Analyse des Einflusses einer ergonomischen Lagerplatzvergabe auf die Beanspruchung und die menschliche Leistung in der manuellen Kommissionierung

Am Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt
zur
Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

DISSERTATION

vorgelegt von

M. Sc. Tim Steinebach

aus Dernbach

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Ralph Bruder, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg
1. Mitberichterstatter:	Prof. Dr. Christoph Glock, TU Darmstadt
2. Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Joachim Metternich, TU Darmstadt

Tag der Einreichung:	24.01.2022
Tag der mündlichen Prüfung:	27.04.2022

Darmstadt 2022
D17

Steinebach, Tim:
Analyse des Einflusses einer ergonomischen Lagerplatzvergabe auf die Beanspruchung und die menschliche Leistung in der manuellen Kommissionierung
Darmstadt, Technische Universität Darmstadt,
Jahr der Veröffentlichung der Dissertation auf TUprints: 2022
URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-215883
Tag der mündlichen Prüfung: 27.04.2022
Veröffentlicht unter CC BY-SA 4.0 International
https://creativecommons.org/licenses/

Danksagung

„Wo ein Wille ist, ist auch ein Weg“ – der Weg meiner Promotion am IAD hat mir jedoch gezeigt, dass ähnlich wie in einer Seilschaft auf einer Bergtour, mühsame Gipfel nur gemeinsam mit Weggefährten zu erreichen sind. Aus diesem Grund möchte ich mich bei allen bedanken, die auf einem Teil des Anstiegs das Seil mit mir geteilt, Standsicherungen gesetzt oder gar den Vorstieg übernommen haben.

An erster Stelle möchte ich mich ganz herzlich bei Herrn *Prof. Dr.-Ing. Ralph Bruder* bedanken. Durch die Gelegenheit, an Ihrem Institut zu promovieren sowie Ihre wertvollen wissenschaftlichen und persönlichen Ratschläge, haben Sie diese Arbeit erst ermöglicht. Gleichwohl haben Sie mir ausreichend Freiräume gelassen, um das Thema eigenständig herzuleiten und zu entwickeln – vielen Dank!

Zudem gilt mein Dank Herrn *Prof. Dr. Christoph Glock* für die Übernahme des Korreferats sowie die tolle Zusammenarbeit in gemeinsamen Forschungsprojekten und entsprechenden Veröffentlichungen. Zudem geht meine Danksagung an Herrn Prof. Dr.-Ing. Joachim Metternich für die kurzfristige und unkomplizierte Übernahme des zweiten Korreferats.

Allen Kollegen und Kolleginnen des IAD danke ich sehr für die bemerkenswert harmonische und freundschaftliche Zusammenarbeit. Vor allem möchte ich mich für die Unterstützung von *Jurij Wakula* bedanken. Ich habe sehr von deinem großen Erfahrungsschatz und deinen konstruktiven Anregungen immer profitiert. Mein Dank gilt ferner dem Rest der ABG-Gruppe für viele spannende Diskussionen und Hilfestellungen im Arbeitsalltag. Zudem bin ich dankbar für den wertvollen Austausch in unserem Erfolgsteam mit *Verena Klaer*, *Deborah Petrat* sowie meinem langjährigen Büropartner *Philip Joisten*. Die Diskussionen mit euch haben mir nicht nur fachlich geholfen, sondern auch stets Mut gemacht! *Andreas Müller* möchte ich aus einem besonderen Grund danken – ohne deine „Rekrutierung“ und deine Begeisterung für die Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter wäre ich vermutlich nie am IAD gelandet. Überdies möchte ich mich bei meinen Projektpartnern vom Fachbereich „Rechts- und Wirtschaftswissenschaften“ der TUDa *Julia Wenzel* und *Heiko Diefenbach* bedanken. Die Zusammenarbeit mit euch rund um Themen der Kommissionierung hat mir viel Spaß bereitet und die vorliegende Arbeit wesentlich vorangebracht. Nicht zuletzt geht mein Dank an die zahlreichen Studierenden, die mit ihren von mir betreuten Bachelor- und Masterarbeiten einen wertvollen Beitrag zu dieser Dissertation darstellen: *Timo Kremer, Lucas Wirthmann, Jana Haselberger, Janis Katzenbach, Paul Klösel, Lennart Müller, Ying Zhao, Edgar Cadavid* und *Asim Mehmedovic*. Ihr habt tolle Arbeit geleistet!

Ein ganz wesentlicher Dank geht an meine Freundinnen und Freunde in der Heimat und in ganz Deutschland, deren vollumfängliche Nennung die Kapazität dieser Danksagung sicherlich sprengen würde. Ihr habt für den dringend notwendigen Ausgleich von manchmal stressigen Phasen gesorgt. Hervorheben möchte ich meinen Kindergartenkumpel und langjährigen Mitbewohner in Darmstadt *Johannes Hannappel* für viele gesellige Stunden und das Lektorat dieser Dissertation.

Der wichtigste Dank gilt jedoch meiner Familie – an erster Stelle meinen Eltern *Stefanie* und *Gerd*. Ihr habt mich von meiner jüngsten Kindheit an bedingungslos unterstützt, gefördert und Last von der Schulter genommen. Hiermit habt ihr den entscheidenden Grundstein für meine Laufbahn gelegt und mir den Rücken gestärkt, egal welchen Weg ich einschlagen habe. Meinem Bruder *Niklas* danke ich dafür, dass ich immer auf dich zählen kann und wir so viele Dinge gemeinsam unternehmen!

Zuletzt danke ich meiner Frau *Lisa* – für deine unentwegte, liebevolle Unterstützung und Motivation während dieser Zeit, obwohl du selbst vor sehr ähnlichen beruflichen Herausforderungen standest. Ohne dich hätte ich das nicht geschafft! Ich habe sehr großes Glück, dich an meiner Seite zu wissen und freue mich auf viele glückliche Jahre mit dir.

Zusammenfassung

Der Kommissionierung kommt innerhalb der Wertschöpfungskette aufgrund steigender Kundenanforderungen und zunehmenden Versandhandels eine entscheidende Rolle in Unternehmen zu. Entsprechende Planungswerkzeuge für manuelle Kommissioniersysteme basieren meist auf rein ökonomischen Kriterien. Ergonomische Bedingungen wurden in Forschung und Praxis bisher nur selten berücksichtigt, sodass hohe physische Belastungen, insbesondere der Wirbelsäule, resultieren können. In dieser Arbeit wird das Entscheidungsproblem der Lagerplatzvergabe (LPV) für Fachbodenregale betrachtet und ein bi-kriterieller Algorithmus mit den Zielen der Wirbelsäulenbelastungs- und Zeitreduzierung entwickelt. Die Kennwerte der beiden Zielfunktionen werden zum einen mit dem biomechanischen Modell „Der Dortmunder“ (Wirbelsäulenbelastung) hergeleitet und zum anderen anhand des MTM-UAS-Standards (Kommissionierzeit) ermittelt. Lagerplanende können über die Wahl eines Gewichtungsparameters entscheiden, wie stark die beiden Ziele in die LPV eingehen. Das Ziel der Arbeit ist die Evaluierung dieser LPV anhand einer umfangreichen Laborstudie mit 48 Kommissionierenden aus der Praxis in einer Lagerumgebung. In vier Szenarien mit verschiedenen Gewichtungsfaktoren werden Beanspruchungs- und Leistungsparameter miteinander verglichen.

Es zeigt sich, dass die beiden Zielgrößen in einem Zielkonflikt stehen. Eine höhere Gewichtung der Belastungskennwerte reduziert zwar die untersuchten Beanspruchungsgrößen (muskuläre Beanspruchung, Herzschlagfrequenz, subjektives Anstrengungsempfinden), erhöht jedoch gleichzeitig die Kommissionierzeit. Insbesondere die muskuläre Beanspruchung des unteren Rückens reagiert sensibel auf die Wahl verschiedener Gewichtungsfaktoren. Ein Einfluss auf die unterlaufenen Kommissionierfehler konnte hingegen nicht festgestellt werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass eine Optimierung nach nur einer der beiden Zielgrößen unter Vernachlässigung der jeweils anderen nicht empfehlenswert ist, da entweder sehr hohe Belastungen bzw. Beanspruchungen oder hohe Kosten durch steigende Kommissionierzeiten resultieren. Mit der Wahl eines passenden Gewichtungsparameters ist es jedoch möglich, die Belastungen bzw. Beanspruchungen von Mitarbeitenden signifikant zu mindern und hierbei nur sehr geringe Einbußen der Kommissionierzeit in Kauf nehmen zu müssen. Die Bestimmung der entsprechenden Faktoren muss in der Praxis individuell anhand unternehmensspezifischer Pareto-Kurven erfolgen.

Das vorgestellte Modell leistet damit einen wesentlichen Beitrag für die Forschung, indem erstmals empirische Leistungs- und Beanspruchungsparameter zur Evaluierung einer Lagerplatzvergabe erhoben werden. Zudem gibt es Lagerplanenden die Möglichkeit, ergonomische Kriterien ohne hohe Investitionskosten in der Kommissionierung zu berücksichtigen und so physische Belastungen im Lager zu reduzieren.

Abstract

Order picking plays a decisive role in companies within the value chain due to increasing customer demands and e-commerce. Corresponding planning tools for manual order picking systems are mostly based on economic criteria. Ergonomic factors have only rarely been taken into account in research and practice, resulting in potentially high physical workloads, especially on the lower spine. In this thesis, the decision problem of storage location assignment (SLA) for shelving systems is considered and a bi-objective algorithm is developed with the aim of reducing the load on the spine and picking time, respectively. The parameters of the two objective functions are derived on the one hand with the biomechanical model "The Dortmunder" (spinal load) and on the other hand are calculated using MTM-UAS (picking time). By choosing a weighting factor, warehouse managers can decide how strongly the two objectives are included in the SLA. The aim of the work is to evaluate the developed SLA on the basis of an extensive laboratory study with 48 pickers from practice in a warehouse environment. Workload and performance parameters are compared in four scenarios with different weighting factors of the SLA.

It turns out that there is a trade-off between the two objective functions. A higher weighting of the load parameters reduces the human strain (muscular strain, heart rate, ratings of perceived exertion), but simultaneously increases the picking time. In particular, the muscular strain on the lower back reacts sensitively to the choice of weighting factors. However, no influence on picking errors could be determined.

The results show that an optimization based on only one of the two object functions, neglecting the other, is not recommended, since either high strains or high costs, resulting from increasing picking times, occur. However, with the choice of a suitable weighting parameter, it is possible to significantly reduce the workload/ strain on employees with only a small increase of picking time. In practice, the relevant factors must be determined individually using a company-specific Pareto curve.

The presented model thus makes a significant contribution to research by collecting empirical performance and strain parameters for the first time to evaluate a storage location assignment. In addition, it gives warehouse managers the opportunity to take ergonomic criteria into account in order picking, to reduce physical workloads without the need for high investments.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis vi
Tabellenverzeichnis vii
Abkürzungsverzeichnis viii
1 Einleitung 1
1.1 Motivation 1
1.2 Zielsetzung 3
1.3 Aufbau der Arbeit 5
2 Stand der Forschung 7
2.1 Kommissionierung 7
2.1.1 Begriffsdefinition und Einordnung 7
2.1.2 Aufbau von Kommissioniersystemen 8
2.1.3 Prozessmodell der manuellen PzW-Kommissionierung 14
2.1.4 Kennzahlen der menschlichen Kommissionierleistung 16
2.2 Belastungsbewertung in der Kommissionierung 20
2.2.1 Grundlegende Begriffe 20
2.2.2 Physische Belastungen in der manuellen Kommissionierung 22
2.2.3 Methoden zur Belastungsermittlung und -bewertung 28
2.3 Literaturüberblick zu ergonomischen Planungskonzepten in der Kommissionierung 30
2.3.1 Entscheidungsprobleme in der manuellen Kommissionierung 31
2.3.2 Einflussgrößen des Kommissioniersystems auf die physische Belastung 35
2.3.3 Arbeitswissenschaftliche Kriterien in der Lagerplatzvergabe 38
2.4 Identifizierung der Forschungslücke und Ableitung der Forschungsfragen 41
3 Entwicklung einer ergonomischen Lagerplatzvergabe 43
3.1 Herleitung der benötigten Kennwerte 43
3.1.1 Bestimmung der Wirbelsäulenbelastung in der manuellen Kommissionierung 44
3.1.2 Bestimmung der Kommissionierzeit 49
3.2 Erstellung einer bi-kriteriellen Optimierung 54
4 Untersuchungsmodell und Leithypothesen 59
4.1 Untersuchungsmodell 59
4.2 Leithypothesen 60
5 Untersuchungskonzept der empirischen Studie 64
5.1 Versuchsaufbau 64
5.2 Messmethoden / Datenerhebung 69
5.2.1 Fragebogen bezüglich personenbezogener Daten 69
5.2.2 Elektromyographie 70
5.2.3 Herzschlagfrequenz 74
5.2.4 Subjektives Anstrengungsempfinden 74
5.2.5 Kommissionierzeit 75
5.2.6 Kommissionierfehler 75
5.3 Versuchsablauf 76
5.4 Probandenkollektiv 78
5.5 Detaillierung der Leithypothesen 80
5.5.1 Detaillierung der Leithypothesen LH 2.1 bis LH 2.6 80
5.5.2 Detaillierung der Leithypothesen LH 3.1 bis LH 3.3 84
5.5.3 Detaillierung der Leithypothesen LH 4.1 bis LH 4.3 85

5.6 Statistische Datenauswertung ... 87
6 Ergebnisse der Kommissionierversuche ... 89
6.1 Muskuläre Beanspruchung ... 89
6.1.1 Deskriptive Auswertung der muskuläre Beanspruchung ... 89
6.1.2 Korrelation zwischen der muskulären Beanspruchung und den Belastungskennwerten ... 96
6.1.3 Abhängigkeit der muskulären Beanspruchung von individuellen Eigenschaften ... 99
6.2 Beanspruchung des Herz-Kreislauf-Systems ... 101
6.2.1 Deskriptive Auswertung der Herzschlagfrequenz ... 101
6.2.2 Korrelation zwischen der Herz-Kreislauf-Beanspruchung und den Belastungskennwerten ... 102
6.3 Subjektives Anstrengungsempfinden ... 103
6.3.1 Deskriptive Auswertung des subjektiven Anstrengungsempfinden ... 103
6.3.2 Korrelation zwischen dem Anstrengungsempfinden und den Belastungskennwerten ... 105
6.4 Kommissionierzeit ... 105
6.4.1 Deskriptive Auswertung der Kommissionierzeit ... 105
6.4.2 Korrelation zwischen der tatsächlichen und der prognostizierten Kommissionierzeit ... 108
6.5 Kommissionierqualität ... 109
6.6 Resultierende Pareto-Kurven ... 110
6.7 Korrelationen zu LH4 ... 112
7 Diskussion ... 114
7.1 Diskussion des Untersuchungskonzepts ... 114
7.1.1 Diskussion der Algorithmusentwicklung und des Messkonzepts ... 114
7.1.2 Diskussion zum Versuchsdesign ... 122
7.2 Diskussion der Ergebnisse der empirischen Studie ... 126
7.2.1 Beanspruchung ... 126
7.2.2 Menschliche Kommissionierleistung ... 130
7.2.3 Bi-kriterielle Analyse der Studienergebnisse ... 133
7.3 Übertragbarkeit und Implementierung der Versuchsergebnisse in die Praxis ... 136
8 Fazit und Ausblick ... 140
Literaturverzeichnis ... 142
Anhang ... 166

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufbau der Arbeit 5
Abbildung 2: Einordnung der Kommissionierung in das Materialflusssystem 8
Abbildung 3: Arbeitssystem Kommissionierung 9
Abbildung 4: Morphologie der Realisierungsmöglichkeiten in einem Kommissioniersystem 14
Abbildung 5: Prozessdarstellung der PzW-Kommissionierung 15
Abbildung 7: Arten und Anteil von Kommissionierfehlern 19
Abbildung 8: Vereinfachtes Belastungs-Beanspruchungs-Konzept nach Rohmert 22
Abbildung 9: Gliederungsschema der Belastungsarten 23
Abbildung 10: Methodenebenen zur Erfassung physischer Belastungen 28
Abbildung 11: Klassenbasierte LPV bei ABC-Zonierung mit dem Radiensystem bzw. dem Segmentsystem 33
Abbildung 12: Entscheidungsprobleme der Kommissionierung 35
Abbildung 13: Einflussgrößen auf die beiden Zielgrößen der Optimierung 43
Abbildung 14: Schematische Darstellung der Berechnung von Druckkräften auf Bandscheiben 45
Abbildung 15: Beispiel von Druckkraftverläufen und Druckkrafttabellen 46
Abbildung 16: Beispielhafte Pareto-Kurve bei bikriterieller Optimierung 57
Abbildung 17: Modell zur Untersuchung des Einflusses einer eLPV auf die Beanspruchung und die menschliche Leistung in der manuellen Kommissionierung 60
Abbildung 18: Lagerlayout der empirischen Studie (Draufsicht) 65
Abbildung 19: Fotographien des Versuchsaufbaus 66
Abbildung 20: Ausschnitt aus einer Pickliste der Kommissionierversuche 67
Abbildung 21: Pareto-Kurve der eLPV auf Basis des im Versuch verwendeten Lagerlayouts und SKU-Datensatzes 68
Abbildung 22: Versuchsablauf 76
Abbildung 23: Kommissioniererfahrung der Versuchspersonen 79
Abbildung 24: Box-Plot-Diagramme der mittleren EA (% MVC) 90
Abbildung 25: Vergleich der mittleren EA (% MVC) des m. erector spinae zwischen Single-Order Picking und Multi-Order Picking 92
Abbildung 26: Box-Plot-Diagramme der dyn. EA (% MVC) 93
Abbildung 27: Mittelwerte der mittleren EA (% MVC) bei Analyse des Datensatzes EA_all 96
Abbildung 28: Lineare Regression der Druckkraft auf L5-S1 nach dem Dortmunder und den Mittelwerten der mittleren EA von m. multifidus und m. erector spinae 98
Abbildung 29: Mittlere EA (% MVC) in Abhängigkeit von individuellen Eigenschaften der Kommissionierenden 100
Abbildung 30: Box-Plot-Diagramme der mittleren HSF 101
Abbildung 31: Box-Plot-Diagramme des subj. Anstrengungsempfindens nach der Borg RPE Skala 104
Abbildung 32: Box-Plot-Diagramme der Kommissionierzeit 106
Abbildung 33: Pareto-Kurven der mittleren (links) bzw. dynamischen (rechts) EA beim SOP der fünf betrachteten Muskeln sowie der eLPV auf Basis der untersuchten λ-Gewichtung 110
Abbildung 34: Pareto-Kurven der HSF (links) bzw. dem subjektiven Anstrengungsempfinden beim SOP sowie der eLPV auf Basis der untersuchten λ-Gewichtung 111
Abbildung 35: Leitfaden zur Implementierung einer eLPV im Unternehmen 138

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ausschnitt der MTM-UAS Normzeitwertkarte „Aufnehmen und Platzieren“ 52
Tabelle 2: Definitionen der verwendeten Variablen und Indizes 54
Tabelle 3: Leithypothesen 2.1 – 2.6 62
Tabelle 4: Leithypothesen 3.1 – 3.3 62
Tabelle 5: Leithypothesen 4.1 – 4.3 63
Tabelle 6: Funktion, Elektrodenpositionierung und MVC-Übung der ausgewählten Muskeln 71
Tabelle 7: Detaillierung der Leithypothese LH 2.1 81
Tabelle 8: Detaillierung der Leithypothese LH 2.2 82
Tabelle 9: Detaillierung der Leithypothese LH 2.3 83
Tabelle 10: Detaillierung der Leithypothese LH 2.4 83
Tabelle 11: Detaillierung der Leithypothese LH 2.5 83
Tabelle 12: Detaillierung der Leithypothese LH 2.6 84
Tabelle 13: Detaillierung der Leithypothese LH 3.1 84
Tabelle 14: Detaillierung der Leithypothese LH 3.2 85
Tabelle 15: Detaillierung der Leithypothese LH 3.3 85
Tabelle 16: Detaillierung der Leithypothese LH 4.1 86
Tabelle 17: Klassifizierung der Effektstärken nach Cohen (1988) 88
Tabelle 18: Zusammenfassende Darstellung der Hypothesenauswertung H2.1.1 bis H2.1.180 95
Tabelle 19: Produkt-Moment-Korrelation der Belastungskennwerte der eLPV und der Mittelwerte der mittleren und dynamischen EA der einzelnen Muskeln 97
Tabelle 20: Produkt-Moment-Korrelation der Belastungskennwerte der eLPV und der mittleren und dynamischen EA der einzelnen Muskeln 97
Tabelle 21: Zusammenfassende Darstellung der Hypothesenauswertung von H2.3.1 bis H2.3.18 102
Tabelle 22: Zusammenfassende Darstellung der Hypothesenauswertung H2.5.1 bis H2.5.18 bezogen auf das subjektive Anstrengungsempfinden am Ende des Szenarios 105
Tabelle 23: Zusammenfassende Darstellung der Hypothesenauswertung H3.1.1 bis H3.1.18 bezogen auf die Kommissionierzeit der verschiedenen Szenarien 107
Tabelle 24: Produkt-Moment-Korrelation der Zeitkennwerte der eLPV und der tatsächlich benötigten Kommissionierzeit 108
Tabelle 25: Absolute und relative Abweichungen zwischen der prognostizierten und tatsächlichen Kommissionierzeit 109
Tabelle 26: Mittelwert und Standardabweichung der Fehlerquoten bei den verschiedenen λ-Gewichtungen der eLPV (n=48) 109
Tabelle 27: Produkt-Moment-Korrelation der muskulären Beanspruchungsreduzierung und der Kommissionierzeiterhöhung 112
Tabelle 28: Produkt-Moment-Korrelation der Reduzierung der HSF bzw. des subjektiven Anstrengungsempfindens und der Kommissionierzeiterhöhung 112

Abkürzungsverzeichnis

AAWS	Automotive Assembly Worksheet
ANOVA	analysis of variance
AU	Arbeitsunfähigkeit
B2B	Business to Business
BK	Berufskrankheit
bpm	beats per minute
CUELA	Computerunterstützte Erfassung & Langzeit-Analyse von Belastungen des Muskel-Skelett-Systems
DGUV	Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung
EA	Elektromyographische Aktivität
EAWS	Ergonomic Assessment Worksheet (früher: European Assembly Worksheet)
EKG	Elektrokardiogramm
EMG	Elektromyographie
eLPV	ergonomische Lagerplatzvergabe
FF	Forschungsfrage
HSF	Herzschlagfrequenz
IAD	Institut für Arbeitswissenschaft der TU Darmstadt
I/O	Input/Output
L4-L5	Bandscheibensegment zwischen dem 4. Lendenwirbel und 5. Lendenwirbel
L5-S1	Bandscheibensegment zwischen dem 5. Lendenwirbel und dem Sakral- bzw. Kreuzbeinwirbel
LH	Leithypothese
LMM	Leitmerkmalmethode
LPV	Lagerplatzvergabe
LWS	Lendenwirbelsäule
m.	musculus (lateinisch für Muskel)
MDD	Mainz-Dortmunder Dosismodell
MDE	Mobile Datenerfassung
MEK	MTM in der Einzel- und Kleinserienfertigung
MSE	Muskel-Skelett-Erkrankungen
MOP	Multi-Order Picking
MTM	Methods-Time Measurement
MVC	Maximale willkürliche isometrische Muskelkontraktion
NIOSH	National Institute for Occupational Safety & Health
NP	nichtdeterministisch polynomielle Zeit
OCRA	Occupational Risk Assessment of repetitive movements and exertions of the upper limbs
OWAS	Ovako Working Posture Analysing System
PzW	Person-zur-Ware
REBA	Rapid Entire Body Assessment
RFID	radio-frequency identification
RPE	Received Perception of Exertion
RULA	Rapid Upper Limb Assessment

SD	Standard Deviation (Standardabweichung)
SKU	stock keeping unit
SOP	Single-Order Picking
TMU	Time Measurement Unit
UAS	Universelles Analysiersystem
vgl.	vergleiche
WMS	Warehouse Management System
WzP	Ware-zur-Person

1 Einleitung

In diesem einleitenden Kapitel wird mit der Motivation (Kapitel 1.1) zur vorliegenden Dissertation begonnen, bevor in Kapitel 1.2 die Zielsetzung erläutert wird. Anschließend wird in Kapitel 1.3 auf den Aufbau der Arbeit eingegangen.

1.1 Motivation

Die Kommissionierung beschreibt den logistischen Prozess des Zusammenstellens von Artikeln aus einer Gesamtmenge an Gütern (Sortiment), der durch Kundenaufträge ausgelöst wird (VDI 3590, 1994). Obwohl Kommissionierprozesse auch für die Bereitstellung von Bauteilen in der Produktion stattfinden, liegt der Schwerpunkt der klassischen Kommissionierung in der Distribution von auf Lager gehaltenen Waren an die verschiedenen Kunden (Wichmann, 1994).

Die Kommissionierung hat unabhängig von der Branche einen elementaren Einfluss auf den Unternehmenserfolg (ten Hompel et al., 2011), da sie den zeit- und kostenintensivsten Teilprozess der Intralogistik darstellt (Tompkins et al., 2010). Etwaige Ineffizienzen oder Kommissionierfehler wirken sich unmittelbar sowohl auf die interne Kostenstruktur als auch auf die externe Kunden-Lieferanten-Beziehung aus (Menk, 1999). Zudem wachsen die Herausforderungen an die Kommissioniersysteme stetig, was nicht zuletzt in der COVID-19-Pandemie deutlich wurde. Artikel müssen aufgrund des zunehmenden Warenversands durch Internetbestellungen (e-Commerce) in immer kürzeren Zeitfenstern, wie z. B. der „same day delivery“, fehlerfrei und zu einem wettbewerbsfähigen Preis an die Kunden geliefert werden (Grosse et al., 2017). Gleichzeitig steigt in zahlreichen Branchen die Anzahl an kundenspezifischen Produktvarianten, wobei die an den Kunden auszuliefernden Losgrößen auch im B2B-Bereich stetig – teilweise bis auf den Wert „eins“ – sinken (De Koster et al., 2007; Bindi et al. 2009). Aufgrund dieser starken Anpassung der gesamten Logistikkette an die Bedürfnisse der Kunden wird von einem Wechsel vom Anbieter- zum Käufermarkt gesprochen, wobei gerade durch die Kommissionierung entscheidende Wettbewerbsvorteile erzielt werden können (ten Hompel et al., 2011).

Trotz dieser Trends und der in vielen Unternehmensbereichen rasch fortschreitenden Automatisierung werden die meisten Lager nach wie vor manuell nach dem Person-zur-Ware Prinzip betrieben (Baumann, 2013, De Koster et al., 2007). Marktanalysen gehen von einem Anteil von 80 % aller Lager in Westeuropa aus, bei denen die Kommissionierung grundsätzlich von menschlichen Kommissionierenden durchgeführt und allenfalls z. B. durch Assistenzsysteme zur Artikelidentifikation technisch unterstützt wird (Napolitano, 2012; Michel, 2017). In Deutschland ist dieser Wert Schätzungen zufolge noch höher (Franzke et al., 2018). Grund hierfür sind auf der einen Seite die hohen Investitions- und Instandhaltungskosten vollautomatischer Systeme (Bächler et al., 2016; Emde & Boysen, 2017). Auf der anderen Seite besitzt der Mensch aufgrund seiner kognitiven und motorischen Fähigkeiten eine deutlich höhere Flexibilität beim Greifen von gelagerten Waren mit verschiedenen Größen und Formen (Arnold

& Furmans, 2005). Ferner sind manuelle Systeme bei saisonalen Schwankungen dynamisch einsetzbar und leichter an die Nachfragesituation auf dem Markt anzupassen (Petersen & Aase, 2004).

Somit verbleibt ein großer Teil der manuellen Arbeitstätigkeiten, wie unter anderem das Heben bzw. Umsetzen von teilweise schweren Artikeln oder das Schieben eines Kommissionierwagens, bei den Kommissionierenden. Diese Tätigkeiten sind oftmals durch das Handhaben schwerer oder unhandlicher Lasten sowie ungünstige Körperhaltungen unter gegebenenfalls repetitiven Bedingungen charakterisiert, was zu hohen körperlichen Belastungen führen kann. Wenn diese Tätigkeiten über einen längeren Zeitraum regelmäßig ausgeübt werden, bergen sie ein hohes Erkrankungs- bzw. Schädigungsrisiko für die beteiligten Mitarbeitenden (Waters et al., 1998; Marras et al., 1999; Schaub & Landau, 2004). Insbesondere in Lagern, in denen die gehandhabten Artikel hohe Gewichte aufweisen, wie beispielsweise in der Automobilindustrie oder im Maschinenbau, erhöht sich das Risiko für Muskel-Skelett-Erkrankungen (MSE) – überwiegend für Schädigungen der Wirbelsäule (Goldscheid, 2008). So wundert es nicht, dass Rückenschmerzen (lower back pain) die häufigste Beschwerde unter Kommissionierenden ist – Studien zeigen, dass nur 6 % der Mitarbeitenden in der Kommissionierung nie unter Rückenschmerzen leiden (Gajšek et al., 2020). Diese Problematik wird durch den demographischen Wandel zusätzlich verstärkt (Walch, 2011), da die Belastbarkeit der Wirbelsäule und ihrer Bandscheiben mit steigendem Alter abnimmt (Jäger et al., 2001a).

Dass die Prävention von MSE vor allem in der Logistik-Branche relevant ist, belegen auch Daten bezüglich der Arbeitsunfähigkeit der jeweiligen Beschäftigten. Während branchenübergreifend auf 100 Erwerbstätige 167 Arbeitsunfähigkeitsfälle je Jahr kommen, sind dies in der Lagerhaltung 224 Fälle – Tendenz steigend (Badura et al., 2016). Mit etwa 60 % ist hierbei ein Großteil der krankheitsbedingten Fehlzeiten der Mitarbeitenden im Logistiksektor auf MSE zurückzuführen – branchenübergreifend liegt dieser Wert bei deutlich niedrigeren 30 % (Schneider et al., 2010). In Deutschland gelten an die Arbeitgebenden gerichtete rechtliche Normen, welche vorschreiben, die Belastungen der Mitarbeitenden zu beurteilen und Überbelastungen zu vermeiden (u.a. Arbeitsschutzgesetz, 1996). Neben den gesundheitlichen Folgen für die Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmer entstehen durch MSE hohe Kosten für Unternehmen durch Produktivitätsverluste oder die Fluktuation von erfahrenen Facharbeitenden (Neubert, 2013; Spath et al., 2019).

Um hohe physische Belastungen, die auf die Kommissionierenden wirken, zu reduzieren und damit indirekt Kosten zu mindern, sollten ergonomische Parameter bereits in der Planung von Kommissionierprozessen berücksichtigt werden (Calzavara et al., 2019; Franzke et al., 2018; Lee et al., 2016). Dieser Notwendigkeit zur Verbesserung der ergonomischen Bedingungen stimmen 86 %[1] der

[1] 86 % ergeben sich aus der Summe der mittelhohen (29 %), hohen (45 %) und sehr hohen (12 %) Zustimmung.

Experten aus der Intralogistik zu (Spath et al., 2019). Obwohl auf diese Herausforderung auch in der wissenschaftlichen Literatur bereits vielfach hingewiesen wurde, konzentrieren sich bisherige Planungsmodelle für die Kommissionierung aufgrund des starken Kostendrucks bisher jedoch fast ausschließlich auf betriebswirtschaftliche Faktoren, wie beispielsweise zurückgelegte Laufwege, Durchlaufzeiten oder die hieraus resultierenden Kosten (Reyes et al., 2019; Grosse et al., 2015a). Konkrete Ansätze zur systematischen Integration arbeitswissenschaftlicher Größen in der Planung der manuellen Person-zur-Ware Kommissionierung, wie z. B. physische Belastungen, sind bisher nur wenige vorhanden (Grosse et al., 2015a; Andriolo et al., 2016).

Eines der klassischen Planungsprobleme der Kommissionierung ist die *Lagerplatzvergabe* (LPV). Hierunter versteht man die Zuordnung von Artikeln zu örtlich definierten Positionen in einem Lager (Bernnat, 1997). Die LPV hat nicht nur eine zentrale Bedeutung für die Leistungs- und Wettbewerbsfähigkeit eines Lagers (Bernnat, 1997), sondern besitzt gleichzeitig großes Potential zur Reduzierung von physischen Belastungen in der manuellen Kommissionierung und damit zur signifikanten Verbesserung ergonomischer Arbeitsbedingungen (Battini et al., 2016; Larco et al., 2017; Günthner & Koch, 2014).

Eine Zuordnung von belastungskritischen Artikeln – z. B. Artikel, die häufig gegriffen werden oder ein hohes Gewicht aufweisen - zu ergonomisch günstigen Lagerplätzen, könnte somit eine Reduzierung der physischen Belastungen bei Kommissioniervorgängen und auf lange Sicht eine Senkung des Risikos der Entwicklung von MSE ermöglichen (Gajsek et al., 2021; Otto et al., 2017).

1.2 Zielsetzung

In der Vergangenheit erfolgte in Unternehmen die Zuordnung von Artikeln zu Lagerplätzen häufig unsystematisch bzw. zufällig, sodass davon ausgegangen werden kann, dass weniger als 15 % der Artikel in Lagerhäusern optimal angeordnet waren (Frazelle, 2002). Der erhebliche Beitrag einer effizienten LPV zur Wirtschaftlichkeit von Lagern ist mittlerweile jedoch unbestritten, sodass auch in der betrieblichen Praxis häufiger konkrete Strategien zur LPV vorliegen. Diese folgen jedoch meist rein wirtschaftlichen Motiven (siehe Kapitel 1.1), sodass die Kommissionierenden potentiell hohen physischen Belastungen ausgesetzt sind (Otto et al., 2017).

Ziel dieser Arbeit ist es deshalb, eine ergonomische Lagerplatzvergabe (eLPV) zu entwickeln, welche die biomechanischen Belastungen, die auf die Wirbelsäule wirken, minimiert, da vor allem die Wirbelsäule während Kommissioniertätigkeiten einem erhöhten Erkrankungsrisiko ausgesetzt ist (Jäger et al., 2002). Hierbei soll die Zuordnung zu Lagerplätzen derart erfolgen, dass schwere und häufig zu greifende Artikel in günstigen Greifhöhen platziert werden, sodass eine manuelle Lastenhandhabung dieser belastungskritischen Artikel in Kombination mit ungünstigen Körperhaltungen bzw. -bewegungen vermieden wird.

Um verschiedene Kombinationen aus Gewicht, Zugriffshäufigkeit, Greifhöhe und weiteren Belastungsfaktoren arbeitswissenschaftlich abgesichert bewerten zu können, muss im Rahmen dieser Dissertation jedoch zunächst ein evaluiertes Belastungsbewertungsverfahren für die Wirbelsäule ausgewählt werden. Darauf aufbauend soll schließlich ein Algorithmus entwickelt werden, der für ein (Teil-)Lager mit Fachbodenkommissionierung anwendbar ist, in dem tendenziell schwere Artikel kommissioniert werden, wie es z. B. in der Automobilindustrie, dem Ersatzteilhandel oder dem Maschinenbau vorkommt (Galka & Günthner, 2016; Steinebach et al., 2020a; Wright & Haslam, 1999). Diese eLPV soll unabhängig vom Lagerlayout und den verwendeten technischen Hilfsmitteln Anwendung finden können und neben der Belastungszielgröße auch eine zeitliche Komponente beinhalten, um wirtschaftlich tragfähige Konzepte zu gewährleisten. Dieses Ziel wird in folgender Forschungsfrage (FF) zusammengefasst:

FF1: Wie sollte eine bi-kriterielle ergonomische Lagerplatzvergabe unter Berücksichtigung der Wirbelsäulenbelastung und der Kommissionierzeit gestaltet werden?

Die bi-kriterielle Lagerplatzvergabe stellt sicher, dass nicht nur die beiden Extremfälle einer strikt belastungsminimierten bzw. wirtschaftlich optimierten LPV kalkulierbar sind, sondern insbesondere auch „Hybrid-Strategien“ angewendet werden können (Larco et al., 2017; Battini et al., 2016).
Kernstück dieser Arbeit sind auf FF1 aufbauende empirische Kommissionierversuche. Es soll ermittelt werden, ob und in welchem Maß eine Reduzierung der Beanspruchung der Kommissionierenden bei der Verwendung der eLPV ermöglicht wird.
Gleichzeitig soll der Zielkonflikt (Trade-Off) zwischen einer ergonomischen Ausrichtung der LPV und der benötigten Kommissionierzeit untersucht werden. Zwar ermöglicht die Platzierung von häufig gegriffenen Artikeln in günstigen Greifhöhen einerseits kürzere Such- und Greifzeiten (Pulverich, 2009; Larco, 2010), jedoch erhöhen sich tendenziell die zurückzulegenden Wegstrecken infolge der Zuordnung von Artikeln zu diesen „Goldenen Zonen“ (Petersen et al., 2005). Ferner ist fraglich, ob sich die Kommissionierqualität, gemessen anhand der Häufigkeit von Pickfehlern, durch eine eLPV verbessert. Die hohen Kosten für Kommissionierfehler unterstreichen die Wichtigkeit dieser Betrachtung (Rammelmeier et al., 2012). Diese beiden Faktoren – Zeit und Qualität – bilden in dieser Arbeit die Kommissionierleistung. Anhand der beschriebenen Überlegungen ergeben sich zwei weitere Forschungsfragen:

FF2: Wie wird die Beanspruchung durch eine ergonomische LPV beeinflusst?

FF3: Wie wird die Kommissionierleistung (Kommissionierzeit bzw. Qualität) durch eine ergonomische LPV beeinflusst?

Letztlich soll ermittelt werden, ob ein Querbezug zwischen der Kommissionierzeit und der Beanspruchung der Kommissionierenden existiert. Die entsprechenden Zusammenhänge werden in Kapitel 4.2 hergeleitet. Es ergibt sich folgende Forschungsfrage:

FF4: Kann ein Teil der Kommissionierzeit durch die ergonomische LPV aufgrund einer geringeren Beanspruchung kompensiert werden?

Hierauf aufbauend sollen Empfehlungen abgeleitet werden, ob und unter welchen Bedingungen die Berücksichtigung von ergonomischen Kennwerten in der LPV sinnvoll ist.

1.3 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Dissertation untergliedert sich in insgesamt acht Kapitel. Der grundlegende Aufbau ist in Abbildung 1 dargestellt.

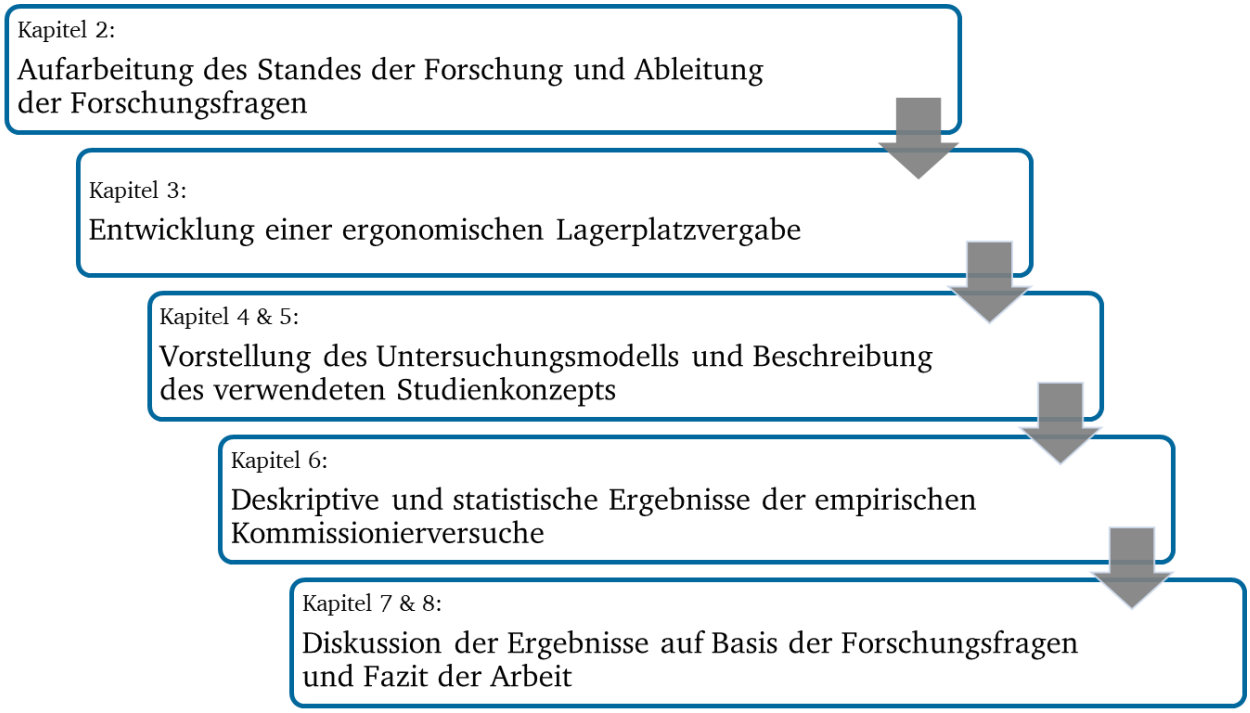


Abbildung 1: Aufbau der Arbeit (eigene Darstellung)

Im Anschluss an die zuvor dargelegte Einleitung (Kapitel 1) knüpft die Aufarbeitung des Standes der Forschung (Kapitel 2) an. Hier werden zunächst grundlegende Begriffe der Intralogistik und Arbeitswissenschaft definiert, die zum weiteren Verständnis notwendig sind. Anschließend werden bekannte Wirkungszusammenhänge zwischen den Einflussgrößen bzw. Gestaltungsparametern der manuellen Kommissionierung und den physischen Belastungen dargelegt. Hierbei werden insbesondere

solche Arbeiten beleuchtet, die sich mit arbeitswissenschaftlichen Aspekten der Lagerplatzvergabe beschäftigt haben. Auf dieser Basis folgt die Ableitung der Forschungslücke und der Forschungsfragen.
In Kapitel 3 wird sodann auf Basis der Erkenntnisse aus der Literaturrecherche eine ergonomische Lagerplatzvergabe unter Berücksichtigung der Belastung der Wirbelsäule entwickelt. Ferner wird eine Methode zur bi-kriteriellen Optimierung vorgestellt, welche zusätzlich zur belastungsminimierenden Zielgröße ein wirtschaftliches Kriterium integriert. Kapitel 4 stellt das Untersuchungsmodell dieser Arbeit vor. Die erwarteten Wirkungszusammenhänge werden in Leithypothesen formuliert und in dem Modell visualisiert.
In Kapitel 5 wird das Untersuchungskonzept vorgestellt, welches die Beschreibung des Aufbaus und Ablaufs des empirischen Kommissionierversuches sowie die verwendeten Messverfahren beinhaltet. Zudem werden die Leithypothesen in statistisch überprüfbare Hypothesen konkretisiert.
Die Ergebnisse der Versuchsreihe werden anschließend dargestellt (Kapitel 6). Hierbei wird sich an der Struktur der Hypothesen orientiert und die Datenauswertung sowohl deskriptiv als auch statistisch abgebildet.
Es folgt eine Diskussion und kritische Betrachtung der Untersuchungsmethodik sowie der Ergebnisse (Kapitel 7). Forschungsfragen werden beantwortet und Handlungsempfehlungen abgeleitet. Die Arbeit schließt mit einem Fazit und einem Ausblick auf zukünftige Forschungsfelder bzw. arbeitswissenschaftliche Fragestellungen in der manuellen Kommissionierung ab (Kapitel 8).

2 Stand der Forschung

Das folgende Kapitel legt benötigte Definitionen und den aktuellen Stand der Forschung zu arbeitswissenschaftlichen Fragestellungen im Kontext der manuellen Kommissionierung dar. Hierbei wird zunächst auf Begriffe und die Systemelemente der Kommissionierung eingegangen (Kapitel 2.1). Im Anschluss wird beschrieben, welche Möglichkeiten zur Belastungsbewertungen in der manuellen Kommissionierung vorliegen (Kapitel 2.2). Zudem sollen in der Vergangenheit erarbeitete Studien vorgestellt werden, die ergonomische Kriterien in der Intralogistik berücksichtigen (Kapitel 2.3). Auf Basis dieser Ausführungen kann anschließend die theoretische Überleitung zu der Forschungslücke und den Forschungsfragen erfolgen (Kapitel 2.4).

2.1 Kommissionierung

2.1.1 Begriffsdefinition und Einordnung

In Lagern werden Fertigwaren, Halberzeugnisse oder Rohstoffe bereitgestellt, welche trotz momentaner Verfügbarkeit erst zu einem späteren Zeitpunkt benötigt werden (Martin, 2016). Ursächlich hierfür ist in der Regel die Sicherungsfunktion eines Lagers, sodass ein Unternehmen auch bei unvollständigen Informationen über zukünftige Kundenbedarfe sowie Bedarfszeitpunkte in der Lage ist, benötigte Güter zu produzieren bzw. Kundenbedarfe zu decken (Mathar & Scheuring, 2009).

Ein Kundenauftrag löst einen Vereinzelungsvorgang von Lagereinheiten zur Lieferung der vom Kunden angeforderten Artikelart in einer bestimmten Stückzahl aus, den man Kommissionierung nennt (ten Hompel et al., 2011). Somit hat die Kommissionierung *„das Ziel, aus einer Gesamtmenge von Gütern (Sortiment) Teilmengen (Artikel) auf Grund von Anforderungen (Aufträge) zusammenzustellen“* (VDI 3590, 1994). Der Kommissioniervorgang inkludiert diesbezüglich alle zur Zusammenstellung der stock keeping units (SKU) notwendigen Aktivitäten (Gudehus, 1973). Ein SKU ist hierbei die kleinste, jedoch noch eigenständig disponierbare Einheit (DIN EN 14943, 2005). Kommissionierprozesse können innerhalb von Unternehmen durchaus mehrfach auftreten – beispielsweise zur Versorgung der Produktion mit Kaufteilen bzw. Rohstoffen und im Anschluss an den Produktionsprozess zur Distribution der Fertigwaren für den Absatzmarkt (Menk, 1999).

Die Mitarbeitenden, die für die Zusammenstellung der SKU verantwortlich sind, werden als „Kommissioniererin“ oder „Kommissionierer“ bzw. in Anlehnung an den englischen Fachbegriff als „Order Picker“ bezeichnet.

Hinsichtlich des Materialflusssystems ist die Kommissionierung vom Wareneingang, welcher für die Prüfung und Buchung der Waren zuständig ist sowie von der Einlagerung bzw. Bereitstellung der Lagereinheiten in den entsprechenden Lagerbereichen, abzugrenzen (Siepenkort, 2013). Nach der

Kommissionierung folgt eine Konsolidierung der in der Kommissionierung entnommenen SKU zu Versandeinheiten. Zusätzlich werden die bestellten Waren in geeignete Versandverpackungen gegeben und an den Kunden ausgeliefert, siehe Abbildung 2. Beim sogenannten Cross Docking kann die Einlagerung und damit ebenso die Kommissionierung übersprungen werden, da angelieferte Großmengen unmittelbar in Teilmengen dem Versand zugeführt werden (De Koster et al., 2007).

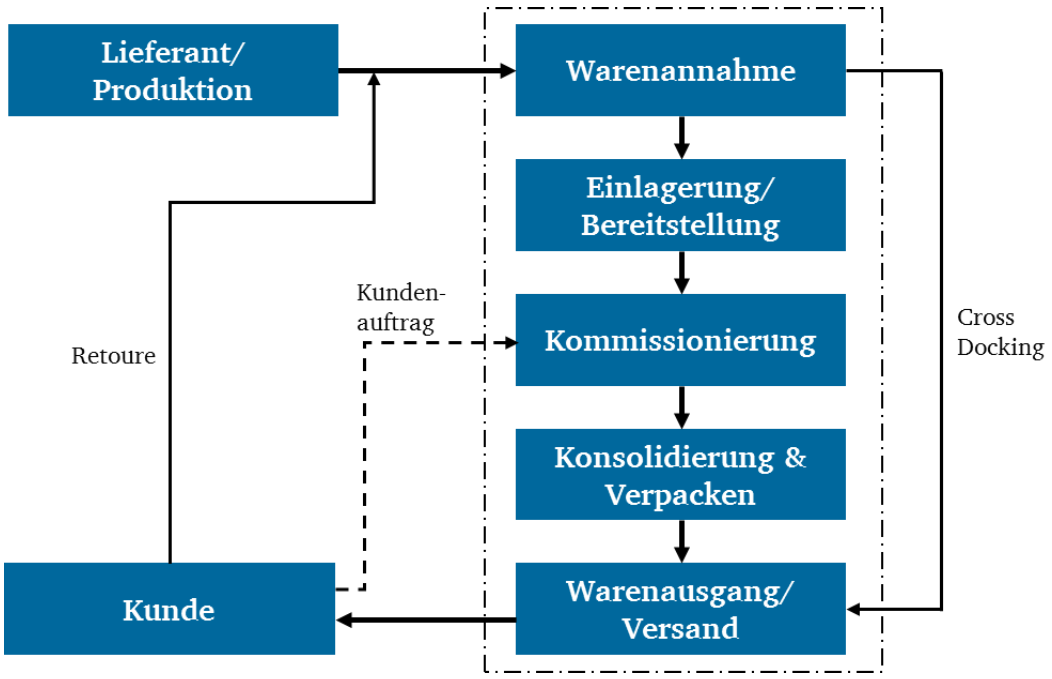


Abbildung 2: Einordnung der Kommissionierung in das Materialflusssystem (vgl. Alicke et al., 2006; Lolling, 2003; Heinz et al., 1997; De Koster et al., 2007)

2.1.2 Aufbau von Kommissioniersystemen

Das Spektrum der Systemeigenschaften von Kommissionierlagern ist in der Praxis enorm groß. Beispielhaft sei dies anhand des Artikelspektrums erklärt: während ein Buchhandel erst ab etwa 50.000 verschiedenen Artikeln als groß gilt, kommt es vor, dass ein Fachhandel nur einige hundert Produkte im Lager hält (Potyka, 1995). Demnach gilt es, das Kommissioniersystem und deren Ausprägungen den Anforderungen entsprechend anzupassen.

Der Kommissionierprozess besteht aus vielen Einzeltätigkeiten (siehe Kapitel 2.1.3). Für die Ausführung dieser Aufgaben werden heute zahlreiche verschiedene Technologien und Strategien verwendet (Guo et al., 2014). Die große Auswahl an technischen Hilfsmitteln und Informationssystemen, das Zusammenspiel zwischen Aufbau- und Ablauforganisation sowie die starke Abhängigkeit von menschlichen Faktoren und deren heterogenen Leistungsfähigkeiten machen die Gestaltung von

Kommissioniersystemen zu einer sehr komplexen Planungsherausforderung (Grosse et al., 2015b; Bächler, 2017).

Um die Struktur von Arbeitsprozessen und das Zusammenwirken von einzelnen Gestaltungselementen in einem einheitlichen Ordnungsschema abzubilden, wird in der Arbeitswissenschaft häufig das sogenannte Arbeitssystem definiert. Dieses wird gemeinhin durch die Elemente Arbeitsperson(en), Arbeitsauftrag, Arbeitsaufgabe, Eingabe, Ausgabe, Arbeitsmittel, Arbeitsobjekte und Umwelteinflüsse beschrieben (Schlick et al., 2018). Ein auf die Kommissionierung zugeschnittenes Arbeitsmodell ist in Abbildung 3 mit Beispielen für die jeweiligen Systemelemente dargestellt, erhebt jedoch keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

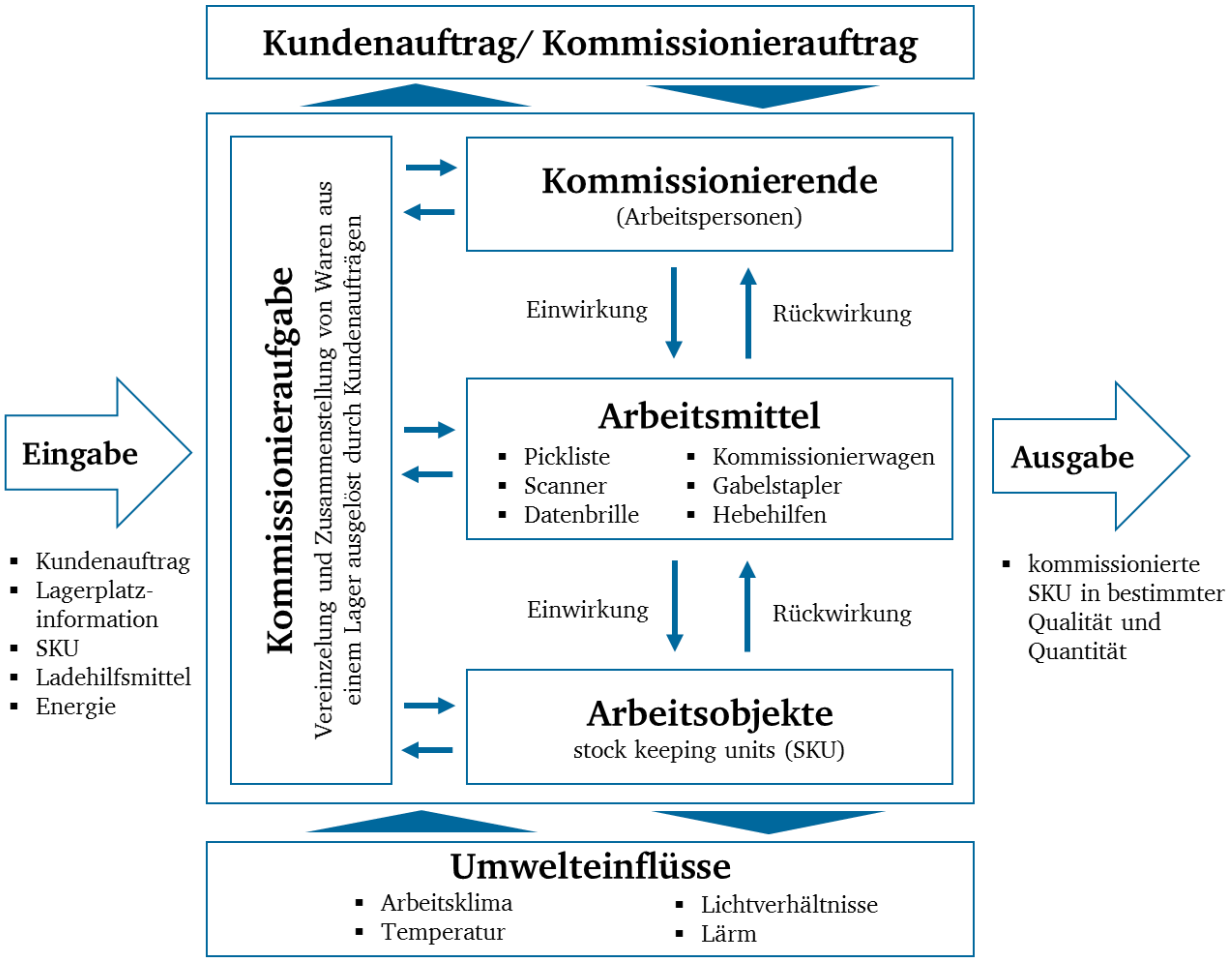


Abbildung 3: Arbeitssystem Kommissionierung (eigene Darstellung in Anlehnung an Bächler, 2017; Schlick et al., 2018)

Ein wettbewerbsfähiges Kommissioniersystem bedingt ein effizientes Zusammenwirken der einzelnen Systemelemente. Hierfür muss die Organisation des Gesamtprozesses, die korrekte Weitergabe von Informationen und die darauf aufbauende physische Abwicklung des Kommissionierauftrags durch die Mitarbeitenden gewährleistet werden (Lolling, 2003; Bächler, 2017). Ein Kommissioniersystem wird deshalb klassischerweise in die drei folgenden Teilbereiche untergliedert (VDI 3590, 1994):

- Materialflusssystem
- Informationsflusssystem
- Organisationssystem

Diese Teilbereiche sollen im Folgenden im Hinblick auf ihre unterschiedlichen Realisierungsvarianten erläutert werden. Die Beschreibung dieser verschiedenen Ausprägungen soll später herangezogen werden, um die Anwendbarkeit der entwickelten ergonomischen Lagerplatzvergabe auf ausgewählte Kommissionierszenarien einzugrenzen.

Materialflusssystem

Das Materialflusssystem beschreibt die physische Bewegung von Objekten im Lager. Dementsprechend legt der Materialfluss fest, wie die Kommissionierenden und die zu entnehmenden SKU räumlich und zeitlich zusammengeführt und wie die Artikel anschließend weiter transportiert werden (ten Hompel & Schmidt, 2006). Folglich sind die folgenden wesentlichen Grundprozesse betroffen (VDI 3590, 1994):

1. Bereitstellung der SKU auf bestimmten Lagerplätzen
2. Bewegung der Kommissionierenden zum Lagerplatz
3. Entnahme der SKU durch die Kommissionierenden
4. Transport der SKU zum Abgabeort
5. Abgabe der SKU

Wie die technische und organisatorische Umsetzung dieser Grundprozesse gestaltet wird hängt maßgeblich von den spezifischen Anforderungen der Kunden sowie der Heterogenität und Eigenschaften des SKU-Portfolios ab (Breu, 2007) und wird aufgrund der großen Bandbreite an Gestaltungsmöglichkeiten häufig als komplexeste Aufgabe der innerbetrieblichen Logistik angesehen (Gudehus, 2013).

Die Bereitstellung der SKU (1) hat zur Aufgabe, den Kommissionierenden die zu entnehmende Ware zur Verfügung zu stellen und unterscheidet sich in eine statische und eine dynamische Variante. Während die SKU bei der statischen Bereitstellung ihre Position zum Zeitpunkt der Entnahme nicht verändern, befindet sich der Artikel bei der dynamischen Realisierung in Bewegung (ten Hompel et al., 2011).

Zusätzlich differenziert man zwischen einer zentralen und einer dezentralen Bereitstellung (ten Hompel & Schmidt, 2006). Bei einer zentralen Bereitstellung findet die Entnahme der SKU an einem festgelegten Ort statt (Ware-zur-Person[2]) und kann z. B. über Kommissionierstationen realisiert werden, die an eine automatisierte Fördertechnik angebunden sind. Entsprechend entfällt die Bewegung der

[2] Synonym werden auch die Begriffe „Ware-zum-Mann“ oder „Ware-zum-Mensch“ verwendet (Franzke, 2018)

Kommissionierenden zum Lagerplatz (2). Dieser Ansatz ist jedoch nur unter bestimmten Voraussetzungen sinnvoll, wie beispielsweise sehr hohe Durchsätze, möglichst Mehrschichtbetrieb, geringe Auslastungsspitzen, standardisierte Ladehilfsmittel sowie hohe Kapitalverfügbarkeit (Pulverich, 2009).

Bei der dezentralen Bereitstellung (Person-zur-Ware) hingegen müssen sich die Kommissionierenden durch das Lager bewegen, um zum Entnahmeort zu gelangen. Dies kann zu Fuß oder mit angetriebenen Flurförderzeugen geschehen (ten Hompel et al., 2011). In dieser Dissertation wird nur die Person-zur-Ware Kommissionierung betrachtet, da eine ergonomische Lagerplatzvergabe lediglich bei wechselnden Entnahmeorten von Relevanz ist.

Die Entnahme des SKU (3) beschreibt den Greif- bzw. Pickvorgang der Kommissionierenden, wobei dieser vollständig automatisiert, technisch unterstützt (bspw. durch Hebehilfen) oder manuell ausgeführt werden kann (Goldscheid, 2008). Eine rein manuelle Entnahme kommt insbesondere dann vor, wenn die zu greifenden SKU heterogene Formen, Volumen oder Massen besitzen oder keine gute Oberflächenbeschaffenheit vorliegt, da mechanische Greifer für diese flexiblen Anforderungen bislang kaum geeignet sind (Gudehus, 2012). Da in dieser Arbeit physische Belastungen der Kommissionierenden untersucht und durch eine Lagerplatzvergabe reduziert werden sollen, werden nachfolgend ausschließlich manuelle Systeme betrachtet. Ferner wird unterschieden, ob je Zugriff einer oder mehrere Artikel entnommen werden, da sich dies direkt auf das Lastgewicht und die Anzahl der Lasthandhabungsvorgänge auswirkt (Jünemann & Schmidt, 2000). Nachdem ein SKU entnommen wurde, folgt der Transport zum Abgabeort (4), wobei wiederum verschiedene Flurförderzeuge denkbar sind.

Ähnlich wie bei der Bereitstellung kann auch bei der Abgabe (5) zwischen einer zentralen und dezentralen Form differenziert werden (ten Hompel et al., 2011). Ist der Abgabeort ein fest eingerichtetes Depot (auch Basis oder I/O Point genannt) an einer bestimmten Stelle im Lager, spricht man von einer zentralen Abgabe. Die dezentrale Variante hingegen zeichnet sich dadurch aus, dass zwischen dem Entnahme- und Abgabeort keine Bewegung stattfindet (VDI 3590, 1994), wie es bei einem Pick-to-Belt System üblich ist. Hierbei wird der Artikel unmittelbar nach der Entnahme auf eine automatisierte Förderanlage abgegeben (Günthner & Heptner, 2007).

Informationsflusssystem

Das Informationsflusssystem ist für die Erfassung und Bereitstellung von Informationen bezüglich des Kommissionierprozesses zum benötigten Zeitpunkt verantwortlich, um somit die Abläufe im Kommissionierlager steuerbar zu machen (Slomka, 1990). Die Auftragsinformationen müssen in einer geeigneten Form an die Kommissionierenden übergeben werden und sind Grundlage für effiziente und fehlerfreie Prozesse (Spath & Wehking, 2010). Eine fehlende Synchronität des Informationsflusses mit

dem Materialfluss, unvollständige Informationen oder eine nicht ergonomische Informationsdarstellung können die Entstehung von Kommissionierfehlern erheblich begünstigen (Lolling, 2003).
Nach der Bestellung eines Kunden werden die Kundenaufträge zunächst in einem Auftragspool gesammelt und geordnet, um sie anschließend in Kommissionieraufträge mit entsprechenden Auftragsinformationen zu transformieren (ten Hompel et al., 2011). Diese definieren den Kommissionierenden eine eindeutige Artikelnummer, die jeweilige Entnahmemenge und den Lagerplatz, an dem das entsprechende SKU zu finden ist. Je nach Kommissioniersystem ist es auch üblich, Abgabeorte, Routingstrategien durch das Lager oder Verpackungsvorgaben zu übermitteln (VDI 3590, 1994). Zur Verwaltung dieser Informationen werden in modernen Lagern Warehouse Management Systeme (WMS) eingesetzt (Ramaa et al., 2012).
Die Informationsübermittlung an die Kommissionierenden ist über viele unterschiedliche Medien und informationstechnische Assistenzsysteme möglich. Am häufigsten zum Einsatz kommt nach wie vor die klassische Kommissionier- bzw. Pickliste auf Papier (belegbasierte Verfahren) oder eine digitalisierte Version dieser Liste (belegloses Verfahren) auf einem MDE-Gerät, wie beispielsweise Scanner oder Tablets (Theel, 2015). Ebenso sind auch weitere beleglose Verfahren, wie beispielweise Pick-by-Light oder Pick-by-Voice in der Intralogistik mittlerweile häufig anzutreffen (Rammelmeier, 2017). Im Zuge der Digitalisierung ergeben sich noch weitere Möglichkeiten, den Order Picker kognitiv zu unterstützen (Steinebach et al., 2020b). So werden beispielsweise Datenbrillen (Pick-by-Vision) oder Projektoren (Pick-by-Projection) zur Informationsübermittlung eingesetzt – diese Technologien sind zum jetzigen Zeitpunkt jedoch vorrangig Gegenstand von Forschung und Pilotprojekten in Unternehmen und haben sich in der Praxis noch nicht entscheidend durchgesetzt (Holz et al., 2020).
Entnahmevorgänge werden meist zwecks Qualitätssicherung quittiert. Dies kann durch das Abhaken der entnommenen Position auf der Pickliste bzw. manuelle Eingabe in ein MDE, über das Scannen eines Barcodes oder automatisch mittels RFID-Technologie (Poon et al., 2009) erfolgen.
Aufgrund des untergeordneten Einflusses auf die physische Belastung der Kommissionierenden werden die Identifikations- und kognitiven Assistenzsysteme in dieser Arbeit nicht weiter analysiert.

Organisationssystem

Das Organisationssystem koordiniert und verbindet den Material- und Informationsfluss und ist damit der wesentliche Faktor zur Gewährleistung der Systemeffizienz (Siepenkort, 2013). Die Organisation legt die Strategie eines Kommissionierablaufs fest (Lolling, 2003) und wird in die Teilbereiche Aufbauorganisation, Ablauforganisation und Betriebsorganisation gegliedert (ten Hompel et al., 2011).

Im Rahmen der Aufbauorganisation wird das Lager häufig anhand der Eigenschaften der gelagerten Artikel (z. B. Zugriffshäufigkeit, Lagertemperatur, Verderblichkeit, Abmessungen, Gewicht oder Sicherheitsanforderungen) in Zonen eingeteilt. So wird zwischen einzonigen – falls keine Einteilung in

verschiedene Zonen vorgenommen wird – und mehrzonigen Lagern unterschieden. In mehrzonigen Lagern kann es vorkommen, dass unterschiedliche Kommissioniertechniken oder Arbeitsmittel (bspw. Ladehilfsmittel) für die jeweiligen Zonen verwendet werden (VDI 3590, 1994).

Die Ablauforganisation legt die operativen Prozesse bezüglich der Auftragsvergabe und die Vorgehensweise bei der Bearbeitung von Kundenaufträgen im Kommissionierlager fest. Der Ablauf der Kommissionierung wird ferner auch von der Aufbauorganisation beeinflusst (Gudehus, 2013). Zum einen wird zwischen einer auftragsorientierten und artikelorientierten Kommissionierung unterschieden. Übernimmt man den Kundenauftrag ohne Veränderung als Kommissionierauftrag, spricht man von einer auftragsorientierten Strategie. Wenn verschiedene Kundenaufträge jedoch aufgeteilt oder zusammengefasst (Batching) werden, so liegt eine artikelorientierte Bearbeitung vor (Lolling, 2003). In diesen Fall steht der Zeitersparnis durch die Nutzung von Synergieeffekten der zusätzliche Aufwand einer nachgelagerten Zusammenführung bzw. Aufsplitterung der einzelnen kommissionierten Artikel zum ursprünglichen Kundenauftrag gegenüber (Jünemann & Schmidt, 2000). Diese kundengerechte Zusammenführung findet jedoch immer häufiger mit der Hilfe von Sortier- bzw. Verteiltechnologien statt, sodass keine zusätzliche manuelle Handhabung notwendig ist (Jodin & ten Hompel, 2012). Des Weiteren differenziert man zwischen serieller und paralleler Auftragsbearbeitung. Während die Kommissionierenden bei der seriellen Variante nacheinander aus verschiedenen Lagerzonen Artikel entnehmen, werden bei der parallelen Bearbeitung individuelle Order Picker in den unterschiedlichen Zonen eingesetzt (Reif, 2009).

Schließlich bestimmt die Betriebsorganisation die zeitliche und mengenmäßige Aufteilung der einzelnen Aufträge in das Kommissioniersystem. Hierunter fallen die Auftragsveranlassung, die Auftragssteuerung und die Auftragsüberwachung (Menk, 1999) mit dem Ziel der gleichmäßigen Kapazitätsauslastung, geringen Durchlaufzeiten sowie hoher Termintreue (Lolling, 2003).

Die in diesem Unterkapitel genannten Realisierungsmöglichkeiten sind abschließend in einer morphologischen Visualisierung in Abbildung 4 zusammengefasst.

	Teilfunktion	Realisierungsmöglichkeit			
Materialflusssystem	Bereitstellung	statisch		dynamisch	
		zentral (Ware-zur-Person)		dezentral (Person-zur-Ware)	
	Bewegung des Kommissionierers zum Lagerplatz	findet nicht statt	findet statt		
			eindimensional	zweidimensional	dreidimensional
			manuell	mechanisiert	automatisiert
	Entnahme des SKU	manuell	mechanisiert	automatisiert	
	Transport der SKU zur Abgabe	findet nicht statt	findet statt		
			eindimensional	zweidimensional	dreidimensional
			manuell	mechanisiert	automatisiert
	Abgabe der SKU	statisch		dynamisch	
		zentral		dezentral	
Informations-flusssystem	Auftragserfassung	manuell	unterstützt	automatisch	
	Auftragsweitergabe	offline		online	
		beleggebunden (Pickliste, Lieferschein, Ettiket)		beleglos (mobil: pick-by-scan, -voice, -display, -vision; stationär: pick-by-light)	
	Quittierung	findet nicht statt	findet statt		
			manuell	unterstützt	automatisch
Oranisations-system	Aufbauorganisation	einzonig		mehrzonig	
	Ablauforganisation	artikelorientierte Bearbeitung		auftragsorientierte Bearbeitung	
		serielle Entnahme		parallele Entnahme	
	Betriebsorganisation	ohne Optimierung		mit Optimierung	

Abbildung 4: Morphologie der Realisierungsmöglichkeiten in einem Kommissioniersystem (vgl. Jünemann & Schmidt, 2000; Lolling, 2003; Bächler, 2017)

2.1.3 Prozessmodell der manuellen PzW-Kommissionierung

Der Prozess der Person-zur-Ware (PzW) Kommissionierung kann in verschiedene Teilschritte untergliedert werden, die unterschiedlich stark zur physischen Belastung der Kommissionierenden beitragen (siehe Kapitel 2.2). Im Folgenden soll definiert werden, wie ein Kommissioniervorgang in dieser Arbeit modelliert wird und welche Aktivitäten nicht betrachtet werden.

Ähnlich dem Materialflusssystem werden die menschlichen Tätigkeiten in verschiedene Teilprozesse untergliedert, siehe Abbildung 5.

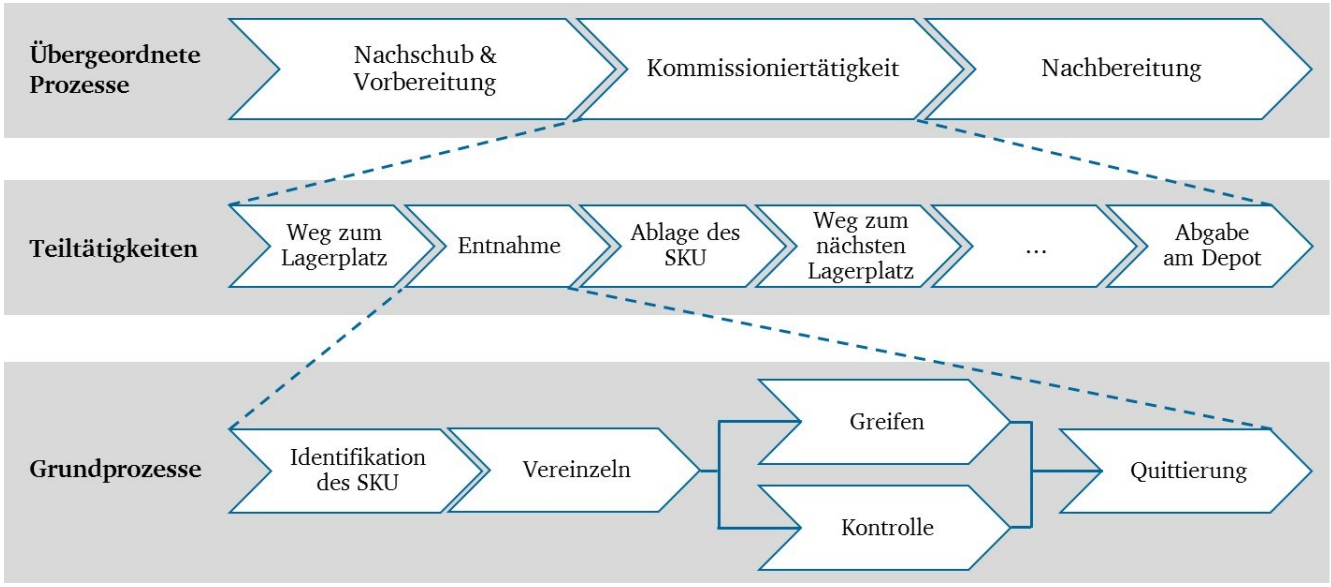


Abbildung 5: Prozessdarstellung der PzW-Kommissionierung (vgl. Günthner et al., 2009; Rammelmeier, 2017)

Grundsätzlich abgegrenzt von Kommissioniervorgängen wird der Nachschub, also das Auffüllen der Regale mit einer bestimmten Anzahl an Artikeln – es wird von einer unerschöpflichen Quelle zur Bereitstellung auf den Lagerplätzen ausgegangen (vgl. ten Hompel et al., 2011). In dieser Arbeit wird die Vorbereitung, also z. B. das Ausdrucken von Kommissionierlisten, Anmeldevorgänge im System oder die Vorbereitung von Ladehilfsmitteln (Günthner et al., 2009) nicht weiter betrachtet.

