
5. Weise Artikel zu Lagerplätzen entsprechend der Sortierung zu, wobei Artikel aus Gruppe G_1 nur Regalplätzen, die 90 cm oder höher sind, zugewiesen werden. Artikel aus Gruppe G_2 werden nur Regalplätzen niedriger als 90 cm zugewiesen.

Die Lagerplatzvergaben, die sich entsprechend der Regel ergeben, sind in Abbildung 43 und Abbildung 44 dargestellt. Die Resultate, die mit den Regeln erzielt werden können, sind in Abbildung 45 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Anwendung der Regel zu einer deutlichen Verbesserung gegenüber dem Status quo führt. Allerdings ist auch ersichtlich, dass mittels komplexer Optimierung Resultate erreicht werden können, bei denen die Zeit und die physische Belastung um 7 bis 8 Prozentpunkte geringer ausfallen.

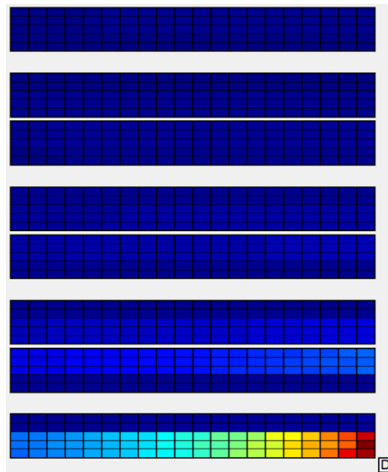


Abbildung 43: Regelbasierte Lagerplatzvergabe für das „Fachboden-\ Kleinteilelager“ bei Annahme der Schleifengangstrategie

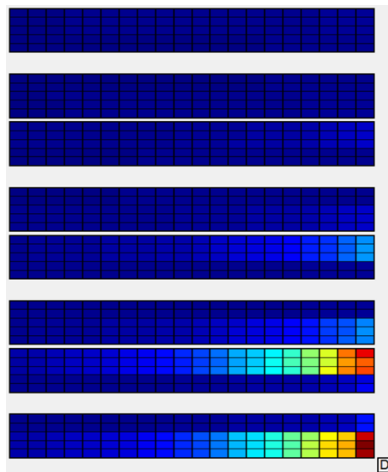


Abbildung 44: Regelbasierte Lagerplatzvergabe für das „Fachboden-\ Kleinteilelager“ bei Annahme der Stichgangstrategie

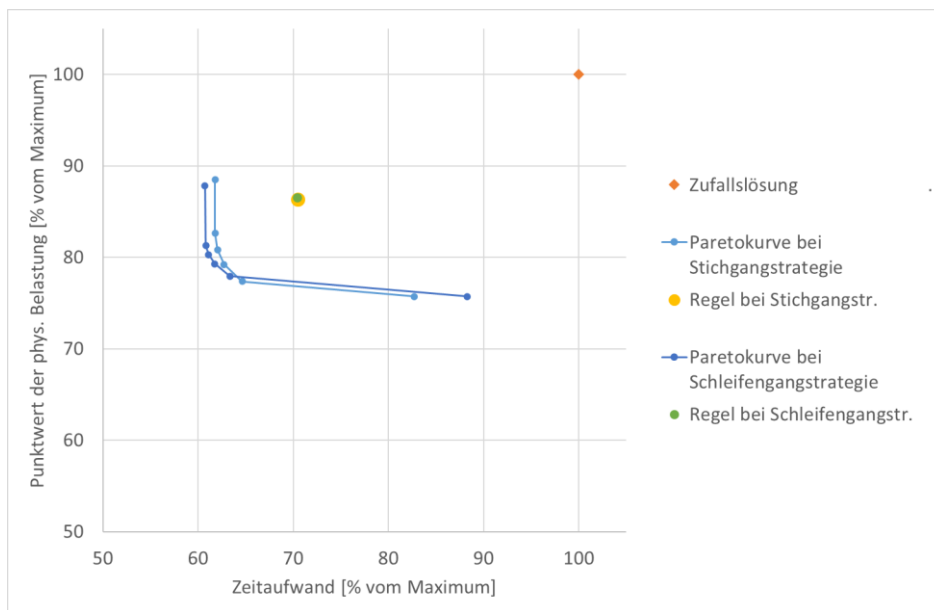


Abbildung 45: Resultate der Regeln zur Lagerplatzvergabe in „Fachboden- Kleinteilelagern“

Abschließend sei einschränkend darauf hingewiesen, dass bei allen vorgenommenen Untersuchungen nicht berücksichtigt wurde, dass sich mehrere Kommissionierer gegenseitig blockieren können. Sofern dieser Aspekt in einem zu planenden Lager eine große Relevanz aufweist, kann es sinnvoll sein, die Lagerplatzvergabe zu „entzerren“ – beispielsweise indem nach den vorgeschlagenen Schemata abwechselnd stark und weniger stark nachgefragte Artikel gelagert werden.

Layouts bei „Fachboden-Kleinteilelagern“

Die Ergebnisse der numerischen Experimente legen nahe, dass Zweiblocklayouts im allgemeinen Einblocklayouts vorzuziehen sind. Wenn die Möglichkeit besteht, sollten also erstere genutzt werden. Ferner hat das Verhältnis von Anzahl an Regalen zu Länge der Regale einen Einfluss, der jedoch fallspezifisch unterschiedlich ist. Die Wahl des Layouts beeinflusst ferner die für das Kommissionieren benötigte Zeit; die physische Belastung wird ebenfalls beeinflusst, allerdings in geringerem Ausmaß.

4.6.2. Allgemeine Handlungsempfehlungen

Auf Basis der Erhebungen bei den Praxispartnern, den numerischen Experimenten sowie allgemeinen ergonomischen Analysen lassen sich des Weiteren übergeordnete Handlungsempfehlungen ableiten. Diese werden in drei Kategorien gegliedert:

1. Anthropometrische Gestaltung von Lagersystemen (Person-zur-Ware)
2. Empfehlungen zu maximal zulässigen Lastgewichten
3. Empfehlungen zu technischen Hilfsmitteln

Im Folgenden werden diese drei Kategorien an Handlungsempfehlungen nacheinander vorgestellt.

4.6.2.1. Anthropometrische Gestaltung von Lagersystemen

Die anthropometrische Arbeitsplatzgestaltung befasst sich mit der geometrischen Auslegung von Arbeitsplätzen und Arbeitsmitteln anhand der Maße des menschlichen Körpers. In Bezug auf Lagerarbeitsplätze sind diese nur zum Teil in Normen vorhanden und sollen hier konkretisiert werden. Praxisnahe Hinweise sind beispielsweise in der VDI 3657 gegeben – so liegen optimale Entnahmehöhen bei etwa 1,10 m und optimale Ablagehöhen bei etwa 0,90 m.

In der Regel werden Arbeitsplätze entsprechend der Körpermaße ab dem 5. Perzentil weiblich bis zum 95. Perzentil männlich gestaltet, um einen großen Teil der Bevölkerung abzudecken. Die folgenden Werte (Werte aus Deutschland) werden jeweils für eine rein männliche, weibliche bzw. eine gemischte Belegschaft im Lager angegeben.

Maximale Entnahmehöhe:

Es ist wichtig, die maximale Entnahmehöhe zu kennen, um sicherheitskritische Situationen (z. B. schwere Lastenhandhabung „auf Zehenspitzen“) zu vermeiden und eine ergonomische Handhabung zu ermöglichen. Die maximale Entnahmehöhe richtet sich nach den „kleinsten Personen“, ist also ein Außenmaß.

Für männliche bzw. weibliche Arbeitspersonen ergeben sich folgende Werte aus der DIN 33402:

- **Mann:** $Greifhöhe_{max} = Reichweite\ nach\ oben, Grifffachse\ (5.\ P.,\ männl.) = 1975\ mm$
- **Frau:** $Greifhöhe_{max} = Reichweite\ nach\ oben, Grifffachse\ (5.\ P.,\ weibl.) = 1840\ mm$

Hieraus lässt sich als Faustregel ableiten, dass Fachbodenregale nicht höher als 1800 mm beladen werden sollten, wenn alle Mitarbeiter diese Ebenen noch ohne Leiter ergonomisch sinnvoll erreichen können sollen. Je nach Volumen und Handhabbarkeit der Artikel sind geringere Lagerhöhen anzustreben.

Vertikaler Greifraum:

In der Literatur ist für den vertikalen Greifraum häufig die Empfehlung gegeben, dass häufig zu entnehmende Artikel („Schnelldreher“) in der sogenannten „Goldenen Zone“ gelagert werden sollten. Diese ist häufig definiert als Bereich zwischen Schulter und Hüfte der Arbeitspersonen. Diese Angabe ist als praxisorientierte Faustregel zwar sinnvoll, jedoch für eine genau Angabe zu unspezifisch, da diese Werte personenbezogen sind. Aus diesem Grund wurde in diesem Projekt nach einer präziseren Angabe gesucht. Ferner spielt bei der Angabe von ergonomischen Entnahmehöhen auch die Entnahmetiefe eines Artikels eine entscheidende Rolle.

Die Goldene Zone wird deshalb im Folgenden definiert als der Bereich, den ein Lagermitarbeiter erreichen kann, ohne dass Überkopparbeit geleistet oder die Person in die Hocke gehen bzw. den Oberkörper beugen muss.

Um für verschiedene Perzentile der Bevölkerung diese idealen Entnahmeräume zu bestimmen, wird ein Viertelkreis um das Schultergelenk mit der Länge der Grifffachse gezogen, siehe Abbildung 49, Abbildung 50 und Abbildung 51.

5. Perzentil:

- **Mann:** Greifraum im Stehen = Viertelkreis auf Höhe 1345 mm mit Radius 685 mm
- **Frau:** Greifraum im Stehen = Viertelkreis auf Höhe 1260 mm mit Radius 625 mm

50. Perzentil:

- **Mann:** Greifraum im Stehen = Viertelkreis auf Höhe 1450 mm mit Radius 740 mm
- **Frau:** Greifraum im Stehen = Viertelkreis auf Höhe 1345 mm mit Radius 690 mm

95. Perzentil:

- **Mann:** Greifraum im Stehen = Viertelkreis auf Höhe 1550 mm mit Radius 815 mm
- **Frau:** Greifraum im Stehen = Viertelkreis auf Höhe 1425 mm mit Radius 750 mm

Die Schnittmenge dieser Viertelkreise der größten und kleinsten Personen im Lager ergeben nun die Goldene Zone. Werden außerdem seitliche Bewegungen außerhalb der Sagittalebene berücksichtigt, sind die entsprechenden vertikalen Greifräume kleiner anzunehmen.

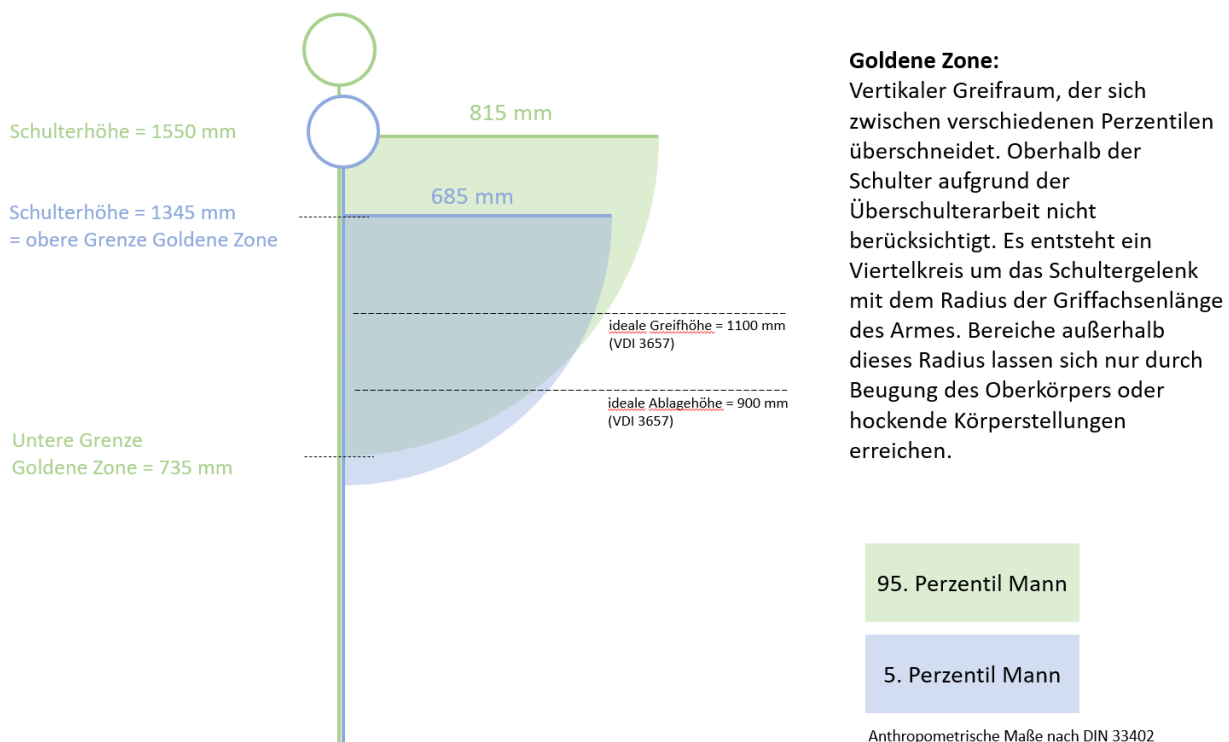
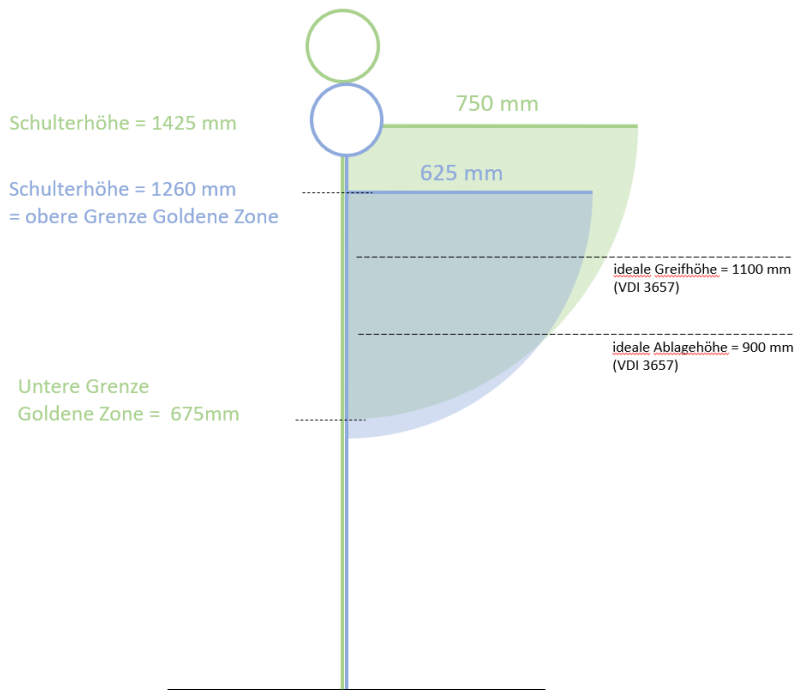


Abbildung 46: Goldene Zone für eine rein männliche Belegschaft



Goldene Zone:

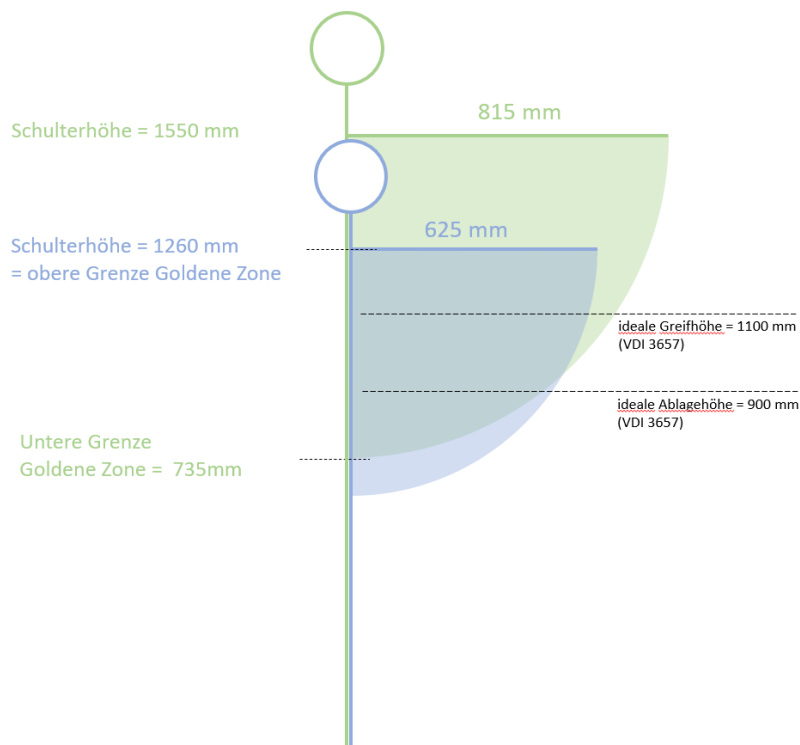
Vertikaler Greifraum, der sich zwischen verschiedenen Perzentilen überschneidet. Oberhalb der Schulter aufgrund der Überschulterarbeit nicht berücksichtigt. Es entsteht ein Viertelkreis um das Schultergelenk mit dem Radius der Griffachsenlänge des Armes. Bereiche außerhalb dieses Radius lassen sich nur durch Beugung des Oberkörpers oder hockende Körperstellungen erreichen.

95. Perzentil Frau

5. Perzentil Frau

Anthropometrische Maße nach DIN 33402

Abbildung 47: Goldene Zone für eine rein weibliche Belegschaft



Goldene Zone:

Vertikaler Greifraum, der sich zwischen verschiedenen Perzentilen überschneidet. Oberhalb der Schulter aufgrund der Überschulterarbeit nicht berücksichtigt. Es entsteht ein Viertelkreis um das Schultergelenk mit dem Radius der Griffachsenlänge des Armes. Bereiche außerhalb dieses Radius lassen sich nur durch Beugung des Oberkörpers oder hockende Körperstellungen erreichen.

95. Perzentil Mann

5. Perzentil Frau

Anthropometrische Maße nach DIN 33402

Abbildung 48: Goldene Zone für eine Belegschaft mit beiden Geschlechtern

Es lässt sich ableiten, dass der optimale vertikale Greifraum im Lager (Annahme: in der Regel beide Geschlechter unter den Mitarbeitern vertreten) zwischen 750 mm und 1250 mm liegt. Werden Artikel entsprechend ihrer Bedarfshäufigkeit nach einer ABC-Analyse in Klassen aufgeteilt, sollten in einem Kleinteilelager A-Artikel und besonders schwere Artikel deshalb möglichst in diesem Bereich liegen. B-Artikel können auch etwas höher bzw. niedriger gelagert werden, falls die optimalen Bereiche bereits belegt sind. Unter 500 mm bzw. über 1500 mm sollten hingegen nur C-Artikel und leichte Lasten gelagert werden.

Ferner zeigt dies eine Problematik bei Palettenlagerung auf dem Boden auf. Um hier niedrige Entnahmehöhen zu vermeiden, sollten Paletten mit besonders schweren A- und B-Artikeln deshalb nach Möglichkeit auf eine Höhe von mindestens 400 mm aufgebockt werden.

