

FORSCHUNGSBERICHT

W. A. Günthner · M. Koch

Erstellung einer ergonomischen
Lagerstrategie und -organisation durch
ein Arbeitslast analysierendes
Warehouse-Management-System
(ErgoWMS)

Forschungsbericht

zu dem IGF-Vorhaben

Erstellung einer ergonomischen Lagerstrategie und -organisation durch ein Arbeitslast analysierendes Warehouse-Management-System (ErgoWMS)

der Forschungsstelle

Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München

Das IGF-Vorhaben 17445 N der Forschungsvereinigung Bundesvereinigung Logistik e.V. - BVL wurde über die



im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Herausgegeben von:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Willibald A. Günthner

fml – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

Technische Universität München

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © **fml** – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

Printed in Germany 2014

ISBN: 978-3-941702-48-6

fml – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

Technische Universität München

Boltzmannstr. 15

85748 Garching

Telefon: + 49.89.289.15955

Telefax: + 49.89.289.15922

www.fml.mw.tum.de

Zusammenfassung

Die Alterung der Belegschaft macht eine Arbeitsgestaltung nötig, bei der verstärkt ergonomische Aspekte berücksichtigt werden. Um Überbelastungen zu identifizieren, ist eine Bewertung der physischen Belastung erforderlich. Im Forschungsprojekt „ErgoWMS“ wurde eine Methodik entwickelt für die fortlaufende und automatische Bewertung der physischen Belastung von Kommissionierern im Warehouse-Management-System (WMS) sowie Konzepte zu deren Reduzierung erstellt.

Für die Belastungsbewertung von Kommissionierern im WMS wurden zwei geeignete Verfahren identifiziert, die beide manuelle Lastenhandhabungen bewerten: die erweiterte Leitmerkmalmethode und das Multiple-Lasten-Tool. Für die Integration eines Verfahrens in ein WMS ist zuerst eine Analyse der vom Kommissionierer durchzuführenden Lastenhandhabungen erforderlich. Auf Basis der Ergebnisse der Analyse wird ein Programmablaufplan erstellt, der den Ablauf des Kommissionierprozesses widerspiegelt. Die Bestimmung der Eingaben des Bewertungsverfahrens erfolgt anhand einer im Projekt entwickelten Logik. Die Logik verwendet Daten aus der Datenbank des WMS, weshalb diese um für die Berechnung notwendige Daten erweitert werden muss.

Die Belastungsbewertung im WMS ermöglicht es, die auf den Kommissionierer wirkende Belastung gezielt zu senken. Im Forschungsprojekt wurden drei Konzepte erarbeitet, die ebenfalls im WMS umgesetzt werden können. Eine wege- und belastungsoptimierte Zuordnung von Artikeln zu Lagerplätzen berücksichtigt die später entstehende Belastung der Kommissionierer schon bei der Einlagerung. Eine gezielte Zuweisung von Kommissionieraufträgen zu Mitarbeitern unter ergonomischen Aspekten verhindert eine ungleichmäßige Belastung der Mitarbeiter. Die Aufforderung zum Arbeitsplatzwechsel bei Erreichen eines definierten Grenzkrisikowerts ermöglicht eine belastungsorientierte Jobrotation.

Um die Realisierbarkeit der erarbeiteten Methodiken und Konzepte zu zeigen, wurde das Open-Source-WMS myWMS LOS um diese erweitert.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problem	1
1.2	Ziele	2
1.3	Lösungsweg zur Erreichung der Ziele	3
1.4	Aufbau der Arbeit	3
2	Grundlagen	5
2.1	Kommissionierung	5
2.1.1	Kommissioniersysteme	5
2.1.2	Kommissionierprozess	7
2.1.3	Kommissionierauftrag	7
2.1.4	Warehouse-Management-Systeme	9
2.2	Belastung und Beanspruchung	10
3	Belastungsbewertung im Warehouse-Management-System	15
3.1	Manuelle Lastenhandhabungen in der Kommissionierung	15
3.2	Einsatzszenarien	17
3.3	Verfahren zur Belastungsbewertung	19
3.3.1	Überblick	20
3.3.2	Bewertung und Auswahl	28
3.3.3	Ausgewählte Verfahren	31
3.4	Integration in das Warehouse-Management-System	42
3.4.1	Analyse des Kommissionierprozesses	42
3.4.2	Programmablaufplan für die Belastungsbewertung	43
3.4.3	Logik für die Ermittlung der Eingabedaten	45
3.4.4	Datenbankeinträge für die Ermittlung der Eingabedaten	53
3.5	Hintergründe zur Logik	55
3.5.1	Einflussfaktoren auf die Eingabedaten	55
3.5.2	Probandenversuche	57
3.6	Exkurs: Belastungszulage	64

4	Belastungsreduzierung im Warehouse-Management-System	67
4.1	Lagerplatzzuordnung	67
4.1.1	Optimierungsproblem	69
4.1.2	Lösungsverfahren	72
4.2	Auftragszuweisung	78
4.2.1	Optimierungsproblem	78
4.2.2	Lösungsverfahren	80
4.3	Jobrotation	82
5	Realisierung des Demonstrators	83
5.1	myWMS LOS	83
5.2	Belastungsbewertung	85
5.2.1	Datenbankschema	85
5.2.2	Lagertopologie	87
5.2.3	Ablauf der Belastungsbewertung	88
5.2.4	Speicherung der Bewertungsergebnisse	90
5.2.5	Benutzeroberfläche	92
5.2.6	Testdaten	95
5.3	Belastungszulage	96
5.4	Lagerplatzzuordnung	96
5.4.1	Datenstruktur für die Bewertung einer Lagerplatzzuordnung	97
5.4.2	Benutzeroberfläche	99
5.5	Auftragszuweisung	101
5.6	Jobrotation	101
6	Zusammenfassung und Ausblick	103
6.1	Zusammenfassung	103
6.2	Ausblick	104
6.3	Nutzen und industrielle Anwendungsmöglichkeiten	105
	Literaturverzeichnis	107
	Abbildungsverzeichnis	113
	Tabellenverzeichnis	117
	Abkürzungsverzeichnis	119

1 Einleitung

Im Forschungsprojekt „ErgoWMS - Erstellung einer ergonomischen Lagerstrategie und -organisation durch ein Arbeitslast analysierendes Warehouse-Management-System“ steht die physische Belastung von Kommissionierern im Fokus. Zentraler Aspekt des Forschungsprojekts war die Entwicklung einer Methodik für die automatische und fortlaufende Bewertung der Belastung von Kommissionierern im Warehouse-Management-System (WMS). Zudem wurden darauf aufbauend Konzepte zur Reduzierung der Belastung erstellt.

1.1 Problem

Erkrankungen des Muskel-Skelett-Systems verursachen in Deutschland rund ein Viertel aller Arbeitsunfähigkeitstage [Bau-2012]. Sie treten vor allem in den höheren Altersklassen auf (siehe Abbildung 1-1). Vor dem Hintergrund des demografischen Wandels ist in den kommenden Jahren ein weiterer Anstieg der Erkrankungen zu erwarten.

Arbeitsunfähigkeit aufgrund von degenerativen Muskel-Skelett-Erkrankungen tritt bei physisch belastenden Berufen überdurchschnittlich häufig auf [Lie-2009]. Um eine Überbelastung und damit die Wahrscheinlichkeit einer Überbeanspruchung der Mitarbeiter zu erkennen, ist eine Bewertung der physischen Belastung erforderlich.

Die Kommissionierung ist ein wesentlicher Bestandteil der Intralogistik und der personalintensivste Bereich innerhalb eines Distributionssystems [Hom-2011]. Sie hat das Ziel, aus einer Gesamtmenge von Gütern Teilmengen aufgrund von Anforderungen zusammenzustellen [VDI 3590-1]. Trotz einem steigenden Anteil automatischer Anlagen in der Intralogistik ist der Mensch in der Kommissionierung bislang unersetzbar. Gründe hierfür sind beispielsweise seine sensomotorischen Fähigkeiten sowie die bedarfsgerechte Skalierbarkeit der Mitarbeiter.

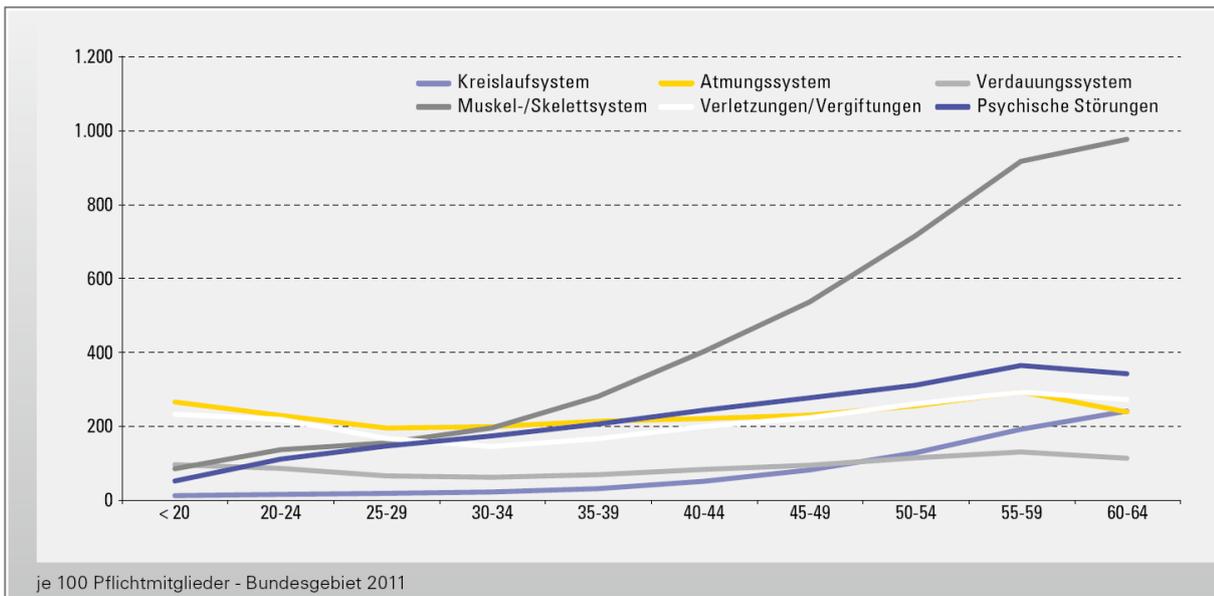


Abbildung 1-1: Arbeitsunfähigkeit nach Alter und Krankheitsarten in Tagen [Bau-2012]

Die Tätigkeit in der manuellen Kommissionierung ist sehr stark von Lastenhandhabungen geprägt [Gol-2007], vor allem das Umsetzen sowie Ziehen oder Schieben von Lasten tritt sehr häufig auf. Eine Bewertung der physischen Belastung erfolgt, wenn überhaupt, häufig nur sporadisch und auf Basis von Durchschnittswerten. Eine automatische und fortlaufende Bewertung der physischen Belastung erfolgt bislang nicht.

1.2 Ziele

Das Forschungsprojekt „ErgoWMS“ verfolgt zwei Ziele. Erstes Ziel ist die Entwicklung einer Methodik, die eine automatische und fortlaufende Bewertung der physischen Belastung von Kommissionierern ermöglicht. Die Methodik soll aufwandsarm implementierbar sein und Transparenz über die Belastungssituation in Unternehmen schaffen. Kritische Arbeitsplätze sollen somit frühzeitig erkannt und Maßnahmen zur Belastungsreduzierung gezielt eingesetzt werden können.

Das zweite Ziel ist die Konzeption von Verfahren, die es ermöglichen, die Belastung der Mitarbeiter zu senken. Die Konzepte sollen dabei auf die Ergebnisse der Belastungsbewertung zugreifen.

1.3 Lösungsweg zur Erreichung der Ziele

Das Vorgehen bei der Projektbearbeitung erfolgte anhand eines Projektplans mit sieben aufeinander abgestimmten Arbeitspaketen (AP) mit einem zeitlichen Umfang von insgesamt 24 Personenmonaten (PM):

- AP 1: Marktanalyse WMS und Festlegung von Kommissionierszenarien
- AP 2: Anforderungsanalyse an die Berechnungsmethodik zur Belastungsermittlung
- AP 3: Entwicklung kommissioniersystem- und belastungsspezifischer Berechnungsparameter
- AP 4: Exemplarische Kopplung von Arbeitsanalyse und WMS
- AP 5: Entwicklung von Organisations- und Vergütungsmodellen sowie einer ergonomischen Lagerfachbelegung
- AP 6: Exemplarische Integration der Organisationsmodelle an das WMS
- AP 7: Dokumentation und Transfer der Ergebnisse

1.4 Aufbau der Arbeit

Der grundlegende Aufbau dieser Arbeit ist in Abbildung 1-2 dargestellt. In Kapitel 2 werden Grundlagen zur Kommissionierung sowie zur Belastung und Beanspruchung erläutert. Diese dienen für das Verständnis der darauf folgenden Kapitel.

Kapitel 3 konzentriert sich auf die Integration wissenschaftlich anerkannter Verfahren zur Belastungsbewertung in Warehouse-Management-Systeme. Dazu wurden Einsatzszenarien für die Belastungsbewertung erarbeitet, geeignete Verfahren für das Vorhaben identifiziert sowie das Vorgehen zur Integration und erforderliche Vorarbeiten beschrieben.

In Kapitel 4 werden Konzepte zur Vermeidung von Überbelastungen entwickelt, die auf die Ergebnisse der Belastungsbewertung in Kapitel 3 zurückgreifen. Ein Ansatz besteht darin, die später entstehende Belastung der Mitarbeiter bereits bei der Lagerplatzvergabe zu berücksichtigen. Außerdem kann die Überlastung einzelner Mitarbeiter durch die gezielte Zuweisung von Aufträgen zu Mitarbeitern verhindert werden. Eine sehr hohe Belastung lässt sich zudem vermeiden, indem Mitarbeiter innerhalb einer Schicht ihren Arbeitsplatz wechseln.

Kapitel 5 zeigt, wie die in Kapitel 3 und Kapitel 4 erarbeiteten Methodiken und Konzepte in einem Demonstrator umgesetzt wurden.

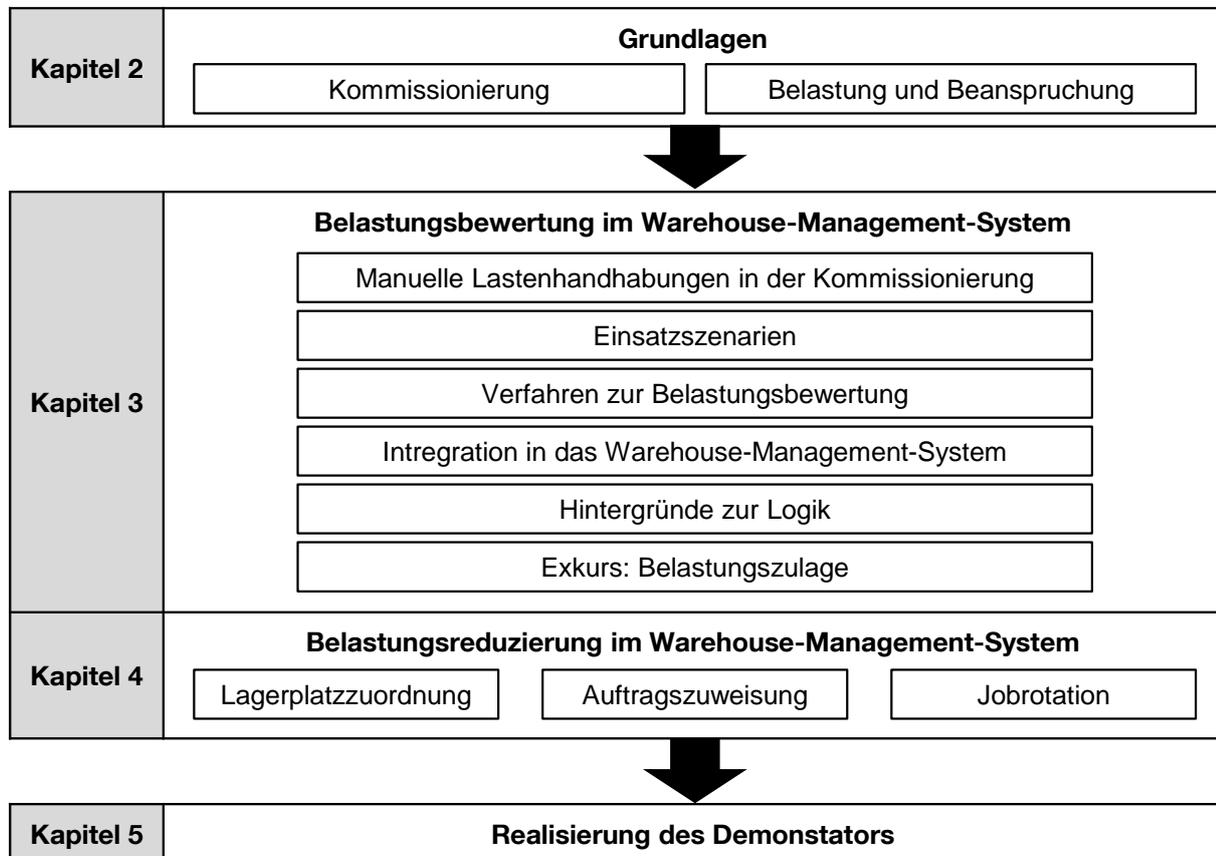


Abbildung 1-2: Aufbau der Arbeit

2 Grundlagen

Abschnitt 2.1 gibt einen Überblick über Grundlagen der Kommissionierung. In Abschnitt 2.2 werden Begriffe und Zusammenhänge aus dem Bereich Ergonomie erläutert.

2.1 Kommissionierung

In diesem Abschnitt wird genauer auf die Gestaltung von Kommissioniersystemen, den Kommissionierprozess, den Kommissionierauftrag sowie das Warehouse-Management-System eingegangen.

2.1.1 Kommissioniersysteme

Kommissioniersysteme gibt es in einer Vielzahl an möglichen Ausprägungen. In der Literatur werden Kommissioniersysteme wie in VDI-Richtlinie 3590 [VDI 3590-1] meist in die Teilsysteme Organisationssystem, Informationssystem und Materialflusssystem untergliedert. Da in dieser Arbeit der Schwerpunkt auf der Bewertung und Reduzierung der physischen Belastung von Kommissionierern liegt, wird im Folgenden nur das Materialflusssystem erläutert.

Durch das Materialflusssystem werden die physischen Bewegungen von Gütern, Menschen und Arbeitsmitteln vorgegeben [Men-1999]. Die Ausprägungen eines Materialflusssystems unterscheiden sich dabei hinsichtlich der Realisierungsmöglichkeiten folgender Vorgänge [VDI 3590-1]: Transport der Güter zur Bereitstellung, Bereitstellung, Bewegung des Kommissionierers zur Bereitstellung, Entnahme der Güter durch den Kommissionierer, Transport der Güter zum Abgabeort, Abgabe, Rücktransport der angebrochenen Ladeeinheiten.

Die Unterscheidung in manuelle und automatisierte Kommissioniersysteme erfolgt auf Basis der Durchführung der Entnahme: Bei einer manuellen Entnahme handelt es sich um ein manuelles Kommissioniersystem, bei automatisierten Kommissioniersystemen wird die Entnahme automatisiert durchgeführt, z. B. durch einen Roboter mit Greifer [Pul-2009]. Die Unterscheidung ist unabhängig von der Art der Bereitstellung [Pul-2009]. Zusätzlich ist die Entnahme mechanisch möglich, d. h. durch vom Menschen gesteuerte Hilfsmittel [VDI 3590-2].

Der Kommissionierer führt beim Kommissionierprozess die Entnahme und die Abgabe durch, dabei kann er Mensch oder Maschine sein [VDI 3590-1]. Da in dieser Arbeit manuelle Kommissioniersysteme betrachtet werden, bezieht sich der Begriff Kommissionierer, wenn nicht anders beschrieben, auf einen Menschen.

Bewegungen des Kommissionierers werden in der VDI-Richtlinie 3590 [VDI 3590-2] hinsichtlich ihrer Automatisierungsstufe unterschieden, dabei gibt es die drei Ausprägungen manuell, mechanisch und automatisch. Da hier im Gegensatz zur VDI-Richtlinie die auf den Kommissionierer wirkende Belastung im Vordergrund steht, werden für die Fortbewegung des Kommissionierers die folgenden drei Fälle definiert, dabei wird nach Antrieb des benutzten Fördermittels unterschieden: ohne Fördermittel, Fördermittel ohne Antrieb, Fördermittel mit Antrieb. Im ersten Fall einer Fortbewegung ohne Fördermittel bewegt sich der Mensch mit oder ohne Last fort. Im zweiten Fall bewegt sich der Kommissionierer mit einem Fördermittel ohne eigenständigen Antrieb fort, dieses wird durch die Muskelkraft des Kommissionierers fortbewegt. Ein Fördermittel ohne eigenständigen Antrieb ist beispielsweise der klassische Kommissionierwagen. Im dritten Fall verfügt das Fördermittel über einen eigenständigen Antrieb. In der manuellen Kommissionierung befindet sich der Mensch i. d. R. im oder auf dem Fördermittel und wird von diesem transportiert, ein bemanntes Regalbediengerät ist hierfür ein Beispiel. Die Realisierungsmöglichkeiten für Entnahme und Fortbewegung sind in Abbildung 2-1 veranschaulicht.

Entnahme	manuell	mechanisch	automatisiert
Fortbewegung	ohne Fördermittel	Fördermittel ohne Antrieb	Fördermittel mit Antrieb

Abbildung 2-1: Realisierungsmöglichkeiten bei Kommissioniersystemen

Üblicherweise werden zwei grundlegende Gestaltungsprinzipien von Kommissioniersystemen unterschieden: Person-zur-Ware und Ware-zur-Person. Beim Kommissionierprinzip Person-zur-Ware (PzW) bewegt sich der Kommissionierer hin zur Bereitstelleinheit [Hom-2011]. Bei der Kommissionierung Ware-zur-Person (WzP) führt der Kommissionierer keine Bewegung durch, die zu kommissionierende Ware wird zum Kommissionierer transportiert [Hom-2011].

2.1.2 Kommissionierprozess

Nach VDI-Richtlinie 3590 [VDI 3590-1] wird der Vorgang des Kommissionierens wie folgt definiert: „Kommissionieren hat das Ziel, aus einer Gesamtmenge von Gütern (Sortiment) Teilmengen auf Grund von Anforderungen (Aufträge) zusammenzustellen.“ Der Kommissionierprozess ist dabei von den Hauptprozessen Bereitstellung und Verpackung abzugrenzen, diese finden vor bzw. nach der Kommissionierung statt [Men-1999].

In dieser Arbeit steht der Mensch im Mittelpunkt, daher sind in Abbildung 2-2 die Teilprozesse der Kommissionierung aus Sicht des Kommissionierers dargestellt. Diese sind Auftragsannahme, Fortbewegung, Entnahme und Ablage, Kontrolle und Quittierung, Fortbewegung zur Abgabe, Abgabe. Es können im jeweiligen Kommissioniersystem weitere Teilprozesse auftreten, die nicht für die Funktion des Kommissioniersystems erforderlich sind (z. B. Wiegen).

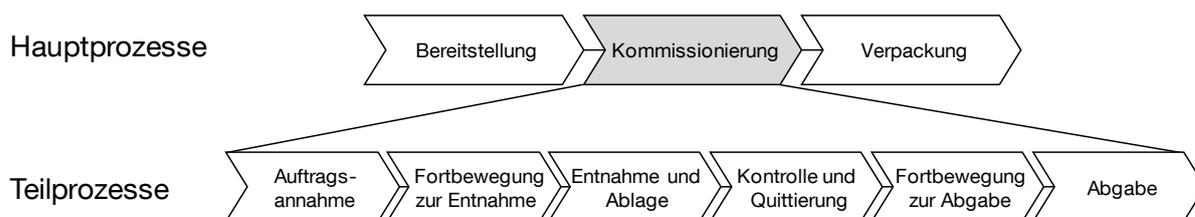


Abbildung 2-2: Teilprozesse der Kommissionierung, in Anlehnung an [Pot-1995]

2.1.3 Kommissionierauftrag

In der Kommissionierung ist zwischen einem Kundenauftrag und einem Kommissionierauftrag zu unterscheiden. Der Kundenauftrag ist die Bestellung eines Kunden bei einem Lieferanten; der Kommissionierauftrag passt diesen an die Belange der Kommissionierung an [Hom-2011]. Dabei entspricht der Kommissionierauftrag nicht notwendigerweise dem Kundenauftrag, beispielsweise kann ein Kundenauftrag in mehrere Kommissionieraufträge aufgesplittet werden. Es existieren aber noch andere Realisierungsmöglichkeiten der Auftragsaufbereitung. Zudem sind im Kommissionierauftrag zusätzliche Informationen enthalten, wie z. B. der Lagerplatz der zu kommissionierenden Ware.

Der Kommissionierauftrag enthält Informationen zum Auftrag sowie Informationen zu den einzelnen zu kommissionierenden Waren. Informationen zum Auftrag sind beispielsweise die Nummer des Kommissionierauftrags und bei einem Kommissionier-

auftrag mit Artikeln für nur einen Kunden die Kundennummer. Informationen zu den zu kommissionierenden Waren sind in den einzelnen Zeilen des Kommissionierauftrags dargestellt, den sogenannten Positionen. Eine Position enthält alle für den Kommissioniervorgang eines Artikels notwendigen Informationen [VDI 3590-1], z. B. die Artikelnummer oder den Lagerplatz.

Zur Visualisierung des Kommissionierauftrags gibt es verschiedene Realisierungsmöglichkeiten. Diese kann beispielsweise papierbasiert in Form einer Kommissionierliste erfolgen. Eine exemplarische Kommissionierliste ist in Abbildung 2-3 dargestellt.

						Kommissionierauftrag: KA208763821 Kundennummer: KU846429 Bestelldatum: 01.03.2014 Lieferdatum: 06.03.2014
Position	Artikelnummer	Artikelbeschreibung	Lagerbereich	Lagerplatz	Menge	Mengeneinheit
1	A10094066	Reflektoren	1	1D01	9	Stück
2	A22033412	Bremshebel	1	3A10	1	Stück
3	A40123412	Schlauch	1	4C03	1	Stück

Abbildung 2-3: Exemplarische Darstellung einer Kommissionierliste

Die im Kommissionierauftrag verwendeten Lagerplatzbezeichnungen sind eindeutige Bezeichnungen zur Bestimmung der Position innerhalb eines Lagerbereichs. Häufig werden dazu drei Koordinaten verwendet: Eine Koordinate steht für das Regal oder den Gang, eine weitere für die Ebene und eine für das Fach. Zum Beispiel könnte 1D01 Regal 1, Ebene D und Fach 01 bedeuten. Abbildung 2-4 zeigt, wie die Koordinaten eines Regals festgelegt sein können.

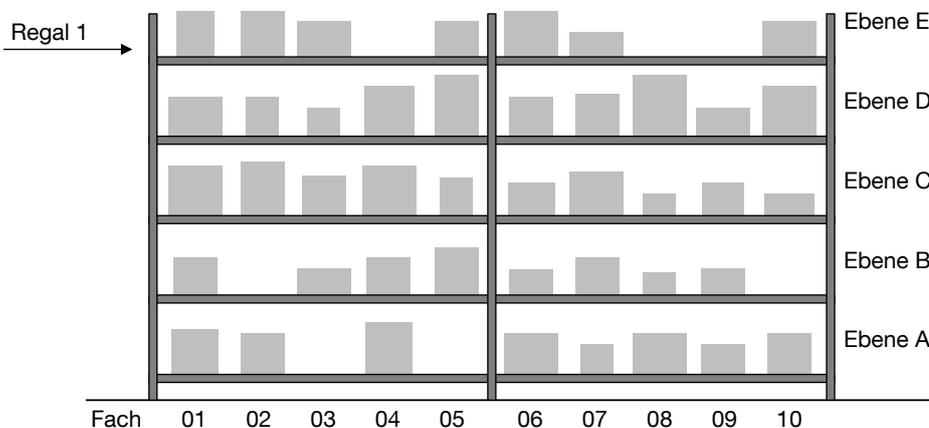


Abbildung 2-4: Exemplarische Koordinaten eines Regals

2.1.4 Warehouse-Management-Systeme

Warehouse-Management-Systeme sind softwarebasierte Systeme zur „Steuerung, Kontrolle und Optimierung komplexer Lager- und Distributionssysteme“, dabei unterstützen sie Prozesse vom Wareneingang bis zum Warenausgang [Hom-2007]. Funktionen eines WMS sind beispielsweise die Mengen- und Lagerplatzverwaltung, die Fördermittelsteuerung und -disposition, die Kontrolle der Systemzustände sowie eine Auswahl an Betriebs- und Optimierungsstrategien [Hom-2007].

Die Architektur eines WMS ist üblicherweise eine Drei-Schichten-Architektur, bestehend aus Präsentationsschicht, Logikschicht und Datenhaltungsschicht (vgl. Abbildung 2-5).

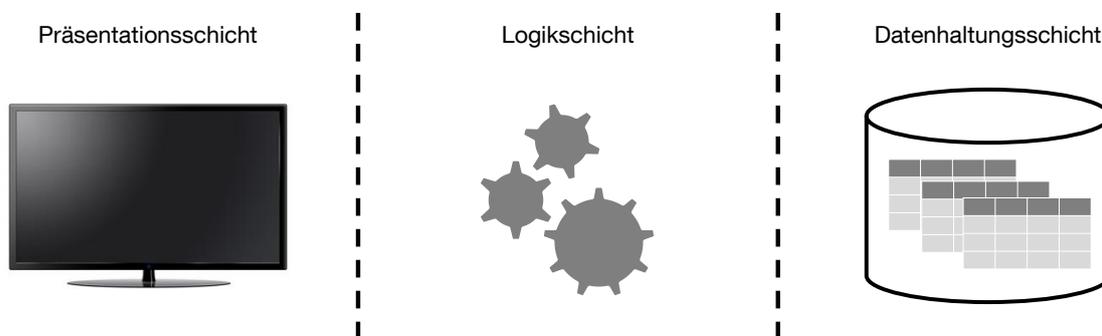


Abbildung 2-5: Drei-Schichten-Architektur

Die Präsentationsschicht ist verantwortlich für die grafische Benutzeroberfläche und somit für die Interaktion mit dem Benutzer. Bei WMS kann der Benutzer sich beispielsweise die Tabelle zu den Artikeldaten anzeigen lassen. Die Logikschicht dient der Implementierung der Anwendungslogik. In der Datenhaltungsschicht befindet sich die Datenbank, sie ist zudem zuständig für das Speichern und Laden von Daten.

Relationale Datenbanken sind heute Standard zur elektronischen Datenverwaltung. Sie basieren auf dem von Codd [Cod-1970] entwickelten, relationalen Datenbankmodell. Eine relationale Datenbank kann als Sammlung von Tabellen verstanden werden, in denen Datensätze gespeichert sind. Nach Unterstein [Unt-2012] wird ein Schema für eine relationale Datenbank durch eine Menge von Bezeichnern für Relationen, ein Relationenschema für jede Relation sowie weitere Konsistenzbeziehungen für jede Relation festgelegt.

Zum systematischen Entwurf von Datenbanken werden spezielle Modellierungsmethoden eingesetzt. Die Unified Modeling Language (UML) ist heute anerkannter

Standard für den Datenbankentwurf. Klassen und Attribute sind grundlegende Modellierungselemente der UML, wobei eine Klasse der Kopfzeile einer Tabelle und ein Attribut der Spaltenüberschrift einer Tabelle entspricht.

Für die Belastungsbewertung in der Kommissionierung sind die im WMS gespeicherte Daten sowie die Möglichkeit des Zugriffs auf diese Daten relevant. Die heutzutage im WMS gespeicherten Daten sind sehr stark abhängig vom jeweiligen System. Für diese Arbeit relevante Daten, die üblicherweise im WMS vorliegen, sind Kommissionieraufträge, Lagerbereiche, Lagerplätze, Höhe und Tiefe der Lagerplätze, aktuelle Bestände, maximale Bestände, Artikelnummer, Artikelgewicht sowie Fördermitteldaten. Ob Informationen zu den Mitarbeitern vorliegen, hängt sehr stark vom jeweiligen Unternehmen ab. I. d. R. ist jedoch nur die Mitarbeiternummer gespeichert. Erfolgt die Erweiterung des WMS in einem neuen Programm, ist der Zugriff auf die Daten erforderlich. Vom WMS-Anbieter muss hierfür eine Funktionalität im WMS vorgesehen werden, so dass der Export der Daten möglich ist. Um die Anforderungen des WMS-Anwenders erfüllen zu können, werden WMS häufig kundenabhängig angepasst [Hom-2007]. Wünscht der Kunde einen Export der Daten, kann der WMS-Hersteller diesen realisieren. Nach einer Studie des Fraunhofer IML [Hom-2007] bieten 91 Prozent der WMS-Anbieter eine XML-Schnittstelle an, die für den Datenaustausch verwendet werden kann.

2.2 Belastung und Beanspruchung

In der Arbeitswissenschaft wird zwischen den Begriffen Belastung und Beanspruchung unterschieden. Unter Belastung wird die „Gesamtheit der äußeren Bedingungen und Anforderungen im Arbeitssystem, die auf den physiologischen und/oder psychologischen Zustand einer Person einwirken“ [DIN EN ISO 6385] verstanden, während mit Beanspruchung die „innere Reaktion des Arbeitenden [...] auf die Arbeitsbelastung, der er ausgesetzt ist“ gemeint ist [DIN EN ISO 6385].

Rohmert [Roh-1984] liefert mit dem vereinfachten Belastungs-Beanspruchungskonzept einen Ansatz, der die Darstellung möglicher Zusammenhänge zwischen Belastung und Beanspruchung ermöglicht (siehe Abbildung 2-6). Beanspruchungen des Menschen sind demnach abhängig von den verursachenden Belastungen sowie den individuellen Eigenschaften, Fähigkeiten, Fertigkeiten, Bedürfnissen des Menschen. Eine objektiv gleiche Belastung kann somit bei unterschiedlichen Menschen

zu einer unterschiedlichen Beanspruchung führen. Nach Rohmert setzt sich die Belastung aus einzelnen Teilbelastungen zusammen. Die Teilbelastungen stammen aus der Arbeitsaufgabe und der Arbeitsumgebung, wobei sich die jeweilige Teilbelastungsart aus der Belastungshöhe und der Belastungsdauer zusammensetzt. In dieser Arbeit wird aus Gründen der besseren Lesbarkeit anstatt Teilbelastungen der Ausdruck Belastungen verwendet.

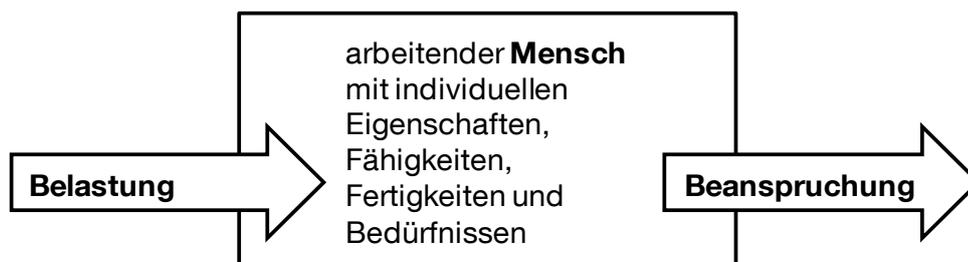


Abbildung 2-6: Zusammenhang zwischen Belastung und Beanspruchung nach dem vereinfachten Belastungs-Beanspruchungs-Konzept [Roh-1984]

Laurig [Lau-1980] unterscheidet vier unterschiedliche Belastungstypen: energetische Belastung, informatorische Belastung, Belastung aus der physikalischen oder chemischen Umgebung sowie Belastung aus der sozialen Umgebung (siehe Abbildung 2-7). Energetische sowie informatorische Belastung entstehen dabei aus der Arbeitsaufgabe. Belastung aus der physikalischen oder chemischen Umgebung sowie Belastung aus der sozialen Umgebung sind durch die Arbeitsumgebung bedingt [Sch-2010]. Die Einteilung in Belastungstypen basiert auf der zuvor von Laurig erstellten Gliederung von Arbeitsaufgaben in Arbeitstypen. Arbeitsaufgaben lassen sich demnach den zwei Arbeitstypen energetische Arbeit oder informatorische Arbeit zuordnen, je nachdem welcher Arbeitstyp bei der Arbeitsaufgabe überwiegt [Lau-1980].

Energetische Arbeit verursacht demnach vorwiegend energetische Belastung. Die energetische Arbeit führt i. d. R. zu einer Inanspruchnahme der Skelettmuskulatur, um Kräfte zu erzeugen oder Bewegungen auszuführen [Sch-2010]. Belastet werden hierbei die Muskulatur, mit der Kräfte erzeugt werden; Knochen, Gelenke, Sehnen und Bänder, die Kräfte aufnehmen müssen; der Stoffwechsel und das Herz-Kreislauf-System, die die von der Muskulatur umgesetzte Energie bereitstellen müssen [Sch-2010].

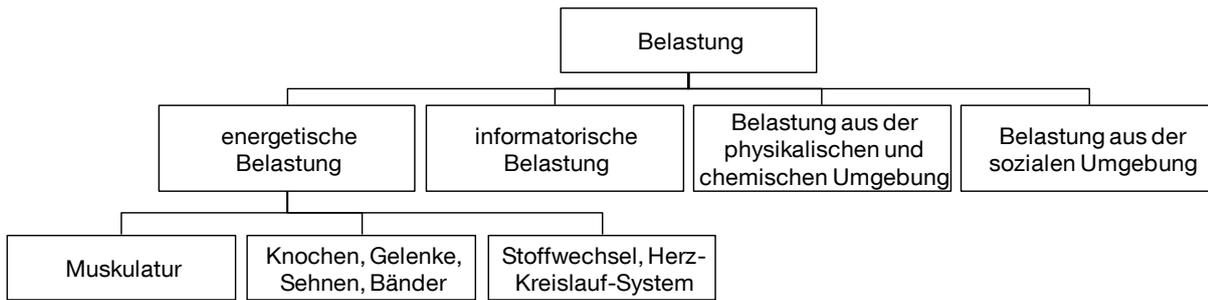


Abbildung 2-7: Belastungstypen

Die Handlungsanleitung für arbeitsmedizinische Vorsorge nach dem Berufsgenossenschaftlichen Grundsatz G 46 „Belastungen des Muskel- und Skelettsystems einschließlich Vibrationen“ [Deu-2009] unterteilt die Untersuchungsanlässe für eine physische Belastung in sechs Gruppen:

- manuelle Lastenhandhabung,
- erzwungene Körperhaltungen,
- Arbeit mit erhöhter Kraftanstrengung und/oder Krafteinwirkung,
- repetitive Tätigkeiten mit hohen Handhabungsfrequenzen,
- Ganzkörper-Vibrationen und
- Hand-Arm-Vibrationen.

Manuelle Lastenhandhabungen sind die dominierende Ursache für eine physische Belastung in der manuellen Kommissionierung [Jün-2000, Hom-2011, Wal-2011], weshalb nur diese im Folgenden betrachtet werden. Die manuelle Lastenhandhabung unterteilt sich nach BGI/GUV-I 504-46 [Deu-2009] weiter in

- Heben, Halten, Tragen sowie
- Ziehen, Schieben.

Beim Heben, Halten, Tragen wirkt das komplette Gewicht der Last auf den Kommissionierer, i. d. R. wird die Last mit den Händen gehandhabt. Die Begriffe werden wie folgt voneinander abgegrenzt [Ste-2011]. Beim Heben wird die Last maximal fünf Sekunden gehalten und nicht mehr als fünf Meter fortbewegt. Das Heben, Absenken und Umsetzen wird nach der Leitmerkmalmethode gleich behandelt und daher im Folgenden nicht unterschieden. Beim Halten einer Last wird diese mehr als fünf Sekunden gehalten und nicht mehr als fünf Meter fortbewegt. Vom Tragen einer Last wird gesprochen, wenn diese mehr als fünf Meter fortbewegt wird.

Mit Ziehen oder Schieben wird das horizontale Bewegen der Lasten bezeichnet. Die Last befindet sich direkt auf einem Untergrund, jedoch muss die manipulierende Person Muskelkräfte für das Bewegen der Last aufwenden. Beim Ziehen wird die Last zum Körper hin bewegt, beim Schieben vom Körper weg. In Abhängigkeit von der zurückgelegten Strecke wird zwischen kurzem und langem Ziehen oder Schieben unterschieden [Ste-2008]. Bei kurzem Ziehen oder Schieben beträgt die zurückgelegte Strecke maximal fünf Meter. Bei langem Ziehen oder Schieben wird dieser Wert überschritten. Sind Lasten zu schwer zum Tragen, werden sie üblicherweise auf Fahrzeuge gesetzt und auf diesen durch Ziehen oder Schieben bewegt. Tabelle 2-1 veranschaulicht die Abgrenzung der Begriffe.

Tabelle 2-1: Begriffsabgrenzung von Heben, Halten, Tragen und Ziehen, Schieben

	Heben, Halten, Tragen		Ziehen, Schieben
	Dauer ≤ 5 s	Dauer > 5 s	
Strecke ≤ 5 m	Heben	Halten	kurzes Ziehen oder Schieben
Strecke > 5 m	Tragen	Tragen	langes Ziehen oder Schieben

Im Folgenden wird oft der Begriff Belastungsarten verwendet, dieser bezieht auf alle möglichen Untergliederungen des Begriffs Belastung, beispielsweise die Belastungstypen, die Untersuchungsanlässe für eine physische Belastung sowie die Formen der manuellen Lastenhandhabung.

Im Hinblick auf die Zielstellung liegt der Fokus dieser Arbeit auf der Bewertung der physischen Belastung, die auf den Kommissionierer wirkt, unabhängig von den individuellen Voraussetzungen des Menschen.

3 Belastungsbewertung im Warehouse-Management-System

Die entwickelte Methodik zur Belastungsbewertung von Kommissionierern im Warehouse-Management-System wird in diesem Kapitel vorgestellt. Dazu wird zunächst darauf eingegangen, wie die Gestaltung des Kommissioniersystems und manuelle Lastenhandhabungen zusammenhängen (siehe Abschnitt 3.1). Im Anschluss werden Einsatzszenarien für die Belastungsbewertung im WMS festgelegt (Abschnitt 3.2). In Abschnitt 3.3 werden Verfahren zur Belastungsbewertung vorgestellt und geeignete Verfahren ausgewählt. Abschnitt 3.4 zeigt die Vorgehensweise für die Integration der Belastungsbewertung ins WMS auf. In Abschnitt 3.5 werden Hintergründe zu getroffenen Annahmen erläutert. Abschnitt 3.6 gibt einen Ausblick auf die mögliche Verwendung der Ergebnisse der Belastungsbewertung für die Ermittlung des Entgelts.