Die PzW-Kommissionierung kennzeichnet sich durch den Weg der Mitarbeitenden zu dem entsprechenden Lagerplatz, an dem die Entnahme durchgeführt wird. Der Weg kann hierbei sowohl zu Fuß (ggf. unter Mitführung eines Kommissionierwagens) als auch mit einem angetriebenen Flurförderzeug zurückgelegt werden.

Bezüglich der Entnahme werden in der hier entwickelten Lagerplatzvergabe nur Systeme mit einer Regalkommissionierung (z. B. Fachbodenregal oder Durchlaufregal) berücksichtigt, auch wenn die Ergebnisse teilweise auf weitere Systeme, wie die Kommissionierung von Paletten, übertragen werden können.

Nach der Entnahme des SKU, der gegebenenfalls eine Vereinzelung aus einer Kartonage oder Kleinladungsträgern vorausgeht, muss das SKU abgelegt werden. Hierfür kommen zwei Optionen in Frage. Zum einen können die SKU auf einem Kommissionierwagen oder Flurförderzeug in beliebiger Höhe und zum anderen direkt auf einer Fördertechnik (Pick-to-Belt) abgelegt werden. Die Entnahme und Ablage des SKU sind hierbei klassische Umsetzvorgänge im Sinne der manuellen Lastenhandhabung (Schaub et al., 2013). Je nach Lagerplatz des SKU muss sich zum Greifen des SKU nach oben gestreckt oder nach unten gebückt werden. Eine genaue Betrachtung der Belastungsfälle folgt in Kapitel 2.2.2.

2.1.4 Kennzahlen der menschlichen Kommissionierleistung

Verschiedene wissenschaftliche Disziplinen definieren den Begriff der Leistung auf unterschiedliche Art und Weise. Die Physik versteht die Leistung als die verrichtete mechanische Arbeit (Kraft × Strecke) pro Zeiteinheit (Bühner, 2000). In der manuellen Kommissionierung wären demnach beispielsweise die zurückgelegten Wegstrecken sowie die bewegten Massen innerhalb eines bestimmten Zeitfensters zu bewerten (Siepenkort, 2013).

Die Betriebswirtschaft hingegen definiert die Leistung als die Ausbringungsmenge von Gütern oder Dienstleistungen aus dem Produktions- bzw. Dienstleistungsprozess eines Unternehmens (Peters et al., 2010). Analog dazu beschreibt die Kommissionierleistung in der Literatur zur Intralogistik klassischerweise die Anzahl an Positionen, die Mitarbeitende pro Zeiteinheit bearbeiten (Gudehus, 2013; VDI 4400-3, 2002). Unterschieden wird die Kommissionierleistung von der Pickleistung, die sich auf die tatsächlich physisch durchgeführten Greifvorgänge bezieht (Günthner et al., 2009).

In dieser Dissertation soll jedoch die *menschliche* Kommissionierleistung definiert werden. Die erbringbare menschliche Leistung und damit die Arbeitsfähigkeit in einem Logistiksystem ist stark abhängig von den individuellen Kapazitäten der Mitarbeitenden (Ilmarinen & Tempel, 2002). Die Kapazität ist nach DIN EN 14943 (2005) definiert als die „*Leistungsfähigkeit einer Ressource innerhalb einer vorgegebenen Zeit*“ und wird „*anhand von Qualität und Menge*“ bewertet.

Aus diesem Grund reicht es zur Bewertung der menschlichen Leistung nicht aus, ausschließlich die kommissionierte Menge der Mitarbeitenden zu bewerten. Neben der Quantität bzw. Kommissionierzeit muss deshalb auch die Qualität (Anzahl bzw. Anteil an Kommissionierfehlern) betrachtet werden, um den Grad der Aufgabenerfüllung adäquat beurteilen zu können (Siepenkort, 2013; Gerpott & Kurt, 2020).

Diese beiden Dimensionen der menschlichen Leistung in manuellen PzW-Kommissioniersystemen werden im Folgenden detaillierter erläutert.

Kommissionierzeit

Die Kommissionierzeit teilt sich in PzW-Systemen auf vier voneinander unterscheidbare Anteile auf (von Borries, 1975):

- Basiszeit
- Wegzeit
- Greifzeit
- Totzeit

In der Basiszeit halten sich die Kommissionierenden vor und nach einer Kommissioniertour am Depot auf. Hier werden Waren abgegeben, neue Aufträge übernommen und ggf. leere Kommissionierbehälter

auf dem Wagen platziert. Aus diesem Grund spricht man bei diesem Zeitanteil häufig auch von der Aufrüstzeit (Gudehus, 2013).

Der Zeitbedarf für die Bewegungen der Kommissionierenden durch das Lager vom Depot zu den jeweiligen Lagerplätzen und zurück zum Abgabeort wird Wegzeit genannt. Sie ist der zeitintensivste Teil der PzW-Kommissionierung und nimmt etwa 40 – 55 % der gesamten Kommissionierzeit ein (siehe Abbildung 6). Entscheidend beeinflusst wird die Wegzeit durch Organisationselemente wie die Lagerplatzvergabe und damit korrespondierende Routing-Strategien. Weiterhin kann die Wegstrecke durch WMS-optimierte Entnahmereihenfolgen minimiert und damit auch die hierfür benötigte Zeit reduziert werden. Schließlich hängt die Wegzeit auch von der Bewegungsgeschwindigkeit des Kommissionierenden ab, die zu Fuß zwischen 0,7 und 1,4 m/s liegt und beim Fahren eines Kommissionierfahrzeugs auf bis zu 2,5 m/s erhöht werden kann (Vogt, 1997).

Während der Greifzeit werden alle physischen Vorgänge, vom Hinlangen und der Entnahme eines SKU aus dem Regal bis zur Ablage auf dem Kommissionierwagen oder der Fördertechnik, durchgeführt. Hierbei handelt es sich demnach um die eigentliche wertschöpfende Tätigkeit in der Kommissionierung. Pro Entnahmeeinheit werden zwischen 2 und 10 Sekunden Zeit benötigt (Gudehus, 2013). Benötigte Hilfsbewegungen, wie z. B. das Bücken zu unteren Lagerfächern werden hierbei in die Greifzeit inkludiert (Galka & Günthner, 2016). Die Greifzeit hängt von räumlichen Einflussfaktoren, wie z. B. den Greifhöhen, Greiftiefen und Ablageentfernungen sowie von Artikeleigenschaften, wie dem Gewicht, Volumen und den Greifbedingungen (z. B. Griffe) ab (Gudehus, 2012). Überdies können die Geschicklichkeit und die physiologischen Voraussetzungen der Mitarbeitenden eine Rolle spielen (Martin, 2009).

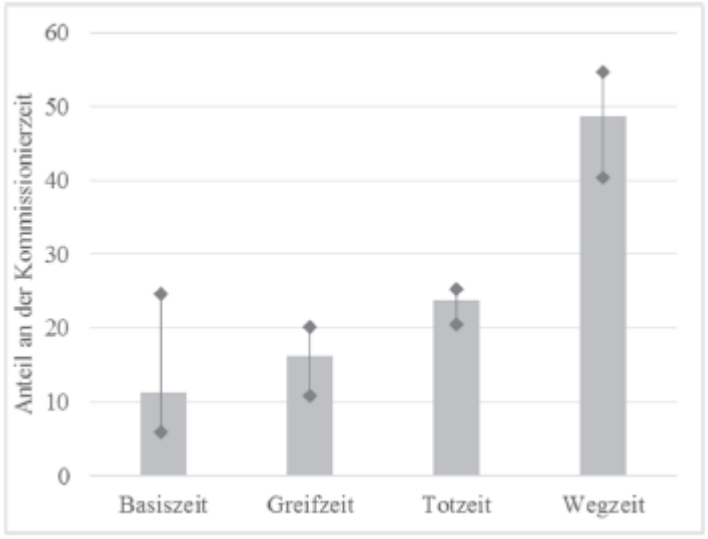


Abbildung 6: Verteilung und Mittelwert der Zeitanteile in PzW-Systemen (Galka & Günthner, 2016)

Die Totzeit umfasst schließlich alle Vorgänge, die neben der physischen Entnahme eines SKU am Entnahmeort zu bewältigen sind (Arnold & Furmans, 2005). Hierunter fallen u. a. das Lesen der Lagerplatzbeschriftung, das Suchen und Identifizieren sowie das Quittieren der Entnahme. Die Totzeit resultiert somit maßgeblich aus informatorischen Prozessen und kann deshalb durch die Implementierung adäquater informationstechnischer Hilfsmittel reduziert werden (Rammelmeier, 2017; Steinebach et al., 2020b).

Da je Kommissionierauftrag die Basiszeit nur einmal, die anderen drei Anteile jedoch je Artikel i auftreten, berechnet sich die Kommissionierzeit für einen Auftrag mit n Artikeln zu (Reif, 2009):

$$Kommissionierzeit = Basiszeit + \sum_{i=1}^{n} (Wegzeit_i + Greifzeit_i + Totzeit_i)$$

Die Zeit, die benötigt wird, um einen oder eine bestimmte Menge an Kommissionieraufträgen abzuschließen, wird häufig auch Durchlaufzeit genannt (z. B. ten Hompel et al., 2011). Die Kommissionierzeit kann schließlich mithilfe von Stundenlöhnen der Mitarbeitenden, Lagerflächen- und Energiekosten proportional in den Gesamtkosten des Lagers berücksichtigt werden (Calzavara et al., 2017a).

Kommissionierqualität

Die Erfüllung eines hohen Qualitätsstandards ist neben einer zeiteffizienten Kommissionierung von hoher Bedeutung, um auf dem Markt bestehen zu können (Mackowiak & Goldscheid, 2005). Unter Qualität versteht man den „*Grad, in dem ein Satz inhärenter Merkmale Anforderungen erfüllt*“ (DIN EN ISO 9000, 2015). Diese ist in der Kommissionierung dann erfüllt, wenn die richtigen Artikel in der richtigen Menge und im richtigen Zustand gesammelt werden (Menk, 1999). Lolling (2003) beschreibt die menschliche Zuverlässigkeit als Voraussetzung zur Erfüllung hoher Qualität. Hierbei handelt es sich um die Fähigkeit des Menschen, eine Aufgabe unter vorgegebenen Bedingungen für ein gegebenes Zeitintervall im Akzeptanzbereich durchzuführen (VDI 4006-1, 2002). Menschliche Fehlhandlungen sind im Gegensatz dazu eine Nicht-Erfüllung der Qualitätsanforderung, wie z. B. das Kommissionieren von falschen Artikeln oder in einer nicht korrekten Menge (Lolling, 2002a).

In der Praxis hat sich eine Kategorisierung in vier verschiedene Fehlertypen durchgesetzt, die anhand direkt sichtbarer Kriterien unterschieden werden können (Lolling, 2003), siehe Abbildung 7.

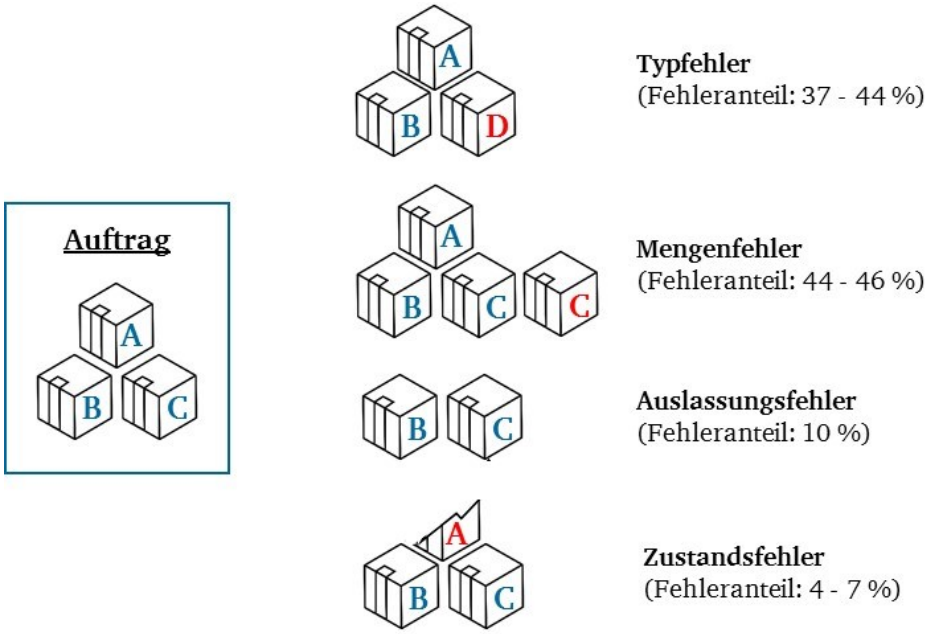


Abbildung 7: Arten und Anteil von Kommissionierfehlern (vgl. Lolling, 2002a; Dullinger, 2005)

Von Typfehlern spricht man, wenn die Order Picker ein falsches SKU zusätzlich oder anstatt des SKU auf der Pickliste greift. Mengenfehler hingegen liegen vor, falls der richtige Artikel in zu hoher oder zu niedriger Anzahl kommissioniert wird. Bei einem Auslassungsfehler wird eine komplette Position eines Auftrags übersprungen und entsprechend nicht kommissioniert. Ein Zustandsfehler entsteht bei einer fehlerhaften oder fehlenden Verrichtung an einem SKU – es resultieren beschädigte Artikel, falsche Verpackungsmaterialien oder fehlerhafte Etikettierungen (Rammelmeier, 2017).

Als wesentlicher Faktor zur Fehlerentstehung in der manuellen Kommissionierung wird neben Arbeits- und Umgebungsbedingungen nach wie vor der Mensch identifiziert (Lolling, 2002a; Franzke, 2018). Dieser kann sich abhängig von seiner Motivation sowie seinen Fähigkeiten und Fertigkeiten bspw. verzählen oder verlesen. Verschärft wird diese Problematik durch den häufigen Einsatz – insbesondere bei Unternehmen mit Saisongeschäft – von ungenügend ausgebildeten Mitarbeitenden bzw. in der Kommissionierung unerfahrenen Leiharbeitenden (Dangelmeier et al., 2005). Der Zusammenhang zwischen der Arbeitsqualität und ergonomischen Gegebenheiten wurde zwar in anderen Branchen des Öfteren nachgewiesen (z. B. Neubert, 2013; Fritzsche et al., 2014; Eklund, 1995), ist in der manuellen Kommissionierung bisher jedoch weitgehend unerforscht.

Kommissionierfehler können hohe Kosten verursachen. Die Kostenhöhe hängt hierbei vor allem vom Zeitpunkt der Fehlerentdeckung ab (Crostack & Deuse, 2007). Wenn ein Fehler unternehmensintern bemerkt wird, entstehen lediglich Kosten durch den zusätzlichen Zeitaufwand bei der Fehlerbehebung. Schätzungen zufolge werden etwa 5 % der Kommissionierzeit zur Fehlerbehebung verwendet (Nave, 2009). Wird der Fehler jedoch erst vom Kunden entdeckt, können Garantie- oder Retourkosten anfallen,

welche zusätzlich auch die Reputation des Unternehmens gefährden. Wenn ein Typfehler auch beim Kunden nicht bemerkt wird und bspw. falsche Teile in Maschinen verbaut werden, können zusätzlich Sach- oder Personenschäden entstehen.
Allgemeines Ziel ist es deshalb, das Auftreten von Pick- oder Kommissionierfehlern zu reduzieren. Dieses Ziel wird mithilfe der Kennzahl „Fehlerquote“ (synonym auch Fehlerrate) beschrieben und in den meisten Unternehmen durch eine relative Fehlerhäufigkeit ausgedrückt (Mackowiak & Goldscheid, 2005). Die Fehlerquote kann sich auf ganze Kommissionieraufträge oder einzelne Positionen beziehen, wobei in dieser Arbeit letztere Bezugsgröße gewählt wird (vgl. Reif, 2009; Rammelmeier, 2017):

$$Fehlerquote\ [\%] = \frac{Anzahl\ fehlerhaft\ kommissionierter\ Positionen}{Anzahl\ aller\ kommissionierten\ Positionen} * 100\ \%$$

In der Praxis typische Fehlerquoten sind von der Branche und den eingesetzten technologischen Assistenzsystemen abhängig (Steinebach et al., 2020b). Durchschnittliche Angaben zur Fehlerquote unterscheiden sich deshalb stark und liegen zwischen 0,01 und 3,0 % (Marvel et al., 2001; Lolling, 2002b; Lolling, 2003; Günthner et al., 2009). Teilweise wird versucht, die Kommissionierfehler mittels zeitintensiven, nachgeschalteten Kontrollprozessen zu minimieren (Grosse et al., 2016). So können beispielsweise Kontrollnummern abgeglichen, Barcodes gescannt oder die kommissionierten Artikel gewogen werden, wobei die sogenannte „Null-Fehler-Kommissionierung“ in manuellen Systemen dennoch aktuell nicht erreichbar ist (Gudehus, 2013).

2.2 Belastungsbewertung in der Kommissionierung

In diesem Kapitel sollen zunächst grundlegende Begriffe der Ergonomie definiert werden. Anschließend werden die in der manuellen Kommissionierung auftretenden physischen Belastungsarten aufgezeigt und potentielle Schwerpunkte bzw. Belastungsengpässe identifiziert. Verschiedene Einflussfaktoren auf die Belastung werden diskutiert. Ferner werden Verfahren vorgestellt, mit denen sich physische Belastungen erfassen und bewerten lassen und inwiefern sich diese für eine Anwendung in der manuellen Kommissionierung eignen.

2.2.1 Grundlegende Begriffe

Ergonomie

Der Begriff Ergonomie setzt sich aus den griechischen Wörtern „ergon“ für Arbeit und „nomos“ für Gesetz zusammen und wird nach DIN EN ISO 26800 (2011) definiert als:

„Wissenschaftliche Disziplin, die sich mit dem Verständnis der Wechselwirkungen zwischen menschlichen und anderen Elementen eines Systems befasst, […] mit dem Ziel, das Wohlbefinden des Menschen und die Leistung des Gesamtsystems zu optimieren."

Somit ist die Ergonomie nicht nur ein entscheidendes Gestaltungswerkzeug für die Arbeitssicherheit, sondern fördert auch das ökonomische Ergebnis eines Arbeitssystems (Pulverich, 2009). Im Gegensatz zur Arbeitswissenschaft werden jedoch soziale und gesellschaftliche Gesichtspunkte menschlicher Arbeit und der Einfluss der Betriebsorganisation in der Ergonomie nicht berücksichtigt (Laurig, 1992). Im internationalen Kontext werden Ergonomie (Ergonomics) und Human Factors häufig synonym verwendet (IEA, 2020).

Physische Belastungen

Physische Belastungen werden in der Arbeitswissenschaft definiert als die „*Gesamtheit der äußeren Bedingungen und Anforderungen im Arbeitssystem, die auf den physiologischen […] Zustand einer Person einwirken*" (DIN EN ISO 6385, 2016). Zum Erhalt der Gesundheit sind physische Belastungen einerseits unerlässlich, andererseits können sehr hohe Belastungen zu Muskel-Skelett-Erkrankungen führen (Steinberg, 2012). Ziel der Arbeitsgestaltung ist es demnach, ein optimales Verhältnis zwischen der Belastung und der individuellen Belastbarkeit zu finden und damit Unter- bzw. Überforderung zu vermeiden (BAuA, 2019b).

Die Gesamtbelastung setzt sich aus Teilbelastungen zusammen, welche sich über die Belastungshöhe und die Belastungsdauer charakterisieren lassen. Diese Teilbelastungen können gleichzeitig oder zeitlich versetzt auftreten (Schlick et al., 2018). Sie untergliedern sich in aufgabenspezifische und situationsspezifische Anteile. Aufgabenspezifische Belastungen ergeben sich aus der Tätigkeit der Mitarbeitenden und können entsprechend je nach Aufgabenart energetischer oder informatorischer Natur sein (Laurig, 1992). Energetische Belastungen erfordern von Mitarbeitenden das Aufbringen von Kräften und stehen im Fokus dieser Arbeit (siehe Kapitel 2.2.2).

Situationsbezogene Belastungen hingegen resultieren aus der physikalischen (z. B. Beleuchtung, Klima, Lärm), chemischen (z. B. Gefahrstoffe) und sozialen (z. B. Betriebsklima) Arbeitsumgebung und spielen in dieser Dissertation eine untergeordnete Rolle (Laurig, 1992; Schlick et al., 2018).

Belastungs-Beanspruchungs-Konzept

Analog zur technischen Mechanik lassen sich auch in der Arbeitswissenschaft Belastungen und Beanspruchungen in einen Ursache-Wirkungs-Zusammenhang bringen. In der Mechanik wird eine Kraft, die von außen auf ein Bauteil wirkt, als Belastung bezeichnet. Unter der Beanspruchung versteht man schließlich die innere Spannung im Bauteil, welche je nach der wirkenden Kraft, den Werkstoffeigenschaften und der Geometrie des Bauteils variiert (Rohmert, 1984; Schlick et al., 2018).

Dieser Grundgedanke lässt sich in den arbeitswissenschaftlichen Kontext übertragen. Belastungen rufen in der Arbeitsperson abhängig von den Eigenschaften, Fähigkeiten, Fertigkeiten und Bedürfnissen des Menschen individuelle Beanspruchungen hervor, siehe Abbildung 8. Die gleiche objektive Belastungsintensität und –dauer kann deshalb bei Individuen mit variierenden Eigenschaften zu unterschiedlicher Beanspruchung führen (Schlick et al., 2018).

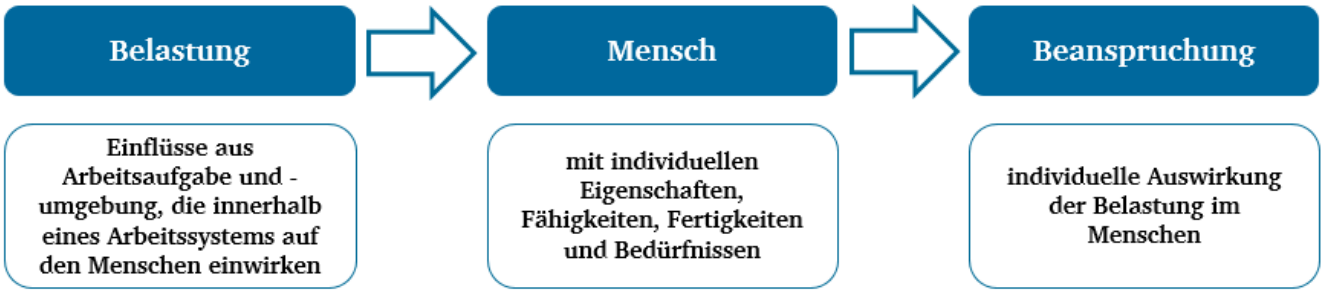


Abbildung 8: Vereinfachtes Belastungs-Beanspruchungs-Konzept nach Rohmert (vgl. Rohmert, 1984)

Darüber hinaus gibt Rohmert (1984) in einem erweiterten Belastungs-Beanspruchungs-Konzept eine detailliertere Einsicht in die oben beschriebenen Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge (siehe Anhang A). Dieses Modell erklärt, dass die Beanspruchung auch von den durchgeführten Handlungen (determiniert durch Fähigkeiten und Fertigkeiten bzw. die Handlungskompetenz) und den hierdurch erbrachten Leistungen des Menschen abhängt (Schlick et al., 2018). Je nach Intensität der Beanspruchung kann es bei Überschreiten der Dauerleistungsgrenze zu positiven (Training, Erfahrung) oder zu negativen (Ermüdung, Schädigung bei Überschreiten der Schädigungsgrenze) Folgeeffekten kommen (Rohmert, 1988). Die Folgen beeinflussen in diesem Modell über eine Rückkopplung die Eigenschaften und Fähigkeiten des Menschen (Rohmert, 1984).
Da Belastungen spezifisch auf bestimmte Organsysteme einwirken können, unterscheidet man ebenso zwischen Teilbeanspruchgen dieser einzelnen Systeme. Beispiele hierfür sind Teilbeanspruchungen von Skelett, Sehnen, Bändern, Muskeln, dem Zentralnervensystem, der Atmung sowie dem Herz-Kreislaufsystem (Kirchner, 1986; Schlick et al., 2018).

2.2.2 Physische Belastungen in der manuellen Kommissionierung

In der manuellen Kommissionierung treten energetische und informatorische Belastungen im Regelfall kombiniert auf. Obwohl informatorische Belastungen und Beanspruchungen wie z. B. Zeitdruck oder Monotonie, durchaus eine nicht zu unterschätzende Rolle spielen (Rinkenauer et al., 2017), wird sich in dieser Arbeit nur mit körperlichen Belastungen beschäftigt.

Wie eingangs erwähnt entstehen durch die hohen physischen Belastungen im Lager Gesundheitsrisiken und damit hohe volkswirtschaftliche Schäden (Lavender et al., 2010). Deshalb lohnt es sich, die in der Kommissionierung auftretenden Belastungen genauer zu analysieren, um diese durch entsprechende Gestaltungsmaßnahmen gezielt reduzieren zu können.

Im Folgenden werden analog zu typischen Screening-Verfahren zur Belastungsbewertung vier Arten der körperlichen Belastung unterschieden (Schaub et al., 2013) und sukzessive im Kontext der Kommissionierung bewertet: statische Körperhaltungen, Aktionskräfte, manuelle Lastenhandhabung und die Belastung der oberen Extremitäten durch repetitive Tätigkeiten, siehe Abbildung 9. Auch wenn eine genaue Bewertung dieser Belastungen nur dann möglich ist, wenn exakte Informationen über die Umsetzung des Materialflusses, die durchgeführten Prozesse und eingesetzten Technologien vorliegen, lassen sich bestimmte Annahmen allgemeingültig festhalten.

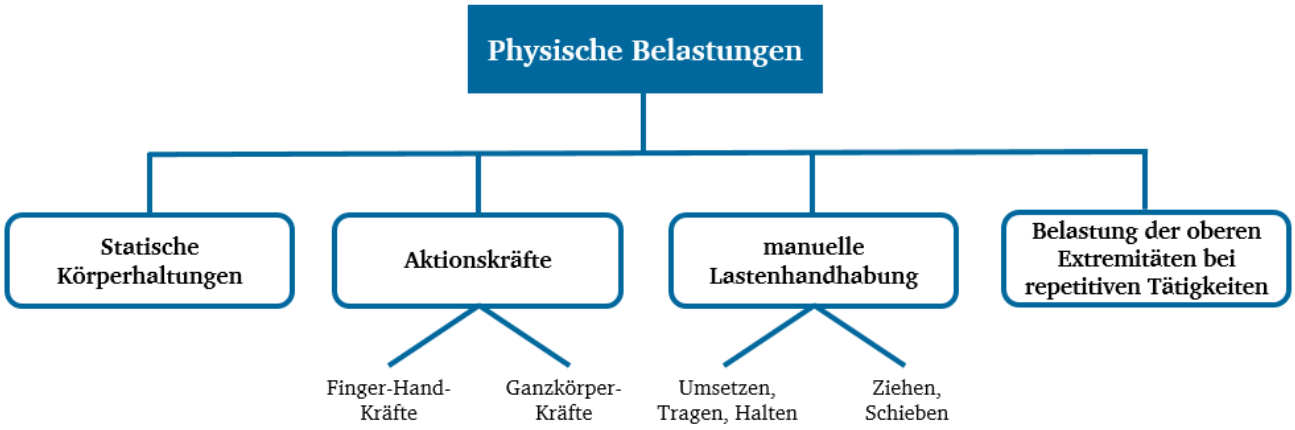


Abbildung 9: Gliederungsschema der Belastungsarten (eigene Darstellung in Anlehnung an Schaub et al., 2013)

Körperlichen Belastungen in der manuellen Kommissionierung

Statische Körperhaltungen oder Zwangshaltungen – per Definition mindestens 4 Sekunden andauernd und ohne Lasten > 3 kg (DIN EN 1005-1, 2009) – kommen in der manuellen PzW-Kommissionierung eher selten vor. Die Kommissionierenden sind meist in Bewegung und die einzelnen Pick-Vorgänge sind durch dynamische Vorgehensweise geprägt. In Einzelfällen können statische Köperhaltungen (≥ 4 s) vorkommen – beispielsweise, wenn Beschäftigte sich in ein Regal hineinbeugen, um Artikel zu identifizieren oder aus einem Gebinde zu vereinzeln. Der Einfluss auf die Gesamtbelastung ist jedoch relativ gering (Steinebach et al., 2020c), sodass statische Körperhaltungen in Bezug auf die zu entwickelnde Lagerplatzvergabestrategie nicht genauer beleuchtet werden. Nicht zu verwechseln sind die statischen Körperhaltungen mit jenen Körperhaltungen während der manuellen Lasthandhabung, welche von großer Bedeutung für die Belastungshöhe in der Kommissionierung sind.

Ebenso spielen Aktionskräfte in der manuellen Kommissionierung eine untergeordnete Rolle. Unter einer Aktionskraft versteht man „*eine Körperkraft, die nach außen vom Körper aus wirkt*“ (Wakula et al., 2009) und wird in der Regel ab einer ausgeübten Kraft von 30 N in Bewertungsverfahren berücksichtigt (Schaub et al., 2013). Diese Grenze wird häufig überschritten, wenn Waren gehandhabt oder technische Hilfsmittel (z. B. Handwagen) bewegt werden. Diese Tätigkeiten werden allerdings der Belastungsart „manuelle Lastenhandhabung“ zugeordnet. Das Aufbringen von Aktionskräften des Ganzkörpersystems auf einen sich nicht bewegenden Kraftangriffspunkt bzw. von höheren Finger-Hand-Kräften ist in der manuellen Kommissionierung hingegen selten vonnöten.

Die manuelle Handhabung von Lasten ist in Kommissioniersystemen allgegenwärtig und die entscheidende physische Belastungsart. So stellen Jäger et al. (2002) fest, dass „*bei logistischen Problemstellungen wie dem Kommissionieren von Waren […] manuelle Lastenhandhabungen unvermeidbar*“ sind.

Das Spektrum an Tätigkeiten in der Kommissionierung ist von Unternehmen zu Unternehmen unterschiedlich. Überwiegend kommt es jedoch zu einer Vielzahl von Hebe- bzw. Umsetzvorgängen von SKU, beispielsweise das Umsetzen eines Artikels aus einem Regal bzw. von einer Palette auf einen Handwagen. Das hierfür notwendige Heben bzw. Senken von teilweise hohen Lastgewichten tritt häufig unter Einnahme von ungünstigen Körperhaltungen auf. Nach einer Studie von Lavender et al. (2010) befinden sich je ein Drittel aller gehandhabten Lasten in einem Distributionszentrum für Lebensmittel in Regalbereichen über Schulterhöhe bzw. unter Kniehöhe. Hierdurch kommt es zwangsläufig zum Heben aus sehr tiefen Regalebenen und einer damit verbundenen Rumpfbeugung bzw. zu Überkopfarbeit in höheren Regalebenen (Steinebach et al., 2021a). Je nach Ausführung kann es zusätzlich zu einer unsymmetrischen Lastenhandhabung kommen – typisch sind eine seitliche Rumpfneigung oder eine Verdrehung des Rumpfes bei der Lastaufnahme bzw. -abgabe (Goldscheid, 2008). Diese Körperhaltungen führen zu hohen biomechanischen Belastungen (Jäger et al., 2002).

Die zu kommissionierenden SKU haben ebenfalls einen großen Einfluss auf die auftretende physische Belastung durch die manuelle Lastenhandhabung. Entscheidende Charakteristika einer Last sind die Form, die Größe und das Lastgewicht (Mital et al., 1993). Diese Eigenschaften sind in der Praxis sehr variabel. Es kommt beispielsweise vor, dass im Versandhandel „*aus einem Sortiment von 35.000 Artikeln von 50 g bis 50 kg und Abmessungen von 50 x 50 x 50 mm bis 5000 x 100 x 100 mm 80.000 Positionen mit 200.000 Entnahmeeinheiten pro Tag kommissioniert werden*“ (Reif, 2009). Auch wenn das Lastgewicht den größten Einfluss auf die Belastung ausübt (Mital et al., 1993), kann gegebenenfalls auch die Form der Verpackung, Greifbedingungen und die Fragilität der Artikel eine Rolle spielen. Boysen et al. (2015) nennen beispielhaft Windschutzscheiben in der Automobilindustrie, welche

aufgrund ihrer unhandlichen Form zusätzlichen muskulären Aufwand zur Stabilisierung der Last erfordern.
Ebenso entscheidet die Anzahl der Lasthandhabungsvorgänge über das Ausmaß der körperlichen Belastung. Die Häufigkeit der Lasthandhabung einzelner Beschäftigter variiert in der Praxis zwischen verschiedenen Lagern und Technologien zwischen 12 und 480 Picks/h stark (Marras et al., 2010).
Insgesamt wird ersichtlich, dass bei der Entwicklung eines Konzepts einer ergonomischen LPV vor allem Umsetz- bzw. Hebevorgänge berücksichtigt werden müssen. Im Gegensatz dazu kommt ein „Tragen“ (> 5 m) oder „Halten“ (> 5s) von Artikeln nur in sehr seltenen Fällen vor und kann für die meisten Arbeitsplätze in der PzW-Kommissionierung vernachlässigt werden (Walch, 2011, S. 96).
Zur manuellen Lastenhandhabung zählen überdies die Unterkategorien Ziehen und Schieben. Diese werden in verschiedenen Belastungsbewertungsverfahren noch in Abhängigkeit der Distanz in kurze und lange Zieh- und Schiebevorgänge untergliedert (z. B. Multiple-Lasten-Tool; Schaub et al., 2012). Beide Formen sind in der manuellen Kommissionierung anzutreffen. Beim Bewegen von der Basis zum Lagerplatz, zwischen einzelnen Lagerplätzen bzw. auf dem Rückweg zum Depot werden häufig Hand-/Kommissionierwagen eingesetzt, um den Transport der Lastgewichte zu erleichtern. Die benötigten Kräfte zum Schieben dieser Wagen können jedoch bei voller Beladung relativ hoch sein – insbesondere die sogenannten „Losreißkräfte“ zur Überwindung der Massenträgheit sind hierbei zu erwähnen und wirken sich als biomechanische Belastung aus (Jung et al., 2005; Jäger et al., 2001b). Bei längeren Zieh- bzw. Schiebetätigkeiten hingegen überwiegen gegebenenfalls energetische Belastungen (DGUV, 2020).
Die Belastungen durch Ziehen bzw. Schieben entfallen jedoch in vielen Kommissioniersystemen. Oft werden die benötigten Kräfte durch technisches Equipment übernommen. So werden häufig mechanisch angetriebene Kommissionier- bzw. Hubwagen, Flurförderzeuge sowie Hoch- bzw. Niederhubkommissionierer eingesetzt. Ebenso ist in einem Pick-to-Belt Ansatz (direktes Ablegen der Last auf einem Förderband) kein Ziehen und Schieben von Lasten notwendig. In den genannten Fällen müssen die Kommissionierenden lediglich den Umsetzvorgang aus eigener Muskelkraft bewerkstelligen – die benötigte mechanische Arbeit für den innerbetrieblichen Transport übernimmt die technische Einrichtung.

Die vierte zu berücksichtigende Kategorie sind Belastungen der oberen Extremitäten durch repetitive Tätigkeiten. Die Definition von repetitiven Tätigkeiten ist nicht einheitlich. Allgemein kann jedoch angenommen werden, dass eine Tätigkeit nur dann repetitiv ist, wenn die Zykluszeit einer wiederkehrenden Aufgabe kürzer als 30 Sekunden ist (Silverstein et al., 1986; Kuhlang et al., 2015). Einige Quellen gehen auch von bedeutend geringeren Zykluszeiten aus, z. B. Colombini et al. (2005) oder Hansson et al. (1996). Wenn ein Entnahme- und Ablagevorgang des SKU inklusive des Ortswechsels zum nächsten Lagerplatz als Zyklus beschrieben wird, so können repetitive Tätigkeiten bei reiner Betrachtung der Zykluszeit von 30 Sekunden ab etwa 120 Picks/h grundsätzlich auftreten. Jedoch sind

die entsprechenden Bewegungen nicht immer gleichförmig wiederkehrend – je nach Lagerplatz und Artikel entstehen unterschiedliche Bewegungsmuster. Zur Bewertung der Repetition ist ebenso die Anzahl an technischen Aktionen je Zeiteinheit (Colombini, 2002) zu berücksichtigen, welche (inklusive zusätzlichen Tätigkeiten wie dem Scannen der Artikel) in der PzW-Kommissionierung relativ niedrig ist. Die Belastung der oberen Extremitäten durch Repetition in der PzW-Kommissionierung ist somit insgesamt als eher gering einzustufen, sollte aber im konkreten Fall immer überprüft werden.
Gänzlich anders zu bewerten ist hingegen die WzP-Kommissionierung. Hier sind die Zykluszeiten sehr viel kürzer, die Bewegungsmuster einheitlicher, und die Anzahl an technischen Aktionen je Zeiteinheit höher, sodass hier sehr wohl mit Belastungen der oberen Extremitäten durch Repetition zu rechnen ist.

Gesundheitliche Folgen dieser Belastungen für die Beschäftigten

Fraglich ist jedoch, wie sich die oben beschriebenen Belastungen auf den Menschen auswirken. Grundsätzlich ist es schwierig, einen direkten Zusammenhang zwischen der Belastungsdosis und den entsprechenden Folgen aus gesundheitlicher Sicht für die Mitarbeitenden oder aus finanzieller Sicht für das Unternehmen abzuleiten (Landau, 2002). Fehlzeiten hängen beispielsweise mit zahlreichen weiteren Faktoren zusammen, wie mit sozialen Komponenten oder Freizeitbeschäftigungen und nicht ausschließlich mit der Belastungssituation am Arbeitsplatz (Schmidt et al., 2005).
Dennoch stehen einige Untersuchungen zur Verfügung, die diese Zusammenhänge – auch in der Kommissionierung – analysiert haben. Grundsätzlich bergen Tätigkeiten mit hohen physischen Belastungen, die über einen längeren Zeitraum ausgeübt werden, ein Schädigungsrisiko (Waters et al., 1998; Schaub & Landau, 2004). Während Herz-Kreislauf-Belastungen sich meist lediglich durch Ermüdung äußern, welche sich durch Erholungspausen beheben lassen, können biomechanische Belastungen zu irreversiblen Schäden führen (Mackowiak & Goldscheid, 2005). Gerade bei Kommissioniertätigkeiten sollte mit Blick auf die vorliegenden biomechanischen Belastungen durch die manuelle Lastenhandhabung „*insbesondere die mechanische Belastung der Lendenwirbelsäule erfasst und hinsichtlich möglicher Überbelastung beurteilt werden, da […] eine erhöhte Erkrankungshäufigkeit im Rückenbereich vorliegt*“ (Jäger et al., 2002). Ebenso stellen Gajšek et al. (2020) sowie Kretschmer et al. (2021) fest, dass Rückenschmerzen im Bereich der Lendenwirbelsäule (lower back pain) die häufigste Ursache für gesundheitliche Beschwerden in der manuellen Kommissionierung sind. Vor allem im Vergleich mit anderen Berufsgruppen in der Intralogistik, wie z. B. Staplerfahrern, haben Kommissionierende deutlich häufiger mit Beschwerden der Wirbelsäule zu kämpfen. In einer entsprechenden Untersuchung mit 221 Befragten zeigt sich, dass nur 6 % der Kommissionierenden nie unter Rückenschmerzen leiden (Gajšek et al., 2020). Eine ältere Studie kommt zu ähnlichen Ergebnissen – hier berichten 47 % der Beschäftigten von dauerhaften Beschwerden im unteren Rückenbereich, welche aus Sicht der Beschäftigten durch die Kommissioniertätigkeiten ausgelöst werden (Wright &

Haslam, 1999). Die im Alter reduzierte Belastbarkeit der Wirbelsäule ist insbesondere im Hinblick auf den demographischen Wandel eine zusätzliche Herausforderung (Jäger et al., 2001a).
Zugleich scheinen im Vergleich mit anderen Berufsgruppen Erkrankungen der Wirbelsäule gerade im Lagerbereich besonders häufig vorzukommen. Unter allen analysierten Berufsgruppen ist die Anzahl der Arbeitsunfähigkeitstage (AU) aufgrund von Rückenbeschwerden im Vergleich mit Beschäftigten im „Verkehrs- und Lagerbereich“ (273 AU-Tage auf 100 Versicherungsjahre) nur bei Metallverarbeitungsberufen noch höher (277 AU-Tage auf 100 Versicherungsjahre). Der Durchschnitt über alle Berufsgruppen liegt lediglich bei 129 AU-Tagen je 100 Versicherungsjahre (Techniker Krankenkasse, 2020).
Entsprechend scheint die biomechanische Belastung in der Kommissionierung, insbesondere diejenige der Lendenwirbelsäule, das höchste Schädigungspotential zu besitzen und wird in dieser Arbeit (siehe Kapitel 3) im Sinne des „Engpassprinzips“ (z. B. Hecktor et al., 2014) als entscheidende Größe für die Belastungsbewertung herangezogen (vgl. Jäger et al., 2002; Goldscheid, 2008).

Unternehmerische Folgen der Belastungen

Die Betrachtung von ergonomischen Maßnahmen nur aus Sicht der Gesundheits-Dimension greift jedoch zu kurz – vielmehr müssen diese immer auch im Kontext der Systemleistung analysiert werden, sodass eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung erfolgen sollte (Neuman & Dul., 2010). Eine exakte Aufschlüsselung von Belastungsfolgen auf unternehmerische Ergebnisse ist allerdings sehr schwierig, da einige Effekte von Belastungsreduzierungen durch ergonomische Maßnahmen (z. B. Senkung der Kosten durch geringere Ermüdung der Beschäftigten) sehr schwer kausal nachweisbar sind (Schultetus, 2005).
Es wird versucht, diese Nachweise z. B. volkswirtschaftlich durch die Dokumentation der zuvor erwähnten Ausfallzeiten der Mitarbeitenden und den daraus entstehenden Produktivitätsausfällen zu erbringen. Die jährlichen Kosten durch krankheitsbedingte Arbeitsunfähigkeit und damit der Reduzierung der Arbeitsproduktivität in deutschen Unternehmen summieren sich auf etwa 85 Mrd. Euro (BAuA, 2020). Wie bereits aufgezeigt, entfällt ein Großteil dieser Fehlzeiten auf Muskel-Skelett-Erkrankungen und insbesondere auf Schädigungen der Lendenwirbelsäule.
Anhand der Literatur lassen sich jedoch auch Folgen von Maßnahmen zur Belastungsreduzierung im unternehmerischen Kontext aufzeigen. In einem Großteil der untersuchten Fälle konnte durch die Berücksichtigung von Human Factors eine Verbesserung der Prozessleistung nachgewiesen werden (Neuman & Dul, 2010). Neben der Reduzierung von Kommissionierzeiten können dies auch qualitative Verbesserungen sein, wie beispielweise die Reduzierung von Pickfehlern beim Kommissionieren, ausgelöst durch geringere körperliche Belastung (vgl. Menk, 1999; Battini et al., 2016). Ungünstige ergonomische Bedingungen und hohe körperliche Belastungen können zudem zu Motivationsdefiziten in der Belegschaft führen (Grosse et al., 2015a). Im Umkehrschluss sind durch eine Verbesserung der Belastungssituation also Motivations- und Produktivitätssteigerungen möglich (Granotto et al., 2019).

Die Auswirkungen auf Unternehmen können insgesamt in Analogie zu einem „Eisberg“ gesehen werden, da nur wenige Folgen als Spitze des Eisbergs direkt abschätzbar sind. Die meisten Zusammenhänge bezüglich potentieller Produktivitäts- bzw. Qualitätsverluste sind hingegen nicht einsehbar (Schaub & Landau, 2004).

2.2.3 Methoden zur Belastungsermittlung und -bewertung

Die Arbeitswissenschaft hat in den vergangenen Jahrzehnten eine große Anzahl an Methoden bereitgestellt, mit deren Hilfe sich vornehmlich physische Belastungen quantifizieren und bewerten lassen (Kugler et. al., 2010; BAuA, 2019a). Ellegast (2010) ordnet diese Verfahren in fünf verschiedene Kategorien ein, siehe Abbildung 10. Die Verfahren unterscheiden sich hinsichtlich ihres Genauigkeitsanspruchs, dem Schulungsaufwand für die jeweilige Methode sowie den vorgesehenen Anwendendengruppen. Zudem sind die Bewertungsverfahren häufig gezielt für bestimmte Belastungsarten (siehe Kapitel 2.2.2) entwickelt worden, sodass vorab eine detaillierte Analyse der Charakteristika der Tätigkeiten für die Auswahl eines oder mehrerer Verfahren entscheidend ist (Kugler et al., 2010). In Anhang B wird ein Überblick über verschiedene Screening-Verfahren und deren Zuordnung zu bestimmten Belastungsarten gegeben.

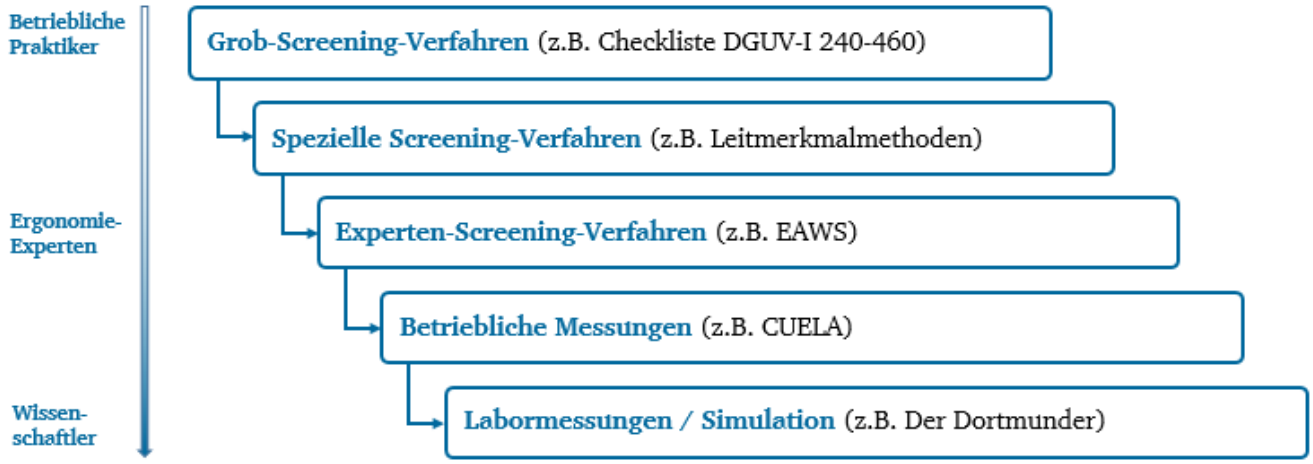


Abbildung 10: Methodenebenen zur Erfassung physischer Belastungen (vgl. BAuA, 2019a; Ellegast, 2010)

Die erste Methodenebene bilden die Grob-Screening-Verfahren, welche zunächst nur eine orientierende Gefährdungsbeurteilung bieten. Jedoch sind sie gut geeignet, um anhand von Richtwerten und Checklisten eine Vorselektion von Arbeitsplätzen mit besonders hohem Gefährdungsrisiko durchzuführen. Gleichzeitig können Belastungsschwerpunkte identifiziert werden, um somit die Auswahl detaillierterer Methoden zu erleichtern (Ellegast, 2010). Beispielhafte Verfahren sind in der

Übersicht in Anhang B gegeben. Zur Bewertung von Kommissioniertätigkeiten sind Grob-Screenings aufgrund der zu oberflächlichen Analyse und der komplexen, ungetakteten Tätigkeiten beim Kommissionieren eher ungeeignet.

Liegen eindeutige Belastungsschwerpunkte vor, können mithilfe der Speziellen Screening-Verfahren Risikofaktoren körperlicher Überbeanspruchung schnell und praxisnah, jedoch detaillierter als mit Grob-Screenings bewertet werden (BAuA, 2019a). Es sind sowohl Verfahren vorhanden, die einzelne als auch mehrere Belastungsarten (Kombinationsverfahren) analysieren (vgl. Hartmann et al., 2008). Sie erlauben in der Regel eine differenzierte Risikobewertung anhand eines Risikopunktewertes, der häufig in ein Ampelschema (DIN EN 614-1, 2009) einzuordnen ist. Spezielle Screenings geben zudem bereits erste Aufschlüsse bezüglich sinnvoller Ansatzpunkte zur Gestaltungsverbesserung von Arbeitsplätzen (Kugler et al., 2010). Typische Verfahren dieser Kategorie sind vor allem im deutschsprachigen Raum die Leitmerkmalmethoden (BAuA, 2019a). Für die Bewertung der Belastungen der oberen Extremitäten stehen zudem beispielsweise das „Rapid Upper Limb Assessment“ (RULA; McAtamney & Corlett, 1993) sowie die OCRA-Checkliste (Colombini et al., 2013) für repetitive Tätigkeiten zur Verfügung. Zudem bietet das am Institut für Arbeitswissenschaft (IAD) entwickelte Multiple-Lasten-Tool die Möglichkeit, die Belastungsarten „Heben, Halten, Tragen“ und „Ziehen, Schieben“ kombiniert zu betrachten (Schaub et al., 2012; DGUV, 2020).

Bei komplexeren Arbeitstätigkeiten, die eine feingliedrigere Angabe von Risikofaktoren bedürfen, bieten sich die Experten-Screenings an. Diese setzen ein fundiertes Methodenwissen durch entsprechende Schulungen voraus und richten sich entsprechend an Ergonomie-Experten. Häufig sind diese auf einzelne Belastungsarten mit strengen Randbedingungen zugeschnitten (Kugler et al., 2010). Beispiele sind das „Occupational Risk Assessment“ (OCRA) für repetitive Tätigkeiten der oberen Extremitäten (Occhipinti, 1998), das „Ovako Working Posture Analysing System“ (OWAS) für statische Körperhaltungen (Karhu et al., 1977) sowie der „Kraftatlas“ (Wakula et al., 2009) zur Bewertung von Aktionskräften. Allerdings gibt es unter den Experten-Screenings auch Kombinationsverfahren, wie das Automotive Assembly Worksheet (AAWS+; Schaub, 2004) und das European Assembly Worksheet (aktuelle Bezeichnung: Ergonomic Assessment Worksheet (EAWS), Schaub et al., 2013). Das EAWS-Verfahren hat den Vorteil, dass es verschiedene Belastungsarten in der Bewertung berücksichtigt und einen summarischen Gesamtwert für manuelle Lastenhandhabungen, statische Körperhaltungen und Aktionskräfte ausgibt.

Sowohl Spezielle als auch Experten-Screening-Verfahren besitzen Limitationen in der praktischen Anwendung. Alle sind abhängig von subjektiven Beobachtungen der Anwendenden. Zudem sind die Belastungsfaktoren nur grob klassifiziert, sodass bei unterschiedlichen Nutzenden abweichende Ergebnisse entstehen können – vor allem dreidimensionale Bewegungen (z. B. Torsion oder Lateralflexion des Rumpfes) sind durch Beobachtungen sehr schwierig zu erfassen und meist fehlerbehaftet (Kilbom, 1994). Abhilfe können in diesen Fällen moderne Messsysteme, wie etwa Motion

Capture Systeme, schaffen. Diese sind in der Lage, Körperhaltungen und –bewegungen ausreichend akkurat aufzuzeichnen und zeitlich aufzulösen (z. B. Steinebach et al., 2020d).

Zur Anwendung in der PzW-Kommissionierung sind die genannten Verfahren nur teilweise geeignet. Dies liegt zum einen daran, dass die Belastungsart der „manuellen Lastenhandhabung“ von einigen der Screening-Tools schlicht nicht abgedeckt wird. Andere Verfahren, wie z. B. die Leitmerkmalmethoden oder OWAS, sind aufgrund ihres einfachen Aufbaus in der Regel nicht detailliert genug, um körperliche Belastungen bei komplexen Kommissioniertätigkeiten akkurat zu bewerten und allenfalls für eine orientierende Abschätzung nutzbar (Ellegast, 2005). Etwaige Einflussgrößen, wie das Lastgewicht, der Lastangriffspunkt, die Rumpfneigung oder dynamische Effekte, werden nur unzureichend differenziert abgebildet (Goldscheid, 2008). Grundsätzliches Problem der Screening-Verfahren ist, dass sie im Sinne dieser Arbeit für mathematische Optimierungsverfahren ungeeignet sind, da sich die Kennwerte der Bewertungsverfahren nicht auf Einzeltätigkeiten (z. B. einzelne Umsetzungsvorgänge) beziehen und sich nicht additiv zusammensetzen lassen, um sie in Zielfunktionen berücksichtigen zu können.

Kategorie 4 und 5 bilden die „Betrieblichen Messungen“ bzw. die „Labormessungen und Simulationen“. Diese Verfahren benötigen wissenschaftlich fundierte Vorkenntnisse. Technische Messsysteme haben hierbei den Vorteil eines „*erhöhten Differenzierungsgrad hinsichtlich der Identifizierung physischer Belastungen*“ (BAuA, 2019a) und sind in der Lage auch Beanspruchungen in unterschiedlichen Körpersegmenten zu quantifizieren. Insbesondere bei Mischbelastungen können betriebliche Messungen bzw. Labormessungen je nach System verlässliche biomechanische, energetisch/kardiopulmonale, muskuläre oder subjektiv wahrgenommene Beanspruchungsdaten liefern. Die Genauigkeit der Messdaten ist bei Verfahren der Labormessungen etwas höher einzuschätzen als bei Verfahren der betrieblichen Messungen (Ellegast, 2010). Zudem sind die gemessenen Daten einer bestimmten Schicht nicht zwangsläufig repräsentativ für einen bestimmten Arbeitsplatz. Gleichzeitig ist der Aufwand für stark standardisierte Labormessungen in der Regel deutlich höher und deshalb ungeeignet für Messungen im Feld (BAuA, 2019).

Zudem erhalten immer häufiger Simulationsmethoden Einzug in die Arbeitswissenschaft. So können in Gelenken bzw. Bandscheiben wirkende Kräfte sowie Momente mittels digitaler Menschmodelle bestimmt werden, um somit Rückschlüsse auf die Arbeitsgestaltung ziehen zu können.

2.3 Literaturüberblick zu ergonomischen Planungskonzepten in der Kommissionierung

Die Planung eines manuellen Kommissionierlagers ist aufgrund der zahlreichen interdependenten Entscheidungsprobleme und technischen Gestaltungsmöglichkeiten sehr komplex. Die Planung bzw. Optimierung eines Planungsproblems hat meist unmittelbar Auswirkung auf andere Zielgrößen, sodass eine ganzheitliche Systembetrachtung stets sinnvoll ist (van Gils et al., 2018).

In diesem Kapitel soll zunächst auf einzelne Entscheidungsprobleme und deren Lösungsansätze eingegangen werden. Anschließend wird vorgestellt, inwiefern menschliche Aspekte Einzug in die Planung von Logistiksystemen erhalten. Schließlich wird das Optimierungsproblem dieser Dissertation aufgegriffen und systematisch Literatur bezüglich der Integration von arbeitswissenschaftlichen Kriterien in Lagerplatzvergabestrategien aufgearbeitet.

2.3.1 Entscheidungsprobleme in der manuellen Kommissionierung

In der Kommissionierung können bereits inkrementelle Prozessverbesserungen zu signifikanter Reduzierung der Durchlaufzeiten und damit der Kundenzufriedenheit führen (Fontana & Nepomuceno, 2017), sodass Planungskonzepte in der betriebswissenschaftlichen Literatur sehr regelmäßig diskutiert werden.
Besonders hohes Optimierungspotential bieten die vier klassischen Entscheidungsprobleme eines Lagers, die von strategischen bis hin zu operativen Planungsaspekten klassifiziert werden: Layout Design, Lagerplatzvergabe, Batching und Routing (De Koster et al., 2007; Diefenbach & Glock, 2019).

Layout Design
Die Planung des Lagerlayouts wird auf verschiedenen Aggregationslevels betrachtet. Sie reicht von der räumlichen Platzierung des Lagers innerhalb einer Fabrik (Kusiak & Hergau, 1987) bis hin zur exakten Konfiguration von Regalen und Gängen bezüglich der Anzahl, Ausrichtung und Abmessungen (z. B. Tompkins et al., 2010; De Koster et al., 2007; Rakesh et al., 2015). Ferner wird die räumliche Platzierung von Abgabepunkten (Roodbergen et al., 2008) sowie optimale Seitenverhältnisse eines Lagers (Guo et al., 2016) untersucht. In der Literatur ist das Ziel dieser Publikationen fast ausschließlich das Finden wegoptimierter Layouts (minimale Laufwege) für bestimmte Nachfragebedingungen bei gegebenen Routingstrategien.
Am häufigsten thematisiert werden konventionelle Layouts mit parallelen Regalreihen (one-block layout), die gegebenenfalls durch Zwischengänge unterteilt werden (multi-block layout). Seltener werden auch alternative Layouts untersucht, wie z. B. U-förmige Lager (Glock & Grosse, 2012; Diefenbach & Glock, 2019), Fishbone-Layouts (Pohl et al., 2009a; Cardona et al., 2012) oder Chevron-Layouts (Masae et al., 2020a). In Anhang C sind diese Layouts grafisch dargestellt.

Lagerplatzvergabe
Die Lagerplatzvergabe (engl. meist „storage location assignment“) ist ein operatives Entscheidungsproblem und ist definiert als Menge von Regeln, welche die Zuordnung von Artikeln zu Lagerplätzen ermöglichen (Neuhäuser & Wehking, 2011; Wäscher et al., 2004). Zu den gängigsten

Lagerplatzvergabe-Strategien gehören hierbei die zufällige LPV, die klassenbasierte LPV und die feste LPV (De Koster et al., 2007).

Bei der zufälligen LPV – auch chaotische LPV genannt – werden SKU den Lagerplätzen zufällig zugeordnet, ohne bestimmte Artikeleigenschaften (z. B. Zugriffshäufigkeit, Gewicht) zu berücksichtigen. Hierdurch ändert sich die Zuordnung im Zeitverlauf sukzessive, da ein Lagerplatz durch ein beliebiges SKU belegt werden kann, sobald er leer ist. Dies hat zur Folge, dass die Kommissionierenden sich kaum an feste Lagerplätze gewöhnen können und Lerneffekte ausbleiben (Grosse et al., 2013). Auf der anderen Seite ist jedoch eine effizientere Auslastung des Lagers möglich, da leere Lagerplätze nicht für bestimmte SKU vorgehalten werden müssen (Pohl et al., 2011).

Bei der Festplatzlagerung wird jeder Artikel einem definierten Lagerplatz zugewiesen, sodass dieser Lagerplatz vorgehalten wird, sollte das entsprechende SKU nicht vorrätig sein. Die Zuordnung erfolgt in der Regel nach bestimmten Kriterien bzw. Artikeleigenschaften. Sehr gebräuchlich ist eine Zuordnungsentscheidung anhand der Umschlaghäufigkeit des SKU – so werden „Schnelldreher“ auf Lagerplätzen nahe dem Depot platziert, während für „Langsamdreher“ längere Wegstrecken mit weiteren Entfernungen zum Depot in Kauf genommen werden (ten Hompel et al., 2011). Alternativ kann der Cube-Order-Index verwendet werden – dieser dividiert die Umschlaghäufigkeit durch das benötigte Lagervolumen (Kallina & Lynn, 1976). Zudem können bei der Festplatzlagerung Zugriffkorrelationen beachtet werden, falls Artikel häufig gemeinsam von Kunden bestellt werden (z. B. Zahnbürste und Zahnpasta) – diese Artikel sollten dann benachbarte Lagerplätze erhalten (Bindi et al., 2009). Seit einigen Jahren werden auch weitere Artikeleigenschaften, wie z. B. das Gewicht genutzt, um arbeitswissenschaftliche Kriterien zu berücksichtigen – diese Ansätze werden in Kapitel 2.3.3 genauer beleuchtet.

Schließlich kombiniert die klassenbasierte LPV die beiden vorgenannten Strategien. Artikel werden entsprechend ihren Eigenschaften in bestimmte Klassen eingeteilt – häufig nach der Umschlaghäufigkeit in ABC-Klassen. A-Artikel (höchste Umschlagshäufigkeit) werden in einer Zone platziert, die sich möglichst nah am Depot befindet. Innerhalb dieser Bereiche findet eine zufällige Verteilung der Artikel statt (Qin et al., 2015). Beispielhafte Varianten der klassenbasierten LPV bei ABC-Zonen sind Abbildung 11 zu entnehmen.

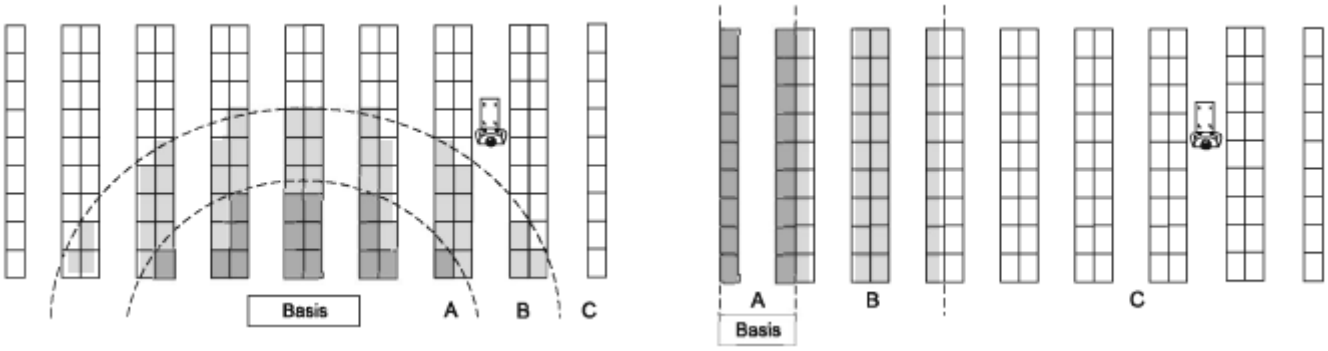


Abbildung 11: Klassenbasierte LPV bei ABC-Zonierung mit dem Radiensystem (links) bzw. dem Segmentsystem (rechts) (ten Hompel et al., 2011)

Die in der Forschung entwickelten LPV-Strategien haben verschiedene Ziele. Während mit Abstand am häufigsten Wegzeiten und Durchlaufzeiten minimiert werden sollen, gibt es auch Arbeiten zur Reduktion der Gesamtkosten, des Platzbedarfs, des Energiebedarfs im Rahmen des ökologischen Supply Chain Managements (Ene et al., 2016; Meneghetti & Monti, 2013) sowie erste Arbeiten zur Minimierung der körperlichen Belastung (Battini et al., 2016; Larco et al., 2017). Einen umfassenden Überblick zu aktuellen Forschungsaspekten bezüglich Lagerplatzvergabestrategien geben Reyes et al. (2019).

Batching

In einer artikelorientierten Kommissionierung können Kundenbestellungen restrukturiert werden – das Order Batching Problem versucht demnach, durch Aufteilung oder Zusammenfassung von einzelnen Bestellungen optimale „Batches“ zu erstellen (Wäscher et al., 2004). Die entstehenden Kommissionieraufträge beinhalten anschließend bestenfalls ausschließlich Artikel, die nahe zueinander gelagert sind, sodass sich wiederum Wegstrecken verkürzen. Zudem wird verhindert, dass bestimmte Lagerplätze wiederholt angesteuert werden müssen (Boysen et al., 2017). Meist werden für Order Batching Probleme heuristische Methoden entwickelt, um es für bestimmte Lagerkonfigurationen und Routingstrategien zu lösen (De Koster et al., 2007). Die Durchführung eines Order Batchings vor der Kommissionierung setzt voraus, dass die Kundenbestellungen nach der Kommissionierung wieder zusammengeführt bzw. kundenspezifisch aufgetrennt werden.

Routing

Das Routing definiert die Wegeführung der Kommissionierenden durch das Lager und damit die Reihenfolge, in der die Mitarbeitenden die SKU entnehmen sollen. Ziel ist im Regalfall die Wegstreckenminimierung, sodass das Routing ein Sonderfall des „Travelling Salesman Problems“ darstellt (De Koster et al., 2007). Obwohl für dieses Problem optimale Lösungen vorliegen, werden wegminimierte Routen in der Praxis fast nie umgesetzt, da sie für den Kommissionierenden kaum intuitiv sind und deshalb keine Akzeptanz finden (De Koster et al., 1999; Henn et al., 2010). Vielmehr wird auf

einfache heuristische Routenschemata zurückgegriffen. Die bekanntesten sind: Stichgang, Schleifengang, Mittelpunkt-Strategie und Largest-Gap-Heuristik (ten Hompel et al., 2011). Am häufigsten findet die Schleifengang-Heuristik (engl. S-shape heuristic) in der Praxis Anwendung und wird deshalb regelmäßig als Benchmark in der Forschung verwendet (Franzke, 2018; Masae et al., 2020b). Zudem gilt sie als für die Mitarbeitenden sehr leicht zu erlernen (ten Hompel et al., 2011). Die Kommissionierenden durchlaufen die Gänge beim Schleifengang mäanderförmig, wobei sie Gänge, in denen sich keine zu entnehmenden SKU befinden, überspringen können (De Koster et al., 2007). Ein ausführlicher Literaturüberblick zum Routing in Lagerhäusern ist Masae et al. (2020b) zu entnehmen.

Zusammenfassung

Einen Überblick über die genannten Entscheidungsprobleme in der Kommissionierung mit ihren möglichen Ausprägungen gibt Abbildung 12. Zusätzlich werden der Automatisierungsgrad und das Zoning (Zuordnung von Artikeln zu bestimmten voneinander abgetrennten Zonen im Lager) dargestellt. Zudem eignet sich die Grafik als Einordnung des in dieser Arbeit behandelten Anwendungsfalls. Der herzuleitende LPV-Algorithmus wird für die Anwendungsfälle entwickelt, die sich durch die Kombination der umrandeten Ausprägungen der Entscheidungsprobleme ergeben. Auf die gestrichelt umrandeten Ausprägungen kann die LPV mit einem entsprechenden Aufwand angepasst werden. Nicht umrandete Ausprägungen werden im Folgenden nicht weiter betrachtet und eignen sich nicht für den in dieser Arbeit beschriebenen LPV-Algorithmus.

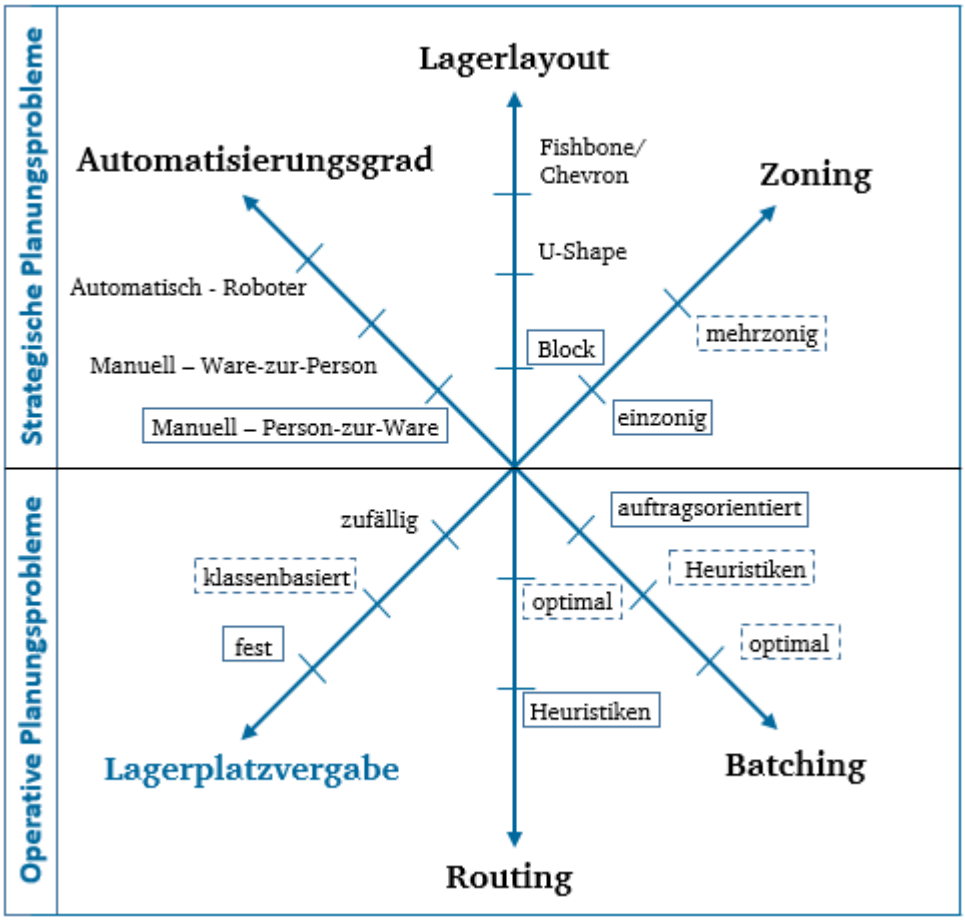


Abbildung 12: Entscheidungsprobleme der Kommissionierung (vgl. Goetschalckx & Ashayeri, 1989; De Koster et al., 2007; Koch, 2014)

Abschließend sei die hohe Interdependenz der genannten Probleme betont, die schnell ersichtlich wird, wenn man beispielsweise an den Einfluss eines abgeänderten Lagerlayouts auf optimale Routingstrategien verweist. Deshalb kann es sinnvoll sein, kombinierte Probleme zu betrachten, welche jedoch mathematisch schnell sehr komplex werden. Einen guten Literaturüberblick bezüglich dieser kombinierten Planungsprobleme gibt van Gils et al. (2018).

2.3.2 Einflussgrößen des Kommissioniersystems auf die physische Belastung

Aufgrund der hohen physischen Belastungen, mit denen in der manuellen Intralogistik zu rechnen ist, wurden in der Vergangenheit auf dem Gebiet der Arbeitswissenschaft einige Ansätze vorgestellt, um die Einflussfaktoren auf die Belastung zu ermitteln und diese durch eine entsprechende Arbeitsgestaltung zu reduzieren.

Die wichtigsten Arbeiten hierzu sollen im Folgenden kurz analysiert werden. Hierbei wird zwischen zwei Arten von Publikationen differenziert:

1) Publikationen, die einzelne Aspekte, wie z. B. Einflussgrößen auf die physische Belastung in der Kommissionierung oder technische Unterstützungssysteme herausgreifen (Kapitel 2.3.2)
2) Publikationen, die Belastungsbewertungsverfahren in die klassischen Entscheidungsprobleme der Kommissionierung integrieren und Optimierungsmodelle entwickeln – hierbei liegt der Fokus dieser Arbeit auf der Lagerplatzvergabe (Kapitel 2.3.3)

Ein tabellarischer Überblick über die hier betrachteten Publikationen ist in Anhang D gegeben.