4.6.2.2. Empfehlungen zu maximal zulässigen Lastgewichte

In Deutschland gibt es keine nationalen Grenzwerte für manuelle Lastenhandhabungen. Betriebsinterne Grenzwerte variieren in weiten Bereichen. In der Praxis scheinen zwei Gewichtswerte relevant zu sein: 25 kg und 15 kg.

- **25 kg** wird als Grenzwert in einschlägigen europäischen (EN 1005-2) und internationalen (ISO 11228-1) Normen für den „allgemeinen beruflichen Gebrauch“ unter idealen Handhabungsbedingungen genannt.
- Für die „allgemeine Arbeitsbevölkerung, einschließlich älterer und jüngerer Personen“ werden **15 kg** empfohlen, insbesondere für Frauen (bei häufiger Handhabung sogar nur 10 kg).
- In BK 2108 werden für die „mittlere“ Altersgruppe (18-39 Jahre) „schwere Lasten, die nah am Körper getragen werden“ als 15 kg bei Frauen und 25 kg bei Männern definiert. (BK 2108: Bandscheibenbedingte Erkrankungen der Lendenwirbelsäule durch langjähriges Heben oder Tragen schwerer Lasten oder durch langjährige Tätigkeiten in extremer Rumpfbeugehaltung)
- Um im Sinne des Arbeitsschutzgesetzes Arbeitsplätze für Männer und Frauen gleichermaßen offen zu halten, erscheint ein **maximales manuell zu handhabendes Artikel- bzw. Behältergewicht von 15 kg** als sinnvoll.

Maximale Gewichte in Abhängigkeit der Greifhöhe:

Eine Beurteilung von Lastenhandhabungen kann jedoch nicht auf das Nennen eines maximal zulässigen Lastgewichtes reduziert werden. Weitere Parameter (z. B. Körperhaltung, Häufigkeit der Lastenhandhabung) sind bei der Beurteilung von Lastenhandhabungen zu berücksichtigen und haben hinsichtlich der Belastung einen ähnlich hohen Einfluss wie das Lastgewicht selbst.

Gerade in der Logistik liegen meist weder eine konstante Entnahmehöhen noch eine ideale Körperhaltung vor. Zudem fällt auf, dass beim Kommissionieren in der Praxis regelmäßig Lasten > 15 kg (vereinzelt bis 50 kg) auftreten. Diese sehr hohen Lastgewichten sollten nur mithilfe technischer Hilfsmittel (z. B. Hebehilfen) bzw. im 2-Personen Handling gehandhabt werden.

Eine Möglichkeit, um maximal empfohlene Lastgewichte zu bestimmen, ist in DIN EN 1005-2 gegeben. Durch die Berücksichtigung verschiedener Multiplikatoren, wie z. B. Höhen- oder Frequenzmultiplikator, lassen sich analog zur NIOSH-Formel (Waters et al., 1993) für jede Entnahmehöhe Massegrenzen berechnen:

$$M_{max,empf.} = M_{ref} \cdot V_M \cdot D_M \cdot H_M \cdot A_M \cdot C_M \cdot F_M \quad (6)$$

Je nach Anwenderpopulation können, wie bereits im obigen Kapitel dargestellt, verschiedene Referenzmassen M_{ref} angenommen werden. Der Multiplikator für die vertikale Position V_M und der Hubmultiplikator D_M kann jeweils direkt aus der entsprechenden Greifhöhe und der Ablagehöhe bestimmt und aus Tabellenwerken abgelesen werden. Beim Abstandsmultiplikator H_M wird von einer guten Zugänglichkeit und somit körpernaher Handhabung ausgegangen. In Praxiserhebungen konnte meist eine leichte Asymmetrie bei der Lasthandhabung festgestellt werden, sodass der entsprechende Multiplikator nach der Tabelle auf $A_M = 0,9$ gesetzt wird. Es wird von einer Frequenz von 60 Picks/h während einer Arbeitszeit von 8 Stunden ausgegangen. Bei davon abweichenden Pickfrequenzen können die empfohlenen Maximalgewichte etwas niedriger (höhere Pickfrequenzen) bzw. höher (niedrigere Pickfrequenzen) liegen. Abbildung 49 gibt zwei Varianten (unterschiedliche Referenzgewichte, je nach Anwenderpopulation) von maximal empfohlenen Lastgewichten in Abhängigkeit von der Greifhöhe an:

Referenzgewicht = 15 kg		Referenzgewicht = 25 kg	
1,75 m	nicht empfohlen	1,75 m	nicht empfohlen
	7,9 kg		13,2 kg
1,3 m	9,5 kg	1,3 m	15,7 kg
1,0 m	10,1 kg	1,0 m	16,9 kg
0,75 m	8,7 kg	0,75 m	14,6 kg
0,5 m	7,6 kg	0,5 m	12,8 kg
0,25 m	6,9 kg	0,25 m	11,4 kg
0 m		0 m	

Abbildung 49: Maximal empfohlene Lastgewichte bei Referenzwerten von 15 kg (links) und 25 kg (rechts)

Zu beachten ist, dass diese Grenzwerte eigentlich nur für dauerhaft wiederkehrende Entnahmepattern (z. B. gleiche Greifhöhen, Lastgewichte und Asymmetrie der Lasthandhabung) gelten – diese sind in der Lagerlogistik jedoch sehr variabel. Zudem gelten die oben genannten Grenzwerte nur unter folgenden Bedingungen:

- nur beidhändige Handhabung;
- uneingeschränkte stehende Körperhaltung und uneingeschränkte Bewegungen;
- gute Greifbedingungen zwischen den Händen und den zu handhabenden Gegenständen;
- hohe Rutschfestigkeit des Bodens;

- andere manuelle Handhabungen als Heben (Tragen, Halten) treten nur minimal auf.

Auch diese Bedingungen sind im Lager nicht immer gegeben. Als praxisnahe Veranschaulichung der tendenziellen Verteilung der maximalen Lastgewichte in Abhängigkeit der Entnahmehöhe sind diese dennoch sinnvoll. Die maximal empfohlenen Lastgewichte in niedrigen oder hohen Entnahmehöhen sind deutlich niedriger als innerhalb der Goldenen Zone. Ferner dürfen Artikel, die sehr selten gehandhabt werden, auch Lastgewichte bis zu den Referenzwerten aufweisen, sollten jedoch in ergonomisch günstigen Greifhöhen platziert werden.

4.6.2.3. Empfehlungen zu technischen Hilfsmitteln

Zuletzt sollen einige Empfehlungen hinsichtlich möglicher technischer Hilfsmittel für manuelle Lagerstätigkeiten gegeben werden. Wie in Kapitel 4.1.2 ersichtlich wird, ist das Spektrum verschiedener Hilfsmittel sehr breit – deshalb sollen hier lediglich allgemeine Handlungsanweisungen sowie Empfehlungen für ausgewählte technische Systeme vorgeschlagen werden.

Um physische Belastungen in Arbeitssystemen zu reduzieren, wird eine klare Maßnahmenhierarchie empfohlen. Technische Maßnahmen (T) sind demnach immer als erstes durchzuführen. Erst wenn keine weiteren technische Maßnahmen umsetzbar sind, kommen organisatorische Maßnahmen (O) in Betracht. Hierzu zählt beispielsweise die Job Rotation. Persönliche Maßnahmen (P) bzw. persönliche Schutzausrüstungen, wozu z. B. auch Exoskelette zählen, sind erst das dritte Mittel der Wahl im Arbeitsschutz.

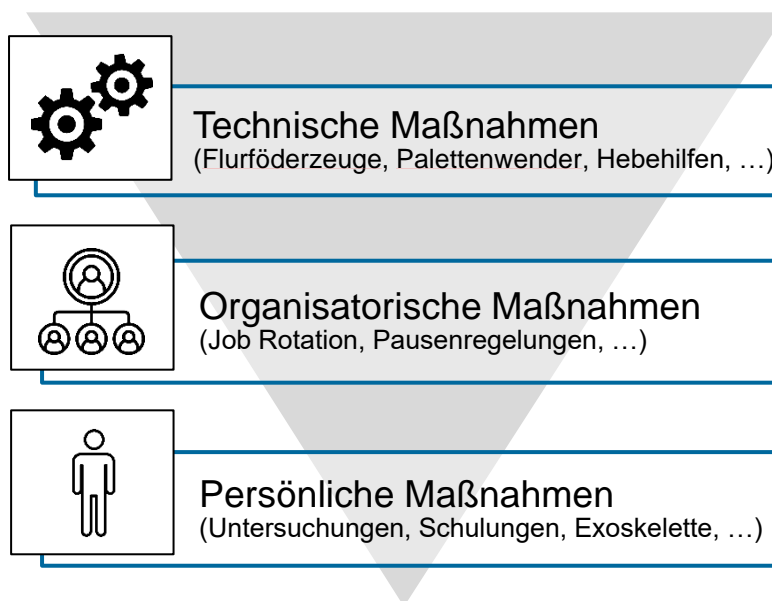


Abbildung 50: TOP-Prinzip bei der Gestaltung von Lagerarbeitsplätzen

Generell sind alle technischen Maßnahmen empfohlen, die physische Belastungen mindern und gleichzeitig nicht zu Effizienzeinbußen führen. Die Interviews mit Lagerplanenden und der Unternehmensführung haben jedoch gezeigt, dass Investitionen in ergonomische Maßnahmen meist eher kritisch betrachtet werden, da hierdurch resultierende wirtschaftliche Benefits sehr schwierig nachzuweisen sind.

Im Folgenden sollen einige technische Hilfsmittel, die in den Praxiserhebungen beobachtet wurden, herausgegriffen und entsprechende Empfehlungen gegeben werden.

Kategorie 1: Ladungsträger und Regalsysteme

In Palettenlagern können Palettenauszüge (siehe Abbildung 51) verwendet werden, die es ermöglichen, beladene Paletten aus dem Regal herauszuziehen. Somit ist die Palette von drei Seiten erreichbar, ohne dass Kommissionierer in das Regal hereinstiegen zu müssen – entsprechend können ungünstige Körperhaltungen vermieden werden. Gleichzeitig entstehen jedoch durch die zusätzlichen Zieh- bzw. Schiebevorgänge zusätzliche körperliche Belastungen. Eine Nutzung des Palettenauszugs ist somit nicht immer vorteilhaft. Eine Abschätzung dieses Zielkonflikts wird mittels EAWS vorgenommen – es soll berechnet werden, ab wie vielen Picks von einer bestimmten Position auf der Palette die günstigere Körperhaltung die zusätzliche Belastung durch das Herausziehen der Palette übersteigt. Hierzu wurde sich den Motion Capture Daten aus der Praxiserhebung bedient.



Abbildung 51: Palettenauszug (Quelle: bito.com)

Die Belastung durch das Ziehen bzw. Schieben des Palettenauszugs ist abhängig vom Gewicht der Palette. Ferner spielt zur Abwägung die Position, von der ein Artikel gegriffen wird, eine entscheidende Rolle. So wird der Palettenauszug zur Entnahme von Artikel, die von der Vorderseite aus erreichbar sind, wohl nie lohnend sein. Vielmehr ist die Nutzung des Auszugs vor allem bei hinteren Positionen auf der Palette sinnvoll, da diese vom Gang aus schwer erreichbar sind.

Abbildung 52 zeigt beispielhaft die Anzahl an Stückentnahmen, die von einer bestimmten Position auf der Palette notwendig sind, damit die Nutzung des Palettenauszugs aus ergonomischer Sicht nach Berechnung mit EAWS zu einem geringer Risikoscore führt. Hier wurden beispielhafte Daten angenommen – im Rahmen des Projekts wurde jedoch ein Excel-Rechner erstellt, der auf der Projektwebseite (siehe Abschnitt 8) zum Download zur Verfügung steht. Anzumerken ist weiterhin, dass in diesem Beispiel angenommen wurde, dass die Artikel „Spalte für Spalte“ entnommen werden. In der Praxis wurden häufig auch „dreiecksförmige“ Entnahmestrategien festgestellt. In

dem entwickelten Excel-Rechner können diese beiden Strategien unterschieden werden. Zu bedenken ist, dass der Palettenauszug immer ergonomisch sinnvoll ist, wenn der Auszugmechanismus motorisiert und damit ohne manuelle Kraftaufbringung konstruiert wurde.

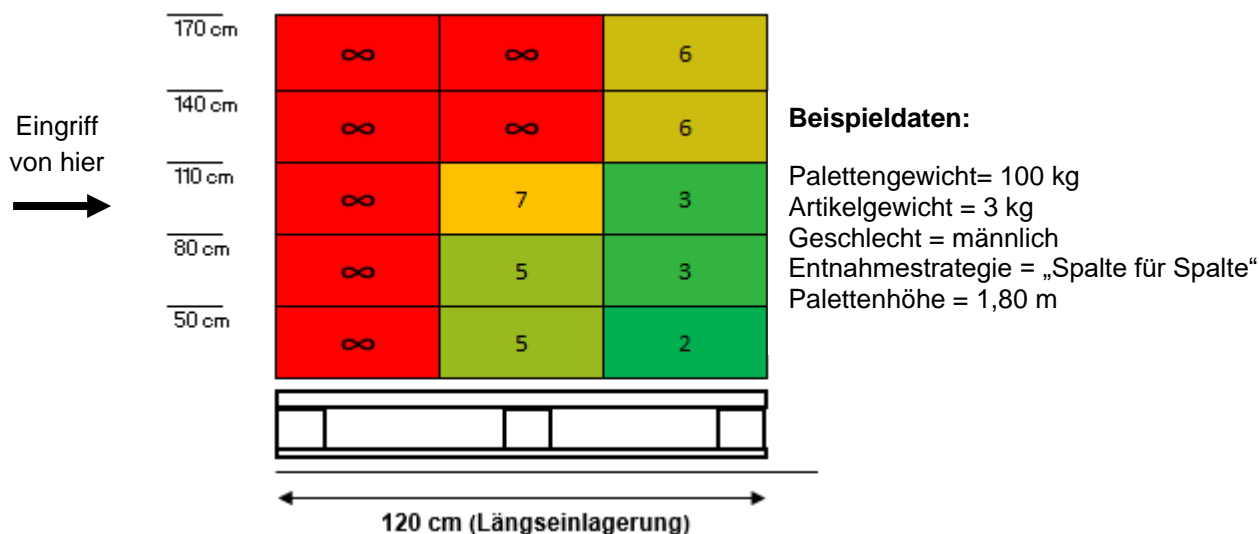


Abbildung 52: Beispielhafte Darstellung des Excel-Rechners zu Palettenauszugsvorrichtungen

Anstelle einer Auszugsvorrichtung für Paletten sind auf dem Markt auch Palettenwendegeräte zu finden. Entsprechende Untersuchungen zur Ergonomie und auch wirtschaftlichen Aspekten dieser technischen Hilfsmittel sind in Glock et al. (2019) zu finden.

Ferner sollten Paletten, insbesondere, wenn sie mit schweren bzw. häufig zu entnehmenden Artikeln bestückt sind, nicht auf dem Boden gelagert werden. Vielmehr ist ein Aufbocken auf Stützrahmen zu empfehlen, sodass die niedrigste Entnahmehöhe auf mindestens 40 cm liegt – ab hier ist im Vergleich mit tieferen Entnahmehöhen mit deutlich verbesserten Körperhaltungen zu rechnen. Auch Durchlaufregale sollten entsprechend in ihrer untersten Ebene nicht zu tief ausgelegt werden.

Außerdem hat sich in der Praxis gezeigt, dass Kartonagen mit vorgestanzten Greifmöglichkeiten handlichere Lasthandhabungen und damit günstigere Körperhaltungen ermöglichen. Wenn dem Einkauf eines Unternehmens verschiedene Kartonagemodelle angeboten werden, sollte diese Möglichkeit in Betracht gezogen werden.

Kategorie 2: Fahr- und Förderzeuge

Die numerischen Experimente dieses Projektes haben gezeigt, dass motorisierte Fahrzeug im Vergleich mit manuell zu schiebenden Wagen große ergonomische Vorteile bieten. Die zusätzlichen Belastungspunkte im EAWS durch das Ziehen bzw. Schieben von Lasten sind verglichen mit den Punkten durch das Umsetzen von Artikeln relativ hoch. Es wurde beobachtet, dass vor allem sehr kurze Schiebevorgänge von einer Entnahmeposition zur nächsten häufig vorkommen - mit bis zu über 500 Einzelvorgängen je Schicht. Diese Belastungen können durch Verwendung eines motorisierten Fahrzeugs gänzlich vermieden werden.

Falls doch manuelle Handwagen genutzt werden, ist darauf zu achten, dass diese ausgestaltete Griffe besitzen, die möglichst höhenverstellbar sind, um günstige Körperhaltungen beim Ziehen

und Schieben zu ermöglichen. Auch die Ablagefläche des Wagens – unabhängig davon, ob das Fahrzeug motorisiert ist – zeichnet sich im besten Fall durch eine Höhenverstellung aus.

Kategorie 3: Greif- und Hebehilfen

Es wird empfohlen, bei manueller Lastenhandhabung spätestens ab einem Behälter- bzw. Artikelgewicht von 25 kg (Frauen 15 kg) Hebehilfen einzusetzen. Häufig ist hierbei jedoch die Herausforderung, dass stationäre Hebehilfen bei der Kommissionierung nicht flexibel einsetzbar sind. In anderen Bereichen des Lages, beispielsweise im Versand, können sie dagegen gut eingesetzt werden. Je nach Prozessgestaltung und Layout könnten mehrere stationäre Hebehilfen in solchen Bereichen sinnvoll sein. Ferner gibt es seit einiger Zeit vermehrt mobile Hebehilfen, die auf Fahrzeugen angebracht werden (z. B. auf Niederhubkommissionierern). Die Hebehilfen stehen somit jeweils am Entnahmeort zur Verfügung und können daher auch bei der Kommissionierung eingesetzt werden.

Außerdem haben sich in der Praxis sehr einfache, oft provisorisch gebaute Hilfsmittel bewährt. Mit „Pick-Sticks“ (mit Greifern oder Haken versehene Stäbe) können z. B. Artikel vom hinteren Teil einer Palette nach vorne gezogen werden, um diese einfacher erreichen zu können, ohne in das Palettenregal hineintreten oder ungünstige Körperhaltungen einnehmen zu müssen. Der Einsatz von „Pick-Sticks“ ist damit sehr zu empfehlen.

5. Angaben zu den aus der Zuwendung finanzierten Ausgaben für Personenmonate des wissenschaftlich-technischen Personals

Die Projektbearbeitung erfolgte im Zeitraum von Oktober 2020 bis August 2022, der eine zwei-monatige kostenneutrale Laufzeitverlängerung beinhaltet, durch jeweils einen wissenschaftlichen Mitarbeiter an den Forschungsstellen (FS) 1 und 2. Aufgrund der SARS-CoV-2-Pandemie und der damit einhergehenden Verschiebung der Erhebungen in der Praxis wurde eine entsprechende kostenneutrale Laufzeitverlängerung beantragt und genehmigt.