3.1 Manuelle Lastenhandhabungen in der Kommissionierung

Teilprozesse der Kommissionierung, bei denen Kommissionierer u. U. manuelle Lastenhandhabungen durchführen, sind die Fortbewegung (zur Entnahme oder zur Abgabe), die Entnahme und die Ablage sowie die Abgabe. Welche Lastenhandhabungen im jeweiligen Kommissionierprozess auftreten, ist sehr stark abhängig von der Gestaltung des Materialflusssystem, insbesondere dem Grad der Automatisierung des Systems.

Fortbewegung

Bei der PzW-Kommissionierung kann der Kommissionierer sich ohne Fördermittel zum Zielort bewegen, ein Fördermittel ohne eigenen Antrieb oder ein Fördermittel mit eigenem Antrieb mit sich führen. Bewegt er sich ohne Fördermittel fort, verursacht das Tragen von Lasten eine Belastung. Bewegt er sich mit einem Fördermittel ohne eigenen Antrieb fort, ergibt sich das Ziehen oder das Schieben von Lasten durch das Bewegen des Fördermittels. Falls der Kommissionierer sich in diesem Fall teilweise ohne Fördermittel, aber mit einer Last fortbewegt, tritt zusätzlich das Tragen von Lasten auf. Bewegt sich der Kommissionierer mit einem Fördermittel mit

Antrieb, befindet er sich i. d. R. auf dem Fördermittel und führt keine manuellen Lastenhandhabungen während der Fortbewegung durch.

Bei der WzP-Kommissionierung bewegt der Kommissionierer sich nicht fort; das Ziehen, das Schieben oder das Tragen von Lasten tritt somit nicht auf.

Entnahme und Ablage

Bei der Entnahme und Ablage von Artikeln findet sowohl bei der PzW- als auch bei der WzP-Kommissionierung ein Umsetzen von Lasten statt.

Abgabe

Führt der Kommissionierer in der PzW-Kommissionierung die Abgabe aller kommissionierten Artikel durch manuelles Umsetzen durch, wirkt hier ebenfalls eine physische Belastung durch das Umsetzen auf ihn.

Bei der WzP-Kommissionierung verursacht die Abgabe der Ware i. d. R. keine Belastung. Der Mitarbeiter kommissioniert gewöhnlich in einen Behälter, der sich auf Fördertechnik befindet, diese transportiert den Behälter nach der Zusammenstellung des Auftrags ab.

Tabelle 3-1 gibt einen Überblick über die erwähnten möglichen Belastungen. Abhängig von der jeweiligen Gestaltung des Kommissioniersystem können ggf. weitere Belastungen auftreten.

Tabelle 3-1: Kategorisierung der Kommissioniersysteme auf Basis der auf den Kommissionierer wirkenden physischen Belastungen

	Person-zur-Ware	Ware-zur-Person
Fortbewegung	falls ohne Fördermittel: Tragen falls mit Fördermittel ohne Antrieb: Ziehen, Schieben; Tragen falls mit Fördermittel mit Antrieb: keine manuelle Lastenhandhabung	
Entnahme und Ablage	Umsetzen	Umsetzen
Abgabe	falls manuelle Abgabe: Umsetzen	

3.2 Einsatzszenarien

Um eine Methodik zur Belastungsbewertung in der Kommissionierung zu entwickeln, ist zuvor die Festlegung von Einsatzszenarien erforderlich. In diesem Abschnitt werden daher Einsatzszenarien für die Belastungsbewertung im WMS ausgewählt und genauer beschrieben.

Für die Auswahl der Einsatzszenarien wurden zwei Anforderungen festgelegt: Zum einen sollen unterschiedliche Arten der manuellen Lastenhandhabung in den Einsatzszenarien auftreten, zum anderen sollen die Szenarien in der Praxis weit verbreitet sein.

Welche Lastenhandhabungen ein Kommissionierer durchführt, wird sehr stark von der Gestaltung des jeweiligen Systems bestimmt (siehe Abschnitt 3.1). Typische Kommissioniersysteme in der Literatur unterscheiden sich hinsichtlich der durchzuführenden Lastenhandhabungen durch den Mitarbeiter. Kommissioniersysteme lassen sich hinsichtlich der Realisierungsmöglichkeiten von Fortbewegung sowie Entnahme und Ablage kategorisieren.

In Tabelle 3-2 sind beispielhaft in der Literatur erwähnte Kommissioniersysteme [Hom-2011] den einzelnen Kategorien zugeordnet. Für eine Beschreibung der entsprechenden Kommissioniersysteme sei auf ten Hompel [Hom-2011] verwiesen. Die Kommissioniersysteme können je nach genauer Gestaltung auch einer anderen Kategorie zugeordnet werden. Beispielsweise wird bei der „manuellen Kommissionierung – Kombination aus Durchlaufregal und Fachbodenregal“ (Bezeichnung entsprechend der Quelle) ein System mit einer Stetigfördertechnik zur dezentralen Abgabe beschrieben, in dem vermutlich kein Fördermittel eingesetzt wird. Das System könnte aber auch mit einer zentralen Abgabe realisiert werden, in dem ein Fördermittel ohne Antrieb eingesetzt wird. Welcher Kategorie ein Kommissioniersystem zugeordnet wird, ist von der genauen Gestaltung abhängig.

Tabelle 3-2: Zuordnung von Kommissioniersystemen zu Kategorien

Fortbewegung des Kommissionierers	keine	<ul style="list-style-type: none"> • Kommissionierstation mit Behälterregalanbindung • Kommissionierstation mit Shuttlesystemanbindung 	WzP
	ohne Fördermittel	<ul style="list-style-type: none"> • Kommissioniernest • manuelle Kommissionierung mit Bahnhöfen • manuelle Kommissionierung - Kombination aus DLR und FBR 	
	Fördermittel ohne Antrieb	<ul style="list-style-type: none"> • konventionelles Kommissionieren • Kommissioniertunnel 	PzW
	Fördermittel mit Antrieb	<ul style="list-style-type: none"> • Kommissionieren im Hochregal 	

DLR: Durchlaufregal
 FBR: Fachbodenregal
 PzW: Person-zur-Ware
 WzP: Ware-zur-Person

Anhand der gebildeten Kategorien, kann auf die auftretenden Belastungen der Kommissioniersysteme geschlossen werden (siehe Tabelle 3-3), diese sind relevant für die Erfüllung der ersten Anforderung an die Einsatzszenarien. Kommissioniersysteme mit einer besonders hohen Vielfalt unterschiedlicher Lastenhandhabungsarten sind Kommissioniersysteme, bei denen eine manuelle Entnahme stattfindet und der Kommissionierer sich ohne Fördermittel oder mit einem Fördermittel ohne Antrieb fortbewegt. Im ersten Fall findet das Tragen und Umsetzen statt, im zweiten Fall das Ziehen und Schieben, das Tragen sowie das Umsetzen. Zudem bewegt sich der Kommissionierer in beiden Fällen ebenerdig und entnimmt die Ware aus Regalen, dadurch ergeben sich sehr unterschiedliche Körperhaltungen des Kommissionierers beim Umsetzen. Die Systeme sind somit die komplexesten hinsichtlich der Vielfalt an auf den Kommissionierer wirkenden Belastungen.

Tabelle 3-3: Auftretende Lastenhandhabungen je Kategorie

Fortbewegung des Kommissionierers	keine	Umsetzen	WzP
	ohne Fördermittel	Tragen Umsetzen	
	Fördermittel ohne Antrieb	Ziehen, Schieben Tragen Umsetzen	PzW
	Fördermittel mit Antrieb	Umsetzen	

Die zweite Anforderung ist die weite Verbreitung der ausgewählten Szenarien in der Praxis. Im Rahmen von Gesprächen mit Unternehmen aus der Industrie hat sich gezeigt, dass vor allem das konventionelle Kommissionieren sehr verbreitet in der Praxis ist. Daher wurde das konventionelle Kommissionieren vom Fachbodenregal sowie das konventionelle Kommissionieren vom Palettenregal als Einsatzszenarien gewählt, die für die Entwicklung der Methodik zur Belastungsbewertung zu Grunde gelegt werden.

Einsatzszenario 1: konventionelles Kommissionieren vom Fachbodenregal

Das Sortiment an kleinvolumigen Artikeln (Stückgut) wird statisch und dezentral auf einfachtiefen Fachbodenregalen bereitgestellt, welche gassenförmig angeordnet sind. Der Kommissionierer bewegt sich mit einem klassischen Kommissionierwagen ebenerdig fort, das Fördermittel ohne Antrieb wird vom Kommissionierer gezogen oder geschoben. Die Entnahme der zu kommissionierenden Auftragspositionen aus dem Regal erfolgt manuell, diese werden nach der Entnahme direkt auf dem mitgeführten Kommissionierwagen abgelegt. Sind alle Auftragspositionen kommissioniert, bewegt sich der Kommissionierer zur statischen und zentralen Abgabe. Dort erfolgt ggf. erneut ein manuelles Umsetzen der Waren.

Einsatzszenario 2: konventionelles Kommissionieren vom Palettenregal

Im Unterschied zu Szenario 1 wird bei diesem Szenario die Ware auf Palettenregalen bereitgestellt. Außerdem führt der Kommissionierer einen Gabelhubwagen anstatt eines klassischen Kommissionierwagens mit sich, auf welchem sich eine Europoolpalette als Ladehilfsmittel befindet.

3.3 Verfahren zur Belastungsbewertung

Für die Belastungsbewertung im WMS ist die Auswahl eines Verfahrens oder mehrerer Verfahren zur Beurteilung der auftretenden Belastungsarten erforderlich. Im Abschnitt 3.3.1 werden bekannte Verfahren zur Belastungsbewertung vorgestellt. Die vorgestellten Verfahren werden anschließend anhand einer Nutzwertanalyse bewertet und geeignete für die Belastungsbewertung im WMS ausgewählt (Abschnitt 3.3.2). In Abschnitt 3.3.3 werden die ausgewählten Verfahren näher erläutert.

3.3.1 Überblick

Verfahren zur Analyse der physischen Belastung wurden in den vergangenen Jahrzehnten etliche entwickelt und veröffentlicht. Diese analysieren und bewerten die auf den Mitarbeiter wirkenden physischen Belastungen und identifizieren mögliche Risiken. Die Bewertungsverfahren unterschieden sich hinsichtlich der Präzisionsstufe der Analyse sowie den Belastungsarten, die im Verfahren beurteilt werden [Kug-2010].

Die Präzisionsstufe der Analyse spiegelt zum einen den Detaillierungsgrad der Ergebnisse, zum anderen den Aufwand für die Durchführung der Analyse und den erforderlichen Qualifizierungsgrad des analysierenden Personals wider. Ein hoher Detaillierungsgrad der Ergebnisse ist i. d. R. mit einem hohen Durchführungsaufwand sowie einer umfangreichen Einarbeitung in das Verfahren und die Interpretation der Ergebnisse verbunden. Nach Kugler et al. [Kug-2010] lassen sich vier unterschiedliche Verfahrenstypen unterscheiden: Grob-Screeningverfahren, Screening-Verfahren, Detailverfahren (auch Expertenverfahren) sowie Messverfahren. Während Grob-Screening-Verfahren nur identifizieren, welche Belastungsarten mögliche Gefährdungen verursachen, werden Screening-Verfahren für die detailliertere Analyse bestimmter Belastungsarten eingesetzt. Die Detailverfahren erlauben eine vertiefte Beurteilung, während Messverfahren kontinuierlich Belastungsgrößen (z. B. Körperhaltungen und -bewegungen) erfassen. Kugler et al. [Kug-2010] empfehlen ein zweistufiges Vorgehen, in dem zuerst durch die Anwendung eines Grob-Screening-Verfahrens die Belastungsarten mit erhöhten Belastungen identifiziert werden, um diese im Anschluss mit einem vertieften Verfahren gezielt zu analysieren.

Jedes Verfahren deckt bestimmte Belastungsarten ab, die im Rahmen der Analyse und Bewertung betrachtet werden. Die Belastungsarten, die im jeweiligen Verfahren beurteilt werden, unterscheiden sich sehr stark. Es gibt beispielsweise Verfahren, die speziell manuelle Lastenhandhabungen bewerten (z. B. die Leitmerkmalmethoden), aber auch Verfahren, die unterschiedliche Belastungsarten beurteilen (z. B. das European Assembly Worksheet).

Im Folgenden werden bekannte Verfahren vorgestellt, dabei wird jeweils der Aufbau sowie die betrachteten Belastungsarten erläutert. Da sich Messverfahren nicht für die Belastungsbewertung im WMS eignen, wird auf diese nicht näher eingegangen.

Grob-Screeningverfahren

Als Grob-Screeningverfahren bieten sich die Checkliste „Orientierende Beurteilung der Gefährdung zur Auswahl des zu untersuchenden Personenkreises bei Belastungen des Muskel- und Skelettsystems“ der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV) sowie das Assembly Worksheet^{light} an. Beide Verfahren ermöglichen eine schnelle Einstufung von Arbeitsplätzen.

Die **Checkliste der DGUV** [Deu-2009] gliedert sich in die Abschnitte manuelle Lastenhandhabung, erzwungene Körperhaltungen, Arbeit mit erhöhter Kraftanstrengung und/oder Krafteinwirkung, repetitive Tätigkeiten mit hohen Handhabungsfrequenzen, Vibrationen sowie abschließende Beurteilung. Die Abschnitte stehen für die jeweils betrachtete Belastungsart. In der abschließenden Beurteilung wird festgelegt, ob Maßnahmen der arbeitsmedizinischen Vorsorge nach G 46 erforderlich sind.

Das **Assembly Worksheet^{light}** (AWS^{light}) [Kug-2010] ist wie folgt gegliedert: Arbeitsschwere, Arbeitsform, Arbeitsbedingungen sowie Bewertung. Im Abschnitt Arbeitsschwere werden manuell bewegte Lasten und Kraftaufwände ab 3 kg bzw. 30 N eingestuft. Im Abschnitt Arbeitsform sind erzwungene Körperhaltungen sowie ungünstige Bewegungen einzustufen. Bei Arbeitsbedingungen sind Faktoren aus der Arbeitsumgebung einzustufen.

Screeningverfahren

Als Screeningverfahren werden im Folgenden die Leitmerkalmethode Heben, Halten, Tragen; die Leitmerkalmethode Ziehen, Schieben; die erweiterte Leitmerkalmethode; das Multiple-Lasten-Tool; das „Rapid Upper Limb Assessment“; das „Ovako Working Posture Analysing System“ sowie das Verfahren von Wichmann vorgestellt.

Die **Leitmerkalmethode Heben, Halten, Tragen** (LMM HHT) [Ste-2011] dient zur Beurteilung des Hebens, Haltens und Tragens von Lasten. Für die Methode ist es ggf. erforderlich eine Tätigkeit in Teiltätigkeiten zu untergliedern, da eine kumulierte Bewertung nicht möglich ist. Beispielsweise lassen sich das Umsetzen und Tragen nicht gemeinsam bewerten. Wechseln innerhalb einer Teiltätigkeit Lastgewicht oder Körperhaltungen, ist zur Bestimmung der jeweiligen Wichtung das arithmetische Mittel der einzelnen, sich ergebenden Wichtungen zu bilden. Die Leitmerkalmethode Heben, Halten, Tragen gliedert sich in drei Schritte:

1. Bestimmung der Zeitwichtung,
2. Bestimmung der Leitmerkmalwichtungen sowie
3. Bewertung.

Die in Schritt 2 bestimmten Leitmerkmalwichtungen sind Wichtungen von Last, Haltung und Ausführungsbedingungen. Die Bestimmung der Zeit-, der Last-, der Haltungs- und der Ausführungsbedingungs-wichtung erfolgt anhand von Tabellen (siehe Anhang A.1). In der in Schritt 3 stattfindenden Bewertung wird ein Risikowert durch Multiplikation der Zeitwichtung mit der Summe der Leitmerkmalwichtungen berechnet:

$$RW = ZW \cdot (LW + HW + AW) \quad (3-1)$$

mit

RW Risikowert

ZW Zeitwichtung

LW Lastwichtung

HW Haltungswichtung

AW Ausführungsbedingungs-wichtung

Der Risikowert ist ein Maß des Risikos für Muskel-Skelett-Erkrankungen. Anhand einer Bewertungstabelle wird diesem Punktwert einer von vier Risikobereichen zugeordnet (siehe Tabelle A-5), dieser beschreibt die Höhe der Belastung, die Wahrscheinlichkeit einer Überbeanspruchung sowie die Notwendigkeit von Gestaltungsmaßnahmen.

Die **Leitmerkalmethode Ziehen, Schieben** (LMM ZS) [Ste-2008] ermöglicht die Bewertung des Ziehens oder Schiebens von Lasten. Wie bei der LMM HHT ist eventuell die Unterteilung von einer Tätigkeit in Teiltätigkeiten für die Anwendung der Methode erforderlich. Beispielsweise werden das Ziehen oder Schieben über kurze Distanzen (Einzelweg bis zu 5 m lang) getrennt vom Ziehen oder Schieben über längere Distanzen (Einzelweg über 5 m lang) betrachtet. Bei unterschiedlichen Lastgewichten oder Körperhaltungen ist die Bildung von Mittelwerten vor Bestimmung der Wichtung in Schritt 2 erforderlich. Die Methode gliedert sich in die gleichen Schritte wie die Leitmerkalmethode Heben, Halten, Tragen, jedoch sind in Schritt 2 die Leitmerkmale dieser Methode Last/Flurförderzeug, Positioniergenauigkeit/Bewegungsgeschwindigkeit, Körperhaltung und Ausführungsbedingungen.

Ebenso wie bei der Leitmerkalmethode Heben, Halten, Tragen werden alle Wichtungen anhand von Tabellen bestimmt.

Bei der abschließenden Bewertung wird wie auch bei der Leitmerkalmethode Heben, Halten, Tragen die Zeitwichtung mit der Summe der Leitmerkmalwichtungen multipliziert. Führt ein Mann die Tätigkeit aus, entspricht das Produkt dem Risikowert. Bei einer Frau als ausführender Person wird das Produkt anschließend mit dem Faktor 1,3 multipliziert, um den Risikowert zu erhalten. Dieser wird wie bei der Leitmerkalmethode Heben, Halten, Tragen einem von vier Risikobereichen zugeordnet.

Die **erweiterte Leitmerkalmethode** [Wal-2011] ermöglicht die Beurteilung des Umsetzens von Lasten. Sie adaptiert die Leitmerkalmethode Heben, Halten, Tragen für den Einsatz in der Kommissionierung, in welcher häufig sehr unterschiedliche Lastgewichte gehandhabt und dabei verschiedenartige Körperhaltungen eingenommen werden. Walch definiert hierfür den Einzelvorgang, der einem halben Umsetzvorgang entspricht, also entweder Entnahme oder Ablage. Das Verfahren wird genauer in Abschnitt 3.3.3 beschrieben.

Das **Multiple-Lasten-Tool** [Kug-2010] basiert auf den Leitmerkalmethoden Heben, Halten, Tragen und Ziehen, Schieben. Das Tool eignet sich zur Bewertung von Tätigkeiten, bei denen das Umsetzen, Halten, Tragen, Ziehen oder Schieben von Lasten erfolgt. Die unterschiedlichen Belastungsarten werden bei dieser Methode zusammen bewertet. Das Tool ist als Microsoft Office Excel-Vorlage gestaltet, so dass unterschiedliche Gewichte und Häufigkeiten direkt eingegeben werden können. In Abschnitt 3.3.3 wird das Tool genauer erläutert.

Das „**Rapid Upper Limb Assessment**“ (RULA) [McA-1993] eignet sich zur Beurteilung von Arbeitsplätzen, bei denen verstärkt arbeitsbedingte Muskel-Skelett-Erkrankungen im Bereich der oberen Gliedmaßen auftreten. Die Methode fokussiert vor allem die Bewertung erzwungener Körperhaltungen, am Rande werden auch repetitive Tätigkeiten mit hohen Handhabungsfrequenzen betrachtet. Sie gliedert sich in folgende Schritte:

1. Berechnung des Gesamtwerts für Arm und Handgelenk, dieser ergibt sich durch Addition der folgenden drei Werte:
 - a. Haltungswert für Oberarm, Unterarm, Handgelenk, Umwendung des Handgelenks,

- b. Wert für Muskelarbeit und
 - c. Wert für Kraft.
2. Berechnung des Gesamtwerts für Hals, Oberkörper, Beine, dieser ist die Summe der folgenden drei Werte:
 - a. Haltungswert für Hals, Oberkörper, Beine,
 - b. Wert für Muskelarbeit und
 - c. Wert für Kraft.
3. Bestimmung der Gesamtpunktzahl anhand der in Schritt 1 und Schritt 2 ermittelten Gesamtwerte.

Das „**Ovako Working Posture Analysing System**“ (OWAS) [Kar-1977] ist eine Methode zur Bewertung von erzwungenen Körperhaltungen. In der von Karhu et al. erstellten Methode wird ein dreistelliger Ziffercode ermittelt. Ziffer 1 steht für die Haltung des Rückens, Ziffer 2 für die Haltung der Arme und Ziffer 3 für die Haltung der Beine. Für jeden Körperbereich wird dessen Haltung einer Kategorie zugeordnet. Diese spiegelt wider wie komfortabel die Haltung des Körperbereichs ist. Kategorie 1 steht für die angenehmste Haltung, mit steigendem Wert der Kategorie wird die Haltung als unangenehmer eingestuft. Ein Beispiel für die Einstufung einer Körperhaltung ist in Abbildung 3-1 dargestellt. Die Methode wurde in den darauf folgenden Jahren um eine Ziffer für gehandhabte Lasten und eine für den Kopf erweitert [Sto-1985].

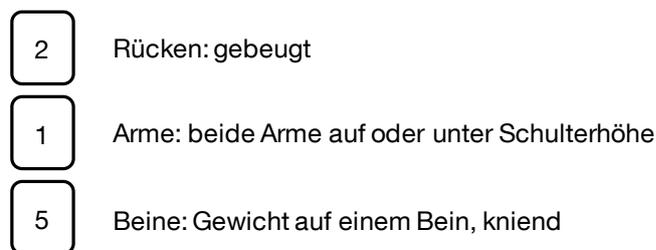


Abbildung 3-1: Exemplarischer dreistelliger Ziffercode für eine Körperhaltung

Das **Verfahren von Wichmann** [Wic-1994] entstand speziell für die Bewertung von Arbeitsplätzen in Kommissioniersystemen. Betrachtet werden als Belastungsarten der physischen Belastung die Lastenhandhabung Heben, Halten, Tragen sowie erzwungene Körperhaltungen. Zudem werden neben der physischen Belastung alle weiteren von Laurig unterschiedenen Belastungstypen untersucht (siehe Abschnitt 2.2).

Das Verfahren legt ein hierarchisches Modell zu Grunde, das die auf den Kommissionierer wirkende Belastung immer feiner untergliedert. Die erste Ebene lehnt sich an die von Laurig vorgestellte Untergliederung der Belastung in Belastungstypen, wie z. B. die energetische Belastung, an. Die Aspekte des jeweiligen Belastungstyps sind in Ebene 2 die sogenannten Belastungsgruppen, z. B. im Fall der energetischen Belastung die Körperhaltung und die Körperbewegung. Jede Belastungsgruppe wird nochmals unterteilt in Belastungsfaktoren, im Fall der Körperbewegung sind Gehen, Handhaben von Gütern und Tragen von Gütern Belastungsfaktoren. Die Ausprägung jedes Faktors wird anhand einer Skala bestimmt. Abbildung 3-2 zeigt die Strukturierung der Belastung in die unterschiedlichen Ebenen.

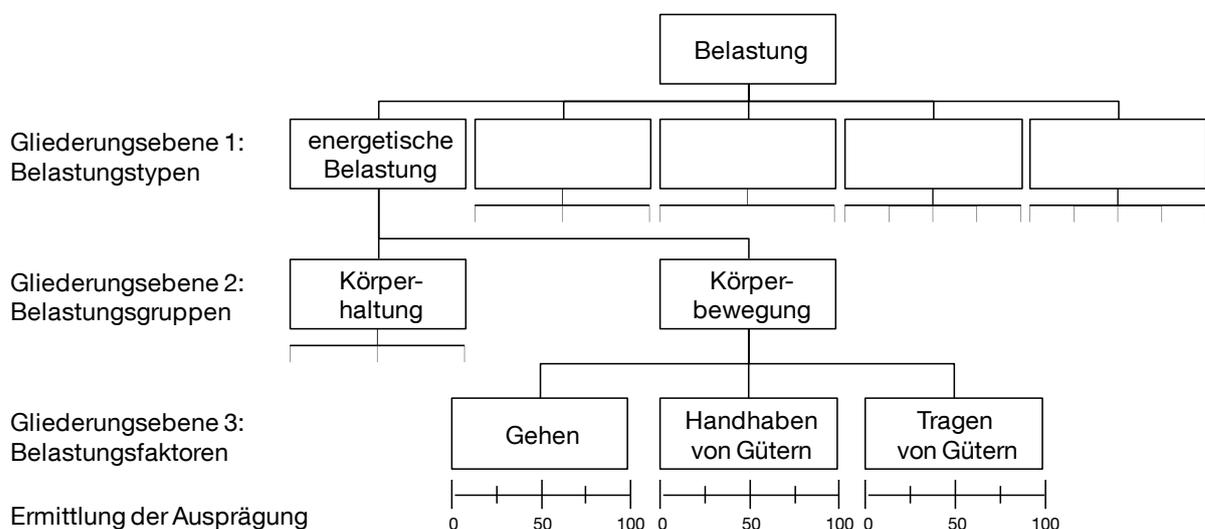


Abbildung 3-2: Strukturierung der Belastung bei Wichmann, in Anlehnung an [Wic-1994]

Der Anwender bestimmt je Belastungsfaktor den Wert der Ausprägung, dieser kann Werte zwischen 0 und 100 annehmen. Der Wert der Belastung wird iterativ über Bildung der gewichteten Summe je Elternknoten gebildet. Die Werte der Gewichtungen sind dabei durch das Verfahren vorgegeben.

Detailverfahren

Detailverfahren sind komplexer im Vergleich zu Screeningverfahren [Kug-2010]. Im Folgenden werden das Automotive Assembly Sheet, das European Assembly Sheet, das Automotive Worksheet plus, das Verfahren des National Institute of Occupational Safety and Health und das Verfahren von Goldscheid vorgestellt.

Das Detailverfahren **Automotive Assembly Sheet** (AAWS) [Sch-2004] wurde insbesondere für Montagetätigkeiten in der Automobilindustrie entwickelt. Das Verfahren umfasst drei Teile:

1. Körperstellung sowie Rumpf-/Armhaltungen,
2. Kräfte/zusätzliche Belastungen sowie
3. manuelles Handhaben von Lasten.

Der erste Teil bewertet erzwungene Körperhaltungen, im zweiten Teil wird Arbeit mit erhöhter Kraftanstrengung und/oder Krafteinwirkung beurteilt. Der dritte Teil dient zur Bewertung der manuellen Lastenhandhabung, dabei wird sowohl das Umsetzen, Halten, Tragen als auch das Ziehen, Schieben anhand von Vereinfachungen der Leitmerkmalmethode Heben, Halten, Tragen und der Leitmerkmalmethode Ziehen, Schieben untersucht.

Aus der Methode entstanden das **European Assembly Worksheet** (EAWS) [Sch-2012] und daraus das **Automotive Worksheet plus** (AAWS+) [Kug-2010], wodurch die drei Verfahren sich sehr ähnlich sind. Ein wesentlicher Unterschied von EAWS und AAWS+ zum AAWS ist ein vierter Teil, der sich mit Belastungen der oberen Extremitäten bei repetitiven Tätigkeiten beschäftigt.

Das **Verfahren des National Institute of Occupational Safety and Health** (NIOSH) [Wat-1993] ermöglicht die Beurteilung des Hebens von Lasten. Im Folgenden wird das NIOSH-Verfahren von 1991 vorgestellt, dieses ist eine erweiterte Version des Verfahrens aus dem Jahre 1981. Das Verfahren eignet sich nur für Hebevorgänge, die bestimmte Voraussetzungen erfüllen. Beispielsweise muss die Lastenhandhabung mit beiden Händen erfolgen. Zuerst wird das „Recommended Weight Limit“ (RWL) bestimmt, dieses ist das empfohlene maximale Lastgewicht. Das RWL berechnet sich durch folgende Formel:

$$RWL = LC \cdot HM \cdot VM \cdot DM \cdot AM \cdot FM \cdot CM \quad (3-2)$$

mit

- LC* Lastkonstante
- HM* Horizontal-Multiplikator
- VM* Vertikal-Multiplikator
- DM* Distanz-Multiplikator

AM Asymmetrie-Multiplikator

FM Frequenz-Multiplikator

CM Kopplungs-Multiplikator

Die Werte der einzelnen Variablen werden durch Formeln oder anhand von Tabellen bestimmt, wobei das RWL in Pfund oder in Kilogramm berechnet werden kann. Sollten sich innerhalb einer Gesamttätigkeit die Hebevorgänge sehr stark unterscheiden, ist der Verfahrensablauf etwas umfangreicher. Es wird hierfür auf Waters [Wat-1993] verwiesen. Im Fall der Betrachtung von nur einem Hebevorgang wird im Anschluss der „Lifting Index“ (LI) gebildet:

$$LI = \frac{\text{Lastgewicht}}{RWL} \quad (3-3)$$

Das Lastgewicht ist hierbei in der gleichen Einheit wie das RWL anzugeben. Ist der LI größer als eins, überschreitet das Gewicht der zu manipulierenden Last das empfohlene Lastgewicht. Der LI kann zur Priorisierung von Gestaltungsmaßnahmen verwendet werden. Beim NIOSH-Verfahren wird im Gegensatz zur Leitmerkmalmethode Heben, Halten, Tragen nicht zwischen Mann und Frau unterschieden.

Das **Verfahren von Goldscheid** [Gol-2007] ist ein Ansatz zur Ermittlung der Wirbelsäulenbelastung in Kommissioniersystemen durch das Heben von Lasten. Das Verfahren bestimmt die auf die Bandscheibe L5-S1 wirkenden Druckkräfte. Die Bandscheibe L5-S1 ist die unterste Bandscheibe und liegt zwischen dem fünften Lenden- und dem ersten Sakralwirbel; sie ist gewählt worden, da sie eine vergleichsweise hohe Schädigungshäufigkeit innerhalb der Lendenwirbelsäule besitzt [Jäg-2002]. Das Verfahren setzt sich aus fünf Schritten zusammen:

1. Analyse der untersuchenden Kommissioniersystems,
2. Analyse der Auftrags-, Leistungs- und Artikelstammdaten,
3. Ermittlung der belastungsspezifischen Einflussgrößen,
4. Ermittlung der Druckkräfte auf die Bandscheibe L5-S1,
5. Analyse der Wirbelsäulenbelastung pro Arbeitsschicht.

Auf Basis der in Schritt 4 ermittelten Druckkräfte in Kilonewton pro Arbeitsschicht und Mitarbeiter wird in Schritt 5 die Häufigkeit der Überschreitung des Richtwerts für die empfohlenen maximalen Druckkräfte in der Lendenwirbelsäule ermittelt. Geschlecht und Alter wirken auf die Höhe des Richtwerts, der Richtwert ist daher ab-

hängig von der betroffenen Personengruppe. Anhand der Häufigkeit der Überschreitungen erfolgt die Bewertung der Belastung pro Arbeitsschicht.

In Tabelle 3-4 sind die von den Verfahren betrachteten Belastungsarten zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 3-4: Überblick über die in den Verfahren bewerteten Belastungsarten, in Anlehnung an [Kug-2010]

Verfahrenstyp	Verfahren	Belastungsarten				
		manuelle Lastenhandhabung		erzwungene Körperhaltungen	Kraftanstrengung/-einwirkung	repetitive Tätigkeiten
		HHT	ZS			
Grob-Screening-Verfahren	Checkliste	X	X	X	X	X
	AWS ^{light}	X	X	X	X	X
Screening-verfahren	LMM HHT	X				
	LMM ZS		X			
	eLMM	X				
	MLT	X	X			
	RULA			X		X
	OWAS			X		
	Wichmann	X		X		
Detailverfahren	AAWS	X	X	X	X	
	EAWS	X	X	X	X	X
	AAWS+	X	X	X	X	X
	NIOSH	X				
	Goldscheid	X				

3.3.2 Bewertung und Auswahl

Für die Bewertung der Verfahren wird die Nutzwertanalyse eingesetzt. Dazu sind folgende Schritte erforderlich: Aufstellung des Zielsystems, Gewichtung der Zielkriterien, Aufstellung der Wertetabelle für den Erfüllungsgrad der Zielkriterien, Berechnung der Nutzwerte und Ermittlung der Rangfolge.

Aufstellung des Zielsystems

Zuerst wird das Zielsystem mit relevanten Zielkriterien aufstellt. Hierbei werden aus dem Hauptziel, der fortlaufenden Belastungsbewertung von Kommissionieren im WMS, die Oberziele abgeleitet. Anhand dieser wird auf bewertbare Zielkriterien geschlossen.

Ein wichtiger Aspekt zur Erreichung des Hauptziels ist die Erfüllung der gewünschten Funktionalität. Zum einen soll das Verfahren die wesentlichen in der Kommissionierung auftretenden Belastungsarten bewerten, zum anderen soll die Bewertung der Belastung nicht nur am Ende einer Schicht, sondern fortlaufend erfolgen. Die fortlaufende Bewertung bedeutet, dass die aktuelle Belastung des Mitarbeiters zu jedem Zeitpunkt abrufbar ist.

Des Weiteren soll die Integration des Verfahrens in das WMS möglich sein. Dazu soll das Verfahren als formale Semantik ausgedrückt werden können, so dass die Umsetzung als Software möglich ist. Außerdem soll die Ermittlung der Eingabedaten des Verfahrens möglich sein, so dass das Verfahren angewendet werden kann.

Daraus ergeben sich die folgenden vier Zielkriterien:

- ZK1: Bewertung der in der Kommissionierung auftretenden Belastungsarten
- ZK2: fortlaufende Bewertung möglich
- ZK3: Methode als formale Semantik beschreibbar
- ZK4: Ermittlung der Eingabedaten möglich

Gewichtung der Zielkriterien

Für die Gewichtung der Zielkriterien wird die Methode „Paarweiser Vergleich“ eingesetzt (siehe Tabelle 3-5). Hierfür werden im ersten Schritt alle zuvor festgelegten Zielkriterien miteinander verglichen und für jedes geordnete Paar bestehend aus zwei unterschiedlichen Zielkriterien ein Punktwert vergeben. Es gibt drei Fälle zur Vergabe der Punktwerte: Komponente 1 ist unwichtiger als Komponente 2 (Punktwert 0); Komponente 1 und Komponente 2 sind gleich wichtig (Punktwert 1); Komponente 1 ist wichtiger als Komponente 2 (Punktwert 2). Im zweiten Schritt wird für jedes Zielkriterium die Summe gebildet, diese setzt sich aus den Punktwerten der geordneten Paare zusammen, bei denen das Zielkriterium die erste Komponente des geordneten Paares ist. Im dritten Schritt wird der Gewichtungsfaktor als Quotient aus dieser Summe und der Summe aller ermittelten Punktwerte gebildet.

Tabelle 3-5: Paarweiser Vergleich zur Bestimmung der Gewichtungsfaktoren

	Komponente 2				Summe	Gewichtungsfaktor
	ZK1	ZK2	ZK3	ZK4		
Komponente 1 Belastungsarten (ZK1)		2	1	1	4	1/3
fortlaufende Bewertung (ZK2)	0		0	0	0	0
formale Semantik (ZK3)	1	2		1	4	1/3
Eingabewerte (ZK4)	1	2	1		4	1/3
Summe					12	1

0: Komponente 1 ist unwichtiger als Komponente 2
 1: Komponente 1 ist genauso wichtig wie Komponente 2
 2: Komponente 1 ist wichtiger als Komponente 2

Aufstellung der Wertetabelle für den Erfüllungsgrad der Zielkriterien

Tabelle 3-6 zeigt, welche Erfüllungsgrade je Zielkriterium festgelegt wurden. Die angegebene Skala für den Zielerfüllungsgrad ist eine Ordinalskala.

Tabelle 3-6: Wertetabelle für den Erfüllungsgrad der Zielkriterien

	Zielerfüllungsgrad			
		1	2	3
Zielkriterium Bewertung der in der Kommissionierung auftretenden Belastungsarten	nein	weniger oder mehr bewertet	nur auftretende bewertet	
fortlaufende Bewertung möglich	nein		ja	
Methode als formale Semantik beschreibbar	nein		ja	
Ermittlung der Eingabewerte möglich	größtenteils nicht	teilweise	größtenteils ja	

Berechnung der Nutzwerte und Ermittlung der Rangfolge

Abschließend wurde die Bewertung der Verfahren durchgeführt. Da Grob-Screening-Verfahren nur identifizieren, welche Belastungsarten mögliche Gefährdungen verursachen, wurden diese nicht betrachtet.

Für jedes Verfahren wurde je Zielkriterium der Zielerfüllungsgrad bestimmt. Anschließend wurde der Teilnutzwert durch Multiplikation des Gewichtungsfaktors mit dem Zielerfüllungsgrad berechnet. Durch Summenbildung der dadurch für ein Verfahren entstehenden Teilnutzwerte wurde der Gesamtnutzwert des Verfahrens gebildet. Die Verfahren wurden nach absteigendem Gesamtnutzwert sortiert (siehe Tabelle 3-7).

Besonders geeignet für das Vorhaben ist das Multiple-Lasten-Tool. Ebenfalls gut geeignet sind die Leitmerkalmethoden Heben, Halten, Tragen und Ziehen, Schieben sowie die erweiterte Leitmerkalmethode.

Für das weitere Vorgehen werden das Multiple-Lasten-Tool sowie die erweiterte Leitmerkalmethode gewählt. Letztere wurde zusätzlich ausgewählt, da sie speziell für die Anforderungen in der Kommissionierung entwickelt wurde.

Tabelle 3-7: Bewertungsverfahren sortiert nach absteigendem Gesamtnutzwert

Verfahren	Erfüllungsgrad des Zielkriteriums				Gesamtnutzwert
	ZK1	ZK2	ZK3	ZK4	
MLT	3	3	3	3	3,0
eLMM	2	3	3	3	2,7
LMM HHT	2	3	3	3	2,7
LMM ZS	2	3	3	3	2,7
NIOSH	2	1	3	3	2,7
AAWS	2	3	3	2	2,3
AAWS+	2	3	3	2	2,3
EAWS	2	3	3	2	2,3
Wichmann	2	1	3	1	2,0
Goldscheid	2	1	1	2	1,7
OWAS	1	1	3	1	1,7
RULA	1	1	3	1	1,7

3.3.3 Ausgewählte Verfahren

In diesem Abschnitt werden die beiden ausgewählten Verfahren näher erläutert. Beide Verfahren beruhen auf den Leitmerkalmethoden. Der tiefgestellte Index i dient zur Nummerierung der Lastenhandhabungen, für die jeweils getrennt Eingaben ermittelt werden. Für eine solche Lastenhandhabung wird im Folgenden der Ausdruck „Handhabungsschritt“ verwendet.

Erweiterte Leitmerkalmethode

Die erweiterte Leitmerkalmethode (eLMM) [Wal-2011] ist eine Methode für die Belastungsbewertung in der Kommissionierung. Sie adaptiert die Leitmerkalmethode Heben, Halten, Tragen, um damit die dort auftretenden Umsetzungsvorgänge beurteilen zu können.

Walch führt die Betrachtung eines halben Umsetzungsvorgangs, den sogenannten Einzelvorgang, ein. Ein Einzelvorgang ist entweder eine Entnahme einer Last aus dem

Regal oder eine Ablage einer Last auf dem Kommissionierwagen. Walch führt diese Betrachtung ein, um die Bestimmung der Haltungswichtung in der Kommissionierung zu vereinfachen. Jeder Einzelvorgang hat *eine* Lastgewicht, *eine* Haltungs- und *eine* Ausführungsbedingungswichtung, welche sich direkt aus der Beobachtung ohne vorherige Mittelwertbildung ergibt. n ist im Folgenden die Anzahl an Umsetzvorgängen, daher gilt für genau einen Einzelvorgang stets:

$$n = 0,5 \tag{3-4}$$

Die Eingaben des Verfahrens für eine Bewertung sind in Tabelle 3-8 dargestellt.

Tabelle 3-8: Eingaben zur Berechnung der Gesamtbewertung

Belastungsart	Beschreibung	Variable
	Geschlecht	g
Umsetzen	Lastgewicht in Kilogramm	LG_i
	Anzahl an Umsetzvorgängen	n_i
	Haltungswichtung	HW_i
	Ausführungsbedingungswichtung	AW_i

Im Verfahren wird zuerst jeder Einzelvorgang oder Vorgangstyp bewertet, bevor anschließend die Gesamtbewertung des Arbeitstages erfolgt.

Die Lastwichtung je Einzelvorgang ergibt sich aus dem Geschlecht der manipulierenden Person und des zu handhabenden Lastgewichts in Kilogramm:

$$LW_i := \begin{cases} 0,7518 \cdot e^{0,064 \cdot LG_i}, & \text{falls } g = m \\ 0,9226 \cdot e^{0,101 \cdot LG_i}, & \text{falls } g = w \end{cases} \tag{3-5}$$

Die Funktion zur Ermittlung der Lastwichtung wurde im Rahmen einer Regressionsanalyse bestimmt. Datengrundlage für die Analyse waren die Klassenmitten der Lastwichtung der Leitmerkmalmethode Heben, Halten, Tragen (siehe Abbildung 3-3).