Einfluss des Lagerplatzes auf die physische Belastung

- **Entnahmehöhe:** In einer Studie von Labus & Gajsek (2018) wird hergeleitet, dass Schmerzen im unteren Rücken und der Schultern signifikant mit Kommissioniertätigkeiten unterhalb der Knie bzw. oberhalb der Schulter zusammenhängen. So sprechen Petersen et al. (2005) von der „Goldenen Zone“ für Entnahmebereich zwischen der Hüfte und den Schultern. Marklin & Wilzbacher (1999) zeigen, dass vier verschiedene Bewertungsverfahren eine niedrigere physische Belastung angeben, wenn die Entnahmehöhe schwerer SKU von 48 cm auf 89 cm erhöht wird. Zu ähnlichen Ergebnissen kommen Feldmann et al. (2019) bei Anwendung der Leitmerkmalmethode. Mithilfe biomechanischer Simulation lassen sich höhere Druckkräfte auf Bandscheiben der LWS für niedrige Entnahmehöhen nachweisen (Skals et al., 2021b; Jäger et al., 2002; Steinebach et al., 2021b). Harari et al. (2020) beschreiben, dass die Entnahmehöhe der wichtigste Einflussfaktor auf die Bandscheibendruckkräfte in L5-S1 ist. Die höchste Druckkraft tritt bei einer Entnahme von Bodenhöhe auf und nimmt bis zu einem Minimum auf einer Höhe von 1,1 m ab. Von dort an nimmt die Druckkraft bis zu einer Entnahmehöhe auf 1,7 m wieder zu. Dies deckt sich sehr gut mit von Goldscheid (2008) ermittelten Druckkräften auf L5-S1 für Kommissioniertätigkeiten. Des Weiteren steigt die lokale Muskelbeanspruchung des unteren Rückens sowie des Nacken-Schulter-Bereiches bei Pick-Tätigkeiten aus niedrigen im Vergleich mit mittleren Höhen (Skals et al., 2021a). Auch der wahrgenommene Diskomfort steigt in oberen (1,2-fach) bzw. unteren (1,3-fach) im Vergleich zu mittleren Regalebenen (Larco et al., 2017). Ferner liegt die maximal akzeptierte bzw. bevorzugte Entnahmehöhe bei Männern signifikant höher als bei Frauen (Lee & Hwang, 2020a). Weisner & Deuse (2014) empfehlen auf Basis von Motion Capture Untersuchungen eine Entnahmehöhe zwischen 85 cm und Schulterhöhe. Die VDI 3657 (1993) hingegen gibt anstelle eines Bereichs eine optimale Entnahmehöhe von 110 cm an.
- **Entnahmetiefe:** Der Einfluss der Entnahmetiefe (sagittaler Lastabstand) auf die biomechanische Belastung der Wirbelsäule ist gut untersucht. So können Marras et al. (1999) sowie Jäger et al. (2002) zeigen, dass sowohl Druck- als auch Scherkräfte mit zunehmender Entnahmetiefe (bzw. Lastabstand) steigen. Hanson & Medbo (2018a) berechnen für Pickvorgänge vom vorderen Teil

einer erhöht stehenden Palette deutlich niedrigere Druckkräfte auf die Bandscheibe L4-L5 als für tiefer gelagerte SKU. Ebenso ermitteln Calzavara et al. (2017b) höhere OWAS-Werte für SKU mit größeren Entnahmetiefen. Weisner & Deuse (2014) geben in ihrer Motion Capture Analyse eine idealerweise maximale Entnahmetiefe von 25 cm an.

- **Neigung:** Ulin & Keyserling (2004) zeigen, dass die Druckkräfte auf das Wirbelsäulensegment L5-S1 beim Picken aus einem um 90° geneigten Behälter sinken und der Anteil der Lastenhandhabung in gebeugter Körperhaltung reduziert wird. Im Gegensatz dazu stellen Hanson et al. (2016) sowie Hanson & Medbo (2018a) durch Simulation fest, dass die Wirbelsäulenbelastung bei einer um 45° geneigten Palette kaum sinkt, während jedoch kürzere Kommissionierzeiten möglich sind. In einem Feldversuch können Hanson & Medbo (2018b) die Ergebnisse bestätigen – auch das REBA-Verfahren (Rapid Entire Body Assessment, Hignett & McAtamney, 2000) zeigt nur eine sehr geringe Reduzierung der physischen Belastung durch eine Neigung. Ebenso zeigen Wakula et al. (2021), dass das Kommissionieren aus einer um 30° geneigten Box im Vergleich zu einer horizontal stehenden Box nach EAWS kaum zu einer Belastungsreduzierung führt.
- **Zugänglichkeit:** Die Zugänglichkeit zu SKU kann maßgeblich die Körperhaltung beeinflussen – so ist es z. B. teilweise notwendig, sich in Palettenregale hereinzubeugen, um an Produkte zu gelangen, die am hinteren Ende der Palette gelagert werden. Um solche Situationen zu entschärfen, werden in der Literatur Palettenwender (Schäfer et al., 2009; Glock et al., 2019) und Palettenauszüge (Calzavara et al., 2017a) diskutiert.

Einfluss der SKU-Eigenschaften auf die physische Belastung

- **Gewicht:** Das Lastgewicht der SKU wird in fast allen arbeitswissenschaftlichen Untersuchungen bezüglich der Kommissionierung einbezogen. Je höher das Lastgewicht, desto höher ist im Regelfall die biomechanische, energetische sowie subjektiv wahrgenommene Belastung bzw. Beanspruchung. Beispielhaft können Marras et al. (1999), Jäger et al. (2002) sowie Goldscheid (2008) den eindeutigen Zusammenhang zwischen dem Lastgewicht und den Kompressions- und Scherkräften auf die Bandscheibe L5-S1 beim Handhaben von Lasten in der Logistik nachweisen. Auch der empfundene Diskomfort ist bei höheren Lasten in der Kommissionierung deutlich erhöht (Larco et al., 2017).
- **Volumen:** Während Snook & Ciriello (1991) keine signifikanten Unterschiede beim Heben von Lasten in Bezug auf das Volumen feststellen, konstatieren Mital et al. (1993), dass Lasten immer so klein wie möglich sein sollten, um hohe physiologische Kosten zu vermeiden. Ebenso steigen die Scherkräfte auf Bandscheiben der LWS bei größeren SKU leicht (Marras et al., 1999). Larco

et al. (2017) stellen außerdem fest, dass das Volumen einen (geringen) Einfluss auf den Diskomfort der Kommissionierenden hat.

- **Greifbarkeit:** Snook & Ciriello (1991) stellen fest, dass die maximal akzeptierten Gewichte beim Heben von Lasten um 16% sinken, wenn diese keine adäquaten Griffe besitzen. Ferner zeigt sich eine signifikante Reduktion der Druck- und Scherkräfte auf L5-S1 für niedrige Entnahmetiefen, wenn die SKU mit entsprechenden Griffen ausgestattet sind (Marras et al., 1999).

Technische Unterstützungssysteme

Eine Reihe von Autoren beschäftigt sich mit technischen Unterstützungssystemen in der Kommissionierung, welche die physische Belastung der Kommissionierenden senken. Typische Ansätze hierfür sind Hebehilfen (Lavender et al., 2013), Palettenwendegeräte (Schäfer et al., 2009; Glock et al., 2019) und Palettenauszüge (Calzavara et al., 2017a). Während die Hebehilfen bei Umsetzvorgängen von SKU direkt mechanisch entlasten, sind Palettenwendegeräte und Palettenauszüge vorgesehen, um den Kommissionierenden den Zugang zum Greifbereich zu erleichtern, um somit günstigere Körperhaltungen einnehmen zu können. Kelterborn et al. (2014) weist zudem die Reduktion der physischen Belastung durch eine Schiebehilfe für Handwagen nach. Einige Arbeiten beschäftigen sich mit der Verwendung von Exoskeletten in der Kommissionierung (Huysamen et al., 2018; Motmans et al., 2018, Kinne et al., 2019).

Ein weiterer Ansatz ist die Etablierung von Wearables bzw. mobiler Messtechnik, die an den Kommissionierenden angebracht werden (z. B. Herzschlagfrequenzmessung, Motion Capture), um ihnen ein direktes Feedback bzgl. eingenommener Körperhaltungen oder ihres Ermüdungszustandes zu geben (Calzavara et al., 2018; Battini et al., 2014).

Ferner gibt es sehr viele Arbeiten zu digitalen Assistenzsystemen für die Intralogistik, welche die Beschäftigten auf kognitiver Ebene unterstützen. Hier sei auf die Literaturüberblicke von Steinebach et al. (2020b) und Glock et al. (2021) verwiesen.

2.3.3 Arbeitswissenschaftliche Kriterien in der Lagerplatzvergabe

Wie bei den meisten operativen Entscheidungsproblemen in der Kommissionierung fokussieren sich auch in der Lagerplatzvergabe die meisten wissenschaftlichen Arbeiten nach einem Literaturüberblick von Reyes et al. (2019) auf die Minimierung von Laufdistanzen (38 %) bzw. Laufzeiten (32 %). Menschliche Eigenschaften oder physische Belastungen werden nur selten in entsprechenden Optimierungsmodellen berücksichtigt. Dieser Umstand wurde jedoch in den letzten Jahren vermehrt als Forschungslücke identifiziert, sodass sich jüngst eine steigende Anzahl von Artikeln mit Human Factors und Ergonomie in der LPV befassen.

In der Vergangenheit wurde die Ergonomie in der LPV häufig gänzlich ausgeklammert. Es empfehlen z. B. De Koster et al. (2007), dass aufgrund möglicher SKU-Beschädigungen darauf geachtet werden soll, schwere Artikel auf einer Palette möglichst weit unten zu platzieren. Auch aus der Praxis ist bekannt, dass teilweise aus Stabilitätsgründen der Regale schwere Artikel möglichst im unteren Bereich gelagert werden sollen.

Dennoch ist die Idee, die Ergonomie bereits durch die LPV zu beeinflussen, nicht ganz neu. So gibt Bernnat (1997) die qualitative Empfehlung, „*insbesondere bei Fachbodenregalen – zur Erleichterung der Such- und Greiftätigkeiten des Kommissionierpersonals – zugriffsintensive Artikel in der Regalmitte im ergonomisch günstigen Bereich*“ einzulagern. Eine der ersten Arbeiten, die menschliche Eigenschaften in Optimierungsmodellen berücksichtigten, wurde von Petersen et al. (2005) veröffentlicht. Die Autoren entwickeln Algorithmen, die auf dem „Goldene Zone“ Ansatz basieren. Die Goldene Zone beschreibt hierbei Lagerplätze, deren Entnahmehöhe zwischen der Schulter und Hüfte der Kommissionierenden liegt. Es wird angenommen, dass die Entnahme von SKU in diesem Bereich schneller möglich ist als unterhalb der Hüfte bzw. oberhalb der Schulter. In einer Monte-Carlo Simulation kann nachgewiesen werden, dass Goldene Zone-Strategien zu kürzeren Kommissionierzeiten führen können. Allerdings werden die zeitlichen Unterschiede zwischen der Greifzeit in der Goldenen Zone und außerhalb dieser nicht belegt und in dieser Publikation schlicht auf 0,1 Sekunden determiniert. Zudem bleibt das Gewicht der Artikel sowie die physische Belastung der Kommissionierenden unberücksichtigt.

Der Goldene Zone Ansatz wird auch von Nookea & Vanichchinchai (2020) aufgegriffen, um das Bücken bzw. Strecken der Mitarbeitenden zu reduzieren. Hierfür werden die Artikel entsprechend ihres Umsatzes in drei Kategorien (ABC) klassifiziert. Die A-Artikel werden den mittleren Regalebenen zugeordnet, die B-Artikel in den nächsthöheren bzw. –niedrigeren und die C-Artikel den verbleibenden Lagerplätzen. In einer Fallstudie wird gezeigt, dass ungünstige Körperhaltungen abnehmen und auch die Kommissionierzeit reduziert wird. Es ist jedoch anzumerken, dass die Autoren beim Routing von einer Schleifengang-Strategie ausgehen, die Kommissionierenden also unabhängig von der Pickliste alle Gänge abgehen. Die LPV hat demnach keinen Einfluss auf die Weg- sondern lediglich auf die Greifzeit. Ebenso fehlt ein konkretes Bewertungsverfahren der Körperhaltungen oder der Einfluss der Artikelgewichte auf die Belastung.

In bisher insgesamt vier Publikationen wurde das „Energy Expenditure Model“ von Garg et al. (1978) als physischer Belastungsparameter in LPV-Optimierungsmodellen verwendet – der Energieumsatz ist damit die am häufigsten verwendete arbeitswissenschaftliche Größe in der LPV. Das Modell nach Garg et al. (1978) erlaubt es, die Gesamtbelastung anhand sich additiv zusammensetzender Energieumsätze für einzelne Tätigkeiten (z. B. Greifen von Artikeln oder Schieben eines Wagens) zu errechnen.

So minimieren Battini et al. (2016) in einem Lager mit einer Regalreihe die energetische Belastung der Picker sowie die Kommissionierzeit pareto-effizient[3]. Es fällt auf, dass die beiden Größen im Zielkonflikt stehen und die optimale Lösung von der Nachfrageverteilung der einzelnen SKU sowie den Regalabmessungen abhängt.

Ebenso nutzen Diefenbach & Glock (2019) den Energieumsatz nach Garg et al. (1978), um die Lagerplatzvergabe und darüber hinaus das optimale Layout von U-förmigen Kommissionierzonen zu bestimmen. Die ergonomische und ökonomische Optimallösung liegen bei diesem Modell nahe zusammen, da von einem Tragen der Artikel ausgegangen wird und eine Minimierung der Wegstrecke somit sowohl die Kommissionierzeit als auch den Energieumsatz reduziert.

Calzavara et al. (2019) untersuchen im Gegensatz zu Battini et al. (2016) kein Fachbodenregal, sondern verschiedene Konfigurationen aus Standhöhe und maximaler Ladehöhe von Paletten bezüglich der LPV. Neben den Kosten (zusammengesetzt aus Bereitstellungs-, Kommissionier- und Lagerplatzkosten) und dem Energieumsatz betrachten sie außerdem den OWAS-Score, um den Einfluss verschiedener Entnahmepositionen bestimmter Palettenkonfigurationen auf die Körperhaltung der Beschäftigten in das Modell einzubeziehen.

In dem Artikel von Gajsek et al. (2021) wird ebenfalls eine multi-kriterielle LPV-Optimierung präsentiert, welche die Kommissionierzeit und die physische Belastung durch den Energieumsatz nach Garg et al. (1977) sowie das OWAS-Verfahren berücksichtigt. Die Autoren ermitteln in einem Versuch die Kommissionierzeiten in Abhängigkeit von Artikelgewichten, -größen sowie der Entnahmehöhe. Zudem werden die Körperhaltungen nach OWAS bewertet und der Energieumsatz berechnet, welche als Eingangsdaten für die Optimierung verwendet werden. Für verschiedene Gewichtungen der Zielgrößen kommen die Autoren in einer numerischen Simulation zu dem Ergebnis, dass die ergonomischen Zielgrößen bei nur geringen Zeitverlusten optimiert werden können.

Larco et al. (2017) befragen in zwei Lagern fünf bzw. sieben Mitarbeitende nach dem empfundenen Diskomfort mittels der Borg CR-10 Skala (Borg, 1982). Über lineare Regressionsanalysen können die Koeffizienten der Einflussgrößen des Gewichts, der Entnahmehöhe sowie der Zugriffshäufigkeit auf den Diskomfort ermittelt werden. Der Diskomfort wird in einer bi-kriteriellen Zielfunktion ähnlich wie in Battini et al. (2016) mit einer Funktion für die Kommissionierzeit kombiniert. Pareto-Kurven des LPV-Problems stellen die optimalen Lösungen dar – eine Reduzierung des durchschnittlichen Diskomforts um 16 % erfordert hierbei beim ersten untersuchten Unternehmen 6 % Erhöhung der Kommissionierzeit. Bei dem zweiten Unternehmen sind es jeweils 7 %. Es liegt also auch hier ein klarer Zielkonflikt vor. Die

[3] Pareto-Effizienz liegt in diesem Zusammenhang vor, wenn die eine Optimierungsgröße nur verbessert werden kann, indem sich die zweite Optimierungsgröße verschlechtert.

Autoren machen klar, dass der analysierte Trade-Off umso mehr an Wichtigkeit gewinnt, je unterschiedlicher die Zugriffshäufigkeiten der SKU sind. Zu erwähnen ist, dass die Einflussfaktoren auf den Diskomfort nur sehr grob differenziert sind – so wird beim Gewicht lediglich zwischen leichten (≤ 3 kg) und schweren (> 3 kg) Artikeln unterschieden.

Ein weiteres bi-kriterielles LPV-Modell stellen Steinebach et al. (2021b) vor. Es basiert jedoch neben einer Kalkulation der Kommissionierzeiten (erste Zielgröße) auf Kennwerten zur Wirbelsäulenbelastung (zweite Zielgröße), welche die Autoren anhand von Kommissionierversuchen und biomechanischer Simulation ermitteln. Aufgrund des Zielkonflikts werden ebenfalls Pareto-Kurven abgeleitet. In der Arbeit von Steinebach et al. (2021c) werden die beiden Zielfunktionen getrennt voneinander in einem einfachen Laborversuch anhand von EMG-Messungen evaluiert.

Ein kombiniertes LPV- und Zoning-Problem wird von Otto et al. (2017) betrachtet. Ziel der Optimierung ist eine über alle Zonen hinweg minimierte physische Gesamtbelastung. Zur Quantifizierung der Belastung machen die Autoren Gebrauch von der „Revised NIOSH Equation“ (Waters et al., 1993), welche auf Basis von biomechanischen, physiologischen und psychophysischen Kriterien das Erkrankungsrisiko des unteren Rückens beim Heben von Lasten angibt. Die Kommissionierzeit bzw. die Kosten werden in der durchgeführten Computersimulation nicht betrachtet – die Autoren machen jedoch darauf aufmerksam, dass eine Optimierung nur nach ökonomischen Zielgrößen hohe Gesundheitsrisiken für die Belegschaft bergen kann.

Schließlich betrachten Bortolini et al. (2017) ein ähnliches Entscheidungsproblem an einer Montagelinie, indem sie ein multi-kriterielles Optimierungsmodell zur Reduzierung von Durchlaufzeiten und ergonomischen Risiken aufstellen. Mit dem REBA-Verfahren sollen Bauteile an einer Montagelinie pareto-optimal den Behältern der Materialbereitstellung zugeordnet werden.

2.4 Identifizierung der Forschungslücke und Ableitung der Forschungsfragen

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass menschliche Faktoren in der Kommissionierung bisher nur rudimentär in Planungskonzepten Berücksichtigung finden (Grosse et al., 2017). Insbesondere wurde die Belastung der Lendenwirbelsäule bisher nicht in ökonomische LPV-Optimierungsansätze integriert, obwohl dieser Körperbereich am häufigsten von Gesundheitsbeschwerden in der Kommissionierung betroffen ist. Hieraus ergibt sich die erste einleitende Forschungsfrage:

FF1: Wie sollte eine bi-kriterielle ergonomische Lagerplatzvergabe unter Berücksichtigung der Wirbelsäulenbelastung und der Kommissionierzeit gestaltet werden?

Zudem handelt es sich bei den gefundenen Ansätzen in der Literatur, die sowohl ökonomische als auch ergonomische Kriterien berücksichtigen, lediglich um mathematische Modelle, die allenfalls mithilfe von

Simulationen bzw. numerischen Experimenten evaluiert wurden. In praktischen Labor- oder Feldversuchen wurden die Wirksamkeit der entwickelten Algorithmen auf zeitliche Größen und Beanspruchungsparameter nicht überprüft. Häufig wird in der Literatur postuliert, dass eine Reduzierung der physischen Belastung bzw. Beanspruchung sowohl die Pickleistung als auch die Qualität der Kommissionierung (in dieser Arbeit gemeinsam als Kommissionierleistung bezeichnet) verbessert (Grosse et al., 2015; Battini et al., 2016), ohne dies jedoch auf empirische Daten zu stützen. Insbesondere bezüglich des Einflusses der ergonomischen Gestaltung der Systeme auf die Beanspruchung und die unterlaufenen Fehler in der Kommissionierung gibt es bisher kaum praktische Studien bzw. Laborversuche – keine wissenschaftliche Arbeit konnte gefunden werden, die dies bezüglich der Lagerplatzvergabe untersucht. Aus diesem Grund lauten die beiden folgenden Forschungsfragen:

FF2: Wie wird die Beanspruchung durch eine ergonomische LPV beeinflusst?

FF3: Wie wird die Kommissionierleistung (Kommissionierzeit bzw. Qualität) durch eine ergonomische LPV beeinflusst?

Aus den mathematischen Modellen bezüglich ergonomischer Lagerplatzvergabestrategien aus der Literatur lässt sich vermuten, dass die Belastungs- und Zeitminimierung einen Zielkonflikt bilden (Battini et al., 2016; Larco et al., 2017). Jedoch ist fraglich, ob eine geringere Beanspruchung der Kommissionierenden dazu führt, dass ein Teil des Verlustes an Kommissionierzeit durch die ergonomische Lagerplatzvergabe kompensiert werden kann. Dieser Querbezug zwischen der Beanspruchung und der Kommissionierzeit soll in Forschungsfrage 4 aufgegriffen werden:

FF4: Kann ein Teil der Kommissionierzeit durch die ergonomische LPV aufgrund einer geringeren Beanspruchung kompensiert werden?

3 Entwicklung einer ergonomischen Lagerplatzvergabe

Der Lagerplatz eines SKU beeinflusst sowohl die Wirbelsäulenbelastung der Kommissionierenden als auch die benötigte Kommissionierzeit (Hanson et al., 2016). Um die Wirkung des Lagerplatzes auf diese beiden Zielgrößen zu beschreiben, müssen zunächst Kennwerte hergeleitet werden (Kapitel 3.1). Anschließend werden diese in einem bi-kriteriellen Optimierungsansatz über eine gewichtete Zielfunktion zusammengefasst.

3.1 Herleitung der benötigten Kennwerte

Der zu entwickelnde ergonomische Lagerplatzvergabe-Algorithmus soll zwei Zielgrößen minimieren: die Belastung der LWS sowie die benötigte Kommissionierzeit. Um diese mathematisch in einer Zielfunktion abbilden zu können, müssen für beide Größen Kennwerte hergeleitet werden, welche den Einfluss der verschiedenen Lagerplatz- und Artikeleigenschaften auf die Wirbelsäulenbelastung bzw. die Kommissionierzeit quantifizieren. Der Algorithmus soll sich hierbei vorrangig auf eine Person-zur-Ware Kommissionierung aus Regalen (z. B. Fachbodenregale, Flow-Rack Regale, etc.) beziehen. Zudem wird angenommen, dass jedem SKU genau ein fester Lagerplatz zugeordnet wird (Festplatzlagerung) und die exakte Position – definiert z. B. über kartesische Koordinaten – bekannt ist.
Abbildung 13 stellt die relevanten Einflussgrößen auf die beiden Zielgrößen grafisch dar – es fällt auf, dass weitere Einflussgrößen, wie z. B. das Artikelvolumen oder die Zugänglichkeit des Lagerplatzes, denkbar sind. Dieses Modell beschränkt sich jedoch zunächst auf die in der Literatur am häufigsten untersuchten und als besonders relevant identifizierten Faktoren (siehe Kapitel 2).

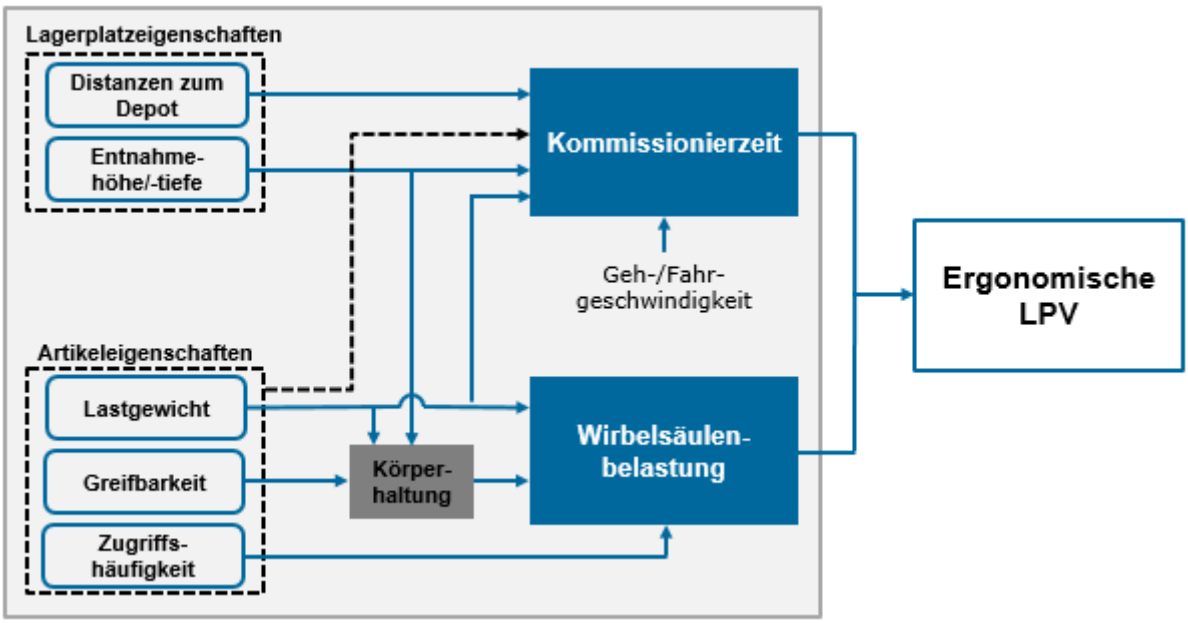


Abbildung 13: Einflussgrößen auf die beiden Zielgrößen der Optimierung (Steinebach et al., 2021b)

Um zu verhindern, dass das Optimierungsproblem NP-schwer[4] wird, sind einige Anforderungen an die Kennwerte zu stellen. Zunächst müssen sich die Kennwerte auf Einzeltätigkeiten beziehen – also z. B. ein exakter Belastungs- bzw. Zeitwert für das einmalige Umsetzen eines SKU. Zudem müssen die Kennwerte zu einem Gesamtwert addiert werden können. So erfüllen auf Belastungsseite die in Kapitel 2 beschriebenen Screening-Verfahren diese Anforderungen beispielsweise nicht, da sie keinen Wert für Einzeltätigkeiten, sondern die Summe einer Vielzahl von Tätigkeiten ausgeben. Eine Optimierung anhand dieses Gesamtwerts ist kaum möglich, da hierfür sehr viele Screening-Scores für alle möglichen SKU-Lagerplatz-Kombinationen zu berechnen wären, wodurch das Problem NP-schwer wird. Selbst bei nur 10 Lagerplätzen bzw. Artikeln ergeben sich 10! = 3,63 Mio. verschiedene Zuordnungsmöglichkeiten. Im Folgenden werden Kennwerte zur Wirbelsäulenbelastung und zur Kommissionierzeit hergeleitet und anschließend in einer gemeinsamen Zielfunktion zusammengeführt.

3.1.1 Bestimmung der Wirbelsäulenbelastung in der manuellen Kommissionierung

Die menschliche Wirbelsäule besteht aus 24 Wirbelkörpern sowie 23 Bandscheiben und ist das tragende Element des Skelettapparats. Die Bandscheiben sind faserknorplige Verbindungen zwischen zwei benachbarten Wirbelkörpern und ermöglichen die Beweglichkeit der Wirbelsäule – gleichzeitig sind sie in der Lage, äußere Druck- und Stoßbelastungen auf die Wirbelsäule zu dämpfen (Schlick et al., 2018). Im Inneren befindet sich eine gallertartige Substanz (nukleus pulposus), welche von einem äußeren Faserring umschlossen ist. Die Bandscheibe kann bei der Handhabung von Lasten Zug-, Druck- und Schubkräfte aufnehmen – hierbei verschiebt sich der nukleus pulposus innerhalb des äußeren Faserrings in Richtung des Ortes geringerer Belastung (Zimmer & Appell, 2021).

In der Vergangenheit wurden zahlreiche biomechanische Modelle der Wirbelsäule entwickelt, mit der sich simulationsgestützt Druck- bzw. Scherkräfte oder Beuge- bzw. Torsionsmomente auf verschiedene Wirbelsäulensegmente berechnen lassen. Häufig genutzte Softwareprogramme sind beispielsweise 3DSSPP, 4D WATBAK oder Anybody. Die meisten Modelle beziehen sich hierbei auf die unteren Bandscheiben der LWS L4-L5 und L5-S1, da etwa 95 % der Schädigungsfälle der Wirbelsäule, die durch das manuelle Handhaben von Lasten entstehen, diese beiden Segmente betreffen (Jäger, 1987). Zudem liegen für die lumbalen Wirbelsäulensegmente publizierte Belastungsgrenzwerte vor, die sich entweder auf das einmalige Handhaben oder auf kumulierte Belastungen (Belastungsdosis) über eine Arbeitsschicht oder das Arbeitsleben hinweg beziehen (Jäger et al., 2019).

[4] NP-Schwere bedeutet, dass ein algorithmisches Problem mindestens so schwer lösbar ist, wie alle Probleme der Klasse NP. In der Klasse NP können Probleme mit einer nichtdeterministischen Turingmaschine in Polynomialzeit gelöst werden. Die Polynomialzeit gilt hierbei als Grenze zwischen praktisch lösbaren und praktisch unlösbaren Problemen.

Das Grundprinzip der biomechanischen Modelle ist hierbei wie folgt zu verstehen: Bei der Lastenhandhabung entstehen über die Gewichtskraft der äußeren Last und deren Hebelarm in Abhängigkeit von der Körperhaltung Ausgleichskräfte, die die Rückenmuskulatur aufbringen muss, um den Oberkörper in einer stabilen Position zu halten. Hierbei muss die Rückenmuskulatur aufgrund des deutlich kürzeren Hebelarms zur Wirbelsäule ein Vielfaches der Gewichtskraft der Last aufbringen (Goldscheid, 2008). Die resultierende Druckkraft in der Wirbelsäule setzt sich schließlich vektoriell aus der Gewichtskraft der äußeren Last und der Gegenkraft in der Rückenmuskulatur zusammen, siehe Abbildung 14. Da sich der Hebelarm der äußeren Kraft z. B. durch eine Rumpfbeugung verlängert, steigt in diesem Fall auch die Druckkraft auf die Wirbelsegmente.

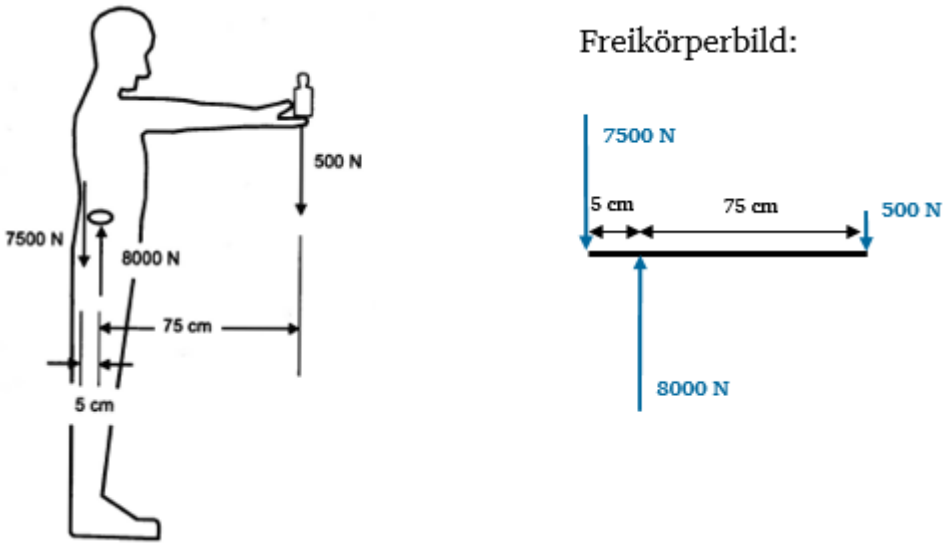
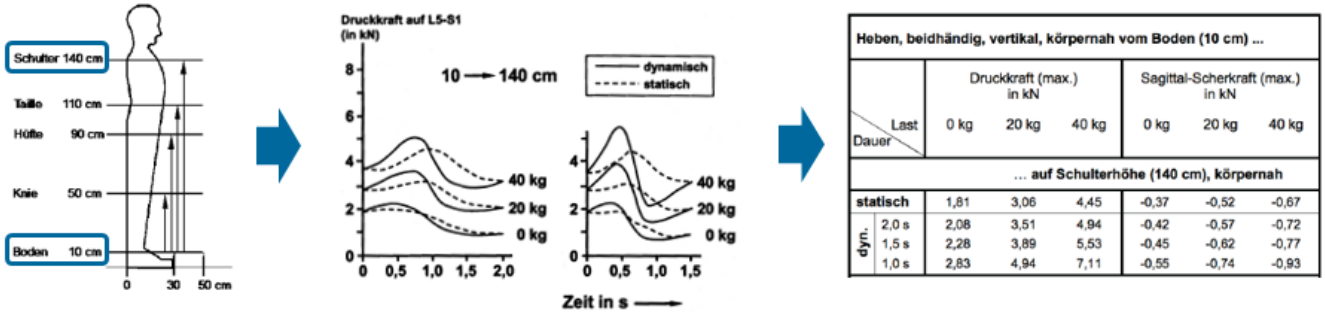


Abbildung 14: Schematische Darstellung der Berechnung von Druckkräften auf Bandscheiben (vgl. Goldscheid, 2008; Bradford & Spurling 1945)

Durch sukzessive Erweiterung dieses einfachen Modells um die Gewichtskraft der Körperteile, (dreidimensionale) Massenträgheitskräfte durch Bewegungen, vielgliedrige Skelettstrukturen oder eine Muskelmodellierung, entstehen sehr detaillierte biomechanische Modelle. Eines der im deutschsprachigen Raum am weitesten verbreiteten ist „Der Dortmunder“. Es hat den Vorteil, dass auch dreidimensionale und dynamische (inklusive Massenträgheit) Handhabungsvorgänge mit unterschiedlichen Bewegungsmustern abbildbar sind. Die Berücksichtigung dynamischer Effekte ist bei Kommissioniertätigkeiten relevant, da die Entnahmevorgänge selbst schwerer SKU meist durch ruckartiges, kraftvolles Heben geprägt sind (Glock et al., 2019). Zudem liegen für den Dortmunder im Gegensatz zu vielen anderen biomechanischen Modellen zahlreiche Untersuchungen hinsichtlich Druckkraftverläufen für verschiedenste Lastfälle vor. Aus diesen Druckkraftverläufen extrahierte maximale Druckkräfte finden sich ferner in Tabellenwerken, die zur Abschätzung der Wirbelsäulenbelastung genutzt werden können. Im Folgenden wird sich für die Bewertung der

Wirbelsäulenbelastung auf die Druckkraft auf L5-S1 beschränkt, obwohl zweifellos auch Scherkräfte oder Torsionsmomente zu Erkrankungen der Wirbelsäule beitragen.

In der Kommissionierung kommt es bei der Entnahme von SKU vor allem zum Heben (vertikale Positionsänderung) bzw. Umsetzen (Positionsänderung in etwa gleicher Aufnahme- und Zielhöhe, Jäger et al., 2002) von Lasten. Die resultierende Druckkraft ist hierbei abhängig von zahlreichen Parametern. Neben dem Lastgewicht differenziert man insbesondere zwischen symmetrischer und unsymmetrischer, einhändiger und beidhändiger, körpernaher und körperferner sowie statischer und dynamischer Lastenhandhabung. Entsprechende Untersuchungen mit dem Dortmunder liegen für das körpernahe und körperferne symmetrische Heben, das ein- und beidhändige unsymmetrische Heben sowie das ein- und beidhändige Umsetzen von Lasten vor (Jäger et al., 2001b; Jäger et al., 2002; Bongwald et al., 1995). Die entsprechenden Druckkraftverläufe und die maximalen Druckkräfte werden für verschiedene Entnahme- und Abgabehöhen, unterschiedliche sagittale Lastabstände sowie verschiedene Ausführungsdauern berechnet und tabellarisch dargestellt. Abbildung 15 zeigt beispielhaft einen Auszug aus diesen Tabellen – in diesem Fall ein symmetrisches, körpernahes Heben von einer Entnahmehöhe von 10 cm auf eine Ablagehöhe von 140 cm. Dargestellt sind Druck- und Scherkraftwerte sowohl für ein (quasi-)statisches als auch für ein dynamisches Heben.



Heben, beidhändig, vertikal, körpernah vom Boden (10 cm) ...

Dauer \ Last	Druckkraft (max.) in kN			Sagittal-Scherkraft (max.) in kN		
	0 kg	20 kg	40 kg	0 kg	20 kg	40 kg
	... auf Schulterhöhe (140 cm), körpernah					
statisch	1,81	3,06	4,45	-0,37	-0,52	-0,67
dyn. 2,0 s	2,08	3,51	4,94	-0,42	-0,57	-0,72
dyn. 1,5 s	2,28	3,89	5,53	-0,45	-0,62	-0,77
dyn. 1,0 s	2,83	4,94	7,11	-0,55	-0,74	-0,93

Abbildung 15: Beispiel von Druckkraftverläufen und Druckkrafttabellen (Jäger et al., 2001; DGUV, 2020)

Die Berechnungen basieren einheitlich auf einer Person mit einer Größe von 175 cm und einem Körpergewicht von 75 kg (Jäger et al., 2002). Trotz dieser sehr umfangreichen Untersuchungen sind diese Werte nicht unmittelbar für Kommissionierungstätigkeiten zu übernehmen. Nicht alle möglichen Zusammenhänge und Gewichtsklassen werden dargestellt. So fehlen einige Kombinationen aus Entnahme- und Abgabehöhe, insbesondere für hohe Entnahmehöhen sowie unsymmetrische Ausführungen. Zudem entsprechen die angenommenen Hebetechniken und Bewegungsmuster unter Umständen nicht dem „typischen“ Vorgehen in der PzW-Kommissionierung.

Deshalb hat Goldscheid (2008) auf Basis dieser Grundlagen ein Konzept zur Ermittlung der Wirbelsäulenbelastung explizit für die PzW-Kommissionierung mit Hilfe des Dortmunders erstellt.

Hierzu führte er Bewegungsstudien durch, um typische sagittale Lastabstände, die Ausprägung der Symmetrie sowie die Kontinuität der Höhenänderung während dem Kommissionieren in Abhängigkeit des Lastgewichts sowie der Entnahme- und Abgabehöhe bzw. -tiefe zu ermitteln. Ähnlich wie Jäger et al. (2001b, 2002) geht man bezüglich der Hebetechnik je nach Entnahmehöhe von einer Kombination zwischen „Heben aus dem Rücken“ und „Heben aus den Beinen“ aus. Im Gegensatz zu Günthner & Koch (2014), die stets eine beidhändige Handhabung annehmen, unterscheidet Goldscheid (2008) zwischen ein- und beidhändiger Handhabung anhand der SKU-Eigenschaften. Es wird vorgeschlagen, bei Artikeln mit einem Lastgewicht unter 2 kg, bei denen entweder die Breite oder Tiefe unter 10 cm und keine Abmessung über 50 cm liegt, von einer einhändigen Handhabung auszugehen. In dieser Arbeit wurde in der durchgeführten Studie die Artikelgröße so standardisiert, dass jeweils beidhändig kommissioniert wird. Eine Abänderung der Kennwerte auf einhändige Handhabung ist dennoch möglich. Ferner stellt Goldscheid (2008) fest, dass bei der Ausübung von Hebevorgängen aufgrund der kleinen Abstände zwischen Lagerplatz und Ablagefläche unabhängig vom Gewicht oder der Entnahmehöhe grundsätzlich von einer unsymmetrischen Körperhaltung ausgegangen werden muss. Symmetrische Handhabungen sind nämlich nur dann möglich, wenn „*Lasten […] symmetrisch und ohne Körperdrehung gehoben werden, wenn ein Objekt vor dem Körper aufgenommen und vor dem Körper nach oben bewegt werden kann*“ (Jäger et al., 2002). Die Last darf entsprechend weder bei der Entnahme noch bei der Abgabe seitlich des Körpers platziert sein, wie es jedoch bei einer Kommissionierung aus einem Regal (z. B. auf einen Handwagen oder eine Fördertechnik) meist der Fall ist. Dadurch ergeben sich erhöhte Druckkräfte auf die Wirbelsäule im Vergleich mit einer symmetrischen Ausführung. Ferner muss bei unterschiedlichen Entnahme- und Ablagehöhen differenziert werden, ob das Heben oder Senken der Last mit oder ohne zwischenzeitliche Unterbrechung stattfindet (z. B. Gehen) bzw. ob die Höhenänderung kontinuierlich stattfindet. Bei Entfernungen zwischen Entnahme- und Ablageplatz von bis zu 1,40 m wird festgestellt, dass Kommissionierende den Hebe- bzw. Senkvorgang unabhängig vom Lastgewicht nicht durch Gehen unterbrechen, sondern allenfalls ein „Fußversetzen“ stattfindet (Goldscheid, 2008). Ein zusätzlicher Belastungswert durch „Tragen“ des SKU zwischen Entnahme- und Ablageposition ist demnach nicht zu berücksichtigen, außer die Entnahme- und Ablageposition liegen weiter auseinander. Die Ausführungsdauer des Hebens aus verschiedenen Entnahmehöhen hat Goldscheid (2008) nach MTM-1 bestimmt und den drei Kategorien 1,0 1,5 und 2 Sekunden zugeordnet. Die Lastgewichtsstufen werden in Kilogramm-Schritten angegeben – die Druckkraftwerte können entsprechend interpoliert werden.

Aufbauend auf diesen kommissionierspezifischen Zusammenhängen ist Goldscheid (2008) in der Lage, konkrete Druckkraftwerte auf das Wirbelsäulensegment L5-S1 für die genannten Lastfälle zu berechnen. Die von Goldscheid (2008) vorgeschlagene Methodik wird für diese Arbeit in großen Teilen übernommen – nur wenige Punkte wurden geändert, um die Belastungswerte für einen LPV-Algorithmus nutzbar zu machen:

- Goldscheid (2008) gibt Druckkraftwerte nur für fünf verschiedene Entnahmehöhen zwischen 30 und 180 cm an. Die Druckkraftwerte für Kommissioniervorgänge in Entnahmehöhen dazwischen werden in 10 cm Schritten interpoliert bzw. unterhalb von 30 cm extrapoliert.
- Entnahmetiefen > 40 cm werden nicht berücksichtigt, da diese bei einer Kommissionierung aus Regalen kaum vorkommen. Dies bedeutet nach Goldscheid (2008), dass die Ausführungsdauer für alle Entnahmehöhen entsprechend MTM in die Kategorie „1 Sekunde“ gesetzt wird.
- In der Arbeit von Goldscheid (2008) werden nur Hebe- bzw. Umsetzvorgänge zur Gesamtbelastung kumuliert, deren errechnete Druckkräfte auf L5-S1 einen bestimmten Grenzwert überschreiten. Da bei der Lagerplatzvergabe jedoch auch diejenigen SKU einem Lagerplatz zugeordnet werden müssen, die je nach Entnahmehöhe unterhalb dieses Schwellenwertes liegen, wird in dieser Arbeit jeder Entnahmevorgang berücksichtigt, unabhängig von der Höhe der Druckkraft.

Auf diese Art und Weise entsteht eine Druckkrafttabelle für beidhändige, körpernahe und unsymmetrische Hebe- bzw. Umsetzvorgänge, die sich in ihren Zeilen durch die unterschiedlichen Entnahmehöhen und in ihren Spalten durch das gehandhabte Lastgewicht aufbaut. Es wird davon ausgegangen, dass das SKU auf ein Flurförderzeug (z. B. Handwagen) abgelegt werden kann, ohne dass es hierfür getragen werden muss. Die Ablagehöhe wird hierbei als konstant auf 90 cm (VDI 3657, 1993) angenommen, sodass in den zu ermittelnden Druckkraftwerten nur eine Ablagehöhe berücksichtigt werden muss. Die entsprechende Tabelle ist in Anhang E abgebildet.
Sollten in einem bestimmten Kommissioniersystem Entnahmetiefen größer als 40 cm, abweichende Ablagehöhen oder einhändige Handhabung vorkommen, so wären weitere Druckkrafttabellen dieser Art notwendig, um sie in dem zu entwickelnden LPV-Algorithmus berücksichtigen zu können. Falls Lastgewichte > 15 kg kommissioniert werden, ist eine Extrapolation der Druckwerttabelle möglich.

Ebenso liegen in der Literatur Werte für das Ziehen und Schieben von Lasten vor (z. B. Jäger et al., 2001b). Diese sollen in diesem Zusammenhang aber nur verwendet werden, um nach erfolgter Lagerplatzvergabe die Gesamtbelastung der Wirbelsäule der Kommissionierenden zu bestimmen. Als Eingangsgröße für die Lagerplatzvergabe wird die Wirbelsäulenbelastung durch das Ziehen bzw. Schieben von Handwagen nicht berücksichtigt. Grund hierfür ist zum einen, dass die resultierenden Druckkräfte im Vergleich mit den Umsetzvorgängen sehr gering sind (vgl. Glock et al., 2019). Zum anderen entsteht die höchste biomechanische Belastung beim Ziehen und Schieben durch die sogenannten „Losreißkräfte“, die zum Anfahren eines Wagens aus der Ruhe hinaus notwendig sind (Jung et al., 2005). So folgern auch Hecktor et al. (2014), dass entsprechend des Engpassprinzips die Druckkräfte auf die LWS vor allem beim Anfahren eines Wagens zu betrachten sind. Diese sind jedoch unabhängig von der geschobenen Strecke, sondern lediglich von der Häufigkeit des Anschiebens. Durch

die LPV wird jedoch maßgeblich die mit einem Handwagen oder Flurförderzeug zurückzulegende Strecke und nicht die Häufigkeit des Anschiebens beeinflusst, sodass der Einfluss der LPV auf die Belastung durch das Ziehen bzw. Schieben sehr gering ist. Dies konnte auch in der Publikation von Steinebach et al. (2020c) gezeigt werden. Zudem entfällt die Belastung durch das Ziehen und Schieben vollständig, wenn angetriebene Kommissionierwagen bzw. Flurförderzeuge verwendet werden.
Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Belastung durch Ziehen und Schieben zwar für die Gesamtbelastung der Wirbelsäule nicht vernachlässigbar ist, die Optimierung der Lagerplatzvergabe jedoch nur einen geringen Einfluss auf die biomechanische Belastung durch das Ziehen und Schieben hat – aus diesem Grund wird sie in dem folgenden LPV-Algorithmus nicht berücksichtigt.

Um die Summe der Druckkraftwerte der einzelnen Umsetzvorgänge kumulativ zu bestimmen, wird entsprechend dem BK-2108-Feststellungsverfahren das Mainz-Dortmunder Dosismodell (MDD) verwendet (Hartung et al., 1999; Jäger et al., 1999). Die Tagesdosis berechnet sich im MDD mit einer quadratisch gewichteten Druckkraft auf das Wirbelsäulensegment L5-S1 F_i als Belastungshöhe sowie mit der Belastungsdauer t_i nach folgender Formel:

$$D = \sqrt{\frac{\sum_i {F_i}^2 \cdot t_i}{8h}} \cdot 8h$$

Die maximal während der Lasthandhabung auftretende Druckkraft wird für die gesamte Belastungsdauer angenommen (Jäger et al., 2002). Die Wirbelsäulenbelastungsdosis $b_{i,j}$ durch die Umsetz- bzw. Hebevorgänge von den SKU i mit dem Lastgewicht m aus dem Regallagerplatz j mit definierten Entnahmehöhen auf einen Handwagen bzw. ein Flurförderzeug soll in Kapitel 3.2 als erste Zielgröße der eLPV minimiert werden.

3.1.2 Bestimmung der Kommissionierzeit

Die Kommissionierzeit ist die zentrale Zielgröße von Lagerplanenden und der am häufigsten in Planungskonzepten minimierte bzw. evaluierte Parameter (Reyes et al., 2019). Gu et al. (2010) unterstreichen dies durch die Aussage, dass, falls durch Prozessänderungen die Möglichkeit besteht, Kommissionierzeiten zu reduzieren, diese Veränderungen höchstwahrscheinlich umgesetzt werden.
Wie bereits in Kapitel 2.1.4 erwähnt, setzt sich die Kommissionierzeit aus der Basis-, Tot, Weg- und Greifzeit zusammen. Für die Basis- und Totzeit können konstante Werte angenommen werden, die in dieser Arbeit nicht genauer untersucht werden – sie beeinflussen die Lagerplatzvergabe nicht. Die Weg- und Greifzeit hingegen hängen direkt vom jeweiligen Lagerplatz ab.

Wegzeit

Die im Lager zurückzulegenden Wegstrecken werden maßgeblich durch die Lagerplatzvergabe und das Routing determiniert. Viele Publikationen beschränken sich zur Ermittlung der Kommissionierzeiten auf die von den Kommissionierenden benötigte Zeit für die zurückzulegenden Distanzen – sie ergibt sich aus den horizontalen Komponenten des Lagerplatzes und kann über zweidimensionale kartesische Koordinaten beschrieben werden. Im Lager ergeben sich bei konventionellen Layouts (z. B. one- oder two-block Layout) sogenannte Manhattan-Distanzen (Pohl et al., 2011), sodass ein Netz aus rechtwinkligen, geraden Wegen entsteht. Die benötigte Zeit $t_{Weg,j}$ für die Distanz zwischen dem Depot und einem bestimmten Lagerplatz j ergibt sich schließlich aus dem Quotienten der Wegstrecke d_j und der Geh- bzw. Fahrgeschwindigkeit v:

$$t_{Weg,j} = \frac{d_j}{v}$$

Beim Single-Order Picking (in dieser Arbeit definiert als Prozess, bei dem nach jedem einzelnen Pick zum Depot zurückgekehrt wird) muss diese Zeit aufgrund des Hin- und Rückweges zweimal je SKU berücksichtigt werden. Beim Multi-Order Picking sammeln die Kommissionierenden hingegen in einer „Tour“ mehrere SKU ein, bevor sie zum Depot zurückkehren. In diesem Fall müssen auch Distanzen zwischen zwei Lagerplätzen berücksichtigt werden. Im Folgenden wird die Optimierung der LPV zunächst auf Basis eines Single-Order Ansatzes entwickelt, da sich die mathematische Herleitung deutlich weniger komplex gestaltet (siehe Kapitel 7.1). Zudem ist das SOP durchaus auch in der Praxis anzutreffen (Dukic et al., 2010).

Die Geschwindigkeit v hängt im Wesentlichen davon ab, ob den Kommissionierenden ein motorisiertes Fahrzeug zur Verfügung steht. In diesem Fall werden in der Literatur durchschnittliche Fahrgeschwindigkeiten von 2,5 m/s angenommen (Vogt, 1997). Bei einem manuell zu schiebenden Wagen wird von deutlich geringeren Geschwindigkeiten im Bereich zwischen 0,7 m/s und 1,3 m/s bei langen Strecken ohne Stopp- bzw. Lenkbewegungen ausgegangen (BAuA, 2019a). Im Bereich der Kommissionierung werden bei vergleichbaren Optimierungsverfahren häufig 0,75 m/s als durchschnittliche Bewegungsgeschwindigkeit beim Ziehen bzw. Schieben eines Wagens gewählt (Gue et al., 2006; Pan et al., 2012; Elbert et al., 2015) – dieser Setzung wird sich im Folgenden angeschlossen. Zudem würde die Möglichkeit bestehen, die Geschwindigkeit in Abhängigkeit des Wagengewichts (Elbert & Müller, 2017a) oder von zu fahrenden Manövern (z. B. Anzahl an Kurven, Elbert & Müller, 2017b) zu parametrisieren.

Greifzeit

Neben der horizontalen Komponente des Lagerplatzes kann jedoch auch die vertikale Komponente (Entnahmehöhe) einen nicht vernachlässigbaren Einfluss auf zeitliche Zielgrößen haben (Pulverich,

2009; Larco et al., 2010). Der bezüglich der Wirbelsäulenbelastung eingeführte „Goldene Zone Ansatz“ hat auch bezüglich der Greifzeit Relevanz, da die Entnahme von SKU in mittleren Entnahmehöhen schneller möglich ist, als in sehr hohen bzw. tiefen Regalebenen (Petersen et al., 2005). Dies liegt nicht nur an der kürzeren Entfernung des Hand-Arm-Systems zu Bereichen innerhalb der Goldenen Zone und demnach kürzeren Bewegungswegen – ebenso lassen sich SKU hier schneller identifizieren (Larco et al., 2010). Untersuchungen zeigen zudem, dass sich der Effekt des zeitintensiveren Greifens außerhalb der mittleren Regalebenen bei älteren Mitarbeitenden (über 50 Jahre) signifikant verstärkt (Gajsek et al., 2018).

Neben der Entnahmehöhe hängt die Greifzeit ferner von Artikeleigenschaften, wie dem Gewicht oder der Greifbarkeit (z. B. Ausgestaltung von Griffen), ab. Finnsgard & Wanström (2013) untersuchen in einer vollfaktoriellen Analyse die Stärke verschiedener Einflussgrößen auf die Greifzeit – jedoch werden nur zwei verschiedene Entnahmehöhen betrachtet, sodass die ermittelten Zeitwerte nicht direkt für diese Arbeit verwendet werden können. Ferner entwickelte Gudehus (2012) eine halbempirische Entnahmezeitformel, mit welcher sich mithilfe von acht verschiedenen Einflussfaktoren die Greifzeit berechnen lässt. Dieses Vorgehen ist jedoch wenig etabliert und hat zudem strikte Limitationen, wie beispielsweise ein maximales Lastgewicht von 10 kg, was für viele Kommissioniersysteme nicht ausreichend ist.

Galka & Günthner (2016) empfehlen für Kommissioniertätigkeiten deshalb die Verwendung von „Systemen vorbestimmter Zeiten“. Diese ermöglichen es, Plan- bzw. Vorgabezeiten für manuelle Arbeitstätigkeiten durch das Zusammensetzten von Zeitbausteinen einzelner Bewegungselemente zu ermitteln (Schlick et al., 2018). Weltweite Verbreitung fand innerhalb dieser Verfahren vor allem das Methods-Time Measurement (MTM), welches heute branchenübergreifend über den gesamten Produktentwicklungsprozess hinweg Anwendung findet (Bokranz & Landau, 2012). So schlagen zahlreiche Autoren bzw. Normen vor, die MTM-Bausteinsysteme auch zur Ermittlung von Kommissionierzeiten einzusetzen (Sadowsky, 2007; Goldscheid, 2008; Reif, 2009; ten Hompel et al., 2011; Siepenkort, 2013; VDI 4481, 2019).

Auf Basis des Grundverfahren MTM-1 wurden verdichtete MTM-Bausteinsysteme entwickelt, wie das Universelle Analysiersystem (MTM-UAS) oder das Verfahren für Einzel- und Kleinserienfertigung (MTM-MEK). Die verdichteten Verfahren besitzen ein geringeres Methodenniveau als das MTM-1, sodass die entsprechenden Tätigkeiten bzw. Bewegungen weniger detailliert aufgeschlüsselt werden müssen und die betrachteten Prozesse weniger „Routinebildungschancen“ benötigen (Bokranz & Landau, 2012). Kernelement der MTM-Verfahren sind Normzeitwertkarten, aus denen sich die jeweiligen Sollzeiten von Bewegungen (MTM-1) bzw. Grundvorgängen (MTM-UAS, MTM-MEK) für eingearbeitete, durchschnittlich veranlagte Mitarbeitende entsprechend der Charakteristika einer Arbeitsaufgabe identifizieren und zu einer Gesamtzeit addieren lassen (Stinson & Wehking, 2012; Bokranz & Landau, 2012). Die Sollzeiten werden in der Zeiteinheit „Time Measurement Unit“ (TMU) angegeben, wobei eine

TMU 0,036 s entspricht. Im Folgenden wird die mittels MTM kalkulierte Zeit eines Entnahmevorgangs eines SKU i aus einem Regallagerplatz j als Greifzeit $t_{Greif,i,j}$ bezeichnet.

Die im Gegensatz z. B. zur Montage variableren Bewegungen in der PzW-Kommissionierung lassen die Verwendung verdichteter MTM-Verfahren zu. Der Empfehlung von Galka & Günthner (2016) folgend wird in dieser Arbeit MTM-UAS zur Ermittlung der Greifzeiten eingesetzt – auf höherverdichtete Verfahren, z. B. das MTM Bausteinsystem zu Standardvorgängen der Logistik, sollte nur dann zurückgegriffen werden, wenn das Methodenniveau dies erfordert (Galka & Günthner, 2016).

Die Kalkulation der Greifzeiten erfolgt analog zu Steinebach et al. (2021b). Das Umsetzen von SKU wird über die drei Grundvorgänge „Aufnehmen und Platzieren“[5], „Körperbewegungen“[6] und „visuelle Kontrolle“[7] zeitlich bewertet.

Der Grundvorgang „Aufnehmen und Platzieren“ kann in Abhängigkeit des Lastgewichts, der Bewegungslänge und der Einfachheit der SKU-Aufnahme anhand einer Normzeitwertkarte bewertet werden, siehe Tabelle 1.

Tabelle 1: Ausschnitt der MTM-UAS Normzeitwertkarte „Aufnehmen und Platzieren“ (vgl. Galka & Günthner, 2016)

Gewicht	Aufnahme	Abgabe	Code	Bewegungslänge l		
				≤ 0,2 m	0,2 m < l ≤ 0,5 m	0,5 m < l ≤ 0,8 m
≤ 1 kg	leicht	ungefähr	AA	20	35	50
	schwierig	ungefähr	AD	20	45	60
	Hand voll	ungefähr	AG	40	65	80
1 kg < m ≤ 8 kg		ungefähr	AH	25	45	55
8 kg < m ≤ 22 kg		ungefähr	AL	80	105	115

In dieser Arbeit wird von einer leichten Artikelaufnahme ausgegangen – eine schwierige Aufnahme kann jedoch grundsätzlich ebenfalls vorkommen, z. B. bei der Kommissionierung von Schüttgut. Hingegen ist in den meisten Kommissioniersystemen lediglich eine „ungefähre“ Artikelabgabe von Nöten (Galka &

[5] Aufnehmen und Platzieren ist „der Grundvorgang, bei dem mit den Fingern oder mit der Hand ein oder mehrere Gegenstände unter Kontrolle gebracht und zu einem Zielort bewegt werden. Aufnehmen und Platzieren beginnt mit einem Hinlangen und endet mit einem Loslassen“ (Bokranz & Landau, 2012)

[6] „Als Körperbewegungen wird jener Grundvorgang bezeichnet, bei dem die Körperachse zeitbestimmend gedreht, verschoben oder geneigt wird.“ (Bokranz & Landau, 2012)

[7] „Der Prozessbaustein [Visuelle Kontrolle] […] beginnt […] mit dem zeitbestimmenden Bewegen der Augen zu einem Prüfmerkmal und endet, wenn der Blick wieder zum Ausgangspunkt zurückgekehrt oder die letzte Entscheidung getroffen ist.“ (Bokranz & Landau, 2012)

Günthner, 2016). Die Abgabe des SKU soll wie auch bei der Kalkulation der Wirbelsäulenbelastung auf einem Handwagen oder Flurfördergerät mit einer konstanten Höhe von 90 cm stattfinden. Das Gewicht der jeweiligen SKU muss bekannt sein und kann meist den Stammdaten entnommen werden – somit kann man den Artikel direkt in eine der drei Gewichtskategorien einordnen. Hierbei spielt es keine Rolle, ob das SKU ein- oder beidhändig gehandhabt wird (Bokranz & Landau, 2012). Die Bewegungslänge ist entsprechend der 8. UAS-Regel zu bestimmen – es ist jeweils die größte zurückgelegte Entfernung der Hand beim „Hinlangen" oder „Bringen" maßgebend. Bewegungslängen von unter 20 cm treten in der Regel kaum auf, da Start- und Endpunkt der SKU-Entnahme meist weiter voneinander entfernt sind. In bodennahen Regalebenen bzw. Entnahmehöhen über Schulterhöhe ist hingegen mit Bewegungslängen der höchsten Kategorie zu rechnen, da bereits die vertikale Distanz vorwiegend über 50 cm beträgt (Steinebach et al., 2021b). Die Bewegungslängen werden für jeden Lagerplatz für eine Person mit 175 cm Körpergröße (analog zu den Druckkraftwerten) ermittelt.
Bei Umsetzvorgängen von SKU unterer Regalebenen wird zusätzlich der Prozessbaustein „Senken und Aufrichten des Rumpfes" aus dem Grundvorgang „Körperbewegung" addiert, welcher bei einem Beugen, Bücken oder Knien gleichermaßen verwendet werden muss (Bokranz & Landau, 2012; Steinebach et al., 2021b). Es wird angenommen, dass die Kommissionierenden den Handwagen bzw. das Flurförderzeug unmittelbar neben dem Lagerplatz abstellen können und somit keine weitere Körperbewegung notwendig ist – andernfalls ist diese entsprechend zu ergänzen.
Letztlich wird ein Normzeitwert für die visuelle Kontrolle der Pickliste als eigenständiger Grundvorgang analysiert, da diese nicht gleichzeitig mit dem Pickvorgang erfolgt. Laut Regelwerk werden 15 TMU für je bis zu drei Ziffern, Buchstaben oder Wörtern mit bis zu drei Silben vergeben (Bokranz & Landau, 2012). Die in dieser Arbeit verwendete Lagerplatzmarkierung besteht aus einer alphanumerischen Kodierung mit drei Zeichen, sodass 15 TMU vergeben werden.

Schließlich ergibt sich die Gesamtzeit, um einen Lagerplatz j anzusteuern, ein bestimmtes SKU i zu entnehmen und zum Depot zurückzukehren nach folgender Formel:

$$t_{i,j} = 2 \cdot t_{Weg,j} + t_{Greif,i,j}$$

Der hier beschriebenen Logik folgend müssen SKU umso eher möglichst nahe am Depot bzw. in mittleren Entnahmehöhen gelagert werden, je höher ihre Zugriffshäufigkeit ist, um die Kommissionierzeit zu minimieren. In Anhang F ist eine Matrix mit Kommissionierzeiten für alle Kombinationen aus SKU i und Lagerplätzen j im Single-Order Picking der Evaluierungsstudie dieser Arbeit gegeben, welche zur Optimierung mit dem LPV-Algorithmus benötigt wird.

3.2 Erstellung einer bi-kriteriellen Optimierung

Die in Kapitel 3.1 hergeleiteten Kennwerte sollen im Folgenden als Eingangsparameter genutzt werden, um einen bikriteriellen ergonomischen LPV-Optimierungsalgorithmus zu entwickeln, der sowohl die Wirbelsäulenbelastung als auch die Kommissionierzeit berücksichtigt. Ziel des Modells soll die Zuordnung der disjunkten Menge I von SKU zu einer disjunkten Menge J von Lagerplätzen sein. Für den Fall, dass die Anzahl von SKU und Lagerplätzen gleich ist, handelt es sich um ein minimales perfektes biparitites Matching Problem (Tittmann, 2011). In Tabelle 2 sind die für das Modell verwendeten Variablen und Indizes zusammengefasst.

Tabelle 2: Definitionen der verwendeten Variablen und Indizes (vgl. Steinebach et al., 2021b)

Index	Bedeutung
i	SKU-Index mit $i = 1, \dots, I$
j	Lagerplatz-Index mit $j = 1, \dots, J$
I	Gesamtanzahl an SKU
J	Gesamtanzahl an Lagerplätzen
f_i	Zugriffshäufigkeit des SKU i je Zeitperiode
x_{ij}	Binäre Entscheidungsvariable zur Lagerung von SKU i auf Lagerplatz j mit $x_{i,j} = \begin{cases} 1, & wenn\ SKU\ i\ auf\ Lagerplatz\ j\ gelagert\ wird \\ 0, & sonst \end{cases}$
B	Kumulierte Wirbelsäulenbelastung
T	Kommissionierzeit (gesamt)
b_{ij}	Kennwert zur Druckkraftdosis auf L5-S1 von SKU i auf Lagerplatz j
$t_{Weg,ij}$	Wegzeit, um zu SKU i an Lagerplatz j zu gelangen
$t_{Greif,ij}$	Greifzeit, um SKU i aus Lagerplatz j zu entnehmen
t_{ij}	Kommissionierzeit von SKU i auf Lagerplatz j
B^{opt}	Minimale kumulierte Wirbelsäulenbelastung
T^{opt}	Minimale Kommissionierzeit
λ	Gewichtungsfaktor $\in$ [0,1]
$\bar{B}$	Dimensionslose kumulierte Wirbelsäulenbelastung
$\bar{T}$	Dimensionslose Kommissionierzeit
G	Funktionswert der gewichteten Zielfunktion

Die Lösung des eLPV-Problems wird analog zu Steinebach et al. (2021b) hergeleitet. Zunächst sind die beiden Zielfunktionen und die dazugehörigen Optimierungsprobleme getrennt voneinander aufzustellen. Als erstes wird die Wirbelsäulenbelastung mittels der Kennwerte zur Druckkraftdosis b_{ij} auf L5-S1 (Anhang E) minimiert:

$$\min B = \sum_{i=1}^{I} \sum_{j=1}^{J} x_{i,j} \cdot b_{i,j} \cdot f_i$$

Analog dazu lässt sich eine Minimierungsfunktion bezüglich der Kommissionierzeit mit Hilfe der zeitlichen Kennwerte $t_{i,j}$ (Anhang F) aufstellen:

$$\min T = \sum_{i=1}^{I} \sum_{j=1}^{J} x_{i,j} \cdot t_{i,j} \cdot f_i$$

$$mit\ t_{i,j} = 2 \cdot t_{Weg,j} + t_{Greif,i,j}$$

Die binäre Entscheidungsvariable $x_{i,j}$ gibt an, ob ein SKU i einem Lagerplatz j zugeordnet wird oder nicht. Zudem ist zu beachten, wie hoch die Zugriffshäufigkeit f_i je Zeiteinheit des SKU i ist, da ein Artikel durchaus auch mehrmals innerhalb dieser Zeiteinheit (z. B. eine Arbeitsschicht) gepickt werden kann. Diesbezüglich ist zu beachten, dass die zu kommissionierende Entnahmemenge nicht zwangsläufig der tatsächlichen Zugriffshäufigkeit entspricht, da auch mehrere SKU auf einmal gegriffen werden können. In diesem Fall ist das Gesamtgewicht je Pick zu ermitteln und die Häufigkeit der Zugriffe entsprechend zu reduzieren. Für die beiden genannten Zielfunktionen sind zudem folgende Nebenbedingungen einzuhalten:

$$\sum_{i=1}^{I} x_{i,j} = 1 \qquad \forall j$$

$$\sum_{j=1}^{J} x_{i,j} = 1 \qquad \forall i$$

$$x_{i,j} \in \{0; 1\}$$

Die ersten beiden Nebenbedingungen drücken aus, dass jedem Lagerplatz j genau ein SKU i zugeordnet wird und vice versa. Mit diesen beiden Zielfunktionen und deren Nebenbedingungen lassen sich die Lagerplatzzuordnungen mit minimaler Wirbelsäulenbelastung B^{opt} sowie minimaler Kommissionierzeit T^{opt} bestimmen, die bei getrennter Betrachtung jedoch deutlich voneinander abweichen. Dies zwingt die Lagerplanenden zu einer Trade-Off Entscheidung (Battini et al., 2016).

Um eine gleichzeitige Optimierung nach belastungsorientierten und zeitlichen Kriterien zu erreichen, müssen beide Zielgrößen in einem bi-kriteriellen Optimierungsmodell zusammengeführt werden. Hierfür bietet sich die weit verbreitete „Gewichtete-Summen-Methode“ an, was eine Normierung der

Zielfunktion voraussetzt, um dimensionslose Parameter zu erhalten (Marler & Arora, 2004). Die Formulierung der neuen Zielfunktion ist gegeben durch:

$$\min G = \lambda \cdot \bar{B} + (1 - \lambda) \cdot \bar{T}$$

Die dimensionslosen mathematischen Ausdrücke für die Wirbelsäulenbelastung $\bar{B}$ und die Kommissionierzeit $\bar{T}$ ergeben sich durch eine Normierung anhand der Optimalwerte der jeweiligen Zielgröße B^{opt} bzw. T^{opt} (vgl. Battini et al., 2016):

$$\bar{B} = \frac{(\sum_{i=1}^{I} \sum_{j=1}^{J} x_{i,j} \cdot b_{i,j} \cdot f_i) - B^{opt}}{B^{opt}}$$

$$\bar{T} = \frac{(\sum_{i=1}^{I} \sum_{j=1}^{J} x_{i,j} \cdot t_{i,j} \cdot f_i) - T^{opt}}{T^{opt}}$$

Für die Optimierung der Zielfunktion G gelten die gleichen Nebenbedingungen wie für die einkriteriellen Optimierungen der Zielfunktionen bezüglich B und T (siehe oben). Über den Gewichtungsfaktor λ ($0 \leq \lambda \leq 1$) kann nun festgelegt werden, welches der beiden Ziele stärker gewichtet werden soll. Mit steigendem λ wird die Druckkraft auf das Wirbelsäulensegment L5-S1 reduziert, während die Kommissionierzeit indes weniger stark berücksichtigt wird. Für die Extremwerte $\lambda = 1$ bzw. $\lambda = 0$ erhält man die belastungs- bzw. zeitminimierte Lösung.

Die Menge an Lösungen verschiedener λ ergibt die Pareto-Front. Jede dieser Lösungen stellt ein Pareto-Optimum dar, bei dem eine Reduzierung der Wirbelsäulenbelastung nur durch eine Erhöhung der Kommissionierzeit erreicht werden kann und umgekehrt. Die entsprechende Pareto-Kurve stellt die Trade-Off Entscheidung zwischen den beiden Zielgrößen grafisch dar – ein idealtypisches Beispiel für den Fall starker Interdependenz zwischen den Zielgrößen bei bi-kriterieller Optimierung ist in Abbildung 16 dargestellt. Folgendes Prinzip soll mit Hilfe der fiktiven Pareto-Kurve erklärt werden:

Jeder Punkt der Kurve ist ein Pareto-Optimum einer bestimmten λ-Gewichtung. Kombinationen aus Belastungs- und Zeitwerten, die links bzw. unterhalb der Kurve liegen, sind in dem spezifischen Lager, auf das sich die Pareto-Kurve bezieht, nicht möglich. Rechts bzw. oberhalb der Kurve hingegen liegen alle ineffizienten Lösungen, die in der Praxis bei fehlender oder ungenügender LPV-Planung bzw. abweichenden Zielgrößen durchaus vorkommen (Larco et al., 2017). Ferner lässt sich erkennen, dass eine reine Belastungsminimierung ($\lambda = 1$) mit einer relativ hohen Kommissionierzeit einhergeht und umgekehrt. Aus diesem Grund bieten sich gegebenenfalls Kompromisslösungen an, die ebenfalls in Abbildung 16 eingetragen sind. Am Beispiel der „belastungspriorisierten Kompromisslösung“ wird deutlich, dass diese potentiell in der Lage ist, die Belastung relativ niedrig in der Nähe des Optimums zu halten, jedoch die benötigte Kommissionierzeit durch die korrespondierende LPV deutlich reduziert

wird. Ebenso unterscheidet sich die Kommissionierzeit zwischen der zeitpriorisierten Kompromisslösung und der Zeitminimierung nur marginal, während die kumulierte Druckkraft auf L5-S1 durch die Kompromisslösung deutlich reduziert werden kann. Neben den in Abbildung 16 eingezeichneten Pareto-Optima sind durchaus auch andere Punkte als belastungs- bzw. zeitpriorisierte Kompromisslösungen denkbar. Ferner ist es Unternehmen nun möglich, sich innerhalb dieses Diagrammes einzuordnen und festzustellen, ob bzw. wie weit sie von einem Pareto-Optimum entfernt sind.
Insgesamt sollen in der empirischen Studie dieser Arbeit vier solcher λ-Gewichtungen miteinander verglichen werden. Hierfür wird der eLPV-Algorithmus in Kapitel 5 auf das konkrete SKU-Portfolio und das verwendete Lagerlayout angewendet.

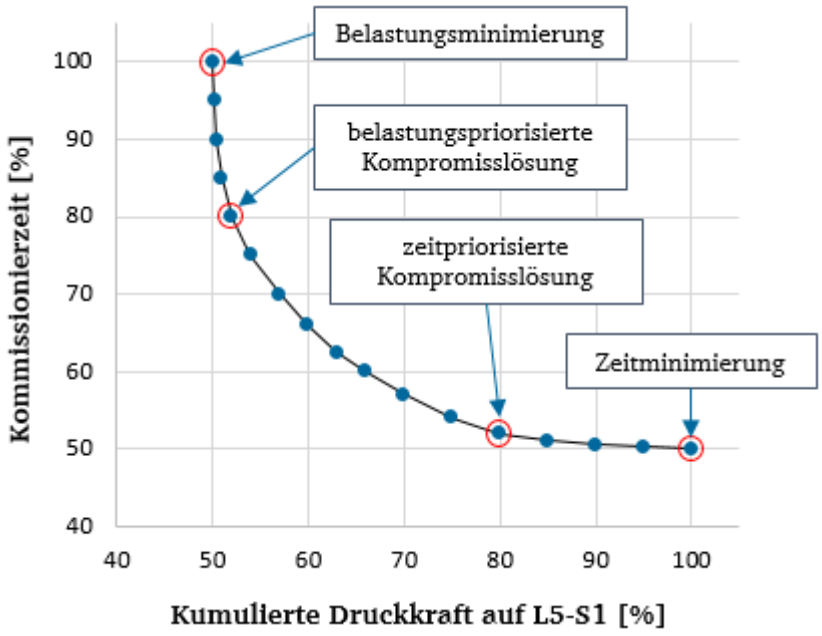


Abbildung 16: Beispielhafte Pareto-Kurve bei bi-kriterieller Optimierung (eigene Darstellung)

Der hier beschriebene eLPV-Algorithmus wurde in der Programmiersprache Java mit der open-source Entwicklungsumgebung „Eclipse“ erstellt. Der Code lädt die Belastungs- und Zeitkennwerte aus Excel-Dateien ein und liest diese als quadratische Matrizen (identische Anzahl an SKU und Lagerplätzen) ein. Über eine Schnittstelle wird das Optimierungsmodell mit IBM® ILOG CPLEX Optimization Studio gelöst. Mithilfe einer Excel-Ausgabe kann die ergonomisch optimierte LPV anhand der Matrix der Entscheidungsvariablen $x_{i,j}$ abgelesen werden. Zudem werden in der Excel-Datei die Zielfunktionswerte und die resultierende Pareto-Kurve abgebildet. Der vollständige Java-Code ist in Anhang G abgebildet.