Im Projektantrag waren für FS 1 15 Personenmonate für wiss.-techn. Personal (A.1 des Finanzierungsplans) sowie 3 Personenmonate für Hilfskräfte (A.3 des Finanzierungsplans) vorgesehen. Abweichend dazu wurden unter Einhaltung des Budgets 17 Personenmonate für wiss.-techn. Personal durch Einsparungen des Einsatzes von Hilfskräften finanziert. Diese war aufgrund von Zugangsrestriktionen während der SARS-CoV-2-Pandemie sowie einer erhöhten Komplexität der zu bearbeitenden Aufgabe, die so nicht im Projektantrag erkennbar war, notwendig. Der IFL wurden bereits während der Projektlaufzeit die Hintergründe und Durchführung dieser Änderung dargelegt. FS 2 hat entsprechend des im Projektantrag vorgesehenen Finanzierungsplans 21 Personenmonate für wiss.-techn. Personal (A.1 des Finanzierungsplans) eingesetzt und zusätzlich 4,2 Personenmonate für Hilfskräfte (A.3 des Finanzierungsplans).

Die Mitarbeiter haben über den jeweiligen angegebenen Bearbeitungszeitraum auf beiden FS, wie im Antrag beschrieben, mit jeweils 100% 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 Projekt 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. Dazu gehörten die Durchführung von Interviews und die Organisation und Moderation von Workshops zur Analyse technischer Hilfsmittel im Lager. Ferner fanden Besprechungen mit den Unternehmen des Projektbegleitenden Ausschusses statt, die gemeinsam vorbereitet und durchgeführt wurden. Die Ergonomie-Analysen bei den Praxispartnern sowie die Entwicklung der integrativen Kennzahlen waren maßgeblich Aufgabe der FS 2, während FS 1 darauf aufbauend mathematische Optimierungsmodelle entwickelte und diese mit numerischen Experimenten validierte. Im Anschluss wurden in gemeinsamer Arbeit übergreifende Handlungsempfehlungen abgeleitet. Die Aufgaben der wissenschaftlichen Mitarbeiter umfassten auch die praxisnahe Aufbereitung und Präsentation der Projektergebnisse.

An der FS 2 wurde der wissenschaftliche Mitarbeiter während der Projektbearbeitung durch eine studentische Hilfskraft (A.3 des Finanzierungsplans) über die Projektlaufzeit unterstützt. Die Hilfskraft übernahm insbesondere Aufgaben zur Aufbereitung von Daten sowie im Rahmen der Praxiserhebung zu manuellen Lagertätigkeiten. Außerdem unterstützte sie bei der Durchführung von Sitzungen mit dem Projektbegleitenden Ausschuss. Ausgaben für Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans) und Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans) waren im Finanzierungsplan nicht vorgesehen und sind dementsprechend nicht angefallen.

6. Erläuterung der 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 realitätsnahe Belastungskennzahlen sowie entsprechende Optimierungsmodelle erstellen zu können, musste zunächst ein umfassendes Verständnis über Lagersysteme und -prozesse in der Praxis erarbeitet werden. Aus diesem Grund wurden eine umfassende Interviewstudie sowie praxisorientierte Workshops durchgeführt. Diese ermöglichten es, einerseits die verschiedenen Kommissioniersysteme, in der Praxis angewandte Planungsverfahren sowie technische Hilfsmittel zu identifizieren und andererseits Forschungsbedarf der Praxis aufzudecken. Ferner konnten damit eine validierte Datengrundlage geschaffen werden.

Die ergonomische Datenerhebung in den Lagern der Unternehmen aus dem Projektbegleitenden Ausschuss waren für die Entwicklung der Ergonomie-Kennzahlen unabdingbar – nur so konnte die tatsächliche Belastungssituation der Mitarbeiter akkurat ermittelt werden. Zudem wurden moderne Motion Capture-Systeme eingesetzt, mit deren Hilfe Körperhaltungen der Mitarbeiter exakt bestimmt werden können. Die Auswertung von über 1000 Kommissioniervorgängen von insgesamt 17 Mitarbeitern sowie die entsprechende Zuordnung zu bestimmten Tätigkeitsklassen ist sehr aufwendig und erfordert eine ausgeprägte Erfahrung im Umgang mit den technischen Systemen. 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.

Zur Untersuchung von integrativen Planungskonzepten für ausgewählte Lagertätigkeiten wurden mathematische Optimierungsmodelle und zugehörige Lösungsverfahren entwickelt, auf deren Basis numerische Studien durchgeführt wurden. Gegenüber anderen Ansätzen, wie z. B. Simulationsmodellen, bieten Optimierungsmodelle den Vorteil, ein viel breiteres Spektrum an Lösungsalternativen zu betrachten. Dies stellt sicher, dass keine vorteilhaften Lösungsalternativen übersehen werden. Damit stellt das Vorgehen eine moderne, anspruchsvolle Forschungsmethodik dar, mit der – bezogen auf die vorliegende Anwendung – unterschiedliche Planungskonzepte und Problemstellungen praxisnah und für genau definierten Lagerszenarien untersucht werden konnten.

Durch die zuvor durchgeführte, umfassende Datenaufnahme konnten geeignete, praxisnahe Optimierungsszenarien mit detaillierten Ergonomie-Parametern als Eingangsgrößen definiert werden. Anschließend wurden die Ergebnisse der numerischen Experimente mit den Mitgliedern des Projektbegleitenden Ausschusses detailliert besprochen, um Nutzenpotenziale für die Praxis zu identifizieren. Mithilfe von einfachen Regeln, die mit den optimierten Lösungen abgeglichen wurden, konnten äußerst zufriedenstellende Praxisempfehlungen abgeleitet werden. Zudem wurden Handlungsempfehlungen zur anthropometrischen Gestaltung von Lagern sowie bezüglich des Einsatzes von technischen Hilfsmitteln gegeben, die in einem VDI-Arbeitskreis diskutiert und evaluiert wurden. Die Ergebnisse und die weiteren geplanten Maßnahmen schaffen die Voraussetzung für einen anwendungsorientierten Ergebnistransfer in die Wirtschaft.

7. Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der erzielten Ergebnisse

Das Ziel dieses Projekts bestand in der Integration wirtschaftlicher und ergonomischer Kenngrößen in Planungs- und Optimierungskonzepte für die manuelle Lagerhaltung, insbesondere die manuelle Kommissionierung. Wie in Abschnitt 2 dargelegt wurde, stellt die manuelle Lagerhaltung einen erheblichen direkten Kostenfaktor für viele Unternehmen dar. Darüber hinaus geht die manuelle Arbeit in der Lagerhaltung mit einem deutlich gesteigerten Risiko der Belegschaft für die Entwicklung muskuloskelettaler Erkrankungen einher. Daraus resultierende Arbeitsausfälle, erhöhte Fehleranfälligkeiten und verringerte Arbeitsleistungen führen zu weiteren Kosten. Die entwickelten ganzheitlichen Planungs- und Optimierungskonzepte und insbesondere die abgeleiteten Handlungsempfehlungen zeigen Lösungsmöglichkeiten auf, um die beschriebenen Kosten zu senken. Dies stellt einen direkten wirtschaftlichen Nutzen dar.

Aufgrund des starken öffentlichen Interesses an Initiativen zur Reduktion von physischen Belastungen der Mitarbeiter ist bei entsprechender Kommunikation auch eine positive Wirkung auf das Unternehmensimage zu erwarten, das sich langfristig auf eine verbesserten Wettbewerbssituation und Personalakquise auswirken kann. Vor dem Hintergrund eines anhaltenden Fachkräftemangels, der sich im Zuge des demographischen Wandels weiter zuspitzen kann, gewinnt dieser Mehrwert an besonderer Relevanz.

Ferner gehen mit muskuloskelettalen Erkrankungen auch volkswirtschaftliche Kosten, z. B. für Produktivitätsverluste oder Rehabilitationsmaßnahmen, einher. Die im Rahmen des Projekts aufgezeigten Maßnahmen und Empfehlungen zur Reduktion physischer Belastungen und damit einhergehender muskuloskelettaler Erkrankungen können dabei helfen, diese Kosten zu reduzieren und knappe Ressourcen im Gesundheitswesen zu entlasten.

Darüber hinaus bieten die im Rahmen der Arbeit gewonnenen Ergebnisse verschiedene wissenschaftlich-technische Mehrwerte. Ein zentrales Ergebnis des Projekts stellen die auf Basis von Datenerhebungen in der Praxis und unter Verwendung etablierter Methoden entwickelten und validierten ergonomische Kennzahlen dar. Diese ermöglichen, physische Belastungen in einem breiten Spektrum manueller Handhabungstätigkeiten in der Kommissionierung zu quantifizieren. Die Kennzahlen sind für die Verwendung im Rahmen von mathematischen (Optimierungs-)Modellen ausgelegt und bieten gegenüber bisher verwendeten Ansätzen eine höhere Genauigkeit und Spezifität. Sie haben damit auch über dieses Projekt hinaus einen großen wissenschaftlich-technischen Nutzen in mathematischen (Optimierungs-)Modellen. Nichtsdestoweniger bergen die Kennzahlen aufgrund ihrer einfachen Anwendbarkeit auch einen praktischen Nutzen, da sie in tabellarischer Form vorliegen und keine Fachkenntnis vom Anwender voraussetzen.

Unter Verwendung der entwickelten Ergonomie-Kennzahlen wurden anschließend mathematische Optimierungsmodelle entwickelt, die ein gemischt ergonomisch-ökonomisches Optimierungsziel aufweisen. Ein wissenschaftlich-technischer Nutzen besteht darin, dass damit aufgezeigt wurde, wie die entwickelten Ergonomie-Kennzahlen in mathematische Modelle integriert werden können und wie mit einer hybriden Zielstellung umgegangen werden kann. Ferner fördern die zur Lösung der Modelle entwickelten Verfahren den wissenschaftlichen Diskurs um Lösungsalternativen für NP-schwere Probleme. Sowohl zukünftige Forschung als auch kommerzielle Software-Produkte können von diesen Einsichten profitieren.

Schließlich ist auch ein technischer Nutzen durch die entwickelten Handlungsempfehlungen gegeben, die zu einer ergonomischen Gestaltung technischer Systeme beitragen. Dass auch ein praktisches Interesse an den abgeleiteten Handlungsempfehlungen besteht, wurde nicht zuletzt dadurch bestätigt, dass ausgehend vom vorliegenden Projekt im Rahmen der Erstellung eines Whitepapers zur Unterstützung von Praktikern bei Anwendung der VDI 3657 die Expertise der Autoren angefragt wurde.

Das Projekt setzte daher wichtige forschungspolitische Impulse für innovierende KMU. Die hohe praktische Relevanz und wirtschaftliche Bedeutung des Forschungsprojekts gerade für KMU wird auch durch die Vielzahl an Praxispartnern belegt, die durch ihre Teilnahme am Forschungsprojekt aktiv mitgewirkt haben und an mehreren Tagen Datenerhebungen in ihren Lagern ermöglichten.

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 und andererseits den Unternehmen neue Denkanstöße zu geben, um körperliche Belastungen in den Lagern zu reduzieren, ohne dabei an Wirtschaftlichkeit zu verlieren. 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.

Alle Publikationen im Rahmen des Projekts können unter www.lageroptimierung-tu-darmstadt.de eingesehen werden.

8.1. Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit

Maßnahme	Ziel	Datum
Veröffentlichung des Forschungsvorhabens/ der Projektbeschreibung auf den Webseiten der beteiligten Fachgebiete	Informationen von Unternehmen und sonstigen Interessenten über das Projekt mit dem Ziel ggf. weitere Praxispartner zu gewinnen	seit 10/2020
Kickoff mit den Unternehmen des Projektbegleitenden Ausschusses (1. Treffen des PA)	Abstimmung und Informationen der Unternehmen über die Projektziele sowie die Koordination des weiteren Vorgehens	27.10.2020
Workshop zur Auswahl arbeitswissenschaftlicher Methoden	Nutzenwertanalyse verschiedener Screening-Methoden zur Identifikation passender Verfahren zur Entwicklung der Ergonomie-Kennzahlen	12.11.2020
Workshop zu technischen Hilfsmitteln	Abstimmung mit drei Unternehmen des PA über mögliche und geeignete technische Hilfsmittel	02.03.2021
Einbindung in die Lehre an der TU Darmstadt	Vermittlung der Forschungsergebnisse an Studierende der beiden Fachgebiete	seit 04/2021
2. Treffen des PA	Abstimmung und Information der Unternehmen über die Projektergebnisse sowie Validierung der Ergebnisse	10.06.2021
Veröffentlichung eines Ansatzes zur Berücksichtigung von Ergonomie in der Kommissionierung in „Zeitschrift für Arbeitswissenschaft“	Information von Wissenschaftlern und potenziellen Multiplikatoren in praxisnaher Zeitschrift über die Projektergebnisse.	29.07.2021

Präsentation des ergonomischen Klassifikationssystems und der Ergonomie-Kennzahlen auf der internationalen wissenschaftlichen Konferenz AHFE 2022	Austausch und Diskussion mit der wissenschaftlichen Fachgemeinschaft. Information von Unternehmen und potenziellen Multiplikatoren über die Projektergebnisse.	28.07.2022
Vortrag beim RKW „Materialfluss und Logistik“ zum Thema Ergonomie in der Kommissionierung	Information von Unternehmen und potenziellen Multiplikatoren über die Projektergebnisse	12.01.2022
3. Treffen des PA	Abstimmung und Information der Unternehmen über die Projektergebnisse sowie Validierung der Ergebnisse – insbesondere bzgl. der Ergonomie-Kennzahlen	28.01.2022
Workshop mit Vertretern von VDI-Arbeitsgruppen	Validierung der Projektergebnisse und Absprache der Möglichkeit der Aufnahme in Normen	17.02.2022 & 06.07.2022
Brown Bag Seminar an der TU Darmstadt	Information von Wissenschaftlern, Studenten und potenziellen Multiplikatoren über die Projektergebnisse	01.04.2022
Veröffentlichung von Projektnews und Ergebnissen auf einer eigens dafür angelegten Projekt-Webseite mit Download-Möglichkeit: www.lageroptimierung-tu-darmstadt.de	Zugang für Interessierte zu Neuigkeiten der Projektbearbeitung	seit 04/2022
Dissertation von Tim Steinebach (Wissenschaftlicher Mitarbeiter der FS 2)	„Analyse des Einflusses einer ergonomischen Lagerplatzvergabe auf die Beanspruchung und die menschliche Leistung in der manuellen Kommissionierung“	27.04.2022
4. Treffen des PA	Abstimmung und Information der Unternehmen über die finalen Projektergebnisse sowie Validierung der Ergebnisse	12.07.2022
Mitarbeit in einem VDI-Ausschuss zur Erstellung eines „Praxisleitfadens für ergonomische Arbeitsplätze in der Logistik“	Einbringung der Projektergebnisse in ein vom VDI veröffentlichtes Whitepaper zur Unterstützung der praktischen Umsetzung der VDI 3657	Seit 06/2022 Veröffentlichung: 01/2023
Veröffentlichung von Handlungsempfehlungen in „Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb“	Information von Unternehmen und potenziellen Multiplikatoren in praxisnaher Zeitschrift über die Projektergebnisse.	Eingereicht: 29.10.2022

8.2. Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit

Maßnahme	Ziel	Datum
Veröffentlichung eines Artikels zur praktischen Anwendung der entwickelten Ergonomie-Kennzahlen in einer praxisnahen Fachzeitschrift	Einbringung der Projektergebnisse in die betriebliche Praxis	Geplant: 12/2022
Präsentation der Projektergebnisse auf Fachtagungen, wie z. B. dem Darmstädter Logistics Summit; Deutscher Logistik-Kongress	Information der Unternehmen über die Projektergebnisse	Geplant: 06/2023
Veröffentlichung von Fachaufsätzen in internationalen wissenschaftlichen Fachzeitschriften, wie z. B. dem IJPE oder dem IJIE	Information der Fachcommunity und Beitrag zur Erweiterung des Forschungsstandes	Geplant: 06/2023

9. Zusammenfassung und Schlussbetrachtung

Im Fokus dieses Projekts stand die Entwicklung von ganzheitlichen Planungskonzepten für die manuelle Lagerlogistik insbesondere der Kommissionierung. Ganzheitlich meint dabei, dass sowohl (klassische) Kostengrößen als auch ergonomische Faktoren, die einen Einfluss auf die physische Belastung der Mitarbeiter haben, in die Betrachtung einfließen. Die Bedeutung und Notwendigkeit ganzheitlicher Betrachtungen wurde mittels Literaturüberblick verdeutlicht.

Zu Beginn des Projekts wurde eine Ist-Analyse der Lagersysteme verschiedener Unternehmen durchgeführt, um daraus generalisierte Lagerhaltungsszenarien, Optimierungspotenziale und (ergonomisch) relevante Vorgänge abzuleiten. Auf Basis von Datenerhebungen im praktischen Betrieb und unter Verwendung etablierter arbeitswissenschaftlicher Methoden wurden im Anschluss ergonomische Kennzahlen entwickelt, die es ermöglichen, physische Belastung in der Kommissionierung zu quantifizieren. Gegenüber bisherigen Bewertungsverfahren zeichnen sich die neu entwickelten Kennzahlen durch einen guten Kompromiss zwischen Genauigkeit, Spezifität und Anwenderfreundlichkeit aus, die sie für den Einsatz in mathematischen Modellen und in der praktischen Anwendung geeignet machen. Innerhalb des vorliegenden Projekts wurden die Kennzahlen zur Formulierung ganzheitlicher Optimierungsmodelle und zugehöriger Lösungsverfahren genutzt. Die entwickelten Optimierungsmodelle und Lösungsverfahren bieten Unternehmen eine Möglichkeit, Lagerprozesse zu optimieren. Ihre Nutzung setzt jedoch eine entsprechende Fachkenntnis voraus. Um Unternehmen daher eine einfachere Alternative zu bieten, wurde mittels der Optimierungsmodelle und Lösungsverfahren und unter Verwendung der eingangs erhobenen Daten eine numerische Studie durchgeführt, um allgemeine Erkenntnisse zu gewinnen. Darauf aufbauend und unter Hinzunahme weiterer Aspekte (wie z. B. anthropometrischen Daten) wurden diverse Handlungsempfehlungen für die praktische Anwendung abgeleitet.

Die fachliche Qualität des interdisziplinären Projekts wurde durch intensive Zusammenarbeit der beiden am Projekt beteiligten Forschungsstellen, die in ihren jeweiligen Verantwortungsbereichen über einschlägige Expertise verfügen, gefördert. Der produktive und bereichernde Austausch zwischen Wissenschaft und Praxis wurde über diverse Interviews, Workshops und Projektsitzungen unter Beteiligung der wirtschaftlichen und wissenschaftlichen Mitglieder des Projektbegleitenden Ausschusses sichergestellt. Durch die Veröffentlichung der Ergebnisse in wissenschaftlichen und praxisnahen Fachzeitschriften, der Präsentation von Ergebnissen in nationalen und internationalen Konferenzvorträgen sowie durch die online zugänglichen zentralen Ergebnisse wurde und wird einem umfangreichen Transfer der Ergebnisse in Wirtschaft und Wissenschaft Rechnung getragen. Besonders hervorzuheben ist hierbei, dass die im Rahmen des Projekts gewonnenen Erkenntnisse und Expertise in die zum Zeitpunkt des Projektabschlusses stattfindende Erstellung eines Whitepapers zur Unterstützung von Praktikern bei Umsetzung der VDI Norm 3657 einfließen.