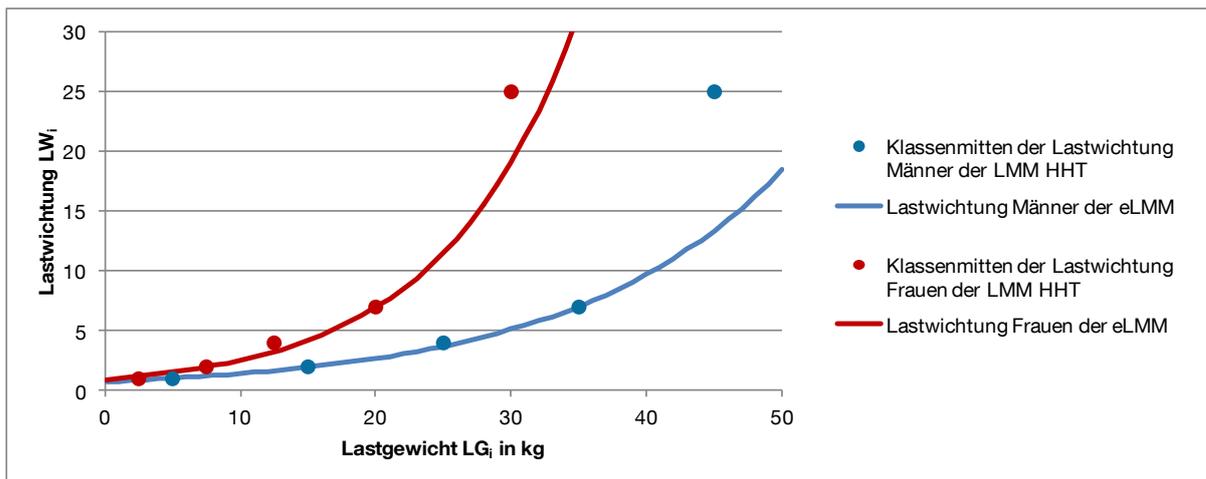


Abbildung 3-3: Abhängigkeit der Lastwichtung vom Lastgewicht

Die Haltungswichtung je Einzelvorgang wird nach den Piktogrammen der Leitmerkmalmethode Heben, Halten, Tragen eingestuft (siehe Tabelle A-3). Bei der Ausführungsbedingungswichtung je Einzelvorgang greift Walch ebenfalls auf die Tabelle der Leitmerkmalmethode Heben, Halten, Tragen zurück (siehe Tabelle A-4). Er nimmt für die Kommissionierung einen Wert der Wichtung von Null an und begründet dies mit den aus Gründen der Arbeitssicherheit überwiegend guten Ausführungsbedingungen in der Kommissionierung.

Die Zeitwichtung berechnet sich mit der folgenden Formel:

$$ZW_i := 0,5852 \cdot n_i^{0,3984} \quad (3-6)$$

Die Formel hat Walch in einem Regressionsverfahren aus den Klassenmitten der Zeitwichtung der Leitmerkmalmethode Heben, Halten, Tragen sowie dazu gehörigen ergänzten und extrapolierten Werten der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin [Bun-2007], die die Leitmerkmalmethode entwickelt hat, bestimmt (vgl. Abbildung 3-4).

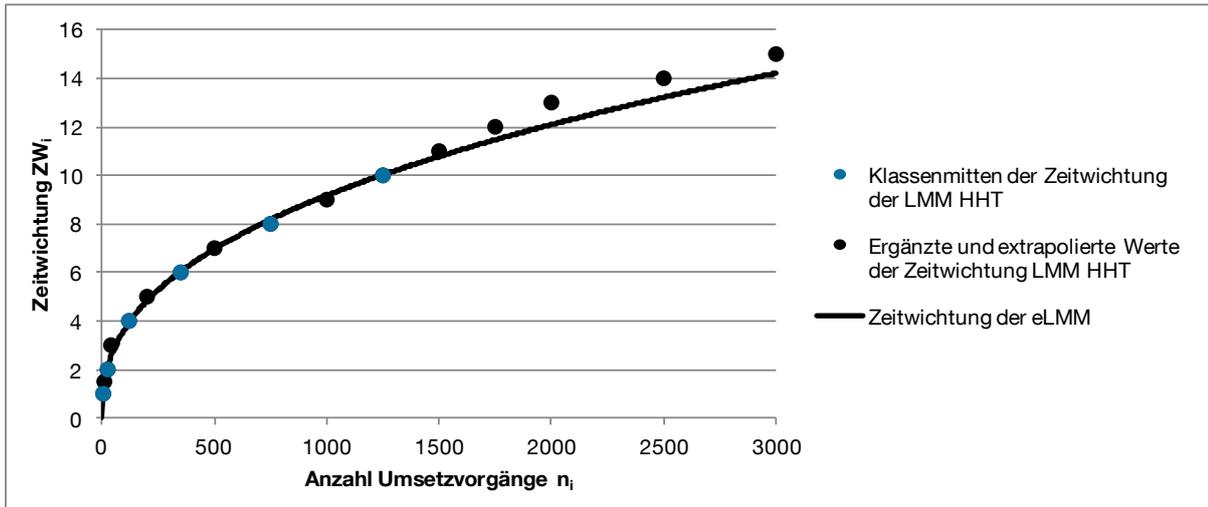


Abbildung 3-4: Abhängigkeit der Zeitwichtung von der Anzahl an Umsetzungsvorgängen

Für genau einen Einzelvorgang ergibt sich:

$$ZW_i = 0,5852 \cdot 0,5^{0,3984} \approx 0,444 \quad (3-7)$$

Haben mehrere Einzelvorgänge identische Leitmerkmalwichtungen, können diese zu einem Vorgangstyp zusammengefasst werden. Die Anzahl der Umsetzungsvorgänge für einen Vorgangstyp ergibt sich durch Addition der Werte der Einzelvorgänge. Die Leitmerkmalwichtungen bleiben identisch. Für k Einzelvorgänge eines Vorgangstyps ergibt sich:

$$ZW_i = 0,5852 \cdot (k \cdot 0,5)^{0,3984} \quad \text{mit } k \in \mathbb{N}^+ \quad (3-8)$$

Der Punktwert je Einzelvorgang oder Vorgangstyp berechnet sich wie folgt:

$$PW_i = ZW_i \cdot (LW_i + HW_i + AW_i) \quad (3-9)$$

Nach Ermittlung aller Punktwerte je Einzelvorgang oder Vorgangstyp wird der Punktwert für die gesamte Tätigkeit (auch Risikowert) ermittelt:

$$RW = \left(\sum_{i=1}^n (PW_i^{\frac{1}{0,3984}}) \right)^{0,3984} \quad (3-10)$$

Dieser lässt sich mit der Bewertungstabelle der Leitmerkmalmethode Heben, Halten, Tragen einem von vier Risikobereichen zuordnen (siehe Tabelle A-5). Ein Risikobe-

reich beschreibt die Höhe der Belastung, die Wahrscheinlichkeit einer Überbeanspruchung sowie die Notwendigkeit von Gestaltungsmaßnahmen.

Multiple-Lasten-Tool

Das Multiple-Lasten-Tool (MLT) [Kug-2010] ermöglicht die Bewertung manueller Lastenhandhabungen, bei denen das Umsetzen, Halten, Tragen, Ziehen oder Schieben von Lasten erfolgt, wobei für die unterschiedlichen Belastungsarten in dieser Methode als Gesamtergebnis *ein* Punktwert ermittelt wird. Während viele Verfahren zu Beurteilung von physischen Belastungen für die Montage entwickelt wurden, war das MLT für Logistkarbeitsplätze in der Materialversorgung mit Routenzügen gedacht. Das Tool ist in einer Microsoft Office Excel-Vorlage implementiert. In einer Tabelle können alle Eingabedaten eingegeben werden, der Risikowert der Tätigkeit errechnet sich automatisch aus den Eingaben durch Formeln.

Bevor die Berechnungen des Verfahrens vorgestellt werden, werden einige Begrifflichkeiten erklärt. Im Folgenden werden fünf Arten der Lastenhandhabung (*LH*) unterschieden, diese sind Umsetzen (*U*), Halten (*H*), Tragen (*T*), Ziehen oder Schieben kurz (*ZSk*) und Ziehen oder Schieben lang (*ZSl*). Diese fünf Handhabungsarten werden in zwei Lastenhandhabungsgruppen (*LHG*) unterteilt: Die erste Gruppe (*UHT*) umfasst das Umsetzen, Halten und Tragen; der zweiten Gruppe (*ZSkZSl*) sind das Ziehen/Schieben kurz und das Ziehen/Schieben lang zugeordnet. Der Ausdruck Gesamttätigkeit bezieht sich auf die Menge aller Lastenhandhabungen des zu beurteilenden Zeitraums.

Im Folgenden werden die Eingaben des Verfahrens, die Berechnungen je Lastenhandhabung sowie die Berechnungen für die Gesamttätigkeit erläutert. Die Berechnungen für die Gesamttätigkeit untergliedern sich in die Ermittlung der Zeitwichtung, weiteren Wichtungen sowie der Gesamtbewertung.

Zur Ermittlung des Gesamtergebnisses ist die Angabe des Geschlechts der durchführenden Person sowie Angaben zu den durchgeführten Lastenhandhabungen erforderlich. Abbildung 3-5 zeigt die Maske für die Eingaben zu den durchgeführten Lastenhandhabungen. Es können mehrere Lastenhandhabungen, die mit einem identischen Lastgewicht stattfinden, in eine Zeile eingetragen werden. Die Eintragungen können aber auch ablauforientiert mit einer neuen Zeile für jede Lastenhandhabung vorgenommen werden. In der Abbildung ausgeblendet sind drei Spalten des Tools, die die Eintragung eines zweiten Umsetzvorgangs in einer Zeile er-

möglichen. Da ein weiterer Umsetzvorgang für ein identisches Gesamtergebnis auch in einer neuen Zeile eingetragen werden kann, wird die Möglichkeit, diesen in die selbe Zeile einzutragen, im Weiteren nicht beachtet.

Gewicht	Umsetzen				Halten			Tragen			Ziehen / Schieben									
	Lastgewicht [kg]	ein- händig	Umsetzen Verladeort Anzahl	1 Haltung	Ausführungs- bedingungen	ein- händig	Halten >5s (sec)	Körper- haltung	Ausführ- beding.	ein- händig	Tragen >5m (m)	Körper- haltung	Ausführ- beding.	ZS kurz Anzahl	ZS lang >5m [m]	Körper- haltung	Ausführ- beding.	Positioniergenauigkeit ZS kurz	ZS lang	Wagen NUR Lenkrollen
120,0	3,0	ja	1	2,0	0										15,00	1,0	0		2	nein
123,0	2,0	nein	1	1,0	0									1		1,0	0	2		nein
	2,0	nein	1	1,0	0															
	1,0	nein	1	1,0	0															
	128,0														10,00	1,0	0		2	nein

Abbildung 3-5: Dateneingabe mittels Eingabemaske

Zur Bestimmung der folgenden Eingabedaten stellt das Tool Tabellen zur Verfügung (siehe Anhang A.2):

- Haltungswichtung beim Umsetzen, Halten, Tragen
- Ausführungsbedingungswichtung beim Umsetzen, Halten, Tragen
- Haltungswichtung beim Ziehen, Schieben
- Ausführungsbedingungswichtung beim Ziehen, Schieben
- Positioniergenauigkeit beim Ziehen, Schieben

In allen Fällen außer bei der Ausführungsbedingungswichtung beim Umsetzen, Halten, Tragen entsprechen die Tabellen denen der Leitmerkalmethoden.

Zusätzlich zu den hier dargestellten notwendigen Eingaben gibt es weitere optionale Eingaben, wie z. B. Werk, Bereich, Analytiker, Datum, Teilenummer, Behälter. Diese werden allerdings nicht zur Ermittlung des Gesamtergebnisses verwendet und daher im Folgenden nicht weiter betrachtet.

In Tabelle 3-9 werden für die notwendigen Eingaben des Tools Variablen definiert.

Tabelle 3-9: Eingaben zur Berechnung der Gesamtbewertung

Belastungsart	Beschreibung	Variable
	Geschlecht	g
	Lastgewicht in Kilogramm	LG_i
Umsetzen	Durchführung einhändig	$h_{i,U}$
	Häufigkeit	$n_{i,U}$
	Haltungswichtung	$HW_{i,U}$
	Ausführungsbedingungswichtung	$AW_{i,U}$
Halten	Durchführung einhändig	$h_{i,H}$
	Dauer in Sekunden	$n_{i,H}^*$
	Haltungswichtung	$HW_{i,H}$
	Ausführungsbedingungswichtung	$AW_{i,H}$
Tragen	Durchführung einhändig	$h_{i,T}$
	Strecke in Meter	$n_{i,T}$
	Haltungswichtung	$HW_{i,T}$
	Ausführungsbedingungswichtung	$AW_{i,T}$
Ziehen/Schieben	ZSk Häufigkeit	$n_{i,ZSk}$
	ZSI Strecke in Meter	$n_{i,ZSI}$
	Haltungswichtung	$HW_{i,ZS}$
	Ausführungsbedingungswichtung	$AW_{i,ZS}$
	Positioniergenauigkeit ZSk	$PG_{i,ZSk}$
	Positioniergenauigkeit ZSI	$PG_{i,ZSI}$
	Wagen nur Lenkrollen	$LR_{i,ZS}$

Um eine Gesamttätigkeit zu beurteilen, werden in einem ersten Schritt bestimmte Berechnungen für jeden Handhabungsschritt durchgeführt. Beim Halten wird die Dauer von Sekunden in Minuten umgerechnet:

$$n_{i,H} := \frac{n_{i,H}^*}{60} \quad (3-11)$$

Die Lastwichtung für das Umsetzen, Halten, Tragen wird wie folgt berechnet:

$$LW_{i,LH} := \begin{cases} 0,7518 \cdot e^{0,064 \cdot h_{i,LH} \cdot LG_i}, & \text{falls } g = m \\ 0,9226 \cdot e^{0,101 \cdot h_{i,LH} \cdot LG_i}, & \text{falls } g = w \end{cases} \quad LH \in \{U, H, T\} \quad (3-12)$$

Für die Belastungsarten Ziehen/Schieben kurz und Ziehen/Schieben lang ist die Lastwichtung:

$$LW_{i,LH} := \begin{cases} t_i, & \text{falls } LR_i = \text{ja} \\ 0,0283 \cdot t_i^3 - 0,1653 \cdot t_i^2 & \text{falls } LR_i = \text{nein} \\ +0,8946 \cdot t_i + 0,1477, & \end{cases} \quad LH \in \{ZSk, ZSl\} \quad (3-13)$$

mit

$$t_i := -0,000008 \cdot LG_i^2 + 0,0136 \cdot LG_i + 0,1054 \quad (3-14)$$

Um die späteren Formeln zu vereinfachen, wird die Variablenbezeichnung für die Haltungswichtung beim Ziehen/Schieben angepasst:

$$HW_{i,LH} := HW_{i,ZS} \quad LH \in \{ZSk, ZSl\} \quad (3-15)$$

Ebenso die Ausführungsbedingungswichtung beim Ziehen/Schieben:

$$AW_{i,LH} := AW_{i,ZS} \quad LH \in \{ZSk, ZSl\} \quad (3-16)$$

Im zweiten Schritt erfolgt die Ermittlung der Zeitwichtung für die Gesamttätigkeit. Pro Handhabungsart wird die Summe der Anzahl, Dauer bzw. Strecke gebildet:

$$n_{LH} := \sum_i n_{i,LH} \quad LH \in \{U, H, T, ZSk, ZSl\} \quad (3-17)$$

Diese wird anschließend in sogenannte Anzahläquivalente überführt. Bei der Gruppe *UHT* wird diese in die Anzahl Umsetzungsvorgänge umgerechnet:

$$n_{LH} := \begin{cases} n_{LH}, & \text{falls } LH = U \\ 7,1236 \cdot n_{LH}^{1,2054}, & \text{falls } LH = H \\ 0,1293 \cdot n_{LH}^{1,1185}, & \text{falls } LH = T \end{cases} \quad (3-18)$$

Damit entspricht beispielsweise 12,77 Sekunden Halten oder 6,23 Meter Tragen einem Umsetzungsvorgang. Bei der Gruppe *ZSkZSl* wird in Anzahl kurze Zieh-/Schiebevorgänge umgerechnet:

$$n_{LH} := \begin{cases} n_{LH}, & \text{falls } LH = ZSk \\ 0,0325139288 \cdot n_{LH}^{1,1119579091}, & \text{falls } LH = ZSl \end{cases} \quad (3-19)$$

Zum Beispiel werden somit lange Zieh-/Schiebevorgänge von in Summe 21,78 Metern einem kurzen Zieh-/Schiebevorgang gleichgesetzt. Der Zusammenhang zwischen den beiden Größen ist in Abbildung 3-6 verdeutlicht. Da bei einem kurzen Zieh-/Schiebevorgang maximal fünf Meter zurückgelegt werden, ist offensichtlich, dass lange Zieh-/Schiebevorgänge zu einem deutlich niedrigeren Anzahläquivalent führen als kurze Zieh-/Schiebevorgänge mit der gleichen insgesamt zurückgelegten Strecke.

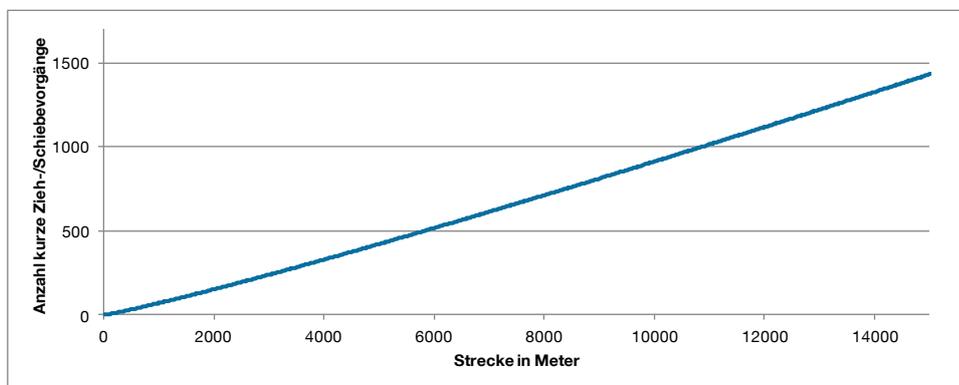


Abbildung 3-6: Umrechnung der Strecke von langen Zieh-/Schiebevorgängen in Anzahl kurzer

Für die Anzahläquivalente wird innerhalb einer Gruppe die Summe gebildet:

$$n_{LHG} := \begin{cases} n_U + n_H + n_T, & \text{falls } LHG = UHT \\ n_{ZSk} + n_{ZSl}, & \text{falls } LHG = ZSkZSl \end{cases} \quad (3-20)$$

Der relative Anteil einer Handhabungsart ist der Quotient aus dessen Anzahläquivalenten und der Summe der Anzahläquivalente seiner Gruppe:

$$\frac{n_{LH}}{n_{LHG}} \quad LH \in \{U, H, T, ZSk, ZSl\} \wedge LHG \in \{UHT, ZSkZSl\} \quad (3-21)$$

Aus den bisher ermittelten Werten kann nun die relative Zeitwichtung bestimmt werden:

$$ZW_{LH,rel} := \left(\frac{n_{LH}}{n_{LHG}} \right) \cdot 0,5782 \cdot n_{LHG}^{0,4002} \quad LH \in \{U, H, T, ZSk, ZSl\} \quad (3-22)$$

Um die Verschleierung von Belastungsengpässen zu vermeiden, wurde zudem die absolute Zeitwichtung für die häufigste Handhabungsart innerhalb einer Gruppe eingeführt [Koo-2010]:

$$ZW_{LH,abs} := 0,5782 \cdot n_{LH}^{0,4002} \quad LH \in \{U, H, T, ZSk, ZSl\} \quad (3-23)$$

Die absolute Zeitwichtung entspricht der relativen Zeitwichtung, wenn die betreffende Handhabungsart die einzige in der Lastenhandhabungsgruppe ist.

Ob für eine Handhabungsart die relative oder die absolute Zeitwichtung als Zeitwichtung verwendet wird, ist abhängig von dessen relativen Anteil. In der Gruppe *UHT* werden die relativen Anteile von Umsetzen, Halten, Tragen verglichen. Die Handhabungsart mit dem echt größten relativen Anteil geht mit der absoluten Zeitwichtung in die Gesamtbewertung ein, die anderen mit der relativen Zeitwichtung. Gibt es keinen echt größten relativen Anteil, gehen alle drei mit der relativen Zeitwichtung in die Gesamtbewertung ein. In der Gruppe *ZSkZSl* werden die relativen Anteile von Umsetzen, Ziehen/Schieben kurz und Ziehen/Schieben lang verglichen. Hat entweder Ziehen/Schieben kurz oder Ziehen/Schieben lang den echt größten relativen Anteil, geht diese Handhabungsart mit der absoluten Zeitwichtung in die Gesamtbewertung ein und die andere Zieh-/Schiebeart mit der relativen. In allen anderen Fällen gehen beide Zieh-/Schiebearten mit der relativen Zeitwichtung in das Gesamtergebnis ein. Für jede Handhabungsart wird die gewählte Zeitwichtung als \overline{ZW}_{LH} gesetzt.

Im dritten Schritt werden die anderen Wichtungen für die Gesamttätigkeit ermittelt, diese sind jeweils ein häufigkeitsgewichteter Mittelwert. Dieser ist bei der Lastwichtung:

$$\overline{LW}_{LH} := \frac{1}{n_{LH}} \cdot \sum_i (n_{i,LH} \cdot LW_{i,LH}) \quad LH \in \{U, H, T, ZSk, ZSl\} \quad (3-24)$$

Der häufigkeitsgewichtete Mittelwert der Haltungswichtung lautet:

$$\overline{HW}_{LH} := \frac{1}{n_{LH}} \cdot \sum_i (n_{i,LH} \cdot HW_{i,LH}) \quad LH \in \{U, H, T, ZSk, ZSl\} \quad (3-25)$$

Der häufigkeitsgewichtete Mittelwert der Ausführungsbedingungsichtung ist:

$$\overline{AW}_{LH} := \frac{1}{n_{LH}} \cdot \sum_i \left(\frac{1}{4} \cdot n_{i,LH} \cdot AW_{i,LH} \right) \quad LH \in \{U, H, T, ZSk, ZSl\} \quad (3-26)$$

Der häufigkeitsgewichtete Mittelwert der Positioniergenauigkeit für das Ziehen/Schieben kurz und das Ziehen/Schieben lang wird analog berechnet.

$$\overline{PG}_{LH} := \frac{1}{n_{LH}} \cdot \sum_i (n_{i,LH} \cdot PG_{i,LH}) \quad LH \in \{ZSk, ZSl\} \quad (3-27)$$

Im vierten Schritt erfolgt die Gesamtbewertung. Für jede Art der Lastenhandhabung wird ein Punktwert bestimmt. Beim Umsetzen, Halten, Tragen wird dieser nach folgender Formel ermittelt.

$$PW_{LH} := \overline{ZW}_{LH} \cdot (\overline{LW}_{LH} + \overline{HW}_{LH} + \overline{AW}_{LH}) \quad LH \in \{U, H, T\} \quad (3-28)$$

Beim Ziehen/Schieben kurz und Ziehen/Schieben lang wird bei der Berechnung des Punktwerts zudem das Geschlecht der durchführenden Person beachtet.

$$PW_{LH} := \begin{cases} \overline{ZW}_{LH} \cdot (\overline{LW}_{LH} + \overline{HW}_{LH} + \overline{AW}_{LH} + \overline{PG}_{LH}), & \text{falls } g = m \\ \overline{ZW}_{LH} \cdot (1,3 \cdot (\overline{LW}_{LH} + \overline{HW}_{LH}) + \overline{AW}_{LH} + \overline{PG}_{LH}), & \text{falls } g = w \end{cases} \quad LH \in \{ZSk, ZSl\} \quad (3-29)$$

Der Punktwert für die gesamte Tätigkeit, der Risikowert, setzt sich aus den Punktwerten je Handhabungsart zusammen:

$$RW := PW_U + PW_H + PW_T + PW_{ZSk} + PW_{ZSl} \quad (3-30)$$

Die Einordnung der Gesamtbewertung in Risikobereiche (siehe Tabelle A-11) ist fast identisch zu der Einordnung in der Leitmerkmalmethode Heben, Halten, Tragen sowie der Leitmerkmalmethode Ziehen, Schieben. Im MLT wurden lediglich die Bereiche 0 bis 10 Punkte und 10 bis 25 Punkte der Leitmerkmalmethoden zu einem Bereich zusammengefasst.

Die Berechnungsmethodik hat den Nachteil, dass es Belastungsspitzen durch die Mittelwertbildung der Wichtungen verschleiert. Daher erfolgt zusätzlich eine Überprüfung auf biomechanisch kritische Lastenhandhabungen, d. h. ungünstige Kombinationen von Lastgewicht und Körperhaltung werden untersucht. Mindestens eine biomechanisch kritische Lastenhandhabung liegt vor, wenn für mindestens eine der Handhabungsarten Umsetzen, Halten, Tragen die folgende Formel wahr ist:

$$\begin{aligned} &(\exists i \in I : (LG_i \geq 10) \wedge (HW_{LH,i} \geq 8)) \\ &\vee (\exists i \in I : (LG_i \geq 20) \wedge (HW_{LH,i} \geq 4)) \quad LH \in \{U, H, T\} \quad (3-31) \\ &\vee (\exists i \in I : (LG_i \geq 40) \wedge (n_{LH,i} > 0)) \end{aligned}$$

wobei I die Menge aller Handhabungsschritte ist.

3.4 Integration in das Warehouse-Management-System

Viele Informationen, die heute im WMS gespeichert sind, lassen Rückschlüsse auf die Eingabedaten der Belastungsbewertung zu. Beispielsweise sind Daten zu Kommissionieraufträgen, zu gelagerten Waren sowie Informationen über die Lagerlogik in der Datenbank des WMS abgelegt. Im Folgenden wird vorgestellt, nach welcher Vorgehensweise eine Belastungsbewertung in WMS integriert werden kann und wie dabei auf die im WMS gespeicherten Daten zurückgegriffen wird.

3.4.1 Analyse des Kommissionierprozesses

Zuerst werden die mit einem Kommissionierauftrag verbundenen Abläufe analysiert, um auftretende manuelle Lastenhandhabungen zu identifizieren. Die Abfolge dieser wird in einem Ablaufdiagramm dargestellt.

Für die in Abschnitt 3.2 vorgestellten Kommissionierszenarien werden folgende Annahmen für den Kommissionierprozess getroffen:

- Es wird von einem Kommissionierer nicht mehr als ein Kommissionierauftrag gleichzeitig bearbeitet.
- Die Positionen des Kommissionierauftrags sind bereits in wegeoptimierter Reihenfolge sortiert.

- Im jedem Lagerbereich gibt es einen definierten Startpunkt, von welchem der Kommissionierer die Erledigung eines Kommissionierauftrags startet. Dieser kann mit der Abgabe identisch sein.
- Der Kommissionierer zieht oder schiebt das Fördermittel bis zum Entnahmestort.
- Die Bearbeitung eines Kommissionierauftrags endet nach erfolgreicher Bearbeitung aller Auftragspositionen an einem definierten Endpunkt für die Abgabe der kommissionierten Ware.

Aus dem festgelegten Kommissionierszenarien sowie den Annahmen ergibt sich das folgende Ablaufmodell (vgl. Abbildung 3-7, links), in dem die Lastenhandhabungen Umsetzen und Ziehen/Schieben vorkommen:

1. Bewegung zum ersten Entnahmestort
2. Entnahme der Artikel aus dem Regal und Ablage auf dem Fördermittel. Die Entnahme und anschließende Ablage wird so oft wiederholt, bis alle Artikel der aktuellen Position kommissioniert sind.
3. Sollten noch weitere Positionen des Auftrags zu bearbeiten, bewegt sich der Kommissionierer anschließend zum nächsten Entnahmestort (weiter mit Punkt 2). Sind bereits alle Positionen des Auftrags eingesammelt, bewegt sich der Kommissionierer zum Abgabestort (weiter mit Punkt 4).
4. Am Abgabestort erfolgt ggf. ein Umsetzen der kommissionierten Waren.
5. Vom Abgabestort bewegt sich der Kommissionierer wieder zum Startpunkt, um den nächsten Auftrag zu erledigen.

Theoretisch sind noch weitere Lastenhandhabungen denkbar, zum Beispiel falls die kommissionierte Ware zu wiegen ist. Diese sind jedoch vom jeweiligen Prozess abhängig und müssen bei der Analyse des Kommissionierprozesses identifiziert und in das Ablaufdiagramm integriert werden.

3.4.2 Programmablaufplan für die Belastungsbewertung

Aus dem Ablaufdiagramm für den Kommissionierprozess lässt sich ein Programmablaufplan für die Umsetzung im WMS erstellen (siehe Abbildung 3-7, rechts).

Da die Bewertungsverfahren für die Tätigkeiten einer Person in einer Schicht konzipiert sind, sind bei *einer* Bewertung die Kommissionieraufträge *eines* Mitarbeiters aus *einer* Schicht relevant. Die Kommissionieraufträge werden in der Reihenfolge

ausgewertet, wie sie vom Kommissionierer bearbeitet wurden. Folglich muss für jeden Kommissionierauftrag der durchführende Mitarbeiter bekannt sein sowie der Zeitpunkt der Fertigstellung des Auftrags. Der Mitarbeiter wird z. B. über seine Mitarbeiter-ID eindeutig identifiziert.

Für jeden Kommissionierauftrag werden für jede Position die Eingabedaten des entsprechenden Verfahrens ermittelt. Einer Position werden immer die Umsetzungsvorgänge für die Artikel der Position sowie der Weg vom Startpunkt oder letzten Entnahmeort zu dieser Position zugeschrieben. Zum Beispiel wird aus dem Geschlecht, dem Artikelgewicht und der zu kommissionierenden Menge das Lastgewicht bestimmt. Direkt im Anschluss an die Bestimmung der Eingabedaten werden bereits die Berechnungen des Verfahrens zur Belastungsbewertung durchgeführt, die zu diesem Zeitpunkt möglich sind. Beispielsweise kann aus dem Geschlecht und dem Lastgewicht bereits die Lastwichtung ermittelt werden. Für die Abgabe wurde die Pseudo-Position $m+1$ eingeführt, hier wird der Weg von letztem Entnahmeort sowie, falls vorhanden, das manuelle Umsetzen bei der Abgabe betrachtet.

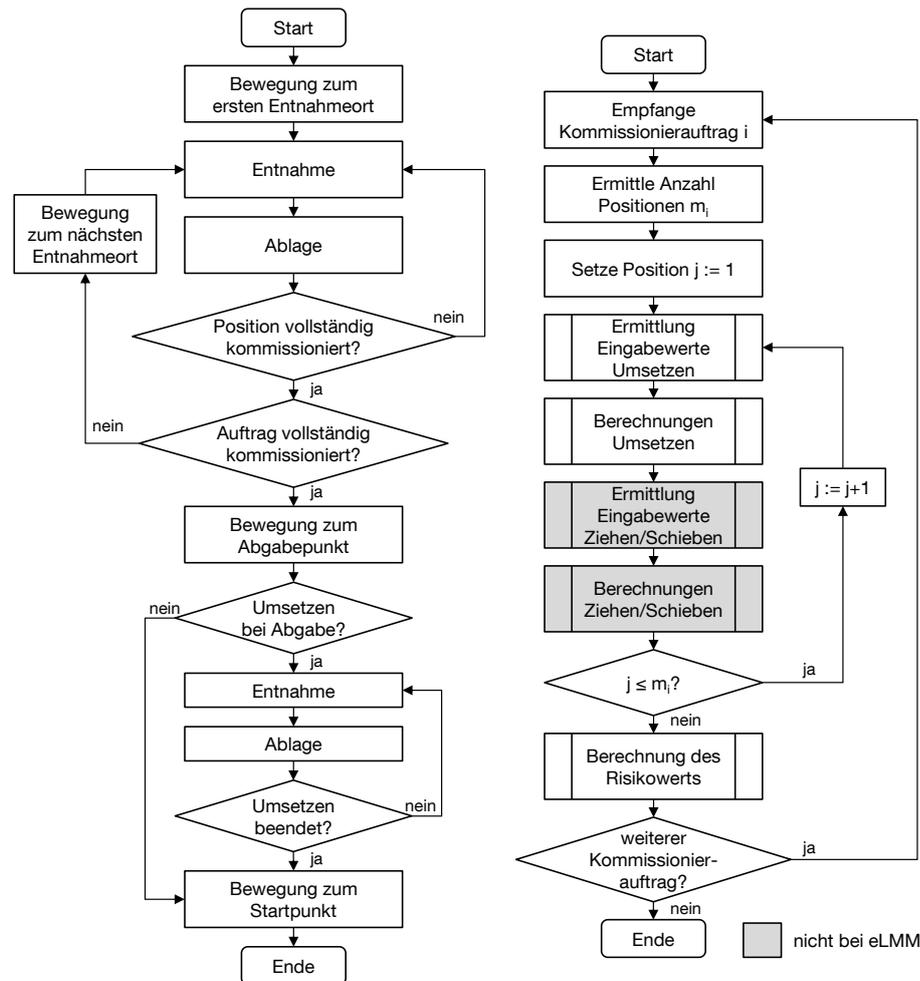


Abbildung 3-7: links: Ablaufdiagramm des Kommissionierprozesses; rechts: Programmablaufplan für die Belastungsbewertung

3.4.3 Logik für die Ermittlung der Eingabedaten

Die Eingabedaten der erweiterten Leitmerkalmethode sowie des Multiple-Lasten-Tools sind weitgehend identisch (siehe Tabelle 3-10). Wesentlicher Unterschied zwischen der eLMM und dem MLT ist die Betrachtung von Umsetzungsvorgängen. Bei der eLMM wird ein Umsetzungsvorgang als zwei halbe Umsetzungsvorgänge gesehen und führt damit zu zwei Handhabungsschritten, deren Eingabedaten sich in der Haltungswichtung unterscheiden. Eine Zusammenfassung der beiden Einzelvorgänge ist nur bei identischer Haltungswichtung zulässig. Beim MLT kann für einen Umsetzungsvorgang als ein Handhabungsschritt betrachtet werden, als Haltungswichtung kann hier der Mittelwert aus Haltungswichtung bei Entnahme und Haltungswichtung bei Abgabe verwendet werden. Eine Betrachtung von zwei Handhabungsschritten mit je einem halben Umsetzungsvorgang führt jedoch zum gleichen Ergebnis. Aus Gründen der besseren Verständlichkeit werden bei beiden Methoden halbe Umsetzungsvorgänge nur zusam-

mengefasst, wenn diese komplett identische Eingaben besitzen, es wird also beim MLT nicht der Mittelwert der Haltungswichtung gebildet, sondern wie bei der eLMM halbe Umsetzvorgänge betrachtet.

Zudem sind für das MLT mehr Eingaben erforderlich als für die eLMM. Beim MLT wird beim Umsetzen zwischen ein- und beidhändigem Umsetzen unterschieden; des Weiteren sind beim MLT Eingaben für die Belastungsart Ziehen/Schieben erforderlich. Das Ziehen/Schieben wird bei der eLMM nicht betrachtet, weshalb auch keine Eingaben dafür erforderlich sind.

Tabelle 3-10: Erforderliche Eingaben für die Berechnung des Gesamtpunktwertes der Tätigkeit

Belastungsart	Eingabe	eLMM	MLT
	Geschlecht	X	X
Umsetzen	Lastgewicht	X	X
	Anzahl	X	X
	Haltungswichtung	X	X
	Ausführungsbedingungswichtung	X	X
	Ein- oder Beidhändigkeit		X
Ziehen/Schieben	Lastgewicht		X
	Anzahl oder Strecke		X
	Haltungswichtung		X
	Ausführungsbedingungswichtung		X
	Positioniergenauigkeit		X
	Wagen nur Lenkrollen		X

X: Eingabe für Bewertung einer Handhabung dieser Belastungsart erforderlich

Im Folgenden wird darauf eingegangen, wie die Eingabedaten der beiden Verfahren bestimmt werden. Daten, die aus der Datenbank des WMS geladen werden, werden im Abschnitt 3.4.4 näher erläutert.

Geschlecht

Das Geschlecht der durchführenden Person wird für jede Beurteilung benötigt.

Umsetzen: Handhabungsschritte, Anzahl Umsetzvorgänge je Handhabungsschritt und Lastgewicht je Handhabungsschritt

Beim Umsetzen der Artikel einer Position können mehrere Umsetzvorgänge stattfinden, daher wird zuerst erklärt, wie die Anzahl der Handhabungsschritte bei einer Po-

sition bestimmt wird. Anschließend wird auf die jeweiligen Eingabedaten je Handhabungsschritt eingegangen. Die Anzahl umgesetzter Artikel bei einem Umsetzungsvorgang wird im Folgenden Entnahmemenge genannt.

Es wird angenommen, dass der Kommissionierer versucht die Artikel mit möglichst wenig Umsetzungsvorgängen zu entnehmen, jedoch für jeden Artikel in Abhängigkeit von seinem Gewicht eine maximale Entnahmemenge existiert. Die maximale Entnahmemenge ist die Menge von einem Artikel, die ein Kommissionierer maximal mit einem Umsetzungsvorgang entnehmen kann. Das zugehörige maximal umgesetzte Lastgewicht wurde anhand von Probandenversuchen bestimmt (siehe Abschnitt 3.5.2), von diesem kann durch das Artikelgewicht auf die maximale Entnahmemenge eines Artikels geschlossen werden. Übersteigt die vom Kommissionierer zu entnehmende Menge bei einer Position die maximale Entnahmemenge, so würde er zuerst so oft wie möglich die maximale Entnahmemenge entnehmen und anschließend, falls noch weitere Artikel zu kommissionieren sind, den Rest. Übersteigt die vom Kommissionierer zu entnehmende Menge die maximale Entnahmemenge nicht, werden die Artikel mit einem Umsetzungsvorgang entnommen. Des Weiteren wird angenommen, dass alle zu kommissionierenden Artikel auch entnommen werden, d. h. es treten beispielsweise keine Fehlmengen auf und dem Kommissionierer unterlaufen keine Mengenfehler.

Außerdem wird ein Umsetzungsvorgang immer in Entnahme und Ablage unterteilt, da hier unterschiedliche Körperhaltungen eingenommen werden. Die sich daraus ergebenden Berechnungen zur Bestimmung der Anzahl an Handhabungsschritte, der Anzahl Umsetzungsvorgänge je Handhabungsschritt und der Lastwichtung je Handhabungsschritt sind in Abbildung 3-8 dargestellt. Die Vergabe des Index für jeden Handhabungsschritt erfolgt ablauforientiert. Es wird hierfür die Menge der natürlichen Zahlen verwendet.

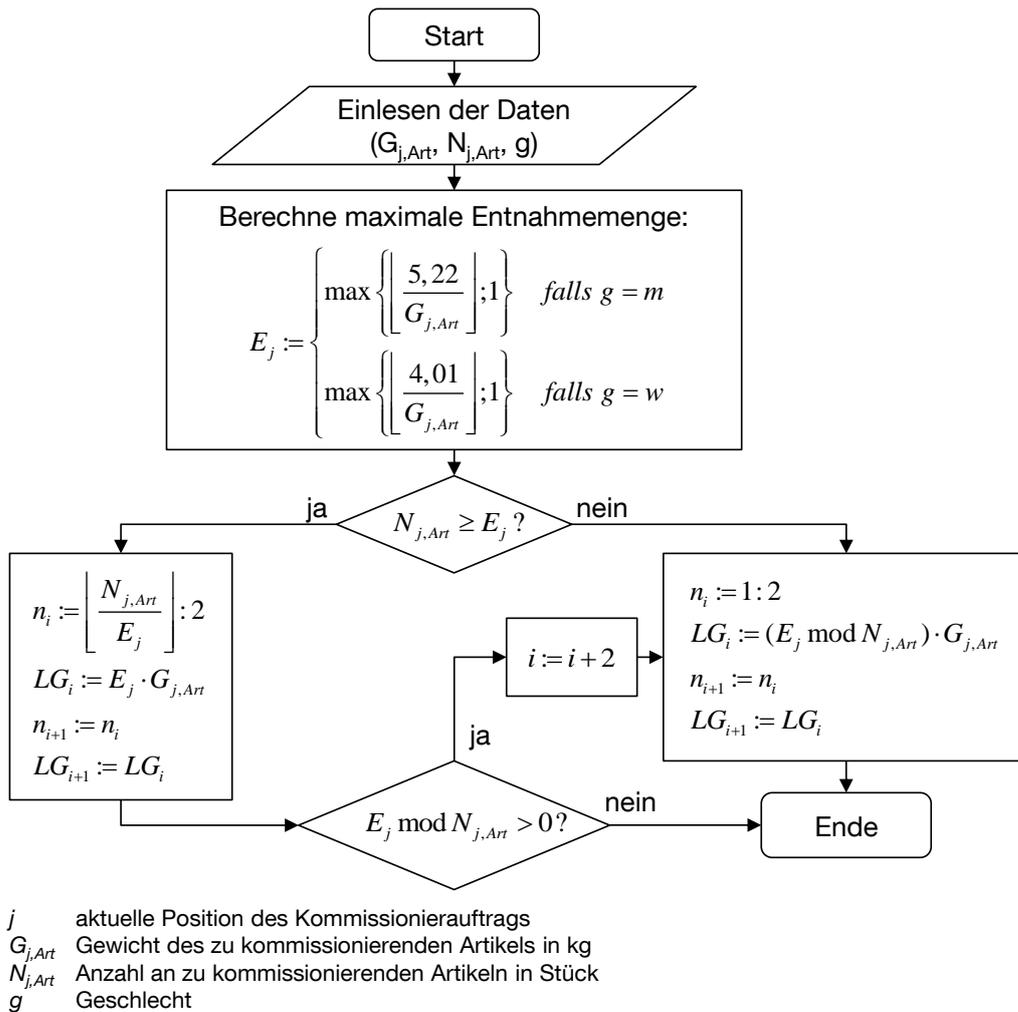


Abbildung 3-8: Bestimmung der Handhabungsschritte, der Anzahl Umsetzungsvorgänge je Handhabungsschritt und des Lastgewichts je Handhabungsschritt

Für die Berechnung ist das Gewicht des zu kommissionierenden Artikels, dessen benötigte Menge sowie das Geschlecht des durchführenden Mitarbeiters erforderlich.