Der eLPV-Algorithmus ist für verschiedene gängige Lagerlayouts und Regaltypen anwendbar – lediglich die Kennwerte zur Wirbelsäulenbelastung b_{ij} und Kommissionierzeit $t_{i,j}$ müssen entsprechend angepasst werden. Ferner ist es denkbar, dass mehr Lagerplätze zur Verfügung stehen als SKU auf diese verteilt

werden müssen ($I < J$) – es würden also Lagerplätze leer bleiben. Um die präsentierte eLPV dennoch nutzen zu können, müssen „Dummy-SKU“ eingeführt werden, die kein Lastgewicht (m = 0 kg) besitzen und eine Zugriffshäufigkeit von null aufweisen – so werden die „nicht vorhandenen“ SKU den ungünstigsten Lagerplätzen zugeordnet.

Außerdem ist es denkbar, den Algorithmus nicht nur für eine feste Lagerplatzvergabe zu verwenden, sondern ihn an einen klassenbasierten Ansatz anzupassen, falls eine höhere Kapazitätsauslastung im Lager gewünscht ist. Für diesen Zweck würden die Artikel nicht einem definierten Lagerplatz, sondern einem bestimmten Bereich im Lager zugeordnet. Die Kennwerte, die sich eigentlich auf bestimmte Kombinationen aus SKU und Lagerplatz beziehen, könnten beispielsweise für ausgewählte Bereiche gemittelt werden – gleichzeitig würden dadurch jedoch zeitliche und belastungsorientierte Optimierungspotentiale ungenutzt bleiben.

4 Untersuchungsmodell und Leithypothesen

Der Literaturüberblick hat gezeigt, dass eine ergonomische Lagerplatzvergabe, wie sie in Kapitel 3 hergeleitet wurde, bisher noch nicht empirisch analysiert wurde. Zu diesem Zweck wird ein Untersuchungsmodell hergeleitet, das sich an den aufgestellten Forschungsfragen orientiert und die Forschungsinhalte grafisch darstellt. Im zweiten Teil dieses Kapitels werden Leithypothesen zu den einzelnen Forschungsfragen hergeleitet.

4.1 Untersuchungsmodell

Ausgangspunkt des Modells bildet die in Kapitel 3 entwickelte ergonomische Lagerplatzvergabe. Die Umwelt, in der dieser Algorithmus Anwendung findet, ist das manuelle Kommissionierlager mit Regallagerung. Hierin gehen Kommissionierende mit individuellen Eigenschaften, Fähigkeiten, Fertigkeiten und Bedürfnissen ihren Arbeitsaufgaben nach. Diese bestehen darin, Artikel aufgrund von Kundenbestellungen aus einem Sortiment im Lager zu sammeln und mit einem technischen Hilfsmittel (z. B. Handwagen oder Flurförderzeug) zu einem Depot zu bringen (De Koster et al., 2007). Unterschieden wird in diesem Untersuchungsmodell zwischen Single-Order Picking und Multi-Order Picking.

Die eLPV verändert bei variierenden λ die Arbeitsaufgabe. Zwar müssen entsprechend der Pickliste die identischen SKU in gleicher Anzahl kommissioniert werden, die korrespondierenden Lagerplätze ändern sich jedoch. Damit gehen veränderte Kombinationen aus Greifhöhen, Lastgewicht und Zugriffshäufigkeit sowie abweichende zurückzulegende Wegstrecken einher (Larco et al., 2017).

Der Gewichtungsparameter λ ist somit als unabhängige Variable zu betrachten. Insgesamt sollen vier verschiedene λ-Ausprägungen untersucht werden – die beiden Optima der einzelnen Zielgrößen sowie je eine belastungs- und eine zeitpriorisierte Kompromisslösung. Die Bestimmung der konkreten λ-Werte in dem betrachteten Anwendungsfall werden in Kapitel 5 dargelegt.

Die Auswirkungen der variierenden LPV-Strategien werden in den Kommissionierstudien in Bezug auf mehrere abhängige Variablen untersucht: die körperliche Beanspruchung sowie die Leistung der Kommissionierenden. Zur Beurteilung der Beanspruchung werden physiologische Messverfahren sowie Befragungen nach subjektiven Beanspruchungen eingesetzt. Die menschliche Leistung setzt sich wie in Kapitel 2.1.4 beschrieben aus der Kommissionierzeit sowie der Kommissionierqualität zusammen. Es wird von einer Entkopplung der Beanspruchung und der Leistung ausgegangen, da die Versuchsteilnehmenden angehalten werden, die Kommissionierung schnellstmöglich und fehlerfrei durchzuführen. Allerdings soll ein potentieller Querbezug zwischen den beiden Größen untersucht werden.

Die abgebildeten Zusammenhänge werden durch die individuellen Eigenschaften, Fähigkeiten, Fertigkeiten und Bedürfnisse der Kommissionierenden moderiert – diese Wirkungszusammenhänge werden nur am Rande betrachtet. Die Eigenschaften der Versuchsteilnehmenden werden jedoch als Kontrollvariablen aufgenommen. Das vollständige Untersuchungsmodell ist in Abbildung 17 inklusive der im Folgekapitel hergeleiteten Leithypothesen visualisiert.

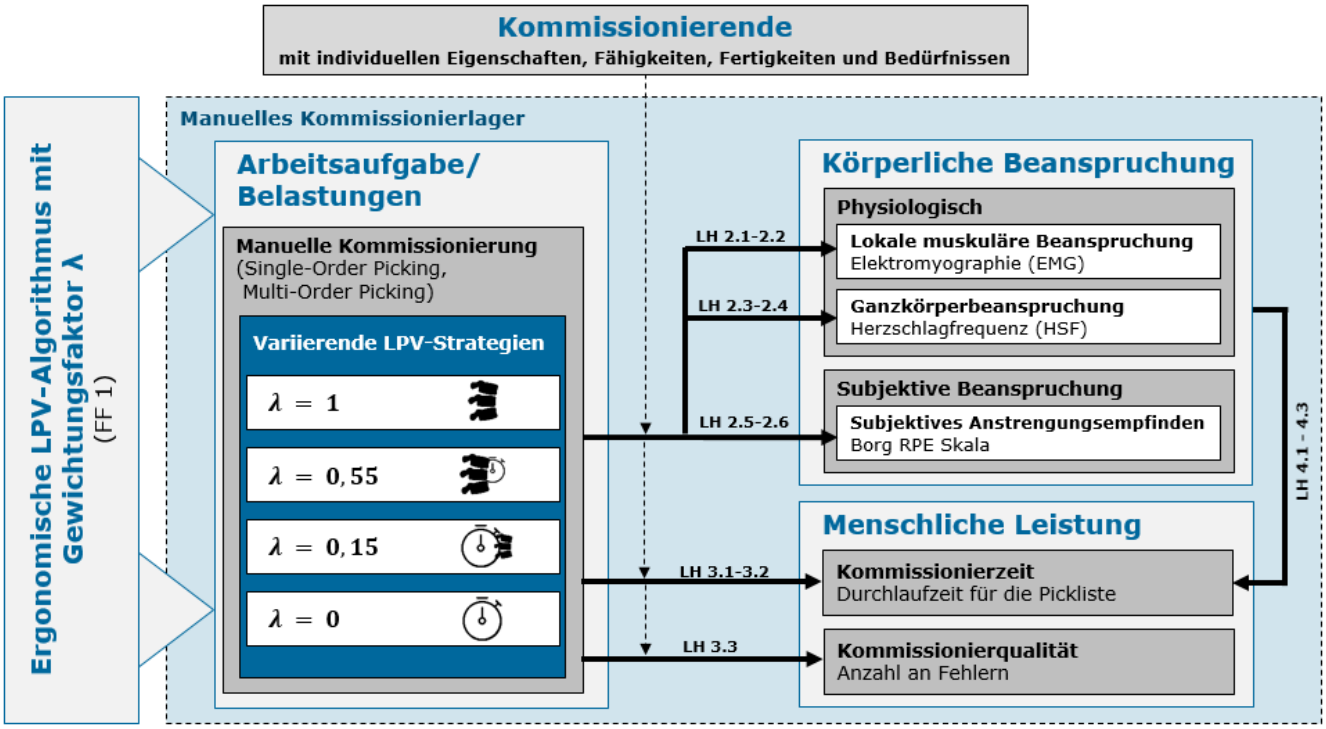


Abbildung 17: Modell zur Untersuchung des Einflusses einer eLPV auf die Beanspruchung und die menschliche Leistung in der manuellen Kommissionierung (eigene Darstellung)

4.2 Leithypothesen

Um die in Kapitel 2.4 formulierten Forschungsfragen zu beantworten, werden im Folgenden Leithypothesen abgeleitet. Diese sollen später in Subhypothesen konkretisiert und anhand einer empirischen Laborstudie statistisch ausgewertet werden. An dieser Stelle sei erwähnt, dass die aufgestellten Hypothesen als Alternativhypothesen zu verstehen sind. Die zur Überprüfung angewendeten statistischen Tests hingegen beziehen sich auf die Nullhypothese. Wenn diese Nullhypothese verworfen wird, gilt die Alternativhypothese als wahrscheinlich.

Bisher liegen keine empirischen Untersuchungen mit physiologischen bzw. zeitlichen Messungen bezüglich der Lagerplatzvergabe in der Kommissionierung vor. Jedoch sind teilweise aus numerischen Simulationen Wirkungszusammenhänge zwischen der Lagerplatzvergabe und deren Auswirkungen auf die Belastung (nicht Beanspruchung) und ökonomische Größen bekannt (z. B. Battini et al., 2016; Larco et al., 2017; Gajsek et al., 2021). Zudem sind weitere Hinweise auf die möglichen Auswirkungen aus

arbeitswissenschaftlicher Literatur bekannt, die zwar nicht die LPV zum Thema haben, sich aber mit ähnlichen Einflussgrößen beschäftigen, siehe Kapitel 2.3.2. Mit Hilfe dieser Vermutungen können gerichtete Unterschieds- und Zusammenhangshypothesen aufgestellt werden.
Bezüglich Forschungsfrage 1 werden keine Leithypothesen aufgestellt, da diese Frage sich primär mit der methodischen Herleitung der ergonomischen LPV beschäftigt. Diese wird anhand der Forschungsfragen 2 bis 4 und den dazugehörigen Hypothesen evaluiert.

In zahlreichen Publikationen wird vermutet, dass durch eine geeignete LPV die Belastung bzw. Beanspruchung signifikant reduziert werden kann (Battini et al., 2016; Larco et al., 2017; Gajsek et al., 2021). In Bezug auf die hier entwickelte eLPV ist davon auszugehen, dass bei $\lambda = 1$ belastungskritische SKU in ergonomisch günstigen Entnahmehöhen platziert werden, sodass die Belastung bzw. Beanspruchung der Kommissionierenden minimiert ist. Bei niedrigeren λ hingegen werden die SKU mit hohen Zugriffshäufigkeiten tendenziell eher in der Nähe des Depots gelagert – dabei kann durch den Algorithmus in Kauf genommen werden, dass belastungskritische SKU auf ergonomisch ungünstigen Lagerplätzen positioniert werden. Fraglich ist jedoch, inwiefern diese mathematische Herleitung in empirischen Versuchen bei der hier entwickelten eLPV messtechnisch nachgewiesen werden können.
Die Leithypothesen 2.1 – 2.6 befassen sich folglich damit, inwiefern die verschiedenen λ -Ausprägungen die Beanspruchung der Kommissionierenden beeinflussen. Es werden zu den drei verschiedenen Messgrößen „muskuläre Beanspruchung des Arm-Schulter-Systems sowie des Rückens“, „Herzschlagfrequenz“ und „subjektives Anstrengungsempfinden“ jeweils eine Unterschieds- und eine Zusammenhangshypothese aufgestellt. Die Zusammenhangshypothese analysiert die Korrelation zwischen den prognostizierten Belastungen und den im Versuch aufgetretenen Beanspruchungen. Tabelle 3 listet diese Leithypothesen inklusive der Literatur, die Hinweise bezüglich der vermuteten Hypothesen geben, auf.
Ferner ergeben sich bezüglich der Forschungsfrage 3 die Leithypothesen 3.1 – 3.3 in Tabelle 4. Die ersten beiden Hypothesen betreffen die Veränderung der Kommissionierzeit infolge variierender eLPV-Strategien. Erneut werden je eine Unterschieds- und eine Zusammenhangshypothese aufgestellt. Die Unterschiedshypothese analysiert den Einfluss der λ-Ausprägungen auf die Kommissionierzeit. Die Zusammenhangshypothese gleicht die per MTM-UAS prognostizierte Kommissionierzeit mit der tatsächlich benötigten Zeit ab. In der Literatur wird auch regelmäßig von einem Einfluss der Ergonomie auf die Kommissionierqualität gesprochen (Schwerha, 2001; Lolling, 2003; Grosse et al., 2015, Setayesh et al, 2021). So sollen sich bei Kommissioniersystemen mit hohen körperlichen Anforderungen die Fehlerquoten signifikant erhöhen (Menk, 1999, Setayesh et al., 2021). Bisher gibt es hierzu jedoch kaum wissenschaftlichen Studien. Leithypothese 3.3 untersucht entsprechend die Beeinflussung der Kommissionierqualität durch die eLPV mit einer Unterschiedshypothese. Da kein Prognosemodell für die

Anzahl an Kommissionierfehlern vorliegt, wird im Gegensatz zur Beanspruchung und der Kommissionierzeit keine Zusammenhangshypothese aufgestellt.

Tabelle 3: Leithypothesen 2.1 – 2.6

FF2: Wie wird die Beanspruchung durch eine ergonomische LPV beeinflusst?	
$LH_{2.1}$	Die lokale physiologische Beanspruchung der Muskeln des Arm-Schulter-Systems sowie des Rumpfes unterscheidet sich signifikant zwischen allen zu untersuchenden λ-Gewichtungen der eLPV außer zwischen den λ-Gewichtungen der Belastungsoptimierung und der belastungspriorisierten Kompromisslösung. (Verracchia et al., 2018; Lee et al., 2021b; Skals et al., 2021a; Steinebach et al., 2021b; Steinebach et al., 2021c)
$LH_{2.2}$	Es besteht eine signifikante positive Korrelation zwischen der prognostizierten Belastung und der gemessenen lokalen Muskelbeanspruchung bei den verschiedenen zu untersuchenden λ-Gewichtungen der eLPV. (Verracchia et al., 2018; Lee et al., 2021b; Skals et al., 2021a; Steinebach et al., 2021b; Steinebach et al., 2021c)
$LH_{2.3}$	Die globale physiologische Beanspruchung des Herz-Kreislauf-Systems unterscheidet sich signifikant zwischen allen zu untersuchenden λ-Gewichtungen der eLPV außer zwischen den λ-Gewichtungen der Belastungsoptimierung und der belastungspriorisierten Kompromisslösung. (Battini et al., 2016; Calzavara et al., 2018; Kluth et al., 2012; Snook & Ciriello, 1991)
$LH_{2.4}$	Es besteht eine signifikante positive Korrelation zwischen der prognostizierten Belastung und der gemessenen globalen Herz-Kreislauf-Beanspruchung bei den verschiedenen zu untersuchenden λ-Gewichtungen der eLPV. (Battini et al., 2016; Calzavara et al., 2018; Kluth et al., 2012; Snook & Ciriello, 1991)
$LH_{2.5}$	Das subjektiv empfundene Anstrengungsempfinden unterscheidet sich signifikant zwischen allen zu untersuchenden λ-Gewichtungen der eLPV außer zwischen den λ-Gewichtungen der Belastungsoptimierung und der belastungspriorisierten Kompromisslösung. (Larco et al., 2017; Labus & Gajsek, 2018)
$LH_{2.6}$	Es besteht eine signifikante positive Korrelation zwischen der prognostizierten Belastung und dem subjektiven Anstrengungsempfinden bei den verschiedenen zu untersuchenden λ-Gewichtungen der eLPV. (Larco et al., 2017; Labus & Gajsek, 2018)

Tabelle 4: Leithypothesen 3.1 – 3.3

FF3: Wie wird die Kommissionierleistung durch eine ergonomische Lagerplatzvergabe beeinflusst?	
$LH_{3.1}$	Die Kommissionierzeiten unterscheiden sich signifikant zwischen allen zu untersuchenden λ-Gewichtungen der eLPV außer zwischen den λ-Gewichtungen der Zeitoptimierung und der zeitpriorisierten Kompromisslösung. (Petersen et al., 2005; Larco et al., 2017; Franzke et al., 2018; Battini et al., 2016)
$LH_{3.2}$	Es besteht eine signifikante positive Korrelation zwischen der durch MTM prognostizierten Kommissionierzeit und der tatsächlich gemessenen Kommissionierzeit bei den verschiedenen zu untersuchenden λ-Gewichtungen der eLPV. (Galka & Günthner, 2016)
$LH_{3.3}$	Die Anzahl der fehlerhaft kommissionierten Positionen unterscheiden sich signifikant zwischen den zu untersuchenden λ-Gewichtungen der eLPV. (Lolling, 2003, Rammelmeier et al., 2012, Caputo et al., 2017, Eklund, 1995; Setayesh et al., 2021)

In Forschungsfrage 4 wird ein potentieller Querbezug zwischen der Beanspruchung und der Kommissionierzeit thematisiert. So kann vermutet werden, dass eine geringere Belastung bzw. Beanspruchung der Kommissionierenden die Kommissionierleistung indirekt erhöht. Zu erklären ist das über zwei gegenläufige Effekte, die auftreten, wenn in der eLPV die Belastungszielgröße stärker gewichtet wird (Erhöhung von λ):

1. Die Laufwege werden bei einer Erhöhung von λ länger, sodass höhere Kommissionierzeiten die Folge sind.
2. Gleichzeitig könnte die geringere Beanspruchung dazu führen, dass für die Kommissionierenden höhere Pickleistungen möglich sind und die Kommissionierzeit entsprechend sinkt (z. B. Calzavara et al., 2019b).

Bezogen auf die Kommissionierzeit wird in den folgenden Leithypothesen vermutet, dass der erste Effekt deutlich überwiegt, er jedoch durch den zweiten Effekt teilweise kompensiert werden kann. Konkret heißt dies, dass bei einer Erhöhung von λ zwar mit höheren Kommissionierzeiten zu rechnen ist, die Erhöhung der Zeiten aber aufgrund der Beanspruchungsreduzierung weniger stark ausfällt, als sich dies durch die Erhöhung der Laufwege vermuten lassen würde. Eine Betrachtung des Einflusses auf die unterlaufenen Kommissionierfehler wird bei diesem Querbezug nicht betrachtet. Die entsprechenden Zusammenhangshypothesen sind in Tabelle 5 zu finden.

Tabelle 5: Leithypothesen 4.1 – 4.3

FF4: Kann ein Teil der Kommissionier durch die eLPV aufgrund einer geringeren Beanspruchung kompensiert werden?	
$\mathbf{LH_{4.1}}$	Es existiert ein signifikant negativer Zusammenhang zwischen der Höhe der muskulären Beanspruchungsreduzierung eines Individuums durch die eLPV und der Höhe der Zeitzunahme.
$\mathbf{LH_{4.2}}$	Es existiert ein signifikant negativer Zusammenhang zwischen der Höhe der Beanspruchungsreduzierung des Herz-Kreislauf-Systems eines Individuums durch die eLPV und der Höhe der Zeitzunahme.
$\mathbf{LH_{4.3}}$	Es existiert ein signifikant negativer Zusammenhang zwischen der Höhe der Reduzierung des subjektiven Anstrengungsempfindens eines Individuums durch die eLPV und der Höhe der Zeitzunahme.

Die Leithypothesen sind im Untersuchungsmodell in Abbildung 17 durch Pfeile dargestellt.

5 Untersuchungskonzept der empirischen Studie

Im Folgenden wird das Untersuchungskonzept zur Evaluierung der in Kapitel 3 hergeleiteten eLPV und der in Kapitel 4 vorgestellten Leithypothesen sorgfältig beschrieben. Zur Untersuchung der Wirkungszusammenhänge beim Einsatz der eLPV wurde eine Laborstudie konzipiert. Eine Beschreibung des Versuchsaufbaus und –ablaufs sowie die eingesetzten Messmethoden sollen zunächst eine umfassende Übersicht bezüglich des Versuchsdesigns geben (vgl. Katzenbach et al., 2021). Im Anschluss wird das Kollektiv der Versuchsteilnehmenden deskriptiv dargestellt. Das Kapitel schließt mit der Detaillierung der Leithypothesen sowie der Erläuterung der statistischen Datenauswertung.

5.1 Versuchsaufbau

In Anlehnung an Döring & Bortz (2016) handelt es sich bei dem vorliegenden Untersuchungsdesign um eine quantitative empirische Laborstudie, welche als Primäranalyse mit einer zuvor ausgewählten Stichprobe durchgeführt wird. Die Auswahl des Lagersaufbaus bzw. eines repräsentativen Artikelportfolios ist aufgrund der großen Anzahl an Gestaltungsmöglichkeiten und unterschiedlicher SKU-Eigenschaften nicht trivial und dennoch entscheidend für interne und externe Validität der Studie. Aus diesem Grund wird nachfolgend die Entscheidung für das ausgewählte Lagerlayout sowie das SKU-Portfolio begründet.

Lagerlayout

Die Kommissionierversuche fanden im Gebäude L1|01 der Technischen Universität Darmstadt in Raum 73 statt. Für die Konstruktion des Lagers wurde eine Fläche von etwa 70 m² benötigt. Zudem stand zusätzlich genügend Platz zum Aufbau von Messequipment im Raum zur Verfügung.

In Anlehnung an Aussagen von Lagermanagern im Rahmen von Interviews wurde ein one-block Layout als die Lageranordnung mit der höchsten Praxisrelevanz identifiziert. Auch in der Literatur ist dies das am häufigsten untersuchte Layout, sodass sich hier an der gewählten Lagerstruktur von Grosse et al. (2014) und Elbert et al. (2015) orientiert wurde. Das konkrete Lager für die Kommissionierversuche bestand aus insgesamt acht Reihen von Fachbodenregalen gleicher Bauart und vier Gängen. Es ist in Abbildung 18 aus der Draufsicht abgebildet. Die Reihen hatten eine Länge von jeweils 5,0 m und eine Höhe von 2,0 m. Jedes Regal besaß fünf Regalböden auf den Höhen 0 cm, 40 cm, 80 cm, 120 cm und 160 cm, sodass keine Entnahmehöhen vorlagen, die von den Versuchsteilnehmenden nicht mehr erreicht werden können (VDI 3657, 1993). Je Reihe und Regalebene befanden sich 15 Lagerplätze (Breite = 0,33 m), sodass das Lager insgesamt über eine Kapazität von 600 Lagerplätzen verfügte. Das Seitenverhältnis des Lagers betrug bei einer Länge von 7,2 m und einer Breite von 5,0 m (ohne Front- und rückseitigen Gang) etwa 1,44, was nach Guo et al. (2016) für ein one-block Layout bei einer

20-60-Nachfrageverteilung[8] in etwa dem Optimum zur Wegeminimierung entspricht. Das Depot war mittig auf der Längsseite des Lagers positioniert und hatte einen Abstand von 1,5 m zu den Regalreihen. Auf der Rückseite der Regalreihen befand sich ein Quergang, sodass schleifengangförmige Routen durch das Lager möglich waren. Die Gangbreite zwischen zwei Fachbodenregalen war mit etwa 1,15 m breiter als die in BGR 234 geforderte Mindestbreite für Kommissioniersysteme, bei denen nur per Hand kommissioniert wird.

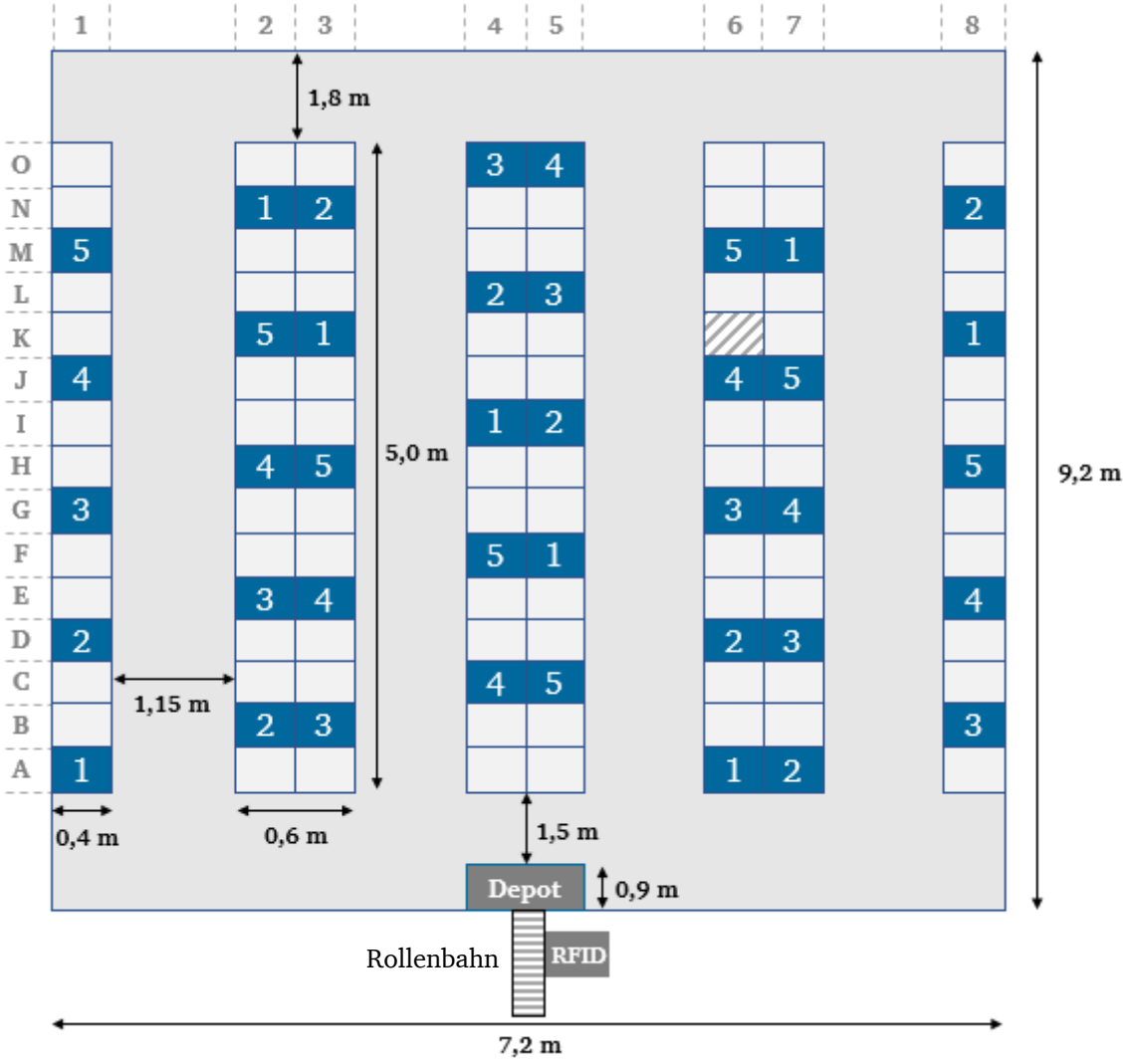


Abbildung 18: Lagerlayout der empirischen Studie aus der Draufsicht (eigene Darstellung)

Bei der Lagerplatzkennzeichnung wurde sich an Praxiserfahrungen und Empfehlungen aus der Literatur (Lolling, 2003) orientiert – eine alphanumerische Kodierung kennzeichnete jeden Lagerplatz eindeutig entsprechend dem Schema „Regalreihe-Lagerplatztiefe-Regalebene“. Die Regalreihen wurde von links

[8] Eine 20-60 Nachfrageverteilung bedeutet, dass 20% der SKU für 60% der Nachfrage verantwortlich sind.

nach rechts mit 1 bis 8 beziffert, die Lagerplatztiefe bezeichnete die Distanz ausgehend vom Depot innerhalb eines Ganges mit A bis O und die Regalebene definierte die Höhe des Fachbodens von unten nach oben mit den Ziffern 1 bis 5. So ist beispielsweise der Lagerplatz in „Regalreihe 6“, „Lagerplatztiefe K“ und „Regalebene 4“ über die Kodierung 6-K-4 gekennzeichnet – dieser Lagerplatz ist in Abbildung 18 grau schraffiert. Die Schriftgröße auf der Pickliste sowie der Kennzeichnung unterhalb der jeweiligen Lagerplätze wurde nach DIN 1450 (2013) gewählt. Zudem wurde auf eine ausreichend starke und gleichmäßige Beleuchtung innerhalb des Lagers geachtet.

Alle Lagerplätze wurden mit formstandardisierten SKU belegt. Um den Aufwand des Versuchs in einem vertretbaren Rahmen zu halten, wurden nicht alle 600 SKU in die Lagerplatzvergabe einbezogen. Vielmehr standen lediglich 40 Lagerplätze zur Zuweisung zur Verfügung – fünf SKU in jeder Regalreihe bzw. acht SKU auf jeder Regalebene. Nur diese Artikel sollten in den Versuchsszenarien tatsächlich kommissioniert werden. Die restlichen Lagerplätze wurden mit identisch aussehenden, für die Versuchspersonen nicht unterscheidbare „Dummy-SKU“, gefüllt. Die „tatsächlichen“ Lagerplätze sind Abbildung 18 zu entnehmen – alle blau hinterlegten Lagerplätze wurden von dem eLPV berücksichtigt. Die Zahlen in den Kästchen deuten die Regalebene an, auf welcher sich der entsprechende Lagerplatz befindet.

Um die aus dem Regal entnommenen SKU durch das Lager zu transportieren, stand den Versuchsteilnehmenden ein Kommissionierwagen mit einer Ablagefläche (85 × 48 cm) auf der idealen Ablagehöhe von 90 cm (VDI 3657, 1993) und Schiebegriffen auf beiden Seiten zur Verfügung. Am Depot wurden die Artikel über eine um wenige Grad geneigte Rollenbahn, die sich ebenfalls auf einer Höhe von 90 cm befand, abtransportiert. Während des Transports über die Rollenbahn wurde zudem ein RFID-Transponder im Inneren der Kartons über einen korrespondierenden Sensor ausgelesen, sodass eine automatische Erfassung aller korrekt bzw. fehlerhaft getätigten Kommissioniervorgänge ermöglicht wurde. Schließlich wurde oberhalb der Regale eine Kamera angebracht, um die Versuche zu filmen und ein Setzen von Markern in den Messsystemen zu gestatten. Abbildung 19 zeigt Fotos des Versuchsaufbaus.

Abbildung 19: Fotographien des Versuchsaufbaus (rechts mit Depot und Rollenbahn)

SKU-Portfolio

Ziel war es, ein möglichst realitätsnahes Szenario abzubilden. Aus diesem Grund wurde auf Daten aus den Warehouse Management Systemen von insgesamt zehn Industrieunternehmen zurückgegriffen, um die im Versuch verwendeten SKU-Eigenschaften zu bestimmen. Insbesondere sollte die Gewichtsverteilung der Artikel sowie deren Nachfragestruktur ermittelt werden. Die Ergebnisse dieser Erhebung sind Anhang H zu entnehmen. Das SKU-Portfolio dieses Versuchs bestand aus 40 Artikeln, da ebenso 40 Lagerplätze in der eLPV berücksichtigt wurden. Die SKU teilten sich proportional entsprechend der Praxiserhebung in bestimmte Gewichtsklassen zwischen 0,25 und 15 kg (mittleres Gewicht = 3,88 ± 3,91 kg) ein. Wenn auch in der Praxis höhere Lastgewichte vorkommen, wurden diese aus ethischen Gründen in diesem Versuch aufgrund der Verletzungsgefahr bei gering belastbaren Personen nicht berücksichtigt. Zudem wurden die Zugriffshäufigkeiten entsprechend der ermittelten Nachfragestruktur festgelegt – es ergeben sich Kommissionierwahrscheinlichkeiten zwischen 0,1 und 5 Zugriffen (mittlere Zugriffshäufigkeit = 1,2 ± 1,4 Zugriffe je SKU) für die verschiedenen Artikel. Dies bedeutet, dass manche Artikel nur auf den Picklisten jeder zehnten Versuchsperson zu finden sind, während sich andere Artikel bis zu fünfmal auf jeder Pickliste befinden. Dies entspricht in etwa einer 20-60-Nachfrageverteilung (siehe Anhang H). Eine Übersicht über das gesamte SKU-Portfolio mit den korrespondierenden Gewichten und Zugriffshäufigkeiten ist in Anhang I zu finden.

Um nicht zu viele unabhängige Variablen zu haben und die interne Validität (eindeutiger Rückschluss der unabhängigen Variablen auf die Effekte der abhängigen Variablen) zu sichern, wurde das Volumen und die Form der SKU standardisiert und somit konstant gehalten (Döring & Bortz, 2016). Die Maße der SKU wurden mit 25 cm × 20 cm × 20 cm so gewählt, dass nach den Regeln von Goldscheid (2008) nur beidhändige Handhabung in Frage kam – in dem angewandten eLPV-Algorithmus waren entsprechend die Belastungs-Kennwerte für beidhändiges Handhaben von Lasten hinterlegt.

Bei den SKU selbst handelte es sich um einen Karton, der zur Erbringung der definierten Lastgewichte mit einer bestimmten Menge Sand gefüllt war.

Pickliste

Auftrags-Nr.: 89654-658

01.06.2021 09:33
Seite 1/2

Kunde: K-0186
Auftragsnummer: 89654-658
Bemerkung: Tor 10; kein Gefahrgut enthalten (Szenario 1: λ = 0)

Position	Lagerplatz	Menge	Artikelnummer	Artikelbezeichnung	Gewicht (kg)
1	6-A-1	1	00040	Batterie 44Ah	7
2	3-B-3	1	00038	Pedalkappen 10 St.	2
3	5-C-5	1	00039	Schwungrad	10
4	3-E-4	1	00036	Antenne	0,75
5	4-F-5	1	00035	Kühlregler	3

Abbildung 20: Ausschnitt aus einer Pickliste der Kommissionierversuche (eigene Darstellung in Anlehnung an Sevim et al., 2015)

Um den Versuchspersonen die Auftragsinformationen zu übermitteln, wurde eine papierbasierte Pickliste genutzt, da diese zumindest in kleineren und mittelgroßen Lagerhäusern noch die vorrangige Methode ist (Behnisch et al., 2017) und sie im Rahmen der Versuche am einfachsten ohne Störeffekte umzusetzen war. Bei der Gestaltung der Pickliste wurden gängige Gestaltungsempfehlungen berücksichtigt (VDI 3657, 1993; DIN 1450, 2013; Lolling, 2003). Ein Auszug aus einer beispielhaften Pickliste ist Abbildung 20 zu entnehmen.

Anwendung des eLPV-Algorithmus und Auswahl der λ-Ausprägungen

Der eLPV-Algorithmus wurde nun auf das angenommene Lagerlayout sowie den SKU-Datensatz angewendet. Es ergab sich eine typische Pareto-Kurve (Abbildung 21), wie sie auch bei einer Vielzahl alternativer SKU-Portfolios in ähnlicher Form festgestellt wurde. Pareto-Optima wurden für alle λ-Ausprägungen in 0,05-er Schritten kalkuliert. Es zeigt sich, dass für das dargestellte Szenario maximale Reduzierungen der kumulierten Wirbelsäulenbelastung von etwa 28,7 % und Zeitersparnisse von 17,9 % im Vergleich der beiden Optima möglich sind.

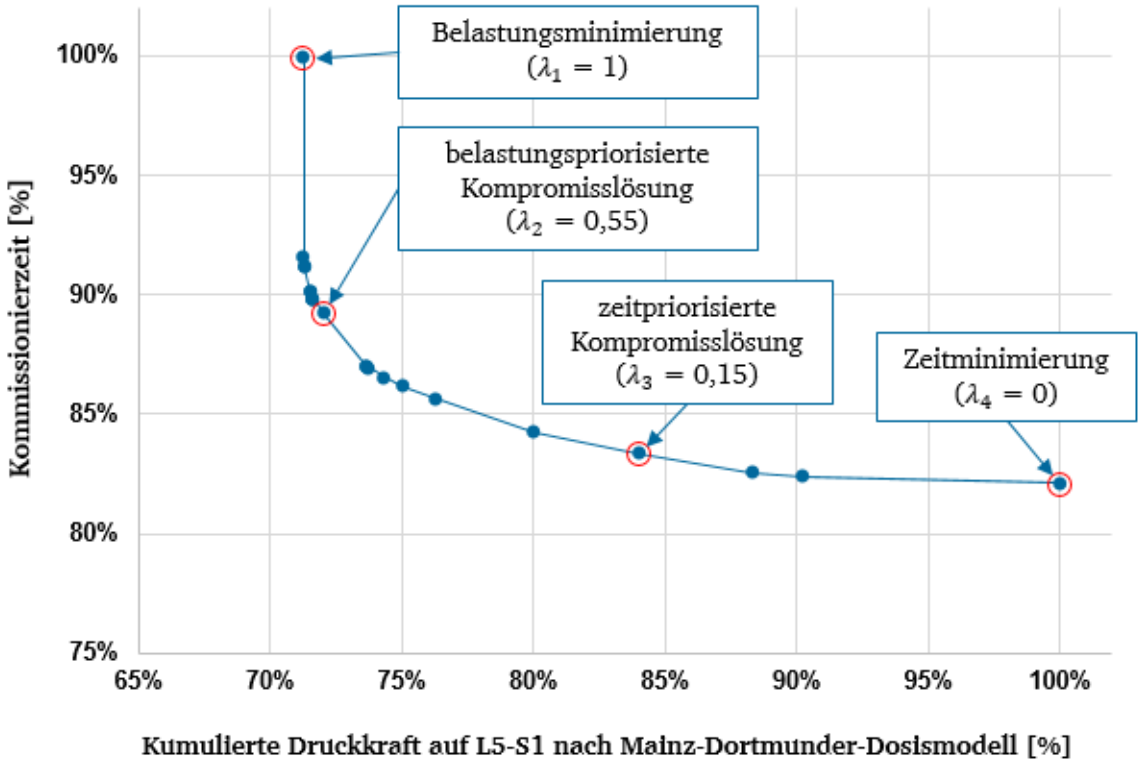


Abbildung 21: Pareto-Kurve der eLPV auf Basis des im Versuch verwendeten Lagerlayouts und SKU-Datensatzes (eigne Darstellung)

Wie in Kap. 3.2 erläutert, können für Lagerplanende Kompromisslösungen zwischen Belastungs- und Zeitminimierung attraktiv sein. Insbesondere Lagerplatzvergabe-Strategien, bei denen eine Zielgröße

stark verbessert werden kann, ohne dass sich die zweite substantiell verschlechtert, sind diesbezüglich interessant. In Gesprächen mit Entscheidungstragenden der Intralogistik bzw. Lagerplanenden wurde deutlich, dass eine Belastungsreduzierung zwar immer sehr gewünscht ist, man jedoch kaum bereit ist, im Gegenzug signifikant an Effizienz zu verlieren. Eine Erhöhung der Kommissionierzeit um etwa 2 % wurde meist als akzeptabel bewertet, wenn dem ein Vorteil bzgl. der Belastungszielgröße gegenüber steht. In dem Untersuchungsdesign dieser Arbeit ist dieser Punkt bei $\lambda = 0{,}15$ zu finden (zeitpriorisierte Kompromisslösung). Analog dazu wurde auch die λ-Ausprägung gesucht, bei der die Kommissionierzeit bestmöglich optimiert wird, ohne sich vom Belastungsminimum ausgehend um mehr als 2 % zu verschlechtern. Die entsprechende Lagerplatzvergabe liegt bei $\lambda = 0{,}55$ (belastungspriorisierte Kompromisslösung). Zu jeder der vier relevanten λ-Gewichtungen gehört eine spezifische Zuordnung von SKU zu Lagerplätzen – diese sollen im Kommissionierversuch als unabhängige Variable dienen.

5.2 Messmethoden / Datenerhebung

Während der Kommissionierversuche kamen verschiedene Messmethoden bzw. –systeme zum Einsatz. Bei manueller Lastenhandhabung können wie bereits beschrieben eine Reihe von Belastungen auftreten. Um diese zu erfassen und „*die Folgen der Belastung (d.h. die individuelle Beanspruchung) adäquat einzuschätzen, sollten gleichzeitig mehrere Dimensionen der Belastung ermittelt werden, die neben der Muskel-Skelett-Belastung z. B. die Beanspruchung des Herz-Kreislauf-Systems und die subjektiv erlebte Beanspruchung einbeziehen*“ (AWMF, 2013). Zudem werden zuverlässige Methoden benötigt, um die Kommissionierleistung akkurat zu erfassen. Die in dieser Untersuchung eingesetzten Methoden zur Beanspruchungs- und Leistungsermittlung sowie die entsprechende Datenauswertung werden im Folgenden vorgestellt.

5.2.1 Fragebogen bezüglich personenbezogener Daten

Für die Studie wurde ein dreiteiliger Fragebogen konzipiert, welcher in Anhang J abgebildet ist. Fragebogen A beschäftigt sich mit personenbezogenen Daten wie dem Alter, Geschlecht und der Körpergröße der Versuchspersonen. Zudem werden gesundheitliche Beschwerden des Muskel-Skelett-Systems erfragt. Ein weiterer Bestandteil ist die bisherige Kommissioniererfahrung der Versuchspersonen. So wird nach der Anzahl an Jahren mit Erfahrung in der manuellen Kommissionierung und den Branchen gefragt, in denen die Erfahrung gesammelt wurde (z. B. Automobilbranche, Chemie & Pharma oder Handel). Zudem sollte eine Einschätzung zur eigenen Kommissionierleistung bezüglich zeitlicher und qualitativer Kriterien im Vergleich mit Kolleginnen und Kollegen gegeben werden. Der Fragebogen enthält vorrangig geschlossene Fragen mit fest vorgegebenen Antwortmöglichkeiten.

Fragebogen B wurde vom Versuchsleitenden ausgefüllt und beinhaltet Daten zum subjektiven Anstrengungsempfinden der Versuchsteilnehmenden. Die korrespondierende Borg RPE Skala wird in Kapitel 5.2.4 genauer beschrieben.

Im Fragebogenteil C konnten nach dem Versuch Angaben zur Bewertung der Übertragbarkeit der Studie in die Praxis bzw. zur Ähnlichkeit der Tätigkeiten im Versuch mit der Kommissioniererfahrungen der Versuchspersonen gemacht werden. Auf einer fünfpoligen Likert-Skala soll die Zustimmung zu fünf versuchsspezifischen Aussagen bewertet werden. Beispielhaft sei dies anhand der Frage C1 aufgezeigt, welche lautet: „Die Artikelgewichte im Versuch waren vergleichbar mit jenen aus meiner Kommissioniererfahrung." Die Versuchspersonen haben nun die Möglichkeit zwischen den Antworten „stimme nicht zu", „stimme eher nicht zu", „weder noch", „stimme eher zu" und „stimme voll zu" zu wählen. Zusätzlich kann bei mangelnder Zustimmung (die ersten beiden Antwortmöglichkeiten) angegeben werden, ob die Artikelgewichte im Versuch leichter oder schwerer sind als bei der realen Berufstätigkeit.

Weiter gibt es Fragen bezüglich der körperlichen Anstrengung, der technischen Ausstattung und dem Lagerlayout – jeweils im Vergleich zwischen dem Versuch und der eigenen Berufserfahrung. Zuletzt wird im Fragebogen bewertet, ob das Messequipment (Elektroden, Kabel, Brustgurt) bei den Kommissioniertätigkeiten eingeschränkt hat.

5.2.2 Elektromyographie

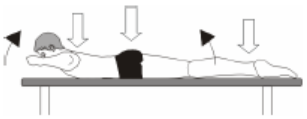
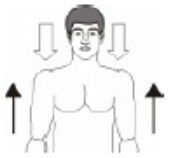
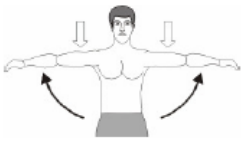
In dieser Arbeit soll zur objektiven Analyse der muskulären Beanspruchung die Oberflächen-Elektromyographie dienen. Mit diesem Verfahren lassen sich Aktionspotentiale, die bei der Muskelinnervierung entstehen, mittels Elektroden an der Hautoberfläche aufnehmen und auswerten (Raez et al., 2006). Die Höhe der elektrischen Signale korreliert hierbei mit der aufgebrachten Muskelkraft (Kluth et al., 2013), sodass eine Beurteilung der Beanspruchung und eine ergonomische Analyse von Arbeitsplätzen bzw. –prozessen ermöglicht wird (Merletti & Parker, 2004).

Die Krafterzeugung entsteht durch elektrische Impulse, die über das Nervensystem und letztlich die motorischen Endplatten auf die Muskelfasern übertragen werden. Durch chemische Reaktionen entsteht in den Muskelzellen eine Depolarisation sowie eine darauffolgende Repolarisation, welche einen elektrischen Impuls auslöst, der als Aktionspotential verstanden werden kann und zur Kontraktion des Muskels führt. Dabei zieht sich der Muskel zusammen und verkürzt sich (Silverthorn, 2010). Die Summe vieler überlagerter Aktionspotentiale kann mit einem Elektrodenpaar und entsprechendem Differenzverstärker aufgezeichnet, grafisch visualisiert und schließlich weiterverarbeitet werden.

Die Muskelauswahl der Studie orientiert sich zum einen an anderen in der Literatur verwendeten Muskelgruppen, bei denen ebenfalls Hebe- bzw. Umsetzvorgänge untersucht wurden. Zum anderen sollen Muskeln untersucht werden, die aus anatomischen Gründen für die Bewegungsmuster in der

Kommissionierung besonders relevant sind. Tabelle 6 listet alle untersuchten Muskeln inklusive deren Funktionen und der Positionierung der entsprechenden Elektroden.

Tabelle 6: Funktion, Elektrodenpositionierung und MVC-Übung der ausgewählten Muskeln (SENIAM (2021), Schünke et al., 2018, Konrad, 2011)

Muskel	Bereich	Funktion	Elektrodenpositionierung	MVC-Übung
m. multifidus	Unterer Rücken	Aufrichtung, Rotation, Lateralflexion und Extension der Wirbelsäule	Auf der Linie von der kaudalen Spitze der hinteren spina iliaca superior zum Zwischenraum zwischen L1 und L2 auf Höhe des Dornfortsatzes von L5 (etwa 2-3 cm von der Mittellinie entfernt)	
m. erector spinae (iliocostalis)		Aufrichtung der Wirbelsäule; Streckung und Lateralflexion der Lendenwirbelsäule	Einfingerbreit medial von der Linie von der hinteren spina iliaca superior zum tiefsten Punkt der unteren Rippe auf Höhe von L2	
m. trapezius pars descendens	Oberer Rücken/ Nacken-Schulter-Bereich	Stabilisierung der Schulter beim Umsetzen von Lasten; Heben der Arme	In der Mitte der Verbindung zwischen dem Akromion zur Wirbelsäule am Wirbel C7	
m. deltoideus pars acromialis		Abduktion des Schultergelenks	Auf der Linie vom Akromion bis zum lateralen Epikondylus des Ellenbogens. Hier sollte die größte Muskelwölbung vorliegen	
m. biceps brachii	Oberarm	Beugung des Ellenbogens; Supination des Unterarms	Auf der Linie zwischen dem medialen Akromion und der fossa cubitalis auf 1/3 der Länge vom fossa cubitalis aus	

Da das verwendete EMG-System eine begrenzte Anzahl an Eingangskanälen besitzt, wird sich in den Kommissionierversuchen auf insgesamt fünf Muskeln einer Körperseite beschränkt. Analog zu Jensen et al. (1999) und Steinebach et al. (2021c) wird die Messung der Muskeln auf der jeweils dominanten Körperseite durchgeführt, um eine Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Personen aufgrund der Körperseitenabhängigkeit der EMG-Signale zu gewährleisten (Diederichsen et al., 2007). Zudem wurden aufgrund der Betrachtung der Wirbelsäulenbelastung nur Muskeln des Oberkörpers und explizit zwei Muskeln aus dem Bereich des unteren Rückens gewählt: m. multifidus und m. erector spinae (iliocostalis). Beide Muskeln stabilisieren die Wirbelsäule und helfen beim Aufrichten des Oberkörpers z. B. bei Hebevorgängen (Schünke et al., 2018). Eine steigende Beanspruchung dieser Muskeln wird mit einer erhöhten Wirbelsäulenbelastung assoziiert (Callaghan et al., 1998; El-Rich et al., 2004). Entsprechend wurden sie bereits in vielen Untersuchungen herangezogen, um die Auswirkungen von bestimmten Tätigkeitscharakteristika auf die Beanspruchung der lumbalen Rückenmuskulatur zu analysieren (Christensen et al., 2015; Isa et al., 2014; Lee et al., 2020b; Lee, 2021; Varrecchia et al.,

2018). Eine besonders hohe Beanspruchung der lumbalen Muskulatur ergibt sich beim Heben aus tiefen Positionen. Häufig werden zudem zur Beurteilung der Wirbelsäulenbelastung sowohl die Druckkräfte per Simulation ermittelt als auch die Beanspruchungen mittels EMG überprüft (Skals et al., 2021a; Skals et al., 2021b) oder Kräfte in der Wirbelsäule gar auf Basis von EMG-Daten abgeschätzt (Marras et al., 1999; Lin, 1999). Battini et al. (2016) rufen außerdem dazu auf, Lagerplatzvergabe-Strategien mit EMG-Messungen zu evaluieren.

Neben den Muskeln zur Evaluierung der Lumbalbelastung/-beanspruchung sollten jedoch andere Bereiche des Oberkörpers nicht vernachlässigt werden, die beim Umsetzen bzw. Heben von Lasten relevant sind. So wurde der m. trapezius pars descendens ausgewählt, da er in zahlreichen Publikationen zur Ermittlung der Beanspruchung in der Kommissionierung untersucht wird und insbesondere bei Überkopfarbeit, die bei Pickvorgängen aus hohen Regalebenen vorkommt, erhöhte Aktivität aufweist (Christmansson et al., 2002; Christensen et al., 2015; Lee et al., 2020b). Entscheidend beim Heben von Lasten ist des Weiteren der m. deltoideus pars acromialis, da er für die Abduktion der Schulter verantwortlich ist (Schünke et al., 2018; Lee et al., 2020b). Auch dieser Muskel wurde bereits in einer Reihe von Untersuchungen in der Kommissionierung einbezogen (Olivera et al., 2011, Lee et al., 2020b, Steinebach et al., 2021c). Zuletzt ist die Aktivität des m. biceps brachii bei Hebe- oder Umsetztätigkeiten signifikant abhängig vom Lagerplatz sowie dem Lastgewicht, weshalb er in dieser Studie als Muskel des Hand-Arm-Systems aufgenommen wird (Olivera et al., 2021; Lee, 2021). Die Muskeln werden aus Gründen der besseren Lesbarkeit im Folgenden auch Multifidus, Erector Spinae, Trapezius, Deltoideus und Bizeps genannt.

Alle Muskeln wurden anhand der Empfehlungen nach SENIAM (2021) lokalisiert (siehe Tabelle 6, Elektrodenpositionierung) und mit je zwei Elektroden im Interelektrodenabstand von etwa 25 mm entlang der Muskelfasern beklebt. Dabei wurde darauf geachtet, dass beide Elektroden sich unabhängig von der Gelenkstellung auch bei einer Muskelverkürzung immer möglichst zentral auf dem Muskelbauch befinden. Zusätzlich wurde eine Referenzelektrode auf den siebten Halswirbel geklebt (vgl. SENIAM, 2021; Konrad, 2011). Die Haut wurde an den Ableitorten zwecks verbesserter Impedanzbedingungen vorab rasiert und mit einem Wattetuch und Desinfektionsmittel gerieben, um abgestorbene Hautpartikel und Schmutz zu entfernen.

In dieser Studie kommt das Noraxon TeleMyo G2 System mit einer Abtastfrequenz von 1500 Hz zum Einsatz. Fünf Messkabel, die jeweils über einen integrierten Messverstärker verfügen, verbinden die selbstklebenden Silber-Silberchlorid-Elektroden (Kendall™ H124SG mit 24 mm Durchmesser) mit einem am Körper getragenen Transmitter. Ein entsprechender Receiver, welcher mit einem PC verbunden ist, empfängt die vom Transmitter gesendeten Signale. Mithilfe der Software „Myo Research XP Master Edition“ werden die Daten ausgewertet.

Die stochastischen EMG-Signale, im Folgenden „Elektromyographische Aktivität“ (EA) genannt, müssen digital bearbeitet werden, um Informationen oder Handlungsimplikationen ableiten zu können (Kluth et al., 2013). Die Daten werden zunächst bandpass-gefiltert, gleichgerichtet und schließlich mit der Root-Mean-Square Methode geglättet. Das Zeitfenster der Glättung wird entsprechend Literaturempfehlungen auf 100 ms festgelegt (Burden et al., 2014; Konrad, 2011).

Die absolute Höhe des EMG-Signals ist hochindividuell und abhängig von anatomischen und physiologischen Unterschieden sowie der exakten Elektrodenpositionierung, sodass eine hohe Variabilität zwischen verschiedenen Versuchspersonen entsteht (Burden, 2010). Um dem entgegenzuwirken, wird das EMG-Signal normalisiert. Am häufigsten wird hierfür die Normalisierung anhand der maximal willkürlichen isometrischen Muskelkontraktion (MVC) verwendet (Kluth et al., 2013). Die entsprechenden Übungen, mit denen der MVC für die einzelnen Muskeln bestmöglich ermittelt werden können, sind in Tabelle 6 skizziert. Die Teilnehmenden an den Kommissionierversuchen wurden nach einer kurzen Aufwärmphase aufgefordert, dreimal jeweils über eine Dauer von drei Sekunden die Kraft bis zum Maximum zu steigern. Dieses Prozedere wurde für jeden Muskel nacheinander durchgeführt und anschließend einmal in Gänze wiederholt – der höchste erzielte Wert (gemittelt über 500 ms) wurde als MVC herangezogen. Das Verhältnis der elektrischen Aktivität zum MVC ergibt schließlich den normalisierten Wert und wird im Folgenden als EA (%) angegeben.

Aus den EA (%) können weitere EMG-Kennwerte abgeleitet werden: mittlere EA (arithmetisches Mittel), Varianz, Minimum, Maximum sowie die statischen und dynamischen Anteile der EA für jeden Muskel. Die statischen Anteile errechnen sich über die Differenz zwischen der minimalen EA in einem bestimmten Zeitabschnitt und dem Ruhewert der jeweiligen Versuchsperson (Strasser et al., 1996). Der dynamische Anteil hingegen ergibt sich aus der Differenz des 95 % und 5% Quantils der EA eines bestimmten Zeitabschnittes (Kluth et al., 2013). Die dynamische Komponente spiegelt die Kontraktionsphase des Muskels wider, wohingegen die statischen Anteile während der Erschlaffungsphase des Muskels zum Tragen kommen (Strasser et al., 1996).

Die Auswertung wurde jeweils mit zwei verschiedenen Daten-Varianten durchgeführt:

1. Auswertung und Kalkulierung der Kennwerte über die gesamte Dauer jedes Kommissionierdurchgangs je Muskel (von Anfang bis Ende jeder EMG-Messung). Die entsprechenden Daten besitzen im Folgenden den Index „EMG_all“.
2. Auswertung und Kalkulierung der Kennwerte nur während der Entnahme des SKU je Muskel. Laufwege sowie die Abgabe am Depot wurde hierbei nicht betrachtet, um deutlichere Unterschiede zwischen den verschiedenen λ-Gewichtungen in Bezug auf die Wirbelsäulenbelastung zu ermöglichen. Es wird vermutet, dass diese vor allem durch die Entnahmevorgänge aus verschiedenen Entnahmehöhen resultieren. Die entsprechenden Daten besitzen im Folgenden den Index „EMG_pick“.

Für letztere Auswertungsvariante wurden mit dem EMG-Signal synchronisierte Videoaufnahmen genutzt, um manuell Marker zu Beginn und Ende eines jeden Entnahmevorgangs zu setzen. Als Beginn eines Entnahmevorgangs wurde hierfür die Herstellung eines Kontakts zwischen der Hand des Kommissionierenden und dem SKU definiert. Das Ende der Entnahme wurde analog auf den Zeitpunkt der Aufhebung des Kontaktes festgelegt.
Zur Auswertung werden die normalisierten EA-Werte aus Myo Research XP exportiert. Die genannten EMG-Kenngrößen können mit Hilfe eines Auswertungsskripts in MATLAB R2021a® automatisiert berechnet werden (Katzenbach, 2021) – der entsprechende MATLAB-Code ist in Anhang K zu finden.

5.2.3 Herzschlagfrequenz

Die Herzschlagfrequenz (analog: Herzschlagrate, Herzfrequenz) ist eine entscheidende kardiovaskuläre Messgröße und beschreibt die gemittelte Anzahl der Herzschläge pro Minute (Schandry, 2016). Sie enthält somit „*Informationen über die Beanspruchung des Herzkreislaufsystems als Reaktion auf Belastungen*“ (AWMF, 2014). Aufgrund der relativ aufwandsarmen Anwendung und Auswertung ist die HSF ein etablierter Parameter in der Arbeitswissenschaft zur Bewertung der physischen Belastung bzw. Beanspruchung. Während die Herzschlagfrequenz in Ruhe in der Regel zwischen 60 und 80 bpm liegt, steigt diese bei erhöhter Belastung an – Werte über 200 bpm sind bei schwerer körperlicher Arbeit möglich (Schlick et al., 2018; AWMF, 2014).
Es gibt verschiedene Messverfahren zur HSF – neben dem klassischen Elektrokardiogramm (EKG) mit Elektroden werden auch „wearables“ in der Wissenschaft zunehmend genutzt (Yetisen et al., 2018). In den Kommissionierversuchen wird der Polar H10 Brustgurt verwendet, um die HSF zu erfassen. In Studien konnte gezeigt werden, dass der Polar H10 Brustgurt valide und akkurate Daten zur Herzschlagfrequenz (und zur Herzfrequenzvariabilität) im Vergleich mit einem EKG-System liefert (Speer et al., 2020). Zudem wird der Brustgurt gar als Gold-Standard für Messungen bei intensiven Körperbewegungen empfohlen (Gilgen-Ammann et al., 2019).
Die HSF wird während der kompletten Zeitspanne eines Kommissionierdurchganges erfasst. Die vom Brustgurt aufgezeichneten Daten können anschließend über eine Bluetooth-Verbindung in eine entsprechende Smartphone-basierte Anwendung (Polar Beat) geladen werden. Über diese werden die mittlere sowie maximale HSF direkt kalkuliert.

5.2.4 Subjektives Anstrengungsempfinden

Kommissionierende können auf subjektiven Skalen ihr Befinden gut einschätzen und auch verschiedene Personen geben bei ähnlichen Pickvorgängen vergleichbare Werte an (Kadefors & Forsman, 2000; Larco et al., 2017). Die hier verwendete Borg RPE Skala („Scale for rating of perceived exertion”) ist ein

Verfahren zur Bewertung des subjektiv empfundenen Anstrengungsempfindens, welches Personen anhand des Grades der Atemlosigkeit, dem Schwitzen sowie der Muskelermüdung angeben (Borg, 2004). Die RPE Skala besitzt einen Wertebereich zwischen 6 und 20 – ursächlich hierfür ist die Annahme eines linearen Zusammenhangs zwischen der Herzschlagrate des Menschen und den Werten auf der RPE Skala. Der zehnfache Wert der Skala entspricht demnach der Herzschlagrate, sodass eine HSF zwischen 60 und 200 abgebildet wird (Borg, 2004). Der tiefste Wert der Skala bedeutet übersetzt „überhaupt nicht anstrengend“ und der höchste Wert „maximale Anstrengung“. Die Borg RPE Skala gilt als leicht verständlich. Zudem sind die Erhebungsdaten einfach zu interpretieren (Borg & Kaijser, 2006).
Um valide Bewertungen von den Versuchsteilnehmenden zu erhalten, ist es wichtig, sich bei der Erläuterung der RPE Skala an eine präzise Anleitung zu halten (Borg, 2004). Die Anleitung sowie die Borg RPE Skala sind in Anhang L abgebildet. Ferner wurde mit den Rechteträgern der Borg RPE Skala eine Lizenzvereinbarung zur Nutzung der Skala in diesen Versuchen geschlossen.
Ähnlich wie Rönick (2020), die das subjektive Anstrengungsempfinden in ihrer Studie alle 7,5 Minuten erfasst, wird die Borg RPE Skala auch in diesem Versuch mehrfach pro Szenario eingesetzt, um die Entwicklung des Anstrengungsempfindens abbilden zu können: unmittelbar vor Start und nach Beendigung eines Durchgangs sowie nach der Hälfte aller zu kommissionierenden SKU.

5.2.5 Kommissionierzeit

Die für jeden Durchgang benötigte Kommissionierzeit wurde mit dem EMG-System parallel erfasst. Auf Zeichen der Versuchsleitenden begannen die Kommissionierenden mit der Arbeitsaufgabe am Depot – zu diesem Zeitpunkt wurden die EMG-Messung und damit auch die Zeitmessung gestartet. Während der Beantwortung der Frage nach dem subjektiven Anstrengungsempfinden nach der Hälfte aller Pickvorgänge in jedem Durchgang wurde die Zeit nicht gestoppt, da es sich um einen marginalen Anteil an der Gesamtzeit handelt. Zudem ist dieser Zeitanteil in jeder Einzelmessung zu finden, sodass kein Einfluss auf Vergleiche zwischen den Szenarien besteht. Beendet wurde die Zeiterfassung wiederum gemeinsam mit der EMG-Messung, nachdem das letzte SKU am Depot abgegeben wurde.

5.2.6 Kommissionierfehler

Üblicherweise sind Fehlerquoten in Laborversuchen deutlich höher als dies in der Praxis der Fall ist – dies liegt bei den bisherigen Studien an den wenig erfahrenen Versuchsteilnehmenden und an der hohen Pickdichte, da Laufwege in entsprechenden Versuchen häufig aufgrund des kleinen simulierten Lagers entfallen oder sehr gering sind (Lolling, 2003). Dem soll hier mit erfahrenen Kommissionierenden als Versuchspersonen und einem realistischen Lagerlayout entgegengewirkt werden. Dennoch

schlussfolgert Lolling (2002b), dass auch bei deutlich höheren Fehlerquoten Vergleiche zwischen einzelnen Szenarien zulässig sind.

In dieser Studie sind vor allem Typfehler und Auslassungsfehler relevant. Aufgrund der großvolumigen SKU ist ein „Verzählen“ im Sinne eines Mengenfehlers unwahrscheinlich. Zudem enthält jede Position nur einen Artikel. Zustandsfehler (z. B. fehlerhafte Etikettierung) werden in der Studie nicht berücksichtigt.

Ein RFID-System (DT-UHF-LX2-U Mid-Range System, 866 MHz), welches seitlich der Rollenbahn angebracht ist, liest automatisiert entsprechende RFID-Transponder aus, die sich in jedem SKU befinden. So wird jedes kommissionierte SKU erfasst und kann im Anschluss mit der Pickliste abgeglichen werden. Typ- oder Auslassungsfehler werden so unmittelbar sichtbar. Entscheidend für die Funktionsfähigkeit ist eine passende räumliche Ausrichtung und Abschirmung des RFID-Systems. Schwere Kartons, die mit viel Sand gefüllt sind, benötigen eine höhere Sendeleistung des Lesegeräts, um die RFID-Transponder zu erkennen. Dies führt jedoch dazu, dass andere SKU teilweise auch über weite Distanzen erkannt werden, z. B. wenn sie noch in den Fachbodenregalen eingelagert sind. Durch entsprechende Abschirmung und Konzentrierung des Signals auf die Rollenbahn kann dieses Problem umgangen werden.

5.3 Versuchsablauf

Insgesamt nahmen 48 erfahrene Kommissionierende zwischen dem 28.05. und 09.07.2021 an den Versuchen teil. Abbildung 22 gibt einen Überblick über die einzelnen Schritte der Versuchsdurchführung. Des Weiteren ist in Anhang M eine Checkliste der Versuchsdurchführung gegeben.

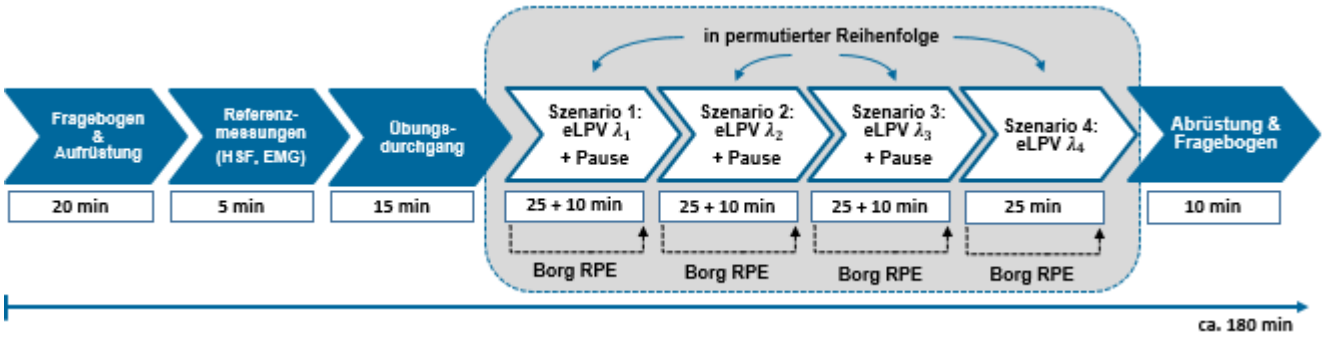


Abbildung 22: Versuchsablauf (eigene Darstellung)

Nach der Begrüßung und Aufklärung der Probandinnen und Probanden bezüglich des Datenschutzes und der Hygienemaßnahmen aufgrund der Corona-Pandemie wurde ihnen Fragebogen A ausgehändigt. Die Versuchsperson erhielt keine Informationen bezüglich der genauen Versuchsziele. Im Anschluss legten die Versuchsteilnehmenden den angefeuchteten Polar-Gurt direkt auf der Haut im Brustbereich an. Die Vorbereitung der EMG-Messung gestaltete sich wesentlich aufwändiger. Nach der Rasur und

Desinfektion der betroffenen Hautstellen an der dominanten Körperseite am unteren Rücken, im Nacken-Schulter-Bereich und am Oberarm wurden die exakten Ableitorte palpiert und anhand der Empfehlungen nach SENIAM (2021) identifiziert. Die Elektroden wurden geklebt und mit Kabeln versehen. Im Anschluss prüften die Versuchsleitenden zunächst die Signalqualität, wobei verschiedene Artefakte auszuschließen sind. Zunächst ist durch spezifische Bewegungen zu prüfen, ob die Elektroden korrekt auf die gewünschten Muskeln geklebt wurden. Ferner ist zu beachten, dass das EMG nicht zu stark von EKG-Signalen überlagert ist (Kluth et al., 2013). Dieses Artefakt kann auftreten, wenn Muskeln in Herznähe untersucht werden. Anschließend wurden die Ruhe-HSF und die Ruhemessung des EMG-Systems aufgezeichnet. Danach fand die MVC-Messung aller Muskeln statt (siehe Tabelle 6), um die EMG-Daten später normalisieren zu können.

Die Versuchsleitenden erläuterten den Aufbau der Pickliste sowie den Kommissionierprozess ausführlich, bevor ein 15-minütiger Übungsdurchgang begonnen wurde. Hierdurch sollten die Lerneffekte während der eigentlichen Versuchsszenarien reduziert werden. Diesbezüglich ist zu beachten, dass die ersten 24 Versuchspersonen die Studie im Single-Order Picking (SOP) durchführten – es wurde ein Artikel je Position kommissioniert und dann zum Depot zurückgekehrt. Die nächsten 24 Probandinnen und Probanden kommissionierten im Multi-Order Picking (MOP) mit jeweils vier Artikel pro Tour. Die Reihenfolge der Pickliste war bei beiden Varianten strikt einzuhalten. Unmittelbar vor dem Start des Versuchs wurde zudem die Borg-Skala anhand der standardisierten Anleitung (Anhang L) erklärt.

Die eigentlichen Kommissionierversuche wurden innerhalb der beiden Gruppen (SOP und MOP) als abhängige Stichprobe im Within-Subject Study Design durchgeführt, da bei physiologischen Messungen hohe interindividuelle Unterschiede bestehen, was eine Vergleichbarkeit verschiedener Personengruppen erschwert (Laborde et al., 2017). Zudem sind beim Within-Subject Study Design aufgrund der höheren statistischen Power kleinere Stichproben ausreichend (Bröder, 2011). Im eigentlichen Versuch durchliefen die Versuchspersonen jeweils alle vier Versuchsszenarien mit den verschiedenen λ-Ausprägungen. Durch eine Permutation der Szenarien-Reihenfolge zwischen den einzelnen Teilnehmenden konnte der Einfluss von Sensitivierungs-, Carry-over- und Lerneffekten reduziert werden (Bröder, 2011).

Je Szenario mussten laut Pickliste 48 SKU kommissioniert werden. Hierfür wurde das Ziel kommuniziert, die Pickliste zügig und ohne Fehler abzuarbeiten - jedoch sollte ein Tempo gewählt werden, dass die Kommissionierenden den ganzen Tag halten könnten. Die Versuchspersonen starteten am Depot mit dem Kommissionierwagen, schoben diesen entsprechend der Pickliste zum Lagerplatz und setzten das zu entnehmende SKU auf dem Wagen ab. Das SOP wird in dieser Arbeit insofern definiert, dass nach dem ersten gepickten SKU direkt der Rückweg zum Depot angetreten wird. Dazu musste der Kommissionierwagen für den Transport benutzt werden – ein Tragen der SKU zum Depot war nicht erlaubt. Diese Standardisierung war zu Zwecken der internen Validität notwendig. Am Depot wurde der Artikel auf der Rollenbahn abgesetzt und von dort automatisch in eine Pufferzone gefördert. Beim MOP

hingegen wurden in einer Tour vier Lagerplätze nacheinander angesteuert und die korrespondierenden SKU ohne sie zu stapeln auf dem Kommissionierwagen abgelegt. Zudem sollte bei den MOP-Durchgängen darauf geachtet werden, dass ein Routing im Schleifengang durchgeführt wird, da dieses am häufigsten in Literatur und Praxis anzutreffen (Franzke et al., 2018; Masae et al., 2020) und sehr einfach erlernbar ist (ten Hompel et al., 2011). Des Weiteren wurde die Reihenfolge der vier während einer Route im MOP zu kommissionierenden Artikel entsprechend des Schleifengang-Prinzips optimiert, sodass ein Abweichen von dieser Routingstrategie zu höheren Kommissionierzeiten geführt hätte. Jeweils zu Beginn des Durchgangs, nach der Hälfte aller kommissionierten SKU und unmittelbar nach Beendigung des Szenarios wurde die Versuchsperson per Borg RPE Skala nach ihrem subjektiven Anstrengungsempfinden befragt. Zudem hatten die Versuchsleitenden während des Versuchs die Aufgabe, SKU mit Zugriffshäufigkeiten > 1 nach dem Entnahmevorgang durch die Versuchsteilnehmenden nachzulegen, um so einen Nachschub zu simulieren.

Jede Versuchsperson durchlief so alle vier Szenarien. Die zu kommissionierenden SKU blieben hierbei in jedem Szenario einer Versuchsperson unverändert – aufgrund der verschiedenen LPV befanden diese sich jedoch auf unterschiedlichen Lagerplätzen.

Zwischen den Szenarien wurde analog zu Vorversuchen (Steinebach et al., 2021c) eine 10-minütige Pause eingehalten, um Carry-over Effekte der Ermüdung von einem auf das nächste Szenario zu vermeiden. Zudem wurde die Pause genutzt, um die SKU entsprechend der im Folgeszenario bevorstehenden LPV zu positionieren.