Anhang 2: Zielerfüllungsgrade

Zielerfüllungsgrad					
Nr.	0	0,25	0,5	0,75	1
Anforderung 1	nein				ja
Anforderung 2	sehr hoher Schulungsaufwand (> 5 Tage), nur für Wissenschaftler	hoher Schulungsaufwand (> 3 Tage); nur für Ergonomie-Experten	mittlerer Schulungsaufwand, auch für Praktiker mit Ergonomie-Kenntnissen	geringer Schulungsaufwand; durch Selbststudium durchführbar	kein Schulungsaufwand notwendig
Anforderung 3	Eingabedaten sind so speziell, dass sie i. d. R. nicht vorhanden sind		Eingabedaten können z.B. durch Messungen oder durch Warehouse-Management-Systeme erhoben werden		Eingabedaten sind für dieses Screening-Verfahren problemlos durch Beobachtung zu erhalten
Anforderung 4	nein				ja
Anforderung 5	Es ist lediglich eine sehr spezifische Tätigkeit abbildbar (keine Bewertung variabler Tätigkeiten möglich)		Leicht abweichende Tätigkeiten (z. B. zu handhabende Gewichte bzw. Körperhaltungen) sind		Viele verschiedene Tätigkeiten und variiierende Eingangsgrößen (z.B. Lastgewichte) sind mit dem Tool abbildbar
Anforderung 6	nein				ja
Anforderung 7	Das Bewertungskategorien des Tools sind sehr grob (z.B. bei Lastgewichten und Körperhaltungen)		Die Bewertungskategorien des Tools sind von mittlerer Granularität		Die Bewertungskategorien des Tools sind von sehr hoher Granularität (z.B. können Lastgewichte exakt angegeben werden)
Anforderung 8	Maßnahmen können nicht abgeleitet werden		Maßnahmen können nur bedingt oder mit viel Zusatzaufwand abgeleitet werden		Maßnahmen können aus den Ergebnissen direkt abgeleitet werden

Anhang 3: Steckbriefe der Lagerhaltungsszenarien

Steckbrief – „Palettenlager“:

1. Aufbau:
 - a. Layout: Ein-/Mehr-Block-Layout
 - b. Lagerplätze: Paletten in Regalen und auf Bodenstellplätzen
 - c. Regalhöhe: 5 - 10 m / 3 - 6 Ebenen
 - d. Ganglänge: 10 - 30 m
 - e. Gangbreite: 2,7 – 4 m
2. Artikellagerung:
 - a. Lagerplatzvergabe: Teilweise dedizierte (Festplatz-), teilweise chaotische Lagerung; mehrere gleichzeitige Lagerplätze pro Artikel sind möglich; teilweise werden die oberen Regalplätze als Nachschublager benutzt, teilweise zum Kommissionieren
 - b. Lagerung: Lagerung auf Paletten; pro Artikel können mehrere Paletten vorhanden sein
3. Routing und Kommissionierablauf:
 - a. Routing: keine Vorgabe/ Stichgang- / Schleifengang- / optimierte Strategie
 - b. Artikel pro Tour: 1 – 30
 - c. Picking: Artikel auf Bodenebene werden direkt entnommen; Artikel in höheren Regalebenen müssen mit der gelagerten Palette zugänglich gemacht werden (Gabelstapler, Hochhubwagen, Vertikalkommissionierer); Picking kompletter Paletten möglich
4. Technische Hilfsmittel:
 - a. Transportmittel: Gabelstapler, (Hoch)Hubwagen, Kommissionierwagen, Vertikalkommissionierer
 - b. Kommissionier-Technik: Barcodescanner, Papierlisten
 - c. Ergonomische Hilfsmittel: meistens keine
5. Auftragsbündelung/-zerteilung
 - a. Bündelung: teilweise werden mehrere Kundenaufträge gleichzeitig kommissioniert; teilweise entsprechen die Kommissionieraufträgen 1:1 den Kundenaufträgen
 - b. Zerteilung: teilweise werden die Kundenaufträge nach räumlichen Kriterien zerteilt; teilweise entsprechen die Kommissionieraufträgen 1:1 den Kundenaufträgen
6. Gewichte und Bedarfe der Artikel:
 - a. Artikelgewichte: 0 - 1 kg: 30 %; 1 - 5 kg: 50 %; 5 - 10 kg: 10 %; 10 - 15 kg: 5 %; 15 – 50 kg: 5 %
 - b. Artikelbedarfsverteilung: 20/80- bis 20/40-Pareto-Verteilung
 - c. Anzahl an Artikeln: 200 – 10.000

Steckbrief – „Fachboden-/Kleinteilelager“:

1. Aufbau:
 - a. Layout: Ein-/Mehr-Block-Layout
 - b. Lagerplätze: Gebündelte Artikel (lose Bündel, Kartons, Boxen etc.) in Fachbodenregalen
 - c. Regalhöhe: 1,7 – 2,1 m / 4 - 8 Ebenen
 - d. Ganglänge: 5 - 20 m
 - e. Gangbreite: 0,9 – 3,3 m

2. Artikellagerung:
 - a. Lagerplatzvergabe: meistens dediziert (Festplatz-)Lagerung;
 - b. Lagerung: Lagerung in Bündeln (lose Bündel, Kartons, Boxen etc.)
3. Routing und Kommissionierablauf:
 - a. Routing: keine Vorgabe/ Stichgang- / Schleifengang- / optimierte Strategie
 - b. Artikel pro Tour: 1 – 30
 - c. Picking: Artikel werden direkt von den Lagerplätzen entnommen
4. Technische Hilfsmittel:
 - a. Transportmittel: Hubwagen, Kommissionierwagen
 - b. Kommissioniertechnik: Barcodescanner, Papierlisten, Pick-by-Light, Pick-by-Voice
 - c. Ergonomische Hilfsmittel: meistens keine
5. Auftragsbündelung/-zerteilung
 - a. Bündelung: teilweise werden mehrere Kundenaufträge gleichzeitig kommissioniert; teilweise entsprechen die Kommissionieraufträgen 1:1 den Kundenaufträgen
 - b. Zerteilung: teilweise werden die Kundenaufträge nach räumlichen Kriterien zerteilt; teilweise entsprechen die Kommissionieraufträgen 1:1 den Kundenaufträgen
6. Gewichte und Bedarfe der Artikel:
 - a. Artikelgewichte: 0 - 1 kg: 25 %; 1 - 5 kg: 25 %; 5 - 10 kg: 20 %; 10 - 15 kg: 10 %; 15 – 50 kg: 10 %
 - b. Artikelbedarfsverteilung: 20/80- bis 20/40-Pareto-Verteilung
 - c. Anzahl an Artikeln: 500 – 10.000

Steckbrief – „Stollenlager“:

1. Aufbau:
 - a. Layout: Ein-/Mehr-Block-Layout
 - b. Lagerplätze: Paletten in Regalen und auf Bodenstellplätzen
 - c. Regalhöhe: ca. 2 m / 2 Ebenen
 - d. Ganglänge: 5 - 20 m
 - e. Gangbreite: 2,7 – 4 m
2. Artikellagerung:
 - a. Lagerplatzvergabe: meistens dediziert (Festplatz-)Lagerung;
 - b. Lagerung: Lagerung auf Paletten
3. Routing und Kommissionierablauf:
 - a. Routing: keine Vorgabe/ Stichgang- / Schleifengang- / optimierte Strategie
 - b. Artikel pro Tour: 1 – 30
 - c. Picking: Artikel werden direkt von den Lagerplätzen entnommen
4. Technische Hilfsmittel:
 - a. Transportmittel: Hubwagen, Kommissionierwagen
 - b. Kommissioniertechnik: Barcodescanner, Papierlisten, Pick-by-Light, Pick-by-Voice
 - c. Ergonomische Hilfsmittel: meistens keine
5. Auftragsbündelung/-zerteilung
 - a. Bündelung: teilweise werden mehrere Kundenaufträge gleichzeitig kommissioniert; teilweise entsprechen die Kommissionieraufträgen 1:1 den Kundenaufträgen
 - b. Zerteilung: teilweise werden die Kundenaufträge nach räumlichen Kriterien zerteilt; teilweise entsprechen die Kommissionieraufträgen 1:1 den Kundenaufträgen
6. Gewichte und Bedarfe der Artikel:

- a. Artikelgewichte: 0 - 1 kg: 25 %; 1 - 5 kg: 25 %; 5 - 10 kg: 20 %; 10 - 15 kg: 10 %;
15 – 50 kg: 10 %
- b. Artikelbedarfsverteilung: 20/80- bis 20/40-Pareto-Verteilung
- c. Anzahl an Artikeln: 500 – 10.000

Anhang 4: Ergonomie-Kennzahlen in tabellarischer Form

Übersicht

- **Umsetzen von Artikeln aus Fachbodenregalen (Kleinteile):**
 - Einflussfaktoren:
 - Geschlecht (männlich/ weiblich)
 - Lastgewicht (0 kg – 30 kg)
 - Ein- bzw. Beidhändigkeit
 - Entnahmehöhe (20 cm – 180 cm)
 - Ablagehöhe (20 cm, 40 cm, 90 cm)

- **Umsetzen von freistehenden Paletten:**
 - Einflussfaktoren:
 - Geschlecht (männlich/ weiblich)
 - Lastgewicht (0 kg – 40 kg)
 - Ein- bzw. Beidhändigkeit
 - Maximale Ladehöhe der Palette (50 cm, 80 cm, 110 cm, 140 cm, 170 cm)
 - Standhöhe der Palette (0 cm, 50 cm, 80 cm)

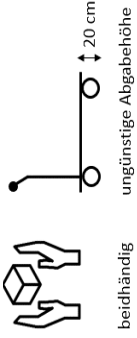
- **Umsetzen von längsgelagerten Paletten:**
 - Einflussfaktoren:
 - Geschlecht (männlich/ weiblich)
 - Lastgewicht (0 kg – 40 kg)
 - Maximale Ladehöhe der Palette (50 cm, 80 cm, 110 cm, 140 cm, 170 cm)
 - Standhöhe = Boden (0 cm)

- **Umsetzen von quergelagerten Paletten:**
 - Einflussfaktoren:
 - Geschlecht (männlich/ weiblich)
 - Lastgewicht (0 kg – 40 kg)
 - Maximale Ladehöhe der Palette (50 cm, 80 cm, 110 cm, 140 cm, 170 cm)
 - Standhöhe = Boden (0 cm)

- **Ziehen oder Schieben von Transportmitteln:**
 - Einflussfaktoren:
 - Geschlecht (männlich/ weiblich)
 - Lastgewicht (40 kg – 750 kg)
 - Art des Transportmittels (Karren, Transportwagen mit/ ohne Bockrollen)

In den Tabellen werden biomechanisch kritische Lastfälle, die bereits bei einmaliger Ausführung ein ergonomisches Risiko beinhalten, gelb hinterlegt.

Umsetzen aus Fachboden-/Kleinteilelagern



Entnahmehöhe	Lastgewicht [kg]																																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
20 cm	2,0	3,9	5,9	6,0	6,1	6,1	6,2	6,3	6,3	6,4	6,5	6,6	6,7	6,8	6,9	7,1	7,3	7,5	7,7	7,9	8,1	8,3	8,5	8,7	8,9	9,2	9,5	9,8	10,1	10,4	10,7	11,0	11,3	11,6	11,9	15,5	19,1	22,7	26,3	29,9
40 cm	1,8	3,6	5,4	5,5	5,5	5,6	5,7	5,7	5,8	5,9	6,0	6,1	6,2	6,3	6,4	6,6	6,8	7,0	7,2	7,4	7,6	7,8	8,0	8,2	8,4	8,7	9,0	9,3	9,6	9,9	10,2	10,5	10,8	11,1	11,4	15,0	18,6	22,2	25,8	29,4
60 cm	1,7	3,4	5,1	5,2	5,2	5,3	5,4	5,5	5,5	5,6	5,7	5,8	5,9	6,0	6,1	6,3	6,5	6,7	6,9	7,1	7,3	7,5	7,7	7,9	8,1	8,4	8,7	9,0	9,3	9,6	9,9	10,2	10,5	10,8	11,1	14,7	18,3	21,9	25,5	29,1
80 cm	1,5	3,0	4,6	4,7	4,8	4,8	4,9	5,0	5,1	5,2	5,3	5,4	5,5	5,6	5,8	6,0	6,2	6,4	6,6	6,8	7,0	7,2	7,4	7,6	7,9	8,2	8,5	8,8	9,1	9,4	9,7	10,0	10,3	10,6	14,2	17,8	21,4	25,0	28,6	
100 cm	1,3	2,7	4,0	4,1	4,2	4,2	4,3	4,4	4,4	4,5	4,6	4,7	4,8	4,9	5,0	5,2	5,4	5,6	5,8	6,0	6,2	6,4	6,6	6,8	7,0	7,3	7,6	7,9	8,2	8,5	8,8	9,1	9,4	9,7	10,0	13,6	17,2	20,8	24,4	28,0
120 cm	1,3	2,7	4,0	4,1	4,2	4,2	4,3	4,4	4,4	4,5	4,6	4,7	4,8	4,9	5,0	5,2	5,4	5,6	5,8	6,0	6,2	6,4	6,6	6,8	7,0	7,3	7,6	7,9	8,2	8,5	8,8	9,1	9,4	9,7	10,0	13,6	17,2	20,8	24,4	28,0
140 cm	1,5	3,0	4,5	4,6	4,7	4,8	4,8	4,9	5,0	5,1	5,2	5,3	5,4	5,5	5,7	5,9	6,1	6,3	6,5	6,7	6,9	7,1	7,3	7,5	7,8	8,1	8,4	8,7	9,0	9,3	9,6	9,9	10,2	10,5	14,1	17,7	21,3	24,9	28,5	
160 cm	1,7	3,3	5,0	5,1	5,2	5,2	5,3	5,4	5,5	5,5	5,6	5,7	5,8	5,9	6,0	6,2	6,4	6,6	6,8	7,0	7,2	7,4	7,6	7,8	8,0	8,3	8,6	8,9	9,2	9,5	9,8	10,1	10,4	10,7	11,0	14,6	18,2	21,8	25,4	29,0
180 cm	1,7	3,5	5,2	5,3	5,4	5,4	5,5	5,6	5,7	5,7	5,8	5,9	6,0	6,1	6,2	6,4	6,6	6,8	7,0	7,2	7,4	7,6	7,8	8,0	8,2	8,5	8,8	9,1	9,4	9,7	10,0	10,3	10,6	10,9	11,2	14,8	18,4	22,0	25,6	29,2

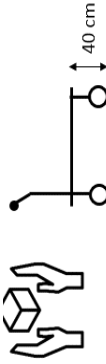
Mann

Entnahmehöhe	Lastgewicht [kg]																																						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30									
20 cm	2,0	4,1	6,1	6,2	6,4	6,7	6,9	7,2	7,6	7,9	8,4	8,9	9,4	9,9	10,4	10,7	11,0	11,3	11,6	11,9	15,5	19,1	22,7	26,3	29,9	nicht empfohlen, Lastgewicht zu hoch													
40 cm	1,9	3,7	5,6	5,7	5,9	6,1	6,4	6,7	7,1	7,4	7,9	8,4	8,9	9,4	9,9	10,2	10,5	10,8	11,1	11,4	15,0	18,6	22,2	25,8	29,4														
60 cm	1,8	3,5	5,3	5,4	5,6	5,9	6,1	6,4	6,8	7,1	7,6	8,1	8,6	9,1	9,6	9,9	10,2	10,5	10,8	11,1	14,7	18,3	21,9	25,5	29,1														
80 cm	1,6	3,2	4,7	4,9	5,1	5,3	5,6	5,9	6,2	6,6	7,1	7,6	8,1	8,6	9,1	9,4	9,7	10,0	10,3	10,6	14,2	17,8	21,4	25,0	28,6														
100 cm	1,4	2,8	4,2	4,4	4,5	4,8	5,0	5,4	5,7	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	8,8	9,1	9,4	9,7	10,0	13,6	17,2	20,8	24,4	28,0														
120 cm	1,4	2,8	4,2	4,3	4,5	4,8	5,0	5,3	5,7	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	8,8	9,1	9,4	9,7	10,0	13,6	17,2	20,8	24,4	28,0														
140 cm	1,6	3,1	4,7	4,9	5,0	5,3	5,5	5,9	6,2	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,3	9,6	9,9	10,2	10,5	14,1	17,7	21,3	24,9	28,5														
160 cm	1,7	3,5	5,2	5,4	5,5	5,8	6,0	6,4	6,7	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	9,8	10,1	10,4	10,7	11,0	14,6	18,2	21,8	25,4	29,0														
180 cm	1,8	3,6	5,4	5,6	5,7	6,0	6,2	6,6	6,9	7,2	7,7	8,2	8,7	9,2	9,7	10,0	10,3	10,6	10,9	11,2	14,8	18,4	22,0	25,6	29,2														

Frau

Annahmen: beidhändig; Abgabe auf "Kommissionierwagen" auf ungünstiger Höhe (20 cm); geringe Entnahmetiefe (< 40 cm)

Umsetzen aus Fachboden-/Kleinteilelagern



beidhändig ungünstige Abgabehöhe

Entnahmehöhe	Lastgewicht [kg]																																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
20 cm	1,8	3,6	5,4	5,5	5,5	5,6	5,7	5,8	5,9	6,0	6,1	6,2	6,3	6,4	6,6	6,8	7,0	7,2	7,4	7,6	7,8	8,0	8,2	8,4	8,7	9,0	9,3	9,6	9,9	10,2	10,5	10,8	11,1	11,4	15,0	18,6	22,2	25,8	29,4	
40 cm	1,6	3,2	4,9	4,9	5,0	5,1	5,1	5,2	5,3	5,4	5,5	5,6	5,7	5,8	5,9	6,1	6,3	6,5	6,7	6,9	7,1	7,3	7,5	7,7	7,9	8,2	8,5	8,8	9,1	9,4	9,7	10,0	10,3	10,6	10,9	14,5	18,1	21,7	25,3	28,9
60 cm	1,5	3,1	4,6	4,6	4,7	4,8	4,9	4,9	5,0	5,1	5,2	5,3	5,4	5,5	5,6	5,8	6,0	6,2	6,4	6,6	6,8	7,0	7,2	7,4	7,6	7,9	8,2	8,5	8,8	9,1	9,4	9,7	10,0	10,3	10,6	14,2	17,8	21,4	25,0	28,6
80 cm	1,3	2,7	4,0	4,1	4,2	4,2	4,3	4,4	4,5	4,5	4,6	4,7	4,8	4,9	5,0	5,2	5,4	5,6	5,8	6,0	6,2	6,4	6,6	6,8	7,0	7,3	7,6	7,9	8,2	8,5	8,8	9,1	9,4	9,7	10,0	13,6	17,2	20,8	24,4	28,0
100 cm	1,2	2,3	3,5	3,6	3,6	3,7	3,8	3,8	3,9	4,0	4,1	4,2	4,3	4,4	4,5	4,7	4,9	5,1	5,3	5,5	5,7	5,9	6,1	6,3	6,5	6,8	7,1	7,4	7,7	8,0	8,3	8,6	8,9	9,2	9,5	13,1	16,7	20,3	23,9	27,5
120 cm	1,2	2,3	3,5	3,6	3,6	3,7	3,8	3,8	3,9	4,0	4,1	4,2	4,3	4,4	4,5	4,7	4,9	5,1	5,3	5,5	5,7	5,9	6,1	6,3	6,5	6,8	7,1	7,4	7,7	8,0	8,3	8,6	8,9	9,2	9,5	13,1	16,7	20,3	23,9	27,5
140 cm	1,3	2,7	4,0	4,1	4,2	4,2	4,3	4,4	4,5	4,5	4,6	4,7	4,8	4,9	5,0	5,2	5,4	5,6	5,8	6,0	6,2	6,4	6,6	6,8	7,0	7,3	7,6	7,9	8,2	8,5	8,8	9,1	9,4	9,7	10,0	13,6	17,2	20,8	24,4	28,0
160 cm	1,5	3,0	4,5	4,6	4,6	4,7	4,8	4,9	4,9	5,0	5,1	5,2	5,3	5,4	5,5	5,7	5,9	6,1	6,3	6,5	6,7	6,9	7,1	7,3	7,5	7,8	8,1	8,4	8,7	9,0	9,3	9,6	9,9	10,2	10,5	14,1	17,7	21,3	24,9	28,5
180 cm	1,6	3,1	4,7	4,8	4,8	4,9	5,0	5,1	5,1	5,2	5,3	5,4	5,5	5,6	5,7	5,9	6,1	6,3	6,5	6,7	6,9	7,1	7,3	7,5	7,7	8,0	8,3	8,6	8,9	9,2	9,5	9,8	10,1	10,4	10,7	14,3	17,9	21,5	25,1	28,7