Umsetzen: Haltungswichtung je Handhabungsschritt

Um eine Schätzung der Haltungswichtung zu ermöglichen, wurden Probandenversuche durchgeführt (siehe Abschnitt 3.5.2). Aus den Beobachtungen in diesen wurde mittels Regressionsanalyse eine Funktion abgeleitet, um den Zusammenhang zwischen der abhängigen Variable und unabhängigen Variablen zu schätzen:

$$\begin{aligned}
 y &= \beta_0 + \beta_1 x_1^3 + \beta_2 x_1^2 + \beta_3 x_1 + \beta_4 x_2^3 + \beta_5 x_2^2 + \beta_6 x_2 \\
 &= 4,54 + 0,000007574 \cdot x_1^3 + 0,001599 \cdot x_1^2 + 0,0476 \cdot x_1 \\
 &\quad - 0,00002955 \cdot x_2^3 - 0,002048 \cdot x_2^2 + 0,05142 \cdot x_2
 \end{aligned}
 \tag{3-32}$$

mit

y geschätzter Wert der Haltungswichtung (abhängige Variable)

β_i Regressionskoeffizienten

x_1 Entnahme-/Ablagehöhe minus Schulterhöhe in cm (unabhängige Variable)

x_2 Entnahme-/Ablagetiefe minus Armlänge in cm (unabhängige Variable)

Zur Bestimmung der Schulterhöhe wird bei Männern 30 cm und bei Frauen 28 cm von der Körpergröße der durchführenden Person abgezogen. Die Werte wurden auf Basis des jeweils 50. Perzentils (18-65 Jahre) nach DIN 33402-2 aus der Differenz der Körperhöhe und der Schulterhöhe des jeweiligen Geschlechts ermittelt.

Die Entnahmehöhe des Artikels wird aus der Höhe der Lagerplatzebene H_{LPE} (Abstand untere Ebene zu Boden), der Höhe des Lagerplatzes H_{LP} (Abstand untere zu oberer Ebene) sowie dem Füllstand des Lagerplatzes FG bestimmt:

$$EH = H_{LPE} + H_{LP} \cdot FG \quad (3-33)$$

Der Füllgrad wiederum ist der Quotient aus dem aktuellen Bestand des Lagerplatzes und dem maximal möglichen Bestand des Artikels auf diesem Lagerplatztyp. Die Entnahmetiefe wird von der Regalfront gemessen. Es wird angenommen, dass diese der halben Tiefe des Lagerplatzes entspricht. Als Ablagehöhe wird die Höhe des Fördermittels verwendet. Es ist davon auszugehen, dass die Ablagetiefe sehr gering ist, daher kann ein Wert von Null angenommen werden.

Bei einer Entnahme oder Ablage, über die bereits bekannt ist, dass stets eine sehr gute Haltung eingenommen wird, kann auch eine Haltungswichtung von 1 angenommen werden. Dies wäre beispielsweise bei einer ergonomisch gestalteten Abgabe der kommissionierten Artikel der Fall.

Umsetzen: Ausführungsbedingungs-wichtung je Handhabungsschritt

Die Ausführungsbedingungen in der Kommissionierung sind überwiegend sehr gut. Bedingungen, die zu einer Ausführungsbedingungs-wichtung größer als Null führen, sollten nicht auftreten. Diese sind z. B. eine Arbeitsfläche unter 1,5 m² oder ein unebener Boden. Daher wird eine Ausführungsbedingungs-wichtung von 0 angenommen. Bei abweichenden Werten von 0 könnte die Ausführungsbedingungs-wichtung in der Datenbank des WMS in der Tabelle für die Lagerbereiche gespeichert werden.

Umsetzen: Ein- und Beidhändigkeit je Handhabungsschritt

Beim Kommissionieren ist davon auszugehen, dass der Kommissionierer beide Hände für das Umsetzen von Lasten einsetzen kann. Sollte er nur eine Hand einsetzen, ist das Gewicht vermutlich so gering, dass die Entscheidung hinsichtlich der resultierenden Belastung keine nennenswerte Auswirkung hat. Die einhändige Handhabung führt jedoch zu einer Erhöhung des Lastgewichts um den Faktor 1,7 und damit zu einer deutlichen Erhöhung der Belastung. Es wird daher hier (wie auch bei der Leitmerkalmethode Heben, Halten, Tragen) nicht zwischen ein- und beidhändiger Handhabung unterschieden und stets von beidhändiger Handhabung ausgegangen.

Umsetzen: manuelle Abgabe

Erfolgt bei der Abgabe erneut ein manuelles Umsetzen der kommissionierten Waren, ist dieses bei der Bewertung zu berücksichtigen. Eine Möglichkeit die Eingabedaten für diese Lastenhandhabungen zu ermitteln, ist das Verdoppeln aller Eingabedaten der Belastungsart Umsetzen des zugehörigen Kommissionierauftrags. Verdoppeln bedeutet für jeden existierenden Handhabungsschritt einen neuen Handhabungsschritt mit den gleichen Einträgen zu erstellen, nur der Wert der Haltungswichtung bei der Ablage müsste angepasst werden. Es wird hierbei angenommen, dass das Entladen des Fördermittels analog zur vorherigen Beladung erfolgt. Hierfür ist die Angabe erforderlich, ob manuelles Umsetzen bei der Abgabe stattfindet oder nicht.

Ziehen/Schieben: Anzahl oder Strecke

Bei der Ermittlung der Eingabedaten für Position j wird die Bewegung zur Position j betrachtet. Bei der ersten Position wird somit die Weg vom Startpunkt zum Lagerplatz des Artikels der ersten Kommissionierposition analysiert. Bei allen weiteren Positionen wird die Fortbewegung vom Lagerplatz der vorherigen Position zur aktuellen Position untersucht. Bei der Pseudo-Position $m+1$ für die Abgabe wird die Fortbewegung vom Lagerplatz der letzten Position zur Abgabe betrachtet. Die Betrachtung einer Position eines Kommissionierauftrags führt folglich auch stets zu maximal einem Handhabungsschritt.

Sind im WMS Wegpunkte sowie die Distanzen zwischen diesen gespeichert, können diese für die Ermittlung der zurückgelegten Strecke verwendet werden. Jeder Lagerplatz ist in diesem Fall bereits einem Wegpunkt zugeordnet, Start- und Abgabe-

punkt eines Lagerbereichs werden als Pseudo-Lagerplätze definiert und ebenfalls Wegpunkten zugeordnet. Erforderliche Daten zur Ermittlung der Distanz sind somit der Lagerplatz der aktuellen Position sowie der Lagerplatz der vorherigen Position. Sind keine Distanzen im WMS gespeichert kann eine Abschätzung der Strecke über die Koordinaten der Lagerplätze erfolgen.

In der Praxis wurde beobachtet, dass bis zu einer Strecke von circa 2 Metern das Fördermittel nicht bewegt wurde, daher wird angenommen, dass bei einer Distanz von maximal 2 Metern kein Ziehen oder Schieben auftritt. In diesem Fall wird somit kein Handhabungsschritt für die Bewegung zur Position erstellt und folglich werden auch keine Eingabedaten ermittelt. Ist die Strecke länger als 2 Meter wird ein neuer Handhabungsschritt für einen Zieh-/Schiebevorgang erstellt. Bei einer Strecke über 2 und bis maximal 5 Meter handelt es sich um kurzes Ziehen/Schieben, die Anzahl wird 1 gesetzt. Bei einer Strecke über 5 Meter handelt es sich um einen langen Zieh-/Schiebevorgang, für den die zurückgelegte Strecke als Eingabe dient.

Ziehen/Schieben: Lastgewicht

Das Lastgewicht beim Ziehen/Schieben setzt sich aus dem Eigengewicht des Fördermittels sowie den bereits kommissionierten Waren des aktuellen Kommissionierauftrags zusammen:

$$LG_{j,ZS} = G_{FM} + \sum_{k=1}^{j-1} (N_{k,Art} \cdot G_{k,Art}) \quad (3-34)$$

mit

j aktuelle Position des Kommissionierauftrags

G_{FM} Gewicht des Fördermitteltyps in kg

$N_{k,Art}$ Anzahl an zu kommissionierenden Artikeln von Position k in Stück

$G_{k,Art}$ Gewicht des zu kommissionierenden Artikels von Position k in kg

Für die Ermittlung des Lastgewichts ist die Kenntnis über den verwendeten Fördermitteltyp, das zugehörige Gewicht des Fördermitteltyps, die Anzahl bisher kommissionierter Artikel des Auftrags sowie das Gewicht der jeweiligen Artikel erforderlich.

Ziehen/Schieben: Haltungswichtung

Die Haltungswichtung wurde in den Probandenversuchen (siehe Abschnitt 3.5.2) beobachtet. Es wurde dabei identifiziert, dass die Haltung sehr stark von der Person und dem Fördermitteltyp abhängt und damit die Haltungswichtung eine Konstante in Abhängigkeit von Mitarbeiter und Fördermittel ist. Da es jedoch einen zu großen Aufwand bedeuten würde, diese Information für jeden Kommissionierer und jedes Fördermittel aufzunehmen und zu speichern, wird hier empfohlen den Wert von 2 als Worst Case für alle Mitarbeiter und Fördermittel zu verwenden.

Ziehen/Schieben: Ausführungsbedingungs-wichtung

Analog zu der Ausführungsbedingungs-wichtung beim Umsetzen wird hier der Wert Null angenommen. Ausführungsbedingungen, die einen schlechteren Wert verursachen, wie z. B. ein verschmutzter Fußboden, eine Neigung des Bodens oder Hindernisse im Bewegungsraum sind in der Kommissionierung nicht zu erwarten. Sollte dies doch der Fall sein, kann pro Lagerbereich die zugehörige Ausführungsbedingungs-wichtung in der Datenbank gespeichert werden, auf die zurückgegriffen wird.

Ziehen/Schieben: Positioniergenauigkeit

Die Wichtung der Positioniergenauigkeit hängt von der Bewegungsgeschwindigkeit sowie der erforderlichen Positioniergenauigkeit des Fördermittels ab. Die Bewegungsgeschwindigkeit kann mit 1 m/s angenommen werden, da dies der mittleren Schrittgeschwindigkeit entspricht [Ste-2008]. Die Positioniergenauigkeit in der Kommissionierung ist gering, da der Fahrweg nicht exakt einzuhalten und das Fördermittel nicht exakt zu positionieren ist. Folglich kann in der Kommissionierung auf einen Wert von 2 für die Wichtung der Positioniergenauigkeit geschlossen werden.

Ziehen/Schieben: Wagen nur Lenkrollen

Die in der Kommissionierung eingesetzten Fördermittel haben üblicherweise nicht nur Lenkrollen. Klassische Kommissionierwägen verfügen zudem über Bockrollen, Gabelhubwagen haben entweder Bockrollen oder eine Pendelachse. Damit ist kein erhöhter Stabilisierungsaufwand notwendig, welcher durch ein Fördermittel mit ausschließlich Lenkrollen entsteht. Hier kann daher der Wert „nein“ verwendet werden. Falls Fördermittel mit nur Lenkrollen vorkommen, kann für jeden Fördermitteltyp ein Datenbankeintrag erstellt werden, auf den zugegriffen wird.

3.4.4 Datenbankeinträge für die Ermittlung der Eingabedaten

Für die im vorherigen Abschnitt beschriebene Logik ist das Vorhandensein der für die Berechnung notwendigen Daten erforderlich. Tabelle 3-11 zeigt die erforderlichen Datenbankeinträge je Eingabe der Bewertungsverfahren. Voraussetzungen für eine fortlaufende Belastungsbewertung sind, dass für jeden Kommissionierauftrag der durchführende Mitarbeiter sowie der Zeitpunkt der Fertigstellung bekannt ist.

Tabelle 3-11: Datenbankeinträge für die Belastungsbewertung

Belastungsart	Eingabe	erforderliche Datenbankeinträge
	Geschlecht	Mitarbeiter.Geschlecht
Umsetzen	Handhabungsschritte, Anzahl Umsetzvorgänge je Handhabungsschritt und Lastgewicht je Handhabungsschritt	Artikel.Gewicht Position.MengeArtikel Mitarbeiter.Geschlecht
	Haltungswichtung je Handhabungsschritt	Mitarbeiter.Armlänge Mitarbeiter.Körpergröße Lagerplatzebene.Höhe Lagerplatztyp.Höhe Lagerplatz.Bestand Artikel.maxBestand Lagerplatztyp.Tiefe Fördermittel.Fördermitteltyp Fördermitteltyp.Höhe Lagerbereich.HöheAbgabepunkt
	Ausführungsbedingungswichtung je Handhabungsschritt	Lagerbereich.AusführungsbedingungswichtungU
	Ein- und Beidhändigkeit je Handhabungsschritt	
	manuelle Abgabe	Lagerbereich.manuelleAbgabe
Ziehen/Schieben	Anzahl oder Strecke	Position.Lagerplatz Kommissionierposition.Index Lagerbereich.Startpunkt Lagerbereich.Abgabepunkt Distanzen
	Lastgewicht	Kommissionierauftrag.Fördermittel Fördermittel.Fördermitteltyp Fördermitteltyp.Eigengewicht Kommissionierauftrag.Artikel Artikel.Gewicht
	Haltungswichtung	
	Ausführungsbedingungswichtung	Lagerbereich.AusführungsbedingungswichtungZS
	Positioniergenauigkeit	
	Wagen nur Lenkrollen	Fördermittel.Fördermitteltyp Fördermitteltyp.nurLenkrollen

Ein mögliches Datenschema wird in diesem Abschnitt dargestellt, andere Entwürfe sind ebenso denkbar. Sollten die Maßeinheiten der gespeicherten Daten sich von den in Abschnitt 3.4.3 verwendeten unterscheiden, sind diese vor der Anwendung der Logik anzupassen. Welche von diesen Daten im WMS eines Unternehmens bereits vorliegen und welche noch zu ergänzen sind, ist sehr stark vom jeweiligen WMS abhängig (vgl. Abschnitt 2.1.4).

Kommissionierauftrag (Primärschlüssel KommissionierauftragID)

Attribute des Kommissionierauftrags sind der Zeitpunkt der Fertigstellung, die Identifikationsnummer des Mitarbeiters sowie die des Fördermittels.

Kommissionierposition (Primärschlüssel KommissionierpositionID)

Für jede Kommissionierposition ist der zugehörige Kommissionierauftrag, die Nummer der Zeile des Auftrags, die Artikelnummer des zu kommissionierenden Artikels sowie dessen Anzahl und Lagerplatz erforderlich.

Mitarbeiter (Primärschlüssel MitarbeiterID)

Attribute der Tabelle „Mitarbeiter“ sind das Geschlecht, die Körpergröße sowie die Armlänge. Mitarbeiterbezogene Daten sind in WMS heute nicht vorhanden. Eine Mitarbeiternummer liegt jedoch häufig vor. Die Eintragungen könnten ergänzt werden, ansonsten kann ein „ungünstiger“ Fall hinsichtlich des Risikowerts angenommen werden (Frau, 50. Perzentil).

Lagerbereich (Primärschlüssel LagerbereichID)

Erforderliche Daten für den Lagerbereich sind Startpunkt sowie Abgabepunkt. Diese können z. B. als Lagerplätze definiert werden. Für die Abgabe kann für jeden Lagerbereich angegeben werden, ob hier manuelles Umsetzen erfolgt oder nicht. Ist dies der Fall kann in dieser Tabelle zusätzlich die Höhe der Abgabe eingetragen werden, um die Berechnung der Haltungswichtung zu ermöglichen. Sollte die Ausführungsbedingungswichtung beim Umsetzen oder Ziehen/Schieben ungleich Null sein, können diese ebenfalls hier eingetragen werden.

Lagerplatzebene (Primärschlüssel LagerbereichID und y-Koordinate Lagerplatz)

Für jede Ebene jedes Lagerbereichs wird ihr Abstand zum Boden gespeichert. Es wird hier angenommen, dass die Regale innerhalb eines Lagerbereichs identisch sind und daher die Ebenen mit der gleichen y-Koordinate die gleiche Höhe besitzen.

Lagerplatz (Primärschlüssel LagerplatzID)

Jeder Lagerplatz ist genau einem Lagerbereich sowie genau einem Lagerplatztyp zugeordnet. Die drei Koordinaten des Lagerplatzes geben seine Position innerhalb

des Lagerbereichs an. Ein Datenbankeintrag gibt Auskunft über den aktuell physisch vorhandenen Bestand.

Lagerplatztyp (Primärschlüssel LagerplatztypID)

Für jeden Lagerplatztyp sind die Attribute Höhe und Tiefe gespeichert.

Fördermittel (Primärschlüssel FördermittelID)

Jedes Fördermittel ist von einem bestimmten Fördermitteltyp.

Fördermitteltyp (Primärschlüssel FördermitteltypID)

Für jeden Fördermitteltyp ist dessen Eigengewicht gespeichert, dieses umfasst ggf. auch das Gewicht von sich üblicherweise auf dem Fördermittel befindenden Ladehilfsmitteln (z. B. Europoolpalette). Zusätzliche ggf. erforderliche Informationen in der Datenbank sind, ob das Fördermittel nur Lenkrollen besitzt und welche Ablagehöhe das Fördermittel besitzt. Diese Informationen sind in WMS aktuell nicht gespeichert, lassen sich aber aufgrund der geringen Anzahl an Fördermitteltypen in einen Unternehmen aufwandsarm ergänzen.

Artikel (Primärschlüssel Artikelnummer)

Für jeden Artikel liegen im WMS Informationen zum Artikelgewicht sowie zum maximalen Bestand des Artikels vor.

3.5 Hintergründe zur Logik

In Abschnitt 3.4 wurden bestimmte Annahmen getroffen. In diesem Abschnitt wird vorgestellt, wie die Annahmen hergeleitet wurden.

3.5.1 Einflussfaktoren auf die Eingabedaten

Bei einer Belastungsbewertung im WMS sind die in Abschnitt 3.4 vorgestellten Eingabedaten automatisch zu ermitteln. Jede Eingabe wird von unterschiedlichen Faktoren beeinflusst, die sich auf deren Wert auswirken und bei einer Schätzung des Wertes zu beachten sind. In diesem Abschnitt wird dargestellt, welche Einflussfaktoren auf die jeweiligen Eingaben wirken. Die Einflussfaktoren können sehr vielfältig

sein, daher erhebt die hier genannte Aufzählung (siehe Anhang B) keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Für das Umsetzen umfassen die Eingabedaten Geschlecht, Anzahl, Lastgewicht, Haltungswichtung, Ausführungsbedingungswichtung und Ein- oder Beidhändigkeit (vgl. Abbildung 3-9). Die Anzahl an Umsetzvorgängen bei der Entnahme einer Position ist sehr stark von der zu kommissionierenden Menge, dem Artikelgewicht, der Artikelgeometrie und der individuellen Technik des Kommissionierers abhängig. Wie er die zu kommissionierende Menge auf Handhabungsvorgänge aufteilt, wird sehr stark vom Artikel und vom Kommissionierer beeinflusst. Das in einem Handhabungsvorgang umgesetzte Lastgewicht ergibt sich aus der Anzahl an umgesetzten Artikeln und dem Gewicht eines Artikels. Welche Haltungswichtung sich für einen Umsetzvorgang ergibt, resultiert aus der Körperhaltung sowie aus der Position der Last. Die Ausführungsbedingungswichtung ergibt sich aus ergonomischen Bedingungen und Greifbedingungen. Ob Artikel ein- oder beidhändig umgesetzt werden, ist sehr stark von deren Geometrie und dem zu handhabenden Gewicht abhängig, aber auch die Art der Bereitstellung hat Einfluss und die individuelle Technik des Mitarbeiters haben Einfluss hierauf.

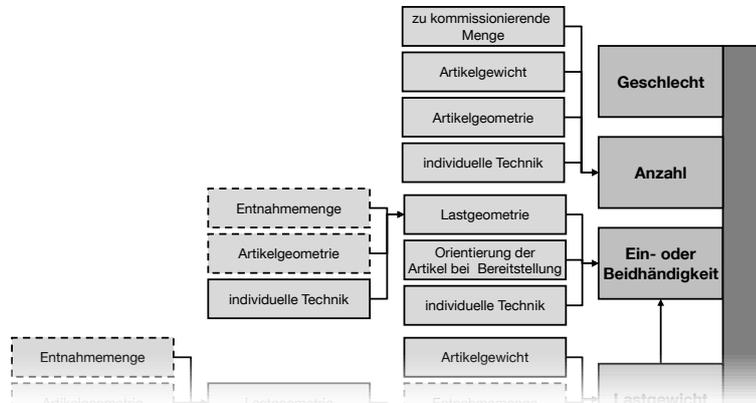


Abbildung 3-9: Darstellung der Einflussfaktoren auf die Eingabedaten beim Umsetzen (vollständige Abbildung siehe Abbildung B-1)

Eingabedaten des Ziehen/Schiebens sind Geschlecht, Anzahl (bei kurzem Ziehen/Schieben) oder Strecke (bei langem Ziehen/Schieben), Lastgewicht, Haltungswichtung, Ausführungsbedingungswichtung, „Wagen nur Lenkrollen“ und Positioniergenauigkeit (siehe Abbildung 3-10). Die Eingabe für Anzahl oder Strecke hängt von der zurückgelegten Strecke des Kommissionierers ab. Das Lastgewicht beim Ziehen/Schieben setzt sich aus dem Gewicht des Fördermittels sowie dessen Beladung zusammen. Die Beladung des Fördermittels sind vor allem die bereits kom-

missionierten Artikel. Die Haltungswichtung hängt nur von der Körperhaltung des Mitarbeiters ab. Diese resultiert wiederum aus den Maßen des Körpers, dem zu bewegenden Lastgewicht, dem verwendeten Fördermittel sowie auch der Technik des Mitarbeiters. Bei der Ausführungsbedingungs-wichtung ist die Neigung und der Zustand des Bodens, das Vorhandensein von Hindernissen sowie der Zustand der Rollen relevant. Ob ein Wagen nur Lenkrollen hat, hängt vom verwendeten Fördermittel ab. Der Wert für die Positioniergenauigkeit ergibt sich aus der Bewegungsgeschwindigkeit und dem Steuerungsaufwand des Fördermittels (z. B. durch häufige Richtungsänderungen).

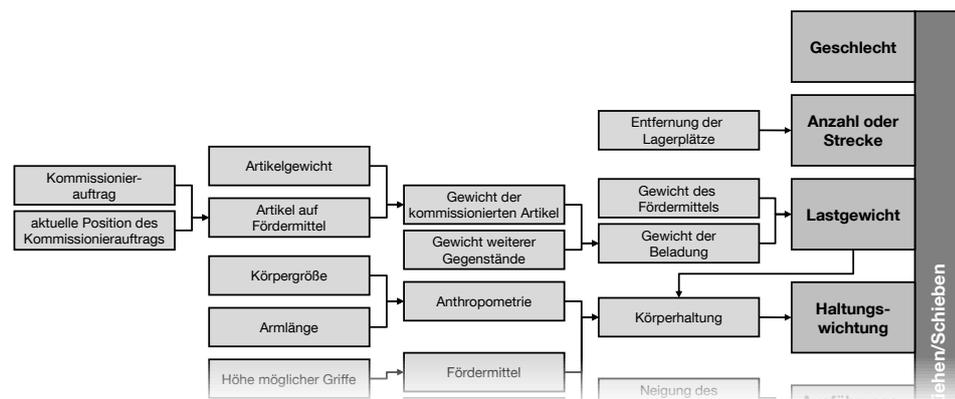


Abbildung 3-10: Darstellung der Einflussfaktoren auf die Eingabedaten beim Ziehen/Schieben (vollständige Abbildung siehe Abbildung B-2)

3.5.2 Probandenversuche

Auf Basis der Vorüberlegungen zu den Einflussfaktoren auf die Eingabedaten wurden im Rahmen von Probandenversuchen Einflussfaktoren gezielt variiert und die sich ergebenden Werte beobachtet. Die untersuchten Werte waren die Höhe des maximal umgesetzten Lastgewichts, die Haltungswichtung beim Umsetzen sowie die Haltungswichtung beim Ziehen/Schieben. Die Daten wurden erhoben, um anhand von diesen Beobachtungen Rückschlüsse auf das Verhalten eines Kommissionierers zu ziehen. Anhang C zeigt die erhobenen Daten.

Probanden

An der Untersuchung nahmen 34 Personen (27 Männer, 7 Frauen) im Alter von 20 bis 35 Jahren (Mittelwert: 27,15 Jahre, Standardabweichung: 3,94 Jahre) teil. Die Körpergröße der Personen betrug zwischen 162 und 187 cm (Mittelwert: 178,15 cm, Standardabweichung: 7,48 cm) und die Armlänge, die von Schulterreckgelenk bis

Daumenansatz gemessen wurde, zwischen 48,0 und 68,5 cm (Mittelwert: 58,91 cm, Standardabweichung: 4,02 cm). Aufgrund der nicht zufälligen Auswahl der Stichprobe besteht kein Anspruch, auf die Grundgesamtheit zu schließen.

Versuchsdurchführung

Jeder Proband führte Versuche an drei Stationen durch. Vor jeder Station erfolgte eine einheitliche, mündliche Unterweisung über die durchzuführenden Lastenhandhabungen. Nach der Unterweisung führte der Proband die Lastenhandhabungen durch. Während der Durchführung wurde er auf Video aufgenommen (Station 1 und Station 2) oder fotografiert (Station 3).

Station 1: Höhe des maximal umgesetzten Lastgewichts

Bei Station 1 führte jeder Proband 12 Versuche durch. In jedem Versuch setzte der Proband 11 von 15 identischen Kartons von einem definierten Entnahmeort zu einem definierten Ablageort um (siehe Abbildung 3-11 und Abbildung 3-12). Die Entfernung zwischen beiden Orten betrug 1,4 m. Die einzelnen Versuche unterschieden sich durch die Größe und das Gewicht der Kartons:

- Größen: 20 x 10 x 10 cm (S); 20 x 15 x 15 cm (M); 30 x 20 x 20 cm (L)
- Gewichte: 0,5 kg; 1 kg; 2 kg; 3 kg

Die Reihenfolge der Versuche wurde variiert, so dass Lern- und Ermüdungseffekte vermieden wurden. Bei jedem Versuch wurde beobachtet, wie viele Kartons vom Probanden maximal auf einmal umgesetzt wurden, woraus auf das maximal umgesetzte Lastgewicht geschlossen wurde.

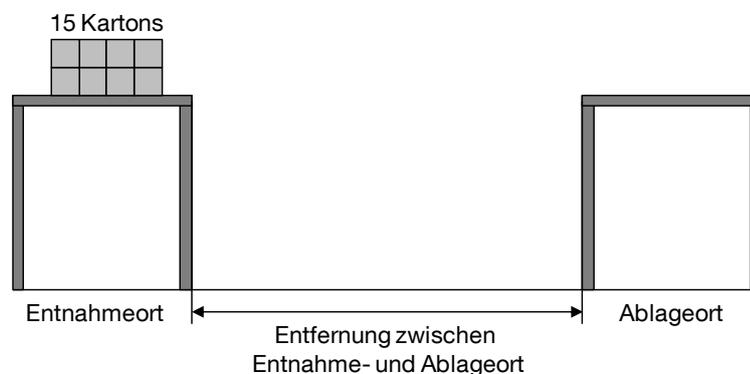


Abbildung 3-11: Versuchsaufbau



Abbildung 3-12: Durchführung des Versuchs

Station 2: Haltungswichtung beim Umsetzen

Bei der zweiten Station entnehmen die Probanden in jedem Versuchen einen Karton aus einem Fachbodenregal mit 5 Ebenen (siehe Abbildung 3-13). Die Ebenenhöhen betragen 13 cm, 53 cm, 93 cm, 133 cm und 173 cm. Für jede Entnahme wurde die Haltung des Probanden beobachtet und ein Wert für die Haltungswichtung vergeben.

In den ersten 15 Versuchen betragen die Abmessungen des Kartons 25 x 31 x 21,8 cm und die Distanz zwischen Front des Kartons und Regalfront stets 0 cm. Variiert wurde das Lastgewicht des Kartons (5 kg; 10 kg; 15 kg) sowie die Ebene, auf welcher sich dieser für die Entnahme befindet.

In den nächsten 20 Versuchen entnahm der Proband jeweils einen 500 g schweren Karton mit den Abmessungen 15 x 20 x 20 cm aus dem Regal. Der Karton wurde auf jede der Ebenen bei jeweils vier unterschiedlichen Tiefen entnommen. Die Distanz zwischen Vorderseite des Kartons und der Regalfront betrug dabei 0 cm, 20 cm, 40 cm sowie 60 cm.

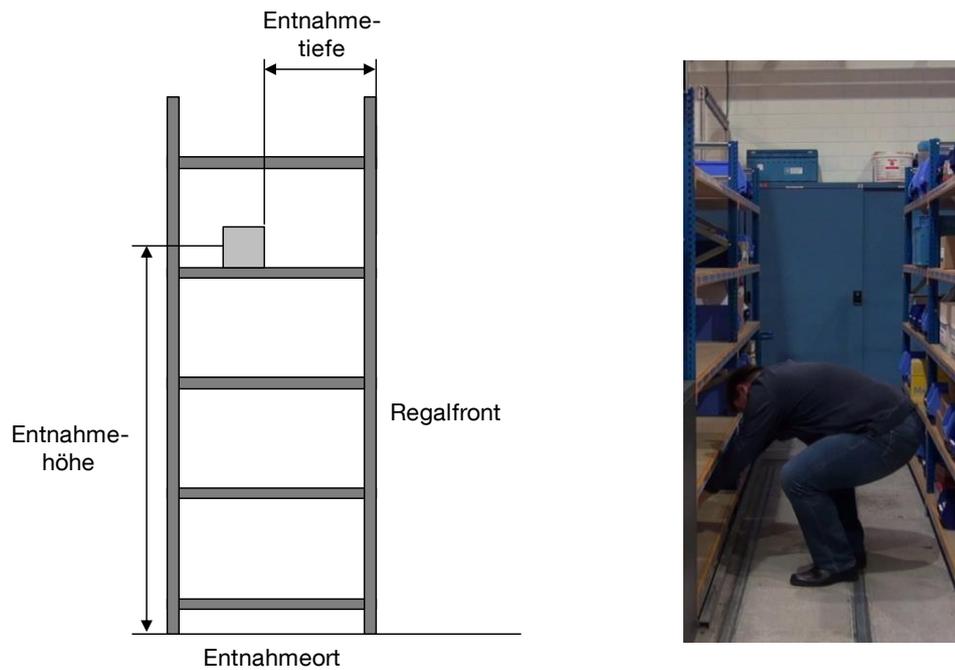


Abbildung 3-13: links: Versuchsaufbau; rechts: Durchführung des Versuchs

Station 3: Haltungswichtung beim Ziehen/Schieben

Bei Station 3 zogen oder schoben die Probanden ein Fördermittel (siehe Abbildung 3-14). In 12 Versuchen je Proband wurde der Fördermitteltyp (kleiner Kommissionierwagen; großer Kommissionierwagen; Gabelhubwagen) sowie das Gewicht der Beladung (40 kg; 60 kg; 80 kg; 100 kg) variiert.

Bei jedem Versuch wurde die Haltung des Probanden einige Meter nach dem Start des Zieh-/Schiebevorgangs beobachtet und ein Wert für die Haltungswichtung vergeben.



Abbildung 3-14: Durchführung des Versuchs

Ergebnisse

Die erhobenen Daten wurden für jeden Probanden einzeln erfasst. Anschließend wurden die Ergebnisse mit denen der anderen Probanden zusammengeführt und ausgewertet. Für die Auswertung wurde die Statistik-Software R eingesetzt.

Station 1: Höhe des maximal umgesetzten Lastgewichts

Bei der Untersuchung des Einflusses von Größe und Gewicht der Kartons auf das maximale umgesetzte Lastgewicht ergaben sich keine erkennbaren Zusammenhänge bei der grafischen Analyse. Eine große Streuung ergab sich sogar innerhalb eines Versuchs, d. h. bei Kartons einer Größe und eines Gewichts, beim Vergleich des maximal umgesetzten Lastgewichts aller Probanden eines Geschlechts (siehe Abbildung 3-15). Es ist lediglich erkennbar, dass mit steigendem Kartongewicht das maximal umgesetzte Lastgewicht ebenfalls anstieg.

Die Mittelwerte des maximal umgesetzten Lastgewichts waren 5,22 kg (Männer) und 4,01 kg (Frauen). Diese wurden in der Logik für die Ermittlung der Eingabedaten als maximal umgesetztes Lastgewicht zur Bestimmung der maximalen Entnahmemenge verwendet (siehe Abschnitt 3.4.3).

Diese Annahme stellt nur eine Näherung an die Realität dar. Hier sind weitere Untersuchungen notwendig, die identifizieren, von welchen Faktoren das umgesetzte Lastgewicht beeinflusst wird und wie sich diese auf das tatsächlich umgesetzte Gewicht auswirken.

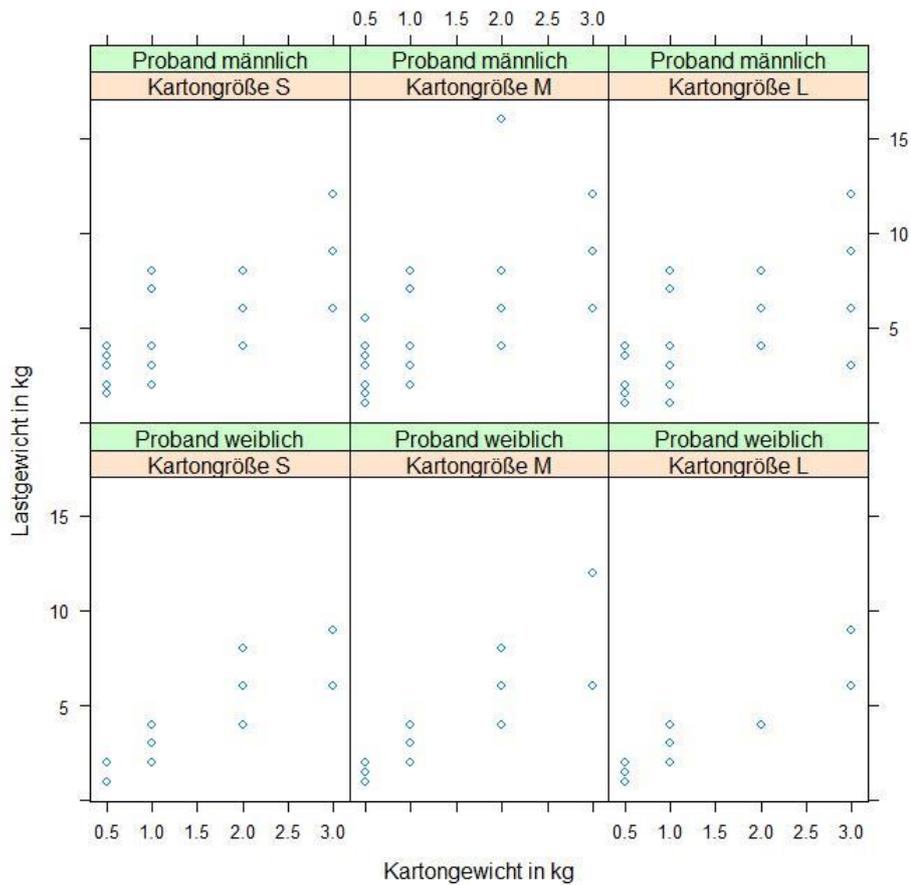


Abbildung 3-15: Grafische Analyse der erhobenen Daten

Station 2: Haltungswichtung beim Umsetzen

Die Daten von Station 2 dienen zur Analyse des Einflusses von Lastgewicht, Entnahmehöhe und Entnahmetiefe auf die Haltungswichtung beim Umsetzen. Für die Auswertung wurde angenommen, dass sich die Entnahmehöhe aus dem Abstand der Regalebene zum Boden sowie der halben Höhe des Kartons zusammensetzt. Die Entnahmetiefe entsprach der Distanz zwischen Vorderseite des Kartons und der Regalfront. Wurde ein zu entnehmender Karton nicht erreicht, wurde der Datensatz für diese Entnahme bei der Auswertung nicht beachtet. Dies war bei 26 von 1190 Datensätzen der Fall.

Die erhobenen Daten wurden in einem ersten Schritt grafisch analysiert, um Zusammenhänge zu identifizieren. Die Auswirkung des Lastgewichts auf die Haltungswichtung war sehr klein, weshalb dieser Einflussfaktor in der weiteren Analyse nicht weiter beachtet wurde. Ein deutlicher Zusammenhang ergab sich aus der Entnahmehöhe und der Entnahmetiefe auf die beobachtete Haltungswichtung.

Im zweiten Schritt wurden Regressionsanalysen durchgeführt mit dem Ziel, den Zusammenhang zwischen messbaren Größen und der beobachteten Haltungswichtung quantitativ zu beschreiben. Für die Haltungswichtung sind neben den gezielt variierten Einflussfaktoren auch die Maße des Menschen relevant. Beispielsweise führt eine Last über Schulterhöhe automatisch zu einem Wert von mindestens 4. Daher wurden die Körpergröße und die Armlänge des Probanden in die Analyse einbezogen, obwohl diese nicht gezielt variiert wurden, sondern sich aus der Stichprobe ergaben.

Im Rahmen der Analysen wurde eine Funktion ermittelt, die den gesuchten Zusammenhang gut quantifiziert. Die abhängige Variable dieser Funktion ist die Haltungswichtung, die unabhängigen Variablen sind die Differenz aus Entnahmehöhe und Schulterhöhe sowie die Differenz aus Entnahmetiefe und Armlänge. Die Schulterhöhe wurde auf Basis der Körpergröße berechnet. Bei Frauen wurden 28 cm, bei Männern 30 cm von der Körpergröße abgezogen (Ermittlung auf Basis des jeweils 50. Perzentils nach DIN 33402-2).

Abbildung 3-16 zeigt die Plots der Residuenanalyse. Die in den Versuchen bestimmte Haltungswichtung ist ein diskretes Merkmal. Durch die Ordinalskala dieser Zielgröße ergibt sich die Struktur der Wertepaare in den Diagrammen 1 und 3. Eine kontinuierliche Skala für die Zielgröße eliminiert jedoch Sprünge und wurde daher zur Bestimmung der Zielgröße gewählt. Lineare Regressionsmodelle setzen eine Normalverteilung des Fehlerterms voraus. Der Q-Q-Plot zeigt, dass die standardisierten Residuen normalverteilt sind und daher die Voraussetzung erfüllen. Im Leverage-Plot ist erkennbar, dass es keine Messung gibt, die einen besonders großen Einfluss auf die Regressionskoeffizienten hat.

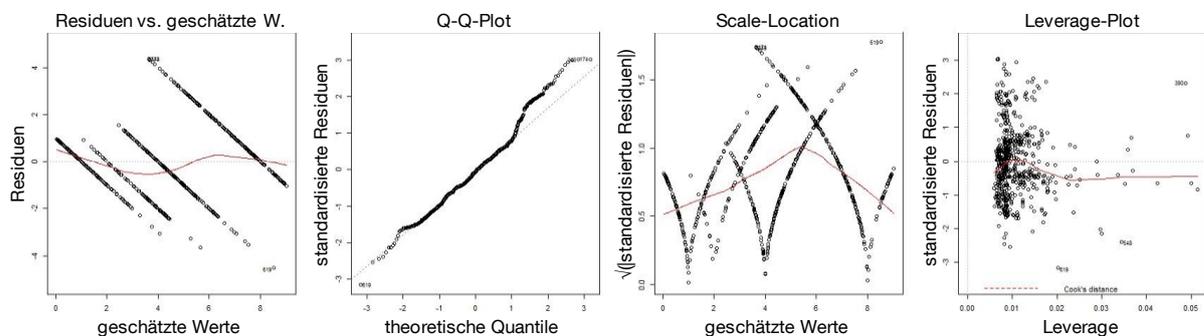


Abbildung 3-16: Plots der Residuenanalyse

Zur Prüfung der Regressionsfunktion wurde das korrigierte Bestimmtheitsmaß sowie der F-Test herangezogen. Das korrigierte Bestimmtheitsmaß der Regression lag bei

einem Wert von 0,7194. Die Funktion ist damit als Mittel zur Trendanalyse der Haltungswichtung gut geeignet. Der p-Wert des F-Tests betrug $2,2 \cdot 10^{-16}$, wodurch dieser unter dem geforderten Signifikanzniveau von 0,05 liegt, die Nullhypothese kann damit verworfen werden.

Die Tests auf Signifikanz einzelner Regressionskoeffizienten wurden mit Hilfe partieller t-Tests durchgeführt. Alle p-Werte unterschreiten den geforderten Wert von 0,05 deutlich. Die Ergebnisse der Tests sind somit ebenfalls signifikant. Die sehr hohe Signifikanz kann in Zusammenhang stehen mit der Abhängigkeit von Messwerten, die aus der mehrfachen Beobachtung der Haltungswichtung eines Probanden resultiert.

Für die Bestimmung der Haltungswichtung eines halben Umsetzungsvorgangs im WMS wurde die hier ermittelte Funktion verwendet (vgl. Abschnitt 3.4.3).

Station 3: Haltungswichtung beim Ziehen/Schieben

Bei Station 3 ergab die Analyse der Ergebnisse einen starken Zusammenhang zwischen beobachteter Haltungswichtung beim Ziehen/Schieben sowie Proband und Fördermitteltyp. Der Einfluss des Lastgewichts war gering.

Alle beobachteten Haltungswichtungen lagen im Intervall zwischen 1 und 2. Eine Haltungswichtung von 1 wurde in 31 % der Versuche, eine Haltungswichtung von 1,5 in 14 % der Versuche und eine Haltungswichtung von 2 in 55 % der Versuche beobachtet.

Da die Analyse der Haltungswichtung beim Ziehen/Schieben für die Praxis einen zu großen Aufwand bedeutet, wurde für die Implementierung im WMS der Worst Case einer Haltungswichtung von 2 gewählt (siehe Abschnitt 3.4.3).

3.6 Exkurs: Belastungszulage

Die Belastungsbewertung im WMS ermöglicht das Abgelten von Belastungen durch eine Belastungszulage beim Entgelt.

Im Entgeltraahmen-Tarifvertrag (ERA-TV) der IG Metall-Baden-Württemberg haben die Tarifvertragsparteien eine Belastungszulage beim Entgelt vereinbart. Der Verdienst setzt sich damit aus Grundentgelt, Leistungsentgelt und Belastungszulage

zusammen. Belastungen aus der Arbeitsaufgabe sowie aus der Arbeitsumgebung sind mit Punkten zu bewerten, welche für die Ermittlung der Belastungszulage herangezogen werden. Die betrachteten Belastungsarten sind: Muskeln, Reizarmut sowie Umgebungseinflüsse.