Nach dem Versuch wurde der Versuchsperson das Messequipment abgenommen und Fragebogen C zum Ausfüllen übergeben. Die Versuchsteilnehmenden erhielten für die ca. dreistündige Studie je 50 € Aufwandsentschädigung.

Das in den Kapiteln 5.1 bis 5.3 beschriebene Versuchsdesign wurde von der Ethikkommission der TU Darmstadt genehmigt. Das positive Votum der Ethikkommission sowie das für die Versuche erstellte Hygiene-Konzept im Rahmen der Corona-Pandemie ist in Anhang N abgebildet.

5.4 Probandenkollektiv

In einem Vorversuch (Steinebach et al., 2021c) wurden geringe bzw. mittlere Effektstärken bezüglich des Einflusses verschiedener LPV-Strategien auf die Beanspruchung kalkuliert. Für das vorgestellte Versuchsdesign ergibt sich bei Annahme dieser Effektstärken für einfaktorielle Varianzanalysen mit Messwiederholung ($\alpha = 0{,}05$; $1 - \beta = 0{,}8$) mit dem Programm G*Power (Faul et al., 2007) eine Stichprobengröße von 46. Döring & Bortz (2016) empfehlen für diese Versuchskonstellation bei mittleren Effektstärken einen Stichprobenumfang von 45 Individuen. Um etwaigen Messausfällen bzw. Absagen von Versuchsteilnehmenden entgegenzuwirken, wird eine Stichprobengröße von 50 Personen festgelegt.

Um valide Ergebnisse zu erhalten und eine bessere Rückführung dieser auf die Grundgesamtheit zu gewährleisten, wurden nur Kommissionierende mit einer minimalen Berufserfahrung von 6 Monaten für die Studie zugelassen. Die Versuchspersonen wurden über Projektpartner des IAD sowie über gezielte Anfragen in Unternehmen mit Lagerhäusern akquiriert. Von den 50 eingeladenen Personen mussten zwei aufgrund von Motivationsdefiziten während des Versuchs gänzlich aus der Datenmenge entfernt werden, sodass die Daten von 48 Kommissionierenden (32 männlich, 16 weiblich) verblieben. Zudem wurden manche Datensätze für bestimmte Muskeln entfernt, da sich die Elektroden während des Versuchs gelöst haben. Alle erhobenen Daten wurden entsprechend des Datenschutzkonzeptes anonymisiert gespeichert und ausgewertet. Der Altersdurchschnitt lag bei 35,1 Jahren (SD = 11,6 Jahre; min = 18 Jahre; max = 65 Jahre). Die Körpergröße variierte ebenfalls recht stark – die Durchschnittsgröße beträgt 173,0 cm (SD = 8,5 cm; min = 154 cm; max = 189 cm). Die Kommissioniererfahrung in Jahren sowie die Branchen (Mehrfachnennung möglich) der Versuchspersonen sind in Abbildung 23 dargestellt.

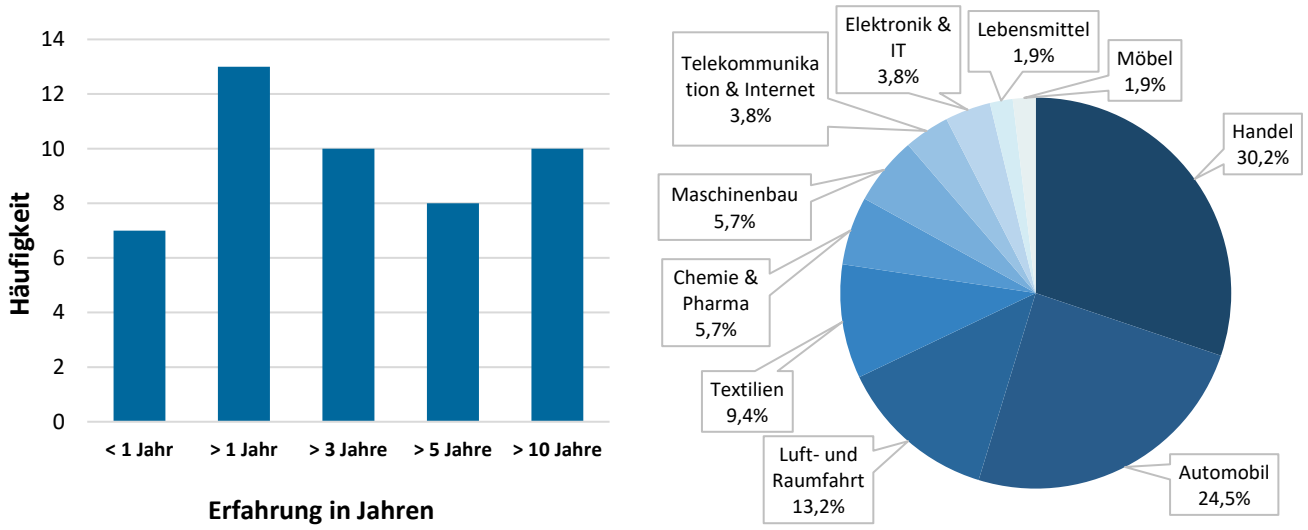


Abbildung 23: Kommissioniererfahrung der Versuchspersonen (eigene Darstellung)

Die Erfahrung der Versuchspersonen war demnach recht hoch: etwa 85 % verfügen über mehr als ein Jahr und etwa 58 % über mehr als drei Jahre Berufserfahrung in der Kommissionierung. Über die Hälfte der Versuchspersonen ordnet sich den Branchen „Handel“ oder „Automobil“ zu.

Des Weiteren ist anzumerken, dass fünf Versuchsteilnehmende leichte Beschwerden im unteren Rücken und eine Person im oberen Rückenbereich hatte – eine Person erlitt zudem bereits einen Bandscheibenvorfall im Wirbelsäulensegment L5-S1, der diese zum Zeitpunkt der Versuche aber kaum beeinträchtigte.

5.5 Detaillierung der Leithypothesen

In diesem Abschnitt sollen die in Kapitel 4.2 hergeleiteten Leithypothesen bezüglich des Einflusses einer eLPV auf die Beanspruchung und menschliche Leistung in Subhypothesen ausformuliert werden. Ziel ist es, statistisch überprüfbare Hypothesen zu definieren, um anhand dieser die Forschungsfragen zu beantworten. Wie bereits erwähnt sollen die Unterschieds- und Zusammenhangshypothesen gerichtet formuliert werden, da die Wirkungszusammenhänge im eLPV-Algorithmus hinterlegt sind und entsprechende Hinweise in der Literatur vorhanden sind. Die Hypothesen sind immer entsprechend der tatsächlichen Erwartung formuliert und verstehen sich nicht als Nullhypothese des dazugehörigen statistischen Tests.

5.5.1 Detaillierung der Leithypothesen LH 2.1 bis LH 2.6

Die Detaillierung der Leithypothesen wird in tabellarischer Form durchgeführt. In LH 2.1 wird erwartet, dass entsprechend der Wirkungszusammenhänge der eLPV die muskuläre Beanspruchung bei steigender λ-Gewichtung abnimmt – eine Ausnahme bildet der Vergleich zwischen der Belastungsminimierung ($\lambda = 1$) und der belastungspriorisierten Kompromisslösung ($\lambda = 0{,}55$). Hier liegt der prognostizierte Unterschied der Wirbelsäulenbelastung in einem marginalen Bereich (max. 2 %), sodass zu vermuten ist, dass keine signifikanten Beanspruchungsunterschiede messbar sind. Diese Hypothese wird für alle fünf Muskeln, jeweils für die mittlere und dynamische elektromyographische Aktivität sowie für die Datensätze des Single- und Multi-Order Picking bzw. der Zusammenfassung dieser beiden Picking-Strategien aufgestellt. Exemplarisch wird Hypothese 2.1.1 ausformuliert:

H 2.1.1: Die gemessenen mittleren EA des m. multifidus unterscheiden sich beim Single-Order Picking nicht signifikant zwischen den eLPV mit $\lambda = 1$ und $\lambda = 0{,}55$.

Werden diesbezüglich alle einzelnen λ-Gewichtungen paarweise miteinander vergleichen, so entstehen insgesamt bei Betrachtung der EMG_pick-Daten (nur die Entnahmevorgänge werden berücksichtigt) 180 Einzelhypothesen (siehe Tabelle 7). Die gleiche Anzahl an Hypothesen liegt zusätzlich vor, wenn die gesamten EMG_all-Daten (inklusive Laufwege und Abgabe am Depot) betrachtet werden. In dieser Arbeit werden zunächst nur die reinen Entnahmevorgänge betrachtet – die Ergebnisse zum EMG_all-Datensatz sind jedoch ebenfalls in Kapitel 6.1 zu finden.
Analog wird bei den Unterschiedshypothesen bezüglich der Herzschlagfrequenz (LH 2.3; Tabelle 9) und bezüglich des subjektiven Anstrengungsempfindens (LH 2.5; Tabelle 11) verfahren – hier jedoch immer mit dem gesamten Datensatz. Es werden jeweils 18 Hypothesen aufgestellt: je Messgröße alle

Kombinationen aus Picking-Strategie (SOP, MOP oder die Daten von SOP und MOP) und λ-Paarvergleich.

Tabelle 7: Detaillierung der Leithypothese LH 2.1 ($\lambda_1 = 1$; $\lambda_{0,55} = 0{,}55$; $\lambda_{0,15} = 0{,}15$; $\lambda_0 = 0$)

Hypothese	**Messgröße „g“**	**Muskel „m“**	**Picking-Strategie „p“**	**Vergleich von…**					
				λ_1, $\lambda_{0,55}$	λ_1, $\lambda_{0,15}$	λ_1, λ_0	$\lambda_{0,55}$, $\lambda_{0,15}$	$\lambda_{0,55}$, λ_0	$\lambda_{0,15}$, λ_0
H 2.1.1 – H 2.1.18	mittlere EA	Multifidus	SOP	H 2.1.1	H 2.1.2	…			
			MOP	H 2.1.6	…				
			SOP & MOP	…					
H 2.1.19 – H 2.1.36		Erector Spinae	SOP						
			MOP						
			SOP & MOP						
H 2.1.37 – H 2.1.54		Trapezius	SOP						
			MOP						
			SOP & MOP						
H 2.1.55 – H 2.1.72		Deltoideus	SOP						
			MOP						
			SOP & MOP						
H 2.1.73 – H 2.1.90		Bizeps	SOP						
			MOP						
			SOP & MOP						
H 2.1.91 – H 2.1.108	dynamisch EA	Multifidus	SOP						
			MOP						
			SOP & MOP						
H 2.1.109 – H 2.1.126		Erector Spinae	SOP						
			MOP						
			SOP & MOP						
H 2.1.127 – H 2.1.144		Trapezius	SOP						
			MOP						
			SOP & MOP						
H 2.1.145 – H 2.1.162		Deltoideus	SOP						
			MOP						
			SOP & MOP						
H 2.1.163 – H 2.1.180		Bizeps	SOP						
			MOP						
			SOP & MOP						
				$\mu_{g,m,p,\lambda_1} = \mu_{g,m,p,\lambda_{0,55}}$	$\mu_{g,m,p,\lambda_1} < \mu_{g,m,p,\lambda_{0,15}}$	$\mu_{g,m,p,\lambda_1} < \mu_{g,m,p,\lambda_0}$	$\mu_{g,m,p,\lambda_{0,55}} < \mu_{g,m,p,\lambda_{0,15}}$	$\mu_{g,m,p,\lambda_{0,55}} < \mu_{g,m,p,\lambda_0}$	$\mu_{g,m,p,\lambda_{0,15}} < \mu_{g,m,p,\lambda_0}$

In Leithypothese 2.2 wird der Zusammenhang zwischen der prognostizierten Wirbelsäulenbelastung und der muskulären Beanspruchung über beide Picking-Strategien untersucht, siehe Tabelle 8. Bezüglich der Zusammenhangshypothesen werden lediglich die EMG_Pick-Datensätze betrachtet, da auch nur die Belastungen während des Entnahmevorgangs im Algorithmus prognostiziert werden. Wiederum analog werden die Hypothesen zu LH 2.4 bezüglich der HSF (Tabelle 10) und LH 2.6 hinsichtlich des subjektiven Anstrengungsempfindens (Tabelle 12) aufgestellt.

Tabelle 8: Detaillierung der Leithypothese LH 2.2

Hypothese	**Messgröße**	**Muskel**	**Formulierung der Hypothese**
H 2.2.1	mittlere EA	Multifidus	Es lässt sich ein signifikant positiver Zusammenhang zwischen der im Multifidus gemessenen physiologischen Beanspruchung (mittlere EA) und der durch die eLPV prognostizierten Belastung über alle Gewichtungsfaktoren λ feststellen.
H 2.2.2		Erector Spinae	Es lässt sich ein signifikant positiver Zusammenhang zwischen der im Erector Spinae gemessenen physiologischen Beanspruchung (mittlere EA) und der durch die eLPV prognostizierten Belastung über alle Gewichtungsfaktoren λ feststellen.
H 2.2.3		Trapezius	Es lässt sich ein signifikant positiver Zusammenhang zwischen der im Trapezius gemessenen physiologischen Beanspruchung (mittlere EA) und der durch die eLPV prognostizierten Belastung über alle Gewichtungsfaktoren λ feststellen.
H 2.2.4		Deltoideus	Es lässt sich ein signifikant positiver Zusammenhang zwischen der im Deltoideus gemessenen physiologischen Beanspruchung (mittlere EA) und der durch die eLPV prognostizierten Belastung über alle Gewichtungsfaktoren λ feststellen.
H 2.2.5		Bizeps	Es lässt sich ein signifikant positiver Zusammenhang zwischen der im Bizeps gemessenen physiologischen Beanspruchung (mittlere EA) und der durch die eLPV prognostizierten Belastung über alle Gewichtungsfaktoren λ feststellen.
H 2.2.6	dynamisch EA	Multifidus	Es lässt sich ein signifikant positiver Zusammenhang zwischen der im Multifidus gemessenen physiologischen Beanspruchung (dynamische EA) und der durch die eLPV prognostizierten Belastung über alle Gewichtungsfaktoren λ feststellen.
H 2.2.7		Erector Spinae	Es lässt sich ein signifikant positiver Zusammenhang zwischen der im Erector Spinae gemessenen physiologischen Beanspruchung (dynamische EA) und der durch die eLPV prognostizierten Belastung über alle Gewichtungsfaktoren λ feststellen.
H 2.2.8		Trapezius	Es lässt sich ein signifikant positiver Zusammenhang zwischen der im Trapezius gemessenen physiologischen Beanspruchung (dynamische EA) und der durch die eLPV prognostizierten Belastung über alle Gewichtungsfaktoren λ feststellen.
H 2.2.9		Deltoideus	Es lässt sich ein signifikant positiver Zusammenhang zwischen der im Deltoideus gemessenen physiologischen Beanspruchung (dynamische EA) und der durch die eLPV prognostizierten Belastung über alle Gewichtungsfaktoren λ feststellen.
H 2.2.10		Bizeps	Es lässt sich ein signifikant positiver Zusammenhang zwischen der im Bizeps gemessenen physiologischen Beanspruchung (dynamische EA) und der durch die eLPV prognostizierten Belastung über alle Gewichtungsfaktoren λ feststellen.

Tabelle 9: Detaillierung der Leithypothese LH 2.3 ($\lambda_1 = 1;\ \lambda_{0,55} = 0{,}55;\ \lambda_{0,15} = 0{,}15;\ \lambda_0 = 0$)

Hypothese	Messgröße	Vergleich von	Picking-Strategie „p“	Formulierung der Hypothese
H 2.3.1 – H 2.3.3	mittlere Herzschlagfrequenz (HSF)	λ_1 und $\lambda_{0,55}$	SOP	$\mu_{\mathrm{HSF,p},\lambda_1} = \mu_{\mathrm{HSF,p},\lambda_{0,55}}$
			MOP	
			SOP & MOP	
H 2.3.4 – H 2.3.6		λ_1 und $\lambda_{0,15}$	SOP	$\mu_{\mathrm{HSF,p},\lambda_1} < \mu_{\mathrm{HSF,p},\lambda_{0,15}}$
			MOP	
			SOP & MOP	
H 2.3.7 – H 2.3.9		λ_1 und λ_0	SOP	$\mu_{\mathrm{HSF,p},\lambda_1} < \mu_{\mathrm{HSF,p},\lambda_0}$
			MOP	
			SOP & MOP	
H 2.3.10 – H 2.3.12		$\lambda_{0,55}$ und $\lambda_{0,15}$	SOP	$\mu_{\mathrm{HSF,p},\lambda_{0,55}} < \mu_{\mathrm{HSF,p},\lambda_{0,15}}$
			MOP	
			SOP & MOP	
H 2.3.13 – H 2.3.15		$\lambda_{0,55}$ und λ_0	SOP	$\mu_{\mathrm{HSF,p},\lambda_{0,55}} < \mu_{\mathrm{HSF,p},\lambda_0}$
			MOP	
			SOP & MOP	
H 2.3.16 – H 2.3.18		$\lambda_{0,15}$ und λ_0	SOP	$\mu_{\mathrm{HSF,p},\lambda_{0,15}} < \mu_{\mathrm{HSF,p},\lambda_0}$
			MOP	
			SOP & MOP	

Tabelle 10: Detaillierung der Leithypothese LH 2.4

Hypothese	Messgröße	Formulierung der Hypothese
H 2.4.1	Mittlere HSF	Es lässt sich ein signifikant positiver Zusammenhang zwischen der Herzschlagfrequenz und der durch die eLPV prognostizierten Belastung über alle Gewichtungsfaktoren λ feststellen.

Tabelle 11: Detaillierung der Leithypothese LH 2.5 ($\lambda_1 = 1;\ \lambda_{0,55} = 0{,}55;\ \lambda_{0,15} = 0{,}15;\ \lambda_0 = 0$)

Hypothese	Messgröße	Vergleich von	Picking-Strategie „p“	Formulierung der Hypothese
H 2.5.1 – H 2.5.3	Subjektives Anstrengungsempfinden (Borg RPE Skala)	λ_1 und $\lambda_{0,55}$	SOP	$\mu_{\mathrm{RPE,p},\lambda_1} = \mu_{\mathrm{RPE,p},\lambda_{0,55}}$
			MOP	
			SOP & MOP	
H 2.5.4 – H 2.5.6		λ_1 und $\lambda_{0,15}$	SOP	$\mu_{\mathrm{RPE,p},\lambda_1} < \mu_{\mathrm{RPE,p},\lambda_{0,15}}$
			MOP	
			SOP & MOP	
H 2.5.7 – H 2.5.9		λ_1 und λ_0	SOP	$\mu_{\mathrm{RPE,p},\lambda_1} < \mu_{\mathrm{RPE,p},\lambda_0}$
			MOP	
			SOP & MOP	
H 2.5.10 – H 2.5.12		$\lambda_{0,55}$ und $\lambda_{0,15}$	SOP	$\mu_{\mathrm{RPE,p},\lambda_{0,55}} < \mu_{\mathrm{RPE,p},\lambda_{0,15}}$
			MOP	
			SOP & MOP	
H 2.5.13 – H 2.5.15		$\lambda_{0,55}$ und λ_0	SOP	$\mu_{\mathrm{RPE,p},\lambda_{0,55}} < \mu_{\mathrm{RPE,p},\lambda_0}$
			MOP	
			SOP & MOP	
H 2.5.16 – H 2.5.18		$\lambda_{0,15}$ und λ_0	SOP	$\mu_{\mathrm{RPE,p},\lambda_{0,15}} < \mu_{\mathrm{RPE,p},\lambda_0}$
			MOP	
			SOP & MOP	

Tabelle 12: Detaillierung der Leithypothese LH 2.6

Hypothese	Messgröße	Formulierung der Hypothese
H 2.6.1	Subjektives Anstrengungsempfinden	Es lässt sich ein signifikant positiver Zusammenhang zwischen dem subjektiven Anstrengungsempfinden und der durch die eLPV prognostizierten Belastung über alle Gewichtungsfaktoren λ feststellen.

5.5.2 Detaillierung der Leithypothesen LH 3.1 bis LH 3.3

In LH 3.1 wird vermutet, dass die Kommissionierzeit bei steigender λ-Gewichtung, außer beim Vergleich zwischen der Zeitminimierung ($\lambda = 0$) und der zeitpriorisierten Kompromisslösung ($\lambda = 0{,}15$), zunimmt. Bei dem genannten Vergleich liegt die prognostizierte Differenz der Kommissionierzeiten bei unter 2 %, sodass vermutlich keine zeitlich signifikanten Unterschiede in den entsprechenden Szenarien gemessen werden können. Diese Hypothesen werden für Single- und Multi-Order Picking bzw. für die Zusammenfassung beider Picking-Strategien (SOP & MOP) jeweils für alle paarweisen Vergleiche der λ-Ausprägungen aufgestellt. Exemplarisch wird Hypothese 3.1.1 ausformuliert:

H 2.1.1: Die gemessene Kommissionierzeit beim Single-Order Picking bei einer eLPV mit $\lambda = 1$ ist signifikant höher als bei einer eLPV mit $\lambda = 0{,}55$.

Tabelle 13: Detaillierung der Leithypothese LH 3.1 ($\lambda_1 = 1$; $\lambda_{0,55} = 0{,}55$; $\lambda_{0,15} = 0{,}15$; $\lambda_0 = 0$)

Hypothese	Messgröße	Vergleich von	Picking-Strategie „p“	Formulierung der Hypothese
H 3.1.1 – H 3.1.3	Kommissionierzeit t	λ_1 und $\lambda_{0,55}$	SOP	$\mu_{t,p,\lambda_1} > \mu_{t,p,\lambda_{0,55}}$
			MOP	
			SOP & MOP	
H 3.1.4 – H 3.1.6		λ_1 und $\lambda_{0,15}$	SOP	$\mu_{t,p,\lambda_1} > \mu_{t,p,\lambda_{0,15}}$
			MOP	
			SOP & MOP	
H 3.1.7 – H 3.1.9		λ_1 und λ_0	SOP	$\mu_{t,p,\lambda_1} > \mu_{t,p,\lambda_0}$
			MOP	
			SOP & MOP	
H 3.1.10 – H 3.1.12		$\lambda_{0,55}$ und $\lambda_{0,15}$	SOP	$\mu_{t,p,\lambda_{0,55}} > \mu_{t,p,\lambda_{0,15}}$
			MOP	
			SOP & MOP	
H 3.1.13 – H 3.1.15		$\lambda_{0,55}$ und λ_0	SOP	$\mu_{t,p,\lambda_{0,55}} > \mu_{t,p,\lambda_0}$
			MOP	
			SOP & MOP	
H 3.1.16 – H 3.1.18		$\lambda_{0,15}$ und λ_0	SOP	$\mu_{t,p,\lambda_{0,15}} = \mu_{t,p,\lambda_0}$
			MOP	
			SOP & MOP	

LH 3.2 untersucht eine Korrelation zwischen den durch die eLPV prognostizierten Zeiten und den gemessenen Kommissionierzeiten in den entsprechenden Szenarien, siehe Tabelle 14. Die

Zusammenhangshypothesen unterscheiden des Weiteren zwischen den verschiedenen Picking-Strategien SOP, MOP sowie der gemeinsamen Betrachtung beider Strategien.

Tabelle 14: Detaillierung der Leithypothese LH 3.2

Hypothese	Messgröße	Formulierung der Hypothese
H 3.2.1	Kommissionier-zeit	Es lässt sich ein signifikant positiver Zusammenhang zwischen den tatsächlich gemessenen Kommissionierzeiten der einzelnen Szenarien und der durch die eLPV prognostizierten Kommissionierzeiten über alle Gewichtungsfaktoren λ beim SOP feststellen.
H 3.2.2		Es lässt sich ein signifikant positiver Zusammenhang zwischen den tatsächlich gemessenen Kommissionierzeiten der einzelnen Szenarien und der durch die eLPV prognostizierten Kommissionierzeiten über alle Gewichtungsfaktoren λ beim MOP feststellen.
H 3.2.3		Es lässt sich ein signifikant positiver Zusammenhang zwischen den tatsächlich gemessenen Kommissionierzeiten der einzelnen Szenarien und der durch die eLPV prognostizierten Kommissionierzeiten über alle Gewichtungsfaktoren λ und alle Versuchspersonen hinweg feststellen.

Die Kommissionierleistung berücksichtigt neben der Kommissionierzeit auch die Anzahl an unterlaufenen Kommissionierfehlern. So wird in den Hypothesen zu LH 3.3 angenommen, dass den Kommissionierenden unabhängig von der Picking-Strategie mit steigender λ-Gewichtung und damit sinkender Belastung bzw. Beanspruchung weniger Kommissionierfehler unterlaufen.

Tabelle 15: Detaillierung der Leithypothese LH 3.3 ($\lambda_1 = 1;\ \lambda_{0,55} = 0{,}55;\ \lambda_{0,15} = 0{,}15;\ \lambda_0 = 0$)

Hypothese	Messgröße	Vergleich von	Picking-Strategie „p“	Formulierung der Hypothese
H 3.3.1 – H 3.3.3	Anzahl an Fehlern	λ_1 und $\lambda_{0,55}$	SOP	$\mu_{\text{Fehleranzahl,p},\lambda_1} < \mu_{\text{Fehleranzahl,p},\lambda_{0,55}}$
			MOP	
			SOP & MOP	
H 3.3.4 – H 3.3.6		λ_1 und $\lambda_{0,15}$	SOP	$\mu_{\text{Fehleranzahl,p},\lambda_1} < \mu_{\text{Fehleranzahl,p},\lambda_{0,15}}$
			MOP	
			SOP & MOP	
H 3.3.7 – H 3.3.9		λ_1 und λ_0	SOP	$\mu_{\text{Fehleranzahl,p},\lambda_1} < \mu_{\text{Fehleranzahl,p},\lambda_0}$
			MOP	
			SOP & MOP	
H 3.3.10 – H 3.3.12		$\lambda_{0,55}$ und $\lambda_{0,15}$	SOP	$\mu_{\text{Fehleranzahl,p},\lambda_{0,55}} < \mu_{\text{Fehleranzahl,p},\lambda_{0,15}}$
			MOP	
			SOP & MOP	
H 3.3.13 – H 3.3.15		$\lambda_{0,55}$ und λ_0	SOP	$\mu_{\text{Fehleranzahl,p},\lambda_{0,55}} < \mu_{\text{Fehleranzahl,p},\lambda_0}$
			MOP	
			SOP & MOP	
H 3.3.16 – H 3.3.18		$\lambda_{0,15}$ und λ_0	SOP	$\mu_{\text{Fehleranzahl,p},\lambda_{0,15}} < \mu_{\text{Fehleranzahl,p},\lambda_0}$
			MOP	
			SOP & MOP	

5.5.3 Detaillierung der Leithypothesen LH 4.1 bis LH 4.3

Wie bereits in Kapitel 4.2 beschrieben, wird mit den Leithypothesen 4.1 bis 4.3 der Querbezug zwischen der Beanspruchung und der Kommissionierzeit untersucht. Explizit bedeutet dies, dass bei einer

Erhöhung der λ-Gewichtung zwar mit erhöhten Kommissionierzeiten zu rechnen ist, die Steigerung der Zeiten aber aufgrund der Beanspruchungsreduzierung niedriger ausfällt, als sich dies durch die mit dem eLPV prognostizierten Zeiten vermuten lassen würde. In Tabelle 16 wird dieser Effekt bezogen auf die muskuläre Beanspruchung und den gesamten Datensatz (SOP & MOP) analysiert. Getrennt betrachtet werden erneut die mittlere bzw. die dynamische EA. Für die EA-Reduzierung wird der Quotient der muskulären Beanspruchung zwischen den Szenarien $\lambda=0$ und $\lambda=1$ gebildet. Die Zeitzunahme entspricht analog dem Quotienten der Kommissionierzeit zwischen den Szenarien $\lambda=1$ und $\lambda=0$.

Tabelle 16: Detaillierung der Leithypothese LH 4.1

Hypothese	Messgröße	Muskel	Formulierung der Hypothese
H 4.1.1	mittlere EA	Multifidus	Es existiert ein signifikant negativer Zusammenhang zwischen der Höhe der mittleren EA-Reduzierung im Multifidus eines Individuums durch die eLPV und der Höhe der Zeitzunahme.
H 4.1.2		Erector Spinae	Es existiert ein signifikant negativer Zusammenhang zwischen der Höhe der mittleren EA-Reduzierung im Erector Spinae eines Individuums durch die eLPV und der Höhe der Zeitzunahme.
H 4.1.3		Trapezius	Es existiert ein signifikant negativer Zusammenhang zwischen der Höhe der mittleren EA-Reduzierung im Trapezius eines Individuums durch die eLPV und der Höhe der Zeitzunahme.
H 4.1.4		Deltoideus	Es existiert ein signifikant negativer Zusammenhang zwischen der Höhe der mittleren EA-Reduzierung im Deltoideus eines Individuums durch die eLPV und der Höhe der Zeitzunahme.
H 4.1.5		Bizeps	Es existiert ein signifikant negativer Zusammenhang zwischen der Höhe der mittleren EA-Reduzierung im Bizeps eines Individuums durch die eLPV und der Höhe der Zeitzunahme.
H 4.1.6	dynamisch EA	Multifidus	Es existiert ein signifikant negativer Zusammenhang zwischen der Höhe der dynamischen EA-Reduzierung im Multifidus eines Individuums durch die eLPV und der Höhe der Zeitzunahme.
H 4.1.7		Erector Spinae	Es existiert ein signifikant negativer Zusammenhang zwischen der Höhe der dynamischen EA-Reduzierung im Erector Spinae eines Individuums durch die eLPV und der Höhe der Zeitzunahme.
H 4.1.8		Trapezius	Es existiert ein signifikant negativer Zusammenhang zwischen der Höhe der dynamischen EA-Reduzierung im Trapezius eines Individuums durch die eLPV und der Höhe der Zeitzunahme.
H 4.1.9		Deltoideus	Es existiert ein signifikant negativer Zusammenhang zwischen der Höhe der dynamischen EA-Reduzierung im Deltoideus eines Individuums durch die eLPV und der Höhe der Zeitzunahme.
H 4.1.10		Bizeps	Es existiert ein signifikant negativer Zusammenhang zwischen der Höhe der dynamischen EA-Reduzierung im Bizeps eines Individuums durch die eLPV und der Höhe der Zeitzunahme.

Analog dazu werden die beiden Leithypothesen 4.2 und 4.3 formuliert. Da es sich um nur eine Messgröße handelt, die als Zusammenhangshypothese auf alle vier Szenarien angewendet wird, können diese Leithypothesen direkt statistisch ausgewertet werden. Die Leit- und Subhypothesen unterscheiden sich aus diesem Grund nicht.

H 4.2.1: Es existiert ein signifikant negativer Zusammenhang zwischen der Höhe der HSF-Reduzierung eines Individuums durch die eLPV und der Höhe der Zeitzunahme.

H 4.3.1: Es existiert ein signifikant negativer Zusammenhang zwischen der Höhe der Reduzierung des subjektiven Anstrengungsempfindens eines Individuums durch die eLPV und der Höhe der Zeitzunahme.

5.6 Statistische Datenauswertung

Die Datensätze werden zunächst deskriptiv mittels Box-Plot-Diagrammen dargestellt, um verschiedene Lagemaße, wie z. B. arithmetisches Mittel und Median, gleichzeitig darzustellen. Ausreißer werden nur dann entfernt, wenn diese durch messtechnische Probleme (z. B. Ablösen von Elektroden) oder durch offensichtlich fehlende Motivation der Versuchsteilnehmenden hervorgerufen wurden. Alle anderen Ausreißer sind als „tatsächliche“ Ausreißer zu werten, insbesondere, wenn eine bestimmte Versuchsperson für jedes Szenario einen Ausreißer in die gleiche Richtung darstellt. Dies kann beispielsweise auf eine niedrigere Gehgeschwindigkeit in Bezug auf zeitliche Größen oder auf einen sehr guten Fitnesszustand in Bezug auf geringe Beanspruchungen zurückzuführen sein. Diese begründeten Ausreißer werden nicht aus der Datenmenge entfernt. Zudem wird auf die Darstellung von Ausreißern in den Box-Plot Diagrammen verzichtet.

Unterschiedshypothesen

In Kapitel 5.5 wurde eine Reihe von Unterschiedshypothesen aufgestellt, die sich auf den Vergleich verschiedener Messgrößen bei vier λ-Gewichtung der eLPV beziehen. Die vier Szenarien werden von allen Versuchspersonen durchlaufen, sodass es sich um eine abhängige Stichprobe handelt. Zur statistischen Analyse wird deshalb eine einfaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholung, auch einfaktorielle repeated measures ANOVA genannt, durchgeführt (Döring & Bortz, 2016). Das Signifikanzniveau wird auf $\alpha = 0{,}05$ festgelegt. Eine Voraussetzung zur Anwendung der Varianzanalyse ist eine Normalverteilung der Daten – jedoch belegt die Literatur, dass die Varianzanalyse robust gegenüber einer Verletzung dieser Voraussetzung ist (Berkovits et al., 2000; Blanca et al., 2017). Zudem kann bei Stichproben mit $n \geq 30$ aufgrund des zentralen Grenzwerttheorems auf eine Normalverteilung verzichtet werden (Döring & Bortz, 2016). Bei Stichproben unter 30 Versuchsteilnehmenden, die nicht normalverteilt sind, wurde der nichtparametrische Friedman-Test als Alternative zur Varianzanalyse verwendet (Zimmermann & Zumbo, 1993). Mit dem Shapiro-Wilk Test wurden die entsprechenden Datensätze auf Normalverteilung untersucht, wobei ebenfalls ein Signifikanzniveau von 5 % festgelegt wurde.

Ferner muss für die Varianzanalyse Sphärizität vorliegen, was bedeutet, dass die Varianzen aller unabhängigen Variablen in etwa konstant sind (Backhaus et al., 2018). Die bekannteste Methode zur

Überprüfung der Sphärizität ist die Anwendung des Mauchly-Tests (Mauchly, 1940). Wird bei diesem Test die Nullhypothese nicht abgelehnt, kann von einem Vorliegen von Sphärizität ausgegangen werden – der p-Wert der einfaktoriellen Varianzanalyse kann dann direkt interpretiert werden. Andernfalls muss die sogenannte Epsilon-Korrektur erfolgen, um einen Fehler 1. Art zu verhindern. Die Art der Korrektur hängt von dem Epsilon-Wert ab. Ist dieser kleiner als 0,75, empfiehlt die Literatur die Greenhouse-Geisser-Korrektur, andernfalls sollte die Huynh-Feldt-Korrektur angewendet werden (Girden, 1992).
Bei der einfaktoriellen Varianzanalyse wird zunächst nur überprüft, ob Innersubjekteffekte vorliegen, also ob sich mindestens zwei Mittelwerte der unabhängigen Variable statistisch voneinander unterscheiden. Um herauszufinden, welche dieser Mittelwertpaare signifikante Differenzen aufweisen, wird eine Post-hoc-Analyse durchgeführt (Backhaus et al., 2018). Die paarweisen Vergleiche (t-Test) werden per Bonferroni-Korrektur angepasst, um Alphafehler-Kumulierung zu vermeiden. Weiterhin können Effektstärken berechnet werden, welche das Ausmaß der statistischen Unterschiede quantifizieren. Referenzwerte nach Cohen (1988) sind in Tabelle 17 gegeben.

Zusammenhangshypothesen

Des Weiteren wird sich statistischen Methoden zur Bestimmung der Korrelation bedient. Diese sagt aus, wie stark ein Zusammenhang zwischen zwei oder mehreren Merkmalen ist und welche Richtung dieser Zusammenhang hat (Field, 2009). Zusammenhangshypothesen werden mit der Produkt-Moment-Korrelation (Pearson-Korrelation) geprüft, sofern kardinalskalierte Datensätze vorliegen (Döring & Bortz, 2016; Du Prel et al., 2010). Der Pearson-Korrelationstest setzt zwar eigentlich eine bivariate Normalverteilung der Merkmale voraus, jedoch reagiert er auf eine Verletzung dieser Voraussetzung sehr robust (Bortz & Schuster, 2010), insbesondere wenn die Stichprobengröße > 30 ist. Aus diesem Grund werden die Zusammenhangshypothesen dieser Arbeit stets mit der Pearson-Korrelation überprüft. Cohen (1988) stellte für diese Korrelation ebenfalls eine Orientierungshilfe auf, um die Effektstärke der Korrelation einzuordnen, siehe Tabelle 17.

Tabelle 17: Klassifizierung der Effektstärken nach Cohen (1988)

Effektstärke	**Einfaktorielle Varianzanalyse**	**Pearson-Korrelation**
Kleiner Effekt	$0{,}1 \leq f < 0{,}25$	$0{,}1 \leq \lvert r \rvert < 0{,}3$
Mittlerer Effekt	$0{,}25 \leq f < 0{,}4$	$0{,}3 \leq \lvert r \rvert < 0{,}5$
Großer Effekt	$f \geq 0{,}4$	$\lvert r \rvert \geq 0{,}5$

Alle statistischen Überprüfungen der Hypothesen wurden mit der Statistiksoftware IBM SPSS durchgeführt.

6 Ergebnisse der Kommissionierversuche

In Kapitel 6 werden die Ergebnisse der empirischen Studie, geordnet nach den einzelnen Messgrößen, vorgestellt. Die Ergebnisse werden deskriptiv anhand von Box-Plot Diagrammen dargestellt, wobei zusätzlich der Mittelwert der Messungen (Kreuz, mit weißer Datenbeschriftung) eingezeichnet ist. Statistische Unterschiede der Mittelwerte werden überdies mit roten Klammern gekennzeichnet. Im Anschluss werden die Hypothesen anhand der Ergebnisse statistisch ausgewertet. Insgesamt beziehen sich die Ergebnisse auf 9216 einzelne Kommissioniervorgänge, die von 48 Versuchsteilnehmenden durchgeführt wurden. Dabei haben sie ein Gesamtgewicht von 35,8 Tonnen bewegt.

6.1 Muskuläre Beanspruchung

6.1.1 Deskriptive Auswertung der muskuläre Beanspruchung

Die Erfassung der muskulären Beanspruchung erfolgte mittels Oberflächen-Elektromyographie. Die Höhe der mittleren und dynamischen EA bestimmen die „physiologischen Kosten“ (Kluth et al., 2013) und damit die lokale physiologische Beanspruchung.

Mittlere elektromyographische Aktivität

In Abbildung 24 sind für alle fünf gemessenen Muskeln je die mittleren EA aus den EMG_pick-Daten für die vier verschiedenen Gewichtungsfaktoren der eLPV über alle Kommissionierenden (SOP & MOP) als Box-Plot Diagramm aufgetragen. Die höchsten lokalen muskulären Beanspruchungen sind in den beiden unteren Rückenmuskeln Multifidus und Erector Spinae zu finden. Deutlich geringer beansprucht sind der Bizeps, der Trapezius und insbesondere der Deltoideus. Auffällig sind für alle Muskeln die recht hohen Streubreiten der EA, welche jedoch aufgrund der großen interindividuellen Unterschiede der Versuchspersonen zu erwarten waren.

Von besonderer Relevanz sind die statistischen Unterschiede zwischen den einzelnen λ-Gewichtungen der eLPV. Für alle Muskeln lässt sich zunächst der gleiche Trend beobachten: mit steigendem λ (höherer Gewichtung der Belastungskennwerte in der eLPV) sinken die Mittelwerte und der Median der mittleren EA (% MVC). Vor allem die lokalen Beanspruchungen des unteren Rückens können stark reduziert werden. So sinken beispielsweise die mittleren EA (% MVC) des Multifidus von 35,4 % MVC (SD=15,0 % MVC) bei $\lambda = 0$ auf 28,8 % MVC (SD=12,4 % MVC) bei $\lambda = 1$, was einer Reduzierung der mittleren EA von etwa 18,6 % entspricht. Die entsprechende einfaktorielle Varianzanalyse zeigt signifikante Unterschiede zwischen den einzelnen Szenarien mit großer Effektstärke (Greenhouse-Geisser-Korrektur; $F(1{,}78;76{,}49) = 34{,}79$, $p < 0{,}001$, $f = 0{,}90$). Mittels Post-hoc Tests zeigen sich zwischen allen untersuchten Gewichtungsfaktoren hochsignifikante Unterschiede außer zwischen der Belastungsoptimierung ($\lambda = 1$) und der belastungspriorisierten Kompromisslösung ($\lambda = 0{,}55$).

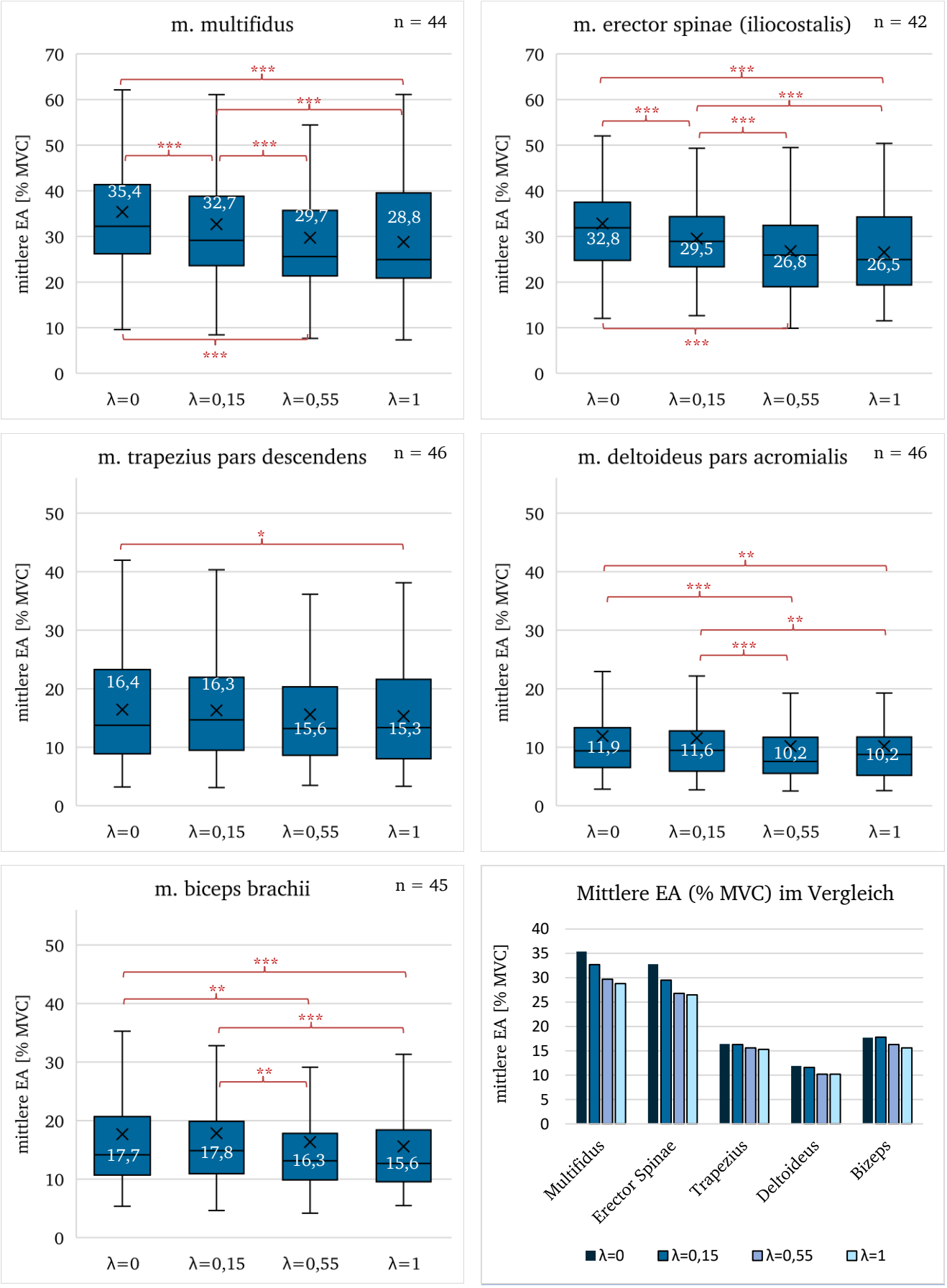


Abbildung 24: Box-Plot-Diagramme der mittleren EA (% MVC) inklusive Mittelwerte (weiß); signifikante Unterschiede der Mittelwertdifferenzen durch Klammer dargestellt (*α=0,05; ** α=0,01; *** α=0,001; Bonferroni-korrigiert)

Analog dazu zeigt auch die ANOVA bezüglich des Erector Spinae signifikante Unterschiede bei großen Effekten (Greenhouse-Geisser-Korrektur; $F(2{,}19;87{,}72) = 33{,}57$, $p < 0{,}001$, $f = 0{,}92$). Wiederum ergeben die Post-hoc Tests hochsignifikante Unterschiede außer zwischen den Gewichtungen $\lambda = 0{,}55$ und $\lambda = 1$.

Beim Trapeziusmuskel fallen die Unterschiede der mittleren EA hingegen wesentlich geringer aus, siehe Abbildung 24 (Mitte, links). Zwar zeigt die Varianzanalyse signifikante Unterschiede ($F(3;132) = 3{,}56$, $p = 0{,}016$, $f = 0{,}28$) bei mittleren Effekten. Jedoch wird mithilfe der Post-hoc Tests deutlich, dass sich lediglich die beiden eLPV zur Minimierung der Belastung ($\lambda = 1$) bzw. Kommissionierzeit ($\lambda = 0$) hinsichtlich der muskulären Beanspruchung unterscheiden. Alle weiteren Szenarien besitzen keine statistisch signifikanten Differenzen.

Schließlich ergeben sich auch bei der Messung des Deltoideus (Greenhouse-Geisser-Korrektur; $F(1{,}88;82{,}54) = 14{,}32$, $p < 0{,}001$, $f = 0{,}57$) sowie des Bizeps (Huynh-Feldt-Korrektur; $F(2{,}48;106{,}70) = 14{,}27$, $p = 0{,}016$, $f = 0{,}58$) statistische Unterschiede der physiologischen Kosten (mittlere EA) zwischen den verschiedenen Gewichtungsfaktoren der eLPV. Die Ergebnisse der Post-hoc Tests lassen sich Abbildung 24 entnehmen.

Zum besseren Vergleich der Mittelwerte zwischen einzelnen Muskeln sind diese in Abbildung 24 (unten rechts) mit einheitlicher Skalierung gesondert abgebildet.

Bei einer separaten Betrachtung des Single-Order (Versuchsteilnehmende Nr. 1 bis 24) und Multi-Order Pickings (Versuchsteilnehmende Nr. 25 bis 48) ändern sich die Ergebnisse der Rückenmuskulatur kaum. Es ergeben sich auch hier die gleichen signifikanten Unterschiede zwischen den verschiedenen Szenarien bei gleichbleibend großen Effekten – einzig die Mittelwertvergleiche der mittleren EA beim Multi-Order Picking zwischen der zeitpriorisierten und belastungspriorisierten Lösung bei den beiden Muskeln des unteren Rückens ergeben keine signifikanten Unterschiede. Beispielhalft ist dies in Abbildung 25 für den Erector Spinae dargestellt. Aufgrund der geringeren Stichprobengröße sind die Signifikanzniveaus etwas geringer als bei dem Datensatz über alle Versuchspersonen.

In der Gesamtbetrachtung können somit die entsprechenden Hypothesen H2.1.1-H2.1.18 (Multifidus) sowie H2.1.19-H2.1.36 (Erector Spinae) bis auf die Hypothesen H2.1.10 und H2.1.28 angenommen werden.

Bei den drei weiteren Muskeln ergeben sich ebenso für fast alle einfaktoriellen Varianzanalysen (bei Normalverteilung) bzw. Friedman-Tests (ohne Normalverteilung) signifikante Unterschiede zwischen den Szenarien bei Einzelbetrachtung von SOP bzw. MOP. Die Post-hoc Tests verzeichnen allerdings teilweise weniger statistische Unterschiede zwischen den einzelnen λ-Gewichtungen, sodass einige der in Kapitel 5 aufgestellten Hypothesen verworfen werden müssen. Insbesondere der Trapezius besitzt weder beim Single-Order noch beim Multi-Order-Picking signifikante Unterschiede zwischen den

verschiedenen λ-Gewichtungen. Alle weiteren Darstellungen bezüglich der Einzelbetrachtung von SOP und MOP sind in Anhang O.1 abgebildet.

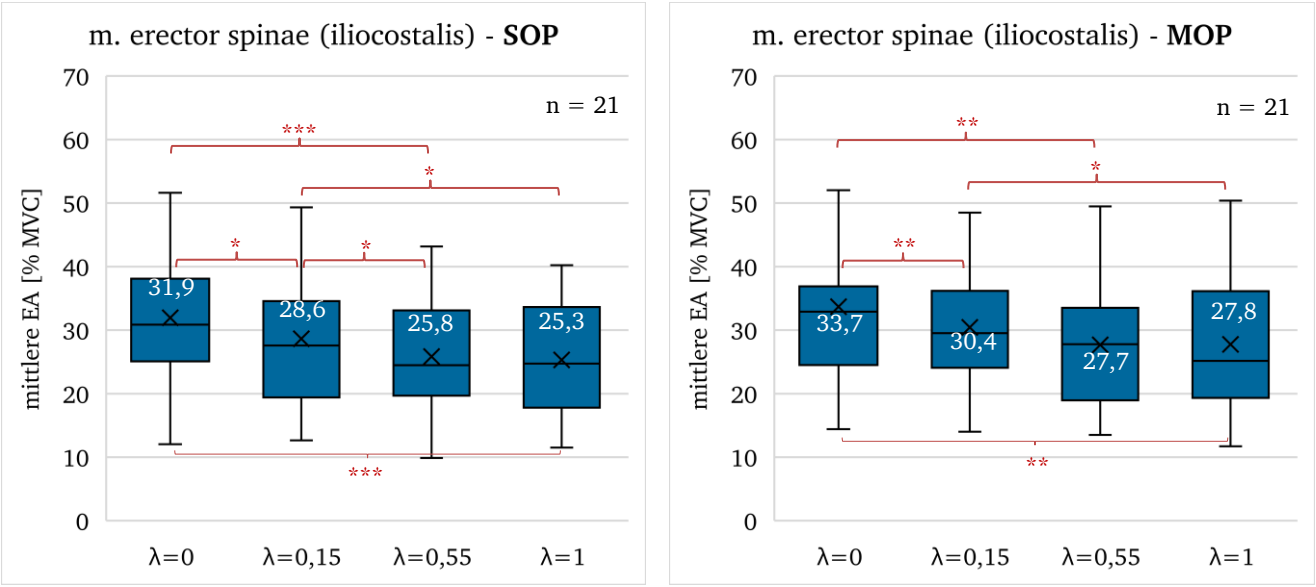


Abbildung 25: Vergleich der mittleren EA (% MVC) des m. erector spinae zwischen Single-Order Picking und Multi-Order Picking; signifikante Unterschiede der Mittelwertdifferenzen durch Klammer dargestellt (*α=0,05; ** α=0,01; *** α=0,001; Bonferroni-korrigiert)

Dynamische elektromyographische Aktivität

Analog zu den obigen mittleren EA werden in Abbildung 26 die Box-Plots der dynamischen EA der betrachteten Muskeln für alle λ-Gewichtungen der eLPV über alle Versuchsteilnehmenden dargestellt. Die einfaktorielle Varianzanalyse deutet darauf hin, dass bei jedem Muskel signifikante Unterschiede zwischen den einzelnen Faktoren vorliegen. Der Trend folgt dabei den gleichen Zusammenhängen wie bei den mittleren EA: Eine höhere λ-Ausprägung in der eLPV reduziert die dynamischen EA. Der Grad der Reduzierung sowie die Existenz von statistischen Unterschieden zwischen den Faktoren variiert jedoch zwischen den verschiedenen Muskeln.

Zuerst werden die unteren Rückenmuskeln analysiert. Auch bezüglich der dynamischen EA sind diese im Vergleich mit den anderen gemessenen Muskeln deutlich höher beansprucht. Zudem fällt auf, dass bei einzelnen Versuchspersonen dynamische EA-Werte von über 100 % MVC erreicht werden – woran dies liegen kann, wird in Kapitel 7.1.1 diskutiert.

Beim Multifidus sinken die dynamischen EA bereits bei einer Änderung des λ-Faktors von $\lambda = 0$ auf $\lambda = 0{,}15$ beträchtlich von 75,5 % MVC (SD=35,7 % MVC) auf 67,1 % MVC (SD=32,3 % MVC). Wenn eine Belastungsoptimierung angestrebt wird, lässt sich dieser Wert gar auf 47,2 % MVC (SD=20,9 % MVC) senken. Dies entspricht einer Reduktion der dynamischen EA um 37,5 %. Ähnliche Werte sind im Erector Spinae festzustellen. Von 69,0 % MVC (SD=25,8 % MVC) bei $\lambda = 0$ verringern sich die dynamischen EA auf 49,0 % MVC (SD=18,4 % MVC) bei $\lambda = 1$ – eine Reduktion um 29,0 %.

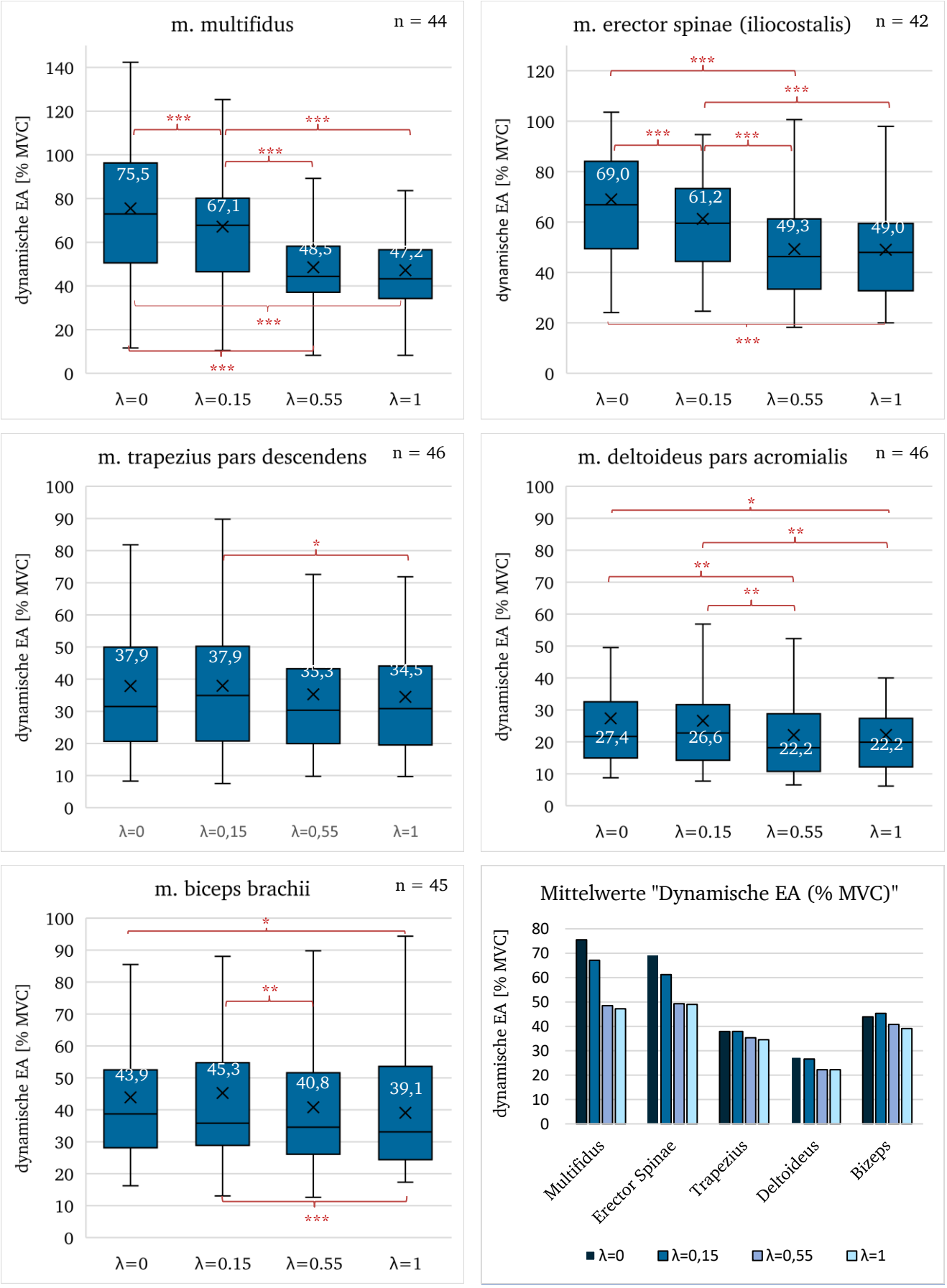


Abbildung 26: Box-Plot-Diagramme der dyn. EA (% MVC) inklusive Mittelwerte (weiß); signifikante Unterschiede der Mittelwertdifferenzen durch Klammer dargestellt (*α=0,05; ** α=0,01; *** α=0,001; Bonferroni-korrigiert)

Wiederum sind sowohl beim Multifidus (Greenhouse-Geisser-Korrektur; $F(1{,}26;54{,}29) = 51{,}99$, $p < 0{,}001$, $f = 1{,}10$) als auch beim Erector Spinae (Greenhouse-Geisser-Korrektur; $F(1{,}65;67{,}62) = 68{,}61$, $p < 0{,}001$, $f = 1{,}29$) hochsignifikante Unterschiede zwischen den Szenarien mit großen Effekten feststellbar.

Per Post-hoc Tests lassen sich zudem signifikante Differenzen zwischen den dynamischen EA der einzelnen λ-Ausprägungen der eLPV nachweisen – wiederum mit Ausnahme des Vergleichs zwischen dem Belastungsoptimum und der belastungspriorisierten Kompromisslösung. Die Hypothesen H2.1.91 bis H2.1.126 können somit bis auf einen λ-Vergleich beim Multifidus im Single-Order Picking angenommen werden, siehe Tabelle 18.

Der Trapezius zeigt nur bei Betrachtung aller Versuchspersonen (SOP & MOP) ((Huynh-Feldt-Korrektur; $F(2{,}61;117{,}27) = 4{,}87$, $p = 0{,}005$, $f = 0{,}33$) sowie bei den dynamischen EA beim MOP (Friedman-Test) signifikante Unterschiede zwischen den Szenarien mit mittleren Effektstärken. Insgesamt müssen die meisten Hypothesen bezüglich des Trapezius abgelehnt werden, da auf dem 5 %-Niveau keine statistischen Differenzen vorliegen – tendenziell sinken jedoch auch beim Trapezius die dynamischen EA mit steigender λ-Ausprägung.

Deltoideus und Bizeps zeigen schließlich bei Anwendung der einfaktoriellen Varianzanalyse jeweils für die Einzelbetrachtung von SOP und MOP als auch für die über alle Versuchsteilnehmenden gemittelten Daten signifikante Unterschiede bezüglich der dynamischen EA. Die jeweiligen statistisch signifikanten Differenzen zwischen den einzelnen Szenarien können Abbildung 26 bzw. Tabelle 18 entnommen werden.

Eine zusammenfassende Darstellung der Auswertung aller Hypothesen bezüglich des Einflusses der eLPV auf die muskuläre Beanspruchung ist in Tabelle 18 zu finden. Angenommene Hypothesen werden durch eine grüne Hinterlegung der entsprechenden Zelle markiert – abgelehnte Hypothesen hingegen werden in Rot gekennzeichnet. Zudem wird durch die (Un-)Gleichheitszeichen angedeutet, ob von einer gerichteten oder ungerichteten Hypothese ausgegangen wird. An dieser Stelle sei noch einmal darauf hingewiesen, dass alle einfaktoriellen Varianzanalysen signifikante Unterschiede ergeben mit Ausnahme des Trapezius für die Einzelbetrachtung des Single-Order und Multi-Order Picking. Ferner ist auffällig, dass für keinen Muskel die mittleren bzw. die dynamischen EA zwischen der Belastungsminimierung ($\lambda = 1$) und der belastungspriorisierten Kompromisslösung ($\lambda = 0{,}55$) signifikant verschieden sind. Für alle anderen Vergleiche von λ-Gewichtungen gibt es hingegen für eine Vielzahl an untersuchten Muskeln signifikante Reduzierungen der mittleren und dynamischen EA. Vor allem die Muskeln des unteren Rückens zeigen hochsignifikante Ergebnisse. Hingegen können keine Unterschiede zwischen der zeitminimierten und zeitpriorisierten Lösung für die Muskeln Trapezius, Deltoideus und Bizeps gefunden werden. Insgesamt können von 180 Hypothesen 132 angenommen werden. Von den 48 abgelehnten Hypothesen entfallen 26 auf den Trapezius und 12 auf den Bizeps.

Tabelle 18: Zusammenfassende Darstellung der Hypothesenauswertung H2.1.1 bis H2.1.180 (grün: Hypothese wird angenommen, rot: Hypothese wird abgelehnt; „<“: gerichtete Hypothese; „=“: ungerichtete Hypothese)

Hypothese	Messgröße	Muskel	Picking-Strategie	Vergleich von…					
				λ_1, $\lambda_{0,55}$	λ_1, $\lambda_{0,15}$	λ_1, λ_0	$\lambda_{0,55}$, $\lambda_{0,15}$	$\lambda_{0,55}$, λ_0	$\lambda_{0,15}$, λ_0
H 2.1.1 – H 2.1.18	mittlere EA	Multifidus	SOP	=	<	<	<	<	<
			MOP	=	<	<	<	<	<
			SOP & MOP	=	<	<	<	<	<
H 2.1.19 – H 2.1.36		Erector Spinae	SOP	=	<	<	<	<	<
			MOP	=	<	<	<	<	<
			SOP & MOP	=	<	<	<	<	<
H 2.1.37 – H 2.1.54		Trapezius	SOP	=	<	<	<	<	<
			MOP	=	<	<	<	<	<
			SOP & MOP	=	<	<	<	<	<
H 2.1.55 – H 2.1.72		Deltoideus	SOP	=	<	<	<	<	<
			MOP	=	<	<	<	<	<
			SOP & MOP	=	<	<	<	<	<
H 2.1.73 – H 2.1.90		Bizeps	SOP	=	<	<	<	<	<
			MOP	=	<	<	<	<	<
			SOP & MOP	=	<	<	<	<	<
H 2.1.91 – H 2.1.108	dynamisch EA	Multifidus	SOP	=	<	<	<	<	<
			MOP	=	<	<	<	<	<
			SOP & MOP	=	<	<	<	<	<
H 2.1.109 – H 2.1.126		Erector Spinae	SOP	=	<	<	<	<	<
			MOP	=	<	<	<	<	<
			SOP & MOP	=	<	<	<	<	<
H 2.1.127 – H 2.1.144		Trapezius	SOP	=	<	<	<	<	<
			MOP	=	<	<	<	<	<
			SOP & MOP	=	<	<	<	<	<
H 2.1.145 – H 2.1.162		Deltoideus	SOP	=	<	<	<	<	<
			MOP	=	<	<	<	<	<
			SOP & MOP	=	<	<	<	<	<
H 2.1.163 – H 2.1.180		Bizeps	SOP	=	<	<	<	<	<
			MOP	=	<	<	<	<	<
			SOP & MOP	=	<	<	<	<	<

Bisher wurden nur die EMG_pick-Daten betrachtet, also eine Datenmenge, die nur EMG-Signale während der SKU-Entnahme enthält. Abbildung 27 hingegen zeigt die Ergebnisse bei Betrachtung der gesamten EMG-Daten (EMG_all). Die mittleren EA sind hierbei erwartungsgemäß niedriger als bei Betrachtung der EMG_pick-Daten, da die Muskeln beispielsweise während des Schiebens des Kommissionierwagens weniger beansprucht werden als beim Entnehmen eines SKU. Der Vergleich

zwischen den verschiedenen Gewichtungsfaktoren der eLPV ist dennoch sehr ähnlich zu bewerten – die Unterschiede fallen niedriger aus, sind aber ebenfalls (hoch-)signifikant.

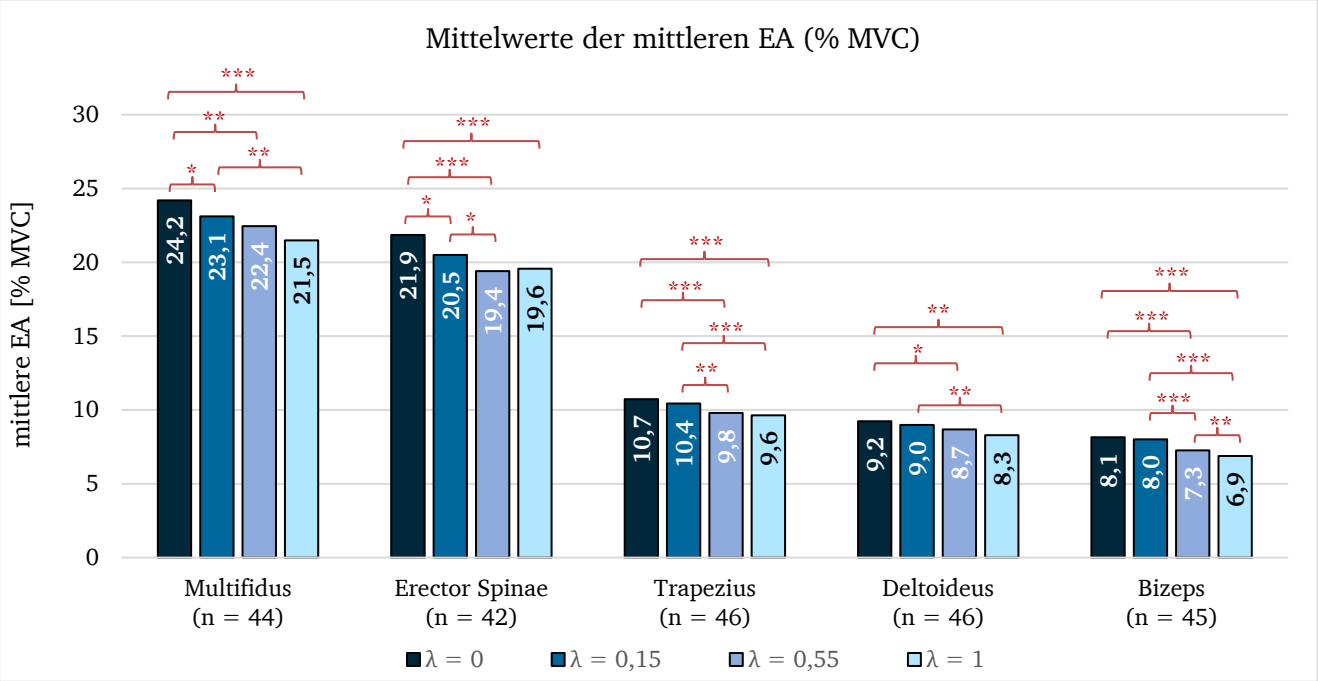


Abbildung 27: Mittelwerte der mittleren EA (% MVC) bei Analyse des Datensatzes EA_all; signifikante Unterschiede der Mittelwertdifferenzen durch Klammer dargestellt (*α=0,05; ** α=0,01; *** α=0,001; Bonferroni-korrigiert)

Zusätzlich sei auf zwei weitere Aspekte hingewiesen, die in ihrer Ausführlichkeit lediglich im Anhang zu finden sind, jedoch für die Interpretation der Ergebnisse nicht zu vernachlässigen sind:

- Werden die Daten unabhängig von der λ-Gewichtung, aber entsprechend ihrer tatsächlichen Reihenfolge im Versuchsablauf ausgewertet, so ergeben sich keine statistischen Unterschiede zwischen den einzelnen Durchgängen. Es liegen somit keine Reihenfolgeeffekte vor. Entsprechende Grafiken sind in Anhang O.2 abgebildet.
- Werden Mittelwertvergleiche für die gemessenen Muskeln zwischen SOP und MOP (auf Basis der EMG_pick-Daten) durchgeführt, so ergeben sich außer für den Deltoideus keine signifikanten Unterschiede. Die Differenzen der muskulären Beanspruchungen zwischen SOP und MOP sind somit größtenteils zu vernachlässigen. Die Vergleiche sind in Anhang O.3 zu finden.

6.1.2 Korrelation zwischen der muskulären Beanspruchung und den Belastungskennwerten

In diesem Unterkapitel wird die Produkt-Moment-Korrelation nach Pearson zwischen den in der eLPV genutzten Belastungskennwerten (Druckkräfte auf L5-S1 auf Basis des Dortmunders) und den

gemessenen muskulären Beanspruchungen (mittlere und dynamische elektromyographische Aktivität) untersucht. Es sind zwei Varianten denkbar, wie die Datengrundlage zur Korrelationsanalyse festgelegt werden kann:

1) Es werden Mittelwerte der mittleren bzw. dynamischen EA von Entnahmevorgängen mit identischen Lastgewicht und Greifhöhe gebildet und diese anschließend mit den Druckkraftwerten korreliert.
2) Die mittleren bzw. dynamischen EA jedes einzelnen Pickvorgangs (je nach Muskel zwischen 7000 und 8000) werden mit den jeweiligen Druckkraftwerten korreliert.

Die Ergebnisse der Korrelationsanalyse auf Basis beider Datenmengen sind in den Tabellen 19 und 20 gegeben. Vorab sei erwähnt, dass in der Datenmenge „echte“ Ausreißer enthalten sind. Deshalb werden zusätzlich die Spearman-Korrelationskoeffizienten (nicht-parametrisch) berechnet und mit den Pearson-Werten verglichen. Die Unterschiede der Korrelationskoeffizienten sind marginal, sodass auf eine Darstellung der Spearman-Korrelationskoeffizienten verzichtet wird.

Tabelle 19: Produkt-Moment-Korrelation der Belastungskennwerte der eLPV und der Mittelwerte der mittleren und dynamischen EA der einzelnen Muskeln

	Multifidus		**Erector Spinae**		**Trapezius**		**Deltoideus**		**Bizeps**	
	mittl. EA	**dyn. EA**	**mittl. EA**	**dyn. EA**	**mittl. EA**	**dyn. EA**	**mittl. EA**	**dyn. EA**	**mittl. EA**	**dyn. EA**
Hypothese	H2.2.1	H2.2.6	H2.2.2	H2.2.7	H2.2.3	H2.2.8	H2.2.4	H2.2.9	H2.2.5	H2.2.10
Pearson-Korrelation	**0,862*****	**0,873*****	**0,869*****	**0,886*****	**0,503****	**0,638*****	**0,401***	**0,435***	**0,695*****	**0,715*****
p-Wert	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,002	< 0,001	0,019	0,010	< 0,001	< 0,001
n	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34
Effektstärke	groß	groß	groß	groß	groß	groß	mittel	mittel	groß	groß
Ablehnung von H_0?	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Tabelle 20: Produkt-Moment-Korrelation der Belastungskennwerte der eLPV und der mittleren und dynamischen EA der einzelnen Muskeln

	Multifidus		**Erector Spinae**		**Trapezius**		**Deltoideus**		**Bizeps**	
	mittl. EA	**dyn. EA**	**mittl. EA**	**dyn. EA**	**mittl. EA**	**dyn. EA**	**mittl. EA**	**dyn. EA**	**mittl. EA**	**dyn. EA**
Hypothese	H2.2.1	H2.2.6	H2.2.2	H2.2.7	H2.2.3	H2.2.8	H2.2.4	H2.2.9	H2.2.5	H2.2.10
Pearson-Korrelation	**0,410*****	**0,526*****	**0,453*****	**0,410*****	**0,192*****	**0,222*****	**0,154*****	**0,115*****	**0,368*****	**0,410*****
p-Wert	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
n	7293	7293	7003	7003	7866	7866	7675	7675	7678	7678
Effektstärke	mittel	groß	mittel	mittel	klein	klein	klein	klein	mittel	mittel
Ablehnung von H_0?	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Alle Korrelationskoeffizienten sind signifikant positiv – das bedeutet, dass höhere prognostizierte Belastungen auf die Bandscheibe L5-S1 zu höheren lokalen Beanspruchungen der Muskeln führen. Wie zu erwarten, sind die entsprechenden Pearson-Korrelationen für die Muskeln des unteren Rückens am höchsten. Die Korrelationskoeffizienten für Multifidus und Erector Spinae besitzen sowohl für die Mittelwerte der mittleren als auch der dynamischen EA Werte mit $r > 0{,}8$ ($p < 0{,}001$). Dies entspricht großen Effektstärken bzw. starker Korrelation. Abbildung 28 verdeutlicht den Zusammenhang mit einer linearen Regression der Druckkraftwerte der eLPV auf die Mittelwerte der mittleren EA.