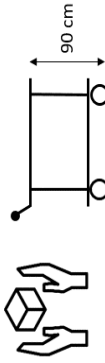
Mann

Entnahmehöhe	Lastgewicht [kg]																																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30							
20 cm	1,9	3,7	5,6	5,7	5,9	6,1	6,4	6,7	7,1	7,4	7,9	8,4	8,9	9,4	9,9	10,2	10,5	10,8	11,1	11,4	15,0	18,6	22,2	25,8	29,4	nicht empfohlen, Lastgewicht zu hoch											
40 cm	1,7	3,3	5,0	5,2	5,4	5,6	5,9	6,2	6,5	6,9	7,4	7,9	8,4	8,9	9,4	9,7	10,0	10,3	10,6	10,9	14,5	18,1	21,7	25,3	28,9												
60 cm	1,6	3,2	4,7	4,9	5,1	5,3	5,6	5,9	6,2	6,6	7,1	7,6	8,1	8,6	9,1	9,4	9,7	10,0	10,3	10,6	14,2	17,8	21,4	25,0	28,6												
80 cm	1,4	2,8	4,2	4,4	4,5	4,8	5,0	5,4	5,7	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	8,8	9,1	9,4	9,7	10,0	13,6	17,2	20,8	24,4	28,0												
100 cm	1,2	2,4	3,7	3,8	4,0	4,2	4,5	4,8	5,2	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,3	8,6	8,9	9,2	9,5	13,1	16,7	20,3	23,9	27,5												
120 cm	1,2	2,4	3,7	3,8	4,0	4,2	4,5	4,8	5,2	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,3	8,6	8,9	9,2	9,5	13,1	16,7	20,3	23,9	27,5												
140 cm	1,4	2,8	4,2	4,4	4,5	4,8	5,0	5,4	5,7	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	8,8	9,1	9,4	9,7	10,0	13,6	17,2	20,8	24,4	28,0												
160 cm	1,6	3,1	4,7	4,8	5,0	5,2	5,5	5,8	6,2	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,3	9,6	9,9	10,2	10,5	14,1	17,7	21,3	24,9	28,5												
180 cm	1,6	3,2	4,9	5,0	5,2	5,5	5,7	6,0	6,4	6,7	7,2	7,7	8,2	8,7	9,2	9,5	9,8	10,1	10,4	10,7	14,3	17,9	21,5	25,1	28,7												

Frau

Annahmen: beidhändig; Abgabe auf "Kommissionierwagen" auf ungünstiger Höhe (40 cm); geringe Entnahmetiefe (< 40 cm)

Umsetzen aus Fachboden-/Kleinteilelagern



beidhändig

günstige Abgabehöhe

Entnahmehöhe	Lastgewicht [kg]																																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
20 cm	1,3	2,6	4,0	4,0	4,1	4,2	4,2	4,3	4,4	4,5	4,6	4,7	4,8	4,9	5,0	5,2	5,4	5,6	5,8	6,0	6,2	6,4	6,6	6,8	7,0	7,3	7,6	7,9	8,2	8,5	8,8	9,1	9,4	9,7	10,0	13,6	17,2	20,8	24,4	28,0
40 cm	1,1	2,3	3,4	3,5	3,6	3,6	3,7	3,8	3,9	3,9	4,0	4,1	4,2	4,3	4,4	4,6	4,8	5,0	5,2	5,4	5,6	5,8	6,0	6,2	6,4	6,7	7,0	7,3	7,6	7,9	8,2	8,5	8,8	9,1	9,4	13,0	16,6	20,2	23,8	27,4
60 cm	1,1	2,1	3,2	3,3	3,4	3,4	3,5	3,6	3,7	3,8	3,9	4,0	4,1	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0	5,2	5,4	5,6	5,8	6,0	6,2	6,5	6,8	7,1	7,4	7,7	8,0	8,3	8,6	8,9	9,2	12,8	16,4	20,0	23,6	27,2	
80 cm	0,9	1,7	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0	3,0	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5	3,6	3,8	4,0	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0	5,2	5,4	5,6	5,9	6,2	6,5	6,8	7,1	7,4	7,7	8,0	8,3	8,6	12,2	15,8	19,4	23,0	26,6	
100 cm	0,7	1,4	2,1	2,1	2,2	2,3	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0	3,1	3,3	3,5	3,7	3,9	4,1	4,3	4,5	4,7	4,9	5,1	5,4	5,7	6,0	6,3	6,6	6,9	7,2	7,5	7,8	8,1	11,7	15,3	18,9	22,5	26,1
120 cm	0,7	1,4	2,1	2,1	2,2	2,3	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0	3,1	3,3	3,5	3,7	3,9	4,1	4,3	4,5	4,7	4,9	5,1	5,4	5,7	6,0	6,3	6,6	6,9	7,2	7,5	7,8	8,1	11,7	15,3	18,9	22,5	26,1
140 cm	0,9	1,7	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0	3,0	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5	3,6	3,8	4,0	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0	5,2	5,4	5,6	5,9	6,2	6,5	6,8	7,1	7,4	7,7	8,0	8,3	8,6	12,2	15,8	19,4	23,0	26,6	
160 cm	1,0	2,0	3,1	3,1	3,2	3,3	3,4	3,4	3,5	3,6	3,7	3,8	3,9	4,0	4,1	4,3	4,5	4,7	4,9	5,1	5,3	5,5	5,7	5,9	6,1	6,4	6,7	7,0	7,3	7,6	7,9	8,2	8,5	8,8	9,1	12,7	16,3	19,9	23,5	27,1
180 cm	1,1	2,2	3,3	3,3	3,4	3,5	3,6	3,6	3,7	3,8	3,9	4,0	4,1	4,2	4,3	4,5	4,7	4,9	5,1	5,3	5,5	5,7	5,9	6,1	6,3	6,6	6,9	7,2	7,5	7,8	8,1	8,4	8,7	9,0	9,3	12,9	16,5	20,1	23,7	27,3

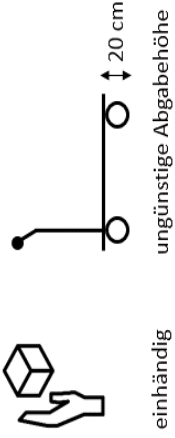
Mann

Entnahmehöhe	Lastgewicht [kg]																																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30							
20 cm	1,4	2,7	4,1	4,3	4,5	4,7	5,0	5,3	5,6	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	8,8	9,1	9,4	9,7	10,0	13,6	17,2	20,8	24,4	28,0	nicht empfohlen, Lastgewicht zu hoch											
40 cm	1,2	2,4	3,6	3,8	3,9	4,2	4,4	4,8	5,1	5,4	5,9	6,4	6,9	7,4	7,9	8,2	8,5	8,8	9,1	9,4	13,0	16,6	20,2	23,8	27,4												
60 cm	1,1	2,2	3,3	3,5	3,7	3,9	4,2	4,5	4,8	5,2	5,7	6,2	6,7	7,2	7,7	8,0	8,3	8,6	8,9	9,2	12,8	16,4	20,0	23,6	27,2												
80 cm	0,9	1,8	2,8	2,9	3,1	3,4	3,6	3,9	4,3	4,6	5,1	5,6	6,1	6,6	7,1	7,4	7,7	8,0	8,3	8,6	12,2	15,8	19,4	23,0	26,6												
100 cm	0,7	1,5	2,2	2,4	2,6	2,8	3,1	3,4	3,7	4,1	4,6	5,1	5,6	6,1	6,6	6,9	7,2	7,5	7,8	8,1	11,7	15,3	18,9	22,5	26,1												
120 cm	0,7	1,5	2,2	2,4	2,6	2,8	3,1	3,4	3,7	4,1	4,6	5,1	5,6	6,1	6,6	6,9	7,2	7,5	7,8	8,1	11,7	15,3	18,9	22,5	26,1												
140 cm	0,9	1,8	2,8	2,9	3,1	3,3	3,6	3,9	4,3	4,6	5,1	5,6	6,1	6,6	7,1	7,4	7,7	8,0	8,3	8,6	12,2	15,8	19,4	23,0	26,6												
160 cm	1,1	2,2	3,2	3,4	3,6	3,8	4,1	4,4	4,7	5,1	5,6	6,1	6,6	7,1	7,6	7,9	8,2	8,5	8,8	9,1	12,7	16,3	19,9	23,5	27,1												
180 cm	1,1	2,3	3,4	3,6	3,8	4,0	4,3	4,6	4,9	5,3	5,8	6,3	6,8	7,3	7,8	8,1	8,4	8,7	9,0	9,3	12,9	16,5	20,1	23,7	27,3												

Frau

Annahmen: beidhändig; Abgabe auf "Kommissionierwagen" auf günstiger Höhe (90 cm); geringe Entnahmetiefe (< 40 cm)

Umsetzen aus Fachboden-/Kleinteilelagern



einhändig ungünstige Abgabehöhe

Entnahmehöhe	Lastgewicht [kg]																															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30		
20 cm	2,0	4,0	6,1	6,2	6,3	6,4	6,6	6,8	7,0	7,3	7,7	8,0	8,3	8,7	9,0	9,4	9,7	10,6	11,1	11,6	14,4	20,6	26,7									
40 cm	1,8	3,7	5,5	5,7	5,8	5,9	6,1	6,2	6,4	6,8	7,1	7,5	7,8	8,1	8,5	8,8	9,2	10,1	10,6	11,1	13,9	20,0	26,1									
60 cm	1,8	3,5	5,3	5,4	5,5	5,6	5,8	6,0	6,2	6,5	6,8	7,2	7,5	7,9	8,2	8,5	8,9	9,8	10,3	10,8	13,6	19,7	25,9									
80 cm	1,6	3,1	4,7	4,8	5,0	5,1	5,2	5,4	5,6	6,0	6,3	6,6	7,0	7,3	7,7	8,0	8,3	9,2	9,7	10,3	13,1	19,2	25,3									
100 cm	1,4	2,8	4,2	4,3	4,4	4,5	4,7	4,9	5,1	5,4	5,8	6,1	6,4	6,8	7,1	7,5	7,8	8,7	9,2	9,7	12,5	18,7	24,8									
120 cm	1,4	2,8	4,2	4,3	4,4	4,5	4,7	4,9	5,1	5,4	5,8	6,1	6,4	6,8	7,1	7,5	7,8	8,7	9,2	9,7	12,5	18,7	24,8									
140 cm	1,6	3,1	4,7	4,8	4,9	5,1	5,2	5,4	5,6	5,9	6,3	6,6	7,0	7,3	7,6	8,0	8,3	9,2	9,7	10,2	13,1	19,2	25,3									
160 cm	1,7	3,4	5,2	5,3	5,4	5,5	5,7	5,9	6,1	6,4	6,8	7,1	7,4	7,8	8,1	8,5	8,8	9,7	10,2	10,7	13,5	19,7	25,8									
180 cm	1,8	3,6	5,4	5,5	5,6	5,8	5,9	6,1	6,3	6,6	7,0	7,3	7,7	8,0	8,3	8,7	9,0	9,9	10,4	10,9	13,8	19,9	26,0									

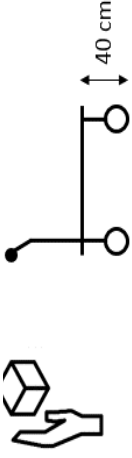
Mann

Entnahmehöhe	Lastgewicht [kg]																																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30			
20 cm	2,1	4,3	6,4	6,9	7,4	8,0	8,9	9,4	10,5	11,0	11,5	13,4	19,5	25,6																			
40 cm	2,0	3,9	5,9	6,3	6,9	7,5	8,3	8,9	10,0	10,5	11,0	12,8	18,9	25,1																			
60 cm	1,9	3,8	5,6	6,1	6,6	7,2	8,1	8,6	9,7	10,2	10,7	12,5	18,7	24,8																			
80 cm	1,7	3,4	5,1	5,5	6,1	6,7	7,5	8,1	9,1	9,7	10,2	12,0	18,1	24,2																			
100 cm	1,5	3,0	4,5	5,0	5,5	6,1	7,0	7,6	8,6	9,1	9,6	11,5	17,6	23,7																			
120 cm	1,5	3,0	4,5	5,0	5,5	6,1	7,0	7,5	8,6	9,1	9,6	11,5	17,6	23,7																			
140 cm	1,7	3,4	5,1	5,5	6,0	6,6	7,5	8,1	9,1	9,6	10,2	12,0	18,1	24,2																			
160 cm	1,8	3,7	5,5	6,0	6,5	7,1	8,0	8,6	9,6	10,1	10,6	12,5	18,6	24,7																			
180 cm	1,9	3,8	5,8	6,2	6,7	7,3	8,2	8,8	9,8	10,3	10,8	12,7	18,8	24,9																			

Frau

Annahmen: einhändig; Abgabe auf "Kommissionierwagen" auf ungünstiger Höhe (20 cm); geringe Entnahmetiefe (< 40 cm)

Umsetzen aus Fachboden-/Kleinteilelagern



einhändig ungünstige Abgabehöhe

Entnahmehöhe	Lastgewicht [kg]																														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
20 cm	2,0	4,0	6,1	6,2	6,3	6,4	6,6	6,8	7,0	7,3	7,7	8,0	8,3	8,7	9,0	9,4	9,7	10,6	11,1	11,6	14,4	20,6	26,7								
40 cm	1,8	3,7	5,5	5,7	5,8	5,9	6,1	6,2	6,4	6,8	7,1	7,5	7,8	8,1	8,5	8,8	9,2	10,1	10,6	11,1	13,9	20,0	26,1								
60 cm	1,8	3,5	5,3	5,4	5,5	5,6	5,8	6,0	6,2	6,5	6,8	7,2	7,5	7,9	8,2	8,5	8,9	9,8	10,3	10,8	13,6	19,7	25,9								
80 cm	1,6	3,1	4,7	4,8	5,0	5,1	5,2	5,4	5,6	6,0	6,3	6,6	7,0	7,3	7,7	8,0	8,3	9,2	9,7	10,3	13,1	19,2	25,3								
100 cm	1,4	2,8	4,2	4,3	4,4	4,5	4,7	4,9	5,1	5,4	5,8	6,1	6,4	6,8	7,1	7,5	7,8	8,7	9,2	9,7	12,5	18,7	24,8								
120 cm	1,4	2,8	4,2	4,3	4,4	4,5	4,7	4,9	5,1	5,4	5,8	6,1	6,4	6,8	7,1	7,5	7,8	8,7	9,2	9,7	12,5	18,7	24,8								
140 cm	1,6	3,1	4,7	4,8	4,9	5,1	5,2	5,4	5,6	5,9	6,3	6,6	7,0	7,3	7,6	8,0	8,3	9,2	9,7	10,2	13,1	19,2	25,3								
160 cm	1,7	3,4	5,2	5,3	5,4	5,5	5,7	5,9	6,1	6,4	6,8	7,1	7,4	7,8	8,1	8,5	8,8	9,7	10,2	10,7	13,5	19,7	25,8								
180 cm	1,8	3,6	5,4	5,5	5,6	5,8	5,9	6,1	6,3	6,6	7,0	7,3	7,7	8,0	8,3	8,7	9,0	9,9	10,4	10,9	13,8	19,9	26,0								

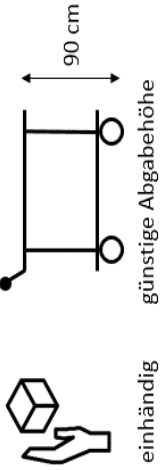
Mann

Entnahmehöhe	Lastgewicht [kg]																														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
20 cm	2,1	4,3	6,4	6,9	7,4	8,0	8,9	9,4	10,5	11,0	11,5	13,4	19,5	25,6																	
40 cm	2,0	3,9	5,9	6,3	6,9	7,5	8,3	8,9	10,0	10,5	11,0	12,8	18,9	25,1																	
60 cm	1,9	3,8	5,6	6,1	6,6	7,2	8,1	8,6	9,7	10,2	10,7	12,5	18,7	24,8																	
80 cm	1,7	3,4	5,1	5,5	6,1	6,7	7,5	8,1	9,1	9,7	10,2	12,0	18,1	24,2																	
100 cm	1,5	3,0	4,5	5,0	5,5	6,1	7,0	7,6	8,6	9,1	9,6	11,5	17,6	23,7																	
120 cm	1,5	3,0	4,5	5,0	5,5	6,1	7,0	7,5	8,6	9,1	9,6	11,5	17,6	23,7																	
140 cm	1,7	3,4	5,1	5,5	6,0	6,6	7,5	8,1	9,1	9,6	10,2	12,0	18,1	24,2																	
160 cm	1,8	3,7	5,5	6,0	6,5	7,1	8,0	8,6	9,6	10,1	10,6	12,5	18,6	24,7																	
180 cm	1,9	3,8	5,8	6,2	6,7	7,3	8,2	8,8	9,8	10,3	10,8	12,7	18,8	24,9																	

Frau

Annahmen: einhändig; Abgabe auf "Kommissionierwagen" auf ungünstiger Höhe (40 cm); geringe Entnahmetiefe (< 40 cm)

Umsetzen aus Fachboden-/Kleinteilelagern



Entnahmehöhe	Lastgewicht [kg]																														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
20 cm	1,4	2,7	4,1	4,2	4,3	4,5	4,6	4,8	5,0	5,4	5,7	6,0	6,4	6,7	7,1	7,4	7,7	8,6	9,1	9,7	12,5	18,6	24,7								
40 cm	1,2	2,4	3,6	3,7	3,8	3,9	4,1	4,3	4,5	4,8	5,2	5,5	5,8	6,2	6,5	6,9	7,2	8,1	8,6	9,1	11,9	18,1	24,2								
60 cm	1,1	2,2	3,3	3,4	3,5	3,7	3,8	4,0	4,2	4,6	4,9	5,2	5,6	5,9	6,3	6,6	6,9	7,8	8,3	8,9	11,7	17,8	23,9								
80 cm	0,9	1,8	2,8	2,9	3,0	3,1	3,3	3,5	3,7	4,0	4,3	4,7	5,0	5,4	5,7	6,0	6,4	7,3	7,8	8,3	11,1	17,2	23,4								
100 cm	0,7	1,5	2,2	2,3	2,5	2,6	2,8	2,9	3,1	3,5	3,8	4,1	4,5	4,8	5,2	5,5	5,8	6,7	7,3	7,8	10,6	16,7	22,8								
120 cm	0,7	1,5	2,2	2,3	2,5	2,6	2,7	2,9	3,1	3,5	3,8	4,1	4,5	4,8	5,2	5,5	5,8	6,7	7,2	7,8	10,6	16,7	22,8								
140 cm	0,9	1,8	2,7	2,9	3,0	3,1	3,3	3,5	3,7	4,0	4,3	4,7	5,0	5,4	5,7	6,0	6,4	7,3	7,8	8,3	11,1	17,2	23,4								
160 cm	1,1	2,1	3,2	3,3	3,5	3,6	3,8	3,9	4,1	4,5	4,8	5,1	5,5	5,8	6,2	6,5	6,8	7,7	8,3	8,8	11,6	17,7	23,8								
180 cm	1,1	2,3	3,4	3,5	3,7	3,8	4,0	4,1	4,3	4,7	5,0	5,4	5,7	6,0	6,4	6,7	7,1	8,0	8,5	9,0	11,8	17,9	24,0								