Die in diesem Kapitel vorgestellte Belastungsbewertung kann für die Bewertung der Belastung durch manuelle Lastenhandhabungen eingesetzt werden, um diese standardisiert zu beurteilen und die Ergebnisse als Eingabe zur Entgeltberechnung zu verwenden. Für die Ermittlung des Entgelts eines Mitarbeiters inklusive Belastungszulage wird folgende Formel vorgeschlagen:

$$e := e_{ob} + \frac{b_{bez}}{r_{bez}} \cdot r \quad (3-35)$$

mit

e_{ob} Entgelt ohne Belastungszulage in Geldeinheiten

b_{bez} Bezugsbelastungszulage in Geldeinheiten

r_{bez} Bezugsrisikowert (einheitslos)

r durchschnittlicher Risikowert eines Mitarbeiters (einheitslos)

Das Entgelt ohne Belastungszulage ist der Verdienst des Arbeitnehmers ohne Berücksichtigung von Belastungen. Dieses orientiert sich beispielsweise an dessen Qualifikationen. Der durchschnittliche Risikowert r ergibt sich aus der Belastungsbewertung. Sind $\{RW_0, \dots, RW_{m-1}\}$ die Risikowerte eines Mitarbeiters für jede Schicht in einem Monat, so ist der durchschnittliche Risikowert:

$$r := \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{m-1} RW_i \quad (3-36)$$

wobei n die Summe der Arbeits- und Urlaubstage des Monats ist. Die Bezugsbelastungszulage ist die Belastungszulage, die gezahlt werden soll, wenn der durchschnittliche Risikowert r dem Bezugsrisikowert r_{bez} entspricht. Abbildung 3-17 verdeutlicht die Zusammenhänge.

Es empfiehlt sich den Quotienten aus Bezugsbelastungszulage und Bezugsbelastungswert im Vergleich zum Entgelt ohne Belastungszulage nicht zu hoch zu wählen, da kein zu großer finanzieller Anreiz für Belastung geschaffen werden soll. Außerdem

sollte der Quotient für alle Mitarbeiter einheitlich definiert sein, da Belastung unabhängig von Arbeitsanforderungen und Leistung einheitlich auf alle Mitarbeiter wirkt.

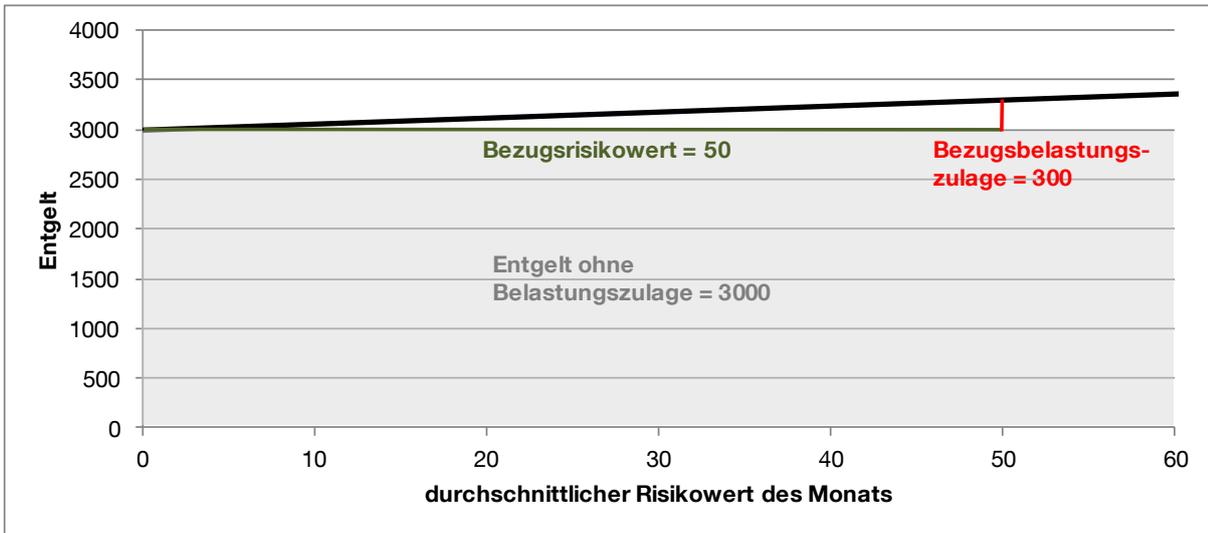


Abbildung 3-17: Ermittlung des Entgelts auf Basis der durchschnittlichen Belastung

Die Software für die Lohn- und Gehaltsabrechnung unterscheidet sich i. d. R. von den WMS in Unternehmen, folglich ist der durchschnittliche Risikowert jedes Mitarbeiters in das Programm zu importieren.

Um zu verhindern, dass Belastungen zu Gesundheitsschäden führen, hat der Arbeitgeber jedoch geeignete Maßnahmen zur Reduzierung der Belastung zu implementieren. Auf diese wird im folgenden Kapitel genauer eingegangen.

4 Belastungsreduzierung im Warehouse-Management-System

Die im vorherigen Kapitel vorgestellte Belastungsbewertung im WMS ermöglicht das Entwickeln von Konzepten, um die auf den Kommissionierer wirkende Belastung zu senken. In diesem Kapitel werden drei Konzepte vorgestellt, wie hohe Risikowerte der Mitarbeiter vermieden werden können.

Bei der Lagerplatzzuordnung wird die später entstehende Belastung bereits bei der Einlagerung von Ladeeinheiten berücksichtigt (Abschnitt 4.1). Bei der Auftragszuweisung werden die Kommissionieraufträge den verfügbaren Mitarbeitern unter Berücksichtigung der Entwicklung des Risikowertes zugewiesen (Abschnitt 4.2). Eine hohe Belastung lässt sich zudem vermeiden, indem der Arbeitsplatz gewechselt wird. Im Abschnitt 4.3 wird vorgestellt, wie die Jobrotation realisiert werden kann.

4.1 Lagerplatzzuordnung

Die im vorherigen Kapitel vorgestellte Belastungsbewertung ermöglicht die Prognose der Risikowerte für eine gegebene Zuordnung von Artikeln zu Lagerplätzen (auch Lagerplatzzuordnung). Dadurch kann für verschiedene Lagerplatzzuordnungen die bei der Kommissionierung entstehende Belastung prognostiziert werden, um die Erkenntnisse bereits für die Einlagerung von Lagereinheiten zu verwenden.

In diesem Abschnitt wird ein Konzept vorgestellt, wie eine statische Zuordnung von Artikeln zu Lagerplätzen (auch feste Lagerplatzordnung) gefunden werden kann, die ergonomische Ziele berücksichtigt. Bei der festen Lagerplatzordnung werden für jeden Artikel Lagerplätze fest reserviert, die nicht durch die Ladeeinheiten anderer Artikel belegt werden dürfen [Gud-2010]. Es wird angenommen, dass die Artikel bereits einem Lagerbereich zugeordnet sind und nur noch innerhalb eines Lagerbereichs die Zuordnung auf Lagerplätze zu erfolgen hat. Das Konzept entstand im Rahmen eines interdisziplinären Projekts am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik [fml-2014].

Bei aktuellen Einlagerstrategien steht häufig die Minimierung der Wege im Fokus. Dadurch werden Schnellläufer nahe der Abgabe eingelagert und befinden sich in diesem Bereich auf allen Ebenen (siehe Abbildung 4-1). Dies führt zu Entnahmen aus

Ebenen über Schulterhöhe und aus tiefen Ebenen, in denen ein Beugen des Oberkörpers oder der Knie erforderlich ist. Diese Haltungen führen jedoch zu einer hohen Haltungswichtung und somit zu einem höheren Risikowert der Mitarbeiter.

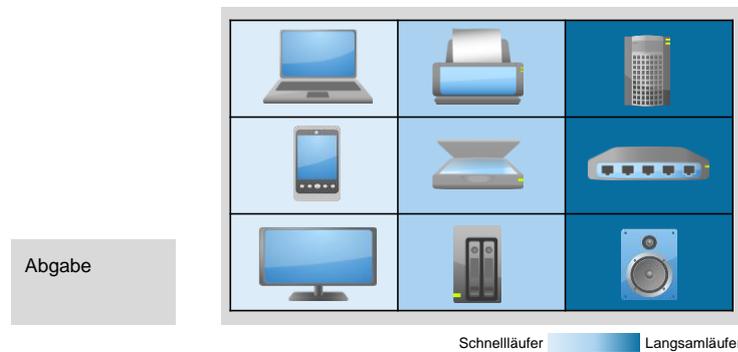


Abbildung 4-1: Resultierende Lagerplatzzuordnung bei einer Minimierung der Wege [fml-2014]

Eine Minimierung der Risikowerte bewirkt, dass Schnelldläufer hauptsächlich in Ebenen auf Höhe des Oberkörpers eingelagert werden (siehe Abbildung 4-2). Folglich befinden sich Langsamläufer in hohen und tiefen Ebenen. Dadurch nehmen die Wegstrecken der Kommissionierer zu, folglich steigt die durchschnittliche Wegzeit pro Auftrag und somit sinkt die Kommissionierleistung. Beim MLT wirkt sich ausschließlich die Anzahl der Umsetzungsvorgänge, bei der eLMM die Anzahl der Umsetzungsvorgänge sowie das zu handhabende Lastgewicht auf die Höhe der Ebene aus.

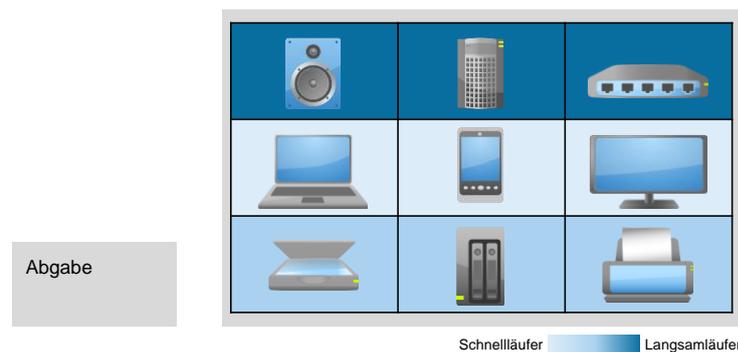


Abbildung 4-2: Resultierende Lagerplatzzuordnung bei einer Minimierung der Risikowerte [fml-2014]

Die Minimierung der Wege und die Minimierung der Risikowerte sind somit konfliktäre Ziele bei der Einlagerung. Bei einer Optimierung unter wirtschaftlichen und ergonomischen Aspekten gilt es beide zu beachten.

4.1.1 Optimierungsproblem

Das Optimierungsproblem ist wie folgt definiert [Kru-2011]:

„Das Dreitupel $(\Omega, f, >)$ beschreibt ein Optimierungsproblem, das gegeben ist durch einen Suchraum Ω , eine Bewertungsfunktion $f: \Omega \rightarrow \mathbb{R}$, die jedem Lösungskandidaten einen Gütwert zuweist, sowie einer Vergleichsrelation $> \in \{<, >\}$.

Dann ist die Menge der globalen Optima $\mathcal{H} \subseteq \Omega$ definiert als

$$\mathcal{H} = \{x \in \Omega \mid \forall x' \in \Omega: f(x) \geq f(x')\}.$$

Bei der Lagerplatzzuordnung ergibt sich der Suchraum Ω durch die Menge der Artikel $A = \{a_0, \dots, a_{l-1}\}$ und die Menge der Lagerplätze $L = \{l_0, \dots, l_{m-1}\}$. Jede Zuordnung von Artikeln zu Lagerplätzen, bei der ein Artikel genau einem Lagerplatz und ein Lagerplatz maximal einem Artikel zugeordnet ist, ist eine Lösung des Optimierungsproblems und damit ein Element des Suchraums Ω . Die Zuordnung von Artikel zu Lagerplatz erfolgt über die Indizierung der Elemente der beiden endlichen Mengen. Es gilt stets $l \leq m$, da ausreichend Lagerplätze für alle Artikel vorhanden sein müssen. Im Fall $l = m$ handelt es sich dabei um eine bijektive Abbildung. Für den Fall, dass $l < m$, wird die Menge A um $m - l$ zusätzliche, nicht unterscheidbare Pseudo-Artikel erweitert, welche als Platzhalter für nicht belegte Lagerplätze dienen. Folglich ist die Menge der Artikel inklusive Pseudo-Artikel $A' := \{a_1, \dots, a_l\} \cup \{a'_{-1}, \dots, a'_{-(m-l)}\}$.

Die Kardinalität $|\Omega|$ des Suchraums Ω beträgt $\frac{m!}{(m-l)!}$ unter der Annahme, dass jeder Artikel jedem Lagerplatz zugeordnet werden kann. Im Fall $l = m$ ist die Anzahl der Elemente des Suchraums maximal, hier gilt $|\Omega| = m!$. In der Praxis ist l nur unwesentlich kleiner oder gleich m , wodurch sich eine sehr große Anzahl an Elementen im Suchraum ergibt.

Die Bewertungsfunktion f bildet Elemente des Suchraums Ω auf reelle Werte ab, diese sind über die Relation $>$ vergleichbar. Bei der Lagerplatzzuordnung stehen sich die konfliktären Ziele Minimierung der Wege und Minimierung der Risikowerte gegenüber. Die für dieses Problem entwickelte Bewertungsfunktion, die es zu minimieren gilt, enthält beide Variablen und ermöglicht somit das Finden eines möglichst guten Kompromisses:

$$f(x) = w_d \cdot \frac{d(x) - d_{min}}{d_{min}} + w_r \cdot \frac{r(x) - r_{ziel}}{r_{ziel}} \quad (4-1)$$

Hierbei sind die Faktoren w_d und w_r Parameter und ermöglichen eine Gewichtung der Ziele und sind vor der Lösung des Optimierungsproblems zu bestimmen. $d(x)$ ist das arithmetische Mittel der zurückgelegten Wegstrecke pro Mitarbeiter und Schicht der zu bewertenden Lösung x . Die Variable d_{min} ist das arithmetische Mittel der zurückgelegte Wegstrecke pro Mitarbeiter und Schicht der wegeoptimierten Lösung. Die Variable $r(x)$ ist das arithmetische Mittel des Risikowerts pro Mitarbeiter und Schicht der zu bewertenden Lösung. Die Variable r_{ziel} ist ebenfalls vor der Optimierung festzulegen, dieser Wert ist der angestrebte durchschnittliche Risikowert pro Mitarbeiter und Schicht. Abbildung 4-3 veranschaulicht das Vorgehen zur Bewertung einer Lagerplatzzuordnung.

Für die Bestimmung von $r(x)$ wird die in Kapitel 3 vorgestellte Belastungsbewertung verwendet. Folglich ist die Implementierung dieser im WMS Voraussetzung für die Optimierung der Lagerplatzzuordnung. Für die Optimierung ist festzulegen, welches Verfahren zur Belastungsbewertung verwendet werden soll. In Kapitel 3 wurde die Integration der erweiterten Leitmerkmalmethode und des Multiple-Lasten-Tools in das WMS vorgestellt. Sollte das Multiple-Lasten-Tool für die Optimierung herangezogen werden, empfiehlt es sich die entstehende Belastung durch Ziehen/Schieben nicht zu berücksichtigen. Im MLT werden lange Zieh-/Schiebevorgänge häufig als weniger belastend eingestuft als kurze Zieh-/Schiebevorgänge. Unwirtschaftliche Lösungen, bei denen häufig gegriffene Artikel weit entfernt von der Abgabe eingelagert werden, erhalten bei der Verwendung des MLT als Bewertungsmethode somit eine relativ gute Bewertung. Diese Lösungen sind allerdings für die Praxis nicht relevant. Das MLT ohne eine Bewertung der Zieh-/Schiebevorgänge lässt sich jedoch sehr gut für die Optimierung einsetzen.

Für die Bestimmung von $r(x)$ ist zudem festzulegen, für wie viele Personen mit welcher Körpergröße und welcher Armlänge die Belastungsbewertung erfolgt. Die Menge an festgelegten Personen ist $M = \{m_0, \dots, m_{n-1}\}$. Hier können beispielsweise die im zu optimierenden Lagerbereich tätigen Mitarbeiter verwendet werden.

Die Ermittlung der Werte $d(x)$ und $r(x)$ setzt voraus, dass eine Datenbasis an Kommissionieraufträgen vorhanden ist, für die die Bewertung erfolgt. Eine Menge abgeschlossener Kommissionieraufträge K des zu optimierenden Lagerbereichs von p

Mitarbeitern aus q Schichten bilden die Grundlage für die Ermittlung der Wegstrecken und Risikowerte pro Mitarbeiter und Schicht:

$$K = K_{0,0} \cup \dots \cup K_{0,q-1} \cup K_{1,0} \cup \dots \cup K_{1,q-1} \cup K_{2,0} \cup \dots \cup K_{p-1,q-1} \quad (4-2)$$

wobei $K_{j,k}$ die Menge der Kommissionieraufträge von Mitarbeiter j in Schicht k ist. Da die Kommissionieraufträge die Grundlage der Optimierung darstellen, ist die Auswahl repräsentativer Aufträge aus der Vergangenheit sehr wichtig.

Das arithmetische Mittel der zurückgelegten Wegstrecken pro Mitarbeiter und Schicht $d(x)$ berechnet sich wie folgt. Da nach der in Kapitel 3 vorgestellten Berechnungsmethodik für die Wegstrecke personenspezifische Abweichungen nicht berücksichtigt werden, wird für jedes $K_{j,k}$ genau eine resultierende Wegstrecke $d_{j,k}$ berechnet. Die ursprüngliche Chronologie der Kommissionieraufträge innerhalb einer Teilmenge $K_{j,k}$ wird dabei beibehalten. Aus den ermittelten Wegstrecken pro Schicht wird das arithmetische Mittel über alle Schichten bestimmt:

$$d(x) = \frac{1}{p \cdot q} \cdot \sum_{j=0}^{p-1} \sum_{k=0}^{q-1} d_{j,k} \quad (4-3)$$

Das Vorgehen zur Ermittlung des arithmetischen Mittels der Risikowerte pro Mitarbeiter und Schicht $r(x)$ ist fast identisch. Im Gegensatz zur Wegstrecke $d_{j,k}$ wird der Risikowert $r_{i,j,k}$ jedoch von Personenmerkmalen beeinflusst. Folglich sind pro $K_{j,k}$ l Risikowerte zu berechnen. Für jedes $K_{j,k}$ wird simuliert, dass jede Person in Menge M die Kommissionieraufträge in der Teilmenge durchführt. Für jede Person m_i und jedes $K_{j,k}$ wird somit genau ein Risikowert $r_{i,j,k}$ bestimmt. Zur Ermittlung von $r_{i,j,k}$ wird die im Kapitel 3 vorgestellte Belastungsbewertung verwendet. Das arithmetische Mittel der Risikowerte lautet daher:

$$r(x) = \frac{1}{n \cdot p \cdot q} \cdot \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{p-1} \sum_{k=0}^{q-1} r_{i,j,k} \quad (4-4)$$

Das arithmetische Mittel der zurückgelegten Wegstrecke pro Mitarbeiter und Schicht der wegeoptimierten Lösung d_{min} wird unter Verwendung einer Heuristik ermittelt, diese umfasst drei Schritte. Im ersten Schritt werden alle Positionen aller für die Optimierung ausgewählten Kommissionieraufträge untersucht und absolute Häufigkei-

ten $h(a_i)$ der auftretenden Artikel a_i erstellt. Die Anzahl der Artikel pro Position wird dabei nicht betrachtet, lediglich das Vorkommen des Artikels pro Position. Die absolute Häufigkeitsverteilung gibt daher darüber Aufschluss, wie oft der Lagerplatz eines Artikels von Kommissionierern angesteuert wurde. Im zweiten Schritt werden die Artikel in Abhängigkeit der in Schritt 1 ermittelten Häufigkeitsverteilung den Lagerplätzen zugeordnet. Artikel mit einer hohen Häufigkeit $h(a_i)$ werden nahe der Abgabe eingelagert, während Artikel mit einer niedrigen Häufigkeit $h(a_i)$ Lagerplätzen weiter entfernt von der Abgabe eingelagert werden. Im dritten Schritt wird die Wegstrecke d_{min} bestimmt. Die Variable d_{min} ist das arithmetische Mittel der zurückgelegten Wegstrecken pro Mitarbeiter und Schicht $d(x)$ für die in Schritt 2 ermittelte Lagerplatzzuordnung.

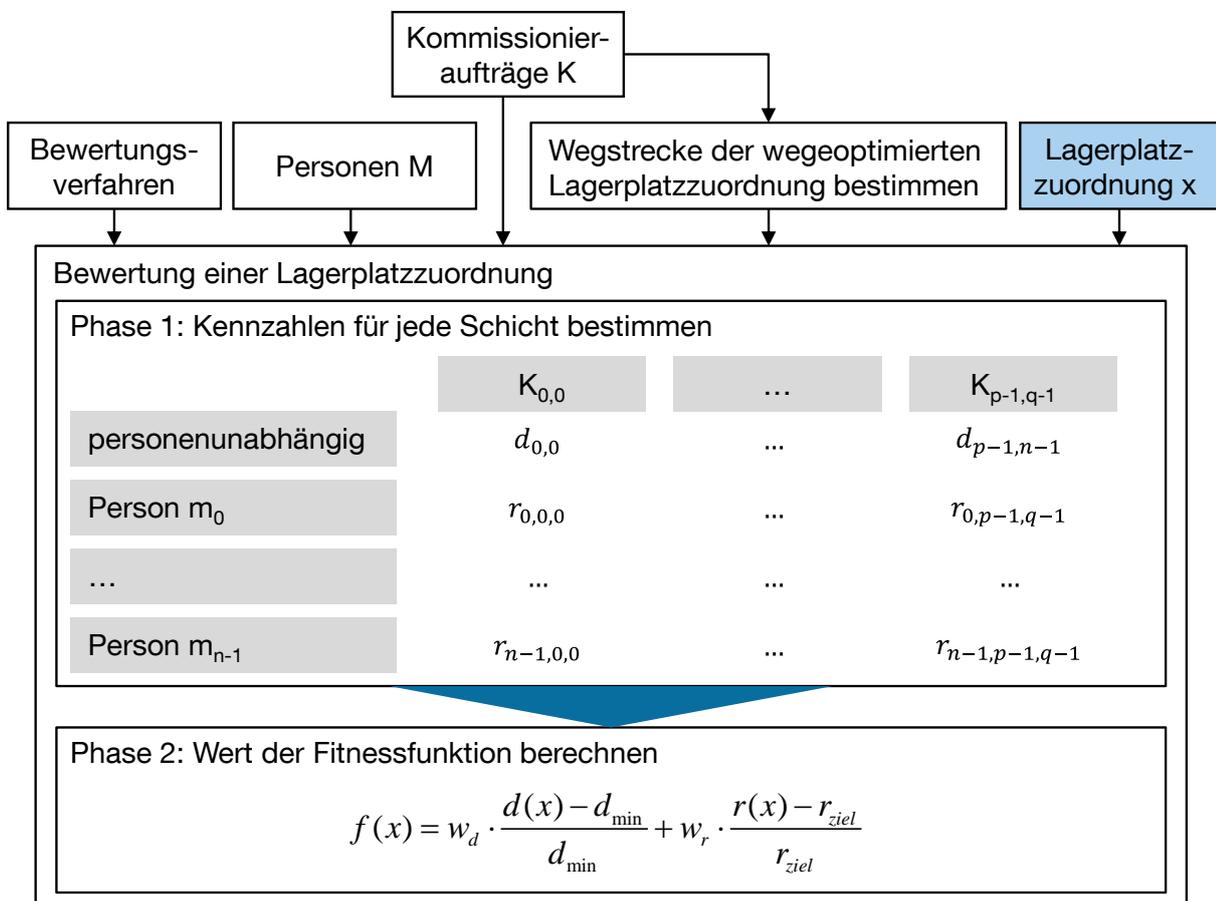


Abbildung 4-3: Bewertung einer Lagerplatzzuordnung

4.1.2 Lösungsverfahren

Aufgrund der Komplexität des Problems verursacht das Finden einer optimalen Lösung einen unverhältnismäßig hohen Zeitaufwand. Für gezielte Suche einer möglichst guten Lagerplatzzuordnung wurden daher genetische Algorithmen

eingesetzt. Sie gehören zur Gruppe der evolutionären Algorithmen und sind somit Metaheuristiken. Evolutionäre Algorithmen sind Optimierungsverfahren, die von der biologischen Evolution inspiriert sind, sie ermöglichen das Finden einer guten Lösung, ohne Optimalität zu garantieren. Die nachfolgenden Erklärungen zu genetischen Algorithmen beziehen sich auf Kruse [Kru-2011].

Ein *Individuum* ist ein Lösungskandidat für das zu lösende Optimierungsproblem. Ein *Chromosom* legt dessen Bauplan in kodierter Form fest. In der Informatik wird häufig nur ein Chromosom zur Kodierung eines Individuums verwendet. Ein *Gen* bezeichnet die grundlegende Einheit der Vererbung, in der Informatik handelt es sich hierbei um ein einzelnes Zeichen. Ein *Allel* stellt eine mögliche Ausprägung eines Gens dar. In der Informatik ist dies der Wert des Zeichens. Eine *Population* ist eine Menge von verschiedenen Individuen. Als *Generation* wird eine Population zu einem bestimmten Zeitpunkt bezeichnet. Die *Fitness* eines Individuums bestimmt dessen Überlebens- und Fortpflanzungschancen. Eine *Fitnessfunktion* (auch Bewertungsfunktion) gibt die Güte der Individuen an, sie kann auch einzuhaltende Nebenbedingungen enthalten.

Bei genetischen Algorithmen wird eine Menge von Lösungskandidaten iterativ verbessert. Eine Folgegeneration wird bestimmt durch Selektion, Mutation und Crossover. Das Prinzip der *Selektion* besagt, dass Individuen mit einer höheren Fitness bessere Chancen haben sollen, Nachkommen zu generieren als schlechtere Individuen. Diese können ebenfalls in die Folgegeneration gelangen, jedoch mit einer geringeren Wahrscheinlichkeit.

Genetische Operatoren verändern Lösungskandidaten genetisch. Unterschieden wird zwischen Rekombination und Mutation. Bei einer *Rekombination* (auch Crossover) werden die Chromosomen von mindestens zwei Individuen einer Population rekombiniert. Eine *Mutation* ist die zufällige Veränderung einzelner Gene des Chromosoms eines Individuums. Zudem gehören die *Werte der genutzten Parameter* zu den Bausteinen des genetischen Algorithmus. Diese sind beispielsweise die Populationsgröße $|P|$ und Mutationswahrscheinlichkeit p_m . Das *Abbruchkriterium* eines genetischen Algorithmus legt fest, nach welcher Iteration der genetische Algorithmus beendet wird. Beispiele hierfür sind eine festgelegte Anzahl an berechneten Generationen oder eine festgelegte Anzahl an Generationen ohne eine Verbesserung der besten gefundenen Lösung. Abbildung 4-4 zeigt den für diese Arbeit verwendeten genetischen Algorithmus.

Eingabe: Fitnessfunktion f

Ausgabe: Chromosom mit der besten Fitness

$P :=$ erzeuge initiale Population

$e :=$ setze elitäre Selektionsrate

$p_c :=$ setze Rekombinationsrate

$p_m :=$ setze Mutationsrate

berechne Fitness der Individuen in P

solange Abbruchkriterium nicht erfüllt ist, wiederhole:

$E :=$ wähle $\lceil |P| \cdot e \rceil$ Individuen aus P mit höchster Fitness // Elitismus

$N := E$ // initialisiere nächste Generation

solange $|N| < |P|$, wiederhole:

$\text{paar} :=$ selektiere ein Chromosomenpaar aus P // Turnierauswahl

mit Wahrscheinlichkeit p_c : $\text{paar} :=$ rekombiniere(paar) // Rekombination

mit Wahrscheinlichkeit p_m : $\text{paar} :=$ mutiere(paar) // Mutation

$N := N \cup \text{paar}$

$P := N$

berechne Fitness der Individuen in P

Rückgabe des Chromosoms mit bester Fitness

**Abbildung 4-4: Genetischer Algorithmus,
in Anlehnung an [fml-2014]**

Im Folgenden wird genauer auf die Chromosomkodierung, die Selektion, die Rekombination, die Mutation, das Abbruchkriterium und getroffene Annahmen eingegangen.

Chromosomkodierung

Im Fall der Lagerplatzzuordnung ist jede mögliche Zuordnung von Artikeln zu Lagerplätzen ein Individuum (siehe Abschnitt 4.1.1). Die bereits vorgestellte Zuordnung von Artikel zu Lagerplatz erfolgt über die Indizierung der Elemente der Menge der Artikel inklusive Pseudo-Artikel $A = \{a_0, \dots, a_{l-1}, a'_{-1}, \dots, a'_{-(m-l)}\}$ und der Menge der Lagerplätze $L = \{l_0, \dots, l_{m-1}\}$. Das Chromosom eines Individuums ist eine Folge von Zahlen mit m Elementen. Die i -te Komponente der Folge ist der Index des Artikels, welcher dem Lagerplatz l_i zugeordnet ist.

Das folgende 6-Tupel zeigt ein Chromosom einer Lagerplatzzuordnung für ein Lager mit 6 Lagerplätzen und drei Artikeln:

$$c = (2, -1, 0, 1, -2, -3) \quad (4-5)$$

wobei sich Artikel a_2 auf Lagerplatz l_0 befindet, der Artikel a_0 befindet sich auf Lagerplatz l_2 , der Artikel a_1 befindet sich auf Lagerplatz l_3 . Die Lagerplätze l_1 , l_4 und l_5 sind nicht belegt. Die Zuordnung ist in Abbildung 4-5 veranschaulicht.

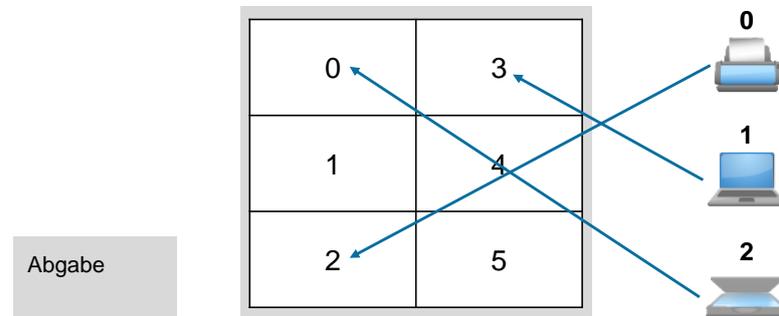


Abbildung 4-5: Beispiel einer Zuordnung von Artikeln zu Lagerplätzen

Selektion

Der Selektionsoperator bestimmt, welche Individuen – unverändert oder verändert – in die nächste Generation gelangen. Für das Problem der Lagerplatzzuordnung wurden zwei Selektionsoperatoren gewählt: der Elitismus und die Turnierausswahl.

Bei vielen Selektionsverfahren ist nicht sichergestellt, dass das beste Individuum einer Generation unverändert in die Folgegeneration gelangt. Beim Elitismus werden daher die k besten Individuen unverändert in die nächste Generation aufgenommen, wobei $k \in \{1, \dots, |P|\}$. Das Auffüllen der $|P| - k$ unbesetzten Positionen erfolgt mit anderem Selektionsverfahren.

Bei der Lagerplatzzuordnung gelangen die besten 1 % der Individuen unverändert in die Folgegeneration. Die verbleibenden 99 % werden durch die Turnierausswahl ausgewählt sowie anschließend mit festgelegten Wahrscheinlichkeiten rekombiniert und mutiert.

Bei der Turnierausswahl werden l zufällig bestimmte Individuen aus der Population gezogen und treten „in einem Turnier“ gegeneinander an, wobei die Turniergröße $l \in \{2, \dots, |P|\}$. Gewinner des Turniers ist das Beste dieser Individuen. Je höher die Fitness eines Individuum ist, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, ausgewählt zu werden. Der Gewinner wird in die Zwischenpopulation gewählt. In der Zwischenpopulation befinden sich alle Individuen, die sich für den Fortbestand qualifiziert haben, jedoch noch nicht genetisch verändert wurden. Nach dem Turnier werden alle Teilnehmer (auch der Gewinner) zurück in die Population gelegt.

Für den genetischen Algorithmus zur Bestimmung der Lagerplatzzuordnung wurde $k = 2$ gewählt, d. h. zwei Individuen werden zufällig aus der Population ausgewählt. Durch die kleine Turniergröße erhöht sich die Wahrscheinlichkeit, dass sich auch schwache Individuen für den Fortbestand qualifizieren. Die Diversität der Population bleibt somit groß. Das Individuum mit der höheren Fitness wird für die Folgegeneration selektiert und anschließend mit einer Wahrscheinlichkeit p_c rekombiniert und zudem einer Wahrscheinlichkeit p_m mutiert. Abbildung 4-6 zeigt den Algorithmus für die Turnierauswahl.

Eingabe: Population P, Turniergröße t
Ausgabe: Chromosomenpaar (c1, c2)

T := wähle t zufällige Chromosome aus P (Turnierteilnehmer)
c1 := Chromosom mit bester Fitness aus T (Sieger)
c2 := c1
solange c1 = c2, wiederhole:
 T := wähle t zufällige Chromosome aus P (Turnierteilnehmer)
 c2 := Chromosom mit bester Fitness aus T (Sieger)

Rückgabe des Chromosomenpaars (c1, c2)

Abbildung 4-6: Algorithmus der Turnierauswahl [fml-2014]

Rekombination

Der Rekombinationsoperator erzeugt Nachkommen durch Rekombination der Chromosomen von mindestens zwei Individuen einer Population.

Bei der Lagerplatzzuordnung besteht der Suchraum Ω aus Permutationen, somit bieten sich permutationserhaltende Rekombinationsoperatoren an. Der eingesetzte permutationserhaltende Rekombinationsoperator ist das ordnungsbasierte Zwei-Punkt-Crossover. Das ordnungsbasierte Zwei-Punkt-Crossover erzeugt zwei Kindindividuen durch Austauschen der Gensequenzen der beiden Eltern.

Beim Zwei-Punkt-Crossover werden zwei zufällige Schnittpunkte bestimmt. Die neuen Individuen entstehen durch ein abwechselndes Austauschen bzw. Nicht-Austauschen der Gensequenzen der Eltern zwischen den aufeinanderfolgenden Schnittpunkten (vgl. Abbildung 4-7). Dadurch entstehen Duplikate von Allelen, folglich sind die generierten Individuen nicht mehr Element des Suchraums Ω .

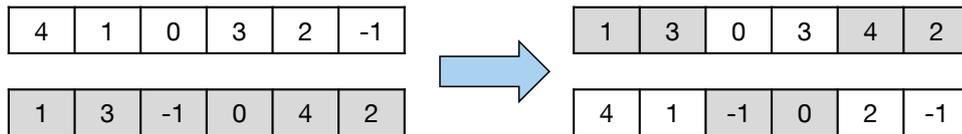


Abbildung 4-7: Beispiel eines Zwei-Punkt-Crossovers, in Anlehnung an [fml-2014]

Beim ordnungsbasierten Zwei-Punkt-Crossover werden die Lücken durch die fehlenden Allele aufgefüllt in der Reihenfolge, in der sie beim anderen Chromosom vorkommen (vgl. Abbildung 4-8). Beide Kinder sind somit ebenfalls Elemente des Suchraums Ω .

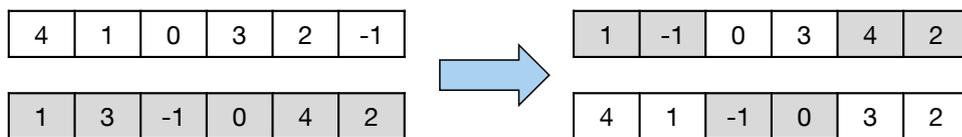


Abbildung 4-8: Beispiel eines ordnungsbasierten Zwei-Punkt-Crossovers, in Anlehnung an [fml-2014]

Mutation

Eine Mutation ist die zufällige Veränderung einzelner Gene des Chromosoms eines Individuums. Die meisten Mutationen sind schädlich, da die Fitness des Individuum schlechter wird. Ein Mutationsoperator soll daher möglichst wenig am Individuum und daher an der Fitness des Individuums ändern.

Für die Lagerplatzzuordnung wurde der Zweiertausch als Mutationsoperator eingesetzt. Dieser tauscht die Ausprägungen zweier Gene eines Chromosoms (siehe Abbildung 4-9). Der Operator wurde für diesen Anwendungsfall erweitert: Beim Vertauschen wird sichergestellt, dass nicht beide Gene negative Zahlen sind. Negative Zahlen stellen leere Lagerplätze dar, ein Vertauschen zweier negativer Zahlen hätte somit keine Änderung der Lagerplatzzuordnung zur Folge.



Abbildung 4-9: Beispiel eines Zweiertauschs, in Anlehnung an [fml-2014]

Abbruchkriterium

Das Abbruchkriterium terminiert den genetischen Algorithmus. Für die Lagerplatzzuordnung wurde definiert, dass die Lösungssuche nach insgesamt 20000 durchge-

fürten Iterationen beendet wird. Der Benutzer kann die Optimierung durch eine Eingabe auch jederzeit manuell beenden.

Annahmen

Im Rahmen der Lagerplatzzuordnung wird auf die in Kapitel 3 vorgestellte Belastungsbewertung zurückgegriffen. Diese setzt voraus, dass Bestände sowie der den Kommissionierauftrag durchführende Mitarbeiter bekannt sind.

Die Bestände werden bei der Belastungsbewertung zur Ermittlung der Haltungsweise beim Umsetzen verwendet. Bei der Echtzeitbewertung liegen die tatsächlich vorhandenen Bestände vor und können für die Bewertung verwendet werden. Wie groß diese in der Zukunft sind, ist jedoch nicht bekannt. Daher wird im Rahmen der Optimierung zur Ermittlung der Risikowerte angenommen, dass sie 50 % des Maximalbestands entsprechen.

Des Weiteren ist bei der Belastungsbewertung in Echtzeit bekannt, welcher Mitarbeiter welchen Kommissionierauftrag erledigt und folglich wird ein Kommissionierauftrag genau einem Mitarbeiter zugeordnet. Für die Zukunft ist jedoch nicht bekannt, welcher Mitarbeiter welchen Kommissionierauftrag durchführen wird. Folglich ist die eindeutige Zuordnung nicht möglich. Aus diesem Grund wird bei der Optimierung für jeden Mitarbeiter $m_i \in M$ angenommen, dass er alle für die Optimierung ausgewählten Kommissionieraufträge durchführt.

4.2 Auftragszuweisung

Eine Möglichkeit hohe Risikowerte einzelner Mitarbeiter zu vermeiden, ist die gezielte Zuweisung von Kommissionieraufträgen zu Mitarbeitern. Hoch belastete Mitarbeiter erhalten bei der ergonomischen Auftragszuweisung Aufträge, die ihre Belastung möglichst gering ansteigen lassen.

4.2.1 Optimierungsproblem

Gegeben ist eine endliche Menge an Kommissionieraufträgen $K = \{k_0, \dots, k_{n-1}\}$ sowie eine endliche Menge an Mitarbeitern $M = \{m_0, \dots, m_{m-1}\}$. Alle Kommissionieraufträge in der Menge K sind aus genau einer Schicht. Jeder Auftrag wurde entweder bereits einem Mitarbeiter zugewiesen und befindet sich in dessen Warteschlange, in

Bearbeitung oder ist erledigt, oder ist noch einem Mitarbeiter zuzuweisen (siehe Abbildung 4-10). Die Menge an Mitarbeitern M enthält alle für die Zuweisung verfügbaren Mitarbeiter. In der Praxis gilt i. d. R. $m < n$. Der Wert der Variablen $x_{i,j}$ gibt an, welchem Mitarbeiter welcher Auftrag zugewiesen ist und ob dieser erledigt, in Bearbeitung oder unerledigt ist:

$$x_{i,j} := \begin{cases} 3 & \text{Auftrag } k_j \text{ wurde Mitarbeiter } m_i \text{ erledigt} \\ 2 & \text{Auftrag } k_j \text{ wird Mitarbeiter } m_i \text{ bearbeitet} \\ 1 & \text{Auftrag } k_j \text{ ist in der Warteschlange von Mitarbeiter } m_i \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases} \quad (4-6)$$

Die Teilmenge der noch nicht zugewiesenen Kommissionieraufträge ist $K_{neu} = \{k_l, \dots, k_{n-1}\}$. Im Verlauf einer Schicht werden der Menge neue Elemente hinzugefügt.

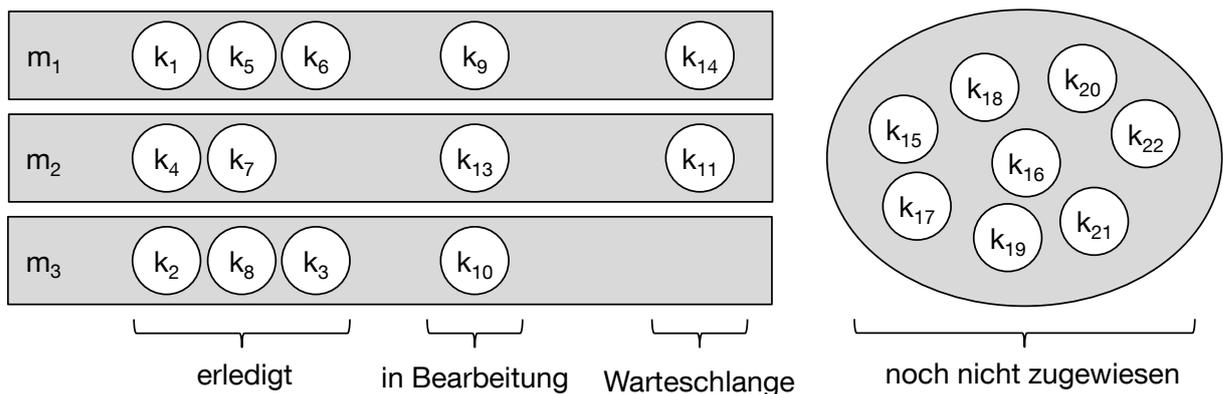


Abbildung 4-10: Exemplarische Zuordnung der Kommissionieraufträge zu Mitarbeitern

Die Matrix x_0 enthält den aktuellen Stand der Zuordnung der Aufträge, dabei gilt:

$$x_{i,j} = 0 \quad \forall i = 0, \dots, m-1, \forall j = l, \dots, n-1 \quad (4-7)$$

Die Anzahl der dem Mitarbeiter m_i zugewiesenen und noch nicht erledigten Aufträge, die sogenannten Länge der Warteschlange eines Mitarbeiters, sei w_i . Es gilt:

$$w_i := \sum_{j \in \{j | (k_j \in K) \wedge (x_{i,j} = 1)\}} x_{i,j} \quad (4-8)$$

Die für dieses Problem definierte Bewertungsfunktion, die es zu minimieren gilt, weist einem Lösungskandidaten x den maximalen Risikowert als Güte zu:

$$f(x) = \max(r_i(x)) \quad (4-9)$$

wobei $r_i(x)$ der Risikowert des Mitarbeiters m_i ist, der sich aus allen ihm zugewiesenen Aufträgen aus K ergibt. Für die Ermittlung des Risikowerts wird die in Kapitel 3 vorgestellte Belastungsbewertung verwendet.