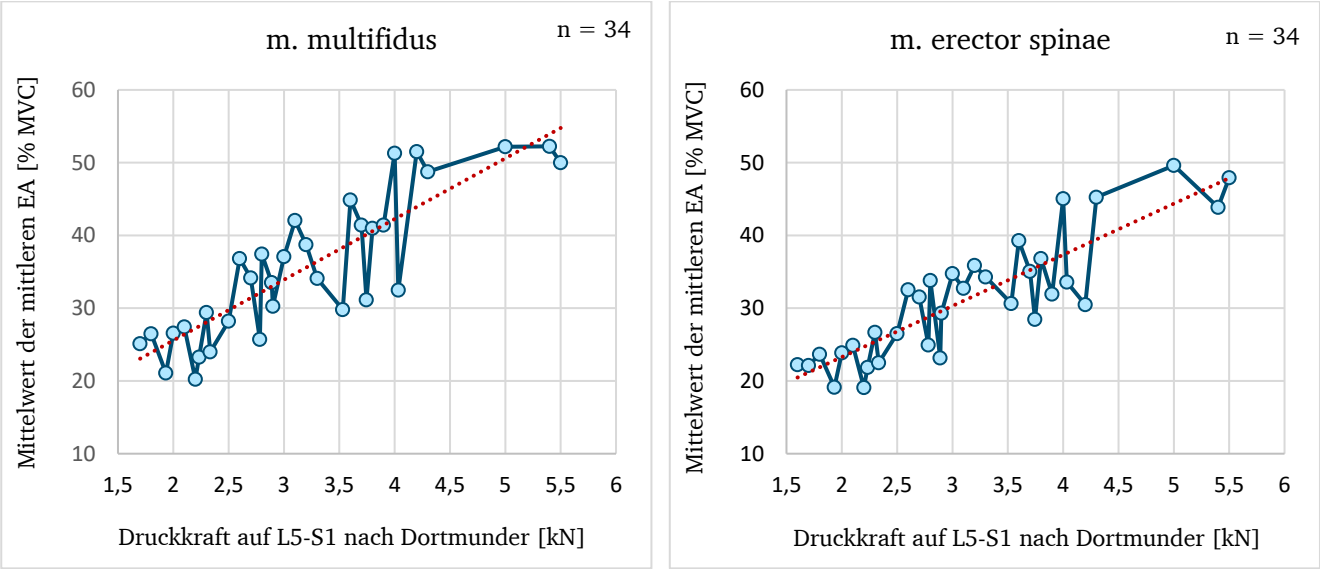


Abbildung 28: Lineare Regression der Druckkraft auf L5-S1 nach dem Dortmunder und den Mittelwerten der mittleren EA von m. multifidus (links) und m. erector spinae (rechts)

Die Korrelationskoeffizienten sowie die entsprechenden Effektstärken der Korrelation sind bei der ersten Berechnungsvariante (gemittelte EA identischer Entnahmevorgänge) aufgrund der geringeren Schwankungen der Messwerte größer. So betragen die Korrelationskoeffizienten der Muskeln des unteren Rückens bei der zweiten Berechnungsvariante (Korrelation aller einzelnen Kommissioniervorgänge) Werte von $r > 0{,}4$ ($p < 0{,}001$) bei mittleren bis großen Effekten.

Die Korrelationskoeffizienten der anderen Muskeln sind teilweise deutlich niedriger. Insbesondere der Deltoideus besitzt nur mittlere Effektstärken ($r = 0{,}401$; $p = 0{,}019$ bei mittl. EA und $r = 0{,}435$; $p = 0{,}01$ bei dyn. EA) bei den Mittelwerten der EA bzw. kleine Effekte bei Korrelation der Einzelwerte der EA ($r = 0{,}154$; $p < 0{,}001$ bei mittlerer EA und $r = 0{,}115$; $p < 0{,}001$ bei dynamischer EA). Die errechneten Korrelationskoeffizienten von Trapezius und Bizeps sind ebenso alle signifikant positiv und besitzen große Effektstärken auf Grundlage der gemittelten EA-Werte und kleine bis mittlere Effekte bei Betrachtung aller einzelnen Entnahmevorgänge als Datengrundlage. Die Hypothesen H2.2.1 bis H2.2.10 können schließlich bei beiden Berechnungsvarianten angenommen werden.

6.1.3 Abhängigkeit der muskulären Beanspruchung von individuellen Eigenschaften

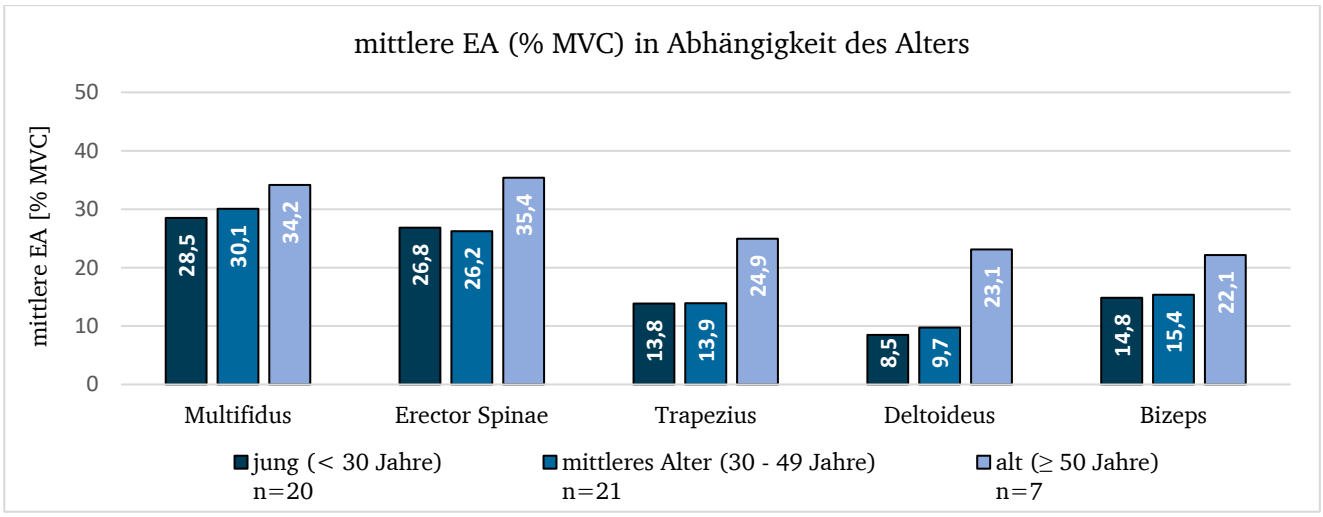
Die ermittelten muskulären Beanspruchungen werden ferner in Bezug auf den Einfluss individueller Eigenschaften der Kommissionierenden untersucht. Hierfür werden Mittelwerte der mittleren EA über alle Entnahmevorgänge für jede Versuchsperson kalkuliert und diese anschließend in Gruppen von Versuchspersonen mit bestimmten Eigenschaften eingeteilt und miteinander verglichen. Differenziert wird nach dem Alter, dem Geschlecht sowie dem Trainingszustand der Personen (gemessen anhand der Anzahl an Stunden, die die Teilnehmenden pro Woche Sport treiben; siehe Fragebogen A). In Abbildung 29 sind die entsprechenden Vergleiche visualisiert. Aufgrund der unabhängigen Stichproben wird zur Berechnung der Signifikanz die Welch-ANOVA genutzt.

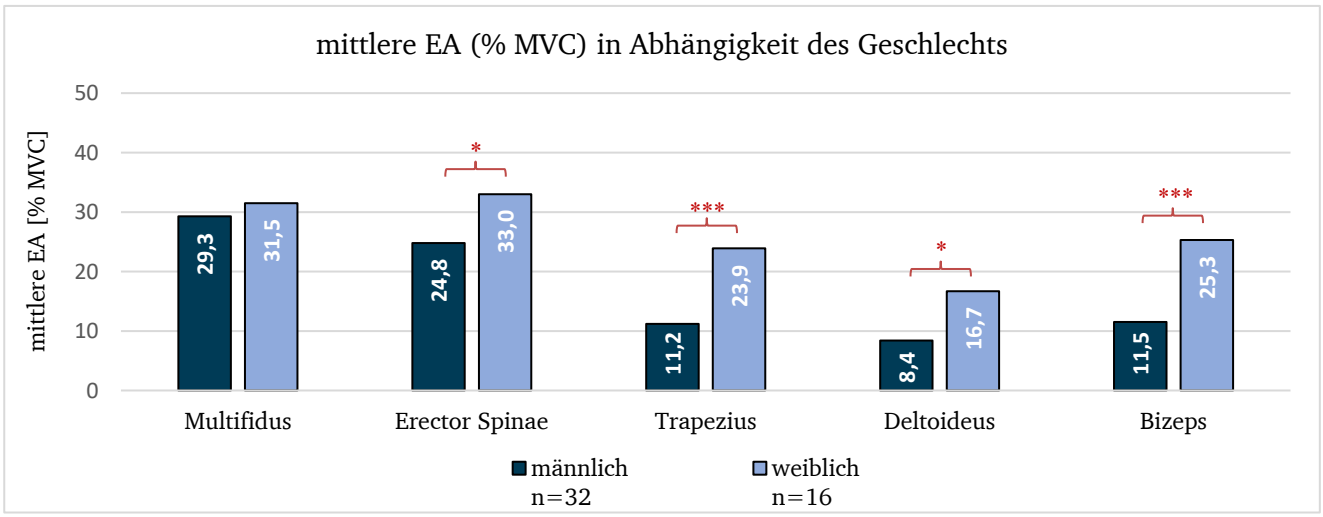
Die physiologischen Kosten älterer Personen (≥ 50 Jahre) sind bei einer von der λ-Gewichtung der eLPV unabhängigen Betrachtung für alle gemessenen Muskeln höher als für jüngere Gruppen von Versuchspersonen. Die mittleren EA von Personen jungen (< 30 Jahre) bzw. mittleren Alters (30 - 49 Jahre) unterscheiden sich hingegen kaum voneinander. Die Welch-ANOVA zeigt keine signifikanten Differenzen zwischen den einzelnen Gruppen.

Außerdem ist festzustellen, dass die muskuläre Beanspruchung von Frauen höher ist als von Männern. Die Mittelwertunterschiede zwischen den Geschlechtern sind außer für den Multifidus statistisch signifikant. Bei den Muskeln Trapezius, Deltoideus und Bizeps fallen die mittleren EA für Frauen mehr als doppelt so hoch aus als für männliche Versuchsteilnehmer.

Schließlich hat auch der Trainingszustand einer Person Einfluss auf die gemessene elektromyographische Aktivität. Personengruppen, die wenig Sport treiben (unter zwei Stunden pro Woche), weisen tendenziell höhere muskuläre Beanspruchungen auf als Personengruppen, die angaben, mehr Sport zu betreiben. Eine weitere Untergliederung in „mittel“ und „viel“ sportliche Aktivität zeigt hingegen kaum noch Unterschiede in Bezug auf die mittlere EA. Die entsprechenden Unterschiede sind nicht statistisch signifikant (Welch-ANOVA).

Da die alters-, trainings- und geschlechtsabhängigen muskulären Beanspruchungen in der Literatur bekannt sind (z. B. Yue & Cole, 1992; Jensen et al., 1994; Pincivero et al., 2000) werden diese im Folgenden nicht weiter diskutiert.





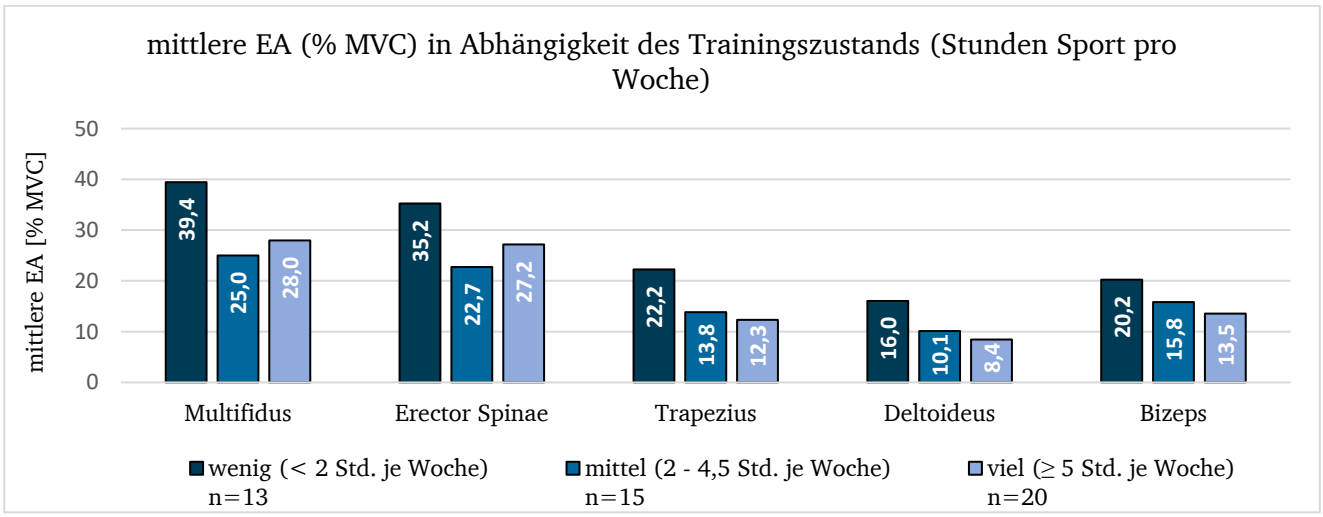


Abbildung 29: Mittlere EA (% MVC) in Abhängigkeit von individuellen Eigenschaften der Kommissionierenden; signifikante Unterschiede der Mittelwertdifferenzen durch Klammer dargestellt (*α=0,05; ** α=0,01; *** α=0,001; Bonferroni-korrigiert)

6.2 Beanspruchung des Herz-Kreislauf-Systems

6.2.1 Deskriptive Auswertung der Herzschlagfrequenz

Die Beanspruchung des Herz-Kreislauf-Systems wird in dieser Arbeit anhand der Herzschlagfrequenz beurteilt. Die Ergebnisse der einzelnen Szenarien mit verschiedenen λ-Ausprägungen der eLPV über alle Probandinnen und Probanden sind in Abbildung 30 aufgezeigt.

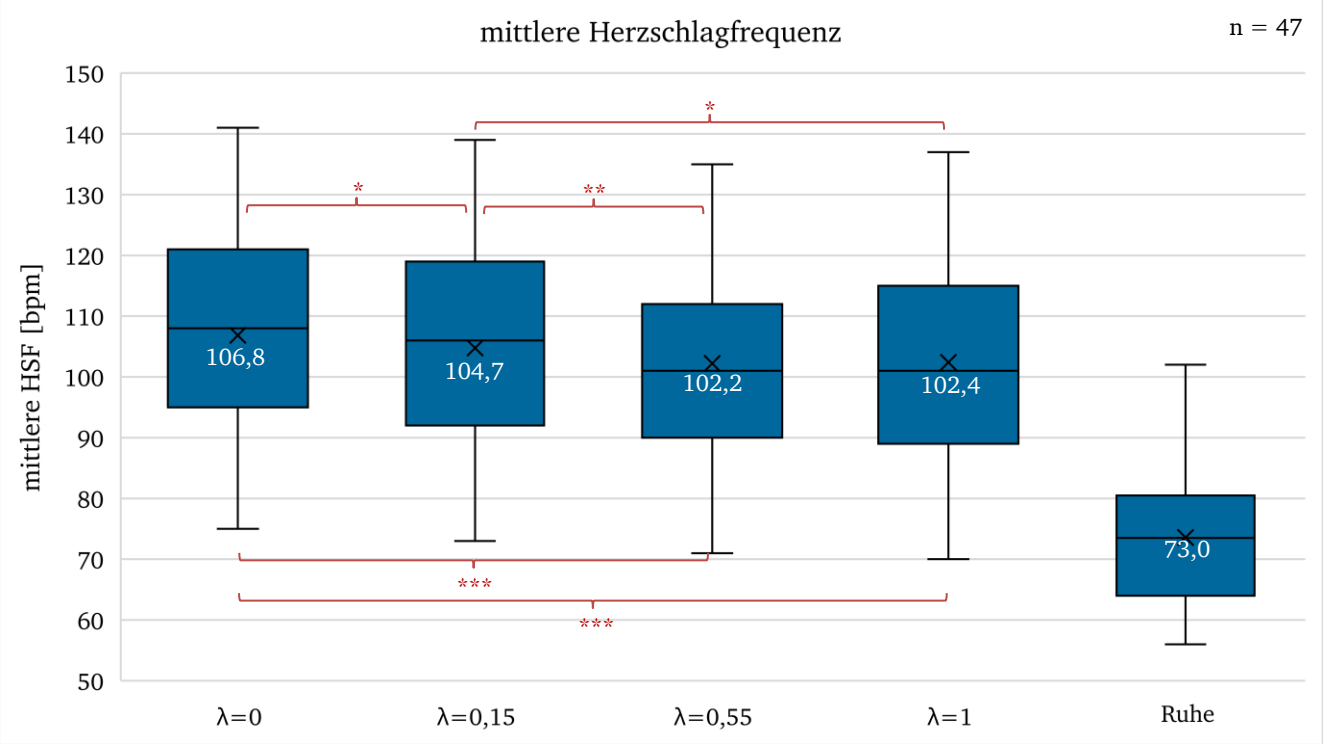


Abbildung 30: Box-Plot-Diagramme der mittleren HSF inklusive Mittelwerte (weiß); signifikante Unterschiede der Mittelwertdifferenzen durch Klammer dargestellt (*α=0,05; ** α=0,01; *** α=0,001; Bonferroni-korrigiert)

Es liegen statistisch signifikante Unterschiede in der gemittelten Herzschlagfrequenz mit hoher Effektstärke vor ($F(3;138) = 15{,}98, p < 0{,}001, f = 0{,}59$). Die Differenzen zwischen den einzelnen Szenarien sind sehr gering. So liegen zwischen der HSF bei der zeitminimierten eLPV (106,8 bpm, SD=16,3 bpm) und der belastungsminimierten eLPV (102,4 bpm, SD=16,4 bpm) lediglich etwa 4 bpm. Die Referenzmessung liegt bei deutlich niedrigeren 73,0 bpm (SD=11,1 bpm) und damit innerhalb des in der Literatur typischerweise angegebenen Bereichs von 60 bis 80 bpm. Trotz der relativ geringen absoluten Differenzen kann mittels Post-hoc Test und Bonferroni-Korrektur belegt werden, dass zwischen allen λ-Gewichtungen signifikante Unterschiede bestehen außer zwischen der belastungspriorisierten Kompromisslösung und der Belastungsminimierung. Konkret liegt die HSF bei $\lambda = 1$ sogar etwas höher als bei $\lambda = 0{,}55$. Signifikante Unterschiede liegen auch zwischen den Versuchsszenarien und der Ruhemessung vor – auf eine entsprechende Darstellung wird in Abbildung 30

jedoch verzichtet. Somit können die Hypothesen bezüglich der Gesamtbetrachtung über alle Probandinnen und Probanden angenommen werden.

Bei einer Einzelbetrachtung des SOP bzw. MOP sind ähnliche Tendenzen feststellbar, siehe Anhang P. Jedoch sind weniger Signifikanzen zu verzeichnen, sodass insgesamt fünf Hypothesen abgelehnt werden müssen. Tabelle 21 gibt einen entsprechenden Überblick.

Tabelle 21: Zusammenfassende Darstellung der Hypothesenauswertung von H2.3.1 bis H2.3.18 (grün: Hypothese wird angenommen, rot: Hypothese wird abgelehnt; „<“: gerichtete Hypothese; „=“: ungerichtete Hypothese)

Hypothese	Messgröße	Vergleich von	Picking-Strategie
H 2.3.1 – H 2.3.3	mittlere Herzschlagfrequenz (HSF)	λ_1 und $\lambda_{0,55}$	SOP (=)
			MOP (=)
			SOP & MOP (=)
H 2.3.4 – H 2.3.6		λ_1 und $\lambda_{0,15}$	SOP (<)
			MOP (<)
			SOP & MOP (<)
H 2.3.7 – H 2.3.9		λ_1 und λ_0	SOP (<)
			MOP (<)
			SOP & MOP (<)
H 2.3.10 – H 2.3.12		$\lambda_{0,55}$ und $\lambda_{0,15}$	SOP(<)
			MOP (<)
			SOP & MOP (<)
H 2.3.13 – H 2.3.15		$\lambda_{0,55}$ und λ_0	SOP (<)
			MOP (<)
			SOP & MOP (<)
H 2.3.16 – H 2.3.18		$\lambda_{0,15}$ und λ_0	SOP (<)
			MOP (<)
			SOP & MOP (<)

6.2.2 Korrelation zwischen der Herz-Kreislauf-Beanspruchung und den Belastungskennwerten

Im Folgenden wird das Ergebnis der Produkt-Moment-Korrelation zwischen der HSF und den Belastungskennwerten der eLPV vorgestellt. Da die Herzschlagfrequenz über das gesamte Szenario aufgezeichnet wurde und nicht einzelnen Pickvorgängen zugeordnet werden kann, wird zur Berechnung der Korrelation die mittlere HSF mit der durch die eLPV berechneten Gesamtbelastung (kumulierte Druckkraft auf Wirbelsäulensegment L5-S1) für jede λ-Gewichtung korreliert. Der Korrelationskoeffizient beträgt $r = 0{,}113$ und ist nicht signifikant. Entsprechend muss Hypothese H2.4.1 abgelehnt werden.

6.3 Subjektives Anstrengungsempfinden

6.3.1 Deskriptive Auswertung des subjektiven Anstrengungsempfinden

Eng verbunden mit der Herzschlagfrequenz ist das subjektive Anstrengungsempfinden nach der Borg RPE Skala. Bei einer Versuchsperson wurden die Werte der Borg RPE Skala nur teilweise dokumentiert, sodass die Daten dieses Teilnehmenden gänzlich entfernt wurden. Somit bleiben n = 47 Datensätze zur Auswertung übrig.

Die Box-Plot Diagramme des Anstrengungsempfindens unmittelbar vor Beginn des Kommissionierszenarios, nach der Hälfte aller Positionen auf der Pickliste sowie am Ende jedes Szenarios für die verschiedenen λ-Gewichtungen sind in Abbildung 31 gegeben.

Zunächst fällt auf, dass das Anstrengungsempfinden mit steigender Dauer der einzelnen Versuchsszenarien zunimmt. Die Mittelwerte vor Beginn des Szenarios sind niedriger als nach der Hälfte aller Picks bzw. zum Ende des Szenarios. Vor Beginn der Szenarien bewegen sich die Mittelwerte der Borg RPE Skala in einem niedrigen Bereich zwischen 7 und 8 Punkten, was einer „extrem leichten“ Anstrengung entspricht. Zwischen den einzelnen λ-Gewichtungen sind erwartungsgemäß keine statistischen Unterschiede festzustellen.

Nach der Kommissionierung der Hälfte aller Positionen auf der Pickliste sind nach der einfaktoriellen ANOVA mit Messwiederholung hingegen statistisch signifikante Differenzen bei großer Effektstärke vorhanden ($F(3;138)=21{,}81$, $p < 0{,}001$, $f = 0{,}69$). Das subjektive Anstrengungsempfinden sinkt von 11,7 Punkten (SD=1,86 Punkte) bei $\lambda = 0$ über 11,1 Punkte (SD=1,90 Punkte) bei $\lambda = 0{,}15$ auf 10,4 Punkte (SD=1,78 Punkte) bei $\lambda = 0{,}55$. Bei $\lambda = 1$ hingegen ist der Mittelwert der Borg RPE Skala mit 10,5 Punkten (SD=1,94 Punkte) marginal höher. Entsprechend der Borg RPE Skala handelt es sich somit um „leichte Anstrengungen“. Außer zwischen den letzteren beiden λ-Ausprägungen sind alle Unterschiede zwischen den Mittelwerten entsprechend der Post-hoc Tests signifikant.

Am Ende der Kommissionierszenarien ergibt sich ein sehr ähnliches Bild. Wiederum sind alle Mittelwerte der subjektiven Anstrengungsempfindung der einzelnen λ-Gewichtungen bis auf diejenigen der belastungspriorisierten Kompromisslösung und der Belastungsminimierung signifikant verschieden (Greenhouse-Geisser-Korrektur; $F(2{,}45;112{,}60)=38{,}06$, $p < 0{,}001$, $f = 0{,}91$). Der höchste gemittelte Wert auf der Borg RPE Skala wird bei dem zeitminimierenden Szenario ($\lambda = 0$) mit 12,9 Punkten (SD=1,85 Punkte) erreicht. Dies entspricht einer „etwas anstrengenden“ Tätigkeit – bei der entsprechenden Beanspruchung kann jedoch laut Borg RPE Skala gut weitergearbeitet werden.

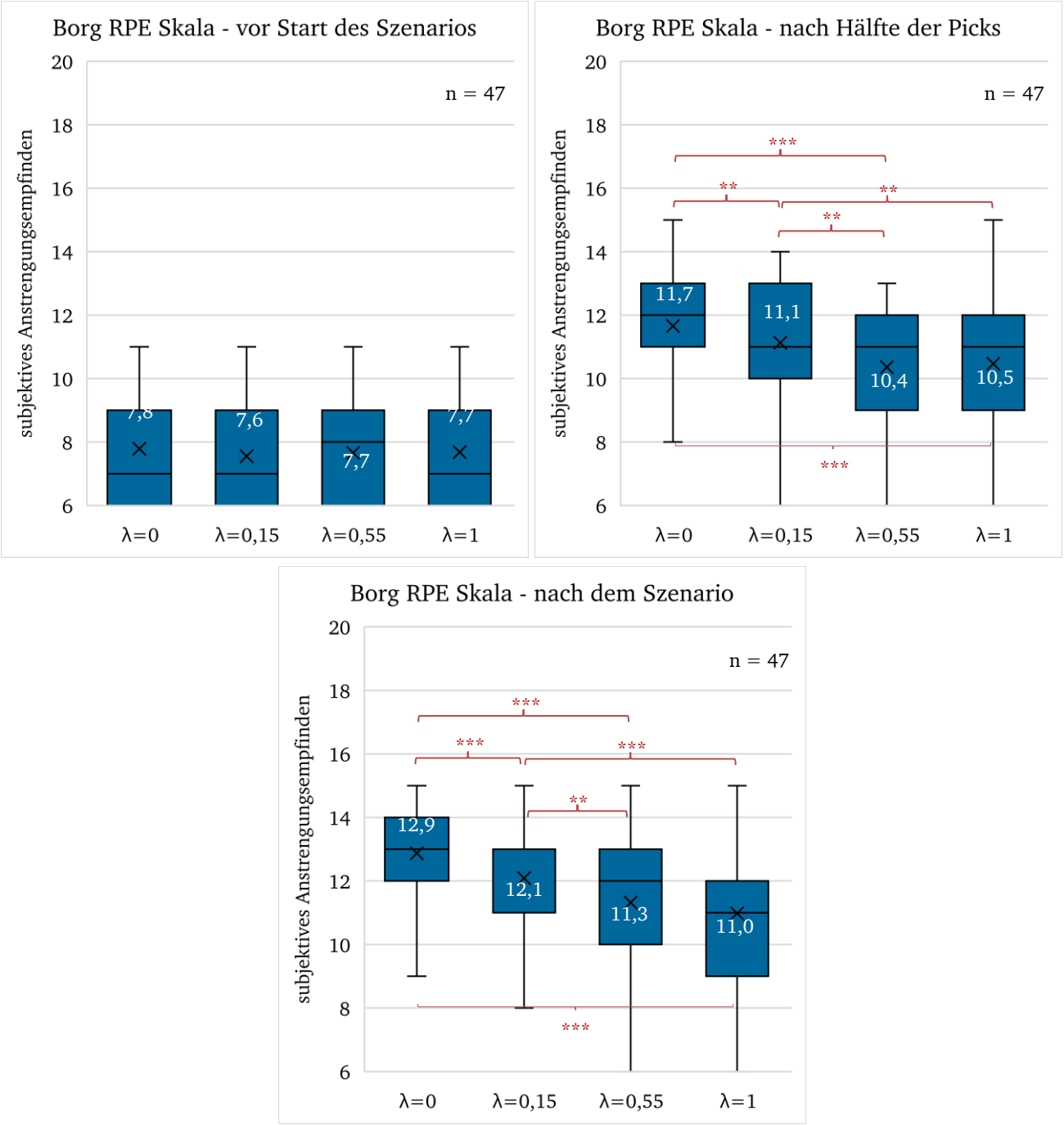


Abbildung 31: Box-Plot-Diagramme des subjektiven Anstrengungsempfindens nach der Borg RPE Skala; Mittelwerte in weiß; signifikante Unterschiede der Mittelwertdifferenzen durch Klammer dargestellt (*α=0,05; ** α=0,01; *** α=0,001; Bonferroni-korrigiert)

Bei separater Betrachtung des SOP bzw. MOP (Box-Plot Diagramme in Anhang Q) sind zwischen den einzelnen λ-Gewichtungen der eLPV mit einer Ausnahme ebenso signifikante Differenzen festzustellen – eine Übersicht über die entsprechende Annahme bzw. Ablehnung der Hypothesen H2.5.1 bis H2.5.18 bezogen auf das subjektive Anstrengungsempfinden am Ende des Kommissionierszenarios zeigt Tabelle 22. Da die entsprechenden Daten nicht normalverteilt ($n < 30$) sind, wurde zur Überprüfung der Hypothesen bezüglich SOP bzw. MOP der Friedman-Test angewendet.

Tabelle 22: Zusammenfassende Darstellung der Hypothesenauswertung H2.5.1 bis H2.5.18 bezogen auf das subjektive Anstrengungsempfinden am Ende des Szenarios (grün: Hypothese wird angenommen, rot: Hypothese wird abgelehnt; „<": gerichtete Hypothese; „=": ungerichtete Hypothese)

Hypothese	Messgröße	Vergleich von	Picking-Strategie
H 2.5.1 – H 2.5.3	Subjektives Anstrengungsempfinden nach der Borg RPE Skala	λ_1 und $\lambda_{0,55}$	SOP (=)
			MOP (=)
			SOP & MOP (=)
H 2.5.4 – H 2.5.6		λ_1 und $\lambda_{0,15}$	SOP (<)
			MOP (<)
			SOP & MOP (<)
H 2.5.7 – H 2.5.9		λ_1 und λ_0	SOP (<)
			MOP (<)
			SOP & MOP (<)
H 2.5.10 – H 2.5.12		$\lambda_{0,55}$ und $\lambda_{0,15}$	SOP(<)
			MOP (<)
			SOP & MOP (<)
H 2.5.13 – H 2.5.15		$\lambda_{0,55}$ und λ_0	SOP (<)
			MOP (<)
			SOP & MOP (<)
H 2.5.16 – H 2.5.18		$\lambda_{0,15}$ und λ_0	SOP (<)
			MOP (<)
			SOP & MOP (<)

6.3.2 Korrelation zwischen dem Anstrengungsempfinden und den Belastungskennwerten

Zwischen dem subjektiven Anstrengungsempfinden auf der Borg RPE Skala während der Kommissionierversuche und den Belastungskennwerten der eLPV liegen signifikante Produkt-Moment-Korrelationen vor. Dies gilt sowohl für die Borg-Werte zur Hälfte der zu kommissionierenden Artikel je Szenario ($r=0{,}263$; $p < 0{,}001$) als auch für die Borg-Werte zum Ende jedes Kommissionierdurchgangs ($r=0{,}347$; $p < 0{,}001$). Die Effektstärken sind nach Cohen (1988) als klein bzw. mittel einzuschätzen. Dementsprechend ist Hypothese H2.6.1 anzunehmen.

6.4 Kommissionierzeit

6.4.1 Deskriptive Auswertung der Kommissionierzeit

Von besonderer Relevanz in diesem Kapitel sind die für die einzelnen Szenarien mit unterschiedlicher λ-Gewichtung der eLPV benötigten Kommissionierzeiten, da in dieser Arbeit der Zielkonflikt zwischen der physischen Belastung/Beanspruchung sowie zeitlichen Größen untersucht werden soll. Abbildung 32 stellt die Kommissionierzeiten über alle Versuchsteilnehmenden sowie einzeln für Single-Order und Multi-Order Picking dar.

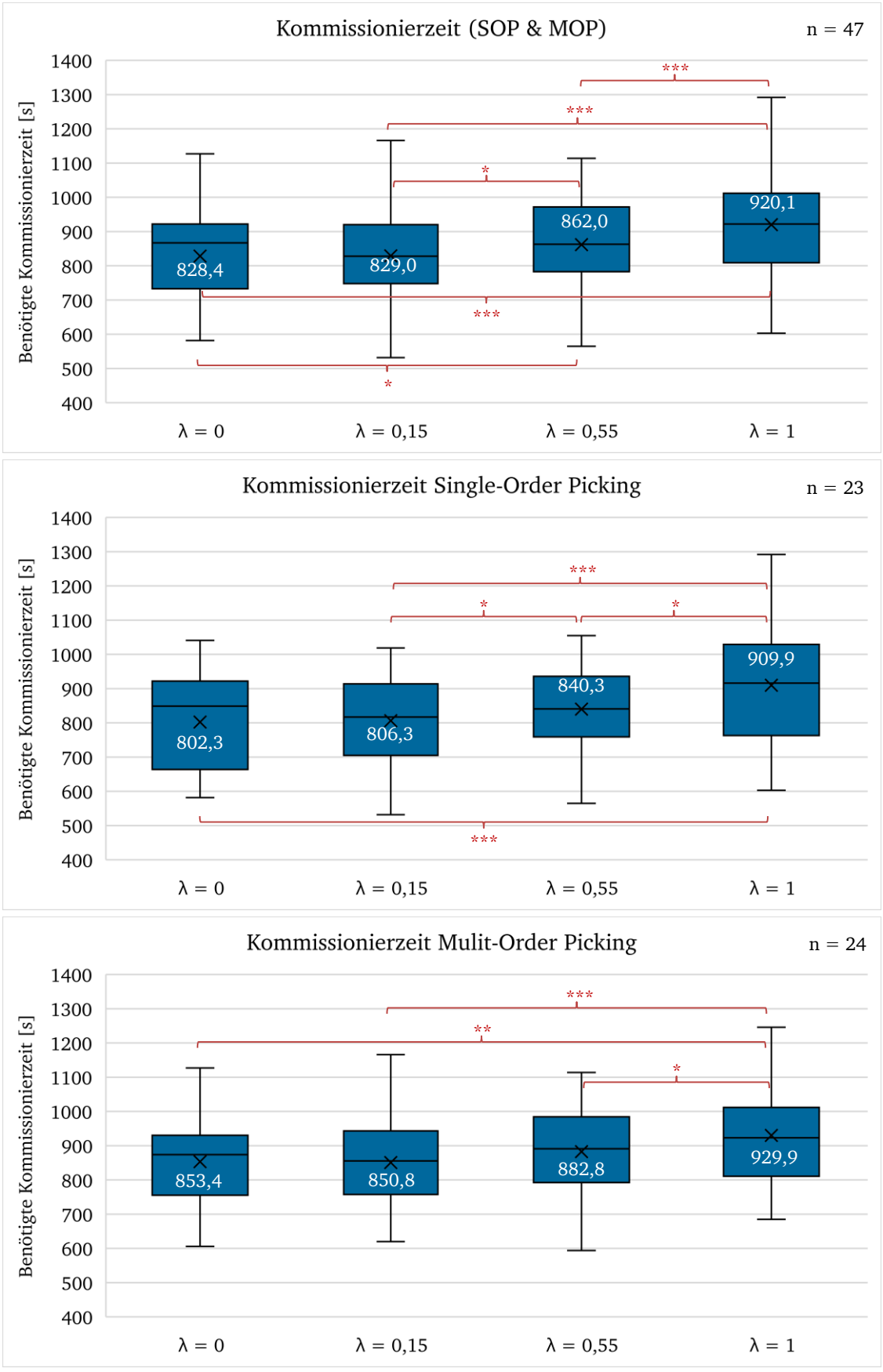


Abbildung 32: Box-Plot-Diagramme der Kommissionierzeit; Mittelwerte in weiß; signifikante Unterschiede der Mittelwertdifferenzen durch Klammer dargestellt (*α=0,05; ** α=0,01; *** α=0,001; Bonferroni-korrigiert)

In allen drei Box-Plot Diagrammen wird ersichtlich, dass die benötigte Kommissionierzeit mit höherer λ-Gewichtung tendenziell zunimmt. Andersherum ausgedrückt benötigen die Versuchspersonen bei verstärkter Berücksichtigung der zeitlichen Kenngrößen weniger Zeit für die Kommissionierszenarien. So steigen die über alle Kommissionierenden gemittelten Zeiten von 828,4 s (SD=134,4 s) bei einer zeitminimierenden eLPV zunächst nur marginal auf 829,0 s (SD=127,1 s), ehe die Kommissionierzeit bei einer weiteren Erhöhung auf $\lambda = 0{,}55$ auf 862,0 s (SD=129,0 s) steigt. Bei der belastungsminimierenden eLPV erhöht sich die Kommissionierzeit gar auf 920,1 s (SD=152,2 s). Dies entspricht einer Steigerung der Kommissionierzeit um 10,0 %. Eine einfaktorielle ANOVA deutet auf statistisch signifikante Unterschiede mit großer Effektstärke hin ($F(3;138)=26{,}99$, $p < 0{,}001$, $f = 0{,}77$). Dies gilt ebenso für die Einzelbetrachtung von SOP (Greenhouse-Geisser-Korrektur; $F(2{,}15;47{,}28)=17{,}23$, $p < 0{,}001$, $f = 0{,}88$) und MOP ($F(3;69)=10{,}10$, $p < 0{,}001$, $f = 0{,}66$), die aufgrund der Normalverteilung der Daten ebenso per einfaktorieller Varianzanalyse mit Messwiederholung bestimmt werden.

Tabelle 23: Zusammenfassende Darstellung der Hypothesenauswertung H3.1.1 bis H3.1.18 bezogen auf die Kommissionierzeit der verschiedenen Szenarien (grün: Hypothese wird angenommen, rot: Hypothese wird abgelehnt; „<“: gerichtete Hypothese; „=“: ungerichtete Hypothese)

Hypothese	Messgröße	Vergleich von	Picking-Strategie
H 3.1.1 – H 3.1.3	Kommissionierzeit	λ_1 und $\lambda_{0,55}$	SOP (=)
			MOP (=)
			SOP & MOP (=)
H 3.1.4 – H 3.1.6		λ_1 und $\lambda_{0,15}$	SOP (<)
			MOP (<)
			SOP & MOP (<)
H 3.1.7 – H 3.1.9		λ_1 und λ_0	SOP (<)
			MOP (<)
			SOP & MOP (<)
H 3.1.10 – H 3.1.12		$\lambda_{0,55}$ und $\lambda_{0,15}$	SOP(<)
			MOP (<)
			SOP & MOP (<)
H 3.1.13 – H 3.1.15		$\lambda_{0,55}$ und λ_0	SOP (<)
			MOP (<)
			SOP & MOP (<)
H 3.1.16 – H 3.1.18		$\lambda_{0,15}$ und λ_0	SOP (<)
			MOP (<)
			SOP & MOP (<)

Mit Hilfe von Post-hoc Tests wird ferner analysiert, welche Kommissionierzeiten bei den verschiedenen λ-Ausprägungen signifikant differieren. Auffällig ist, dass jeweils zwischen der zeitminimierenden und zeitpriorisierenden eLPV keine statistischen Unterschiede bestehen, wie es in den entsprechenden Hypothesen vermutet wurde. Die Kommissionierzeit bei $\lambda = 0$ ist entweder nur sehr geringfügig kürzer oder gar wie beim MOP etwas höher als bei $\lambda = 0{,}15$. Die meisten anderen Vergleiche zwischen den

verschiedenen Gewichtungen der eLPV sind signifikant unterschiedlich, siehe Tabelle 23. Dementsprechend können die meisten der Hypothesen H3.1.1 bis H3.1.18 angenommen werden.
Außerdem fällt auf, dass die durchschnittlichen Kommissionierzeiten für die verschiedenen eLPV beim Multi-Order Picking länger ausfallen als beim Single-Order Picking. Auch wenn die Unterschiede nicht statistisch signifikant sind, überrascht dieses Ergebnis, da beim MOP aufgrund der Tourenbildung kürzere Laufwege zu verzeichnen sind. In Kapitel 7 wird dieser Umstand diskutiert. Zudem wurden die Kommissionierzeiten auch entsprechend ihrer tatsächlichen Reihenfolge im Versuch geordnet, um zu überprüfen, ob Lerneffekte vorliegen. Es ergeben sich signifikant höhere Zeiten für den ersten der vier Durchgänge im Vergleich mit den nachfolgenden Durchgängen, siehe Anhang R. Auch dieses Ergebnis wird in Kapitel 7 noch einmal aufgegriffen.

6.4.2 Korrelation zwischen der tatsächlichen und der prognostizierten Kommissionierzeit

In diesem Unterkapitel sollen die tatsächlich benötigten Kommissionierzeiten mit den durch die eLPV (MTM-UAS) prognostizierten Zeiten abgeglichen werden. Die entsprechenden Korrelationskoeffizienten nach Pearson sind Tabelle 24 zu entnehmen. Da die Daten keine Ausreißer enthalten und sie zudem normalverteilt sind, wird auf einen Vergleich mit den Korrelationskoeffizienten nach Spearman verzichtet.

Tabelle 24: Produkt-Moment-Korrelation der Zeitkennwerte der eLPV und der tatsächlich benötigten Kommissionierzeit

	SOP	**MOP**	**SOP & MOP**
Hypothese	H3.2.1	H3.2.2	H3.2.3
Pearson-Korrelation	**0,293****	**0,240***	**0,264*****
p-Wert	0,005	0,018	< 0,001
n	92	96	188
Effektstärke	klein	klein	klein
Ablehnung von H_0?	✓	✓	✓

Für die beiden Picking-Strategien SOP bzw. MOP sowie für die gemeinsame Betrachtung beider Strategien ergeben sich signifikant positive Korrelationskoeffizienten, sodass davon ausgegangen werden kann, dass höhere durch die eLPV prognostizierte Kommissionierzeiten mit höheren tatsächlichen Kommissionierzeiten einhergehen. Die Nullhypothesen werden dementsprechend abgelehnt, sodass die in Kapitel 5.5 formulierten Alternativhypothesen H3.2.1 bis H3.2.3 als wahrscheinlich gelten und folglich angenommen werden. Die Effektstärken sind als klein einzuschätzen.

Neben der Korrelation ist außerdem die absolute bzw. relative Abweichung der tatsächlichen von der prognostizierten Kommissionierzeit von Relevanz. Da die zeitlichen Kennwerte der eLPV auf einem Single-Order Picking Ansatz basieren, wird dieser im Folgenden analysiert. Tabelle 25 zeigt die im Versuch durchschnittlich benötigten sowie die per MTM-UAS prognostizierten Kommissionierzeiten für die einzelnen eLPV-Szenarien. Daraus lassen sich die absoluten sowie relativen Abweichungen errechnen. Die höchste relative Abweichung liegt beim Einsatz der zeitminimierenden eLPV mit 10,9 % vor. Die geringsten relativen Abweichungen (4,3 %) treten hingegen im belastungsminimierenden Szenario auf. Die Ursachen für die Abweichungen werden in Kapitel 7 diskutiert.

Tabelle 25: Absolute und relative Abweichungen zwischen der prognostizierten und tatsächlichen Kommissionierzeit

	Kommissionierzeit [s]		**Abweichung**	
	Prognose mit MTM-UAS	**tatsächlich im Versuch benötigt**	**Absolut [s]**	**Relativ [%]**
$\lambda=0$	714,7	802,3	87,7	10,9
$\lambda=0{,}15$	725,4	806,3	80,9	10,0
$\lambda=0{,}55$	776,9	840,3	63,4	7,5
$\lambda=1$	870,5	909,9	39,4	4,3

6.5 Kommissionierqualität

Neben der Kommissionierzeit ist die Kommissionierqualität die zweite Dimension der menschlichen Leistung in dieser Arbeit. Die von den Versuchspersonen getätigten Fehler wurden automatisiert von einem RFID-System aufgezeichnet. Insgesamt unterliefen den Kommissionierenden sehr wenige Fehler. Die über alle Szenarien gemittelte Fehlerquote liegt bei lediglich 0,68 % – dies entspricht durchschnittlich etwa 1,3 Fehlern je Teilnehmenden im gesamten Versuch. Insgesamt machten 17 Versuchspersonen gar keine Fehler. Dem Kommissionierenden mit der schlechtesten Kommissionierqualität unterliefen hingegen fünf Fehler im Versuch, sodass es zu hohen Standardabweichungen kommt. Von den insgesamt 61 Kommissionierfehlern handelt es sich bei 44 (72,1 %) um Typfehler – die restlichen entfallen auf Auslassungsfehler (27,9 %).

Tabelle 26 zeigt die Aufteilung der Kommissionierfehler auf die verschiedenen Szenarien mit den entsprechenden λ-Ausprägungen. Die höchste Fehlerquote liegt bei der zeitpriorisierten Kompromisslösung ($\lambda=0{,}15$) mit 0,75 % (SD=1,74 %) vor, die niedrigste bei der zeitminimierenden Lösung mit 0,58 % (SD=1,27 %).

Tabelle 26: Mittelwert und Standardabweichung der Fehlerquoten bei den verschiedenen λ-Gewichtungen der eLPV (n=48)

Szenario	$\lambda=0$	$\lambda=0{,}15$	$\lambda=0{,}55$	$\lambda=1$
Mittelwert	0,58 %	0,75 %	0,71 %	0,66 %
Standardabweichung	1,27 %	1,74 %	1,16 %	1,30 %

Gemäß einer einfaktoriellen Varianzanalyse gibt es keine signifikanten Unterschiede bezüglich der Fehlerquoten zwischen den verschiedenen Szenarien (Greenhouse-Geisser-Korrektur; $F(2{,}59;119{,}33) = 0{,}146$, $p = 0{,}932$, $f = 0{,}05$). Auch bei einer separaten Betrachtung von Single- bzw. Multi-Order Picking liegen keine statistisch signifikanten Differenzen vor. Folglich werden alle Hypothesen von H3.3.1 bis H3.3.18 abgelehnt.

6.6 Resultierende Pareto-Kurven

Im Folgenden werden die zuvor präsentierten Ergebnisse bezüglich Beanspruchungs- und Zeitgrößen in Diagrammen zusammengefasst. Hierfür werden je Messgröße Pareto-Kurven aus den empirischen Daten der vier Pareto-Optima (für jede λ-Gewichtung) gebildet. Die Beanspruchungsdaten werden auf der x-Achse als relative Werte in Prozent vom maximalen Wert aufgetragen – analog dazu befinden sich die relativen zeitlichen Messgrößen auf der y-Achse. Als Basis werden die Daten des Single-Order Picking gewählt, da die zeitlichen Kennwerte des eLPV-Algorithmus auf Grundlage dieser Picking-Strategie hergeleitet wurden. Zunächst wird in Abbildung 33 die in Kapitel 3 theoretisch hergeleitete Pareto-Kurve (schwarz) mit den Messpunkten der mittleren und dynamischen EA verglichen.

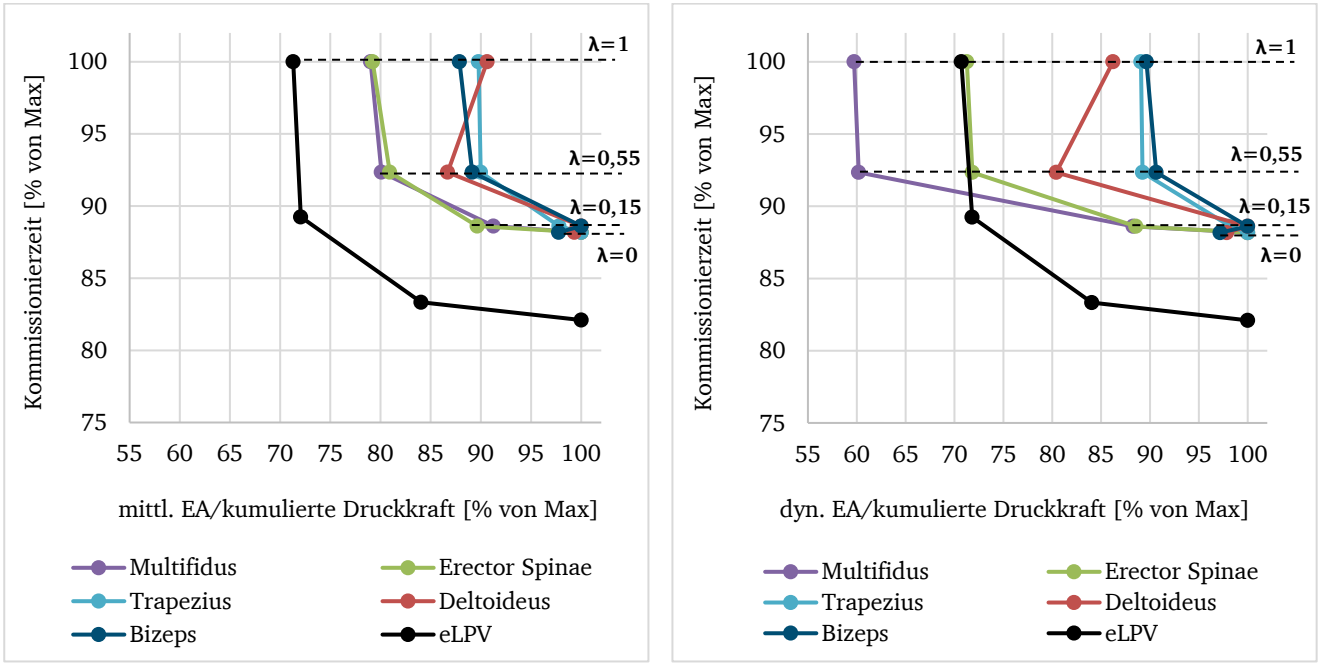


Abbildung 33: Pareto-Kurven der mittleren (links) bzw. dynamischen (rechts) EA beim SOP der fünf betrachteten Muskeln sowie der eLPV auf Basis der untersuchten λ-Gewichtung

Zunächst fällt auf, dass die Messpunkte des Deltoideus in beiden Diagrammen von Abbildung 33 keine typische Pareto-Kurve bilden, da sie nicht konvex ist. So ist das Pareto-Optimum bei $\lambda = 0{,}55$ gegenüber demjenigen in $\lambda = 1$ dominant und folglich immer vorzuziehen. Die anderen Kurven hingegen haben ähnliche Formen wie die theoretische Kurve, die durch Anwendung der eLPV entsteht. Insbesondere die

Kurven der beiden unteren Rückenmuskeln sind der durch die eLPV errechneten Kurve ähnlich. Allerdings weichen die tatsächlich gemessenen (relativen) Wertepaare der verschiedenen λ-Gewichtungen in ihrer Höhe von denen der theoretisch bestimmten Pareto-Optima ab. Dies gilt vor allem für die zeitlichen Größen: Während die eLPV von Reduzierungen der Kommissionierzeit um bis zu 17,9 % ausgeht, können im Versuch lediglich 11,8 % erreicht werden. Hingegen sind die Potentiale der Reduzierung der dynamischen EA im Multifidus gar etwas größer als die prozentuale Reduzierung der kumulierten Druckkräfte auf L5-S1 – die Vergleichbarkeit dieser Größen ist jedoch schwierig.
Der Vollständigkeit halber sind in Abbildung 34 zudem die aus den Messpunkten der Herzschlagfrequenz sowie des subjektiven Anstrengungsempfindens (nach der Hälfte bzw. nach der letzten aller zu kommissionierenden Positionen) gebildeten Pareto-Kurven dargestellt.

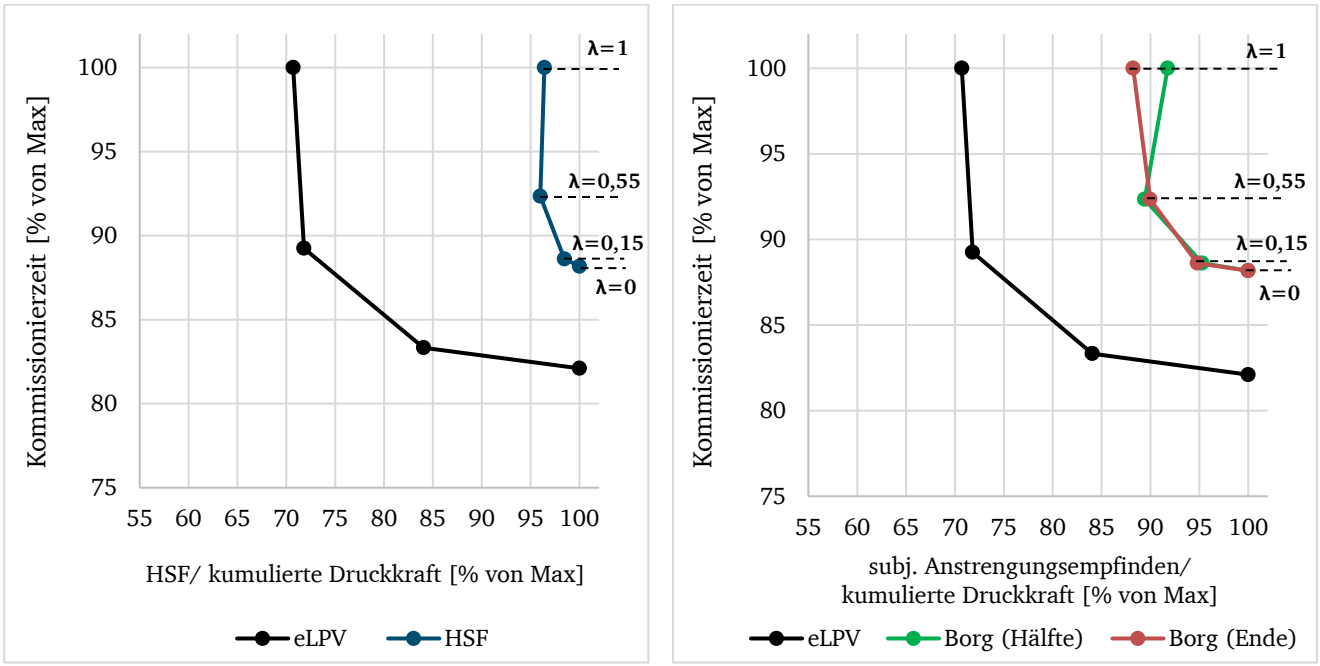


Abbildung 34: Pareto-Kurven der HSF (links) bzw. dem subjektiven Anstrengungsempfinden (rechts) beim SOP sowie der eLPV auf Basis der untersuchten λ-Gewichtung

Die zeitlichen Größen haben sich zu jenen in Abbildung 33 nicht geändert. Die Reduzierung der Herzschlagfrequenz durch eine eLPV ist jedoch stark beschränkt, sodass die Pareto-Kurve fast senkrecht verläuft – die HSF reagiert somit recht unsensibel auf eine Änderung der λ-Gewichtung. Auch das subjektive Anstrengungsempfinden ändert sich durch eine Erhöhung von λ im Vergleich mit dem Reduzierungspotential der Muskelaktivität eher wenig, jedoch deutlich sensibler als die HSF.

6.7 Korrelationen zu LH4

Leithypothese 4 untersucht einen Querbezug zwischen der Beanspruchung und der Kommissionierzeit. Konkret ist fraglich, ob sich die Kommissionierzeiten durch die Reduzierung der Beanspruchung in Folge der eLPV bei einzelnen Individuen weniger erhöht als bei Individuen, die keine bzw. eine geringe Beanspruchungsreduzierung erfahren. Der Einfluss der eLPV auf die Beanspruchung bzw. Kommissionierzeit wird durch Quotienten der Messgrößen aus den belastungs- bzw. zeitminimierenden Szenarien gebildet, damit relative und keine absoluten Größen korreliert werden. Die in Kapitel 5.5.3 formulierten Zusammenhangshypothesen werden entsprechend ausgewertet.

In Tabelle 27 werden die Korrelationskoeffizienten zwischen der Reduzierung der muskulären Beanspruchung infolge der eLPV und der Erhöhung der Kommissionierzeit gelistet. Analog bildet Tabelle 28 die Korrelationen zwischen der Reduzierung der Herz-Kreislauf-Beanspruchung bzw. des subjektiven Anstrengungsempfindens und der Erhöhung der Kommissionierzeit ab.

Tabelle 27: Produkt-Moment-Korrelation der muskulären Beanspruchungsreduzierung und der Kommissionierzeiterhöhung

	Multifidus		**Erector Spinae**		**Trapezius**		**Deltoideus**		**Bizeps**	
	mittl. EA	**dyn. EA**	**mittl. EA**	**dyn. EA**	**mittl. EA**	**dyn. EA**	**mittl. EA**	**dyn. EA**	**mittl. EA**	**dyn. EA**
Hypothese	H4.1.1	H4.1.6	H4.1.2	H4.1.7	H4.1.3	H4.1.8	H4.1.4	H4.1.9	H4.1.5	H4.1.10
Pearson-Korrelation	**- 0,065**	**-0,052**	**- 0,205**	**- 0,271***	**- 0,132**	**-0,075**	**- 0,260***	**-0,171**	**- 0,217**	**0,080**
p-Wert	0,337	0,368	0,096	0,041	0,198	0,311	0,043	0,128	0,083	0,301
n	42	42	42	42	46	46	46	46	45	45
Effektstärke	-	-	-	klein	-	-	klein	-	-	-
Ablehnung von H_0?	✘	✘	✘	✓	✘	✘	✓	✘	✘	✘

Tabelle 28: Produkt-Moment-Korrelation der Reduzierung der HSF bzw. des subjektiven Anstrengungsempfindens und der Kommissionierzeiterhöhung

	Herzschlagfrequenz	**Subjektives Anstrengungsempfinden**	
		Zur Hälfte	**Am Ende**
Hypothese	H4.2.1	H4.3.1	H4.3.1
Pearson-Korrelation	**- 0,104**	**0,027**	**-0,081**
p-Wert	0,244	0,488	0,352
n	47	47	47
Effektstärke	-	-	-
Ablehnung von H_0?	✘	✘	✘

Die Korrelationskoeffizienten aus Tabelle 27 sind fast alle wie in den korrespondierenden Hypothesen erwartet negativ. Jedoch sind die Koeffizienten alle als klein und kaum signifikant einzuschätzen. Lediglich die Korrelationen der Kommissionierzeitquotienten mit den entsprechenden Quotienten der

EA-Reduzierung des Erector Spinae (dynamische EA) bzw. des Deltoideus (mittlere EA) besitzen einen p-Wert von knapp unter 0,05. Die Korrelationen bezüglich der Herzschlagfrequenz bzw. des subjektiven Anstrengungsempfindens sind ebenfalls nicht signifikant.

Entsprechend werden alle Hypothesen außer diejenigen bezüglich der zwei zuvor genannten Fälle (H4.1.4 und H4.1.7) abgelehnt.

7 Diskussion

In der empirischen Studie dieser Arbeit wurden vier verschiedene Parameter bezüglich der Gewichtung der Minimierungsziele „Wirbelsäulenbelastung“ und „Kommissionierzeit“ einer ergonomischen Lagerplatzvergabe hinsichtlich bestehender Unterschiede und Zusammenhänge untersucht. In diesem Abschnitt werden das zugrundeliegende Untersuchungskonzept sowie die präsentierten Ergebnisse der Studie kritisch diskutiert, um anhand dessen die aufgestellten Forschungsfragen zu beantworten. Zudem werden Handlungsimplikationen zur Implementierung der eLPV abgeleitet und eine Abschätzung zur Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse in die Praxis gegeben.

7.1 Diskussion des Untersuchungskonzepts

7.1.1 Diskussion der Algorithmusentwicklung und des Messkonzepts

Zunächst wird auf die Herleitung des Algorithmus zur ergonomischen Lagerplatzvergabe sowie auf das in der Evaluierungsstudie verwendete Messkonzept Bezug genommen. Dabei wird insbesondere auf bestehende Limitationen eingegangen.

Entwicklung des eLPV-Algorithmus

Die meisten Algorithmen zur Berücksichtigung von Belastungsparametern in Planungskonzepten der Intralogistik basieren auf dem Energieumsatz nach Garg et al. (1978). In dieser Arbeit wird jedoch die mechanische Belastung der Lendenwirbelsäule in Form von Druckkräften genutzt, da Erkrankungen der Wirbelsäule zu den am häufigsten anzutreffenden MSE in der Logistik gehören. Es stehen zahlreiche biomechanische Modelle zur Verfügung, jedoch wenige, die frei verfügbar sind und für die konkrete Druck- oder Scherkräfte für kommissionierspezifische Tätigkeiten vorliegen.

Für den eLPV-Algorithmus wurden schließlich von Goldscheid (2008) berechnete Druckkraftwerte für Kommissioniertätigkeiten auf das Wirbelsäulensegment L5-S1 auf Basis des „Dortmunders“ gewählt. Das Modell hat den Vorteil, dass auch unsymmetrische bzw. dreidimensionale Körperhaltungen und Massenträgheitskräfte berücksichtigt werden, die beim Kommissionieren regelmäßig auftreten. Darüber hinaus ist eine biomechanische Modellierung von Bewegungen, des Skelett- und Muskelsystems sowie des Bauchrauminnendrucks implementiert, sodass der Dortmunder zu den detailliertesten biomechanischen Modellen der Wirbelsäule zählt (Jäger et al., 2001b).

Goldscheid (2008) trifft in seiner Ermittlung der kommissionierspezifischen Druckkraftwerte einige Annahmen – diese werden auch für diese Arbeit übernommen. Zum einen basieren die Berechnungen der Druckkräfte auf einer Person mit einer Körpergröße von 175 cm und einem Körpergewicht von 75 kg. Die durchschnittliche Körpergröße der Versuchsteilnehmenden von 173,0 cm (SD=8,5 cm) stimmt hiermit gut überein. Die individuellen Körpergrößen weichen jedoch teilweise stark ab, sodass die

Druckkraftberechnungen für einzelne Personen nicht mehr präzise zutreffen. Zudem sind die durchgeführten Bewegungsmuster bei Entnahmevorgängen aus verschiedenen Höhen nur im Ansatz prognostizierbar. So wird z. B. angenommen, dass es sich beim Heben aus niedrigeren Entnahmehöhen um eine Mischung von „Heben aus dem Rücken“ und „Heben aus den Beinen“ handelt. Tatsächlich unterscheiden sich die Bewegungsmuster jedoch zwischen den Mitarbeitenden. In Studien hat sich außerdem eine Altersabhängigkeit bei der Bewegungsausführung gezeigt – während jüngere Personen stärker aus den Knien heben, zeigt sich bei älteren Personen tendenziell eine stärkere Rumpfbeugung, die zu höherer Wirbelsäulenbelastung führt (Shojaei et al., 2016; Chen et al., 2017). Die tatsächliche Druckkraft auf die lumbosakrale Bandscheibe ist ferner vom sagittalen Lastabstand, der Zeitdauer der Handhabung sowie der Entscheidung der Kommissionierenden abhängig, ob die Last ein- oder beidhändig umgesetzt bzw. gehoben wird.
Diese individuell geprägten Abhängigkeiten zeigen, dass im Gegensatz zur retrospektiven Beurteilung der Wirbelsäulenbelastung eine Bestimmung der Druckkräfte auf Bandscheiben a priori zu Planungszwecken schlicht nicht exakt möglich ist. Es handelt sich bei den Kennzahlen somit nur um eine fundierte Abschätzung von typischerweise vorkommenden Ausführungsmustern aus entsprechenden Versuchen, die im Algorithmus für jeden Kommissionierenden gleichermaßen angenommen werden. Diese Limitation ist bei Anwendung der eLPV zu bedenken.
Die Druckkraftwerte können unter Umständen konkretisiert werden, indem eine Anpassung der Anthropometrie auf die durchschnittlichen in der Belegschaft existierenden Körpermaße durchgeführt wird oder man auf empirische Werte im Unternehmen bezüglich der Bewegungsausführung und Zeitdauern zurückgreift. So haben beispielsweise Steinebach et al. (2021) gezeigt, dass die eingenommene Körperhaltung für bestimmte Entnahmehöhen stark von der Körpergröße abhängt. Um unternehmensspezifische Kennwerte im Algorithmus zu implementieren, müssen jedoch umfassende Erhebungen stattfinden, die anschließend aufwendig mit dem Dortmunder ausgewertet werden müssen. Die Kosten der Erhebungen übersteigen vermutlich den Nutzen der etwas präziseren Kennwerte in den meisten Fällen deutlich.

Weiterhin wird die kumulierte Wirbelsäulenbelastung anhand des Lastgewichts und der Zugriffshäufigkeit der SKU bestimmt. Neben diesen beiden Eigenschaften können allerdings auch weitere Eigenschaften der Artikel entscheidend auf die Belastungshöhe einwirken, wie z. B. die Greifbarkeit, das Volumen bzw. die Sperrigkeit des Artikels oder die Stabilität des Lastschwerpunkts. Fraglich ist jedoch, inwiefern diese Eigenschaften in entsprechenden Stammdaten der Unternehmen überhaupt verfügbar wären, um sie bei der eLPV berücksichtigen zu können. Deshalb wurde in diesem Ansatz zunächst darauf verzichtet.
Zu beachten ist außerdem, dass durch den eLPV-Algorithmus nicht die gesamte kumulierte Belastung der LWS bestimmt wird. Es fehlen die Druckkräfte, die beim Ziehen/Schieben des Wagens sowie beim

Umsetzen am Depot entstehen. Konkret erfasst werden lediglich Belastungen, die durch die Lagerplatzvergabe beeinflusst werden. Eine gesonderte Belastungsbewertung ist demnach zwingend erforderlich, wobei diese auf Basis der Werte der eLPV ausgebaut werden kann. Diese sind anschließend mit entsprechenden Grenzwerten abzugleichen. Sinnvoll ist eine Analyse anhand der sogenannten Revidierten Dortmunder Richtwerte, welche maximal empfohlene Kompressionskräfte bei der manuellen Lastenhandhabung vorgeben – diese variieren in Abhängigkeit vom Alter bei Frauen zwischen 4,1 und 1,8 kN und bei Männern zwischen 5,4 und 2,2 kN (Jäger, 2019). Vergleicht man diese Werte mit jenen aus den erstellten Druckkrafttabellen in Anhang E, so fällt auf, dass vor allem bei der Handhabung von schweren Lasten diese Grenzwerte teilweise überschritten werden. Die höchste in der Tabelle verzeichnete Kompressionskraft bei einem Hebevorgang aus 10 cm Entnahmehöhe beträgt bei einem Lastgewicht von 15 kg bereits 5,5 kN und ist damit höher als alle Grenzwerte (von jeder zweiten Versuchsperson nur einmalig gehandhabt) – zu beachten ist, dass in der betrieblichen Praxis teilweise Artikel mit noch höherem Lastgewicht kommissioniert werden. Insbesondere für weibliche Kommissioniererinnen oder Personen hohen Alters können somit bei regelmäßiger Ausführung Handhabungsvorgänge mit großem Verletzungs- bzw. Erkrankungsrisiko vorliegen.
Ferner kann die kumulierte Gesamtbelastung mit einem Wert für eine maximal empfohlene Tagesdosis bzw. Lebensdosis abgeglichen werden. Die maximal empfohlene Tagesdosis bezüglich der Entstehung von Erkrankungen der Bandscheiben beträgt bei Frauen $3{,}5 \cdot 10^3$ Nh und bei Männern $5{,}5 \cdot 10^3$ Nh. Ebenso wird auch die kritische Gesamtdosis über das Arbeitsleben in Werte für Frauen ($17 \cdot 10^6$ Nh) und Männer ($25 \cdot 10^6$ Nh) unterteilt. Werden diese Grenzwerte für Arbeitnehmende überschritten, so sind die arbeitstechnischen Voraussetzungen für die Anerkennung der Berufskrankheit BK 2108 („Bandscheibenbedingte Erkrankungen der Lendenwirbelsäule durch langjähriges Heben oder Tragen schwerer Lasten […]“) erfüllt (Hartung et al., 1999).
Die hergeleiteten Kennwerte sind außerdem rein kompressionsbezogen, sodass andere Risikofaktoren, wie z. B. die Scherung oder Torsion von Wirbelsäulensegmenten, trotz der unbestrittenen Bedeutung für die Entstehung von Erkrankungen der LWS, unberücksichtigt bleiben (Jäger, 2019). Ferner bleiben auch energetische, gynäkologische, muskuläre oder psychologische Größen in den Belastungs-Kennwerten der eLPV unbeachtet (Jäger et al., 2002).

Auch die Ermittlung der zeitlichen Komponenten beruht ähnlich wie die Druckkräfte auf einigen Annahmen, die so in der Realität nicht für alle Kommissioniersysteme gegeben sind. So wird unter anderem eine leichte Artikelaufnahme angenommen. Diese war im Versuch gegeben, da die eher großen, alleine lagernden Artikel mühelos unter Kontrolle gebracht werden können – für abweichende Systeme muss dies nicht der Fall sein. Zudem können die tatsächlichen Bewegungslängen bei der Artikelentnahme in Abhängigkeit von der Anthropometrie und der zum SKU relativen Position des Kommissionierenden von den antizipierten Bewegungslängen abweichen.

Die zeitlichen Kennwerte wurden unter der Annahme ermittelt, dass ein Single-Order Picking mit einem Artikel je Position vorliegt und die Kommissionierenden somit nach jedem entnommenen Artikel zum Depot zurückkehren, um das SKU abzugeben. Ursächlich für diese Annahme ist, dass ansonsten gleichzeitig auch Routing und gegebenenfalls Batching-Ansätze mitbetrachtet werden müssten. Ein solches Optimierungsproblem kann selbst bei kleinen Probleminstanzen NP-schwer werden (De Koster et al., 2007). Deshalb wurde in diesem Algorithmus zunächst nur das SOP für die Kennwertermittlung verwendet und in der Evaluierungsstudie untersucht, ob die Optimierung auch für einfache Routingkonzepte (Schleifengang) ihre zeitlichen Minimierungsziele erfüllt. Eine Zusammenführung dieser Optimierungsprobleme ist in zukünftigen Arbeiten ein vielversprechendes Forschungsfeld.
Allgemein gehen die nach MTM-UAS ermittelten Werte von eingearbeiteten, durchschnittlich veranlagten Mitarbeitenden aus. Personen mit langjähriger Erfahrung oder über- bzw. unterdurchschnittlichen Fähigkeiten und Fertigkeiten können hingegen abweichende Greifzeiten beim Kommissionieren aufweisen. Gleichermaßen unterliegen auch die Gehgeschwindigkeiten gewissen Schwankungen in der Belegschaft und hängen zudem von der Anzahl an zu manövrierenden Kurven ab. Dennoch gilt MTM-UAS als anerkannter Standard und wird in der Literatur explizit für die Kommissionierung empfohlen (Galka & Günthner), sodass davon auszugehen ist, dass grundsätzlich valide Sollzeiten ableitbar sind. Die Abweichungen zur tatsächlichen Kommissionierzeit werden in Kapitel 7.2.2 diskutiert.

Zur Zusammenbringung der beiden Zielgrößen wird hier die Gewichtete-Summen-Methode gewählt – es ist jedoch auch denkbar, eine von beiden Zielgrößen unter der Voraussetzung, dass ein bestimmter Grenzwert für die zweite Zielgröße nicht verletzt wird, zu optimieren (Goal Programming). Zudem sind die vier in der Studie ausgewählten λ-Gewichtungen der eLPV in Gesprächen mit Praxispartnern präferierte Vorschläge. Es können im Einzelfall durchaus andere Gewichtungen relevant sein. Falls ein Unternehmen beispielsweise generell ausreichend Pufferzeit in den Kommissionierprozessen hat oder die Kommissioniereffizienz einen untergeordneten Stellenwert besitzt, können unter Umständen höhere Effizienzverluste als 2 % in Kauf genommen werden, sofern die Mitarbeitenden dadurch zusätzlich entlastet werden können. Ebenso ist es denkbar, dass bereits ein Effizienzverlust von 2 % als nicht akzeptabel bewertet wird. Diese Entscheidung muss in jedem Unternehmen individuell anhand der durch die eLPV resultierenden Pareto-Kurve im Abgleich mit den wirtschaftlichen und humanitären Zielen getroffen werden.
Trotz der hier genannten Limitationen unterstützt die entwickelte eLPV dabei, ökonomische und ergonomische Zielfunktionen so zu integrieren, dass die resultierenden Beanspruchungen und menschlichen Kommissionierleistungen die vermuteten Wirkungszusammenhänge widerspiegeln, wie in Kapitel 7.2 ausführlicher diskutiert wird.