Mann

Entnahmehöhe	Lastgewicht [kg]																														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
20 cm	1,5	3,0	4,5	4,9	5,5	6,1	6,9	7,5	8,5	9,1	9,6	11,4	17,5	23,6																	
40 cm	1,3	2,6	4,0	4,4	4,9	5,5	6,4	7,0	8,0	8,5	9,0	10,9	17,0	23,1																	
60 cm	1,2	2,5	3,7	4,1	4,7	5,3	6,1	6,7	7,7	8,3	8,8	10,6	16,7	22,8																	
80 cm	1,0	2,1	3,1	3,6	4,1	4,7	5,6	6,1	7,2	7,7	8,2	10,0	16,2	22,3																	
100 cm	0,9	1,7	2,6	3,0	3,6	4,2	5,0	5,6	6,7	7,2	7,7	9,5	15,6	21,7																	
120 cm	0,9	1,7	2,6	3,0	3,6	4,2	5,0	5,6	6,6	7,2	7,7	9,5	15,6	21,7																	
140 cm	1,0	2,1	3,1	3,5	4,1	4,7	5,5	6,1	7,2	7,7	8,2	10,0	16,2	22,3																	
160 cm	1,2	2,4	3,6	4,0	4,6	5,2	6,0	6,6	7,7	8,2	8,7	10,5	16,6	22,7																	
180 cm	1,3	2,5	3,8	4,2	4,8	5,4	6,2	6,8	7,9	8,4	8,9	10,7	16,8	23,0																	

Frau

Annahmen: einhändig; Abgabe auf "Kommissionierwagen" auf günstiger Höhe (90 cm); geringe Entnahmetiefe (< 40 cm)

Umsetzen von freistehender Palette



beidhändig

Standhöhe = Boden

max. Ladehöhe	Lastgewicht [kg]																																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
50 cm	1,2	2,5	3,7	3,7	3,8	3,9	4,0	4,0	4,1	4,2	4,3	4,4	4,5	4,6	4,7	4,9	5,1	5,3	5,5	5,7	5,9	6,1	6,3	6,5	6,7	7,0	7,3	7,6	7,9	8,2	8,5	8,8	9,1	9,4	9,7	13,3	16,9	20,5	24,1	27,7
80 cm	1,1	2,2	3,4	3,4	3,5	3,6	3,6	3,7	3,8	3,9	4,0	4,1	4,2	4,3	4,4	4,6	4,8	5,0	5,2	5,4	5,6	5,8	6,0	6,2	6,4	6,7	7,0	7,3	7,6	7,9	8,2	8,5	8,8	9,1	9,4	13,0	16,6	20,2	23,8	27,4
110 cm	1,0	2,0	3,0	3,1	3,2	3,2	3,3	3,4	3,4	3,5	3,6	3,7	3,8	3,9	4,0	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0	5,2	5,4	5,6	5,8	6,0	6,3	6,6	6,9	7,2	7,5	7,8	8,1	8,4	8,7	9,0	12,6	16,2	19,8	23,4	27,0
140 cm	1,0	1,9	2,9	2,9	3,0	3,1	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5	3,6	3,7	3,8	3,9	4,1	4,3	4,5	4,7	4,9	5,1	5,3	5,5	5,7	5,9	6,2	6,5	6,8	7,1	7,4	7,7	8,0	8,3	8,6	8,9	12,5	16,1	19,7	23,3	26,9
170 cm	1,0	1,9	2,9	3,0	3,0	3,1	3,2	3,2	3,3	3,4	3,5	3,6	3,7	3,8	3,9	4,1	4,3	4,5	4,7	4,9	5,1	5,3	5,5	5,7	5,9	6,2	6,5	6,8	7,1	7,4	7,7	8,0	8,3	8,6	8,9	12,5	16,1	19,7	23,3	26,9

Mann

max. Ladehöhe	Lastgewicht [kg]																														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
50 cm	1,3	2,6	3,8	4,0	4,2	4,4	4,7	5,0	5,3	5,7	6,2	6,7	7,2	7,7	8,2	8,5	8,8	9,1	9,4	9,7	13,3	16,9	20,5	24,1	27,7	nicht empfohlen, Lastgewicht zu hoch					
80 cm	1,2	2,4	3,5	3,7	3,9	4,1	4,4	4,7	5,0	5,4	5,9	6,4	6,9	7,4	7,9	8,2	8,5	8,8	9,1	9,4	13,0	16,6	20,2	23,8	27,4						
110 cm	1,1	2,1	3,2	3,3	3,5	3,8	4,0	4,3	4,7	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	7,8	8,1	8,4	8,7	9,0	12,6	16,2	19,8	23,4	27,0						
140 cm	1,0	2,0	3,0	3,2	3,4	3,6	3,9	4,2	4,5	4,9	5,4	5,9	6,4	6,9	7,4	7,7	8,0	8,3	8,6	8,9	12,5	16,1	19,7	23,3	26,9						
170 cm	1,0	2,0	3,1	3,2	3,4	3,6	3,9	4,2	4,6	4,9	5,4	5,9	6,4	6,9	7,4	7,7	8,0	8,3	8,6	8,9	12,5	16,1	19,7	23,3	26,9						

Frau

Annahmen: Standhöhe = Boden; beidhändig; Körperhaltung bei der Abgabe auf den "Kommissionierwagen" ist optimal

Umsetzen von freistehender Palette



beidhändig

Standhöhe = 50 cm

max. Ladehöhe	Lastgewicht [kg]																																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
50 cm	0,8	1,7	2,5	2,6	2,7	2,7	2,8	2,9	3,0	3,0	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5	3,7	3,9	4,1	4,3	4,5	4,7	4,9	5,1	5,3	5,5	5,8	6,1	6,4	6,7	7,0	7,3	7,6	7,9	8,2	8,5	12,1	15,7	19,3	22,9	26,5
80 cm	0,8	1,6	2,4	2,4	2,5	2,6	2,7	2,7	2,8	2,9	3,0	3,1	3,2	3,3	3,4	3,6	3,8	4,0	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0	5,2	5,4	5,7	6,0	6,3	6,6	6,9	7,2	7,5	7,8	8,1	8,4	12,0	15,6	19,2	22,8	26,4
110 cm	0,8	1,7	2,5	2,6	2,7	2,7	2,8	2,9	2,9	3,0	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5	3,7	3,9	4,1	4,3	4,5	4,7	4,9	5,1	5,3	5,5	5,8	6,1	6,4	6,7	7,0	7,3	7,6	7,9	8,2	8,5	12,1	15,7	19,3	22,9	26,5

Mann

max. Ladehöhe	Lastgewicht [kg]																														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
50 cm	0,9	1,8	2,7	2,9	3,0	3,3	3,5	3,9	4,2	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,3	7,6	7,9	8,2	8,5	12,1	15,7	19,3	22,9	26,5	nicht empfohlen, Lastgewicht zu hoch					
80 cm	0,8	1,7	2,5	2,7	2,9	3,1	3,4	3,7	4,0	4,4	4,9	5,4	5,9	6,4	6,9	7,2	7,5	7,8	8,1	8,4	12,0	15,6	19,2	22,8	26,4						
110 cm	0,9	1,8	2,7	2,8	3,0	3,3	3,5	3,8	4,2	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,3	7,6	7,9	8,2	8,5	12,1	15,7	19,3	22,9	26,5						

Frau

Annahmen: Standhöhe = 50 cm; beidhändig; Körperhaltung bei der Abgabe auf den "Kommissionierwagen" ist optimal

Umsetzen von freistehender Palette



beidhändig

Standhöhe = 80 cm

		Lastgewicht [kg]																																							
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
max. Ladehöhe	50 cm	0,7	1,4	2,2	2,2	2,3	2,4	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0	3,1	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0	5,2	5,5	5,8	6,1	6,4	6,7	7,0	7,3	7,6	7,9	8,2	11,8	15,4	19,0	22,6	26,2
	80 cm	0,8	1,6	2,5	2,5	2,6	2,7	2,7	2,8	2,9	3,0	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5	3,7	3,9	4,1	4,3	4,5	4,7	4,9	5,1	5,3	5,5	5,8	6,1	6,4	6,7	7,0	7,3	7,6	7,9	8,2	8,5	12,1	15,7	19,3	22,9	26,5

Mann

		Lastgewicht [kg]																														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
max. Ladehöhe	50 cm	0,8	1,6	2,3	2,5	2,7	2,9	3,2	3,5	3,8	4,2	4,7	5,2	5,7	6,2	6,7	7,0	7,3	7,6	7,9	8,2	11,8	15,4	19,0	22,6	26,2	nicht empfohlen, Lastgewicht zu hoch					
	80 cm	0,9	1,7	2,6	2,8	3,0	3,2	3,5	3,8	4,1	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,3	7,6	7,9	8,2	8,5	12,1	15,7	19,3	22,9	26,5						

Frau

Annahmen: Standhöhe = 80 cm; beidhändig; Körperhaltung bei der Abgabe auf den "Kommissionierwagen" ist optimal

Umsetzen von freistehender Palette



einhändig



Standhöhe = Boden

max. Ladehöhe	Lastgewicht [kg]																																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30					
50 cm	1,3	2,6	3,8	3,9	4,1	4,2	4,4	4,5	4,7	5,1	5,4	5,8	6,1	6,4	6,8	7,1	7,5	8,4	8,9	9,4	12,2	18,3	24,4	nicht empfohlen, Lastgewicht zu hoch											
80 cm	1,2	2,3	3,5	3,6	3,8	3,9	4,0	4,2	4,4	4,8	5,1	5,4	5,8	6,1	6,5	6,8	7,1	8,0	8,5	9,1	11,9	18,0	24,1	nicht empfohlen, Lastgewicht zu hoch											
110 cm	1,1	2,1	3,2	3,3	3,4	3,5	3,7	3,9	4,1	4,4	4,8	5,1	5,4	5,8	6,1	6,5	6,8	7,7	8,2	8,7	11,5	17,7	23,8	nicht empfohlen, Lastgewicht zu hoch											
140 cm	1,0	2,0	3,0	3,1	3,3	3,4	3,5	3,7	3,9	4,3	4,6	4,9	5,3	5,6	6,0	6,3	6,6	7,5	8,0	8,6	11,4	17,5	23,6	nicht empfohlen, Lastgewicht zu hoch											
170 cm	1,0	2,0	3,0	3,2	3,3	3,4	3,6	3,8	4,0	4,3	4,6	5,0	5,3	5,7	6,0	6,3	6,7	7,6	8,1	8,6	11,4	17,5	23,7	nicht empfohlen, Lastgewicht zu hoch											

Mann

max. Ladehöhe	Lastgewicht [kg]																																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30					
50 cm	1,4	2,8	4,2	4,6	5,2	5,8	6,6	7,2	8,3	8,8	9,3	11,1	17,2	23,4	nicht empfohlen, Lastgewicht zu hoch																				
80 cm	1,3	2,6	3,9	4,3	4,9	5,5	6,3	6,9	7,9	8,5	9,0	10,8	16,9	23,0	nicht empfohlen, Lastgewicht zu hoch																				
110 cm	1,2	2,4	3,5	4,0	4,5	5,1	6,0	6,5	7,6	8,1	8,6	10,5	16,6	22,7	nicht empfohlen, Lastgewicht zu hoch																				
140 cm	1,1	2,3	3,4	3,8	4,4	5,0	5,8	6,4	7,4	8,0	8,5	10,3	16,4	22,5	nicht empfohlen, Lastgewicht zu hoch																				
170 cm	1,1	2,3	3,4	3,8	4,4	5,0	5,8	6,4	7,5	8,0	8,5	10,3	16,5	22,6	nicht empfohlen, Lastgewicht zu hoch																				

Frau

Annahmen: Standhöhe = Boden; einhändig; Körperhaltung bei der Abgabe auf den "Kommissionierwagen" ist optimal

Umsetzen von freistehender Palette



einhändig



Standhöhe = 50 cm

		Lastgewicht [kg]																													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
max. Ladehöhe	50 cm	0,9	1,8	2,7	2,8	2,9	3,1	3,2	3,4	3,6	3,9	4,3	4,6	5,0	5,3	5,6	6,0	6,3	7,2	7,7	8,2	11,1	17,2	23,3	nicht empfohlen, Lastgewicht zu hoch						
	80 cm	0,8	1,7	2,5	2,6	2,8	2,9	3,1	3,2	3,4	3,8	4,1	4,4	4,8	5,1	5,5	5,8	6,1	7,0	7,6	8,1	10,9	17,0	23,1	nicht empfohlen, Lastgewicht zu hoch						
	110 cm	0,9	1,8	2,7	2,8	2,9	3,0	3,2	3,4	3,6	3,9	4,3	4,6	4,9	5,3	5,6	6,0	6,3	7,2	7,7	8,2	11,0	17,2	23,3	nicht empfohlen, Lastgewicht zu hoch						

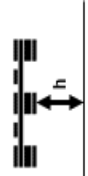
Mann

		Lastgewicht [kg]																													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
max. Ladehöhe	50 cm	1,0	2,0	3,1	3,5	4,0	4,6	5,5	6,1	7,1	7,6	8,1	10,0	16,1	22,2	nicht empfohlen, Lastgewicht zu hoch															
	80 cm	1,0	1,9	2,9	3,3	3,9	4,5	5,3	5,9	7,0	7,5	8,0	9,8	15,9	22,0	nicht empfohlen, Lastgewicht zu hoch															
	110 cm	1,0	2,0	3,0	3,5	4,0	4,6	5,5	6,0	7,1	7,6	8,1	10,0	16,1	22,2	nicht empfohlen, Lastgewicht zu hoch															

Frau

Annahmen: Standhöhe = 50 cm; einhändig; Körperhaltung bei der Abgabe auf den "Kommissionierwagen" ist optimal

Umsetzen von freistehender Palette



einhändig Standhöhe = 80 cm

Mann

		Lastgewicht [kg]																													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
max. Ladehöhe	50 cm	0,8	1,5	2,3	2,4	2,6	2,7	2,8	3,0	3,2	3,6	3,9	4,2	4,6	4,9	5,3	5,6	5,9	6,8	7,3	7,9	10,7	16,8	22,9	nicht empfohlen, Lastgewicht zu hoch						
	80 cm	0,9	1,7	2,6	2,7	2,8	3,0	3,1	3,3	3,5	3,9	4,2	4,5	4,9	5,2	5,6	5,9	6,2	7,1	7,6	8,2	11,0	17,1	23,2							

Frau

		Lastgewicht [kg]																													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
max. Ladehöhe	50 cm	0,9	1,8	2,7	3,1	3,7	4,3	5,1	5,7	6,7	7,3	7,8	9,6	15,7	21,8	nicht empfohlen, Lastgewicht zu hoch															
	80 cm	1,0	2,0	3,0	3,4	4,0	4,6	5,4	6,0	7,0	7,6	8,1	9,9	16,0	22,1																

Annahmen: Standhöhe = 80 cm; einhändig; Körperhaltung bei der Abgabe auf den "Kommissionierwagen" ist optimal

Umsetzen von längsgelagerter Palette



beidhändig



Standhöhe = Boden

max. Ladehöhe	Lastgewicht [kg]																																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
50 cm	1,4	2,7	4,1	4,2	4,2	4,3	4,4	4,5	4,6	4,7	4,8	4,9	5,0	5,1	5,3	5,5	5,7	5,9	6,1	6,3	6,5	6,7	6,9	7,1	7,4	7,7	8,0	8,3	8,6	8,9	9,2	9,5	9,8	10,1	13,7	17,3	20,9	24,5	28,1	
80 cm	1,2	2,5	3,7	3,8	3,8	3,9	4,0	4,1	4,2	4,3	4,4	4,5	4,6	4,7	4,9	5,1	5,3	5,5	5,7	5,9	6,1	6,3	6,5	6,7	7,0	7,3	7,6	7,9	8,2	8,5	8,8	9,1	9,4	9,7	13,3	16,9	20,5	24,1	27,7	
110 cm	1,1	2,2	3,3	3,4	3,5	3,5	3,6	3,7	3,8	3,9	4,0	4,1	4,2	4,3	4,5	4,7	4,9	5,1	5,3	5,5	5,7	5,9	6,1	6,3	6,6	6,9	7,2	7,5	7,8	8,1	8,4	8,7	9,0	9,3	12,9	16,5	20,1	23,7	27,3	
140 cm	1,0	2,1	3,1	3,2	3,2	3,3	3,4	3,5	3,5	3,6	3,7	3,8	3,9	4,0	4,1	4,3	4,5	4,7	4,9	5,1	5,3	5,5	5,7	5,9	6,1	6,4	6,7	7,0	7,3	7,6	7,9	8,2	8,5	8,8	9,1	12,7	16,3	19,9	23,5	27,1
170 cm	1,0	2,1	3,1	3,2	3,2	3,3	3,4	3,5	3,5	3,6	3,7	3,8	3,9	4,0	4,1	4,3	4,5	4,7	4,9	5,1	5,3	5,5	5,7	5,9	6,1	6,4	6,7	7,0	7,3	7,6	7,9	8,2	8,5	8,8	9,1	12,7	16,3	19,9	23,5	27,1

Mann

max. Ladehöhe	Lastgewicht [kg]																														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
50 cm	1,4	2,8	4,3	4,4	4,6	4,9	5,1	5,4	5,8	6,1	6,6	7,1	7,6	8,1	8,6	8,9	9,2	9,5	9,8	10,1	13,7	17,3	20,9	24,5	28,1	nicht empfohlen, Lastgewicht zu hoch					
80 cm	1,3	2,6	3,9	4,0	4,2	4,5	4,7	5,0	5,4	5,7	6,2	6,7	7,2	7,7	8,2	8,5	8,8	9,1	9,4	9,7	13,3	16,9	20,5	24,1	27,7						
110 cm	1,2	2,3	3,5	3,6	3,8	4,1	4,3	4,6	5,0	5,3	5,8	6,3	6,8	7,3	7,8	8,1	8,4	8,7	9,0	9,3	12,9	16,5	20,1	23,7	27,3						
140 cm	1,1	2,2	3,3	3,4	3,6	3,8	4,1	4,4	4,8	5,1	5,6	6,1	6,6	7,1	7,6	7,9	8,2	8,5	8,8	9,1	12,7	16,3	19,9	23,5	27,1						
170 cm	1,1	2,2	3,3	3,4	3,6	3,9	4,1	4,4	4,8	5,1	5,6	6,1	6,6	7,1	7,6	7,9	8,2	8,5	8,8	9,1	12,7	16,3	19,9	23,5	27,1						

Frau

Annahmen: Standhöhe = Boden; beidhändig; Körperhaltung bei der Abgabe auf den "Kommissionierwagen" ist optimal