4.2.2 Lösungsverfahren

Um eine gute Lösung für das Problem zu finden, wurde eine Heuristik entwickelt. Für die Entwicklung der Heuristik wurden die Annahmen getroffen, dass die Bearbeitungsdauer der Aufträge keinen hohen Variationskoeffizienten besitzt und die Auftragszuweisung nur vor Beginn der Schicht und nicht während dieser aktiviert werden kann.

Zu Beginn der Schicht werden jedem Mitarbeiter m_i zwei Aufträge zugewiesen, so dass einer der Aufträge unmittelbar in Bearbeitung ist und der andere sich in der Warteschlange des Mitarbeiters befindet. Sollten weniger als $2 \cdot m$ zuzuweisende Aufträge vorhanden sein, werden diese gleichmäßig auf alle Mitarbeiter verteilt. Den Algorithmus für die Startzuordnung zeigt Abbildung 4-11.

Eingabe: Kommissionieraufträge K , Mitarbeiter M

Ausgabe: Startzuordnung x

$i := 0$

solange ($i < 2$), wiederhole:

$j := 0$

 solange ($j < m$) und (K_{neu} nicht leer), wiederhole:

$k^* :=$ wähle Auftrag aus K_{neu} zufällig aus

 weise m_j den Auftrag k^* zu

$j := j+1$

$i := i+1$

berechne Risikowert $r_i(x)$ für jeden Mitarbeiter

Rückgabe der Startzuordnung x

Abbildung 4-11: Algorithmus für die Startzuordnung

Nachdem die Startzuordnung erfolgt ist, bewirken zwei Ereignisse bei jedem Auftreten das Starten eines Algorithmus. Das erste Ereignis tritt ein, wenn der Kommissionierer m_i mit der Bearbeitung eines neuen Auftrags beginnt und dadurch das Ele-

ment aus seiner Warteschlange entfernt wird. Sollte die Menge K_{neu} nicht leer sein, wird ihm ein neuer Auftrag zugewiesen. Bei Mitarbeitern mit einem hohen Risikowert, wird ein Auftrag ausgewählt, der den Risikowert des Mitarbeiters möglichst wenig ansteigen lässt. Bei Mitarbeitern, die keinen hohen Risikowert haben, wird der Auftrag zufällig aus der Menge K_{neu} ausgewählt. Abbildung 4-12 zeigt den Algorithmus.

Eingabe: Kommissionieraufträge K , Mitarbeiter M , aktuelle Zuordnung x_0
Ausgabe: neue Zuordnung x

falls K_{neu} nicht leer, dann:

falls $r_i(x) > 0,9$ -Quantil, dann:

$k^* :=$ wähle Auftrag aus K_{neu} , der $r_i(x)$ am wenigsten ansteigen lässt
weise m_i den Auftrag k^* zu

sonst:

$k^* :=$ wähle Auftrag aus K_{neu} zufällig aus
weise m_i den Auftrag k^* zu

aktualisiere $r_i(x)$

sonst:

Rückgabe der neuen Zuordnung x

Abbildung 4-12: Algorithmus für das erste Ereignis

Das zweite Ereignis tritt ein, wenn die Menge K_{neu} leer ist und ein neuer Kommissionierauftrag k^* eintrifft. Tritt dieses Ereignis ein, wird ermittelt, welcher Kommissionierer mit einer leeren Warteschlange den niedrigsten Risikowert besitzt. Diesem wird der neue Auftrag zugewiesen. Abbildung 4-13 zeigt das Vorgehen.

Eingabe: Kommissionieraufträge K , Mitarbeiter M , aktuelle Zuordnung x_0
Ausgabe: neue Zuordnung x

$M_w :=$ Menge aller Mitarbeiter mit leerer Warteschlange

falls M_w nicht leer, dann:

$m_i :=$ wähle Mitarbeiter aus M_w mit niedrigsten Risikowert
weise m_i den neu eingetroffenen Auftrag k^* zu
aktualisiere $r_i(x)$

sonst:

Rückgabe der neuen Zuordnung x

Abbildung 4-13: Algorithmus für das zweite Ereignis

Sollten zwei Ereignisse zum gleichen Zeitpunkt eintreten, werden diese sequenziell bearbeitet. Die Reihenfolge der Bearbeitung wird zufällig festgelegt.

4.3 Jobrotation

Eine weitere Möglichkeit hohe Risikowerte und damit die Überbelastungen der Mitarbeiter zu vermeiden, ist die belastungsorientierte Jobrotation. Eine sehr hohe Belastung eines Mitarbeiters lässt sich vermeiden, indem dieser bei Erreichen eines bestimmten Risikowerts den Arbeitsplatz wechselt. Der Grenzkrisikowert RW_g ist vorab festzulegen, dieser Risikowert ist der angestrebte maximale Risikowert für jeden Mitarbeiter.

In konstanten Zeitintervallen wird für alle Mitarbeiter $M = \{m_0, \dots, m_{m-1}\}$ überprüft, ob der definierte Grenzkrisikowert RW_g überschritten wurde:

$$r_i(x) \geq RW_g \quad \forall i = 0, \dots, m-1 \quad (4-10)$$

wobei $r_i(x)$ der Risikowert des Mitarbeiters m_i ist, der sich aus allen ihm zugewiesenen und bereits erledigten Aufträgen ergibt. Für die Ermittlung des Risikowerts wird die in Kapitel 3 vorgestellte Belastungsbewertung verwendet.

Sobald der Grenzkrisikowert RW_g überschritten wurde, wird dieser zum Arbeitsplatzwechsel aufgefordert. Die durch den Risikowert beurteilte Belastungsart ist die manuelle Lastenhandhabung. Folglich sollten beim neuen Arbeitsplatz des Mitarbeiters möglichst keine Lastenhandhabungen durchzuführen sein.

5 Realisierung des Demonstrators

Die in Kapitel 3 beschriebene Methodik zur Belastungsbewertung sowie die in Kapitel 4 beschriebenen Modelle zur Belastungsreduzierung wurden als Erweiterung des Open-Source-WMS myWMS LOS umgesetzt. Nachdem myWMS LOS kurz beschrieben wird (Abschnitt 5.1), wird die Umsetzung erläutert (Abschnitt 5.2 bis 5.6). Abschnitte 5.1, 5.2, 5.4 und 5.6 beruhen auf einem interdisziplinären Projekt am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik [fml-2014].

5.1 myWMS LOS

myWMS LOS ist ein Open-Source-WMS, das gemäß der Java Enterprise Edition 5 (Java EE 5) Spezifikation programmiert wurde [Hom-2010]. Die Software basiert auf dem myWMS Rahmenwerk, welches im Jahr 2000 entwickelt wurde. Dieses ist ein auf dem „Baukastenprinzip beruhendes Rahmenwerk [...] für Warehouse-Management-Systeme“ [Hom-2010]. myWMS LOS ist nach der Drei-Schichten-Architektur aufgebaut (vgl. Abbildung 5-1), auf die einzelnen Schichten wird im Folgenden eingegangen.

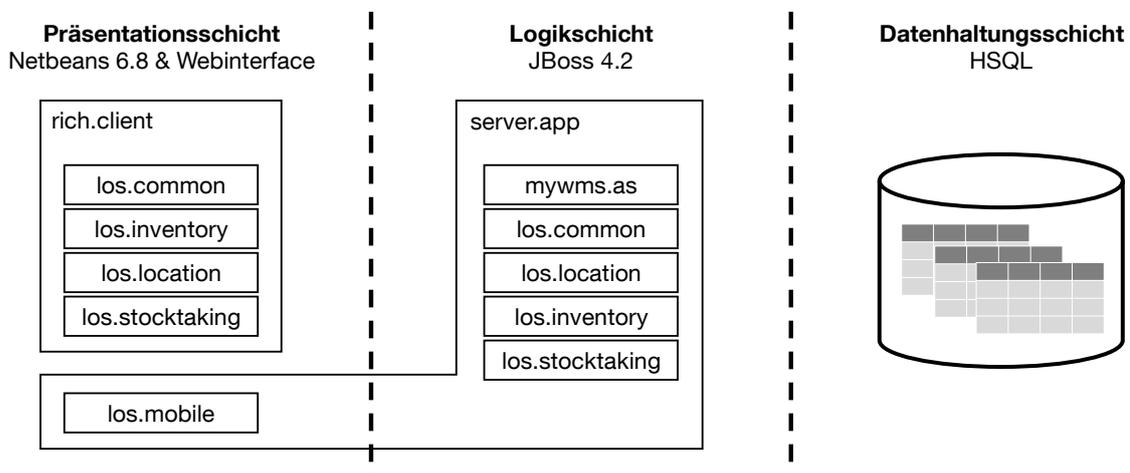


Abbildung 5-1: Aufbau von myWMS LOS, in Anlehnung an [fml-2014]

myWMS LOS stellt zwei grafische Benutzeroberflächen zur Verfügung: einen Rich-Client und eine browserbasierte Oberfläche. Der auf Netbeans basierende Rich-Client dient der Erstellung von Oberflächen an festen Arbeitsstationen. In der Praxis eignet sich der Rich-Client für das Durchführen von administrativen Tätigkeiten, z. B. dem Anlegen neuer Lagerplätze oder Kommissionieraufträge. Die für mobile Endge-

räte optimierte browserbasierte Oberfläche dient der Unterstützung der grundlegenden Prozesse im Lager, z. B. dem Erledigen eines Kommissionierauftrags.

Die Logik ist für einen Java-EE-Anwendungsserver entwickelt. Als Implementierung für den Java-EE-Server wurde die Open-Source-Lösung JBoss 4.2 verwendet. Die Logikschicht gliedert sich in unterschiedliche Module, die jeweils einen funktionalen Aspekt der Software abbilden:

- mywms.as: grundlegende Datenstrukturen und Basisfunktionen
- los.common: Erweiterung der Basisfunktionen von mywms.as
- los.location: Funktionen für die Lagertopologie
- los.inventory: Funktionen für die Artikelverwaltung
- los.stocktaking: Funktionen für den Inventurprozess

Als Datenbank wird HSQL (Hyber Structured Query Language) eingesetzt. Für die objektrelationale Abbildung wird Hibernate verwendet. Hibernate kann Objekte in der Datenbank ablegen und aus den in der Datenbank gespeicherten Datensätzen Objekte erzeugen.

Die durchgeführten Erweiterungen betreffen alle drei Schichten (siehe Abbildung 5-2). In der Präsentationsschicht wurden zwei Module geringfügig erweitert und vier neue hinzugefügt. Die neuen Module sind *RiskAssessment* (Belastungsbewertung), *Salary* (Belastungszulage), *Optimization* (Lagerplatzzuordnung) sowie *JobAssignment* (Auftragszuweisung). In der Logikschicht wurden die zwei bestehende Module erweitert. In der Datenhaltungsschicht wurde das bestehende Datenbankschema angepasst.

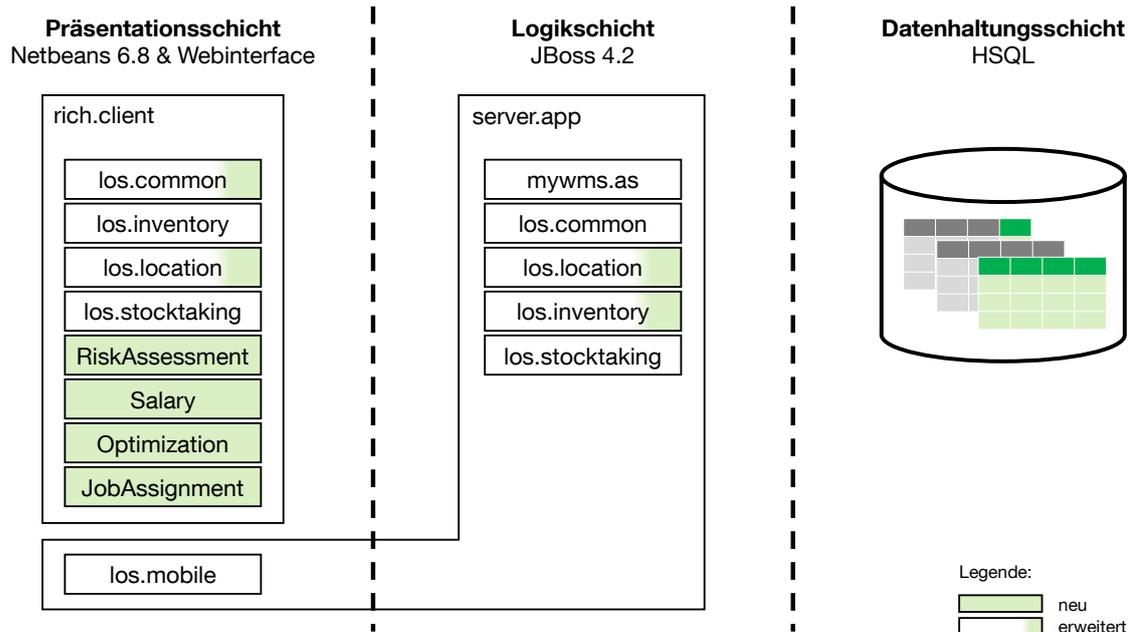


Abbildung 5-2: Erweiterungen in myWMS LOS, in Anlehnung an [fml-2014]

5.2 Belastungsbewertung

In diesem Abschnitt werden die für die Belastungsbewertung erforderlichen Erweiterungen beschrieben, diese betreffen das Datenbankschema, die Lagertopologie, die Speicherung der Bewertungsergebnisse, den Ablauf der Belastungsbewertung, die Benutzeroberfläche und das Generieren von Testdaten.

5.2.1 Datenbankschema

Am Datenbankschema von myWMS LOS wurden Änderungen vorgenommen, um das Speichern der für die Belastungsbewertung erforderlichen Daten (vgl. Abschnitt 3.4.3 und 3.4.4) zu ermöglichen. Die Änderungen werden im Folgenden erläutert und sind in Abbildung 5-3 veranschaulicht.

LOSPickRequest (Kommissionierauftrag)

Die Klasse *LOSPickRequest* (Kommissionierauftrag) wurde um die Attribute *executed* und *employee* erweitert. *Executed* enthält den Zeitpunkt der Fertigstellung. *Employee* gibt an, welcher Mitarbeiter dem Kommissionierauftrag zugeordnet ist. Des Weiteren wurde vom bereits existierenden Attribut *cart* (Kommissionierwagen) der Datentyp auf *Cart* geändert. Dieser war zuvor vom Typ *LOSStorageLocation*

(Lagerplatz), wodurch auch Regalplätze als Kommissionierwagen gesetzt werden konnten.

LOSPickRequestPosition (Kommissionierposition)

In der Klasse *LOSPickRequestPosition* (Kommissionierposition) wurde das Attribut *pickSequenceIndex* hinzugefügt. Dieses Attribut enthält die Nummer der Kommissionierposition.

Employee (Mitarbeiter)

Das Speichern von Mitarbeiterdaten war in myWMS LOS nicht vorgesehen, daher wurde die Klasse *Employee* (Mitarbeiter) neu angelegt. Attribute der Klasse sind *number* (Personalnummer), *firstName* (Vorname), *lastName* (Nachname), *sex* (Geschlecht), *armLength* (Armlänge) und *bodySize* (Körpergröße).

LOSArea (Lagerbereich)

Die Klasse *LOSArea* (Lagerbereich) wurde um die Attribute *pickStartPos*, *pickDestination*, *unloadCartAtDestination* und *pickDestinationHeight* erweitert. *PickStartPos* und *pickDestination* geben Start- und Abgabepunkt für einen Kommissionierauftrag an. *UnloadCartAtDestination* beschreibt, ob manuelles Umsetzen bei der Abgabe erfolgt. Das Attribut *pickDestinationHeight* ist für die Höhe der Abgabe.

LevelHeight (Lagerplatzebene)

Die Klasse *LevelHeight* (Lagerplatzebene) wurde neu angelegt. Die Attribute der Klasse sind *yCoordinate*, *area* und *height*. *yCoordinate* und *area* beschreiben die Lagerplatzebene eines Lagerbereichs. *Height* enthält den Abstand einer Lagerplatzebene vom Boden.

Cart (Kommissionierwagen)

Die neu angelegte Klasse *Cart* (Kommissionierwagen) ist eine Spezialisierung der Basisklasse *LOSStorageLocation*. Die Spezialisierung *Cart* besitzt neben den geerbten Attributen der Basisklasse das Attribut *cartType*, durch welches der Kommissionierwagentyp angegeben wird.

CartType (Kommissionierwagentyp)

Die neu erstellte Klasse *CartType* (Kommissionierwagentyp) besitzt die Attribute *weight*, *onlySwivelCasters* und *storageHeight*. *Weight* gibt das Eigengewicht des Kommissionierwagens an. *OnlySwivelCasters* beschreibt, ob der Kommissionierwagen nur Lenkrollen besitzt. *StorageHeight* ermöglicht das Speichern der Ablagehöhe des Kommissionierwagens.

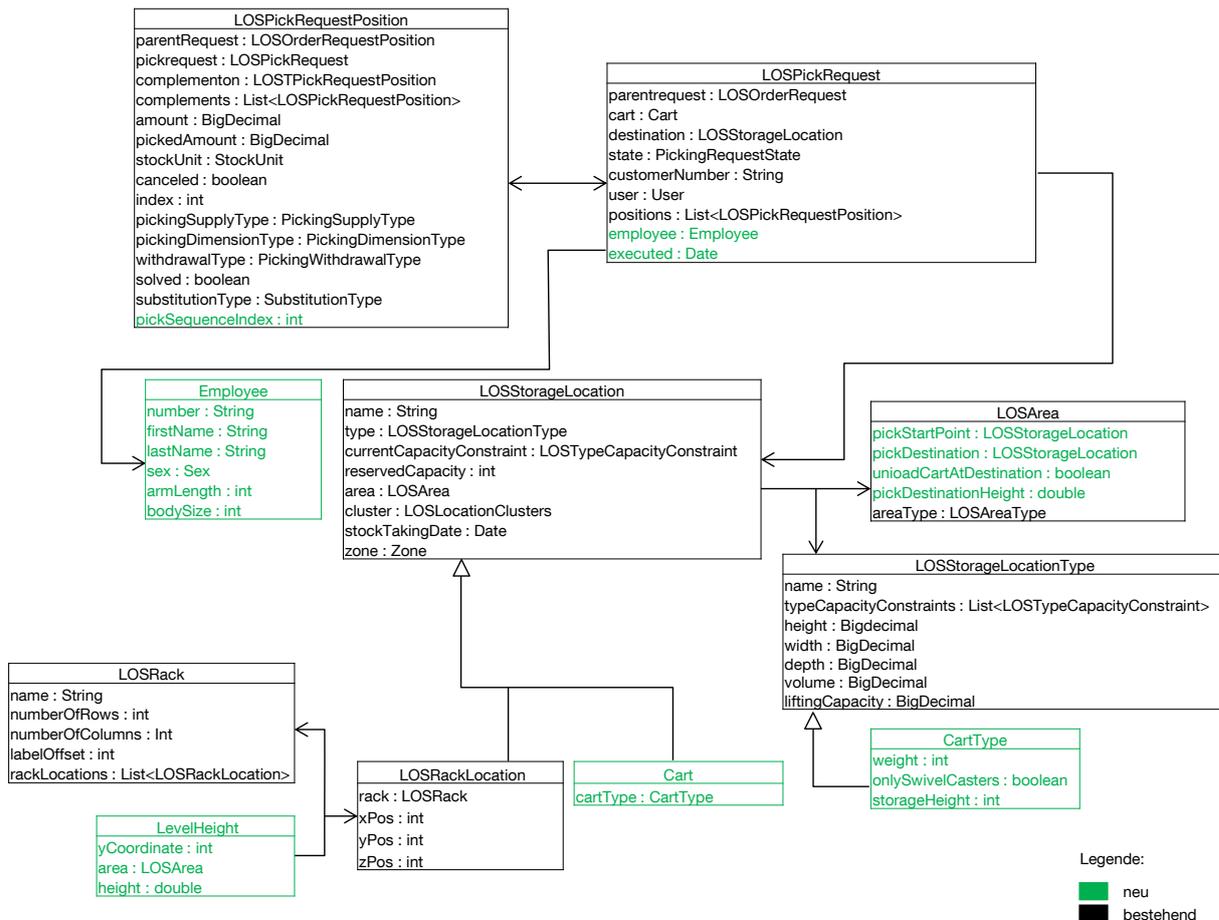


Abbildung 5-3: Erweitertes Datenbankschema [fml-2014]

5.2.2 Lagertopologie

Um die vom Kommissionierer zurückgelegten Distanzen für die Bewertung von Zieh-/Schiebevorgängen ermitteln zu können, wurde myWMS LOS um die Abbildung von Lagertopologien erweitert.

Ein ungerichteter Graph, bestehend aus Knoten und Kanten, bildet das Wegenetz des Lagers von beliebig vielen Lagerbereichen ab. Knoten sind relevante Wegpunkte im Lager, z. B. vor einem Lagerplatz, an der Abgabe, an Verzweigungen oder bei

Gasseneingängen. Jeder Wegpunkt kann mit beliebig vielen Lagerplätzen assoziiert werden, jeder Lagerplatz ist jedoch genau einem Wegpunkt zugeordnet. In myWMS LOS sind Regalplätze (*LOS Rack Location*) eine Spezialisierung von Lagerplätzen (*LOS Storage Location*), sie besitzen zusätzlich x-, y- und z-Koordinaten. Regalplätze des gleichen Lagerbereichs, die sich nur in der Koordinate für die Ebene unterscheiden, sollten immer dem gleichen Wegpunkt zugeordnet sein. Kanten sind die möglichen Verbindungen zwischen den Wegpunkten, welche jedoch nur zwischen benachbarten Wegpunkten erstellt werden. Jede Kante hat genau ein Gewicht, das der Länge des Weges in Metern zwischen beiden Wegpunkten entspricht.

Innerhalb eines Lagerbereichs muss ein Graph zusammenhängend sein, d. h. je zwei Knoten können durch mindestens eine Kantenfolge des Graphen verbunden werden. Für jeden Lagerbereich ist zudem ein Start- und ein Abgabepunkt zu definieren, wobei diese identisch sein können. Für jeden der beiden Punkte wurde ein Pseudo-Lagerplatz erstellt, der mit einem Wegpunkt assoziiert wurde.

5.2.3 Ablauf der Belastungsbewertung

Die Belastungsbewertung gliedert sich in eine Auftragsanalyse, die einen einzelnen Kommissionierauftrag analysiert, und eine Risikowertermittlung, die auf Basis der Ergebnisse der Auftragsanalyse den Risikowert ermittelt. Beide Phasen greifen auf einen Formelblock zu.

Formelblock

Der Formelblock enthält die Formeln von eLMM und MLT zur Belastungsbewertung. Er ist losgekoppelt von der Datenhaltung von myWMS LOS. Der Formelblock ist in Abbildung D-1 dargestellt. Die komplexe Struktur ergibt sich aus den Unterschieden der beiden Bewertungsverfahren sowie der Unterscheidung von Mann und Frau bei einigen Berechnungen.

Auftragsanalyse

In der Auftragsanalyse und der Risikowertermittlung ist die Flusslogik sowie die Speicherung der Ergebnisse implementiert. Die Auftragsanalyse startet, sobald ein Auftrag auf *Accepted* gesetzt wird (vgl. Abbildung 5-4) und analysiert nur diesen einen Kommissionierauftrag. Den Ablauf der Analyse zeigt Abbildung 5-5.



Abbildung 5-4: Die Auftragsanalyse startet mit dem Öffnen des Kommissionierauftrags, in Anlehnung an [fmi-2014].

Die zugehörigen Klassen sind in Abbildung D-2 dargestellt. Die Klasse *RiskAssessmentPickRequestAnalyzer* durchläuft alle Kommissionierpositionen des zu analysierenden Auftrags und ruft für jede vom Kommissionierer durchzuführende Handhabung die zugehörige Methode des Interfaces *RiskAssessmentPickRequestCalculator* auf. Der Calculator berechnet die Wichtungen für jede Handhabung und speichert die Ergebnisse auf Positionsebene, dabei greift er für das Ziehen/Schieben auf die Klasse *RiskAssessmentPickRequestPositionPullPush* und für das Umsetzen auf die Klasse *RiskAssessmentPickRequestPositionMove* zu. Diese beiden Klassen nutzen die im Formelblock implementierten Formeln der Bewertungsverfahren. Hat der Analyzer alle Positionen des Kommissionierauftrags sowie die Fahrt zum und ggf. das Umsetzen am Abgabepunkt durchlaufen, veranlasst der Calculator die Aggregation der Ergebnisse und das Speichern auf Auftragsebene.

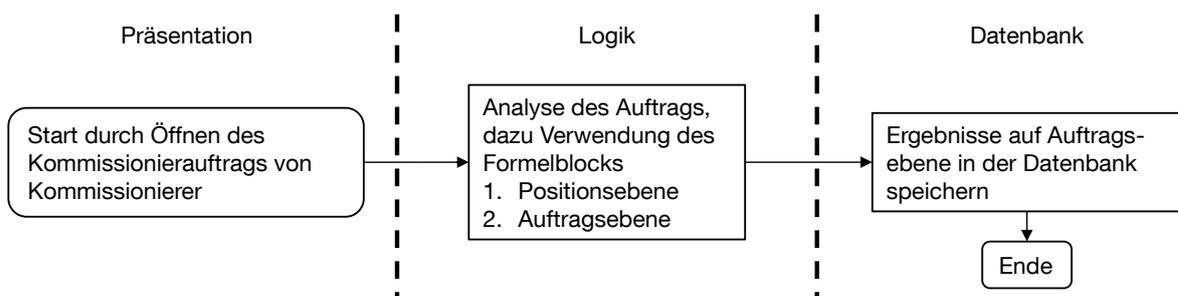


Abbildung 5-5: Ablauf der Auftragsanalyse

Risikowertermittlung

Die Risikowertermittlung wird vom Benutzer gestartet und ab diesem Zeitpunkt in konstanten Zeitintervallen erneut automatisch gestartet (siehe Abbildung 5-6). In der Risikowertermittlung wird auf Basis der Ergebnisse der Auftragsanalyse für jeden Mitarbeiter und jede Schicht ein Risikowert berechnet. Für die Berechnung werden

alle Kommissionieraufträge mit den Status *Accepted*, *Picking*, *Picked*, *Finished* betrachtet. Abbildung D-3 zeigt die Implementierung dieser Phase.

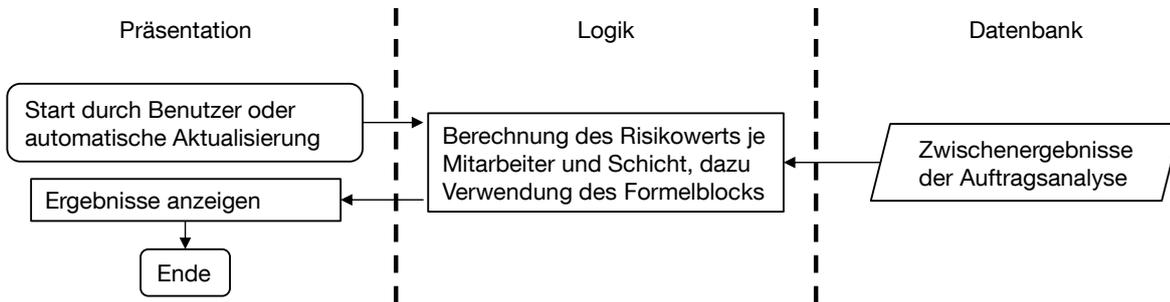


Abbildung 5-6: Ablauf der Risikowertermittlung

5.2.4 Speicherung der Bewertungsergebnisse

Um die Ergebnisse von Auftragsanalyse und Risikowertermittlung zu speichern, wurden neue Klassen erstellt. Die Ergebnisse der Auftragsanalyse werden auf Positionsebene sowie auf Auftragsebene gespeichert.

Abbildung 5-7 zeigt die durchgeführten Erweiterungen für die Ergebnisse auf Positionsebene. Die Klasse *SinglePickRiskAssessment* sowie deren Ableitungen dienen zum Speichern der Ergebnisse. Die vier Ableitungen *PickRequestPositionRAELMM*, *LocationRAELMM*, *PickRequestPositionRAMLT*, *LocationRAMLT* resultieren aus Unterschieden der beiden implementierten Bewertungsverfahren eLMM und MLT sowie aus der Zuordenbarkeit zu einer Auftragsposition. Handhabungen, die keiner Position des Kommissionierauftrags direkt zugeordnet werden können, werden einem Lagerplatz zugeordnet. Zum Beispiel kann das manuelle Umsetzen am Abgabepunkt keiner existierenden Position zugeordnet werden, folglich wird diese der als Lagerplatz definierten Abgabe zugeordnet. Um die Performance zu verbessern, werden die berechneten Ergebnisse nicht in die Datenbank geschrieben.

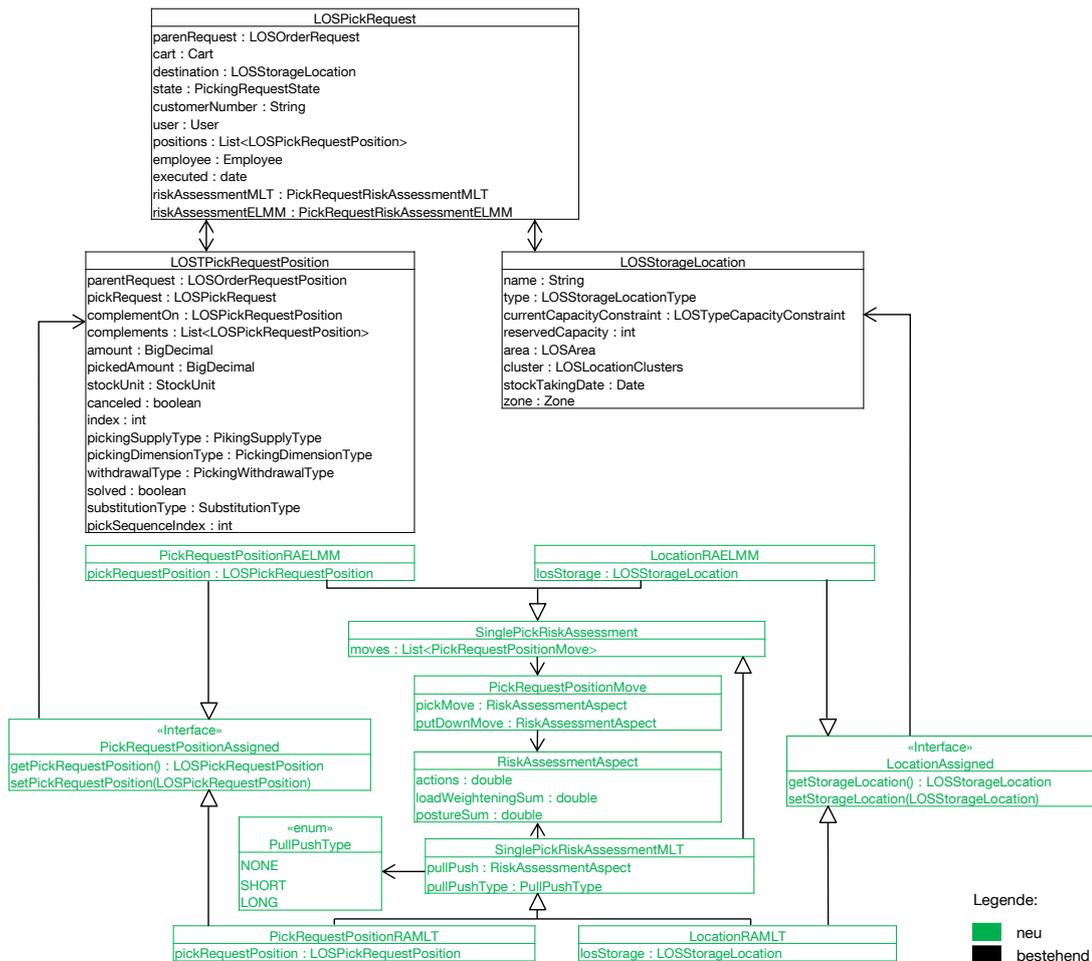


Abbildung 5-7: Erweiterungen für die Speicherung der Ergebnisse auf Positionsebene [fml-2014]

Abbildung 5-8 zeigt die Klassen auf Auftrags Ebene. Die Speicherung des Ergebnisses der Auftragsanalyse wird über die Klassen *PickRequestRiskAssessmentELMM* und *PickRequestRiskAssessmentMLT* durchgeführt. *RiskAssessmentELMM* und *riskAssessmentMLT* sind Attribute des Kommissionierauftrags zur Speicherung der Ergebnisse der Auftragsanalyse. Die Risikowertermittlung nutzt diese Ergebnisse.

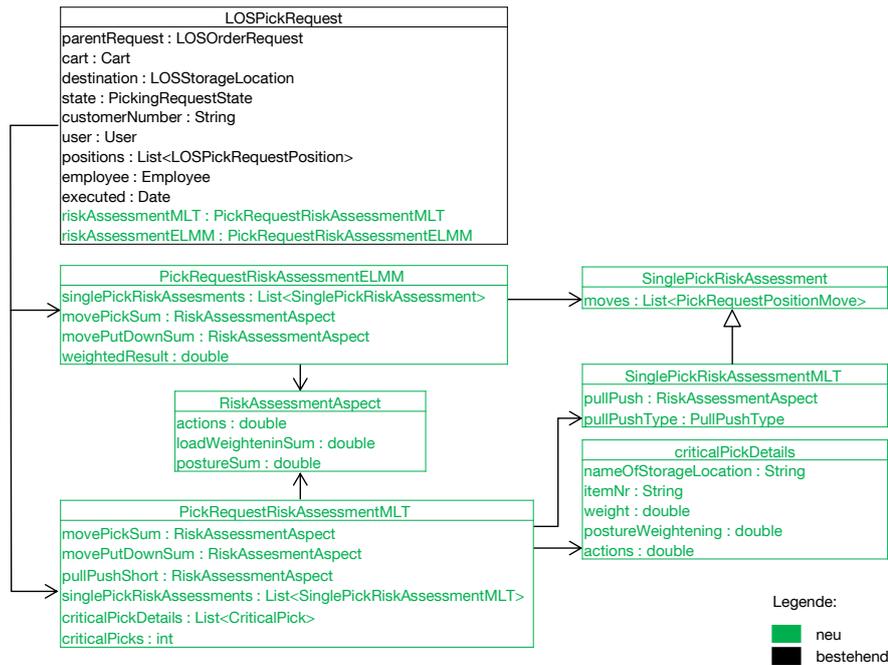


Abbildung 5-8: Erweiterungen für die Speicherung der Ergebnisse auf Auftragsebene [fml-2014]

5.2.5 Benutzeroberfläche

Die Änderungen an der Benutzeroberfläche betreffen zwei Bereiche. Zum einen wurde die Bearbeitung der neu erstellten Klassen und Attribute ermöglicht, außerdem wurde eine Registerkarte für die Visualisierung der Belastungsbewertung erstellt.

Verwaltung zusätzlicher Daten

Die in Abschnitt 5.2.1 beschriebenen Anpassungen im Datenbankschema wirken sich auf die Darstellung der Daten für den Benutzer aus. Im Entitäten-Explorer wurden im Ordner *Stammdaten* die Punkte *Mitarbeiterstamm*, *Kommissionierwagentyp*, *Kommissionierwagen* und *Regalebenehöhe* hinzugefügt (vgl. Abbildung 5-9). Jeder Punkt steht für eine neu erstellte Tabelle.

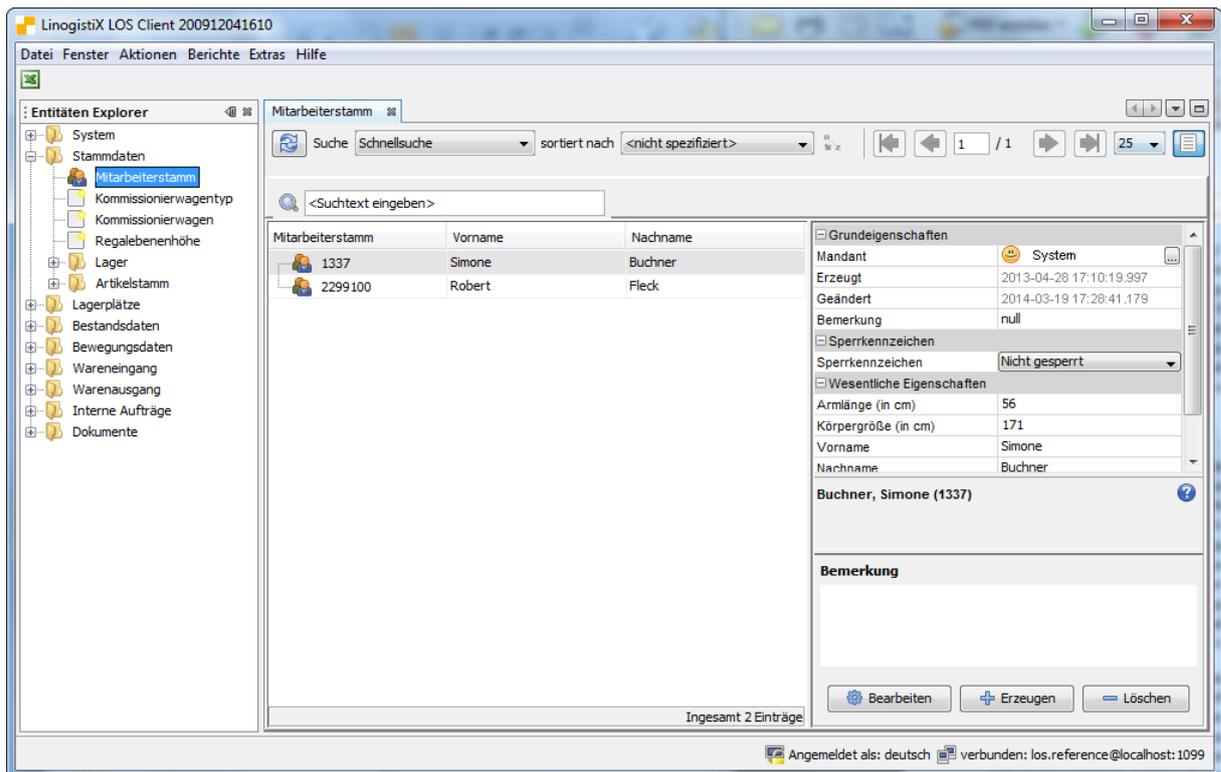


Abbildung 5-9: Neue Punkte im Entitäten Explorer

Für bereits existierende Klassen, die um neue Attribute erweitert wurden, sind neue Spaltenüberschriften in den zugehörigen Tabellen entstanden. Dies betrifft die Punkte *Warenausgang\Kommissionieraufträge*, *Warenausgang\Kommissionierpositionen* sowie *Stammdaten\Lager\Bereiche* im Entitäten-Explorer.

Belastungsbewertung

Die neu erstellte Registerkarte für die Belastungsbewertung wird über den Menüpunkt *Fenster > Risikobewertung durchführen* geöffnet. Sie gliedert sich in drei Teile: Eingaben, Übersicht über alle Mitarbeiter und Detailansicht für einen Mitarbeiter und eine Schicht. Abbildung 5-10 zeigt die Registerkarte.

Im oberen Teil befinden sich die Eingaben. Der Benutzer kann den zu bewertenden Zeitraum durch Eingabe von Startdatum und Enddatum eingrenzen. Außerdem kann er eLMM oder MLT als Methode für die Belastungsbewertung auswählen. Die Belastungsbewertung wird gestartet über den Button *Risikobewertung durchführen* und aktualisiert sich nach dem Starten fortlaufend automatisch.

In der Tabelle darunter befindet sich eine Übersicht über alle Mitarbeiter, in der die Risikowerte je Mitarbeiter und Schicht eingetragen sind. Neben jedem Risikowert

befindet sich die zugehörige Ampelfarbe, die den Risikowert einem Risikobereich zuordnet und schnell kritische Arbeitsplätze erkennen lässt.

Möchte der Benutzer Details über einen bestimmten Risikowert erfahren, kann er in dessen Zelle klicken. In der Detailansicht unter der Tabelle erscheinen Informationen zu dem ausgewählten Risikowert. Zuerst finden sich dort Informationen zum durchführenden Mitarbeiter. Darunter zeigt ein Diagramm den Verlauf des Risikowerts in Abhängigkeit von der Uhrzeit. Der Diagrammhintergrund in der Vergangenheit ist nicht transparent. Kommissionieraufträge dieses Zeitraums haben die Status *Picked* und *Finished*. Der Diagrammhintergrund für die Zukunft ist transparent dargestellt. Kommissionieraufträge mit den Status *Accepted* und *Picking* werden für die Auswertung hinzugenommen. Unter dem Diagramm befindet sich der prognostizierte Risikowert zum Ende der Schicht sowie die Punktwerte je Handhabungsart (Umsetzen, Ziehen/Schieben kurz, Ziehen/Schieben lang). Für jede Handhabungsart sind belastungsrelevante Informationen visualisiert. Der Benutzer kann sich beispielweise Informationen zu ungünstigen Kombinationen aus Lastgewicht und Körperhaltung unter dem Punkt *Anzahl Belastungsspitzen\Details* aufrufen.