Messkonzept

Bisher wurden in der Kommissionierung keine empirischen Studien zur Untersuchung des Einflusses verschiedener Lagerplatzvergabe-Strategien auf zeitliche Größen und die Beanspruchung der Kommissionierenden durchgeführt. Viele Studien beschränken sich bei der Entwicklung entsprechender Algorithmen auf eine Evaluierung mittels numerischer Experimente und Simulationen (z. B. Battini et al., 2016; Diefenbach & Glock, 2019). In einigen Publikationen bezüglich Planungskonzepten in der Kommissionierung wird das Fehlen von empirischen Daten deshalb als Limitation beschrieben (z. B. Elbert & Müller, 2017a). In dieser Arbeit werden zur umfassenden Einschätzung der Folgen der physischen Belastung Empfehlungen der Literatur folgend (z. B. AWMF, 2013) mehrere Beanspruchungsgrößen gleichzeitig gemessen: die muskuläre Beanspruchung, die Beanspruchung des Herz-Kreislauf-Systems sowie das subjektive Anstrengungsempfinden. Ferner wird die von den Versuchsteilnehmenden benötigte Kommissionierzeit sowie die Anzahl und Art der unterlaufenen Kommissionierfehlern aufgezeichnet. Das Messkonzept, gegliedert nach den verwendeten Messmethoden, wird nachfolgend diskutiert.

Elektromyographie

Eine zentrale Rolle in der Evaluierungsstudie spielt die Elektromyographie. Die Beanspruchungen der Muskeln im unteren Rücken stehen in direkter Verbindung mit der Wirbelsäulenbelastung (Callghan et al., 1998; El-Rich et al., 2004), sodass eine Evaluierung der Wirksamkeit des eLPV-Algorithmus hinsichtlich des untersuchten Engpasses der „LWS“ möglich erscheint. Zu beachten ist jedoch die in der Literatur beschriebene Einschränkung, dass die EMG-Aktivität der unteren Rückenmuskeln bei Tätigkeiten in extremer Rumpfbeugung sehr niedrig wird. Hieraus sollte jedoch nicht geschlossen werden, dass die entsprechenden Kräfte in der Wirbelsäule gering sind. Vielmehr werden in diesem Fall tiefer liegende Muskeln bzw. Muskeln im Hüftbereich aktiv (Jäger et al., 1985). Durch eine Analyse des Videomaterials kann jedoch festgestellt werden, dass meist Mischbewegungen ausgeführt wurden und extreme Rumpfbeugungen mit maximaler Flexion kaum vorgekommen sind. Ebenso zeigt sich in den Daten der klare Trend, dass das Kommissionieren aus tieferen Regalebenen mit deutlich erhöhten EA einhergeht, sodass die oben beschriebene Messproblematik in dieser Arbeit allenfalls eine untergeordnete Rolle spielt.

EMG-Analysen wurden bereits in anderen Publikationen zur Kommissionierung oder ähnlichen Tätigkeiten eingesetzt (z. B. Oliveira et al., 2011; Christensen et al., 2015; Lee et al., 2020b; Skals et al., 2021a). Die Muskelauswahl hat sich teilweise an dieser Literatur orientiert. In dieser Arbeit wurde nur die dominante Körperseite analysiert – die Auswirkungen auf die Muskeln der Gegenseite bleiben unberücksichtigt. Zudem beschränkt sich die Untersuchung auf eine Analyse der Muskeln des Oberkörpers. Obwohl auch ein Effekt der eLPV auf die Muskeln der unteren Extremitäten zu erwarten

ist, beispielsweise durch den Einfluss auf die Häufigkeit des Kniens, musste aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit an Messkanälen auf derartige Messungen verzichtet werden.

Meist waren die entsprechenden Muskeln aufgrund ihrer Größe und der Lokalisierungshilfen von SENIAM (2021) recht einfach zu palpieren. Dennoch ist stets mit Cross Talk anderer Muskeln zu rechnen – dies lässt sich bei der Anwendung des Oberflächen-EMGs nicht verhindern. Problematisch war teilweise außerdem das vorzeitige Ablösen der Elektroden bei einigen Versuchspersonen aufgrund von starker Schweißbildung. Abgelöste Elektroden waren durch deutliche Artefakte im EMG-Signal unmittelbar feststellbar. Sofern der Versuch noch nicht weit fortgeschritten war, konnten die Elektroden neu geklebt und die Messung von vorne gestartet werden. In einigen Fällen war dies aus zeitlichen Gründen jedoch nicht mehr möglich, sodass die Daten dieses Muskels für alle Szenarien der jeweiligen Versuchsperson gelöscht wurden. Am Erector Spinae blieben so beispielsweise nur noch 42 Versuchspersonen übrig.

Bei Betrachtung der Ergebnisse fällt auf, dass für einige Versuchspersonen bei belastungskritischen Hebevorgängen EA-Werte von über 100 % vorkommen. Derartige Werte dürften bei einer korrekten Ausführung der MVC-Übungen theoretisch nicht vorliegen. Die wahrscheinlichste Ursache ist, dass die entsprechenden Versuchspersonen die MVC-Übungen nicht mit maximaler Intensität durchgeführt haben. Hier zeigt sich, wie entscheidend eine entsprechende Anleitung und Motivation der Studienteilnehmenden ist. Sodeberg & Knutson (2000) gehen davon aus, dass der in den Übungen gemessene MVC von ungeübten Personen um bis zu 20 - 40 % geringer sein kann als das tatsächliche Maximum. Ferner ist auch eine Aufwärmphase vor Beginn der Übungen relevant. Dennoch weisen die hohen Werte tendenziell darauf hin, dass die lokalen muskulären Beanspruchungen des unteren Rückens, insbesondere für weibliche Versuchspersonen, sehr hoch waren.

Obwohl Studien zur Beurteilung der Höhe von muskulärer Beanspruchung anhand der MVC-Normalisierung vorliegen, lassen sich bislang keine allgemeingültigen Empfehlungen bzw. Grenzwerte ableiten (vgl. Zipp, 1988), auch, da zu vermuten ist, dass diese Grenzen nicht für jeden Muskel in gleichem Maße gelten. Deshalb bietet sich die Elektromyographie, so wie sie auch in dieser Studie eingesetzt wurde, vor allem für vergleichende Messungen an (Schlick et al., 2018).

Zu erwähnen sind ferner die hohen Standardabweichungen der EMG-Signale zwischen den verschiedenen Versuchspersonen. Zu begründen ist dies durch die breite Streuung des Alters, des Trainingszustands der einzelnen Muskeln und des Geschlechts. Außerdem haben die unterschiedlichen Bewegungsmuster einen nicht zu unterschätzenden Einfluss auf die physiologischen Kosten. Auf diese Weise lässt sich verstehen, dass Ausreißer-Werte entstehen, die nicht auf Messfehler, sondern auf tatsächlich vorliegende Diskrepanzen zurückzuführen sind. Demnach wurden diese Ausreißer im Datensatz nicht exkludiert. Ein Vergleich mit Ergebnissen der statistischen Signifikanztests mit Datensätzen ohne diese Ausreißer zeigt, dass die wenigen Ausreißer nur einen geringen Einfluss auf die statistischen Größen besitzen.

Schließlich sei noch darauf hingewiesen, dass die Videoaufnahme während der SKU-Entnahme in wenigen Fällen leicht verdeckt war, sodass die Bestimmung des exakten Zeitpunktes, zu dem ein SKU gegriffen bzw. abgegeben wird (EMG_pick-Daten), erschwert wurde. Jedoch konnte das Frame des Videos ausgewählt werden, bei dem die Kontaktaufnahme bzw. -aufhebung zu dem SKU am wahrscheinlichsten ist.
Insgesamt hat sich das EMG als sehr valide und sensible Methode erwiesen, um Unterschiede zwischen den einzelnen Szenarien zuverlässig aufzuzeigen. Der hohe zeitliche Aufwand zur Durchführung und Auswertung der Daten sowie das benötigte Vorwissen zur Anwendung dieser Messmethode sei an dieser Stelle aber explizit erwähnt.

Herzschlagfrequenz

Die Herzschlagfrequenz wird allgemein als geeignet eingestuft, um die Beanspruchung bei körperlicher Arbeit objektiv zu beurteilen (AWMF, 2013). Zwar ist keine direkte Umrechnung der HSF in einen Energieumsatz möglich, jedoch korrelieren die beiden Größen stark (Schlick et al., 2018). Zu beachten ist, dass die HSF neben der körperlichen Aktivität auch von verschiedenen äußeren Umständen und dem individuellen Erregungszustand sowie der psychischen Anspannung abhängig ist. Versuchspersonen, die eine bewusste oder unbewusste emotionale Aufregung verspüren, werden so vor allem zu Beginn des Versuchs höhere Herzschlagraten verzeichnen. Jedoch konnte mit einsetzender Kommissioniertätigkeit bei allen Probandinnen und Probanden eine deutliche Erhöhung der HSF im Vergleich mit dem Ruhepuls festgestellt werden. Die HSF reagiert außerdem nur etwas verzögert auf körperliche Belastung, sodass eine Zuordnung von Herzschlagraten zu bestimmten Entnahmevorgängen nicht sinnvoll ist. Entsprechend wurde jeweils die gemittelte Herzschlagfrequenz über ein Szenario ausgewertet.
Der eingesetzte Polar H10 Brustgurt hat sich insbesondere in Bezug auf die aufwandsarme Vorbereitung der Messung und die Zuverlässigkeit bei Tätigkeiten mit hoher Dynamik bewährt. Lediglich die erstmalige Kopplung des Systems zu Beginn der Versuche mit einer smartphone-basierten Applikation benötigte gelegentlich mehrere Anläufe, bis eine stabile Verbindung aufgebaut werden konnte. Es sei darauf verwiesen, dass der Brustgurt im Vergleich zu einem EKG-System mit auf der Haut angebrachten Elektroden kein Gold-Standard bei derartigen Untersuchungen ist. Der Polar H10 wird jedoch mittlerweile regelmäßig für wissenschaftliche Studien eingesetzt (z. B. Nganou-Gnindjio et al., 2020; Speer et al., 2020).

Subjektives Anstrengungsempfinden

Die Borg RPE Skala ist grundsätzlich eine der am weitesten verbreiteten Methoden, um subjektives Anstrengungsempfinden zu erfassen und findet in zahlreichen Studien Anwendung (Richie, 2012; Williams, 2017). Die Versuchsteilnehmenden gaben meist steigende Anstrengungswerte zwischen den einzelnen Befragungszeitpunkten in einem Szenario an. Nach den Pausen zwischen den Szenarien sank

das subjektive Anstrengungsempfinden jedoch häufig wieder auf den Ausgangswert. Auffällig ist, dass die exakte Höhe der Angabe des Borg-RPE-Wertes von dem Gewicht des unmittelbar vor der Abfrage durch die Versuchsleitenden kommissionierten SKU abzuhängen scheint. So konnten höhere Werte festgestellt werden, wenn es sich um sehr schwere SKU handelte. Gleichwohl ist dieser Umstand für einen intraindividuellen Vergleich weniger relevant, da vor der Abfrage in den einzelnen Szenarios jeweils das gleiche SKU gepickt wurde. Zwischen verschiedenen Versuchsteilnehmenden gab es hingegen unterschiedliche Pickreihenfolgen, sodass die absolute Höhe der Anstrengungsempfindung hiervon beeinflusst sein kann.

Überdies gaben viele Versuchspersonen zu Protokoll, dass sie in den Szenarien mit höherer λ-Gewichtung wahrgenommen haben, dass zwar die Laufwege etwas länger gewesen wären, sich dafür aber die häufig gepickten oder schweren Artikel auf günstigeren Lagerplätzen befunden hätten, was gemeinhin als angenehmer empfunden worden wäre. Diese Überlegung der Teilnehmenden könnte ebenfalls einen Einfluss auf die Beurteilung des subjektiven Anstrengungsempfindens haben – gleichzeitig wird aber ersichtlich, dass tatsächlich subjektiv detektierbare Unterschiede zwischen den Szenarien ausgemacht werden konnten.

Das subjektive Anstrengungsempfinden auf der Borg RPE-Skala und die Herzschlagfrequenz sollen für Personen zwischen 30 und 40 Jahren linear über den Faktor 10 zusammenhängen (Borg, 2004). Es fällt jedoch auf, dass dieser Zusammenhang für die vorhandene Untersuchung nicht exakt zutrifft. Die Werte auf der Borg-Skala sind etwas höher als die Herzschlagraten es vermuten lassen würden. Insbesondere sind die Unterschiede zwischen den Szenarien auf der Borg-RPE Skala höher als hinsichtlich der Herzschlagrate objektiv messbar wird: zwischen $\lambda=0$ und $\lambda=1$ liegen auf der Borg-RPE-Skala fast zwei Punkte, was einem Unterschied der Herzschlagrate von 20 bpm entsprechen würde. Tatsächlich liegen jedoch nur 4 bpm zwischen diesen beiden Szenarien. Die Entlastung scheint somit subjektiv im Vergleich mit der objektiven Messung der HSF höher zu sein.

Kommissionierzeit

Die Kommissionierzeit ist ein entscheidender Faktor für die Evaluierung von Planungsentscheidungen in der Intralogistik. In dieser Studie konnte die Zeit mit einer Stoppuhr problemlos aufgezeichnet werden. In seltenen Fällen entstanden leichte Abweichungen der Kommissionierzeit dadurch, dass Kommissionierende zunächst in einen falschen Gang einbogen, diesen Fehler anschließend korrigierten und den korrekten Lagerplatz ansteuerten. Hierdurch wird der Zeitwert des entsprechenden Kommissionierenden für dieses Szenario leicht nach oben „verfälscht“, da die Kommissionierzeit bei idealen Laufwegen etwas niedriger wäre. Diese Zeitanteile wurden nicht nachträglich angepasst.

Ebenso wurden die Kommissionierzeiten auch bei Pickfehlern nicht verändert. Insbesondere Auslassungsfehler (Überspringen einer Position auf der Pickliste) haben einen entsprechenden Einfluss auf die Kommissionierzeit. Bei einer Fehlerquote von 0,68 % – wobei es sich bei der Mehrheit der

unterlaufenen Kommissionierfehler um Typfehler handelt – ist der Einfluss jedoch marginal. Ebenso hat die Abfrage des subjektiven Anstrengungsempfindens in der Mitte jedes Szenarios einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Kommissionierzeit.

Kommissionierqualität

Zur Erfassung der Messfehler kam ein RFID-System zum Einsatz, welches entsprechende RFID-Tags in den SKU auslas. Trotz des sehr hohen Kalibrierungs- und Abschirmungsaufwand, der für eine zuverlässige Erfassung notwendig war, ist diese Methode einer manuellen Überprüfung der kommissionierten SKU vorzuziehen. Der ohnehin hohe Personalaufwand für die Versuchsdurchführung konnte so um eine Person reduziert werden.

Ein akustisches Signal signalisierte, dass ein bestimmtes SKU vom RFID-System erkannt und ausgelesen wurde, sodass unmittelbar auffiel, wenn technische Probleme aufgetreten waren, was jedoch kaum vorkam. Zu beachten war außerdem, dass die verwendeten RFID-Tags relativ empfindlich auf mechanische Belastungen reagieren, sodass diese innerhalb der Kartons aufgeklebt wurden.

7.1.2 Diskussion zum Versuchsdesign

Für die Evaluierungsstudie wurde eine Laborumgebung gewählt. Zwar besitzen Feldversuche eine hohe Übertragbarkeit in die Praxis und Realitätsnähe der Ergebnisse, jedoch ist der für die Versuche erforderliche Standardisierungsgrad zu hoch für eine Untersuchung in einem Betrieb. Zudem wäre der zeitliche und damit auch monetäre Aufwand unverhältnismäßig hoch. Ein permanenter Eingriff in das Tagesgeschäft bzw. die Restrukturierung der Lagerplatzvergabe zur Prüfung der einzelnen Gewichtungsfaktoren wäre in einem realen Lager ebenso wenig denkbar, wie ein wochenlanges Vorhalten der entsprechenden Lagerfläche für Versuchszwecke. Gleichzeitig lässt sich der stabile Einsatz der komplexen Messtechnik in einer Laborumgebung besser gewährleisten. Aus diesem Grund wurde versucht, ein möglichst realistisches Szenario mit erfahrenen Kommissionierenden aus der betrieblichen Praxis in einem Laborversuch nachzubilden.

Das Lagerlayout wurde anhand von Fragebögen und Interviews mit Projektpartnern erstellt. Festzuhalten ist zunächst, dass es kein „Standard-Lager“ gibt – fast alle Elemente des Lageraufbaus sind hochindividuell. Dennoch lassen sich bestimmte Charakteristika aus den Interviews ableiten, die besonders häufig vorkommen. So wird sich, wie in Kapitel 3 beschrieben, für ein one-block Layout entschieden, welches aus Fachbodenregalreihen mit Regalebenen auf in der Praxis üblichen Höhen besteht (VDI 3657, 1993). Alle Versuchsteilnehmenden konnten die Artikel auf der höchsten Regalebene (160 cm) selbstständig ohne Tritthilfen erreichen. Die verwendete Lagergröße ist vergleichsweise als klein anzusehen, sodass die Laufwege analog als eher kurz einzustufen sind. Häufig sind Kommissionierende in der Praxis allerdings bestimmten Zonen im Lager zugeordnet, sodass der Bereich

je Mitarbeiterin/Mitarbeiter eher mit typischen Realbedingungen übereinstimmt. Der Einfluss verkürzter Laufwege auf die Kommissionierzeit ist hervorzuheben – in größeren Lagern würden sich Auswirkungen auf die Wegstreckenminimierung ggf. noch stärker abzeichnen. Auch bezüglich der Beanspruchung ergeben sich bei kurzen Laufwegen Unterschiede: Zwar ist die Belastung durch kürzere Strecken beim Ziehen bzw. Schieben eines Wagens geringer, jedoch erhöht sich gleichzeitig die Pickfrequenz, was mit einer Belastungssteigerung aufgrund der erhöhten Häufigkeit der Lastenhandhabungen pro Zeiteinheit einhergeht.

Ähnlich wie das Lagerlayout wurde auch das SKU-Portfolio wie bereits erläutert an die Ergebnisse der Interviews mit Projektpartnern angelehnt. Im Einzelfall weichen die SKU-Portfolios von Unternehmen hiervon jedoch ab. So wurden sehr schwere Artikel ($> 15\,\mathrm{kg}$) aus ethischen Gründen nicht kommissioniert. Diese Belastungsspitzen wurden somit aus dem Versuch ausgeklammert – mit ihnen ist jedoch bei Anwendung der eLPV in der Praxis zu rechnen. Eine wichtige Feststellung ist, dass das Potential zur Belastungs- bzw. Zeitreduzierung der eLPV stark abhängig von der Heterogenität des SKU-Portfolios ist (Larco et al., 2017). Man stelle sich vor, dass die Gewichte und Zugriffshäufigkeiten der einzelnen SKU eines Lagers alle in einer ähnlichen Größenordnung liegen. In diesem Fall könnte man durch verschiedene Anordnungen der entsprechenden Artikel keine zeitlichen oder belastungsbezogenen Unterschiede erzielen. Deshalb ist bei einer hohen Streuung der Lastgewichte und Zugriffshäufigkeiten mit einem höheren Optimierungspotential der eLPV zu rechen. Konkret kann das Optimierungspotential sowohl höher als auch niedriger als in dem hier betrachteten Studienkonzept sein – dieses muss vor der Anwendung der eLPV im Einzelfall dringend geprüft werden. In Anhang S sind die Erkenntnisse numerischer Experimente mit zufällig generierten SKU-Portfolios abgebildet. Diese zeigen auf, wie sich das kalkulierte Optimierungspotential (relativer Unterschied der kumulierten Wirbelsäulenbelastung zwischen $\lambda=1$ und $\lambda=0$) bei variierenden Standardabweichungen von Lastgewicht bzw. Zugriffshäufigkeit ändert. Deutlich wird, dass die Optimierungspotentiale mit steigender Standardabweichung der Zugriffshäufigkeit bis zu einem Sättigungsniveau steigen. Bezüglich einer Steigerung der Standardabweichung des Lastgewichts erreicht das Optimierungspotential ein Maximum, bevor es bei noch höheren Standardabweichungen asymptotisch auf einem hohen Niveau verbleibt.

Zudem handelte es sich bei den zu greifenden SKU um formstandardisierte Kartons, die jeweils einmal pro Lagerplatz vorgehalten wurden. Es ist zu beachten, dass in realen Kommissioniersystemen häufig auch Kleinteile kommissioniert werden, die abgezählt oder aus einer Umverpackung vereinzelt werden müssen. Ebenso können Artikel sehr sperrig oder unhandlich sein. Diese Eigenschaften wurden im Versuchsdesign bewusst ausgeschlossen, um zu verhindern, dass zu viele unabhängige Variablen untersucht werden.

Weiterhin ergeben sich Diskussionspunkte hinsichtlich des technischen Equipments, welches den Versuchspersonen zur Verfügung stand. Zum einen wurde ein neuer Kommissionierwagen mit geringem

Gewicht und sehr geringem Rollwiderstand verwendet. In der betrieblichen Praxis sind die Transportmittel häufig bereits stark verschlissen und damit nicht nur aufgrund der häufig schlechteren Bodenbeschaffenheit schwergängiger. So entstehen in realer Umgebung höhere Belastungen durch das Ziehen und Schieben. Zudem werden teilweise Wagen verwendet, deren Ablagefläche nicht auf einer Höhe von 90 cm, sondern deutlich tiefer liegt. So entstehen erhöhte Beanspruchungen aufgrund der bei der Lastabgabe einzunehmenden ungünstigen Körperhaltung.
Ferner wird zur Informationsübermittlung der Kommissionieraufträge eine Papierliste genutzt. Es wird davon ausgegangen, dass die Entscheidung, ob eine beleggebundene Variante (z. B. papierbasierte oder digitale Pickliste) bzw. ein belegloses Assistenzsystem (beispielsweise pick-by-light oder pick-by-voice) eingesetzt wird keinen großen Einfluss auf die physische Belastung hat. Allenfalls die Kommissionierzeiten müssten geringfügig angepasst werden. Ebenso hat die gewählte Art der Informationsübermittlung Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit von Pickfehlern (Guo et al., 2014; Baechler et al., 2016; Steinebach et al., 2020b). In Bezug auf die Ergebnisse würden sich voraussichtlich jedoch keine Änderungen bei den Vergleichen der einzelnen Szenarien ergeben, da sie bei jeder der verschiedenen λ-Gewichtungen im gleichen Maße auftritt.

Hinsichtlich des Versuchsablaufs konnte festgestellt werden, dass die 48 Picks je Szenario ausreichend waren, um Unterschiede zwischen den verschiedenen λ-Gewichtungen der eLPV festzustellen. Der Versuchsablauf wurde von allen Probandinnen und Probanden verstanden – die Kennzeichnung der Lagerplätze wurde von vielen Versuchspersonen ausdrücklich als sehr eingängig und schnell identifizierbar hervorgehoben. Die teilweise deutlich längeren Lagerplatzbezeichnungen in der Praxis seien oft weniger intuitiv.
In der Studie fanden zwei verschiedene Picking-Strategien Anwendung: Single-Order Picking und Multi-Order Picking. SOP bedeutet, dass von den Kommissionierenden nur ein Auftrag (von einem Kunden) bearbeitet wird (ten-Hompel et al., 2011). In der Praxis ist SOP häufig zu finden (Dukic et al., 2010). In diesem Versuch umfasst ein Auftrag zudem nur einen Artikel. Die Befragung der Partnerunternehmen hat gezeigt, dass diese Vorgehensweise in der Realität durchaus vorkommt. Häufiger anzutreffen ist in der Praxis jedoch sicherlich Multi-Order Picking, sodass diese Picking-Strategie nicht vernachlässigt werden sollte. Ziel ist es allerdings nicht, die Ergebnisse zwischen SOP und MOP miteinander zu vergleichen, sondern zu analysieren, ob die in den Hypothesen beschriebenen Zusammenhänge für beide Picking-Strategien gelten. Der für das Routing im MOP vorgegebene Schleifengang wurde von den Versuchspersonen problemlos umgesetzt.
Mit insgesamt drei Stunden Versuchsdauer je Versuchsperson exklusive der benötigten Zeit für die Versuchsvorbereitung war die Studie relativ aufwendig. Derart lange Messungen können zu Ermüdungseffekten führen, die verzerrenden Einfluss auf die Daten haben können (Döring & Bortz, 2016). Reihenfolgeeffekte sollten durch entsprechende Permutation der Szenarien möglichst

ausgeglichen werden. Eine Bestimmung der Pausenlänge durch entsprechende Gleichungen (Rohmert, 1960) ist schwierig, da beim Kommissionieren sowohl die effektiv notwendige Leistung als auch individuelle Dauerleistungswerte schwer ermittelbar sind. Selbst bei Annahme ungünstiger Werte reicht jedoch eine Pause von 10 Minuten aus. Die Ergebnisse zeigen, dass die gewählte Pausendauer analog zu Vorversuchen (Steinebach et al., 2021c) geeignet war, um Carry-Over Effekte durch Muskelermüdung zu vermeiden. Dies ist entscheidend, da ein Vergleich der EA nur sinnvoll ist, wenn keine Ermüdung in nachfolgende Szenarien übertragen wird (Kluth et al., 2013). Muskuläre Ermüdung äußert sich unter anderem durch steigende Amplituden des EMG-Signals (Cifrek et al., 2009). Diese konnten bei einem Vergleich zwischen den Mittelwerten der EA der Durchgänge in ihrer tatsächlichen Reihenfolge nicht nachgewiesen werden. Die mittleren und dynamischen EA erhöhten entsprechend sich im Versuchsablauf nicht (siehe Anhang O.2).

Bezüglich der Kommissionierzeit können jedoch Reihenfolgeeffekte aufgezeigt werden. So ist ein Übungseffekt durch den ersten durchgeführten Durchgang sichtbar. Ordnet man alle Kommissionierzeiten nach der tatsächlich durchgeführten Reihenfolge, so ist die durchschnittliche Kommissionierzeit des ersten Durchgangs signifikant länger als für alle folgenden Durchgänge. Dies deutet darauf hin, dass der 15-minütige Übungsdurchgang nicht ausreichend war und länger hätte gewählt werden sollen. Auf die Relevanz von Lerneffekten machen auch Grosse & Glock (2015) aufmerksam – anhand von verschiedenen Lernkurven in der Kommissionierung kann verdeutlicht werden, dass die Lerneffekte vor allem zu Beginn besonders hoch sind. So steigt die Pickrate von neuen Mitarbeitenden zunächst stark an und pendelt sich später auf einem annähernd konstanten Niveau ein. Diese Erkenntnisse decken sich mit den Versuchsergebnissen. Da es sich um sehr erfahrene Kommissionierende handelt, sind die Lernkurven in diesem Fall möglicherweise besonders steil. Aufgrund der permutierten Reihenfolge mittelt sich dieser Effekt jedoch heraus und hat somit einen geringen Einfluss auf den Vergleich zwischen den einzelnen eLPV-Gewichtungen.

Das Durchschnittsalter von Erwerbstätigen in der Lagerwirtschaft wird mit 42,8 Jahren beziffert (Statistisches Bundesamt, 2017). Das Probandenkollektiv ist mit einem durchschnittlichen Alter von 35,1 Jahren (SD=11,6 Jahre) etwas jünger. Dieser Abweichung im Alter steht jedoch die hohe Erfahrung der Versuchspersonen entgegen, welche die Ergebnisqualität im Vergleich zu Studien mit einem zufällig ausgewählten Kollektiv steigert. Die Kommissionierenden haben routinierte Bewegungsmuster für bestimmte Entnahmevorgänge entwickelt und kennen die Prozesse aus ihrem täglichen Berufsleben. Die Versuchspersonen haben hauptsächlich Erfahrung in Lagern aus dem Handel und der Automobilindustrie. Anzumerken ist, dass in diesen Bereichen zumindest teilweise von Paletten kommissioniert wird. Jedoch sind meist auch Zonen mit Fachbodenregalen im Lager vorhanden, die den Kommissionierenden bekannt sind.

7.2 Diskussion der Ergebnisse der empirischen Studie

In vielen Arbeitssystemen schließen sich Ergonomie und Wirtschaftlichkeit keinesfalls aus (Neuman & Dul, 2010). Auch in der Kommissionierung kann eine gute ergonomische Gestaltung des Systems in vielerlei Hinsicht die Effizienz steigern (vgl. Calzavara et al., 2017a; Hanson et al., 2018b; Diefenbach & Glock, 2019). Bei konkreter Betrachtung des Lagerplatzvergabeproblems zeigt sich jedoch, dass eine gleichzeitige Berücksichtigung der Wirbelsäulenbelastung und der Kommissionierzeit zu einem Zielkonflikt führt. Diese Erkenntnis deckt sich mit der Literatur zur Lagerplatzvergabe in Bezug auf andere Belastungsgrößen (Battini et al., 2016; Larco et al., 2017; Bortolini et al., 2017). Der Zielkonflikt resultiert hauptsächlich aus der Unvereinbarkeit der beiden Wirkmechanismen der eLPV, gleichzeitig die zurückzulegenden Wegstrecken zu minimieren, indem umsatzstarke Artikel möglichst nahe am Depot gelagert werden, während dieselben SKU in idealer Greifhöhe platziert werden sollen, um die Wirbelsäulenbelastung zu reduzieren.
In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Messungen bezüglich beider Zielgrößen der eLPV aus den Kommissionierversuchen diskutiert und anschließend anhand dieser Erkenntnisse Handlungsimplikationen zur Anwendung der eLPV abgeleitet.

7.2.1 Beanspruchung

In der Studie zur ergonomischen Lagerplatzvergabe wurden drei Beanspruchungsgrößen aufgezeichnet: mit der lokalen muskulären Beanspruchung ausgewählter Muskeln des Oberkörpers und der globalen Beanspruchung des Herz-Kreislauf-Systems zwei objektive Messgrößen auf der einen Seite sowie das subjektive Anstrengungsempfinden auf der anderen Seite. In dieser Arbeit wird die Verbindung zwischen der Belastung, welche durch die eLPV beeinflusst wird, und diesen Beanspruchungsgrößen untersucht.

Soll die Wirbelsäulenbelastung mittels der eLPV reduziert werden, so hat dies zur Folge, dass belastungskritische SKU (hohes Lastgewicht, hohe Zugriffshäufigkeit) eher in mittleren Regalhöhen gelagert werden. Dieser Goldene Zone Ansatz wurde bereits schon von Petersen et al. (2005) beschrieben – in diesem Fall jedoch, um Zeitvorteile durch eine schnellere Entnahme zu erreichen. Der hier entwickelte Algorithmus hingegen berücksichtigt Erkenntnisse aus der Literatur, die von niedrigeren Kompressionskräften bei manueller Lastenhandhabung in günstigen Entnahmehöhen ausgehen als in niedrigen oder sehr hohen Regalebenen. Die abgeleiteten Hypothesen gehen schließlich davon aus, dass die prognostizierten Belastungen mit den gemessenen Beanspruchungsgrößen korrelieren bzw. dass Szenarien mit geringerer prognostizierter Belastung ebenso signifikante Unterschiede auf Beanspruchungsseite hervorrufen.
Anhand der Versuchsergebnisse lässt sich grundsätzlich feststellen, dass eine höhere Gewichtung der Belastung in der eLPV alle drei Beanspruchungsdimensionen reduziert. Insbesondere die mittleren und

dynamischen EA der Muskeln im unteren Rücken Multifidus und Erector Spinae können stark verringert werden. Dieser Effekt ist naheliegend, da die eLPV für dieses Körpersegment ausgelegt wurde und die entsprechenden Zusammenhänge in der Literatur bekannt sind (Callaghan et al., 1998; El-Rich et al., 2004). Die Ergebnisse decken sich beispielsweise mit den Erkenntnissen von Skals et al. (2021a) oder Steinebach et al. (2021c), die höhere EMG-Signale bei Kommissioniertätigkeiten aus niedrigen Regalebenen oder mit höheren Lastgewichten feststellten. Allerdings gelingt es mithilfe hoher λ-Gewichtungen der eLPV, auch die EA im Nacken-Schulter-Bereich und den Oberarmen zu reduzieren, obwohl die Belastungsgröße nicht direkt auf diese Körpersegmente abzielt. Eine Platzierung von schweren bzw. häufig gegriffenen Artikeln in der Goldenen Zone reduziert also auch muskuläre Beanspruchung in anderen Körperbereichen – wenn auch in geringem Maße als im unteren Rücken. Lediglich in Bezug auf die Beanspruchung des Trapezius ist die eLPV kaum in der Lage, die EA zu verringern.

Besonders stark sind die Unterschiede zwischen $\lambda=0$ und $\lambda=1$ bzw. zwischen $\lambda=0$ und $\lambda=0{,}55$. Jedoch kann auch schon bei einer Erhöhung von $\lambda=0$ auf $\lambda=0{,}15$ bereits eine deutliche Reduzierung der physiologischen Kosten in den Muskeln des unteren Rückens erreicht werden. Hingegen konnten für alle Muskeln, wie in den Hypothesen vermutet, keine Beanspruchungsunterschiede zwischen der belastungsminimierenden und der belastungspriorisierten Pareto-Lösung festgestellt werden. Die muskulären Beanspruchungen (z. B. für den Erector Spinae beim MOP) sind je nach betrachteter Picking-Strategie teilweise sogar für $\lambda=0{,}55$ marginal geringer als für $\lambda=1$. Hieraus lässt sich schlussfolgern, dass die beiden Lösungen so dicht aneinander liegen, dass es aus Beanspruchungssicht irrelevant ist, welche der beiden gewählt wird. Dies ist nicht überraschend, da auch die kumulierten Wirbelsäulenbelastungen dieser beiden λ-Gewichtungen maximal 2 % voneinander abweichen.

Schlussfolgernd kann somit angenommen werden, dass Leithypothese LH 2.1 zumindest teilweise angenommen werden kann, auch wenn vereinzelt in Subhypothesen keine signifikanten Unterschiede vorliegen. Mit Ausnahme des Trapezius sind allerdings alle einfaktoriellen Varianzanalysen zur Untersuchung von Unterschieden zwischen den einzelnen Szenarien signifikant. Zudem liegt die abnehmende Tendenz der muskulären Beanspruchung bei steigendem λ für alle Muskeln vor.

Die oben diskutierten Ergebnisse gelten sowohl für die Betrachtung ausschließlich der Entnahmevorgänge (EMG_pick) als auch über das ganze Szenario hinweg. Allerdings liegen die mittleren und dynamischen EA der Pick_EMG-Daten deutlich höher als diejenigen der EMG_all-Daten. Somit wird erkennbar, dass die muskuläre Beanspruchung vor allem bei den Umsetzvorgängen der SKU aus dem Regal entsteht. Die Beanspruchung der Muskeln durch das Schieben des Wagens ist viel geringer. Lediglich beim Deltoideus bewegen sich die EA (%) bei den beiden Betrachtungsweisen in einer ähnlichen Größenordnung. Ein möglicher Grund könnte sein, dass der Wagen meist mit leicht angehobenen Armen geschoben wird, wobei die Schultermuskulatur aktiviert werden muss.

Mithilfe der EMG_pick Daten kann außerdem gezeigt werden, dass die geringere Beanspruchung bei hoher Belastungsgewichtung der eLPV nicht schlicht dadurch zustande kommt, dass zwischen den einzelnen Picks längere Phasen mit niedrigerer Beanspruchung liegen, die dann in Relation die zeitlich gemittelte Gesamtbeanspruchung reduzieren. Vielmehr werden bei den EMG_pick-Daten lediglich die Entnahmevorgänge untersucht, die unter der Annahme, dass keine Ermüdung eintritt, unabhängig von der Länge der Zeitspanne zwischen zwei Picks sind.

Überdies kann Leithypothese 2.2 angenommen werden, da die elektromyographische Aktivität aller untersuchten Muskeln signifikante Korrelationen mit den Belastungskennwerten der eLPV aufweist. Auch hier zeigt sich, dass die prognostizierte Belastung der Lendenwirbelsäule ein guter Indikator für die Beanspruchung, auch von Muskeln anderer Körpersegmente, ist.

Zwischen der Wirbelsäulenbelastung und der Herzschlagfrequenz sind keine direkten Wirkungszusammenhänge zu erwarten. Die HSF wurde in dieser Studie somit auch als Kontrollvariable angesehen, um abzuschätzen, wie die globale physiologische Beanspruchung auf Änderungen der eLPV reagiert. Es lässt sich feststellen, dass sich die HSF analog zur muskulären Beanspruchung bei einer höheren Belastungsgewichtung der eLPV reduziert, allerdings in einem deutlich geringeren Maße als die muskuläre Beanspruchung. Wie beschrieben, liegen zwischen der zeit- und belastungsminimierenden Lagerplatzvergabe lediglich etwa 4 bpm, was einer Reduktion von etwa 4 % entspricht. Auch wenn die Differenzen signifikant sind und hohe Effektstärken aufweisen, ist es fraglich, ob Unterschiede dieser Größenordnung überhaupt arbeitswissenschaftlich relevant sind. Hervorzuheben ist jedoch, dass die Entwicklung der Herz-Kreislauf-Beanspruchung in Abhängigkeit der eLPV zumindest nicht im Widerspruch zur muskulären Beanspruchung steht – denn dies hätte den Nutzen einer eLPV zum Zwecke der Reduzierung von MSE in Frage gestellt. Die aus Belastungssicht günstige Platzierung der Artikel scheint vielmehr auch einen leicht reduzierenden Einfluss auf die globale physiologische Beanspruchung zu haben: Energetische Kennwerte für Umsetzvorgänge in mittleren Entnahmehöhen sind geringer, als entsprechende Handhabungsvorgänge aus tiefen oder hohen Regalebenen (vgl. Garg et al., 1978; Spitzer et al., 1982). Aufgrund der Korrelation mit dem Energieumsatz kann somit auch eine mögliche Erklärung für geringfügig reduzierte Herzschlagfrequenzen gefunden werden.
Diesem Effekt wirken die längeren Laufwege entgegen, die zwar zu einem höheren gesamten Energieumsatz führen – da die Kommissionierenden für diesen Laufweg jedoch mehr Zeit benötigen, bleibt der Energieumsatz pro Zeiteinheit beim Ziehen bzw. Schieben mutmaßlich in etwa konstant.
Insgesamt kann auch Leithypothese 2.3 schließlich nur teilweise angenommen werden, da nicht alle Subhypothesen den Erwartungen entsprechen. Für einige wenige Mittelwertvergleiche im SOP bzw. MOP ergeben sich keine signifikanten Unterschiede für die verschiedenen Szenarien. Jedoch deuten auch hier alle einfaktoriellen Varianzanalysen auf signifikante Unterschiede bezüglich der HSF hin. Die

Korrelation zwischen der kumulierten Wirbelsäulenbelastung und der HSF ist hingegen nicht signifikant, sodass Leithypothese 2.4 abgelehnt wird.

Analog zu den anderen beiden Beanspruchungsgrößen reduziert sich ebenfalls das subjektive Anstrengungsempfinden bei hohen λ-Gewichtungen. Wie bereits beschrieben gelingt es einigen Versuchsteilnehmenden sogar, subjektiv die Effekte der eLPV zu beschreiben. In Übereinstimmung hiermit haben Larco et al. (2017) festgestellt, dass Kommissionierende Pick-Vorgänge aus mittleren Ebenen bevorzugen und dort weniger Diskomfort verspüren. Auf der Borg CR-10 Skala wurden für tiefe Regalebenen im Schnitt 1,27 Punkte und für hohe Regalebenen 1,18 Punkte mehr vergeben. Ebenso decken sich das niedrigere subjektive Anstrengungsempfinden nach der Borg RPE Skala mit den Ergebnissen des Vergleichs einer belastungsminimierten und einer wegstreckenminimierten LPV in Steinebach et al. (2021c). Schließlich können in dieser Studie die Leithypothesen 2.5 (Unterschiedshypothesen) und 2.6 (Zusammenhangshypothesen) angenommen werden.
Aus Beanspruchungssicht kann des Weiteren der potentielle Einfluss des aufgrund der Covid-19 Pandemie zu tragenden Mund-Nasen-Schutzes (OP-Maske) diskutiert werden. Der Einfluss wurde in der Literatur bereits untersucht, wobei meist zwischen einem Einsatz von OP-Masken und FFP-2 Masken unterschieden wird. Während bei Ergometertests im Vergleich zwischen der Ausführung mit einer OP-Maske und ohne Maske kaum signifikante Unterschiede feststellbar waren (etwas geringere Maximalleistung bei leicht geringerer HSF bei Nutzung der OP-Maske; nicht signifikant), sind bei der Nutzung einer FFP-2 Maske signifikante Unterschiede bezüglich Leistungsparameter und pulmonaler Größen zu finden (Fikenzer et al., 2020; Georgi et al., 2020). Ebenso liegt eine geringfügig niedrigere Sauerstoffsättigung des Blutes bei Nutzung einer FFP-2 Maske vor, welche jedoch nach Auffassung der Autoren keine klinische Relevanz hat (Scarano et al., 2021). Es wird deshalb nur mit einem sehr geringen Einfluss der Masken, insbesondere bei intraindividuellen Vergleichen, auf die objektiven Versuchsergebnisse gerechnet. Nach Georgi et al. (2020) sind allenfalls höhere Borg RPE-Werte aus psychologischen Ursachen zu erwarten – dies deckt sich mit den in diesem Versuch im Vergleich mit der Herzschlagrate etwas höheren Borg RPE-Werten.

Zusammenfassend lässt sich eindrücklich zeigen, dass die eLPV wie erwartet wirkt und sich alle Beanspruchungsparameter mit hoher Gewichtung der Belastungskennwerte signifikant reduzieren lassen. Dies gilt sowohl für Single- als auch für Multi-Order Picking. Es konnten demnach auch Erkenntnisse aus einer korrespondierenden Vorstudie (Steinebach et al., 2021c) bestätigt und ausgeweitet werden. Die Größe der Unterschiede und die entsprechenden Effektstärken zwischen einzelnen λ-Gewichtungen unterscheiden sich zwar zwischen den einzelnen Beanspruchungsparametern, jedoch zeigen alle Effekte in die gleiche Richtung. Langfristig kann sich somit die Einführung einer eLPV neben einer Senkung der Risiken zur Entwicklung von MSE auch in

Form von ökonomischen Vorteilen auswirken: Etwa können die Ausgaben für gesundheitsbedingte Ausfälle bzw. die Fluktuation der Mitarbeitenden sinken oder die Arbeitsmotivation gesteigert werden (Grosse et al., 2015).

7.2.2 Menschliche Kommissionierleistung

Kommissionierzeit

Die Kommissionierzeit wird in dieser Studie durch die gewählte Gewichtung λ der eLPV maßgeblich beeinflusst. Sie nimmt mit steigender λ-Ausprägung zu und ist für das belastungsminimierte Szenario am höchsten. Deutlich kürzere Kommissionierzeiten ergeben sich bereits für die belastungspriorisierte eLPV ($\lambda = 0{,}55$) und noch kürzere Zeiten für die zeitpriorisierten ($\lambda = 0{,}15$) bzw. zeitminimierten ($\lambda = 0$) Szenarien. Zu beachten ist, dass bei höheren Kommissionierzeiten allgemein mit höheren Kosten zu rechnen ist, da für konstante Auftragsmengen mehr Arbeitspersonen benötigt werden, um die Aufträge in der gleichen Zeit zu bearbeiten. Ebenso kann es zu längeren Lieferzeiten an die Kunden kommen.
Das zeitpriorisierte und zeitminimierte Szenario unterscheiden sich nicht statistisch voneinander. Dies gilt sowohl für den Single- als auch für den Multi-Order Picking Ansatz. Die entsprechenden zeitlichen Differenzen der Mittelwerte liegen unter 0,5 %. Zudem ist die durchschnittliche Kommissionierzeit beim MOP für das zeitpriorisierte Optimum marginal niedriger als für das zeitoptimierte Optimum. Diese Ergebnisse sind wiederum nicht verwunderlich, da die prognostizierten Zeiten dieser beiden Pareto-Optima sehr dicht zusammenliegen. Aus einer rein ökonomischen Sicht ist der Entscheidungsträger somit indifferent zwischen $\lambda = 0$ und $\lambda = 0{,}15$. Leithypothese 3.1 kann somit zumindest teilweise angenommen werden, da mit Ausnahme von drei Subhypothesen im SOP bzw. MOP alle anderen erwarteten Unterschiede signifikant vorliegen.
Ebenso kann Leithypothese 3.2 angenommen werden, da zwischen den durch MTM-UAS prognostizierten und den tatsächlichen Kommissionierzeiten signifikante Korrelationen vorliegen. Obwohl die Kommissionierzeiten für das Single-Order Picking entwickelt wurden, ist auch die Korrelation beim MOP signifikant. Der Korrelationskoeffizient ist jedoch geringer und auch das Signifikanzniveau niedriger als beim SOP. Dies deutet darauf hin, dass der Algorithmus zwar auch bei einer Bildung von Routen durch das Lager Kommissionierzeiten bei einer höheren Gewichtung der Zeit (kleines λ) reduziert. Allerdings wird die Lagerplatzvergabe sicherlich nicht für beliebige Zusammenstellungen von Routing- und Batching-Strategien optimal gelöst. Hierfür müssten diese Optimierungsprobleme in die eLPV integriert werden. Auch eine nachgeschaltete Optimierung des Routings bzw. Batchings bei bereits optimierter Lagerplatzvergabe ist denkbar. Auf diese Limitationen muss bei der Anwendung der eLPV explizit hingewiesen werden.
Beim direkten Vergleich der Kommissionierzeiten zwischen SOP und MOP fällt auf, dass die Relation entgegen der Erwartung ausfällt. Da beim MOP vier Artikel in einer Route eingesammelt werden, bevor

zum Depot zurückgekehrt wird, liegen kürzere Wegstrecken vor. Analog müsste demnach die Kommissionierzeiten beim MOP kürzer sein (Petersen & Aase, 2004). Tatsächlich liegen sie beim MOP jedoch durchschnittlich um etwa 4,5 % höher (nicht signifikant). Ursächlich hierfür ist wahrscheinlich die ungleiche Zusammensetzung der beiden getrennten Gruppen. Die Gruppe der Versuchsteilnehmenden beim SOP war insgesamt jünger (32,5 vs. 37,7 Jahre), trieb mehr Sport in der Freizeit (4,4 vs. 3,2 Stunden pro Woche) und schätzte die eigene Kommissionierleistung besser ein (siehe Fragebogen A) als die Teilnehmenden beim MOP. Somit wurde im SOP aufgrund der zufälligen Gruppenzusammensetzung trotz der längeren Laufwege eine kürzere Kommissionierzeit erzielt. Falls bei zukünftigen Studien die beiden Picking-Strategien gezielt miteinander verglichen werden sollen, ist entweder ein vollständiges Within-Subject Design zu wählen oder sorgfältig auf eine ausgewogene Gruppenzusammensetzung zu achten.

Obwohl die intraindividuellen Unterschiede der Kommissionierzeit in der erwarteten Form auftreten und signifikanten Korrelation mit der prognostizierten Zeit vorliegen, müssen die Abweichungen zwischen der tatsächlichen und der mit MTM-UAS berechneten Kommissionierzeit diskutiert werden. Die Kommissionierenden in der Studie waren im Mittel für alle Szenarien langsamer als die entsprechende Sollzeit mittels MTM. Die relativen Abweichungen liegen wie in Kapitel 6 gezeigt zwischen 4,3 und 10,9 %. Dies kann vielfältige Gründe haben.

Zum einen fällt auf, dass die Zeit zur Identifikation der Artikel deutlich länger gedauert hat, als dies zuvor eingeplant wurde. Es wurde von einem Abgleichen eines dreistelligen Codes ausgegangen für den 15 TMU vergeben wurden (Bokranz & Landau, 2012). In den Versuchen ließ sich jedoch klar erkennen, dass die tatsächlich benötigte Zeit hierfür deutlich höher lag. Häufig wurde sich durch einen mehrfachen Abgleich zwischen Kommissionierliste und Lagerplatzkennzeichnung versichert, dass der richtige Artikel gegriffen wird. Aus diesem Grund sind die relativen Abweichungen bei hohen λ geringer. Hier sind die Laufwege länger, sodass die Zeiten für die Identifikation der Artikel weniger ins Gewicht fallen.

Für das Suchen und Abgleichen der SKU sollte somit in Zukunft ein größerer Zeitfaktor eingeplant werden. Wenn die Sollzeit zum Suchen und Identifizieren nur um eine Sekunde je kommissioniertem SKU erhöht wird, so entfallen die Abweichungen zwischen den prognostizierten und tatsächlichen Kommissionierzeiten entweder gänzlich oder werden für andere Szenarien zumindest um über 50 % reduziert.

Zudem gab es einige Versuchspersonen, die jedes kommissionierte SKU mit einer Markierung auf der Pickliste „quittierten“. Für diesen Vorgang wurden im Algorithmus keine korrespondierenden Sollzeiten hinterlegt. Ebenso wurde analog zu zahlreichen Publikationen (Gue et al., 2006; Pan et al., 2012; Elbert et al., 2015) von einer mittleren Geschwindigkeit beim Schieben eines Wagens von 0,75 m/s ausgegangen. Aufgrund der zahlreichen zu fahrenden Kurven könnte die durchschnittliche Geschwindigkeit etwas niedriger liegen – eine Anpassung der zeitlichen Kennwerte könnte entsprechend

der Vorschläge von Elbert & Müller (2017b) erfolgen. Generell ist auffällig, dass die Art und Weise, wie der Kommissionierwagen bewegt wurde, sehr unterschiedlich war – auch hier kam es somit zu zeitlichen Abweichungen. Die Handhabungsweise reichte von einem ausschließlichen Schieben des Wagens (nach dem Pick wurde um den Wagen herumgelaufen), über ein „Mitziehen“ neben dem Wagen bis hin zu einem teilweisen Hinterherziehen des Wagens. Außerdem liegt ein Übungseffekt vor. Im ersten Durchgang (geordnet nach der tatsächlichen Versuchsreihenfolge) wurden längere Kommissionierzeiten benötigt als in den folgenden Szenarien. Man kann also davon ausgehen, dass die Versuchspersonen nicht in allen Durchgängen „vollständig eingearbeitet“ waren, wovon MTM jedoch ausgeht (Stinson & Wehking, 2012). Auch hier macht sich demnach bemerkbar, dass eine längere Trainingsphase in zukünftigen Studien angebracht ist.
Es wäre auch möglich gewesen, die Leistungsbereitschaft der Versuchspersonen durch einen Leistungslohn zu steigern. Jedoch wurde sich dagegen entschieden, da dies gegebenenfalls zu einem unnatürlich hohen Arbeitstempo geführt hätte.

Auch das Optimierungspotential ist bei den tatsächlichen Zeiten kleiner als bei den durch die eLPV prognostizierten Kommissionierzeiten. Die berechnete Differenz zwischen den Kommissionierzeiten bei $\lambda = 0$ und $\lambda = 1$ liegt bei 17,9 %. Tatsächlich erreicht wird in der Studie jedoch nur eine Verbesserung der Kommissionierzeit von 11,8 %. Diese Differenz kann zumindest teilweise ebenfalls durch die längeren Zeiten zum Suchen und Identifizieren der SKU erklärt werden, die für jeden Artikel anfallen. Der relative Anteil der Wegstrecke, auf den die eLPV maßgeblich einen Einfluss hat, wird dadurch reduziert. Folglich sinkt somit das Optimierungspotential bezüglich der Kommissionierzeit.

Insgesamt ist die Ermittlung von Sollzeiten in der manuellen Kommissionierung mittels MTM-UAS dennoch gut geeignet, um sie in Optimierungsmodellen zu verwenden. Unter Umständen sind jedoch Besonderheiten einzelner Kommissioniersysteme zu beachten und gegebenenfalls in der Sollzeitplanung zu berücksichtigen. Trotz des klar strukturierten und festgeschriebenen MTM-Standards wird deshalb ein iteratives Vorgehen und eine Evaluation der zeitlichen Kennwerte anhand der tatsächlich gemessenen Zeiten empfohlen, um die Planungsqualität einer ergonomischen Lagerplatzvergabe zu steigern.

Kommissionierqualität

Die durchschnittliche Fehlerquote in den Kommissionierversuchen von 0,68 % ist für Laborversuche vergleichsweise niedrig – gemittelte Fehlerquoten in anderen Versuchen liegen mit z. B. 1,8 – 4,2 % in Lolling (2002a) oder 1,13 % mittels Pick-by-Paper (Baechler et al., 2016) meist höher. Eine Untersuchung in der Industrie mit insgesamt 38 analysierten Unternehmen kam auf einen Mittelwert der Fehlerquote von 0,41 % (Lolling, 2002b), die mit dem hier ermittelten Wert recht gut übereinstimmt.

Die sehr niedrigen Fehlerquoten in der Studie verdeutlichen, dass die teilnehmenden Kommissionierenden ausreichend Erfahrung besaßen sowie ihre Aufgaben routiniert und sorgsam ausführten. Zudem kann daraus geschlossen werden, dass die Lagerplatzkennzeichnung und Pickliste übersichtlich war und die Versuchspersonen den Prozess gut verstanden haben.

Leithypothese 3.3 ist in diesem Versuch abzulehnen, da keine Unterschiede zwischen den Szenarien festzustellen waren. Die Fehlerquote ist demnach unabhängig von der gewählten λ-Ausprägung. Hieraus kann geschlossen werden, dass eine niedrigere physische Belastung bzw. eine bessere ergonomische Gestaltung die Kommissionierqualität nicht zwangsläufig verbessert. Ursächlich hierfür könnte jedoch auch sein, dass verschiedene Fehlerursachen in dem vorliegenden Versuchsdesign ausgeschlossen waren. So konnten sich die Kommissionierenden beispielsweise nicht verzählen, da von jedem Lagerplatz nur ein SKU auf einmal entnommen wurde. Zudem waren die Artikel sehr groß und die Lagerplätze deutlich voneinander getrennt, sodass ein unbewusstes „Vergreifen“ unterbunden wurde. Jedoch wurden keine Assistenzsysteme eingesetzt, die eine Identifizierung von Artikeln erleichtern, wie beispielsweise Pick-by-Light oder Pick-by-Voice. Ferner hatten die Versuchspersonen keine Möglichkeit, sich anhand der Artikelbeschreibung zu orientieren, da alle SKU optisch identisch waren.
Anzumerken ist, dass bezüglich der Entstehung von Fehlern neben der physischen Ergonomie vor allem auch die kognitive Ergonomie betrachtet werden muss. Der Einfluss dieser Komponente wird von zahlreichen Forschenden betont (z. B. Kretschmer et al., 2017). Zur gezielten Untersuchung des Einflusses der eLPV auf Fehler wird deshalb ein entsprechend abgeändertes Versuchsdesign empfohlen.

7.2.3 Bi-kriterielle Analyse der Studienergebnisse

Der Beitrag dieser Arbeit liegt insbesondere in der Verknüpfung von Belastungs- und Beanspruchungsdaten in der manuellen Kommissionierung sowie die gleichzeitige Untersuchung von empirisch ermittelten Kommissionierzeiten, während zahlreiche Autoren ihre LPV-Modelle lediglich in numerischen Experimenten bzw. Computersimulationen evaluiert haben. Die beiden Zielgrößen der Optimierung sollen in diesem Unterkapitel nun gemeinsam betrachtet und der bereits erwähnte Zielkonflikt diskutiert werden. Die Ergebnisse zeigen ausführlich, dass hohe λ-Gewichtungen der eLPV zwar Belastungen bzw. Beanspruchungen senken, gleichzeitig jedoch die Kommissionierzeit steigern und umgekehrt.
Die Wechselwirkung dieser beiden Größen kann anhand von Pareto-Kurven, die mithilfe des Algorithmus automatisiert erstellt werden, visualisiert und analysiert werden. In der hier betrachteten Studie kann für einen repräsentativen Fall gezeigt werden, dass Optimierungen nach nur einer Zielgröße wenig sinnvoll sind. Durch die Einführung einer bi-kriteriellen Optimierung hingegen können pareto-optimale Lösungen gefunden werden, die für Lagerplanende sehr attraktiv sind. Wird bei einer rein

zeitminimierenden Lagerplatzvergabe die λ-Gewichtung nur leicht erhöht (hier von $\lambda = 0$ auf $\lambda = 0{,}15$), so ändern sich die Kommissionierzeiten kaum. Gleichzeitig treten jedoch signifikant geringere Belastungen bzw. Beanspruchungen auf. Es ist zwar im mathematischen Sinne nicht zulässig, von einer Dominanz der zeitpriorisierten gegenüber der zeitminimierenden Lösung zu sprechen – dennoch ist es aus Sicht der Entscheidungstragenden nach dieser Argumentation nicht empfehlenswert, rein zeitoptimierte Lösungen anzustreben. Gleichermaßen gilt dies für den Vergleich der Belastungsoptimierung und der belastungspriorisierten Kompromisslösung. Eine rein belastungsoptimierte Lagerplatzvergabe könnte für das Unternehmen sehr kostenintensiv werden, ohne hierdurch signifikante ergonomische Vorteile gegenüber der belastungspriorisierten LPV zu generieren. Die beschriebenen Erkenntnisse decken sich mit numerischen Berechnungen bezüglich anderer Belastungskenngrößen von Larco et al. (2017), Battini et al. (2016), Bortolini et al. (2017) und Gajsek et al. (2021). Im Vergleich mit der vorliegenden Studie liegen die zeitlichen und belastungsorientierten Optimierungspotentiale bei Larco et al. (2017) in einer ähnlichen Größenordnung (durchschnittlicher Diskomfort), während Bortolini et al. (2017) noch größere Potentiale der Belastungsreduzierung (REBA-Score) errechnen. Battini et al. (2016) hingegen untersuchen den Zielkonflikt zwischen dem Energieumsatz und der Kommissionierzeit, welcher deutlich geringer ausfällt, da diese Belastungsgröße stark mit der zurückzulegenden Wegstrecke korreliert, die ebenfalls auf die Kommissionierzeit einwirkt. Diese Erkenntnisse können von Diefenbach & Glock (2019) bestätigt werden.

Ausdrücklich erwähnt sei, dass die Quantifizierung der λ-Gewichtung der hier untersuchten Kompromisslösungen nicht immer bei $\lambda = 0{,}15$ bzw. $\lambda = 0{,}55$ zu finden ist. Im Einzelfall muss die sich ergebende Pareto-Kurve genau analysiert werden und mit dem Ist-Zustand der Lagerplatzvergabe verglichen werden, wobei davon auszugehen ist, dass die meisten Unternehmen sich mit ihrer LPV rechts bzw. oberhalb der Pareto-Kurve im dominierten Bereich befinden (vgl. Larco et al., 2017).

Bei der Entscheidung für eine bestimmte λ-Gewichtung der eLPV werden sich die Lagerplanenden stets fragen, wie die Belastungsreduzierung arbeitswissenschaftlich zu bewerten ist, wenn diese zulasten ökonomischer Effizienz erzielt werden soll. Diese Frage muss im Einzelfall anhand der berechneten kumulierten Belastungsdosis der Wirbelsäule sowie den Spitzenbelastungen durch die Entnahmevorgänge bewertet werden. Diese gibt der Algorithmus ebenfalls für alle λ aus.

In dieser konkreten Studie liegt zwischen der Zeit- und Belastungsoptimierung ein Unterschied von 28,7 % der kumulierten Druckkraftdosis durch die Entnahmevorgänge. Eine für die Praxis besonders relevante Entscheidung könnte die Wahl zwischen der zeitminimierten und zeitpriorisierten eLPV sein, da meist die ökonomischen Ziele im Fokus stehen. Diesbezüglich wird ersichtlich, dass bei einer Änderung der eLPV von $\lambda = 0$ auf $\lambda = 0{,}15$ die kumulierte Druckkraftdosis bereits um 16,0 % verringert wird. Die verschiedenen Beanspruchungsparameter folgen dieser Belastungsreduzierung. Dies kann bei langjähriger Exposition in solchen Arbeitssystemen einen großen Unterschied ausmachen. Generell ist Lagerplanenden zu empfehlen kumulierte Druckkräfte auf Bandscheiben der LWS durch berufliche

Exposition so gering wie möglich zu halten, da Überlastungen auf lange Sicht mit Schmerzen im unteren Rücken und degenerativer Erkrankungen in Verbindung gebracht werden (Jäger et al., 2019; Lu et al., 2014). Zumindest aber sollten die kumulierten Druckkräfte unterhalb der Obergrenzen für eine Tagesdosis liegen. Ebenso sollten Lagerplanende hohe Spitzenbelastungen oberhalb der revidierten Dortmunder Richtwerte vermeiden. Dass dies ebenfalls durch eine Anwendung der eLPV möglich ist, soll durch den Anwendungsfall der vorliegenden Studie verdeutlicht werden: Während das schwerste SKU mit einem Lastgewicht von 15 kg bei von $\lambda = 0$ in der untersten Ebene gelagert wird und beim Heben eine kalkulierte Druckkraft von 5,5 kN auf L5-S1 hervorruft und damit oberhalb der Revidierten Dortmunder Richtwerte liegt (Jäger et al., 2019), ist dies bei den drei anderen Szenarien nicht der Fall. Im Vergleich dazu verursacht der Hebevorgang dieses SKU aus einer mittleren Ebene nur eine Druckkraft von 3,3 kN. Es gelingt somit selbst bei nur einer geringfügigen Berücksichtigung belastungsorientierter Kenngrößen in der eLPV, Spitzenbelastungen beim Kommissionieren zu reduzieren. Tendenziell sinkt so insbesondere bei häufiger Ausführung die Wahrscheinlichkeit der Erkrankungen der Lendenwirbelsäule (Jäger et al., 2019). Lagerplanende sollten bei der Wahl eines Pareto-Optimums außerdem die Zusammensetzung der Belegschaft berücksichtigen. Ältere bzw. weibliche Mitarbeitende oder Personen mit einschlägiger Erkrankungshistorie im Bereich des unteren Rückens besitzen in der Regel eine geringere individuelle Belastbarkeit. Bei der Anwendung des eLPV sind demnach ggf. angepasste maximal zulässige Spitzenlasten oder zulässigen kumulierten Wirbelsäulenbelastung anzusetzen, um MSE vorzubeugen. Eine exakte Quantifizierung der zu erwartenden MSE oder gar eine Ableitung der monetären Einbußen durch ebensolche ist jedoch unseriös und wird an dieser Stelle nicht weiterverfolgt. In Zukunft könnten die Anwendenden der eLPV durch eine Integration von nachgelagerten Kalkulationen von Screening-Verfahren, wie z. B. EAWS, unterstützt werden. Eine Evaluation der einzelnen Pareto-Optima sowie die Bewertung der resultierenden körperlichen Belastung würde so zusätzlich durch eine Einordnung in ein Ampelschema erleichtert.

Ferner soll an dieser Stelle das Zusammenspiel der Kommissionierleistung und der Beanspruchung diskutiert werden. Leistung und Beanspruchung stehen laut dem erweiterten Belastungs-Beanspruchungs-Konzept (Rohmert, 1984; siehe Anhang A) stets in einem Beziehungszusammenhang. Wenn die Versuchspersonen sich sehr anstrengen eine möglichst hohe Pickleistung zu erreichen, wird die Beanspruchung steigen und vice versa. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass der dominante Einfluss auf die Belastung und Beanspruchung in dieser Studie von den unterschiedlichen Anordnungen der SKU durch die eLPV ausgeht. Diese verändert die Arbeitssituation und damit die Belastung.
Entgegen des erweiterten Belastungs-Beanspruchungs-Konzepts sind die Leistung und die Beanspruchung in dem Arbeitsmodell entkoppelt, da angenommen wird, dass die Leistungsbereitschaft der Person zwischen den einzelnen Szenarien konstant ist. Untersucht wird demnach der voneinander unabhängige Einfluss der eLPV auf die Beanspruchung sowie die Kommissionierleistung. Falls

Versuchspersonen ihre Kommissionierleistung derart anpassen, dass sie ihre Beanspruchung auf einem konstanten, für sie angenehmen Level halten (vgl. Schlick et al., 2018), so würde sich dies stets in einer der beiden Zielgrößen bemerkbar machen. Der Trade-Off der beiden Größen bleibt somit auch bei Verhaltensanpassungen sichtbar.

Bei Betrachtung der Daten erscheint es unwahrscheinlich, dass die Probandinnen und Probanden ihre Leistung stark angepasst haben, um ihre Beanspruchung konstant zu halten, denn diese steigt in allen drei Beanspruchungskategorien mit sinkendem λ. Gewisse Anpassungseffekte sind jedoch nicht auszuschließen.

In Leithypothesen 4.1 bis 4.3 wird zudem ein Querbezug zwischen Kommissionierzeit und Beanspruchung untersucht. Es stellt sich die Frage, ob durch die Reduzierung der Beanspruchung in Folge der eLPV kürzere Kommissionierungszeiten möglich werden. Zwischen der Beanspruchungsreduzierung und der Kommissionierzeitzunahme liegen tendenziell negative Korrelationen vor. Dies deutet an, dass gegebenenfalls ein schwacher Effekt vorliegt, der jedoch aufgrund der zu geringen Stichprobengröße nicht signifikant nachgewiesen werden kann. Die Beanspruchungsreduzierung scheint so zumindest in dieser Studie keinen signifikanten Einfluss auf die Kommissionierzeit zu haben, sodass die Leithypothesen bezüglich des Querbezugs abgelehnt werden müssen. Es ist denkbar, dass sich dies bei einer längeren Versuchsdauer bzw. während eines kompletten Arbeitstages in der betrieblichen Praxis ändert.

7.3 Übertragbarkeit und Implementierung der Versuchsergebnisse in die Praxis

Abschließend soll die externe Validität der Studienergebnisse diskutiert und ein Leitfaden zur Einführung einer ergonomischen Lagerplatzvergabe in Unternehmen vorgestellt werden. Eine Studie ist dann extern valide bzw. in die Praxis übertragbar, wenn die Ergebnisse über die Gegebenheiten der Untersuchung hinausgehend verallgemeinerbar sind (Döring & Bortz, 2016).

In der Studie wurden erfahrene Kommissionierende als Versuchspersonen gewählt, sodass mit einer routinierten Arbeitsweise und etablierten Bewegungsmustern zu rechnen ist, die in einer hohen Datenvalidität resultieren. Zudem wurde die Gelegenheit genutzt, die Versuchspersonen im Anschluss an den Versuch direkt nach der Übereinstimmung des gewählten Versuchsdesigns mit der täglichen Berufserfahrung zu befragen, siehe Fragebogenteil C. Die entsprechenden Angaben sind in Anhang T wiedergegeben. Die Versuchspersonen gaben an, dass generell eine hohe Übereinstimmung des gewählten Szenarios mit der eigenen Berufserfahrung besteht. Dies betrifft zum einen die verwendeten Artikelgewichte, wobei tendenziell aufgezeigt wurde, dass diese in der Praxis teilweise noch etwas höher sind. Auch die körperliche Anstrengung sowie das Lagerlayout wurden als der Berufserfahrung entsprechend bewertet – lediglich die Lagergröße wurde von mehreren Teilnehmenden als zu klein beurteilt. Die größten Abweichungen ergeben sich hinsichtlich der verwendeten Technik. Zum einen

wurden in der Studie keine Assistenzsysteme zur Artikelidentifikation verwendet. Insbesondere Handscanner wurden von vielen Personen vermisst. Ferner wurde festgehalten, dass die in der Praxis verwendeten Kommissionierfahrzeuge meist einen Antrieb besitzen, sodass ein manuelles Schieben des Wagens entfällt. Positiv zu bewerten ist, dass die verwendete Messtechnik die Versuchspersonen in ihrer Tätigkeit nicht eingeschränkt hat, sodass hierdurch keine Datenverzerrung zu erwarten ist. Insgesamt kann so davon ausgegangen werden, dass ein recht realistisches Szenario abgebildet wurde. Dennoch ist die Generalisierbarkeit der Ergebnisse erschwert, da die Variation an Gestaltungselementen eines Lagers bzw. der Kommissionierprozesse sehr groß und hochindividuell ist. Lagerlayout und Produktcharakteristika haben, wie bereits beschrieben, einen großen Einfluss auf die Ergebnisse (vgl. Battini et al., 2016; Gajsek et al., 2021). Bei Übertragung dieser Zusammenhänge auf andere Kommissioniersysteme ist dies dringend zu beachten. Die zu treffenden Entscheidungen sind immer von der Analyse des individuellen Einzelfalls abhängig. Hierfür soll jedoch im Folgenden eine Handlungsanleitung gegeben werden.

Abbildung 35 präsentiert einen möglichen Leitfaden, der Praktiker mit einem strukturierten Vorgehen zur Abschätzung der Notwendigkeit bzw. des Nutzens einer eLPV bei deren Umsetzung unterstützt. Die einzelnen Schritte werden nachfolgend erläutert.
Zunächst ist es unabhängig von der Frage nach einer geeigneten Lagerplatzvergabe auch aus rechtlichen Gründen geboten, eine Ergonomie-Analyse für intralogistische Arbeitsplätze durchzuführen. Mit hierfür geeigneten Werkzeugen können Risikofaktoren und physische Belastungen erfasst und bewertet werden. Neben dem in dieser Arbeit behandelten Ansatz zur kumulierten Wirbelsäulenbelastung ist auch ein Screening, z. B. mit den EAWS-Verfahren (Schaub et al., 2013) möglich. Anhand der Risikobewertung dieser Verfahren lässt sich ableiten, ob ein Handlungsbedarf besteht. Falls ja, würden entsprechende Maßnahmen nach dem TOP-Prinzip[9] eingeleitet werden. Da bei einer eLPV direkt an der Arbeitsgestaltung und somit an der Quelle angesetzt wird, handelt es sich im Sinne des TOP-Prinzips um eine technische Maßnahme. Diese sind vorrangig zu verwenden, um durch Umgestaltung Belastungen zu reduzieren. Falls weitere technische Maßnahmen nicht möglich und ergonomische Risiken noch immer zu hoch sind, kommen organisatorische Maßnahmen in Betracht. Hierzu zählt z. B. die Job Rotation (vgl. Koch, 2017).

[9] Aus § 4 Arbeitsschutzgesetz leitet sich die folgende Reihenfolge der Maßnahmen zur Reduzierung ergonomischer Risiken ab: technische Maßnahmen, organisatorische Maßnahmen, persönliche Maßnahmen (vgl. Koch, 2017).