Umsetzen von längsrelaxierter Palette



einhändig



Standhöhe = Boden

max. Ladehöhe	Lastgewicht [kg]																													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
50 cm	1,4	2,8	4,3	4,4	4,5	4,6	4,8	5,0	5,2	5,5	5,8	6,2	6,5	6,9	7,2	7,5	7,9	8,8	9,3	9,8	12,6	18,8	24,9	nicht empfohlen, Lastgewicht zu hoch						
80 cm	1,3	2,6	3,9	4,0	4,1	4,2	4,4	4,6	4,8	5,1	5,4	5,8	6,1	6,5	6,8	7,1	7,5	8,4	8,9	9,4	12,2	18,4	24,5							
110 cm	1,2	2,3	3,5	3,6	3,7	3,8	4,0	4,2	4,4	4,7	5,1	5,4	5,7	6,1	6,4	6,8	7,1	8,0	8,5	9,0	11,8	18,0	24,1							
140 cm	1,1	2,2	3,2	3,4	3,5	3,6	3,8	4,0	4,2	4,5	4,8	5,2	5,5	5,9	6,2	6,5	6,9	7,8	8,3	8,8	11,6	17,7	23,9							
170 cm	1,1	2,2	3,3	3,4	3,5	3,6	3,8	4,0	4,2	4,5	4,8	5,2	5,5	5,9	6,2	6,5	6,9	7,8	8,3	8,8	11,6	17,8	23,9							

Mann

max. Ladehöhe	Lastgewicht [kg]																													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
50 cm	1,5	3,1	4,6	5,1	5,6	6,2	7,1	7,6	8,7	9,2	9,7	11,5	17,7	23,8	nicht empfohlen, Lastgewicht zu hoch															
80 cm	1,4	2,8	4,2	4,7	5,2	5,8	6,7	7,2	8,3	8,8	9,3	11,1	17,3	23,4																
110 cm	1,3	2,6	3,8	4,3	4,8	5,4	6,3	6,8	7,9	8,4	8,9	10,8	16,9	23,0																
140 cm	1,2	2,4	3,6	4,0	4,6	5,2	6,0	6,6	7,7	8,2	8,7	10,5	16,7	22,8																
170 cm	1,2	2,4	3,6	4,1	4,6	5,2	6,1	6,6	7,7	8,2	8,7	10,5	16,7	22,8																

Frau

Annahmen: Standhöhe = Boden; einhändig; Körperhaltung bei der Abgabe auf den "Kommissionierwagen" ist optimal

Umsetzen von querlagerter Palette



beidhändig

Standhöhe = Boden

max. Ladehöhe	Lastgewicht [kg]																																																																																														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40																																																							
50 cm	1,3	2,6	3,9	4,0	4,0	4,1	4,2	4,3	4,3	4,4	4,5	4,6	4,7	4,8	4,9	5,1	5,3	5,5	5,7	5,9	6,1	6,3	6,5	6,7	6,9	7,2	7,5	7,8	8,1	8,4	8,7	9,0	9,3	9,6	9,9	10,2	10,5	10,8	11,1	11,4	11,7	12,0	12,3	12,6	12,9	13,2	13,5	13,8	14,1	14,4	14,7	15,0	15,3	15,6	15,9	16,2	16,5	16,8	17,1	17,4	17,7	18,0	18,3	18,6	18,9	19,2	19,5	19,8	20,1	20,4	20,7	21,0	21,3	21,6	21,9	22,2	22,5	22,8	23,1	23,4	23,7	24,0	24,3	24,6	24,9	25,2	25,5	25,8	26,1	26,4	26,7	27,0	27,3	27,6	27,9
80 cm	1,2	2,3	3,5	3,6	3,7	3,7	3,8	3,9	3,9	4,0	4,1	4,2	4,3	4,4	4,5	4,7	4,9	5,1	5,3	5,5	5,7	5,9	6,1	6,3	6,5	6,8	7,1	7,4	7,7	8,0	8,3	8,6	8,9	9,2	9,5	9,8	10,1	10,4	10,7	11,0	11,3	11,6	11,9	12,2	12,5	12,8	13,1	13,4	13,7	14,0	14,3	14,6	14,9	15,2	15,5	15,8	16,1	16,4	16,7	17,0	17,3	17,6	17,9	18,2	18,5	18,8	19,1	19,4	19,7	20,0	20,3	20,6	20,9	21,2	21,5	21,8	22,1	22,4	22,7	23,0	23,3	23,6	23,9	24,2	24,5	24,8	25,1	25,4	25,7	26,0	26,3	26,6	26,9		
110 cm	1,0	2,1	3,1	3,2	3,3	3,3	3,4	3,5	3,5	3,6	3,7	3,8	3,9	4,0	4,1	4,3	4,5	4,7	4,9	5,1	5,3	5,5	5,7	5,9	6,1	6,4	6,7	7,0	7,3	7,6	7,9	8,2	8,5	8,8	9,1	9,4	9,7	10,0	10,3	10,6	10,9	11,2	11,5	11,8	12,1	12,4	12,7	13,0	13,3	13,6	13,9	14,2	14,5	14,8	15,1	15,4	15,7	16,0	16,3	16,6	16,9	17,2	17,5	17,8	18,1	18,4	18,7	19,0	19,3	19,6	19,9	20,2	20,5	20,8	21,1	21,4	21,7	22,0	22,3	22,6	22,9	23,2	23,5	23,8	24,1	24,4	24,7	25,0	25,3	25,6	25,9	26,2	26,5	26,8	27,1
140 cm	1,0	2,0	2,9	3,0	3,1	3,1	3,2	3,3	3,4	3,4	3,5	3,6	3,7	3,8	3,9	4,1	4,3	4,5	4,7	4,9	5,1	5,3	5,5	5,7	5,9	6,2	6,5	6,8	7,1	7,4	7,7	8,0	8,3	8,6	8,9	9,2	9,5	9,8	10,1	10,4	10,7	11,0	11,3	11,6	11,9	12,2	12,5	12,8	13,1	13,4	13,7	14,0	14,3	14,6	14,9	15,2	15,5	15,8	16,1	16,4	16,7	17,0	17,3	17,6	17,9	18,2	18,5	18,8	19,1	19,4	19,7	20,0	20,3	20,6	20,9	21,2	21,5	21,8	22,1	22,4	22,7	23,0	23,3	23,6	23,9	24,2	24,5	24,8	25,1	25,4	25,7	26,0	26,3	26,6	26,9
170 cm	1,0	2,0	3,0	3,0	3,1	3,2	3,2	3,3	3,4	3,5	3,6	3,7	3,8	3,9	4,0	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0	5,2	5,4	5,6	5,8	6,0	6,3	6,6	6,9	7,2	7,5	7,8	8,1	8,4	8,7	9,0	9,3	9,6	9,9	10,2	10,5	10,8	11,1	11,4	11,7	12,0	12,3	12,6	12,9	13,2	13,5	13,8	14,1	14,4	14,7	15,0	15,3	15,6	15,9	16,2	16,5	16,8	17,1	17,4	17,7	18,0	18,3	18,6	18,9	19,2	19,5	19,8	20,1	20,4	20,7	21,0	21,3	21,6	21,9	22,2	22,5	22,8	23,1	23,4	23,7	24,0	24,3	24,6	24,9	25,2	25,5	25,8	26,1	26,4	26,7	27,0

Mann

max. Ladehöhe	Lastgewicht [kg]																																																																															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30																																																		
50 cm	1,4	2,7	4,1	4,2	4,4	4,7	4,9	5,2	5,6	5,9	6,4	6,9	7,4	7,9	8,4	8,7	9,0	9,3	9,6	9,9	10,2	10,5	10,8	11,1	11,4	11,7	12,0	12,3	12,6	12,9	13,2	13,5	13,8	14,1	14,4	14,7	15,0	15,3	15,6	15,9	16,2	16,5	16,8	17,1	17,4	17,7	18,0	18,3	18,6	18,9	19,2	19,5	19,8	20,1	20,4	20,7	21,0	21,3	21,6	21,9	22,2	22,5	22,8	23,1	23,4	23,7	24,0	24,3	24,6	24,9	25,2	25,5	25,8	26,1	26,4	26,7	27,0			
80 cm	1,2	2,5	3,7	3,8	4,0	4,3	4,5	4,8	5,2	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,3	8,6	8,9	9,2	9,5	9,8	10,1	10,4	10,7	11,0	11,3	11,6	11,9	12,2	12,5	12,8	13,1	13,4	13,7	14,0	14,3	14,6	14,9	15,2	15,5	15,8	16,1	16,4	16,7	17,0	17,3	17,6	17,9	18,2	18,5	18,8	19,1	19,4	19,7	20,0	20,3	20,6	20,9	21,2	21,5	21,8	22,1	22,4	22,7	23,0	23,3	23,6	23,9	24,2	24,5	24,8	25,1	25,4	25,7	26,0	26,3	26,6	26,9		
110 cm	1,1	2,2	3,3	3,4	3,6	3,9	4,1	4,4	4,8	5,1	5,6	6,1	6,6	7,1	7,6	7,9	8,2	8,5	8,8	9,1	9,4	9,7	10,0	10,3	10,6	10,9	11,2	11,5	11,8	12,1	12,4	12,7	13,0	13,3	13,6	13,9	14,2	14,5	14,8	15,1	15,4	15,7	16,0	16,3	16,6	16,9	17,2	17,5	17,8	18,1	18,4	18,7	19,0	19,3	19,6	19,9	20,2	20,5	20,8	21,1	21,4	21,7	22,0	22,3	22,6	22,9	23,2	23,5	23,8	24,1	24,4	24,7	25,0	25,3	25,6	25,9				
140 cm	1,0	2,1	3,1	3,3	3,4	3,7	3,9	4,3	4,6	4,9	5,4	5,9	6,4	6,9	7,4	7,7	8,0	8,3	8,6	8,9	9,2	9,5	9,8	10,1	10,4	10,7	11,0	11,3	11,6	11,9	12,2	12,5	12,8	13,1	13,4	13,7	14,0	14,3	14,6	14,9	15,2	15,5	15,8	16,1	16,4	16,7	17,0	17,3	17,6	17,9	18,2	18,5	18,8	19,1	19,4	19,7	20,0	20,3	20,6	20,9	21,2	21,5	21,8	22,1	22,4	22,7	23,0	23,3	23,6	23,9	24,2	24,5	24,8	25,1	25,4	25,7	26,0	26,3	26,6	26,9
170 cm	1,0	2,1	3,1	3,3	3,5	3,7	4,0	4,3	4,6	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	7,8	8,1	8,4	8,7	9,0	9,3	9,6	9,9	10,2	10,5	10,8	11,1	11,4	11,7	12,0	12,3	12,6	12,9	13,2	13,5	13,8	14,1	14,4	14,7	15,0	15,3	15,6	15,9	16,2	16,5	16,8	17,1	17,4	17,7	18,0	18,3	18,6	18,9	19,2	19,5	19,8	20,1	20,4	20,7	21,0	21,3	21,6	21,9	22,2	22,5	22,8	23,1	23,4	23,7	24,0	24,3	24,6	24,9	25,2	25,5	25,8	26,1	26,4	26,7	27,0

Frau

Annahmen: Standhöhe = Boden; beidhändig; Körperhaltung bei der Abgabe auf den "Kommissionierwagen" ist optimal

nicht empfohlen,
Lastgewicht zu hoch

Umsetzen von querelagerter Palette



einhändig



Standhöhe = Boden

max. Ladehöhe	Lastgewicht [kg]																													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
50 cm	1,4	2,7	4,1	4,2	4,3	4,4	4,6	4,8	5,0	5,3	5,6	6,0	6,3	6,7	7,0	7,3	7,7	8,6	9,1	9,6	12,4	18,6	24,7	nicht empfohlen, Lastgewicht zu hoch						
80 cm	1,2	2,4	3,7	3,8	3,9	4,0	4,2	4,4	4,6	4,9	5,3	5,6	5,9	6,3	6,6	7,0	7,3	8,2	8,7	9,2	12,0	18,2	24,3							
110 cm	1,1	2,2	3,3	3,4	3,5	3,6	3,8	4,0	4,2	4,5	4,9	5,2	5,5	5,9	6,2	6,6	6,9	7,8	8,3	8,8	11,6	17,8	23,9							
140 cm	1,0	2,1	3,1	3,2	3,3	3,5	3,6	3,8	4,0	4,3	4,7	5,0	5,4	5,7	6,0	6,4	6,7	7,6	8,1	8,6	11,5	17,6	23,7							
170 cm	1,0	2,1	3,1	3,2	3,3	3,5	3,6	3,8	4,0	4,4	4,7	5,0	5,4	5,7	6,1	6,4	6,7	7,6	8,1	8,7	11,5	17,6	23,7							

Mann

max. Ladehöhe	Lastgewicht [kg]																													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
50 cm	1,5	3,0	4,4	4,9	5,4	6,0	6,9	7,4	8,5	9,0	9,5	11,3	17,5	23,6	nicht empfohlen, Lastgewicht zu hoch															
80 cm	1,3	2,7	4,0	4,5	5,0	5,6	6,5	7,0	8,1	8,6	9,1	11,0	17,1	23,2																
110 cm	1,2	2,4	3,6	4,1	4,6	5,2	6,1	6,6	7,7	8,2	8,7	10,6	16,7	22,8																
140 cm	1,2	2,3	3,5	3,9	4,4	5,0	5,9	6,5	7,5	8,0	8,5	10,4	16,5	22,6																
170 cm	1,2	2,3	3,5	3,9	4,5	5,1	5,9	6,5	7,5	8,1	8,6	10,4	16,5	22,6																

Frau

Annahmen: Standhöhe = Boden; einhändig; Körperhaltung bei der Abgabe auf den "Kommissionierwagen" ist optimal

Ziehen/Schieben von Transportwagen










		Lastgewicht [kg]																																						
		40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300	310	320	330	340	350	360	370	380	390	400		
Transportmittel		40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300	310	320	330	340	350	360	370	380	390	400		
M1		1,7	1,7	1,9	2,1	2,3	2,5	2,7	2,8	2,9	3,0	3,1	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0	5,2																	
M2		1,7	1,7	1,9	2,1	2,3	2,5	2,7	2,8	2,9	3,0	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5	3,6	3,7	3,8	3,9	4,0	4,1	4,2	4,3	4,4	4,5	4,6	4,7	4,8	4,9	5,0	5,1	5,2	5,3	5,3	5,4	5,4	5,5	5,5	
M3		1,7	1,7	1,9	2,1	2,2	2,3	2,4	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0	3,1	3,2	3,0	3,0	3,1	3,1	3,2	3,2	3,3	3,4	3,5	3,6	3,7	3,8	3,9	4,0	4,1	4,2	4,3	4,3	4,4	4,4	4,5	4,5	

Mann

		Lastgewicht [kg]																																							
		40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300	310	320	330	340	350	360	370	380	390	400			
Transportmittel		40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300	310	320	330	340	350	360	370	380	390	400			
M1		1,7	2,0	2,2	2,5	2,7	2,8	3,0	3,1	3,3	3,6	3,8	4,1	4,3	4,6	4,8	5,1																								
M2		1,7	2,0	2,2	2,5	2,7	2,8	3,0	3,1	3,3	3,4	3,5	3,6	3,8	3,9	4,0	4,1	4,3	4,4	4,5	4,7	4,8	4,9	5,1	5,2	5,3	5,3	5,4	5,5	5,6	5,7	5,7	5,8	5,8	5,9	5,9	6,0	6,0	6,0		
M3		1,7	2,0	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,7	2,8	2,9	2,9	3,0	3,0	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5	3,7	3,8	3,9	4,1	4,2	4,3	4,4	4,5	4,6	4,7	4,8	4,9	5,0	5,1	5,2	5,2	5,3	5,4	5,4		

Frau

Annahmen: sehr geringer Rollwiderstand, Haltungsverlängerung konstant und unabhängig vom Lastgewicht des Wagens

M1				Karren
M2				Trolleys und Transportwagen
M3				Schienenwagen. Hubwagen

(siehe EAWS Version 1.3.6)

11. Referenzen

- Arnold, D., Furmans, K.: (2005). Materialfluss in Logistiksystemen. Springer-Verlag, Berlin.
- Azzi, A., Battini, D., Persona, A., & Sgarbossa, F. (2012). Packaging design: general framework and research agenda. *Packaging Technology and Science*, 25(8), 435-456.
- Badura, B.; Ducki, A.; Schröder, H.; Klose, J.; Meyer, M. (2016). Fehlzeiten Report 2016: Unternehmenskultur und Gesundheit - Herausforderungen und Chancen. Springer, Heidelberg.
- Baker, P., & Perotti, S. (2008). UK warehouse benchmarking report. Cranfield School of Management.
- Battini, D.; Calzavara, M.; Persona, A.; Sgarbossa, F. (2015). Order picking system design: the storage assignment and travel distance estimation (SA&TDE) joint method. *International Journal of Production Research*, 53 (4), 1077-1093.
- Battini, D., Glock, C. H., Grosse, E. H., Persona, A., & Sgarbossa, F. (2016). Human energy expenditure in order picking storage assignment: A bi-objective method. *Computers & Industrial Engineering*, 94, 147-157.
- Behnisch, P.; Glock, C. H.; Grosse, E. H.; Ries, J. M. (2017). Auf dem Weg zum Warehouse 4.0? - Zum aktuellen Stand der Automatisierung in der Lagerhaltung, in: Glock, C. H.; Grosse, E. H. (Hrsg.): *Warehousing 4.0: Technische Lösungen und Managementkonzepte für die Lagerlogistik der Zukunft*. B + G Wissenschaftsverlag, 53-74.
- BITO (2022). Vorteile & Nutzen Systembehälter BITO XL Motion. <https://www.bitto.com/de-de/loesungen/produkte/behaeltersysteme/behaelter-fuer-automatisierte-laeger/>
- Boston Dynamics (2022). Stretch. <https://www.bostondynamics.com/products/stretch>
- Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAUA) (2014). Volkswirtschaftliche Kosten durch Arbeitsunfähigkeit 2012. www.baua.de/de/Informationen-fuer-die-Praxis/Statistiken/Arbeitsunfaehigkeit/Kosten.html
- Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAUA) und Länderausschuss für Arbeitsmedizin und Sicherheitstechnik (2001). Leitmerkmalmethode zur Beurteilung von Heben, Halten und Tragen (Formblatt).
- Bozer, Y. A.; Kyle, J. W. (2008). Order batching in walk-and-pick order picking systems. *International Journal of Production Research*, 46 (7), 1887-1909.
- Brynzér, H.; Johansson, M.I. (1996). Storage location assignment: Using the product structure to reduce order picking times. *International Journal of Production Economics*, 46-47 (1), 595-603.
- Calzavara, M., Glock, C. H., Grosse, E. H., Persona, A., & Sgarbossa, F. (2017). Analysis of economic and ergonomic performance measures of different rack layouts in an order picking warehouse. *Computers & Industrial Engineering*, 111, 527-536.