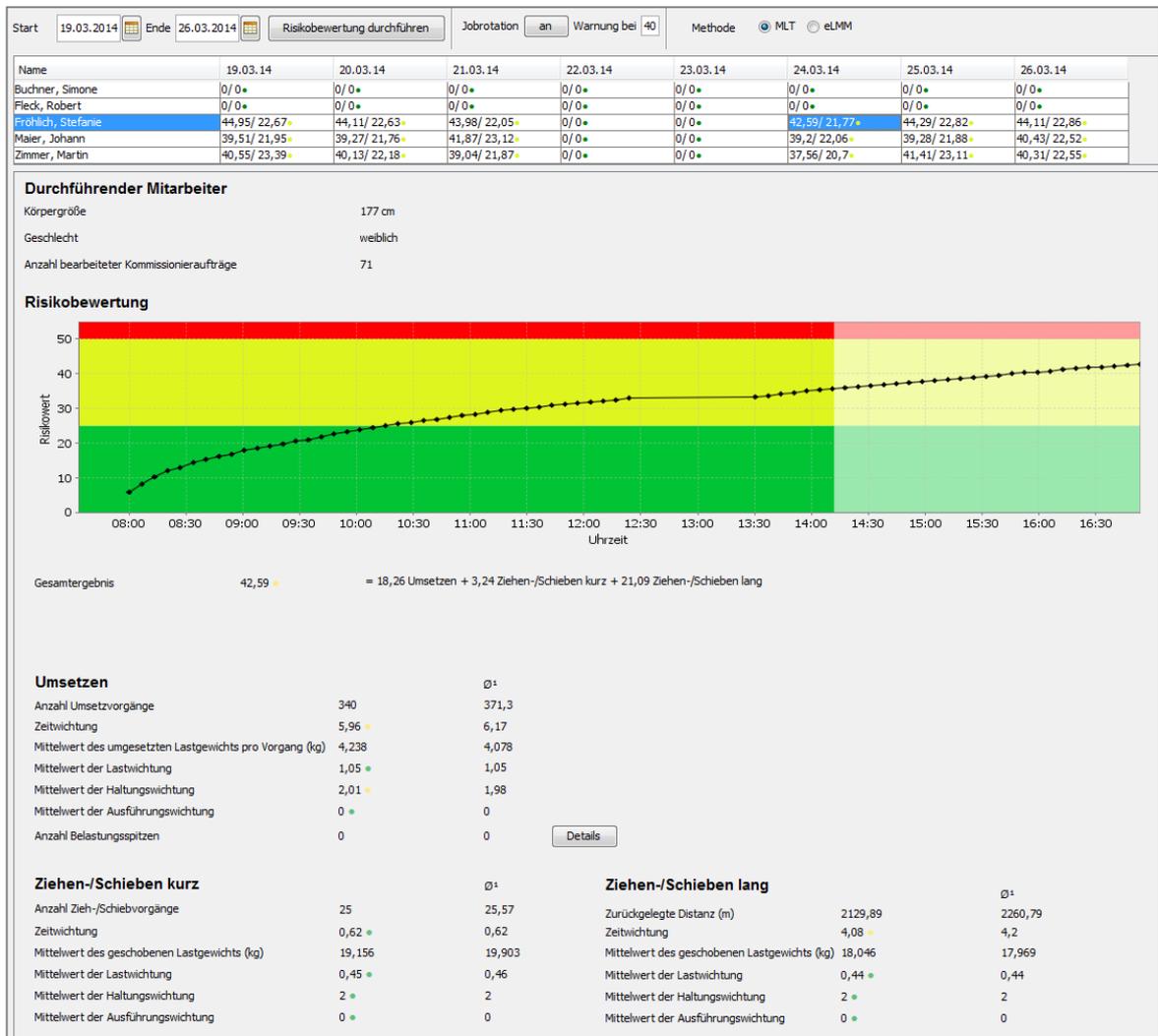


Abbildung 5-10: Registerkarte der Belastungsbewertung

5.2.6 Testdaten

Für Testzwecke wurde zudem ein Testdatengenerator erstellt, der über den Menüpunkt *Fenster > Testdaten generieren* aufgerufen werden kann. Dort kann der Benutzer die Eingaben tätigen sowie die Testdatengenerierung starten. In einem ersten Schritt erstellt die Klasse *TestDataInitiator* Mitarbeiter (*Employee*), Artikel (*Items*), Ladehilfsmittel (*UnitLoads*) sowie Lagereinheiten (*StockUnits*). Im zweiten Schritt generiert die Klasse *TestDataGenerator* Kommissionieraufträge. Alle generierten Daten werden in der Datenbank gespeichert. Das Löschen der Testdaten startet ebenfalls der Benutzer. Die Klasse *TestDataDeleter* entfernt die Testdaten aus der Datenbank.

5.3 Belastungszulage

In diesem Abschnitt werden die Änderungen an der Benutzeroberfläche für die Implementierung der Belastungszulage vorgestellt. Die Benutzeroberfläche besteht aus einem Assistenten sowie einer Registerkarte. Der Benutzer kann den Assistent über den Menüpunkt *Extras > Entgeltermittlung* öffnen.

Der Assistent umfasst vier Schritte. In Schritt 1 sind die Monate auszuwählen, für die die Entgeltermittlung stattfinden soll. Im nächsten Schritt sind die Entgeltbeträge ohne die Belastungszulage zu bestimmen. Dies erfolgt entweder durch den Import einer XML-Datei. In Schritt 3 sind Bezugsrisikowert und Belastungszulage vom Benutzer einzugeben. Die verwendete Formel für die Entgeltermittlung wird im Assistent angezeigt (vgl. Abschnitt 3.6). Die beiden Eingaben werden stets für die nächste Verwendung des Assistenten gespeichert. Der Benutzer kann auch Standardwerte festlegen und diese wiederherstellen. Im letzten Schritt wählt der Benutzer die Methode für die Belastungsbewertung aus, diese ist entweder die erweiterte Leitmerkalmethode oder das Multiple-Lasten-Tool.

Das Entgelt wird entsprechend der in Abschnitt 3.6 vorgestellten Vorgehensweise für die in Schritt 1 des Assistenten ausgewählten Monate berechnet. Als Arbeitstage werden alle Wochentage außer Samstag und Sonntag gesetzt.

Nach dem Beenden des Assistenten öffnet sich automatisch die Registerkarte *Entgeltermittlung*. Die darin angezeigte Tabelle enthält für jeden Mitarbeiter und Monat drei Einträge (siehe Abbildung 5-11). Der erste gibt Auskunft über die Höhe des Entgelts ohne Belastungszulage, der zweite über die Belastungszulage, der dritte gibt an, wie hoch das Entgelt mit Belastungszulage ist.

Name	06.14 Entgelt ohne Belastungszulage	06.14 Belastungszulage	06.14 Entgelt inklusive Belastungszulage
Kommissionierer, Nr. 1	1500,0	45,18	1545,18
Kommissionierer, Nr. 2	1500,0	44,16	1544,16

Abbildung 5-11: Tabelle zur Entgeltermittlung

5.4 Lagerplatzzuordnung

In diesem Abschnitt wird näher auf die Erweiterungen der Datenstruktur und der Benutzeroberfläche eingegangen, die für die Lagerplatzzuordnung implementiert wurden.

5.4.1 Datenstruktur für die Bewertung einer Lagerplatzzuordnung

Die Bewertung einer Lagerplatzzuordnung gliedert sich wie in Abschnitt 4.1.1 beschrieben in zwei Phasen. In der ersten Phase wird die Durchführung aller ausgewählten Kommissionieraufträge simuliert, dabei werden für jede Schicht und jede Person bestimmte Kennzahlen ermittelt sowie pro Person Durchschnittswerte über alle Schichten gebildet. Bestimmte Kennzahlen sind der Risikowert für jede ausgewählte Person, die zurückgelegte Wegstrecke, die Kommissionierleistung in Anzahl Positionen pro Stunde, die Anzahl bearbeiteter Kommissionieraufträge, die Anzahl bearbeiteter Positionen sowie die Anzahl Entnahmen. In der zweiten Phase wird der Wert der Fitnessfunktion bestimmt, wozu zuvor die Durchschnittswerte über alle Personen für die Ergebnisse aus Phase 1 gebildet werden.

Die Ergebnisse der beiden Phasen werden im Objekt *WarehouseFitness* gespeichert (siehe Abbildung 5-12). Dieses besteht aus dem Vektor *EmployeeShiftRisks* sowie aus acht Attributen.

```
WarehouseFitness
{
  EmployeeShiftRisks: [ ... ],

  fitness: 0.16,
  averageDistance: 2341,
  averageRisk: 36.7,
  averagePerformance: 70.8,

  optimalDistance: 2124,
  targetRisk: 30,
  distanceWeightenFactor: 0.5,
  riskWeightenFactor: 0.5
}
```

Abbildung 5-12: Objekt *WarehouseFitness* [fml-2014]

Der Vektor *EmployeeShiftRisks* enthält Ergebnisse der Phase 1. In jedem Feld des Vektors ist ein Objekt des Datentyps *EmployeeShiftRisk* gespeichert, welches genau einer Person zugeordnet ist und alle Ergebnisse dieser Person enthält. Der Vektor *EmployeeShiftRisks* hat daher die Länge der für die Optimierung bestimmten Anzahl an Personen. Das Objekt *EmployeeShiftRisk* hat 16 Attribute (siehe Abbildung 5-13). Das Attribut *employee* speichert Informationen zum Mitarbeiter. Das Attribut *numShifts* gibt an, wie viele Schichten für die Person simuliert wurden. Die Attribute

shiftRisk (Risikowert), *shiftDistance* (Wegstrecke), *shiftPickTime* (Kommissionierzeit), *shiftPerformance* (Leistung), *shiftNumPickRequests* (Anzahl an bearbeiteten Kommissionieraufträge), *shiftNumPickPositions* (Anzahl an bearbeiteten Positionen) und *shiftPicks* (Anzahl an Entnahmen) enthalten die Kennzahlen für jede Schicht und daher Vektoren der Länge *numShifts*. Die Attribute *averageRisk*, *averageDistance*, *averagePickTime*, *averagePerformance*, *averagePickRequests*, *averagePickPositions* und *averagePicks* enthalten die zugehörigen Durchschnittswerte der Person über alle Schichten.

```
EmployeeShiftRisk:
{
  employee: {bodySize: 171, armLength: 56, sex: „FEMALE“},
  numShifts: 3,

  shiftRisk: [41.2, 34.5, 38.0],
  shiftDistance: [2387, 2103, 2594],
  shiftPickTime: [ ... ],
  shiftPerformance: [ ... ],
  shiftNumPickRequests: [ ... ],
  shiftNumPickPositions: [ ... ],
  shiftNumPicks: [ ... ],

  averageRisk: 37.9,
  averageDistance: 2361 ,
  averagePickTime: ... ,
  averagePerformance: ... ,
  averagePickRequests: ... ,
  averagePickPositions: ... ,
  averagePicks: ...
}
```

Abbildung 5-13: Objekt *EmployeeShiftRisk* [fml-2014]

Die vier Attribute *fitness*, *averageDistance*, *averageRisk* und *averagePerformance* des Objekts *WarehouseFitness* enthalten die Ergebnisse aus Phase 2. *fitness* enthält den Wert der Fitnessfunktion für die zu untersuchende Lagerplatzzuordnung. *averageDistance* (Wegstrecke), *averageRisk* (Risikowert) und *averagePerformance* (Leistung) enthalten den Mittelwert über die zugehörigen Durchschnittswerte pro Person.

Die Attribute *optimalDistance*, *targetRisk*, *distanceWeightenFactor* und *riskWeightenFactor* des Objekts *WarehouseFitness* enthalten die Parameter für die Spezifikation der Fitnessfunktion (vgl. Abschnitt 4.1.1). *optimalDistance* speichert den

Wert der Wegstrecke der wegeoptimierten Lösung d_{\min} , *targetRisk* den angestrebten Risikowert r_{ziel} , *distanceWeightenFactor* enthält den Gewichtungsfaktor für die Wegstrecke w_d und *riskWeightenFactor* den Gewichtungsfaktor für den Risikowert w_r .

5.4.2 Benutzeroberfläche

Die Benutzeroberfläche zur Lagerplatzzuordnung besteht aus einem Assistenten sowie einer Registerkarte. Der Assistent öffnet sich über den Menüpunkt *Extras > Lagerplatzzuordnung optimieren ...*.

In Schritt 1 bis 3 findet eine Eingrenzung der Kommissionieraufträge statt, die für die Optimierung verwendet werden. In Schritt 1 wählt der Benutzer dazu den zu optimierenden Lagerbereich aus. In Schritt 2 wählt er einen repräsentativen Zeitraum aus der Vergangenheit durch Eingabe von Start- und Enddatum. In Schritt 3 können von bestimmten Mitarbeitern erledigte Kommissionieraufträge durch Deaktivieren des Mitarbeiters aus der Datenbasis für die Optimierung ausgeschlossen werden.

In Schritt 4 kann der Benutzer die Personen für die Optimierung definieren (siehe Abbildung 5-14). Dies kann entweder eine fiktive Person sein, für die Geschlecht, Körpergröße und Armlänge anzugeben sind, oder Personen aus dem Mitarbeiterstamm.

In Schritt 5 ist eine Methode für die Belastungsbewertung auszuwählen sowie anzugeben, ob auch eine Wegeoptimierung oder eine Leistungsbewertung stattfinden soll. Als mögliche Methode können eLMM, MLT und MLT ohne Ziehen/Schieben gewählt werden. Das MLT ohne eine Bewertung des Ziehen/Schiebens als zusätzliche Option wurde erstellt, da beim MLT mit einer Bewertung des Ziehen/Schiebens eine Lösung mit sehr langen Wegen aufgrund der niedrigeren entstehenden Belastung besser beurteilt wurde als eine mit kurzen Wegen. Deaktiviert der Benutzer die Option *Wegeoptimierung*, wird nur die y-Koordinate der Lagerplätze variiert, wodurch sich die Wege des Kommissionierers nicht ändern. Wird die Option *Leistungsbewertung* aktiviert, wird im Rahmen der Optimierung nicht nur der zurückgelegte Weg berechnet, sondern auch die resultierende Leistung geschätzt.

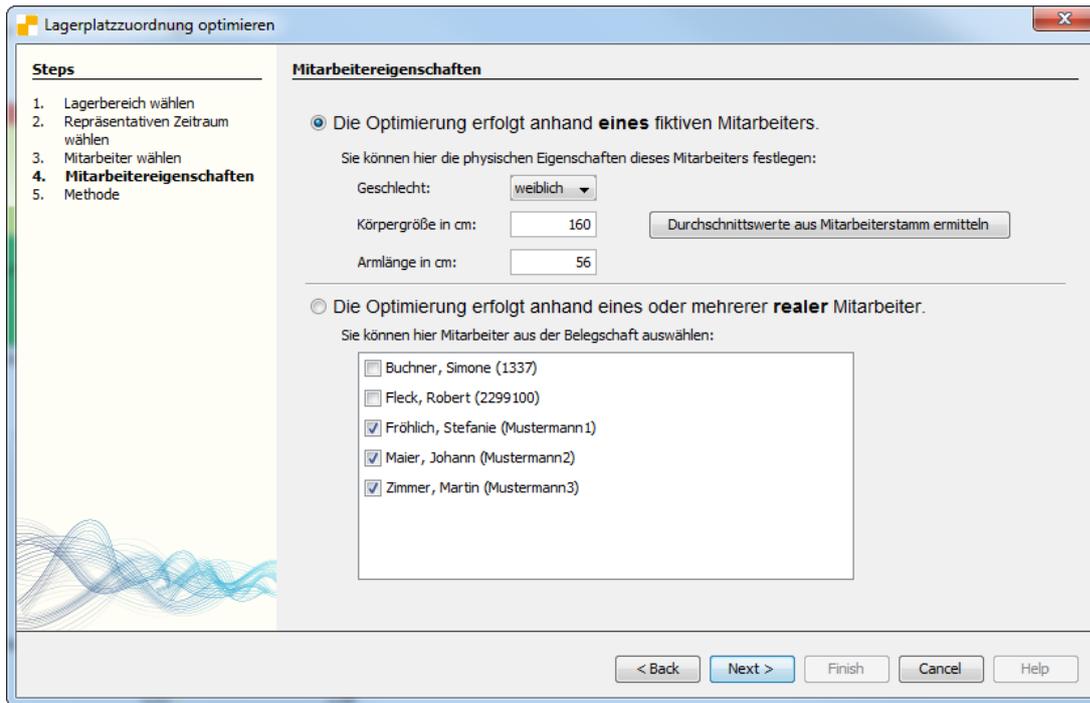


Abbildung 5-14: Assistent für die Optimierung der Lagerplatzzuordnung

Durch Beenden des Assistenten öffnet sich automatisch die Registerkarte für die Optimierung der Lagerplatzzuordnung (siehe Abbildung 5-15). Diese gliedert sich in drei Bereiche.

Links oben sind Informationen zu den ausgewählten Kommissionieraufträgen dargestellt. Rechts oben kann der Benutzer drei Parameter der Fitnessfunktion eingeben: die Zielvorgabe für den Risikowert sowie die Werte der Gewichtungsfaktoren. Die Formel für Fitnessfunktion kann zudem vom Benutzer modifiziert werden. Der Benutzer startet die Optimierung durch das Klicken auf den Button *Starten*.

Im unteren Bereich der Registerkarte finden sich zwei Registerkarten: *Lösungsbewertung* und *Beste gefundene Lösung*. Die Registerkarte *Lösungsbewertung* zeigt die Werte der bisher besten gefundenen Lösung sowie in einem Diagramm deren Verlauf in Abhängigkeit der Iterationen. Der Benutzer muss die Lösungsbewertung manuell stoppen durch das Klicken auf *Lösungsbewertung stoppen*. Sobald er die Lösungssuche beendet, öffnet sich die Registerkarte *Beste gefundene Lösung* und zeigt die Lagerplatzzuordnung mit dem besten Wert der Fitnessfunktion, die gefunden wurde.

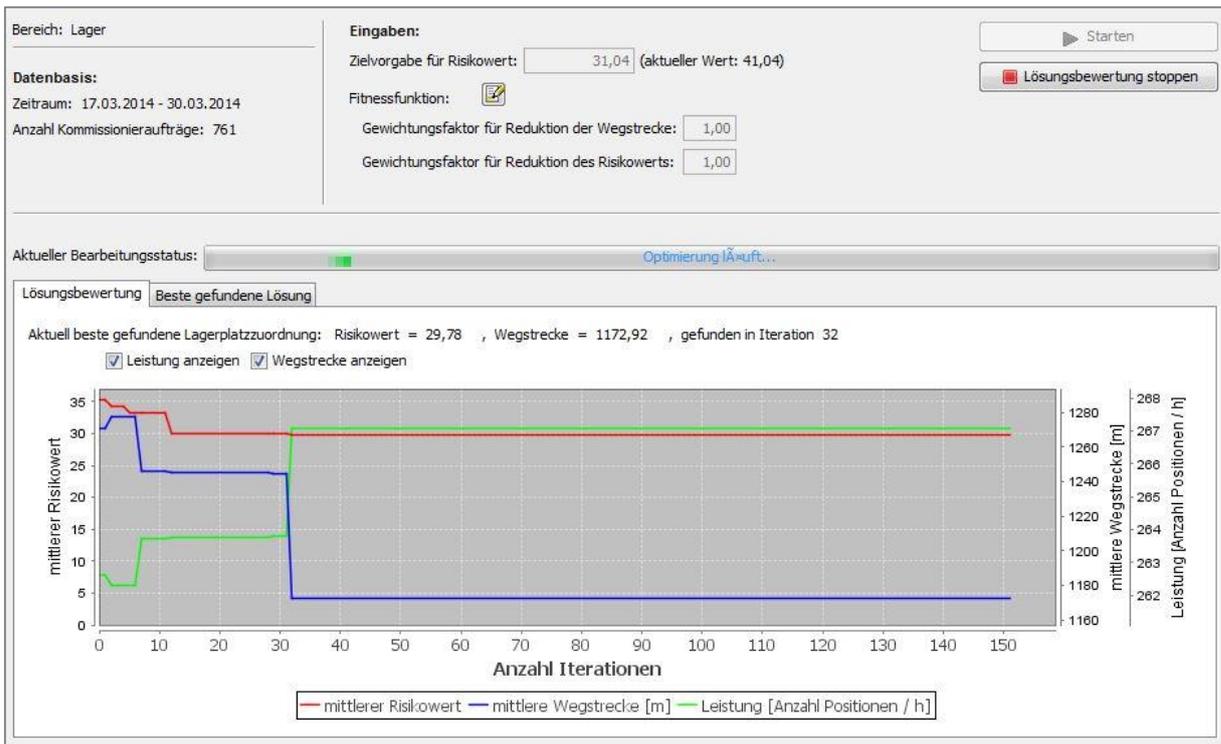


Abbildung 5-15: Registerkarte für die Optimierung der Lagerplatzzuordnung

5.5 Auftragszuweisung

Die in Abschnitt 4.2.2 vorgestellte Heuristik wurde im Demonstrator umgesetzt, um Aufträge den Mitarbeitern gezielt zuzuweisen. Für die Auftragszuweisung ist es erforderlich, dass der Benutzer diese in der Registerkarte der Belastungsbewertung aktiviert hat (siehe Abbildung 5-16), ansonsten werden die Aufträge den Mitarbeitern zufällig zugeordnet. Die Zuweisung erfolgt in konstanten Zeitabständen (alle 10 Minuten) für alle bekannten, aber noch nicht in der Vergangenheit zugewiesenen Aufträge.



Abbildung 5-16: Aktivieren der Auftragszuweisung

5.6 Jobrotation

In diesem Abschnitt werden die Änderungen an der Benutzeroberfläche näher erläutert, die für die belastungsorientierte Jobrotation vorgenommen wurden. Die Änderungen umfassen zwei Bereiche: Zum einen sind Eingaben des Benutzers erforder-

lich, zum anderen muss der Mitarbeiter über den Arbeitsplatzwechsel informiert werden.

Die Eingaben für die Jobrotation sind in der Registerkarte der Belastungsbewertung integriert, diese ist über den Menüpunkt *Fenster > Risikobewertung durchführen* erreichbar. Der Benutzer kann einstellen, ob die belastungsorientierte Jobrotation aktiviert sein soll und wenn ja, bei welchem Grenzkrisikowert der Arbeitsplatzwechsel stattfinden soll (siehe Abbildung 5-16).

Sobald ein Mitarbeiter das erste Mal den Grenzkrisikowert überschreitet, erscheint ein Pop-up mit der Aufforderung zum Arbeitsplatzwechsel (siehe Abbildung 5-17). Um den Risikowert eines Mitarbeiters zu ermitteln, werden alle ihm zugewiesene Aufträge mit den Status *picked* und *finished* für die Risikowertermittlung verwendet. Das Pop-up erscheint in einer Schicht maximal einmal für jeden Mitarbeiter.



Abbildung 5-17: Aufforderung zum Arbeitsplatzwechsel durch ein Pop-up

6 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Kapitel werden zu Beginn die Ergebnisse des Forschungsprojekts zusammengefasst (Abschnitt 6.1) sowie ein Ausblick gegeben (Abschnitt 6.2). Im Anschluss wird der Nutzen und industrielle Anwendungsmöglichkeiten (Abschnitt 6.3), die Verwendung der zugewendeten Mittel (Abschnitt 6.4) und der Ergebnistransfer in die Wirtschaft (6.5) erläutert.

6.1 Zusammenfassung

Ziele des Forschungsprojekts „ErgoWMS“ waren die Entwicklung einer Methodik, die eine automatische und fortlaufende Bewertung der physischen Belastung von Kommissionierern ermöglicht, sowie die Konzeption von Verfahren, die es ermöglichen, die Belastung der Mitarbeiter zu senken.

Im Forschungsprojekt wurde für ein in der Praxis weit verbreitetes Kommissionierszenario eine Methodik für die automatische und fortlaufende Belastungsbewertung der dort eingesetzten Mitarbeiter im WMS entwickelt. Zu Beginn wurden hierfür Bewertungsverfahren für die physische Belastung untersucht und davon zwei geeignete für das Vorhaben ausgewählt: die erweiterte Leitmerkmalmethode und das Multiple-Lasten-Tool. Die erweiterte Leitmerkmalmethode beurteilt das Umsetzen von Lasten; das Multiple-Lasten-Tool eignet sich zur Bewertung von Tätigkeiten, bei denen das Umsetzen, Halten, Tragen, Ziehen oder Schieben von Lasten erfolgt. Für eine Integration in ein WMS wurde eine Vorgehensweise konzipiert, welche unabhängig vom betrachteten Kommissionierszenario ist. In dieser wird zuerst der zu bewertende Kommissionierprozess analysiert, anhand dessen ein Programmablaufplan für die Belastungsbewertung erstellt wird. Der Programmablaufplan stellt den Zusammenhang zwischen den Positionen eines Kommissionierauftrags und den resultierenden Lastenhandhabungen her. Für jede Handhabungsart wurde eine Logik erstellt, wie für eine Handhabung die Eingabedaten der Bewertungsverfahren ermittelt werden. Für einige Eingabedaten dienten die Beobachtungen aus Probandenversuchen als Datengrundlage zur Entwicklung der Logik. Zudem wurde untersucht, welche Datenbankeinträge im WMS erforderlich sind und ein mögliches Datenbankschema konzipiert.

Des Weiteren wurden Konzepte zur Reduzierung der Belastung entwickelt, welche auf die Ergebnisse der Belastungsbewertung zugreifen. Die Belastungsbewertung im WMS ermöglicht die Prognose der Risikowerte für eine gegebene Zuordnung von Artikeln zu Lagerplätzen. Unterschiedliche Zuordnungen können hinsichtlich der später entstehenden Belastung der Kommissionierer verglichen werden. In dieser Arbeit wurde ein genetischer Algorithmus vorgestellt, der die Lagerplatzzuordnungen generiert und evaluiert. Bei der Evaluation wird sowohl die entstehende mittlere von den Kommissionierern zurückgelegte Wegstrecke als auch der mittlere Risikowert der Mitarbeiter berücksichtigt. Ein weiteres Konzept zur Belastungsreduzierung ist das gezielte Zuweisen von Kommissionieraufträgen zu Mitarbeitern. Hoch belasteten Mitarbeitern werden dabei Aufträge zugewiesen, die ihren Risikowert möglichst wenig ansteigen lassen. Das dritte Konzept ist die ergonomische Jobrotation. Bei Erreichen eines Grenzkrisikowertes wird der Mitarbeiter vom WMS aufgefordert, für den Rest der Schicht eine Tätigkeit ohne manuelle Lastenhandlungen durchzuführen.

Die Methodik zur Belastungsbewertung und die Konzepte zur Belastungsreduzierung wurden exemplarisch in einem Demonstrator implementiert. Hierzu wurde das Open-Source-WMS myWMS LOS erweitert. Herzstück der Erweiterung ist die Belastungsbewertung. Sie ermittelt auf Basis der im WMS gespeicherten Daten, wie z. B. Kommissionieraufträgen und Mitarbeiterdaten, die Risikowerte je Mitarbeiter und Schicht. Für jeden Risikowert sind Details abrufbar, wie beispielsweise der Verlauf des Risikowertes innerhalb der Schicht, dessen Bestandteile oder Belastungsspitzen.

Die automatische Belastungsbewertung im WMS schafft Transparenz über die Belastungssituation in Unternehmen. Kritische Arbeitsplätze können somit frühzeitig erkannt und Maßnahmen zur Belastungsreduzierung gezielt eingesetzt werden.

6.2 Ausblick

Die Ergebnisse des Projekts haben gezeigt, dass die Belastungsbewertung von Kommissionierern in WMS integrierbar ist und zur Verbesserung der Belastungssituation genutzt werden kann. Die dargelegte Methodik zur Belastungsbewertung ist nicht auf die vorgestellten Einsatzszenarien beschränkt. Sie lässt sich auch auf andere Szenarien übertragen. Gegebenenfalls sind in diesem Zusammenhang weitere

Untersuchungen erforderlich, um die durchgeführten Lastenhandhabungen möglichst realitätsgetreu zu erfassen. Bevor eine Anwendung in der Unternehmen erfolgt, sollte die Methodik der Belastungsbewertung hinsichtlich der berechneten Risikowerte für den spezifischen Anwendungsfall validiert werden. Probleme können somit erkannt und behoben werden.

Für nachfolgende Studien wird empfohlen die Einflussfaktoren auf das umgesetzte Lastgewicht sowie auf die Anzahl der für das Umsetzen verwendeten Hände genauer zu untersuchen. Bei den Probandenversuchen hat sich gezeigt, dass vor allem auch die Anordnung der Gegenstände bei der Bereitstellung einen wesentlichen Einfluss auf die Anzahl der auf einmal umgesetzten Kartons und damit auf das Lastgewicht hat.

Zukünftig gilt es zudem die existierenden Bewertungsverfahren weiter zu verbessern. Beispielsweise wirkt sich die Kombination von hohem Lastgewicht und hoher Haltungswichtung beim Multiple-Lasten-Tool nicht auf den Risikowert aus, sondern wird nur bei der Überprüfung auf biomechanisch kritische Lastenhandhabungen beachtet. Wird eine Optimierung der Lagerplatzzuordnung anhand des Bewertungsverfahrens durchgeführt, sollte sich das Lastgewicht auf die Höhe der ausgewählten Ebene auswirken.

6.3 Nutzen und industrielle Anwendungsmöglichkeiten

Die Anwendung eines Bewertungsverfahrens erfordert eine umfangreiche Einarbeitung in dieses. Große Unternehmen haben i. d. R. Experten, die über entsprechende Kenntnisse verfügen. KMU verfügen häufig nicht über das notwendige Know-how zur Anwendung. Eine automatische Belastungsbewertung im WMS ermöglicht für diese eine aufwandsarme Beurteilung, die nur geringe Ergonomiekennnisse voraussetzt.

Die Nutzung der im Forschungsprojekt erzielten Ergebnisse ist in zahlreichen Bereichen möglich: Unternehmen, in denen manuelle Lagersysteme zum Einsatz kommen, profitieren von den Ergebnissen ebenso wie Anbieter von WMS. Da manuelle Lagersysteme in nahezu allen Wirtschaftszweigen eingesetzt werden, können die Ergebnisse entsprechend branchenübergreifend genutzt werden. Das große Interesse von WMS-Anbietern am Forschungsprojekt zeigt die hohe Relevanz des Themas und lässt eine industrielle Anwendung erwarten.

Immer noch herrschen in vielen Unternehmen Arbeitsbedingungen, die insbesondere für ältere Mitarbeiter kritisch sind. Die automatische Bewertung der physischen Belastung im WMS schafft Transparenz über die Belastungssituation der Kommissionierer. Dies ermöglicht die gezielte Umsetzung und Wirksamkeitskontrolle von Gestaltungsmaßnahmen.

Der im Forschungsprojekt entwickelte Demonstrator steht nach Abschluss des Projekts allen Interessenten aus Lehre, Wissenschaft sowie Wirtschaft diskriminierungsfrei zur Verfügung, so dass er als Basis für eine praxistaugliche Anwendung genutzt werden kann.

Literaturverzeichnis

- [Bau-2012] Bauer, V.; Bungard, S.; Hertle, D.; Kliner, K.; Tewes, C.; Trümner, A.: BKK Gesundheitsreport 2012 - Gesundheit fördern - Krankheit versorgen - mit Krankheit leben. Herausgegeben von: BKK Bundesverband, 2012.
- [Bun-2007] Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin: Extrapolation der Zeitwichtungen - Vorschlag für die Praxis, 2007. URL: http://www.autoerg.net/files/autoerg/LMM_HHT_2007.pdf (Aufruf am 08.05.2014).
- [Cod-1970] Codd, E. F.: A relational model of data for large shared data banks. In: Communications of the ACM, Jg. 13 (1970) Nr. 6, S. 377–387.
- [Deu-2009] Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung: Handlungsanleitung für die arbeitsmedizinische Vorsorge - nach dem Berufsgenossenschaftlichen Grundsatz G 46 „Belastungen des Muskel- und Skelettsystems einschließlich Vibrationen“, 2009.
- [DIN EN ISO 6385] DIN EN ISO Nr. 6385:2004-05: Grundsätze der Ergonomie für die Gestaltung von Arbeitssystemen. Deutsches Institut für Normung e. V. Beuth.
- [Gol-2007] Goldscheid, C.: Ermittlung der Wirbelsäulenbelastung in manuellen Kommissioniersystemen. Aachen: Shaker, 2007.
- [Gud-2010] Gudehus, T.: Logistik - Grundlagen - Strategien - Anwendungen. 4. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010.
- [Hom-2007] Hompel, M. t.; Wolf, O.: WMS-Marktreport 2007-2008 - Entwicklungen und Trends des WMS-Marktes. München: Huss, 2007.
- [Hom-2010] Hompel, M. t.; Schmidt, T.: Warehouse Management - Organisation und Steuerung von Lager- und Kommissioniersystemen. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010.
- [Hom-2011] Hompel, M. t.; Sadowsky, V.; Beck, M.: Kommissionierung. 1. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011.

- [Jäg-2002] Jäger, M.; Göllner, R.; Jordan, C.; Theilmeier, A.; Luttmann, A.: Belastung der Lendenwirbelsäule beim Heben und Umsetzen von Lasten. In: Zeitschrift für Arbeitswissenschaft, Jg. 56 (2002) Nr. 1-2, S. 93–105.
- [Jün-2000] Jünemann, R.; Schmidt, T.: Materialflußsysteme - Systemtechnische Grundlagen. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2000.
- [Kar-1977] Karhu, O.; Kansi, P.; Kuorinka, I.; Kuorinka, I.: Correcting working postures in industry: A practical method for analysis. In: Applied Ergonomics, Jg. 8 (1977) Nr. 4, S. 199–201.
- [Koo-2010] Kooperationsprogramm zu normativem Management von Belastungen und Risiken bei körperlichen Risiken: Multiple-Lasten-Tool - Bewertung multipler (manueller) Lastenhandhabungen - Hintergrundinformation zur Tool-Version 1.4, 2010.
- [Kru-2011] Kruse, R.: Computational Intelligence - Eine methodische Einführung in Künstliche Neuronale Netze, Evolutionäre Algorithmen, Fuzzy-Systeme und Bayes-Netze. 1. Auflage. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2011.
- [Kug-2010] Kugler, M.; Bierwirth, M.; Schaub, K.; Sinn-Behrendt; Feith, A.; Ghezal-Ahmadi, K.; Bruder, R.: Förderschwerpunkt 2007 - Belastungen des Muskel-Skelett-Systems bei der Arbeit – integrative Präventionsansätze praktisch umsetzen. Herausgegeben von: Institut für Arbeitswissenschaft der TU Darmstadt, 2010.
- [Lau-1980] Laurig, W.: Grundzüge der Ergonomie - Einführung. Berlin, Köln: Beuth, 1980.
- [McA-1993] McAtamney, L.; Nigel Corlett, E.: RULA: a survey method for the investigation of work-related upper limb disorders. In: Applied Ergonomics, Jg. 24 (1993) Nr. 2, S. 91–99.
- [Men-1999] Menk, J.: Beitrag zur Planung qualitätsfähiger Kommissioniersysteme - Ein humanorientierter Ansatz. Dortmund: Praxiswissen, 1999.

- [Pot-1995] Potyka, S.: Systematik zur Selektion von Kommissioniersystemen in der Planung. Dortmund: Praxiswissen, 1995.
- [Pul-2009] Pulverich, M.; Schietinger, J.: Handbuch Kommissionierung - Effizient picken und packen. München: Vogel, 2009.
- [Roh-1984] Rohmert, W.: Das Belastungs-Beanspruchungs-Konzept. In: Zeitschrift für Arbeitswissenschaft, Jg. 38 (1984) Nr. 4, S. 196–200.
- [Sch-2004] Schaub, K.: Das "Automotive Assembly Worksheet" (AAWS). In: Landau, K. (Hrsg): Montageprozesse gestalten. Stuttgart: Ergonomika, 2004, S. 91–111.
- [Sch-2010] Schlick, C.: Arbeitswissenschaft. 3. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010.
- [Sch-2012] Schaub, K.; Caragnano, G.; Britzke, B.; Bruder, R.: The European Assembly Worksheet. In: Theoretical Issues in Ergonomics Science (2012), S. 1–23.
- [Ste-2008] Steinberg, U.; Caffier, G.; Liebers, F.; Behrendt, S.: Ziehen und Schieben ohne Schaden. 4. Auflage. Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, 2008.
- [Ste-2011] Steinberg, U.; Windberg, H.-J.: Heben und Tragen ohne Schaden. 6. Auflage. Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, 2011.
- [Sto-1985] Stoffert, G.: Analyse und Einstufung von Körperhaltungen bei der Arbeit nach der OWAS-Methode. In: Zeitschrift für Arbeitswissenschaft, Jg. 39 (1985) Nr. 1, S. 31–38.
- [Unt-2012] Unterstein, M.; Matthiessen, G.: Relationale Datenbanken und SQL in Theorie und Praxis. 5. Auflage. Berlin: Springer, 2012.
- [VDI 3590-1] VDI Nr. 3590-1:1994-04: Kommissioniersysteme - Grundlagen. Verband Deutscher Ingenieure. Beuth.

- [VDI 3590-2] VDI Nr. 3590-2:2002-07: Kommissioniersysteme - Systemfindung. Verband Deutscher Ingenieure. Beuth.
- [Wal-2011] Walch, M. D.: Belastungsermittlung in der Kommissionierung vor dem Hintergrund einer altersgerechten Arbeitsgestaltung der Intra-logistik. Garching b. München: Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik der Technischen Universität München, 2011.
- [Wat-1993] Waters, T. R.; Putz-Anderson. Vern; Garg, A.; Fine, L. J.: Revised NIOSH equation for the design and evaluation of manual lifting tasks. In: Ergonomics, Jg. 36 (1993) Nr. 7, S. 749–776.
- [Wic-1994] Wichmann, A.: Planungshilfsmittel für manuelle Kommissioniertätigkeiten. 2. Auflage. München: Huss, 1994.

Verzeichnis der betreuten Studienarbeiten

Die Studienarbeiten sind unter wissenschaftlicher und inhaltlicher Anleitung des Betreuers erarbeitet worden.