- Calzavara, M., Glock, C. H., Grosse, E. H., & Sgarbossa, F. (2018). An integrated storage assignment method for manual order picking warehouses considering cost, workload and posture. *International Journal of Production Research*, 57 (8), 2392-2408.
- Calzavara, M., Battini, D., Bogataj, D., Sgarbossa, F., & Zennaro, I. (2020). Ageing workforce management in manufacturing systems: state of the art and future research agenda. *International Journal of Production Research*, 58 (3), 729-747.
- Chackelson, C., Errasti, A., Ciprés, D., & Lahoz, F. (2013). 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.
- CROWN (2022). QuickPick Remote Kommissioniertechnologie. <https://www.crown.com/de-de/gabelstapler/kommissioniertechnologie-quickpick.html>
- Davarzani, H.; Norrman, A. (2015). Toward a relevant agenda for warehousing research: literature review and practitioners' input. *Logistics Research*, 8 (1), 1-18.
- Denis, D., St-Vincent, M., Imbeau, D., & Trudeau, R. (2006). Stock management influence on manual materials handling in two warehouse superstores. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 36 (3), 191-201.
- De Koster, R. D. & Poort, E. V. D. (1998). Routing orderpickers in a warehouse: a comparison between optimal and heuristic solutions. *IIE Transactions*, 30 (5), 469-480.
- De Koster, R.; Le-Duc, T.; Roodbergen, K. J. (2007). Design and control of warehouse order picking: A literature review. *European Journal of Operational Research*, 182 (2), 481-501.
- De Vries, J.; de Koster, R.; & Stam, D. (2016). Exploring the role of picker personality in predicting picking performance with pick by voice, pick to light and RF-terminal picking. *International Journal of Production Research*, 54(8), 2260-2274.
- Ditchen, D.; Brandstädt, F. (2015). MEGAPHYS - Entwicklung eines Methodenpakets zur Gefährdungsbeurteilung physischer Belastungen am Arbeitsplatz. *Technische Sicherheit* 5 (10), 17-23.
- DSLV (2019). Bundesverband Spedition und Logistik e. V., Umsatz und Beschäftigte. https://www.dslv.org/dslv/web.nsf/id/pa_de_beschaeftigte.html.
- Elbert, R. M., Franzke, T., Glock, C. H., & Grosse, E. H. (2017). The effects of human behavior on the efficiency of routing policies in order picking: the case of route deviations. *Computers & Industrial Engineering*, 111, 537-551.
- Ellegast, R. P. (2010). Quantifizierung physischer Belastungen am Arbeitsplatz. *Zentralblatt für Arbeitsmedizin, Arbeitsschutz und Ergonomie*, 60(11), 386-389.
- Emde, B.; Boysen, N. (2017). Kommissionierung mithilfe mobiler Lagerroboter, in: Glock, C. H.; Grosse, E. H. (Hrsg.): *Warehousing 4.0: Technische Lösungen und Managementkonzepte für die Lagerlogistik der Zukunft*. B + G Wissenschaftsverlag, 103-114.

- Finnsgård, C., & Wänström, C. (2013). Factors impacting manual picking on assembly lines: an experiment in the automotive industry. *International Journal of Production Research*, 51(6), 1789-1798.
- Frazelle, E.A. (2002). *World-class warehousing and material handling*. New York: McGraw-Hill.
- Gademann, N.; Velde, S. (2005). Order batching to minimize total travel time in a parallel-aisle warehouse. *IIE Transactions*, 37 (1), 63-75.
- Galka, S., Günthner, W.A. (2016). Einfluss von Artekeleigenschaften auf die Entnahmezeit in Kommissioniersystemen. *Logistics Journal: Proceedings*, 1-22.
- Garg, A., Chaffin, D. B., & Herrin, G. D. (1978). Prediction of metabolic rates for manual materials handling jobs. *The American Industrial Hygiene Association Journal*, 39 (8), 661-674.
- Gebhardt (2022). GEBHARDT GridPick. <https://gebhardt-group.com/de/produkte/kommissionieren/cobots-fur-kommissionierung.html>
- Glock, C. H.; Grosse, E. H. (2012). Storage policies and order picking strategies in U-shaped orderpicking systems with a movable base. *International Journal of Production Research*, 50 (16), 4344-4357.
- Glock, C. H., Grosse, E. H., Elbert, R. M., & Franzke, T. (2016). Maverick picking: the impact of modifications in work schedules on manual order picking processes. *International Journal of Production Research*, 55 (21), 6344-6360.
- Glock, C. H., Grosse, E. H., Abedinnia, H., & Emde, S. (2019). An integrated model to improve ergonomic and economic performance in order picking by rotating pallets. *European Journal of Operational Research*, 273(2), 516-534.
- Grosse, E. H., Glock, C. H., & Jaber, M. Y. (2013). The effect of worker learning and forgetting on storage reassignment decisions in order picking systems. *Computers & Industrial Engineering*, 66 (4), 653-662.
- Grosse, E. H.; Glock, C. H.; Ballester-Ripoll, R. (2014). 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.
- Grosse, E. H., & Glock, C. H. (2015). The effect of worker learning on manual order picking processes. *International Journal of Production Economics*, 170, 882-890.
- Grosse, E. H.; Glock, C. H.; Jaber, M. Y.; Neumann, W. P. (2015). Incorporating human factors in order picking planning models: Framework and research opportunities. *International Journal of Production Research*, 53 (3), 695-717.
- Grosse, E. H.; Glock, C. H. & Neumann, W. P. (2017). Human factors in order picking: A content analysis of the literature. *International Journal of Production Research*, 55 (5), 1260-1276.
- Gu, J.; Goetschalckx, M.; Mc Ginnis, L.F. (2007). Research on warehouse operation: a comprehensive review. *European Journal of Operational Research*, 177 (1), 1-21.

- Gu, J.; Goetschalckx, M.; Mc Ginnis, L.F. (2010). Research on warehouse design and performance evaluation: a comprehensive review. *European Journal of Operational Research*, 203 (3), 539- 549.
- Günthner, W.A.; Deuse, J.; Rammelmeier, T.; Weisner, K. (2014). Entwicklung und technische Integration einer Bewertungsmethodik zur Ermittlung von Mitarbeiterbelastungen in Kommissioniersystemen (ErgoKom). Schlussbericht des AIF Forschungsvorhabens, München.
- Henn, S. (2012). Algorithms for on-line order batching in an order picking warehouse. *Computers & Operations Research*, 39 (11), 2549-2563.
- Henn, S.; Schmid, V. (2013). Metaheuristics for order batching and sequencing in manual order picking systems. *Computers & Industrial Engineering*, 66 (2), 338-351. Hsieh, L. F.; Huang, Y. C. (2011). New batch construction heuristics to optimise the performance of order picking systems. *International Journal of Production Economics*, 131 (2), 618-630.
- Hong, S.; Johnson, A. L.; Peters, B. A. (2012). Large-scale order batching in parallel-aisle picking systems. *IIE Transactions*, 44 (2), 88-106.
- Hwang, H.; Oh, Y.H.; Lee, Y.K. (2004). 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.
- Jäger, M.; Göllner, R.; Jordan, C.; Theilmeier, A.; Luttmann, A. (2002). Belastung der Lendenwirbelsäule beim Heben und Umsetzen von Lasten. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, 56, 93-105.
- Jung, M. C., Haight, J. M., Freivalds, A. (2005). Pushing and pulling carts and two-wheeled hand trucks. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 35(1), 79-89.
- Kadefors, R.; Forsman, M. (2000). Ergonomic Evaluation of Complex Work: A Participative Approach Employing Video-Computer Interaction, Exemplified in a Study of Order Picking. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 25 (4), 435-445.
- Kelterborn, D. M. F. (2017). Erweiterung eines Systems vorbestimmter Zeiten zur Bewertung der körperlichen Belastung in der Produktionslogistik (Dissertation, TU München).
- Korte, D., Hagg, M., Wehking, K.-H. (2017). Effiziente Reorganisationsmaßnahmen in manuellen Kommissioniersystemen (ReKom). Abschlussbericht zum IGF-Forschungsvorhaben (18689N).
- Kugler, M.; Bierwirth, M.; Schaub, Kh.; Sinn-Behrendt, A.; Feith, A.; Ghezal-Ahmadi, K.; Bruder, R. (2010). Ergonomie in der Industrie - aber wie? Handlungshilfe für den schrittweisen Aufbau eines einfachen Ergonomiemanagements. <http://www.kobra-projekt.de>.
- Kuhlang, P., Rast, S., Liebig, S., Lüben, A., Finsterbusch, T., Mühlbradt, T. (2015). Methoden und Perspektiven zur ergonomischen Bewertung und Gestaltung langzyklischer Tätigkeiten in der Fahrzeuginstandhaltung. *Praxiswissen Instandhaltung, Intelligente, lernorientierte Instandhaltung-Smart Maintenance*, 181-193.

- Kuhn, H. W. (1955). The Hungarian method for the assignment problem. *Naval research logistics quarterly*, 2(1-2), 83-97.
- Larco, J. A., de Koster, R., Roodbergen, K. J., & Dul, J. (2016). Managing warehouse efficiency and worker discomfort through enhanced storage assignment decisions. *International Journal of Production Research*, 55 (21), 6407-6422.
- Laurig, W.; Hecktor, K.; Jäger, M. (1994). Entwicklung eines Expertensystems zur ergonomischen Analyse und Gestaltung von Tätigkeiten des manuellen Lastentransports, *Ergon-EXPERT*, Köln: Schmidt.
- Lavender, S. A., Oleske, D. M., Andersson, G. B., & Kwasny, M. M. (2006). Low-back disorder risk in automotive parts distribution. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 36 (9), 755-760.
- Lavender, S. A., Sommerich, C. M., Johnson, M. R., & Radin, Z. (2010). Developing ergonomic interventions to reduce musculoskeletal disorders in grocery distribution centers. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 54 (5), 1229-1233.
- Lavender, S. A., Marras, W. S., Ferguson, S. A., Splittstoesser, R. E., & Yang, G. (2012). Developing physical exposure-based back injury risk models applicable to manual handling jobs in distribution centers. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 9 (7), 450-459.
- Lolling, A. (2002). Laborversuche zur Analyse von menschlichen Fehlern in der Kommissionierung. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, 56 (1-2), 80-92.
- Masae, M., Glock, C. H., & Grosse, E. H. (2020a). Order picker routing in warehouses: A systematic literature review. *International Journal of Production Economics*, 224, 107564.
- Masae, M., Glock, C. H., & Vichitkunakorn, P. (2020b). Optimal order picker routing in the chevron warehouse. *IIE Transactions*, 52(6), 665-687.
- Matusiak, M.; de Koster, R.; Kroon, L.; Saarinen, J. (2014). A fast simulated annealing method for batching precedence-constrained customer orders in a warehouse. *European Journal of Operational Research*, 236 (3), 968-977.
- Matusiak, M., de Koster, R., & Saarinen, J. (2017). Utilizing individual picker skills to improve order batching in a warehouse. *European Journal of Operational Research*, 263 (3), 888-899.
- Napolitano, M. (2012). 2012 warehouse/DC operations survey: Mixed signals. *Modern Materials Handling*, 51 (11), 48-56.
- Neumann, W.P. (2004). *Production Ergonomics: Identifying and managing risk in the design of high performance work systems*, Göteborg, Sweden.
- Pan, J. C. H.; Wu, M. H.; Chang, W. L. (2014). 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.

- Parker, M. (1997). Incorporating ergonomics into the concurrent engineering of a new warehouse. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 20 (3), 251-257.
- Petersen, C.G.; Aase, G. (2004). A comparison of picking, storage, and routing policies in manual order picking. *International Journal of Production Economics*, 92 (1), 11-19.
- Petersen, C.G.; Schmenner, R.W. (1999). An Evaluation of Routing and Volume-based Storage Policies in an Order Picking Operation. *Decision Sciences*, 30 (2), 481-501.
- Pfohl, H. C. (Ed.). (2013). *Betriebswirtschaftslehre der Mittel-und Kleinbetriebe: größenspezifische Probleme und Möglichkeiten zu ihrer Lösung*. Erich Schmidt Verlag.
- Pohl, L. M., Meller, R. D., & Gue, K. R. (2009). Optimizing fishbone aisles for dual-command operations in a warehouse. *Naval Research Logistics (NRL)*, 56(5), 389-403.
- Rademacher, H.; Bruder, R.; Sinn-Behrendt, A.; Landau, K. (2011). Identifying demographic bottlenecks for musculoskeletal risks in production areas - Implications for the design of industrial workplaces and assignment of workers. 10. International Symposium on Human Factors in Organisational Design and Management, 4. - 6. April 2011, Grahamstown (South Africa). REFA-Fachausschuss Chemie (Hrs.) (1987). Handhaben von Lasten, Darmstadt, Seminar.
- Schaub K.; Caragnano G.; Britzke B.; Bruder R. (2012). The European Assembly Worksheet. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 14, 616-639.
- Schaub, K.; Möglich, D.; Kaiser, B.; Rast, S.; Rönick, K.; Bier, L.; Sinn-Behrendt, A.; Kuhlmann, P. (2016). Analyse und Bewertung von körperlichen Belastungen bei langzyklischen Tätigkeiten als Voraussetzung für ergonomische Arbeitsgestaltung. In: *Arbeit in komplexen Systemen – Digital, vernetzt, human?! 62. GfA-Frühjahrskongress*, RWTH Aachen University, vol. B.3.8. GfA-Press, Dortmund.
- Schaub, K. H., Steinberg, U., Bierwirth, M., Kugler, M., Bruder, R. (2012). MultiPLa – a tool for the combined overall estimation of various types of manual handling tasks. *Work*, 41, 4433-4435.
- Schneider, E.; Irastorza, X. (2010). OSH in figures: work-related musculoskeletal disorders in the EU - facts and figures. European Agency for Safety and Health at Work, Luxembourg.
- Scholl, P. (2009). Skalierbare Kommissioniersysteme – Entwicklung eines Instrumentariums zur Auswahl eines kostenoptimalen skalierbaren Kommissioniersystems unter Berücksichtigung prognostizierter Auslastungsschwankungen. Schlussbericht zum IGF-Forschungsvorhaben (15359).
- Silverstein, B. A., Fine, L. J., Armstrong, T. J. (1986). Hand wrist cumulative trauma disorders in industry. *Occupational and Environmental Medicine*, 43(11), 779-784.
- Statistisches Bundesamt (2017a). Marktdaten zu Logistik und Transport. <https://de.statista.com/statistik/kategorien/kategorie/16/themen/133/branche/logistik-transport/>

- Statistisches Bundesamt (2017b). Welche Auswirkungen hat der demografische Wandel bereits heute auf Ihr Unternehmen <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/173235/umfrage/auswirkungen-des-demografischen-wandels-auf-unternehmen/>
- Statistisches Bundesamt (2018). Verteilung des Lager- und Logistikflächenumsatzes in Deutschland im Jahr 2017 (Q1-3) nach Branchen. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/180660/umfrage/lagerflaechenumsatz-nach-branchen/>
- Steinberg, U.; Caffier, G.; Mohr, D.; Liebers, F.; Behrendt, S. (1998). Modellhafte Erprobung des Leitfadens Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der manuellen Handhabung von Lasten: (Abschlussbericht). In BAuA-Schriftenreihe, Bremerhaven.
- Steinberg, U.; Caffier, G.; Liebers F.; Behrendt, S. (2008). Ziehen und Schieben ohne Schaden. Hrsg.: BAuA. 4. Auflage. Dortmund: BAuA Eigenverlag.
- Steinberg U.; Windberg, H.-J. (2011) Heben und Tragen ohne Schaden. Hrsg.: BAuA. 6. Unveränderte Auflage. Dortmund: BAuA Eigenverlag.
- Steinebach, T., Grosse, E. H., Glock, C. H., Wakula, J., & Lunin, A. (2020). Accuracy evaluation of two markerless motion capture systems for measurement of upper extremities: Kinect V2 and Captiv. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 30(4), 291-302.
- Steinebach, T. (2022). Analyse des Einflusses einer ergonomischen Lagerplatzvergabe auf die Beanspruchung und die menschliche Leistung in der manuellen Kommissionierung. Dissertation, TU Darmstadt.
- Still (2015). STILL Ergopick mit Kranausleger für leichtes Lasthandling. <https://www.pressebox.de/pressemitteilung/still-gmbh/STILL-Ergopick-mit-Kranausleger-fuer-leichtes-Lasthandling/boxid/769639>
- Stinson, M., Sommer, T. Wehking, K.-H. (2014). Bewertung und Optimierung der Effizienz manueller Tätigkeiten in der Kommissionierung (EfKom). Schlussbericht zum IGF-Forschungsvorhaben (17236).
- Stinson, M., & Wehking, K. H. (2016). Experimental analysis of manual order picking processes in a Learning Warehouse. *Logistics Journal*, 2016.
- St-Vincent, M., Denis, D., Imbeau, D., & Laberge, M. (2005). Work factors affecting manual materials handling in a warehouse superstore. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 35 (1), 33-46.
- ten Hompel, M.; Deuse, J.; Mackowiak, J.; Goldscheid, C. (2005). Ganzheitliche Bewertung und Optimierung manueller Arbeitsplätze in Kommissioniersystemen. Schlussbericht des IGF-Forschungsvorhabens (13904).
- ten Hompel, M., Günthner, Venn, E., W. A Ulbrich, A. (2007). Simulationsgestützte Grobplanung von Kommissioniersystemen. Schlussbericht zum IGF-Forschungsvorhaben (14601N).

- ten Hompel, M., Crostack, H. A., Zellerhoff, J., Pelka, M., Mathis, J., Strothotte, D. (2010). Strategien für die flexible, auftragsweise Kommissionierung mit integrierter Prüfung. Schlussbericht zum IGF-Forschungsvorhaben (15811).
- Theys, C.; Bräysy, O.; Dullaert, W.; Raa, B. (2010). Using a TSP heuristic for routing order pickers in warehouses. *European Journal of Operational Research*, 200 (3), 755-763.
- Tompkins, J.A.; White, J.A.; Bozer, Y.A. (2010). *Facilities Planning*. 4. Ausgabe. New York: McGraw-Hill.
- Xiao, J.; Zheng, L. (2012). Correlated storage assignment to minimize zone visits for BOM picking. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 61(5-8), 797-807.
- Van Gils, T., Ramaekers, K., Caris, A., de Koster, R. B. (2018). 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.
- Wakula, J., Steinebach, T., Klaer, V., Rabenhaupt, W., & Maier, G. (2021). Analysis of the Physical Workload and Ergonomic Design of Workstations for “Goods-to-Person” Order Picking. In *Congress of the International Ergonomics Association*, 522-529, Springer, Cham.
- Walch, D. (2011). Belastungsermittlung in der Kommissionierung vor dem Hintergrund einer altersgerechten Arbeitsgestaltung der Intralogistik. Dissertation, Lehrstuhl für Fördertechnik, Materialfluss und Logistik der Technischen Universität München.
- Walter, R., Boysen, N., & Scholl, A. (2013). The discrete forward-reserve problem—Allocating space, selecting products, and area sizing in forward order picking. *European Journal of Operational Research*, 229 (3), 585-594.
- Waters, T. R., Putz-Anderson, V., Garg, A., Fine, L. J. (1993). Revised NIOSH equation for the design and evaluation of manual lifting tasks. *Ergonomics*, 36(7), 749-776.
- Waters, T. R., Putz-Anderson, V., & Baron, S. (1998). Methods for assessing the physical demands of manual lifting: a review and case study from warehousing. *American Industrial Hygiene Association*, 59 (12), 871-881.
- Winkelhaus, S., & Grosse, E. H. (2020). Logistics 4.0: a systematic review towards a new logistics system. *International Journal of Production Research*, 58 (1), 18-43.
- Winkelhaus, S., Grosse, E. H., & Morana, S. (2021). Towards a conceptualisation of Order Picking 4.0. *Computers & Industrial Engineering*, 159, 107511.
- Zäpfel, G., Braune, R., & Bögl, M. (2010). Metaheuristic search concepts: A tutorial with applications to production and logistics.