- [fml-2012a] Abram, Laura: Konzeption von Strategien zur Gesundheitsprävention der Mitarbeiter in der Kommissionierung. Bachelorarbeit am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik der Technischen Universität München. Betreut durch Dipl.-Wi.-Ing. M. Koch. Abgegeben im September 2012.
- [fml-2012b] Possin, Corinna: Analyse der körperlichen Belastung in der Kommissionierung und Weiterentwicklung des Multiple-Lasten-Tools. Bachelorarbeit am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik der Technischen Universität München. Betreut durch Dipl.-Wi.-Ing. M. Koch. Abgegeben im September 2012.
- [fml-2012c] Kollosche, R.: Durchführung einer Machbarkeitsstudie zur Erweiterung von Warehouse Managementsystemen durch ein Ergonomiemodul. Bachelorarbeit am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik der Technischen Universität München. Betreut durch Dipl.-Wi.-Ing. M. Koch. Abgegeben im Oktober 2012.
- [fml-2012d] Blöchl, G.: Implementierung zentraler Funktionen eines WMS und Integration eines Ergonomiemoduls für Kommissioniertätigkeiten. Semesterarbeit am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

- der Technischen Universität München. Betreut durch Dipl.-Wi.-Ing. M. Koch. Abgegeben im November 2012.
- [fml-2013a] Strebin, Thomas: Experimentelle Analyse von Eingabeparametern für die Bewertung von Belastungen in der Kommissionierung. Bachelorarbeit am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik der Technischen Universität München. Betreut durch Dipl.-Wi.-Ing. M. Koch. Abgegeben im März 2013.
- [fml-2013b] Heiß, J.: Entwicklung von Organisations- und Vergütungsmodellen sowie einer ergonomischen Lagerfachbelegung. Bachelorarbeit am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik der Technischen Universität München. Betreut durch Dipl.-Wi.-Ing. M. Koch. Abgegeben im Mai 2013.
- [fml-2014] Lang, H.; Seilbeck, R.: Risikobewertung von Kommissioniertätigkeiten und belastungsreduzierende Lagerplatzzuordnung. Interdisziplinäres Projekt am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik der Technischen Universität München. Betreut durch Dipl.-Wi.-Ing. M. Koch. Abgegeben im März 2014.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Arbeitsunfähigkeit nach Alter und Krankheitsarten in Tagen [Bau-2012]	2
Abbildung 1-2: Aufbau der Arbeit	4
Abbildung 2-1: Realisierungsmöglichkeiten bei Kommissioniersystemen	6
Abbildung 2-2: Teilprozesse der Kommissionierung, in Anlehnung an [Pot-1995]	7
Abbildung 2-3: Exemplarische Darstellung einer Kommissionierliste	8
Abbildung 2-4: Exemplarische Koordinaten eines Regals	8
Abbildung 2-5: Drei-Schichten-Architektur	9
Abbildung 2-6: Zusammenhang zwischen Belastung und Beanspruchung nach dem vereinfachten Belastungs-Beanspruchungs-Konzept [Roh-1984]	11
Abbildung 2-7: Belastungstypen	12
Abbildung 3-1: Exemplarischer dreistelliger Ziffercode für eine Körperhaltung	24
Abbildung 3-2: Strukturierung der Belastung bei Wichmann, in Anlehnung an [Wic-1994]	25
Abbildung 3-3: Abhängigkeit der Lastwichtung vom Lastgewicht	33
Abbildung 3-4: Abhängigkeit der Zeitwichtung von der Anzahl an Umsetzvorgängen	34
Abbildung 3-5: Dateneingabe mittels Eingabemaske	36
Abbildung 3-6: Umrechnung der Strecke von langen Zieh-/Schiebevorgängen in Anzahl kurzer	39
Abbildung 3-7: links: Ablaufdiagramm des Kommissionierprozesses; rechts: Programmablaufplan für die Belastungsbewertung	45
Abbildung 3-8: Bestimmung der Handhabungsschritte, der Anzahl Umsetzvorgänge je Handhabungsschritt und des Lastgewichts je Handhabungsschritt	48
Abbildung 3-9: Darstellung der Einflussfaktoren auf die Eingabedaten beim Umsetzen (vollständige Abbildung siehe Abbildung B-1)	56
Abbildung 3-10: Darstellung der Einflussfaktoren auf die Eingabedaten beim Ziehen/Schieben (vollständige Abbildung siehe Abbildung B-2)	57
Abbildung 3-11: Versuchsaufbau	58
Abbildung 3-12: Durchführung des Versuchs	59
Abbildung 3-13: links: Versuchsaufbau; rechts: Durchführung des Versuchs	60

Abbildung 3-14: Durchführung des Versuchs	60
Abbildung 3-15: Grafische Analyse der erhobenen Daten	62
Abbildung 3-16: Plots der Residuenanalyse	63
Abbildung 3-17: Ermittlung des Entgelts auf Basis der durchschnittlichen Belastung	66
Abbildung 4-1: Resultierende Lagerplatzzuordnung bei einer Minimierung der Wege [fml-2014]	68
Abbildung 4-2: Resultierende Lagerplatzzuordnung bei einer Minimierung der Risikowerte [fml-2014]	68
Abbildung 4-3: Bewertung einer Lagerplatzzuordnung	72
Abbildung 4-4: Genetischer Algorithmus, in Anlehnung an [fml-2014]	74
Abbildung 4-5: Beispiel einer Zuordnung von Artikeln zu Lagerplätzen	75
Abbildung 4-6: Algorithmus der Turnierauswahl [fml-2014]	76
Abbildung 4-7: Beispiel eines Zwei-Punkt-Crossovers, in Anlehnung an [fml-2014]	77
Abbildung 4-8: Beispiel eines ordnungsbasierten Zwei-Punkt-Crossovers, in Anlehnung an [fml-2014]	77
Abbildung 4-9: Beispiel eines Zweiertauschs, in Anlehnung an [fml-2014]	77
Abbildung 4-10: Exemplarische Zuordnung der Kommissionieraufträge zu Mitarbeitern	79
Abbildung 4-11: Algorithmus für die Startzuordnung	80
Abbildung 4-12: Algorithmus für das erste Ereignis	81
Abbildung 4-13: Algorithmus für das zweite Ereignis	81
Abbildung 5-1: Aufbau von myWMS LOS, in Anlehnung an [fml-2014]	83
Abbildung 5-2: Erweiterungen in myWMS LOS, in Anlehnung an [fml-2014]	85
Abbildung 5-3: Erweitertes Datenbankschema [fml-2014]	87
Abbildung 5-4: Die Auftragsanalyse startet mit dem Öffnen des Kommissionierauftrags, in Anlehnung an [fml-2014].	89
Abbildung 5-5: Ablauf der Auftragsanalyse	89
Abbildung 5-6: Ablauf der Risikowertermittlung	90
Abbildung 5-7: Erweiterungen für die Speicherung der Ergebnisse auf Positionsebene [fml-2014]	91
Abbildung 5-8: Erweiterungen für die Speicherung der Ergebnisse auf Auftragsebene [fml-2014]	92
Abbildung 5-9: Neue Punkte im Entitäten Explorer	93
Abbildung 5-10: Registerkarte der Belastungsbewertung	95
Abbildung 5-11: Tabelle zur Entgeltermittlung	96

Abbildung 5-12: Objekt <i>WarehouseFitness</i> [fml-2014]	97
Abbildung 5-13: Objekt <i>EmployeeShiftRisk</i> [fml-2014]	98
Abbildung 5-14: Assistent für die Optimierung der Lagerplatzzuordnung	100
Abbildung 5-15: Registerkarte für die Optimierung der Lagerplatzzuordnung	101
Abbildung 5-16: Aktivieren der Auftragszuweisung	101
Abbildung 5-17: Aufforderung zum Arbeitsplatzwechsel durch ein Pop-up	102

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Begriffsabgrenzung von Heben, Halten, Tragen und Ziehen, Schieben	13
Tabelle 3-1: Kategorisierung der Kommissioniersysteme auf Basis der auf den Kommissionierer wirkenden physischen Belastungen	16
Tabelle 3-2: Zuordnung von Kommissioniersystemen zu Kategorien	18
Tabelle 3-3: Auftretende Lastenhandhabungen je Kategorie	18
Tabelle 3-4: Überblick über die in den Verfahren bewerteten Belastungsarten, in Anlehnung an [Kug-2010]	28
Tabelle 3-5: Paarweiser Vergleich zur Bestimmung der Gewichtungsfaktoren	30
Tabelle 3-6: Wertetabelle für den Erfüllungsgrad der Zielkriterien	30
Tabelle 3-7: Bewertungsverfahren sortiert nach absteigendem Gesamtnutzwert	31
Tabelle 3-8: Eingaben zur Berechnung der Gesamtbewertung	32
Tabelle 3-9: Eingaben zur Berechnung der Gesamtbewertung	37
Tabelle 3-10: Erforderliche Eingaben für die Berechnung des Gesamtpunktwertes der Tätigkeit	46
Tabelle 3-11: Datenbankeinträge für die Belastungsbewertung	53

Abkürzungsverzeichnis

eLMM	erweiterte Leitmerkmalmethode
MLT	Multiple-Lasten-Tool
PM	Personenmonate
PzW	Person-zur-Ware
WMS	Warehouse-Management-System
WzP	Ware-zur-Person

Anhang A Tabellen der Bewertungsverfahren

A.1 Leitmerkmalmethode Heben, Halten, Tragen

Tabelle A-1: Bestimmung der Zeitwichtung

Hebe- oder Umsetzvorgänge (< 5 s)		Halten (> 5 s)		Tragen (> 5 m)	
Anzahl am Arbeitstag	Zeitwichtung	Gesamtdauer am Arbeitstag	Zeitwichtung	Gesamtweg am Arbeitstag	Zeitwichtung
< 10	1	< 5 min	1	< 300 m	1
10 bis < 40	2	5 bis 15 min	2	300 m bis < 1 km	2
40 bis < 200	4	15 min bis < 1 Stunde	4	1 km bis < 4 km	4
200 bis < 500	6	1 Stunde bis < 2 Stunden	6	4 bis < 8 km	6
500 bis < 1000	8	2 Stunden bis < 4 Stunden	8	8 bis < 16 km	8
≥ 1000	10	≥ 4 Stunden	10	≥ 16 km	10

Tabelle A-2: Bestimmung der Lastwichtung

Wirksame Last für Männer	Lastwichtung	Wirksame Last für Frauen	Lastwichtung
< 10 kg	1	< 5 kg	1
10 bis < 20 kg	2	5 bis < 10 kg	2
20 bis < 30 kg	4	10 bis < 15 kg	4
30 bis < 40 kg	7	15 bis < 25 kg	7
≥ 40 kg	25	≥ 25 kg	25

Tabelle A-3: Bestimmung der Haltungswichtung

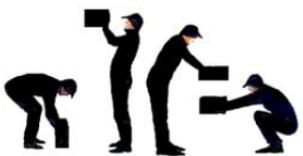
Charakteristische Körperhaltungen und Lastposition	Körperhaltung, Position der Last	Haltungswichtung
	<ul style="list-style-type: none"> • Oberkörper aufrecht, nicht verdreht • Last am Körper 	1
	<ul style="list-style-type: none"> • geringes Vorneigen oder Verdrehen des Oberkörpers • Last am Körper oder körpernah 	2
	<ul style="list-style-type: none"> • tiefes Beugen oder weites Vorneigen • geringe Vorneigung mit gleichzeitigem Verdrehen des Oberkörpers • Last körperfern oder über Schulterhöhe 	4
	<ul style="list-style-type: none"> • weites Vorneigen mit gleichzeitigem Verdrehen des Oberkörpers • Last körperfern • eingeschränkte Haltungsstabilität beim Stehen • Hocken oder Knien 	8

Tabelle A-4: Bestimmung der Ausführungsbedingungs-wichtung

Ausführungsbedingungen	Ausf.-wichtung
Gute ergonomische Bedingungen, z. B. ausreichend Platz, keine Hindernisse im Arbeitsbereich, ebener rutschfester Boden, ausreichend beleuchtet, gute Griffbedingungen	0
Einschränkung der Bewegungsfreiheit und ungünstige ergonomische Bedingungen (z.B. 1.: Bewegungsraum durch zu geringe Höhe oder durch eine Arbeitsfläche unter 1,5 m ² eingeschränkt oder 2.: Standsicherheit durch unebenen, weichen Boden eingeschränkt)	1
Stark eingeschränkte Bewegungsfreiheit und/oder Instabilität des Lastschwerpunktes (z.B. Patiententransfer)	2

Tabelle A-5: Bestimmung des Risikobereichs

Risikobereich	Punktwert	Beschreibung
1	< 10	Geringe Belastung, Gesundheitsgefährdung durch körperliche Überbeanspruchung ist unwahrscheinlich.
2	10 bis < 25	Erhöhte Belastung, eine körperliche Überbeanspruchung ist bei vermindert belastbaren Personen ⁴⁾ möglich. Für diesen Personenkreis sind Gestaltungsmaßnahmen sinnvoll.
3	25 bis < 50	Wesentlich erhöhte Belastung, körperliche Überbeanspruchung ist auch für normal belastbare Personen möglich. Gestaltungsmaßnahmen sind angezeigt. ⁵⁾
4	≥ 50	Hohe Belastung, körperliche Überbeanspruchung ist wahrscheinlich. Gestaltungsmaßnahmen sind erforderlich. ⁵⁾

A.2 Multiple-Lasten-Tool

Tabelle A-6: Bestimmung der Haltungswichtung beim Umsetzen, Halten, Tragen

Charakteristische Körperhaltungen und Lastposition	Körperhaltung, Position der Last	Haltungswichtung
	<p>Oberkörper aufrecht, nicht verdreht</p> <p>Last am Körper</p>	<p>1</p>
	<p>geringes Vorneigen oder Verdrehen des Oberkörpers</p> <p>Last am Körper oder körpernah</p>	<p>2</p>
	<p>tiefes Beugen oder weites Vorneigen</p> <p>geringe Vorneigung mit gleichzeitigem Verdrehen des Oberkörpers</p> <p>Last körperfern oder über Schulterhöhe</p>	<p>4</p>
	<p>weites Vorneigen mit gleichzeitigem Verdrehen des Oberkörpers</p> <p>Last körperfern</p> <p>eingeschränkte Haltungsstabilität beim Stehen</p> <p>Hocken oder Knien</p>	<p>8</p>

Tabelle A-7: Bestimmung der Ausführungsbedingungs-wichtung beim Umsetzen

Ausführungsbedingungen	Ausf.-wichtung
<p>Gute ergonomische Bedingungen z.B. ausreichend Platz, keine Hindernisse im Arbeitsbereich, ebener rutschfester Boden, ausreichend beleuchtet</p> <p>Gute Greifbedingungen Teilegeometrie bewirkt neutrale Handgelenkstellung Entnahme Kleinteile (ohne größeres Verklemmen) aus dem Großbehälter Teil liegt frei auf "Rutsche", auf Förderband oder in Roboterstation KLT steht "frei" und kann mit beiden Händen gut gepackt werden</p>	0
<p>Leichte Behinderungen bei Greifbedingungen Teilgeometrie bewirkt 1/2 Abweichung der neutralen Handgelenkstellung Ungeeignete Handschuhe (zu dick, zu groß) Entnahme Kleinteile (Teile verklemmen) aus dem Großbehälter KLT's stehen eng nebeneinander im Regal oder auf Dolly (Platz für Hände ausreichend)</p>	1
<p>Verschlechterte ergonomische Bedingungen z.B. Eingeschränkter Bewegungsfreiraum, kleinere Hindernisse im Arbeitsbereich wirken sich auf Standsicherheit aus</p> <p>Ungünstige Greifbedingungen Teilegeometrie bewirkt 2/3 Abweichung der neutralen Handgelenkstellung Entnahme Kleinteile aus Großbehälter (Teile müssen teilweise losgebrochen werden) KLT's stehen so eng nebeneinander, dass kaum Freiraum für Hände besteht</p>	2-3
<p>wesentliche Verschlechterung der ergonomischen Bedingungen z.B. Standsicherheit eingeschränkt (Boden uneben, weich, rutschig, abschüssig), Rückwärts oder seitwärts mitlaufen bei Arbeitsausführung</p> <p>Schlechte Greifbedingungen Teilegeometrie führt zu stark abweichender Handgelenkstellung Teile verhaken ständig ineinander, müssen ständig losgebrochen werden KLT-Blockstapel, KLT kann nur mit Fingerspitzen gepackt werden (Kein Freiraum Hände)</p>	4-5
<p>Extrem schlechte ergonomischen Bedingungen Stark eingeschränkte Bewegungsfreiheit (Stolpergefahr durch Bodenbeschaffenheit), Instabilität des Lastenschwerpunktes, Arbeitsaufgabe am Rand Ausführbarkeit Mehrfaches Nach- und Umgreifen erforderlich</p> <p>Sehr schlechte Greifbedingungen Teilegeometrie führt zu maximal abweichender Handgelenkstellung Kein Griff, keine "richtige" Anpackstelle</p>	6-8

Tabelle A-8: Bestimmung der Haltungswichtung beim Ziehen, Schieben

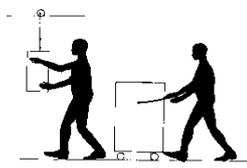
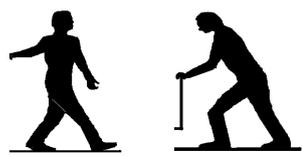
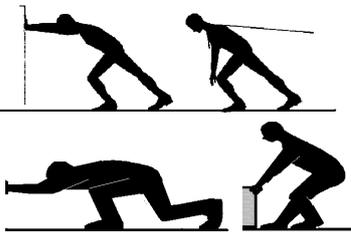
	Körperhaltung	Haltungswichtung
	Rumpf aufrecht, keine Verdrehung	1
	Rumpf leicht vorgeneigt und/oder leicht verdreht (einseitiges Ziehen)	2
	Stärkere Neigung des Körpers in Bewegungsrichtung Hocken, Knien, Bücken	4
	Kombination von Bücken und Verdrehen	8

Tabelle A-9: Bestimmung der Ausführungsbedingungs-wichtung beim Ziehen, Schieben

Ausführungsbedingungen	Ausf.-wichtung
Gut: → Fußboden oder andere Fläche eben, fest, glatt, trocken, → ohne Neigung, → keine Hindernisse im Bewegungsraum, → Rollen oder Räder leichtgängig, kein erkennbarer Verschleiss der Radlager	0
Eingeschränkt: → Fußboden verschmutzt, etwas uneben, weich, → geringe Neigung bis 2 ° → Hindernisse im Bewegungsraum, die umfahren werden müssen, → Rollen oder Räder verschmutzt, nicht mehr ganz leichtgängig, Lager ausgeschlagen	2
Schwierig: → unbefestigter oder grob gepflasterter Fahrweg, Schlaglöcher, starke Verschmutzung, → Neigungen 2 bis 5 °, → Flurförderzeuge müssen beim Anfahren „losgerissen“ werden → Rollen oder Räder verschmutzt, schwergängig	4
Kompliziert: → Stufen, Treppen, Absätze, → Neigungen > 5 °, → Kombinationen der Merkmale von „Eingeschränkt“ und „Schwierig“	8

Tabelle A-10: Bestimmung der Positioniergenauigkeit beim Ziehen, Schieben

Positioniergenauigkeit	Bewegungsgeschwindigkeit	
	langsam ($< 0,8$ m/s)	schnell ($0,8 - 1,3$ m/s)
Gering - keine Vorgabe des Fahrweges - Last kann ausrollen oder wird an Anschlag gestoppt	1	2
Hoch - Last ist exakt zu positionieren und anzuhalten - Fahrweg ist exakt einzuhalten - häufige Richtungsänderungen	2	4

Tabelle A-11: Einstufung des Gesamtergebnisses

Grün (0 bis < 25)	Geringe Belastung, Gesundheitsgefährdung durch körperliche Überbeanspruchung ist unwahrscheinlich. Bei 10 bis 25 Punkte kann eine körperliche Überbeanspruchung bei vermindert belastbaren Personen möglich sein. Für diesen Personenkreis sind Gestaltungsmaßnahmen sinnvoll.
Gelb (25 bis < 50)	Wesentlich erhöhte Belastung, körperliche Überbeanspruchung ist auch für normal belastbare Personen möglich. Gestaltungsmaßnahmen sind angezeigt.
Rot (≥ 50)	Hohe Belastung, körperliche Überbeanspruchung ist wahrscheinlich. Gestaltungsmaßnahmen sind erforderlich.

Anhang B Einflussfaktoren auf die Eingabedaten

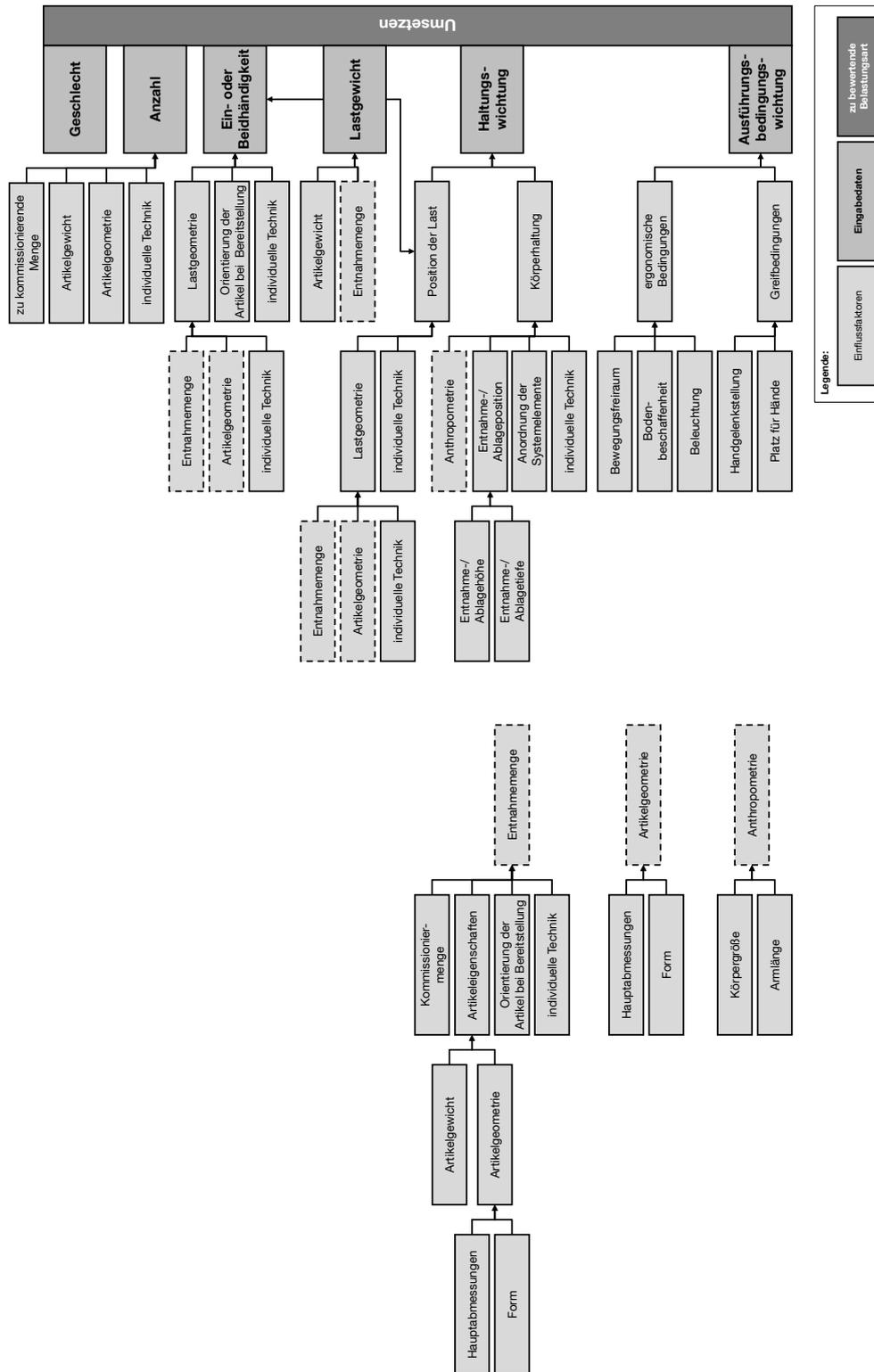


Abbildung B-1: Darstellung der Einflussfaktoren auf die Eingabedaten beim Umsetzen

B Einflussfaktoren auf die Eingabedaten

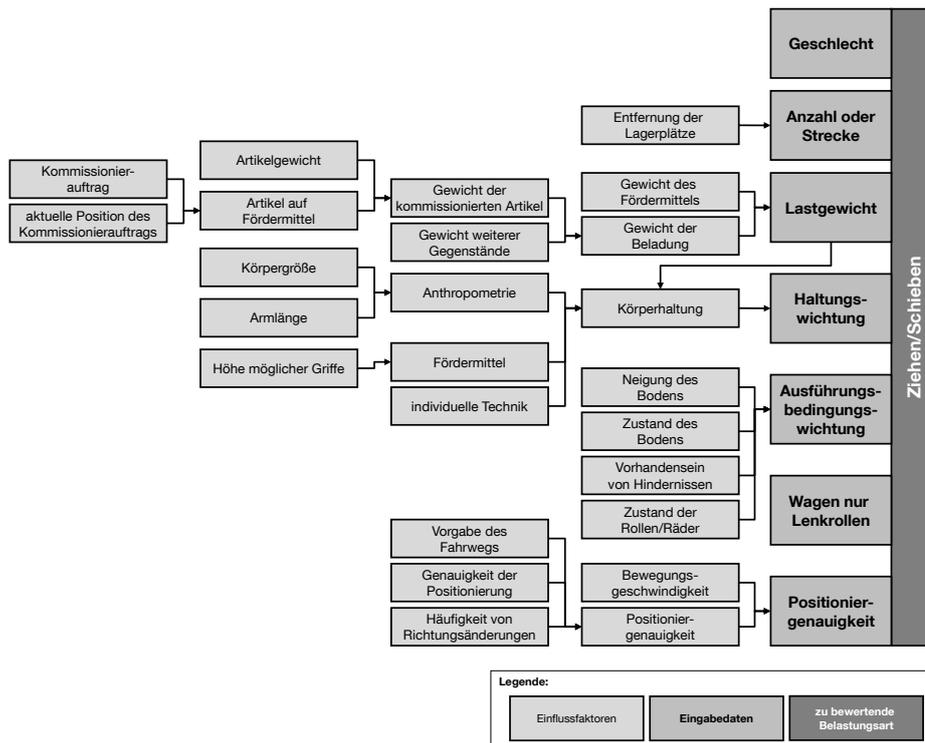


Abbildung B-2: Darstellung der Einflussfaktoren auf die Eingabedaten beim Ziehen/Schieben

Anhang C Beobachtungen der Probandenversuche

Tabelle C-1: Maximal umgesetzte Menge der Kartons an Station 1

	Geschlecht	Körpergröße in cm	Greifarm in cm	Gewicht je Karton in kg: Kartongröße in S/M/L:	0,5		1		2		3		3		
					S	M	L	S	M	L	S	M	L	S	M
Proband 1	m	186	57		4	4	2	4	4	1	4	2	3	3	2
Proband 2	m	185	63		3	3	3	3	3	2	3	3	3	3	2
Proband 3	m	183	61		7	7	7	7	7	8	4	4	4	4	4
Proband 4	m	162	53,5		4	4	3	4	2	3	2	2	2	2	3
Proband 5	m	180	59		6	8	4	4	4	4	2	3	2	2	2
Proband 6	m	171	56		4	4	4	3	4	2	2	4	2	2	2
Proband 7	m	185	59		7	7	4	4	4	4	4	4	2	3	2
Proband 8	w	169	52		4	3	2	4	3	2	3	2	2	2	3
Proband 9	w	165	54		4	2	3	3	3	2	2	2	2	2	2
Proband 10	m	180	58		8	11	7	7	7	7	4	4	4	4	4
Proband 11	m	183	62		4	3	2	4	4	2	3	4	2	3	4
Proband 12	w	175	65		4	4	4	4	4	4	3	3	2	2	2
Proband 13	m	183	60		4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3
Proband 14	m	174	57,5		3	4	3	2	4	3	3	3	3	3	3
Proband 15	m	175	57		4	4	2	4	4	2	4	4	2	4	2
Proband 16	w	162	48		2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Proband 17	m	180	62		4	4	8	4	8	8	4	4	4	3	4
Proband 18	m	185	62		3	4	4	3	4	4	4	3	4	2	2
Proband 19	m	187	68,5		4	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Proband 20	m	187	64		4	8	8	3	3	4	2	2	2	2	1
Proband 21	m	182	62		4	3	3	4	3	4	4	3	3	4	3
Proband 22	m	186	60		8	4	3	4	4	3	3	2	3	2	2
Proband 23	w	175	57,5		4	3	3	3	3	2	2	3	2	2	2
Proband 24	m	177	57		4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3
Proband 25	m	178	59,5		8	4	4	4	3	2	4	2	2	2	2
Proband 26	m	185	61		8	7	7	8	7	4	4	8	4	4	4
Proband 27	w	169	56,5		2	2	2	3	3	2	2	3	2	3	2
Proband 28	m	164	54		6	6	4	4	4	4	2	2	2	2	2
Proband 29	m	180	60		4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	4
Proband 30	m	184	60		4	4	2	4	2	2	2	2	2	2	2
Proband 31	m	186	64		7	8	7	4	7	4	4	4	4	4	4
Proband 32	m	176	59		4	4	3	4	4	3	3	3	4	3	3
Proband 33	m	182	58		4	3	3	4	2	2	4	2	2	3	2
Proband 34	w	176	56		4	4	3	4	4	3	4	4	2	3	4

Tabelle C-2: Beobachtete Haltungswichtung Umsetzen an Station 2, Versuch 1-15

	Geschlecht	Körpergröße in cm	Armlänge in cm	Lastgewicht in kg: Entnahnehöhe in cm:														
				5	10	15	5	10	15	5	10	15	5	10	15	5	10	15
Proband 1	m	186	57	8	8	8	4	4	4	1	1	1	1	1	1	4	4	4
Proband 2	m	185	63	4	4	4	8	4	4	1	1	1	1	1	1	4	4	4
Proband 3	m	183	61	4	8	8	8	8	8	1	1	1	1	1	1	4	4	4
Proband 4	m	162	53,5	4	4	4	4	4	1	1	1	1	1	1	1	4	4	4
Proband 5	m	180	59	4	4	4	4	4	4	1	1	1	1	1	1	4	4	4
Proband 6	m	171	56	4	4	4	4	4	4	1	1	1	1	1	1	4	4	4
Proband 7	m	185	59	4	4	4	4	4	2	2	2	1	1	1	1	4	4	4
Proband 8	w	169	52	4	4	4	4	4	8	1	1	1	1	1	1	4	4	4
Proband 9	w	165	54	4	4	4	4	4	8	1	1	1	1	1	1	4	4	4
Proband 10	m	180	58	4	4	4	8	8	8	1	1	1	1	1	1	4	4	4
Proband 11	m	183	62	4	4	4	2	2	2	1	1	1	1	1	1	4	4	4
Proband 12	w	175	65	4	4	4	2	4	4	1	1	1	1	1	1	4	4	4
Proband 13	m	183	60	4	4	4	2	2	4	1	1	1	1	1	1	4	4	4
Proband 14	m	174	57,5	4	4	4	4	4	4	1	1	1	1	1	1	4	4	4
Proband 15	m	175	57	4	4	4	4	4	4	1	1	1	1	1	1	4	4	4
Proband 16	w	162	48	4	4	4	4	4	4	1	1	1	1	1	1	4	8	NE
Proband 17	m	180	62	4	4	4	4	4	4	1	1	1	1	1	1	4	4	4
Proband 18	m	185	62	4	4	4	4	4	8	1	1	1	1	1	1	4	4	4
Proband 19	m	187	68,5	4	4	4	4	4	4	1	1	1	1	1	1	4	4	4
Proband 20	m	187	64	4	4	4	4	4	4	1	1	1	1	1	1	4	4	4
Proband 21	m	182	62	4	4	4	2	2	2	1	1	1	1	1	1	4	4	4
Proband 22	m	186	60	8	8	8	4	4	4	1	1	1	1	1	1	4	4	4
Proband 23	w	175	57,5	4	4	4	2	2	2	1	1	1	1	1	1	4	4	NE
Proband 24	m	177	57	4	4	4	4	4	4	1	1	1	1	1	1	4	4	4
Proband 25	m	178	59,5	4	4	4	2	2	2	1	1	1	1	1	1	4	4	4
Proband 26	m	185	61	8	8	8	4	4	4	1	1	1	1	1	1	4	4	4
Proband 27	w	169	56,5	4	4	4	2	4	4	1	1	1	1	1	1	4	4	4
Proband 28	m	164	54	4	4	4	2	2	2	1	1	1	1	1	1	4	4	4
Proband 29	m	180	60	4	4	4	2	4	4	1	1	1	1	1	1	4	4	4
Proband 30	m	184	60	4	4	4	4	4	4	1	1	1	1	1	1	4	4	4
Proband 31	m	186	64	4	4	4	4	4	4	1	1	1	1	1	1	4	4	4
Proband 32	m	176	59	4	4	4	4	4	4	1	1	1	1	1	1	4	4	4
Proband 33	m	182	58	8	8	4	4	4	4	1	1	1	1	1	1	4	4	4
Proband 34	w	176	56	4	4	4	4	4	4	2	2	2	1	1	1	4	4	4

NE: nicht erreicht

Tabelle C-3: Beobachtete Haltungswichtung Umsetzen an Station 2, Versuch 16-35

C Beobachtungen der Probandenversuche

	Geschlecht	Körpergröße in cm	Armlänge in cm	Entnahnehöhe in cm: Entnahmetiefe in cm:	20,5	20,5	20,5	20,5	60,5	60,5	60,5	60,5	101	101	101	101	141	141	141	181	181	181	181	
					0	20	40	60	0	20	40	60	0	20	40	60	0	20	40	60	0	20	40	60
Proband 1	m	186	57		8	8	8	8	8	8	8	8	1	2	2	2	1	1	2	4	4	4	4	NE
Proband 2	m	185	63		4	4	8	8	2	4	8	8	1	2	4	8	1	1	4	4	4	4	4	8
Proband 3	m	183	61		8	8	8	8	8	8	8	8	1	1	8	8	1	1	2	4	4	4	4	8
Proband 4	m	162	53,5		4	4	8	8	4	8	8	8	1	2	2	8	1	1	1	4	4	8	NE	NE
Proband 5	m	180	59		4	8	8	8	2	2	4	8	1	2	8	8	1	1	2	8	4	4	4	NE
Proband 6	m	171	56		4	4	4	8	4	4	4	8	1	2	4	4	1	1	1	4	4	4	8	NE
Proband 7	m	185	59		4	8	8	8	4	4	8	8	2	2	2	8	1	1	1	2	4	4	8	8
Proband 8	w	169	52		4	8	8	8	2	4	8	8	1	1	2	4	1	1	2	4	4	4	4	NE
Proband 9	w	165	54		4	4	8	8	2	4	8	8	1	1	2	8	1	1	2	4	4	8	NE	NE
Proband 10	m	180	58		4	4	8	8	4	4	8	8	2	1	1	2	1	1	1	2	4	4	4	8
Proband 11	m	183	62		4	8	8	8	2	4	8	8	1	1	2	4	1	1	1	2	4	4	4	8
Proband 12	w	175	65		4	8	8	8	2	4	8	8	1	1	1	8	1	1	1	4	4	4	8	NE
Proband 13	m	183	60		8	8	8	8	2	4	8	8	1	1	4	4	1	1	1	4	4	4	8	8
Proband 14	m	174	57,5		4	4	8	8	4	8	8	8	1	2	4	4	1	1	2	4	4	4	8	NE
Proband 15	m	175	57		4	8	8	8	2	4	8	8	1	2	4	8	1	1	2	4	4	4	8	NE
Proband 16	w	162	48		4	8	8	8	4	4	8	8	1	1	4	8	1	1	2	4	4	8	NE	NE
Proband 17	m	180	62		4	4	8	8	2	4	8	8	1	2	2	8	1	1	2	2	4	4	8	8
Proband 18	m	185	62		4	8	8	8	2	4	8	8	1	2	4	8	1	1	2	2	4	4	8	NE
Proband 19	m	187	68,5		4	4	4	8	4	4	4	8	1	1	2	8	1	1	1	2	4	4	4	4
Proband 20	m	187	64		4	4	8	8	2	2	8	8	1	1	2	8	1	1	1	2	4	4	8	8
Proband 21	m	182	62		4	4	8	8	2	4	8	8	1	1	2	8	1	1	1	2	4	4	8	8
Proband 22	m	186	60		4	4	4	8	4	4	8	8	1	2	4	8	1	1	2	8	4	4	8	NE
Proband 23	w	175	57,5		4	4	8	8	2	4	8	8	1	1	4	8	1	1	2	2	4	4	8	NE
Proband 24	m	177	57		4	4	8	8	2	4	4	8	1	2	2	4	1	1	1	2	4	4	8	NE
Proband 25	m	178	59,5		4	4	8	8	2	2	4	8	1	1	2	4	1	1	1	4	4	4	8	8
Proband 26	m	185	61		4	4	8	8	4	4	4	8	1	1	2	8	1	1	2	4	4	4	8	8
Proband 27	w	169	56,5		4	8	8	8	4	4	4	8	1	1	2	4	1	1	2	4	4	4	NE	NE
Proband 28	m	164	54		4	4	8	8	2	4	8	8	1	1	2	4	1	1	2	4	4	8	NE	NE
Proband 29	m	180	60		4	8	8	8	2	4	4	8	1	1	4	8	1	1	1	2	4	4	8	8
Proband 30	m	184	60		4	4	8	8	2	4	4	8	1	1	2	4	1	1	2	2	4	4	8	8
Proband 31	m	186	64		4	8	8	8	2	2	4	8	1	2	2	8	1	1	2	4	4	4	8	8
Proband 32	m	176	59		4	4	8	8	4	4	4	8	1	1	4	8	1	1	2	4	4	4	8	NE
Proband 33	m	182	58		4	4	8	8	2	4	4	8	1	1	2	4	1	1	1	2	4	4	8	NE
Proband 34	w	176	56		4	4	8	8	4	4	4	8	1	2	4	8	1	1	2	4	4	4	8	NE

NE: nicht erreicht

Tabelle C-4: Beobachtete Haltungswichtung Ziehen/Schieben an Station 3

Proband	Geschlecht	Körpergröße in cm	Greifarm in cm	Fördermitteltyp: Gewicht der Beladung in kg:	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	
					40	60	80	100	40	60	80	100	40	60	80	100	
Proband 1	m	186	57		2	2	2	2	2	1	1	1,5	1,5	1	1	1	1
Proband 2	m	185	63		2	2	2	2	2	1	1	2	1	1,5	1	1	1
Proband 3	m	183	61		2	2	2	2	2	2	2	2	2	1,5	1,5	1,5	1,5
Proband 4	m	162	53,5		1	1	2	2	2	1	1	2	2	2	1	1	2
Proband 5	m	180	59		1	2	2	2	2	1	1	1	2	1,5	1,5	2	2
Proband 6	m	171	56		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Proband 7	m	185	59		2	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2
Proband 8	w	169	52		1	1	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2
Proband 9	w	165	54		2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1
Proband 10	m	180	58		1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1	1
Proband 11	m	183	62		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2
Proband 12	w	175	65		2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2
Proband 13	m	183	60		1,5	1,5	2	2	2	2	2	2	2	1	1,5	1	2
Proband 14	m	174	57,5		1	1,5	2	2	2	1	1	1	1,5	1,5	2	2	2
Proband 15	m	175	57		1,5	2	1,5	1,5	1	1,5	1	1	1	2	2	2	2
Proband 16	w	162	48		2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Proband 17	m	180	62		1,5	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Proband 18	m	185	62		1	1	1	1	2	2	2	2	2	1	1	1	1
Proband 19	m	187	68,5		2	2	2	2	2	1,5	1,5	2	2	1,5	1	1	1
Proband 20	m	187	64		2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1,5	2
Proband 21	m	182	62		1,5	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	1	2
Proband 22	m	186	60		2	2	2	2	2	1	1,5	1,5	2	1	1	1	2
Proband 23	w	175	57,5		1,5	1,5	1	2	1,5	1	2	1,5	2	1	1	1	1,5
Proband 24	m	177	57		2	2	2	2	2	1	1	1	1	1,5	1	1,5	1,5
Proband 25	m	178	59,5		2	2	2	2	2	1,5	2	2	1,5	1,5	1,5	2	2
Proband 26	m	185	61		1,5	1,5	2	2	2	2	2	2	2	1,5	2	1,5	2
Proband 27	w	169	56,5		1,5	1,5	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Proband 28	m	164	54		2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Proband 29	m	180	60		2	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2
Proband 30	m	184	60		1,5	2	1,5	2	1,5	2	2	2	2	2	2	2	2
Proband 31	m	186	64		2	2	1,5	2	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	2	1,5	2	2
Proband 32	m	176	59		2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Proband 33	m	182	58		1,5	2	2	2	1,5	1	1	1,5	1	1	1	1	1
Proband 34	w	176	56		2	2	2	2	2	1,5	1,5	2	2	2	2	2	2

Anhang D Klassendiagramme des Demonstrators

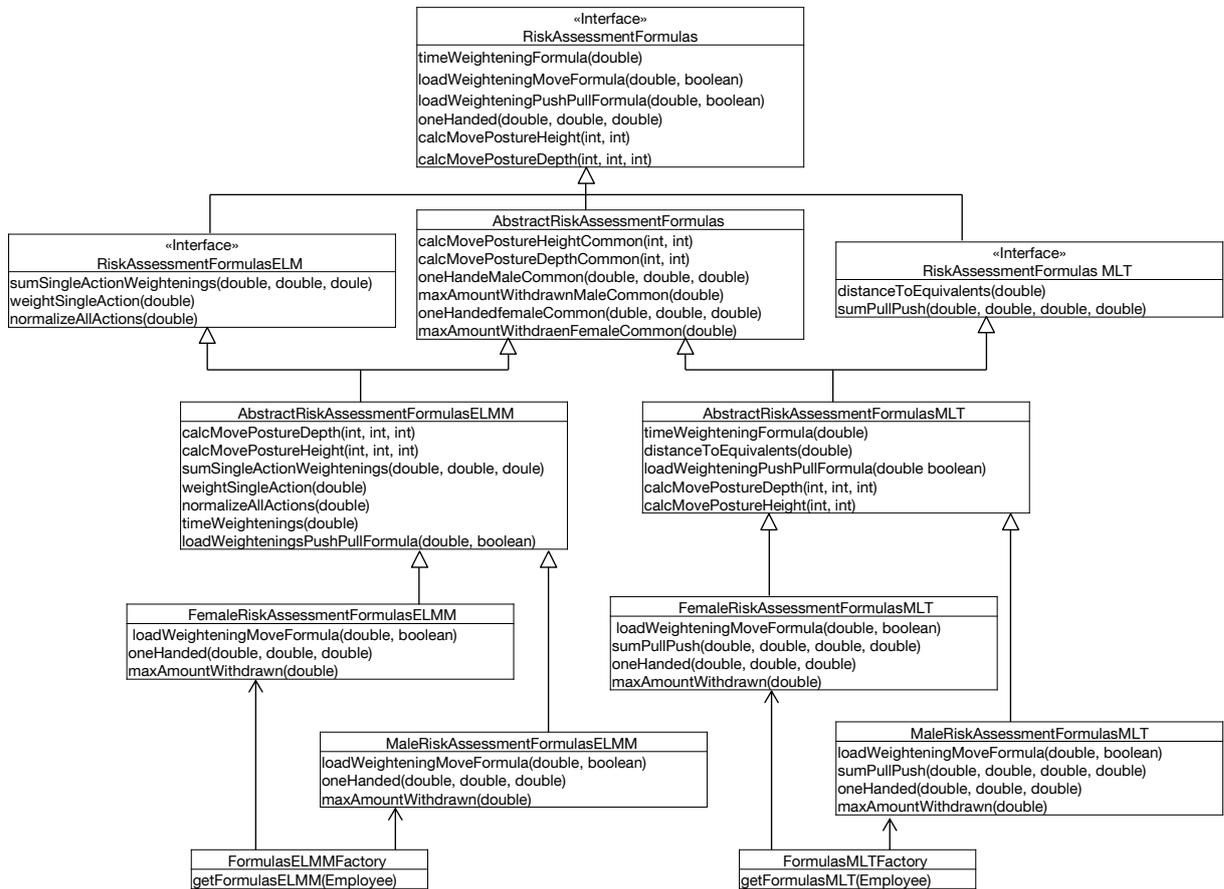


Abbildung D-1: Formelblock [fml-2014]

D Klassendiagramme des Demonstrators

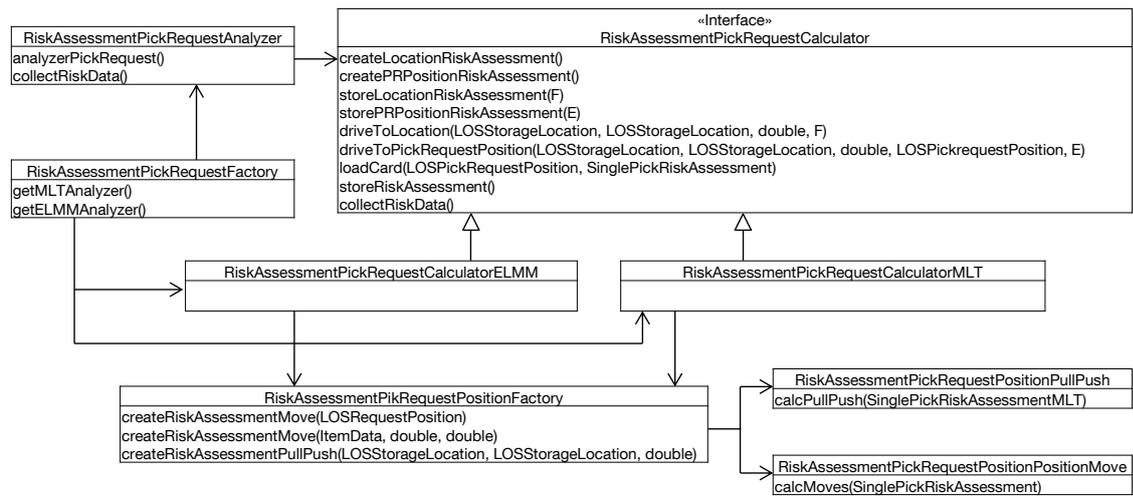


Abbildung D-2: Auftragsanalyse [fmi-2014]

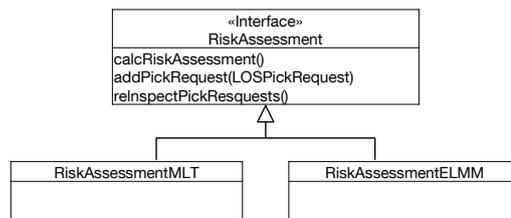


Abbildung D-3: Risikowertermittlung [fmi-2014]