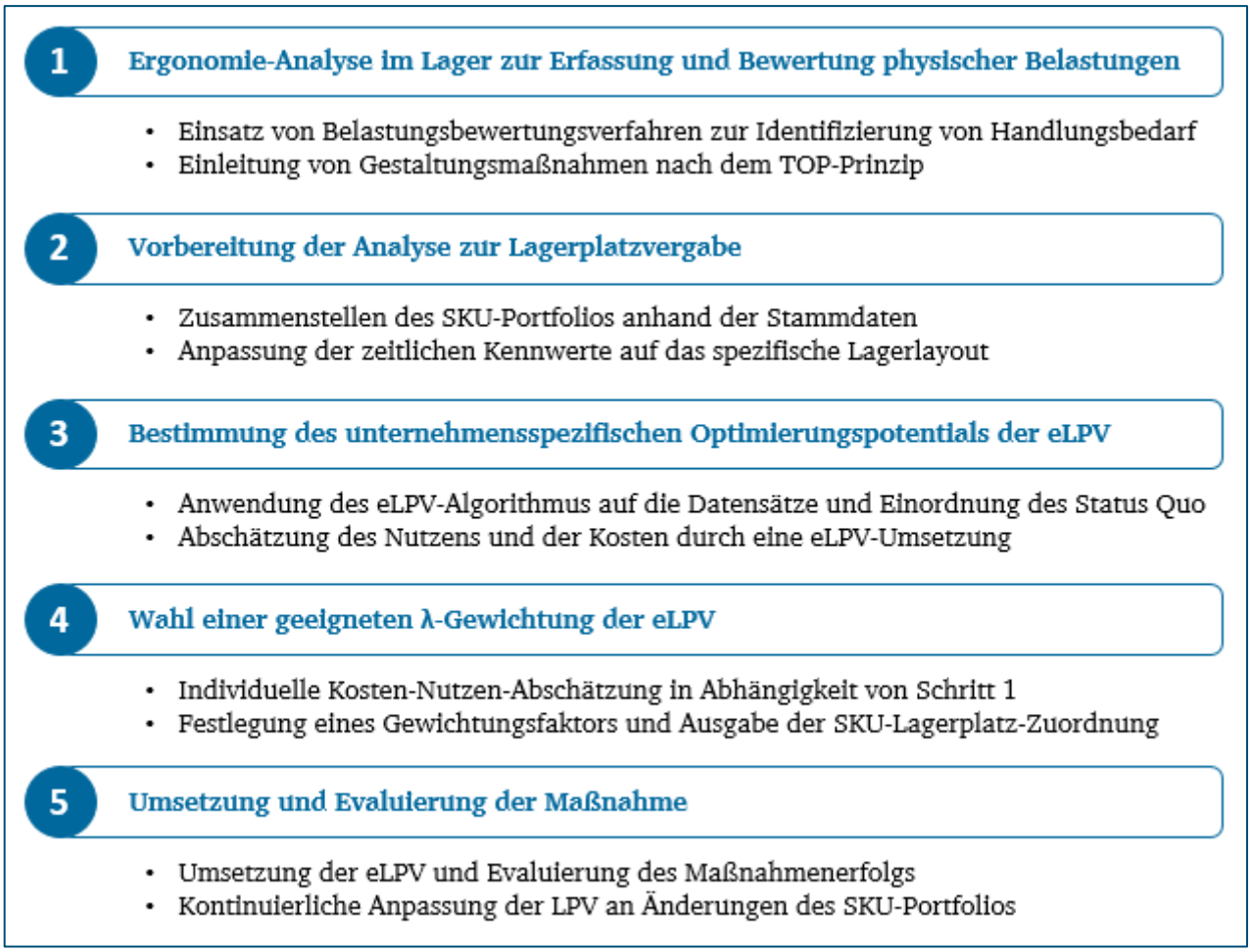


Abbildung 35: Leitfaden zur Implementierung einer eLPV in Unternehmen (eigene Darstellung)

Im zweiten Schritt werden Daten einzelner Lagerzonen zusammengestellt, die für die Potential-Analyse der eLPV notwendig sind. Hierzu gehören insbesondere Stammdaten aus dem WMS, die das Artikelportfolio betreffen, wie z. B. Lastgewichte und Umsatz-/ Zugriffhäufigkeiten einzelner Artikel. Eine hohe Heterogenität der SKU-Eigenschaften weist bereits vor einer Anwendung der eLPV auf ein hohes Potential dieser Maßnahme hin. Es ist darauf zu achten, dass die Stammdaten gepflegt sind, um etwaige Ineffizienzen der eLPV zu verhindern. Ferner müssen die zeitlichen Kennwerte entsprechend des konkreten Lagerlayouts mittels MTM-UAS angepasst werden. Da die Greifzeit im Vergleich mit der Wegzeit eine untergeordnete Rolle spielt, genügt es für eine erste Abschätzung auch, nur die Wegzeiten bzw. Distanzen zu berücksichtigen, ohne MTM-Analysen durchführen zu müssen. Bei einer Neuplanung des Lagers muss zudem entschieden werden, welche Artikel auf Paletten bzw. in Fachbodenregalen gelagert werden – eine Entscheidungshilfe kann der Ansatz von Battini et al. (2018) bieten.

In einem dritten Schritt wird das unternehmensspezifische Optimierungspotential der eLPV bestimmt. Hierfür werden die zuvor erstellten Datensätze in den eLPV-Algorithmus geladen. Es ist sinnvoll, den Status Quo in Relation zu der sich ergebenden Pareto-Kurve einzuordnen, um zu ermitteln, wie weit man von einem Pareto-Optimum entfernt ist. Es lässt sich ferner erkennen, wie groß die

Optimierungspotentiale der beiden Zielgrößen in dem spezifischen Lager sind und ob die Einführung einer eLPV überhaupt zu klaren Verbesserungen führen kann. Außerdem muss in diesem Schritt geklärt werden, ob prozessuale Bedingungen der Einführung im Weg stehen und mit welchen Kosten für die Umstellung zu rechnen ist.

Ist man zu dem Schluss gelangt, im Lager bzw. in bestimmten Lagerzonen eine eLPV einzuführen, so muss in einer individuellen Kosten-Nutzen-Entscheidung ein konkreter Gewichtungsparameter λ gewählt werden. Hierbei gilt generell, dass sowohl Spitzenlasten als auch kumulierte Druckkräfte so gering wie möglich gehalten werden sollten, um die Erkrankungswahrscheinlichkeit der LWS gering zu halten. Wie in Kapitel 7.2.3 gezeigt wurde, können bereits durch die geringfügige Berücksichtigung der ergonomischen Kennwerte Spitzenbelastungen und die kumulierte Gesamtbelastung reduziert werden. Zumindest jedoch sollten die in Kap. 7.1.1 genannten Grenzwerte eingehalten werden – hierbei ist die Belastbarkeit der individuellen Mitarbeitenden zu beachten. Grundsätzlich ist jedoch auch eine Optimierung nur anhand der Wirbelsäulenbelastung ebenfalls nicht zu empfehlen, da dies zu hohen Kosten führen kann.

Im Anschluss kann die SKU-Lagerplatz-Zuordnung ausgegeben und entsprechend umgesetzt werden. Zu beachten ist, dass aus Prozessgründen gegebenenfalls Einzel-/Ausnahmefälle berücksichtigt werden müssen, die von der berechneten LPV abweichen. Nach erfolgter Anwendung einer eLPV ist dringend zu empfehlen, die Umsetzung zu evaluieren und die physischen Belastungen auf den entsprechenden Arbeitsplätzen erneut mit den arbeitswissenschaftlichen Bewertungsverfahren aus Schritt 1 zu beurteilen. Die eLPV alleine wird entsprechend des Ampelschemas (DIN EN 614-1, 2009) einen „rot beurteilten“ Arbeitsplatz selten in einen „grün beurteilten“ Arbeitsplatz umwandeln und garantiert daher keinesfalls, dass es sich um unkritische Arbeitstätigkeiten handelt. Zudem ist eine kontinuierliche Anpassung der LPV an Änderungen im SKU-Portfolio oder veränderte Marktnachfragen sinnvoll – dies kann automatisiert aus WMS-Daten oder in Zukunft unterstützt durch Machine Learning erfolgen.

8 Fazit und Ausblick

In dieser Arbeit wurde ein bi-kriterieller Algorithmus zwecks einer ergonomische Lagerplatzvergabe für Fachbodenregale entwickelt, der die beiden Zielgrößen Wirbelsäulenbelastung und Kommissionierzeit minimiert. Eine wesentliche Erkenntnis ist, dass zwischen diesen beiden Größen ein Zielkonflikt besteht. Entsprechend können Pareto-Optima je nach Gewichtung der beiden Ziele abgeleitet werden, wovon vier verschiedene in einem umfangreichen Laborversuch evaluiert wurden. Erstmals konnte so eine Lagerplatzvergabestrategie für die manuelle Kommissionierung empirisch anhand von Beanspruchungs- und Leistungsparametern untersucht werden.

In der Studie wurden in einer Lagerumgebung im Labor elektromyographische Aktivitäten von fünf Muskeln des Oberkörpers, die Herzschlagfrequenz sowie das subjektive Anstrengungsempfinden von insgesamt 48 Versuchspersonen erfasst. Zur Bestimmung der menschlichen Leistung wurde ferner die Kommissionierzeit gestoppt sowie die Anzahl und Art der unterlaufenen Fehler erfasst.

Anhand der Ergebnisse lassen sich die erwarteten Wirkungszusammenhänge größtenteils bestätigen. Eine höhere Gewichtung der Belastungskennwerte reduziert die untersuchten Beanspruchungsgrößen – insbesondere die muskuläre Beanspruchung im unteren Rücken kann signifikant verringert werden. Ebenso ist eine Optimierung der Kommissionierzeit und damit der entstehenden Personalkosten im Lager durch entsprechende Gewichtung der zeitlichen Kennwerte möglich. Ein Einfluss des Gewichtungsparameters der eLPV auf die Kommissionierqualität anhand der unterlaufenen Pickfehler konnte nicht festgestellt werden.

Eine bedeutende Feststellung ist, dass sich eine Optimierung nach nur einer der beiden Zielgrößen unter Vernachlässigung der jeweils anderen als nicht empfehlenswert erwiesen hat. Es ist entweder mit sehr hohen Belastungen bzw. Beanspruchungen zu rechnen (rein ökonomische Optimierung) oder die Kommissionierprozesse werden sehr kostenintensiv (rein belastungsorientiere Optimierung). In den Randbereichen der Pareto-Kurve kann bereits eine geringfügige Berücksichtigung einer Zielgröße zu maßgeblichen Verbesserung dieser führen, ohne die andere Zielgröße deutlich schlechter zu stellen. In der Praxis ist es schließlich ratsam immer sowohl die Wirbelsäulenbelastung als auch die Kommissionierzeit zu berücksichtigen – die spezifische Gewichtung der beiden Zielgrößen muss individuell anhand der Pareto-Kurve und der Unternehmensziele gewählt werden. Zwingend einzuhalten sind jedoch spezifische Grenzwerte zur Wirbelsäulenbelastung.

Damit leistet diese Dissertation einen wichtigen Beitrag zur Integration von arbeitswissenschaftlichen Kriterien in Planungsmodelle der Intralogistik. Ferner schafft sie auch Sensibilität dafür, dass eine ergonomische Lagergestaltung bereits mit der LPV beginnt. Die vorgestellte Lagerplatzvergabe stellt schließlich eine valide Methode zur Reduzierung von physischen Belastungen bzw. der Kommissionierzeit dar, ohne dass hierfür sehr hohe Investitionen, z. B. die Beschaffung neuer

Technologie, notwendig wäre. Gleichzeitig zeigt sich im Rahmen dieser Arbeit weiterer zukünftiger Forschungsbedarf:

Der entwickelte Algorithmus unterliegt einigen Anwendungsgrenzen. So wurden die hinterlegten Kennzahlen für eine Kommissionierung aus Fachbodenregalen ausgelegt. Eine Anpassung an eine Kommissionierung aus verschiedenen Palettenebenen ist jedoch ebenfalls denkbar (vgl. Calzavara et al., 2019a). Eine Erweiterung um zusätzliche Belastungsarten, insbesondere eine Verknüpfung von physischer und mentaler Belastung ist ebenfalls ein relevantes Forschungsthema. Ferner ist eine Integration von Routing- bzw. Batching-Ansätzen in die eLPV vielversprechend, um weitere Optimierungspotentiale in der manuellen Kommissionierung aufzudecken. Eine Umrechnung der Kommissionierzeiten mittels Kostensätzen für Personal und Lagerfläche in konkrete Kosten würden die Auswirkungen der eLPV zudem noch anschaulicher gestalten (vgl. Calzavara et al., 2017a). Besonders hilfreich wäre außerdem die Erweiterung des Algorithmus um eine nachgelagerte Kalkulierung eines Risikowertes anhand etablierter Screening-Verfahren (z. B. EAWS) für alle Pareto-Lösungen. Dies würde die Einstufung der Ergebnisse in Risikoklassen und die Evaluierung der Wirksamkeit angepasster LPV-Strategien erleichtern.

In der durchgeführten Studie konnte kein Zusammenhang zwischen der physischen Belastung und der Anzahl an Kommissionierfehlern gefunden werden. Ursächlich hierfür könnte jedoch das Untersuchungsdesign sein, welches verschiedene Fehlerarten konzeptionell ausschloss – mit einer angepassten Methodik sollten demnach in Zukunft auch die Wirkungszusammenhänge von Ergonomie und Kommissionierqualität anhand empirischer Daten erforscht werden.

Der Einfluss der verschiedenen Produktcharakteristika, technischen Hilfsmitteln oder abweichender Lagerlayouts auf das Optimierungspotential der eLPV konnte im Rahmen der vorliegenden Arbeit nur am Rande betrachtet werden. Es ist zu empfehlen, diese Forschungslücke mit entsprechenden Simulationstools oder weiteren Laborversuchen zu schließen. Hierbei wäre es auch möglich, neben den hier betrachteten Gewichtungsfaktoren weitere zu analysieren. Ebenso wären Daten aus dem Feld hilfreich, um die praktische Umsetzbarkeit der eLPV zu bewerten.

Mit Blick in die Zukunft wird außerdem ersichtlich, dass die Automatisierung auch in der Intralogistik weiter voranschreiten wird (Cimini et al, 2021). Zwar sind Pick-Roboter, die sich eigenständig durch das Lager bewegen und SKU von den entsprechenden Lagerplätzen entnehmen bisher eher die Ausnahme. Jedoch haben sich in bestimmten Bereichen beispielsweise Roboter-Systeme durchgesetzt, die nach dem WzP-Prinzip ganze Regale zu den Kommissionierenden bringen. Da somit die Laufwege entfallen, könnte es sein, dass sich belastungsorientierte und zeitliche Ziele ergänzen und nicht oder nur minimal im Zielkonflikt stehen. Bei einer fortschreitenden Robotisierung der Kommissionierung könnten sich zudem weitere arbeitswissenschaftliche Themenstellungen hinsichtlich der Mensch-Roboter-Kooperation ergeben.

Literaturverzeichnis

Alicke, K., Lippolt, C., Wisser, J. (2006). Prozessorientiertes Benchmarking von Distributionszentren in Wertschöpfungsnetzwerken. Intralogistik – Potentiale, Perspektiven, Prognosen. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 91-100.

Andriolo, A., Battini, D., Persona, A., Sgarbossa, F. (2016). A new bi-objective approach for including ergonomic principles into EOQ model. International Journal of Production Research, 54 (9), 2610-2627.

Arnold, D., Furmans, K. (2005). Materialfluss in Logistiksystemen. Springer-Verlag, Berlin.

AWMF (2013a). Körperliche Belastungen des Rückens durch Lastenhandhabung und Zwangshaltungen im Arbeitsprozess. Arbeitsmedizinische S1-Leitlinie der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin (DGAUM) und der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (GfA).

AWMF (2014). Leitlinie: Nutzung der Herzschlagfrequenz und der Herzfrequenzvariabilität in der Arbeitsmedizin und der Arbeitswissenschaft. Deutsche Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin (DGAUM) und Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (GfA).

Backhaus, K., Erichson, B., Plinke, W., Weiber, R. (2018). Multivariate Analysemethoden (15. Aufl.). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.

Badura, B., Ducki, A., Schröder, H., Klose, J., Meyer, M. (2016). Fehlzeiten Report 2016: Unternehmenskultur und Gesundheit - Herausforderungen und Chancen. Springer, Berlin/ Heidelberg.

Baechler, A., Baechler, L., Autenrieth, S., Kurtz, P., Hoerz, T., Heidenreich, T., Kruell, G. (2016). A comparative study of an assistance system for manual order picking - called pick-by-projection - with the guiding systems pick-by-paper, pick-by-light and pick-by-display. 49th Hawaii International Conference on System Sciences, IEEE, 523-531.

Bächler, A. (2017). Entwicklung und Evaluierung eines nutzerzentrierten Assistenzsystems zur Unterstützung von leistungsgeminderten Mitarbeitern bei manuellen Kommissioniertätigkeiten. Dissertation, Technische Universität München.

Battini, D., Persona, A., Sgarbossa, F. (2014). Innovative real-time system to integrate ergonomic evaluations into warehouse design and management. Computers & Industrial Engineering, 77, 1-10.

Battini, D., Glock, C. H., Grosse, E. H., Persona, A., Sgarbossa, F. (2016). Human energy expenditure in order picking storage assignment: A bi-objective method. Computers & Industrial Engineering, 94, 147-157.

Battini, D., Calzavara, M., Persona, A., Sgarbossa, F. (2018). A method to choose between carton from rack picking or carton from pallet picking. Computers & Industrial Engineering, 126, 88-98.

Baumann, H. (2013). Order Picking Supported by Mobile Computing. Bremen: University of Bremen.

Behnisch, P., Glock, C. H., Grosse, E. H., Ries, J. M. (2017). Auf dem Weg zum Warehouse 4.0? Zum aktuellen Stand der Automatisierung in der Lagerhaltung. Technische Universität Darmstadt, Fachbereich für Rechts- und Wirtschaftswissenschaften.

Berkovits, I., Hancock, G. R., Nevitt, J. (2000). Bootstrap resampling approaches for repeated measure designs: Relative robustness to sphericity and normality violations. Educational and Psychological Measurement, 60(6), 877-892.

Bernnat, R. (1997). Strategien der Lagerplatzvergabe: Rationalisierungspotentiale im Kommissionierlager. Springer-Verlag.

Bindi, F., Manzini, R., Pareschi, A., Regattieri, A. (2009). Similarity-based storage allocation rules in an order picking system: an application to the food service industry. International Journal of Logistics: Research and Applications, 12(4), 233-247.

Blanca Mena, M. J., Alarcón Postigo, R., Arnau Gras, J., Bono Cabré, R., Bendayan, R. (2017). Non-normal data: Is ANOVA still a valid option?. Psicothema, 2017, 29(4), 552-557.

Bokranz, R., Landau, K. (2012). Handbuch Industrial Engineering–Produktivitätsmanagement mit MTM Band 1: Konzept. Überarbeitete und erweiterte Auflage, Schäffer-Poeschel Verlag, Stuttgart.

Bongwald, O., Luttmann, A., Laurig, W. (1995). Leitfaden für die Beurteilung von Hebe- und Tragetätigkeiten. Sankt Augustin, Germany: Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften (HVBG).

Borg, G. (1970). Perceived exertion as an indicator of somatic stress. Scandinavian journal of rehabilitation medicine, 2(2), 92-98.

Borg, G. (1982). A category scale with ratio properties for intermodal and interindividual comparisons. Psychophysical judgment and the process of perception, 25-34. Berlin: VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften.

Borg, G. (2004). Anstrengungsempfinden und körperliche Aktivität. Deutsches Ärzteblatt, 101 (15), 1016-1021.

Borg, E., Kaijser, L. (2006). A comparison between three rating scales for perceived exertion and two different work tests. Scandinavian journal of medicine & science in sports, 16(1), 57-69.

Bortolini, M., Faccio, M., Gamberi, M., Pilati, F. (2017). Including material exposure and part attributes in the manual assembly line balancing problem. IFAC-PapersOnLine, 49(12), 926-931.

Bortz, J. Schuster, C. (2010). Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler. Springer-Lehrbuch, 7., vollst. überarb. und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Boysen, N., Emde, S., Hoeck, M., Kauderer, M. (2015). Part logistics in the automotive industry: Decision problems, literature review and research agenda. European Journal of Operational Research, 242(1), 107-120.

Boysen, N., Briskorn, D., Emde, S. (2017). Parts-to-picker based order processing in a rack-moving mobile robots environment. European Journal of Operational Research, 262(2), 550-562.

Bradford, F. K., Spurling, R. G. (1945). The intervertebral disc. Charles C. Thomas, Springfield, Illinois.

Breu, L. (2007). Kein isolierter Prozess. Materialfluss, 5, 10-13.

Bröder, A. (2011). Versuchsplanung und experimentelles Praktikum. Hogrefe Verlag.

Bühner, R. (2000). Mitarbeiter mit Kennzahlen führen – Der Quantensprung zu mehr Leistung; 4. Auflage, Verlag Moderne Industrie Landsberg.

Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA, 2019a). MEGAPHYS - Mehrstufige Gefährdungsanalyse physischer Belastungen am Arbeitsplatz. Abschlussbericht zum Kooperationsprojekt von BAuA und DGUV - Band 1.

Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA, 2019b). Gefährdungsfaktoren: Ein Ratgeber. Dortmund. Zugriff am 29.01.2021, verfügbar unter: www.baua.de/gefaehrdungsfaktoren

Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA, 2020). Volkswirtschaftliche Kosten durch Arbeitsunfähigkeit 2018, verfügbar unter: https://www.baua.de/DE/Themen/Arbeitswelt-und-Arbeitsschutz-im-Wandel/Arbeitsweltberichterstattung/Kosten-der-AU/pdf/Kosten-2018.pdf

Burden, A. (2010). How should we normalize electromyograms obtained from healthy participants? What we have learned from over 25 years of research. Journal of electromyography and kinesiology, 20(6), 1023-1035.

Burden, A. M., Lewis, S. E., Willcox, E. (2014). The effect of manipulating root mean square window length and overlap on reliability, inter-individual variability, statistical significance and clinical relevance of electromyograms. Manual therapy, 19(6), 595-601.

Callaghan, J. P., Gunning, J. L., McGill, S. M. (1998). The relationship between lumbar spine load and muscle activity during extensor exercises. Physical therapy, 78(1), 8-18.

Calzavara, M., Glock, C. H., Grosse, E. H., Persona, A., Sgarbossa, F. (2017a). Analysis of economic and ergonomic performance measures of different rack layouts in an order picking warehouse. Computers & Industrial Engineering, 111, 527-536.

Calzavara, M., Hanson, R., Sgarbossa, F., Medbo, L., Johansson, M. I. (2017b). Picking from pallet and picking from boxes: a time and ergonomic study. IFAC-PapersOnLine, 50(1), 6888-6893.

Calzavara, M., Persona, A., Sgarbossa, F., Visentin, V. (2018). A device to monitor fatigue level in order-picking. Industrial Management & Data Systems, 118(4), 714-727.

Calzavara, M., Glock, C. H., Grosse, E. H., Sgarbossa, F. (2019a). An integrated storage assignment method for manual order picking warehouses considering cost, workload and posture. International Journal of Production Research, 57(8), 2392-2408.

Calzavara, M., Persona, A., Sgarbossa, F., Visentin, V. (2019b). A model for rest allowance estimation to improve tasks assignment to operators. International Journal of Production Research, 57(3), 948-962.

Caputo, A. C., Pelagagge, P. M., Salini, P. (2017). Modelling human errors and quality issues in kitting processes for assembly lines feeding. Computers & Industrial Engineering, 111, 492-506.

Cardona, L. F., Rivera, L., Martínez, H. J. (2012). Analytical study of the fishbone warehouse layout. International Journal of Logistics Research and Applications, 15(6), 365-388.

Chen, J. A., Dickerson, C. R., Wells, R. P., Laing, A. C. (2017). Older females in the workforce – the effects of age on psychophysical estimates of maximum acceptable lifting loads. Ergonomics, 60(12), 1708-1717.

Christensen, A., Piper, A., Jensen, D. (2015). EMG and posture patterns in manual DC fulfillment. Proceedings of the 2015 Industrial and Systems Engineering Research Conference, 2664-2673.

Christmansson, M., Medbo, L., Hansson, G. Å., Ohlsson, K., Byström, J. U., Möller, T., Forsman, M. (2002). A case study of a principally new way of materials kitting - an evaluation of time consumption and physical workload. International Journal of Industrial Ergonomics, 30(1), 49-65.

Cifrek, M., Medved, V., Tonković, S., Ostojić, S. (2009). Surface EMG based muscle fatigue evaluation in biomechanics. Clinical biomechanics, 24(4), 327-340.

Cimini, C., Lagorio, A., Pirola, F., Pinto, R. (2021). How human factors affect operators' task evolution in Logistics 4.0. Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries, 31(1), 98-117.

Cohen, J. (1988). Statistical power analysis for the behavioral sciences (2nd ed.). Hillsdale, N.J.: L. Erlbaum Associates.

Colombini, D. (2002). Risk Assessment and Management of Repetitive Movements and Exertions of Upper Limbs: Job Analysis, Ocra Risk Indicies, Prevention Strategies and Design Principles. Elsevier.

Colombini, D., Occhipinti, E., Álvarez-Casado, E. (2013). The revised OCRA Checklist method. Editorial Factors Humans: Barcelona, Spain.

Colombini, D., Occhipinti, E., Fanti, M. (2005). Il metodo Ocra per l'analisi e la prevenzione del rischio da movimenti ripetuti. Manuale per la valutazione e la gestione del rischio (Vol. 15). Franco Angeli Editore.

Crostack, H. A., Deuse, J. (2007). Optimierung von Kommissionierung und Verpackung durch geeignete Strategien für die Qualitätssicherung unter Berücksichtigung der Retourenabwicklung. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben, Dortmund.

Dangelmaier, W., Mueck, B., Franke, W. (2005). Mixed Reality in Lagerprozessen. In: Gausemeier, J.; Grafe M.: Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. Paderborn: HNI-Verlagsschriftenreihe, 167, 133-143.

De Koster, R., Le-Duc, T., Roodbergen, K. J. (2007). Design and control of warehouse order picking: A literature review. European journal of operational research, 182(2), 481-501.

Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV, 2020). MEGAPHYS: Mehrstufige Gefährdungsanalyse physischer Belastungen am Arbeitsplatz. (DGUV Report 3/2020). Abschlussbericht zum Kooperationsprojekt von BAuA und DGUV - Band 2.

Diederichsen, L. P., Nørregaard, J., Dyhre-Poulsen, P., Winther, A., Tufekovic, G., Bandholm, T., Krogsgaard, M. (2007). The effect of handedness on electromyographic activity of human shoulder muscles during movement. Journal of Electromyography and Kinesiology, 17(4), 410-419.

Diefenbach, H., Glock, C. H. (2019). Ergonomic and economic optimization of layout and item assignment of a U-shaped order picking zone. Computers & Industrial Engineering, 138, 106094.

Döring, N., Bortz, J. (2016). Forschungsmethoden und Evaluation in den Sozial- und Humanwissenschaften, 5. Auflage. Wiesbaden, Springerverlag.

Du Prel, J.-B., Röhrig, B., Hommel, G., Blettner, M. (2010). Auswahl statistischer Testverfahren. Teil 12 der Serie zur Bewertung wissenschaftlicher Publikationen. Deutsches Ärzteblatt International, 107 (19), 343-348.

Dukić, G., Česnik, V., Opetuk, T. (2010). Order-picking methods and technologies for greener warehousing. Strojarstvo, 52(1), 23-31.

Dullinger, K. H. (2005). Das richtige Kommissionier-Konzept – eine klare Notwendigkeit. Jahrbuch Logistik, 194-198.

Eklund, J. A. (1995). Relationships between ergonomics and quality in assembly work. Applied Ergonomics, 26(1), 15-20.

El-Rich, M., Shirazi-Adl, A., Arjmand, N. (2004). Muscle activity, internal loads, and stability of the human spine in standing postures: combined model and in vivo studies. Spine, 29(23), 2633-2642.

Elbert, R., Franzke, T., Glock, C. H., Grosse, E. H. (2015). Agent-based analysis of picker blocking in manual order picking systems: Effects of routing combinations on throughput time. 2015 Winter Simulation Conference. 3937-3948. IEEE.

Elbert, R., Müller, J. P. (2017a). The impact of item weight on travel times in picker-to-parts order picking: an agent-based simulation approach. 2017 Winter Simulation Conference, 3162-3173. IEEE.

Elbert, R., Müller, J. P. (2017b). Manoeuvres in manual person-to-parts order picking systems: Is there a significant influence on travel time and metabolic rates?. IFAC-PapersOnLine, 50(1), 6894-6899.

Ellegast, R. (2005). Verfahren zur Bewertung von manuellen Lastenhandhabungen. Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften (HVBG); Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitsschutz–BGIA (Hrsg.): BGIA-Report, 4, 21-29.

Ellegast, R. P. (2010). Quantifizierung physischer Belastungen am Arbeitsplatz. Zentralblatt für Arbeitsmedizin, Arbeitsschutz und Ergonomie, 60(11), 386-389.

Emde, S., Boysen, N. (2017). Kommissionierung mithilfe mobiler Lagerroboter. In: Glock, C. H.; Grosse, E. H. (Hrsg.): Warehousing 4.0: Technische Lösungen und Managementkonzepte für die Lagerlogistik der Zukunft. B + G Wissenschaftsverlag, 103-114.

Ene, S., Küçükoğlu, İ., Aksoy, A., Öztürk, N. (2016). A genetic algorithm for minimizing energy consumption in warehouses. Energy, 114, 973-980.

Faul, F., Erdfelder, E., Lang, A. G., Buchner, A. (2007). G* Power 3: A flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences. Behavior research methods, 39(2), 175-191.

Feldmann, F., Seitz, R., Kretschmer, V., Bednorz, N., Ten Hompel, M. (2019). Ergonomic evaluation of body postures in order picking systems using Motion Capturing. In 2019 Prognostics and System Health Management Conference (PHM-Paris), 204-209. IEEE.

Field, A. (2009). Discovering statistics using SPSS. (and sex and drugs and rock ‚n' roll) (3. ed.). Los Angeles Calif. u.a.: SAGE.

Fikenzer, S., Uhe, T., Lavall, D., Rudolph, U., Falz, R., Busse, M., Laufs, U. (2020). Effects of surgical and FFP2/N95 face masks on cardiopulmonary exercise capacity. Clinical Research in Cardiology, 109(12), 1522-1530.

Finnsgård, C., Wänström, C. (2013). Factors impacting manual picking on assembly lines: an experiment in the automotive industry. International Journal of Production Research, 51(6), 1789-1798.

Fontana, M. E., Nepomuceno, V. S. (2017). Multi-criteria approach for products classification and their storage location assignment. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 88(9-12), 3205-3216.

Franzke, T. (2018). Der Mensch als Faktor in der manuellen Kommissionierung: eine simulationsbasierte Analyse der Effizienz in Person-zur-Ware-Kommissioniersystemen. Springer-Verlag.

Frazelle, E. (2002). World-class warehousing and material handling (Vol. 1). New York: McGraw-Hill.

Fritzsche, L., Wegge, J., Schmauder, M., Kliegel, M., Schmidt, K. H. (2014). Good ergonomics and team diversity reduce absenteeism and errors in car manufacturing. Ergonomics, 57(2), 148-161.

Gajšek, B., Cajner, H., Dukić, G., Opetuk, T., Lukac, B., Puskadija, N. (2018). Ergonomics for productivity in order-picking processes for aging workforce. 7th International Ergonomics Conference, Zadar, Crotia.

Gajšek, B., Dukić, G., Butlewski, M., Opetuk, T., Cajner, H., Kač, S. M. (2020). The impact of the applied technology on health and productivity in manual “picker-to-part” systems. Work, 1-12.

Gajšek, B., Šinko, S., Kramberger, T., Butlewski, M., Özceylan, E., Đukić, G. (2021). Towards Productive and Ergonomic Order Picking: Multi-Objective Modeling Approach. Applied Sciences, 11(9), 4179.

Galka, S., Günthner, W. A. (2016). Einfluss von Artikeleigenschaften auf die Entnahmezeit in Kommissioniersystemen. Logistics Journal: Proceedings, 2016(10).

Garg, A., Chaffin, D. B., Herrin, G. D. (1978). Prediction of metabolic rates for manual materials handling jobs. American Industrial Hygiene Association Journal, 39(8), 661-674.

Georgi, C., Haase-Fielitz, A., Meretz, D., Gäsert, L., Butter, C. (2020). The impact of commonly-worn face masks on physiological parameters and on discomfort during standard work-related physical effort. Deutsches Ärzteblatt International, 117(40), 674.

Gerpott, T. J., Kurt, A. (2020). Verbessert ein Pick-by-Watch-System Kommissionierungsleistungen gegenüber herkömmlichen Papierlisten?. Zeitschrift für Arbeitswissenschaft, 1-15.

Gilgen-Ammann, R., Schweizer, T., Wyss, T. (2019). RR interval signal quality of a heart rate monitor and an ECG Holter at rest and during exercise. European journal of applied physiology, 119(7), 1525-1532.

Girden, E. R. (1992). ANOVA: Repeated measures - Quantitative Applications in the Social Sciences. Bd. 84, 1. Aufl., Thousand Oaks: SAGE Publications Inc.

Glock, C. H., Grosse, E. H. (2012). Storage policies and order picking strategies in U-shaped order-picking systems with a movable base. International Journal of Production Research, 50(16), 4344-4357.

Glock, C. H., Grosse, E. H., Neumann, W. P., Feldman, A. (2021). Assistive devices for manual materials handling in warehouses: a systematic literature review. International Journal of Production Research, 59(11), 3446-3469.

Goetschalckx, M., Ashayeri, J. (1989). Classification and design of order picking. Logistics World, 99-106.

Goldscheid, C. (2008). Ermittlung der Wirbelsäulenbelastung in manuellen Kommissioniersystemen. Dissertation. Shaker-Verlag, Aachen.

Granotto, G. F., Sgarbossa, F., Glock, C. H., Grosse, E. H. (2019). The effect of worker fatigue on the performance of a bucket brigade order picking system. IFAC-PapersOnLine, 52(13), 2195-2200.

Grosse, E. H., Glock, C. H. (2013). An experimental investigation of learning effects in order picking systems. Journal of Manufacturing Technology Management.

Grosse, E. H., Glock, C. H., Ballester-Ripoll, R. (2014). A simulated annealing approach for the joint order batching and order picker routing problem with weight restrictions. International Journal of Operations and Quantitative Management, 20(2), 65-83.

Grosse, E. H., Glock, C. H. (2015). The effect of worker learning on manual order picking processes. International Journal of Production Economics, 170, 882-890.

Grosse, E. H., Glock, C. H., Jaber, M. Y., Neumann, W. P. (2015a). Incorporating human factors in order picking planning models: Framework and research opportunities. International Journal of Production Research, 53 (3), 695-717.

Grosse, E. H., Glock, C. H., Neumann, W. P. (2015b). Human factors in order picking system design: a content analysis. IFAC-PapersOnLine, 48(3), 320-325.

Grosse, E. H., Dixon, S. M., Neumann, W. P., Glock, C. H. (2016). Using qualitative interviewing to examine human factors in warehouse order picking. International Journal of Logistics Systems and Management, 23(4), 499-518.

Grosse, E. H., Glock, C. H., Neumann, W. P. (2017). Human factors in order picking: a content analysis of the literature. International Journal of Production Research, 55(2017) 5, 1260–1276.

Gu, J., Goetschalckx, M., McGinnis, L. F. (2010). Research on warehouse design and performance evaluation: A comprehensive review. European journal of operational research, 203(3), 539-549.

Gudehus, T. (1973). Grundlagen der Kommissioniertechnik: Dynamik der Warenverteil-und Lagersysteme. Girardet W. Verlag, Essen.

Gudehus, T. (2012). Logistik 2: Netzwerke, Systeme und Lieferketten. Springer-Verlag.

Gudehus, T. (2013). Logistik I: Grundlagen, Verfahren und Strategien. Springer-Verlag.

Gue, K. R., Meller, R. D., Skufca, J. D. (2006). The effects of pick density on order picking areas with narrow aisles. IIE transactions, 38(10), 859-868.

Günthner, W. A., Heptner, K. (2007). Technische Innovationen für die Logistik. Huss-Verlag.

Günthner, W. A., Blomeyer, N., Reif, R., Schedlbauer, M. (2009). Pick-by-Vision: Augmented Reality unterstützte Kommissionierung. Forschungsbericht. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München.

Günthner, W. A., Koch, M. (2014). Erstellung einer ergonomischen Lagerstrategie und -organisation durch ein Arbeitslast analysierendes Warehouse-Management-System. Forschungsbericht Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München.

Guo, A., Raghu, S., Xie, X., Ismail, S., Luo, X., Simoneau, J., Starner, T. (2014). A comparison of order picking assisted by head-up display (HUD), cart-mounted display (CMD), light, and paper pick list. Proceedings of the 2014 ACM International Symposium on Wearable Computers, 71-78.

Guo, X., Yu, Y., De Koster, R. B. (2016). Impact of required storage space on storage policy performance in a unit-load warehouse. International Journal of Production Research, 54(8), 2405-2418.

Hanson, R., Medbo, L., Jukic, P., Assaf, M. (2016). Manual picking from large containers-time efficiency and physical workload. IFAC-PapersOnLine, 49(12), 1703-1708.

Hanson, R., Medbo, L., Assaf, M., Jukic, P. (2018a). Time efficiency and physical workload in manual picking from large containers. International Journal of Production Research, 56(3), 1109-1117.

Hanson, R., Medbo, L., Berlin, C., Hansson, J. (2018b). Manual picking from flat and tilted pallet containers. International Journal of Industrial Ergonomics, 64, 199-212.

Hansson, G. Å., Balogh, I., Ohlsson, K., Rylander, L., Skerfving, S. (1996). Goniometer measurement and computer analysis of wrist angles and movements applied to occupational repetitive work. Journal of Electromyography and Kinesiology, 6(1), 23-35.

Harari, Y., Bechar, A., Riemer, R. (2020). Workers' biomechanical loads and kinematics during multiple-task manual material handling. Applied ergonomics, 83, 102985.

Hartmann, B., Bradl, I., Ellegast, R. (2008). Bewertung körperlicher Belastungen des Rückens durch Lastenhandhabung und Zwangshaltungen im Arbeitsprozess. Leitlinie der DGAUM. Arbeitsmedizin, Sozialmedizin, Umweltmedizin, 43, 455-462.

Hartung, E., Schäfer, K., Jäger, M., Luttmann, A., Bolm-Audorff, U., Kuhn, S., Francks, H. P. (1999). Mainz-Dortmunder Dosismodell (MDD) zur Beurteilung der Belastung der Lendenwirbelsäule durch Heben oder Tragen schwerer Lasten oder durch Tätigkeiten in extremer Rumpfbeugehaltung bei Verdacht auf Berufskrankheit Nr. 2108. Teil 2: Vorschlag zur Beurteilung der arbeitstechnischen Voraussetzungen im Berufskrankheiten-Feststellungsverfahren. Arbeitsmedizin, Sozialmedizin, Umweltmedizin, 34, 112-122.

Hecktor, K., Schaub, K., Jäger, M. (2014). Biomechanische Gefährdungsbeurteilung bei Montagearbeitsplätzen. Zeitschrift für Arbeitswissenschaft, 68(1), 7-17.

Henn, S., Koch, S., Doerner, K. F., Strauss, C., Wäscher, G. (2010). Metaheuristics for the order batching problem in manual order picking systems. Business Research, 3(1), 82-105.

Heinz, K. (1997). Prozesskostenrechnung für die Logistik kleiner und mittlerer Unternehmen-Methodik und Fallbeispiele. Verlag Praxiswissen.

Hignett, S., McAtamney, L. (2000). Rapid entire body assessment (REBA). Applied ergonomics, 31(2), 201-205.

Holz, A., Herold, R., Friemert, D., Hartmann, U., Harth, V., Terschüren, C. (2020). Datenbrillen am Arbeitsplatz. Zentralblatt für Arbeitsmedizin, Arbeitsschutz und Ergonomie, 1-5.

Huysamen, K., de Looze, M., Bosch, T., Ortiz, J., Toxiri, S., O'Sullivan, L. W. (2018). Assessment of an active industrial exoskeleton to aid dynamic lifting and lowering manual handling tasks. Applied ergonomics, 68, 125-131.

Ilmarinen, J., Tempel, J. (2002). Arbeitsfähigkeit 2010: Was können wir tun, damit Sie gesund bleiben?. VSA-Verlag.

International Ergonomics Association (IEA, 2020). Human Factors/Ergonomics (HF/E) - Definition, International Ergonomics Association. Zugriff am 25.02.2021, verfügbar unter: https://iea.cc/what-is-ergonomics/

Isa, H., Kamat, S. R., Rohana, A., Saptari, A., Shahrizan, M. (2014). Analysis of muscle activity using surface electromyography for muscle performance in manual lifting task. Applied Mechanics and Materials, 564, 644-649.

Jäger, M., Luttmarm, A., Laurig, W. (1985). Elektromyographische Untersuchungen ausgewählter Tätigkeiten im Baugewerbe. Untersuchungen zum Gesundheitsrisiko beim Heben und Umsetzen schwerer Lasten im Baugewerbe. Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven, 19-42.

Jäger, M. (1987). Biomechanisches Modell des Menschen zur Analyse und Beurteilung der Belastung der Wirbelsäule bei der Handhabung von Lasten. VDI-Verlag.

Jäger, M., Luttmann, A., Bolm-Audorff, U., Schäfer, K., Hartung, E., Kuhn, S., Francks, H. P. (1999). Mainz-Dortmunder Dosismodell (MDD) zur Beurteilung der Belastung der Lendenwirbelsäule durch Heben oder Tragen schwerer Lasten oder durch Tätigkeiten in extremer Rumpfbeugehaltung bei Verdacht auf Berufskrankheit Nr. 2108. Teil 1: Retrospektive Belastungsermittlung für risikobehaftete Tätigkeitsfelder. Arbeitsmedizin, Sozialmedizin, Umweltmedizin, 34, 101-111.

Jäger, M., Jordan, C., Luttmann, A., Laurig, W. (2000). Evaluation and assessment of lumbar load during total shifts for occupational manual materials handling jobs within the Dortmund Lumbar Load Study. International journal of industrial ergonomics, 25(6), 553-571.

Jäger, M., Luttmann, A., Göllner, R. (2001a). Belastbarkeit der Lendenwirbelsäule beim Handhaben von Lasten – Ableitung der „Dortmunder Richtwerte “auf Basis der lumbalen Kompressionsfestigkeit. Zentralblatt für Arbeitsmedizin, 51, 354-372.

Jäger, M., Jordan, C., Theilmeier, A., Luttmann, A. (2001b). Dortmunder Lumbalbelastungsstudie 2: Ermittlung und Beurteilung vergleichbarer Tätigkeiten hinsichtlich der Körperhaltung und der Wirbelsäulenbelastung bei verschiedenen beruflichen Tätigkeiten. Forschungsbericht: Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften (HVBG).

Jäger, M., Gollner, R., Jordan, C., Theilmeier, A., Luttmann, A. (2002). Belastung der Lendenwirbelsäule beim Heben und Umsetzen von Lasten. Zeitschrift für Arbeitswissenschaft, 56, 93-105.

Jäger, M. (2019). Die „Revidierten Dortmunder Richtwerte“. Zentralblatt für Arbeitsmedizin, Arbeitsschutz und Ergonomie, 69(5), 271-289.

Jensen, C., Finsen, L., Hansen, K., Christensen, H. (1999). Upper trapezius muscle activity patterns during repetitive manual material handling and work with a computer mouse. Journal of electromyography and kinesiology, 9(5), 317-325.

Jensen, R., Fuglsang-Frederiksen, A., Olesen, J. (1994). Quantitative surface EMG of pericranial muscles in headache. A population study. Electroencephalography and Clinical Neurophysiology/Evoked Potentials Section, 93(5), 335-344.

Jodin, D., ten Hompel, M. (2012). Sortier-und Verteilsysteme – Grundlangen, Aufbau, Berechnung und Realisierung. Springer-Verlag.

Jünemann, R., Schmidt, T. (2000). Materialflusssysteme – Systemtechnische Grundlagen. Springer-Verlag.

Jung, M. C., Haight, J. M., Freivalds, A. (2005). Pushing and pulling carts and two-wheeled hand trucks. International Journal of Industrial Ergonomics, 35(1), 79-89.

Kadefors, R., Forsman, M. (2000). Ergonomic evaluation of complex work: a participative approach employing video–computer interaction, exemplified in a study of order picking. International Journal of Industrial Ergonomics, 25(4), 435-445.

Kallina, C., Lynn, J. (1976). Application of the cube-per-order index rule for stock location in a distribution warehouse. Interfaces, 7(1), 37-46.

Karhu, O., Kansi, P., Kuorinka, I. (1977). Correcting working postures in industry: a practical method for analysis. Applied ergonomics, 8(4), 199-201.

Kelterborn, M., Burghart, C., Kraul, R., Intra, C., Günthner, W. A. (2014). Zeitliche und ergonomische Bewertung in der Kommissionierung. Industrie Management, 30(5), 41-44.

Kilbom, Å. (1994). Repetitive work of the upper extremity: Part I—Guidelines for the practitioner. International Journal of Industrial Ergonomics, 14(1-2), 51-57.

Kinne, S., Kretschmer, V., Bednorz, N. (2019). Palletising support in intralogistics: the effect of a passive exoskeleton on workload and task difficulty considering handling and comfort. International Conference on Human Systems Engineering and Design: Future Trends and Applications, Springer, Cham., 273-279.

Kirchner, J. H. (1986). Belastungen und Beanspruchungen – Einige begriffliche Klärungen zum Belastungs-Beanspruchungs-Konzept. Arbeitsorganisation und Neue Technologien, 553-569. Springer, Berlin, Heidelberg.

Kluth, K., Baldus, S., Strasser, H. (2012). Order-picking in deep cold–physiological responses of younger and older females. Part 1: heart rate. Work, 41, 3002-3009.

Kluth, K., Steinhilber, B., Nesseler, T. (2013). Oberflächen-Elektromyographie in der Arbeitsmedizin, Arbeitsphysiologie und Arbeitswissenschaft. Zeitschrift für Arbeitswissenschaft, 67(2), 113-128.

Koch, S. (2014). Grundlagen der Kommissionierung. In Genetische Algorithmen für das Order Batching-Problem in manuellen Kommissioniersystemen, 5-29. Springer Gabler, Wiesbaden.

Koch, M. (2017). Methodik zur Einführung von Jobrotation in der Logistik. Dissertation. Technische Universität München.

Konrad, P. (2011). EMG-FIBEL. Eine praxisorientierte Einführung in die kinesiologische Elektromyographie. Noraxon INC. USA. Zugriff am 18.11.2021, verfügbar unter: http://www.velamed.com/wp-content/uploads/EMG-FIBEL-V1.1.pdf

Kretschmer, V., Eichler, A., Rinkenauer, G., Spee, D. (2017). Focus on the human being: Cognitive Ergonomics in intralogistics. Logistics Journal: Proceedings, 2017(10).

Kretschmer, V., Reiser, J., Rinkenauer, G. (2021). Stellenwert der Kognitiven Ergonomie in cyber-physischen Logistiksystemen: Ergebnisse einer Feldstudie bei einem Versandhandelsunternehmen. In: GfA Frühjahreskongress 2021, GfA Press.

Kugler, M., Bierwirth, M., Schaub, K., Feith, A., Ghezel-Ahmadi, K., Bruder, R. (2010). KoBRA-Kooperationsprogramm zu normativem Management von Belastungen und Risiken bei körperlicher Arbeit. Ergonomie in der Industrie – aber wie. Handlungshilfe für den schrittweisen Aufbau eines einfachen Ergonomiemanagements. Meindl Druck, München.

Kuhlang, P., Rast, S., Liebig, S., Lüben, A., Finsterbusch, T., Mühlbradt, T. (2015). Methoden und Perspektiven zur ergonomischen Bewertung und Gestaltung langzyklischer Tätigkeiten in der Fahrzeuginstandhaltung. Praxiswissen Instandhaltung, Intelligente, lernorientierte Instandhaltung–Smart Maintenance, 181-193.

Kusiak, A., Heragu, S. S. (1987). The facility layout problem. European Journal of operational research, 29(3), 229-251.

Laborde, S., Mosley, E., Thayer, J. F. (2017). Heart rate variability and cardiac vagal tone in psychophysiological research–recommendations for experiment planning, data analysis, and data reporting. Frontiers in psychology, 8(213).

Labus, N., Gajšek, B. (2018). Use of ergonomic principles in manual order picking systems. Logistics & sustainable transport, 9(1), 11-22.

Landau, K. (2002). Ergonomie und Wirtschaftlichkeit – „rechnet“ sich die Arbeitsgestaltung? Angewandte Arbeitswissenschaft (172), 49-67.

Larco, J. A. (2010). Incorporating worker-specific factors in operations management models (Doctoral dissertation). Rotterdam School of Management.

Larco, J. A., De Koster, R., Roodbergen, K. J., Dul, J. (2017). Managing warehouse efficiency and worker discomfort through enhanced storage assignment decisions. International Journal of Production Research, 55(21), 6407-6422.

Laurig, W. (1992). Grundzüge der Ergonomie: Erkenntnisse und Prinzipien. Beuth Verlag, Berlin.

Lavender, S. A., Sommerich, C. M., Johnson, M. R., Radin, Z. (2010). Developing ergonomic interventions to reduce musculoskeletal disorders in grocery distribution centers. In Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, 54(15), 1229-1233. SAGE Publications, Los Angeles.

Lavender, S. A., Ko, P. L., Sommerich, C. M. (2013). Biomechanical evaluation of the Eco-Pick lift assist: a device designed to facilitate product selection tasks in distribution centers. Applied ergonomics, 44(2), 230-236.

Lee, E. Y., Kim, M. K., Chang, Y. S. (2016). Development of an Advanced Picking Station Considering Human Factors. Human factors and ergonomics in manufacturing & service industries, 26(6), 700-712.

Lee, K. S., Hwang, J. (2020a). Determination of maximum acceptable and comfortable height during one-handed lifting. Work, 65(3), 497-507.

Lee, J. A., Chang, Y. S., Karwowski, W. (2020b). Assessment of working postures and physical loading in advanced order picking tasks: A case study of human interaction with automated warehouse goods-to-picker systems. Work, 67(4), 855-866.

Lee, T. H. (2021). The effects of handle height, load's CoG height and load on lifting tasks. Applied Ergonomics, 91, 103294.

Lin, M. C. (1999). The effects of work load and operation position on the spine during manual activity. Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries, 9(4), 381-392.

Lolling, A. (2002a). Laborversuche zur Analyse von menschlichen Fehlern in der Kommissionierung. Zeitschrift für Arbeitswissenschaft, 56, 80-92.

Lolling, A. (2002b). Fehlerraten verschiedener Kommissioniersysteme in der Praxis. Zeitschrift für Arbeitswissenschaft, 56, 112-115.

Lolling, A. (2003). Analyse der menschlichen Zuverlässigkeit bei Kommissioniertätigkeiten. Dissertation. Shaker-Verlag, Aachen.

Luczak, H. (1998). Arbeitswissenschaft. Springer-Verlag, München.

Lu, M. L., Waters, T. R., Krieg, E., Werren, D. (2014). Efficacy of the revised NIOSH lifting equation to predict risk of low-back pain associated with manual lifting: a one-year prospective study. Human Factors, 56(1), 73-85.

Mackowiak, J., Goldscheid, C. (2005). Ganzheitliche Bewertung und Optimierung manueller Arbeitsplätze in Kommissoniersystemen. AiF-Schlussbericht.

Marklin, R. W., Wilzbacher, J. R. (1999). Four assessment tools of ergonomics interventions: case study at an electric utility's warehouse system. American Industrial Hygiene Association Journal, 60(6), 777-784.

Marler, R. T., Arora, J. S. (2004). Survey of multi-objective optimization methods for engineering. Structural and multidisciplinary optimization, 26(6), 369-395.

Marras, W. S., Granata, K. P., Davis, K. G., Allread, W. G., Jorgensen, M. J. (1999). Effects of box features on spine loading during warehouse order selecting. Ergonomics, 42(7), 980-996.

Marras, W. S., Lavender, S. A., Ferguson, S. A., Splittstoesser, R. E., Yang, G. (2010). Quantitative biomechanical workplace exposure measures: distribution centers. Journal of Electromyography and Kinesiology, 20(5), 813-822.

Masae, M., Glock, C. H., Vichitkunakorn, P. (2020). Optimal order picker routing in the chevron warehouse. IISE Transactions, 52(6), 665-687.

Masae, M., Glock, C. H., Grosse, E. H. (2020b). Order picker routing in warehouses: A systematic literature review. International Journal of Production Economics, 224, 107564.

Martin, H. (2009). Transport-und Lagerlogistik – Planung, Struktur, Steuerung und Kosten von Systemen der Intralogistik. Vieweg + Teubner Verlag.

Martin, H. (2016). Transport-und Lagerlogistik: Systematik, Planung, Einsatz und Wirtschaftlichkeit. Springer-Verlag.

Marvel, J. H., Shell, R. L., Weckman, G. R. (2001). An application of heuristic algorithms for determining inventory location in a distribution warehouse. International Journal of Industrial Engineering, 8, 5-15.

Mathar, H. J., Scheuring, J. (2009). Unternehmenslogistik – Grundlagen für die betriebliche Praxis mit zahlreichen Beispielen, Repetitionsfragen und Antworten, Zürich, Campendio Bildungsmedien.

Mauchly, J. W. (1940). Significance test for sphericity of a normal n-variate distribution. The Annals of Mathematical Statistics, 11(2), 204-209.

McAtamney, L., Corlett, E. N. (1993). RULA: a survey method for the investigation of work-related upper limb disorders. Applied ergonomics, 24(2), 91-99.

Meneghetti, A., Monti, L. (2013). Sustainable storage assignment and dwell-point policies for automated storage and retrieval systems. Production Planning & Control, 24(6), 511-520.

Menk, J. (1999). Beitrag zur Planung qulitätsfähiger Kommissioniersysteme: ein humanorientierter Ansatz. Verlag Praxiswissen.

Merletti, R., Parker, P. J. (2004). Electromyography: physiology, engineering, and non-invasive applications (Vol. 11). John Wiley & Sons.

Michel, R. (2017). 2017 Warehouse/DC Operations Survey. In the thick of e-commerce adjustments. Logistics Management, 56 (11), 52-58.

Mital, A., Nicholson, A. S., Ayoub, M. M, (1993). Guide to manual materials handling. CRC Press.

Motmans, R., Debaets, T., Chrispeels, S. (2018). Effect of a passive exoskeleton on muscle activity and posture during order picking. Congress of the International Ergonomics Association, Springer, Cham., 338-346.

Napolitano, M. (2012). 2012 warehouse/DC operations survey: Mixed signals. Modern Materials Handling, 51 (11), 48-56.

Nave, M. (2009): Einführung und Grundlagen. In: Pulverich, M., Schietinger, J. (Hrsg.): Handbuch Kommissionierung. München 2009, S. 15–30.

Neubert, N. (2013). Return-on-Investment in der Arbeitswissenschaft: Qualitäts- und Produktivitätsverbesserungen durch ergonomische Arbeitsplatzgestaltung. Dissertation, Technische Universität Darmstadt.

Neuhäuser, D., Wehking, K. H. (2011). Der Lagerorganisationsgrad als Steuerungsgröße für optimale Reorganisationszyklen in Kommissioniersystemen. Logistics Journal: Proceedings, 7(1).

Neumann, W. P., Dul, J. (2010). Human factors: spanning the gap between OM and HRM. International journal of operations & production management, 30(9), 923-950.

Nganou-Gnindjio, C., Yefou, M. D., Tankeu, R., Nanseu, A., Sobngwi, E. (2020). Use of the Polar H10 cardiofrequencemeter and Ewing's autonomic function tests in the screening of cardiac autonomic neuropathy in type 1 diabetes mellitus in Yaoundé. Archives of Cardiovascular Diseases Supplements, 12(1), 193.

Nookea, W., Vanichchinchai, A. (2020). An Ergonomics-Based Storage Bin Allocation for Picking Efficiency Improvement. In 2020 IEEE 7th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA), 307-310.

Occhipinti, E. (1998). OCRA: a concise index for the assessment of exposure to repetitive movements of the upper limbs. Ergonomics, 41(9), 1290-1311.

Oliveira, A. B., Silva, L. C., & Coury, H. J. (2011). How do low/high height and weight variation affect upper limb movements during manual material handling of industrial boxes?. Brazilian Journal of Physical Therapy, 15, 494-502.

Otto, A., Boysen, N., Scholl, A., Walter, R. (2017). Ergonomic workplace design in the fast pick area. OR Spectrum, 39(4), 945-975.

Pan, J. C. H., Shih, P. H., Wu, M. H. (2012). Storage assignment problem with travel distance and blocking considerations for a picker-to-part order picking system. Computers & Industrial Engineering, 62(2), 527-535.

Pangert, R., Hartmann, H. (1998). Belastungsgrenzen repetitiver Lastaufnahmen nach epidemiologischen Erkenntnissen. Lumbale Bandscheibenkrankheit: Operationsindikator? Berufskrankheiten 2108-2110. Neuroorthopädie, 7, 175-180.

Petersen, C. G., Aase, G. (2004). A comparison of picking, storage, and routing policies in manual order picking. International Journal of Production Economics, 92(1), 11-19.

Petersen, C. G., Siu, C., Heiser, D. R. (2005). Improving order picking performance utilizing slotting and golden zone storage. International Journal of Operations & Production Management, 25(10), 997-1012.

Peters, S., Brühl, R., Stelling, J. N. (2010). Betriebswirtschaftslehre: Einführung. Oldenbourg Verlag.

Pincivero, D. M., Green, R. C., Mark, J. D., Campy, R. M. (2000). Gender and muscle differences in EMG amplitude and median frequency, and variability during maximal voluntary contractions of the quadriceps femoris. Journal of Electromyography and Kinesiology, 10(3), 189-196.

Pohl, L. M., Meller, R. D., Gue, K. R. (2009a). Optimizing fishbone aisles for dual-command operations in a warehouse. Naval Research Logistics, 56(5), 389-403.

Pohl, L. M., Meller, R. D., Gue, K. R. (2009b). An analysis of dual-command operations in common warehouse designs. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 45(3), 367-379.

Pohl, L. M., Meller, R. D., Gue, K. R. (2011). Turnover-based storage in non-traditional unit-load warehouse designs. IIE Transactions, 43(10), 703-720.

Poon, T. C., Choy, K. L., Chow, H. K., Lau, H. C., Chan, F. T., Ho, K. C. (2009). A RFID case-based logistics resource management system for managing order-picking operations in warehouses. Expert Systems with Applications, 36(4), 8277-8301.

Potyka, S. (1995). Systematik zur Selektion von Kommissioniersystemen in der Planung. Verlag Praxiswissen.

Pulverich, M. (2009). Handbuch Kommissionierung: Effizient picken und packen. Verlag Heinrich Vogel, München.

Qin, K., Chen, F. Y., Ma, L. (2015). Cutting down the travel distance of put systems at Kunming International Flower Auction Market. International Journal of Production Research, 53(12), 3573-3585.

Raez, M. B. I., Hussain, M. S., Mohd-Yasin, F. (2006). Techniques of EMG Analysis: detection, processing, classification and application. Biological Procedures Online, 8, 11-35.

Rakesh, V., Adil, G. K. (2015). Layout optimization of a three dimensional order picking warehouse. IFAC-PapersOnLine, 48(3), 1155-1160.

Ramaa, A., Subramanya, K. N., Rangaswamy, T. M. (2012). Impact of warehouse management system in a supply chain. International Journal of Computer Applications, 54(1), 14-20.

Rammelmeier, T., Galka, S., Günthner, W. A. (2012). Fehlervermeidung in der Kommissionierung. 8. Fachkolloquium der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik e. V., 1-6.

Rammelmeier, T. (2017). Vermeidung und prozessintegrierte Erkennung von Kommissionierfehlern auf Basis der Pick-by-Vision-Technologie. Dissertation, Technische Universität München.

Reif, R. (2009). Entwicklung und Evaluierung eines Augmented Reality unterstützten Kommissioniersystems. Dissertation, Technische Universität München.

Reyes, J., Solano-Charris, E., Montoya-Torres, J. (2019). The storage location assignment problem: A literature review. International Journal of Industrial Engineering Computations, 10(2), 199-224.

Rinkenauer, G., Kretschmer, V., Kreutzfeldt, M. (2017). Kognitive Ergonomie in der Intralogistik. Whitepaper, Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML, Dortmund, 1-13.

Ritchie, C. (2012). Rating of perceived exertion (RPE). Journal of physiotherapy, 58(1), 62.

Rönick, K. (2020). Analyse des Einflusses unterschiedlicher Individualisierungsgrade eines Montagearbeitsplatzes. Dissertation. Technische Universität Darmstadt.

Rohmert, W. (1960). Zur Theorie der Erholungspausen bei dynamischer Arbeit. Internationale Zeitschrift für angewandte Physiologie einschließlich Arbeitsphysiologie, 18(3), 191-212.

Rohmert, W. (1984). Das Belastungs-Beanspruchungs-Konzept. Zeitschrift für Arbeitswissenschaft, 38(4), 193-200.

Rohmert, W. (1988). Ergonomie, was ist das?. Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektrotechnik.

Roodbergen, K. J., Sharp, G. P., Vis, I. F. (2008). Designing the layout structure of manual order picking areas in warehouses. IIE Transactions, 40(11), 1032-1045.

Sadowsky, V. (2007). Beitrag zur analytischen Leistungsermittlung von Kommissioniersystemen. Dortmund: Verlag Praxiswissen.

Scarano, A., Inchingolo, F., Rapone, B., Festa, F., Tari, S. R., Lorusso, F. (2021). Protective face masks: Effect on the oxygenation and heart rate status of oral surgeons during surgery. International Journal of Environmental Research and Public Health, 18(5), 2363.

Schäfer, K., Schick, R., Rokosch, F., Schwarzmann, K., Kany, H. P., Weiner, U. (2009). Verbesserung der Arbeitsbedingungen beim Kommissionieren durch Einsatz eines Palettenwendegerätes. Zentralblatt für Arbeitsmedizin, Arbeitsschutz und Ergonomie, 59(4), 106-118.

Schandry, R. (2011). Biologische Psychologie. Weinheim, Beltz.

Schaub, K. H., Landau, K. (2004). Ergonomie und Prävention in der betrieblichen Praxis. Angewandte Arbeitswissenschaften, 180, 52-70.

Schaub, K. H. (2004). Das „Automotive Assembly Worksheet“ (AAWS). Montageprozesse gestalten: Fallbeispiele aus Ergonomie und Organisation. Stuttgart: Ergonomia, 91-111.

Schaub, K. H., Steinberg, U., Bierwirth, M., Kugler, M., Bruder, R. (2012). MultipLa – a tool for the combined overall estimation of various types of manual handling tasks. Work, 41, 4433-4435.

Schaub, K., Caragnano, G., Britzke, B., Bruder, R. (2013). The European assembly worksheet. Theoretical Issues in Ergonomics Science, 14(6), 616-639.

Schlick, C., Bruder, R., Luczak, H. (2018). Arbeitswissenschaft. Springer-Verlag.

Schmidt, K. H., Neubach, B., Heuer, H. (2010). Korrelate von Fehlzeitenunterschieden zwischen Organisationen. Zeitschrift für Arbeitswissenschaft, 59, 31-39.

Schneider, E., Irastorza, X., Copsey, S. (2010). OSH in figures: work-related musculoskeletal disorders in the EU - facts and figures. European Agency for Safety and Health at Work, Luxembourg.

Schünke, M., Schulte, E., Schumacher, U., Voll, M., Wesker, K. (2005). Prometheus: Allgemeine Anatomie und Bewegungssystem. LernAtlas der Anatomie. Stuttgart: Thieme.

Schultetus, W. (2005). Nutzung und Nutzen arbeitswissenschaftlicher Methoden in den Unternehmen. Angewandte Arbeitswissenschaft (185), 45-64.

Schwerha, D. J. (2001). The Effect of Some Worker-Related Variables on Work Ability, Work Technique, and Number of Errors in a Packing Job. In Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, 45(3), 250-254. SAGE Publications, Los Angeles.

SENIAM (2021). Homepage. Link: http://seniam.org/. Zugriff am 11.11.2021.

Setayesh, A., Grosse, E. H., Glock, C. H., & Neumann, W. P. (2021). Determining the source of human-system errors in manual order picking with respect to human factors. International Journal of Production Research, 1-23.

Sevim, B., Matuschek, C., Bisping, D. S., Schulz, F., Zappe, J., Baumann, M. A. (2015). Camera-assisted Pick-by-feel. Abschlussbericht, Technische Universität Dortmund, Lehrstuhl Förder- und Lagerwesen.

Shojaei, I., Vazirian, M., Croft, E., Nussbaum, M. A., Bazrgari, B. (2016). Age related differences in mechanical demands imposed on the lower back by manual material handling tasks. Journal of biomechanics, 49(6), 896-903.

Siepenkort, A. (2013). Methode zur Messung und Bewertung der individuellen Kommissionierleistung in" Person-zur-Ware"-Systemen. Dissertation.

Silverstein, B. A., Fine, L. J., Armstrong, T. J. (1986). Hand wrist cumulative trauma disorders in industry. Occupational and Environmental Medicine, 43(11), 779-784.

Silverthorn, D. (2010). Physiologie. 4., aktualisierte Aufl. München, Boston: Pearson Studium.

Skals, S., Bláfoss, R., Andersen, M. S., de Zee, M., Andersen, L. L. (2021a). Manual material handling in the supermarket sector. Part 1: Joint angles and muscle activity of trapezius descendens and erector spinae longissimus. Applied Ergonomics, 92, 103340.

Skals, S., Bláfoss, R., Andersen, L. L., Andersen, M. S., de Zee, M. (2021b). Manual material handling in the supermarket sector. Part 2: Knee, spine and shoulder joint reaction forces. Applied Ergonomics, 92, 103345.

Slomka, M. (1990). Methoden der Schwachstellen-und Ursachenanalyse in logistischen Systemen: eine empirische Untersuchung. Dissertation, Universität Passau.

Snook, S. H., Ciriello, V. M. (1991). The design of manual handling tasks: revised tables of maximum acceptable weights and forces. Ergonomics, 34(9), 1197-1213.

Soderberg, G. L., Knutson, L. M. (2000). A guide for use and interpretation of kinesiologic electromyographic data. Physical therapy, 80(5), 485-498.

Spath, D., Wehking, K.-H. (2010). Der Mensch in der Intralogistik – Ein Handbuch für Führungskräfte. Universität Stuttgart.

Spath, D., Ehmann, R., Braun, M., Kille, B., Marrenbach, D., Scholtz, O. (2019). Der Mensch in der Intralogistik. Fraunhofer IAO, Stuttgart.

Speer, K. E., Semple, S., Naumovski, N., McKune, A. J. (2020). Measuring heart rate variability using commercially available devices in healthy children: A validity and reliability study. European Journal of Investigation in Health, Psychology and Education, 10(1), 390-404.

Spitzer, H., Hettinger, T., Kaminsky, G. (1982). Tafeln für den Energieumsatz bei körperlicher Arbeit. Beuth-Verlag.

Statistisches Bundesamt (2017). Durchschnittsalter von Erwerbstätigen nach ausgewählten Berufsgruppen Ergebnis des Mikrozensus 2017. Zugriff am 11.12.2021, verfügbar unter: https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2018/11/PD18_448_122.html

Steinberg, U. (2012). Entwicklung der Leitmerkmalmethode manuelle Arbeitsprozesse. sicher ist sicher – Arbeitsschutz aktuell, 63(1), 5-10.

Steinebach, T. (2020a). Der Einfluss einer ergonomischen Lagerplatzvergabe auf die menschliche Beanspruchung und Leistung in der manuellen Kommissionierung. Bericht zum 65. Arbeitswissenschaftlichen Kongress: Digitaler Wandel, digitale Arbeit, digitaler Mensch? Dortmund, GfA-Press.

Steinebach, T., Scheuermeyer, V., Stumpf, E., Wakula, J. (2020b): Cognitive assistance systems in manual order picking – a literature review. Bericht zum 65. Arbeitswissenschaftlichen Kongress: Digitaler Wandel, digitale Arbeit, digitaler Mensch? Dortmund, GfA-Press.

Steinebach, T., Kremer, T., Klaer, V. (2020c): Analyse des Einflusses einer ergonomischen Lagerplatzvergabe auf die physische Belastung in der Kommissionierung mittels ema-Simulationssoftware. Bericht zum 65. Arbeitswissenschaftlichen Kongress: Digitaler Wandel, digitale Arbeit, digitaler Mensch? Dortmund, GfA-Press.

Steinebach, T., Grosse, E. H., Glock, C. H., Wakula, J., Lunin, A. (2020d). Accuracy evaluation of two markerless motion capture systems for measurement of upper extremities: Kinect V2 and Captiv. Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries, 30(4), 291-302.

Steinebach, T., Wenzel, J., Wakula, J., Elbert, R. (2021a). The body height as an input parameter for a capability-based order assignment in manual order picking. Bericht zum 66. Arbeitswissenschaftlichen Kongress: Arbeit HUMAINE gestalten. Dortmund, GfA-Press.

Steinebach, T., Wakula, J., Bruder, R., Paulke, M. (2021b). Entwicklung einer ergonomischen Lagerplatzvergabe in der manuellen Person-zur-Ware Kommissionierung. Zeitschrift für Arbeitswissenschaft, 75(3), 296-310.

Steinebach, T., Wakula, J., Mehmedovic, A. (2021c). The influence of an ergonomic storage location assignment on human strain in manual order picking. Lecture Notes in Networks and Systems, 221. Proceedings of the 21st Congress of the International Ergonomics Association (IEA 2021), 511-521.

Stinson, M., Wehking, K. H. (2012). Leistungsbewertung und-optimierung in der manuellen Kommissionierung. Logistics Journal.

Strasser, H. (1996). Beanspruchungsgerechte Planung und Gestaltung manueller Tätigkeiten: Elektromyographie im Dienst der menschengerechten Arbeitsgestaltung.

Theel, S. (2015). Kommissionierung im 21. Jahrhundert: von Pick-by-Voice bis RFID. Diplomica Verlag.

Techniker Krankenkasse (2020). Gesundheitsreport 2020 – Arbeitsunfähigkeiten. Herausgeber: Techniker Krankenkasse, Hamburg

ten Hompel, M., Schmidt, T. (2006). Warehouse Management: Organisation und Steuerung von Lager- und Kommissioniersystemen. Springer-Verlag.

ten Hompel, M., Sadowsky, V., Beck, M. (2011). Kommissionierung: Materialflusssysteme 2 - Planung und Berechnung der Kommissionierung in der Logistik. Springer-Verlag.

Tittmann, P. (2011). Graphentheorie: eine anwendungsorientierte Einführung. Carl Hanser Fachbuchverlag, München.

Tompkins, J. A., White, J. A., Bozer, Y. A., Tanchoco, J. M. A. (2010). Facilities planning. John Wiley & Sons.

Ulin, S. S., Keyserling, W. M. (2004). Case studies of ergonomic interventions in automotive parts distribution operations. Journal of Occupational Rehabilitation, 14(4), 307-326.

Van Gils, T., Ramaekers, K., Caris, A., De Koster, R. B. (2018). Designing efficient order picking systems by combining planning problems: State-of-the-art classification and review. European Journal of Operational Research, 267(1), 1-15.

Varrecchia, T., De Marchis, C., Rinaldi, M., Draicchio, F., Serrao, M., Schmid, M., Ranavolo, A. (2018). Lifting activity assessment using surface electromyographic features and neural networks. International Journal of Industrial Ergonomics, 66, 1-9.

Vogt, G. (1997). Das neue Kommissionier Handbuch. Verlag moderne Industrie, Landsberg.

von Borries, R. (1975). Kennziffern zur Auswahl von Kommissioniersystemen für Stückgutlager des Handels und der Industrie. Dissertation, Technische Universität Berlin.

Wäscher, G. (2004). Order picking: a survey of planning problems and methods. Supply chain management and reverse logistics, 323-347. Springer, Berlin, Heidelberg.

Wakula, J., Berg, K., Schaub, K., Bruder, R., Glitsch, U., Ellegast, R. (2009). Der montagespezifische Kraftatlas. BGIA-Report: Vol. 2009, 3.

Wakula, J., Steinebach, T., Klaer, V., Rabenhaupt, W., Maier, G. (2021). Analysis of the Physical Workload and Ergonomic Design of Workstations for “Goods-to-Person” Order Picking. Lecture Notes in Networks and Systems, 221. Proceedings of the 21st Congress of the International Ergonomics Association (IEA 2021), 522-529.

Walch, D. (2011). Belastungsermittlung in der Kommissionierung vor dem Hintergrund einer alternsgerechten Arbeitsgestaltung der Intralogistik. Dissertation, Technische Universität München.

Waters, T. R., Putz-Anderson, V., Garg, A., Fine, L. J. (1993). Revised NIOSH equation for the design and evaluation of manual lifting tasks. Ergonomics, 36(7), 749-776.

Waters, T. R., Putz-Anderson, V., Baron, S. (1998). Methods for assessing the physical demands of manual lifting: a review and case study from warehousing. American Industrial Hygiene Association, 59 (12), 871-881.

Weisner, K., Deuse, J. (2014). Assessment methodology to design an ergonomic and sustainable order picking system using motion capturing systems. Procedia CIRP, 17, 422-427.

Wichmann, A. (1994). Planungshilfsmittel für manuelle Kommissioniertätigkeiten. Dissertation. Huss-Verlag.

Williams, N. (2017). The Borg rating of perceived exertion (RPE) scale. Occupational Medicine, 67(5), 404-405.

Wright, E. J., Haslam, R. A. (1999). Manual handling risks and controls in a soft drinks distribution centre. Applied Ergonomics, 30(4), 311-318.

Yetisen, A. K., Martinez-Hurtado, J. L., Ünal, B., Khademhosseini, A., Butt, H. (2018). Wearables in medicine. Advanced Materials, 30(33), 1706910.

Yue, G., Cole, K. J. (1992). Strength increases from the motor program: comparison of training with maximal voluntary and imagined muscle contractions. Journal of neurophysiology, 67(5), 1114-1123.

Zimmer, P., Appell, H. J. (2021). Funktionelle Anatomie: Grundlagen sportlicher Leistung und Bewegung. Springer-Verlag.

Zimmerman, D. W., & Zumbo, B. D. (1993). Relative power of the Wilcoxon test, the Friedman test, and repeated-measures ANOVA on ranks. The Journal of Experimental Education, 62(1), 75-86.

Zipp, P. (1988). Optimierung der Oberflächenableitung bioelektrischer Signale. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 17 Nr. 45. VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf.

Normen, Gesetze und Standards

Arbeitsschutzgesetz (1996). Gesetz über die Durchführung von Maßnahmen des Arbeitsschutzes zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Beschäftigten bei der Arbeit. Beck-Texte im dtv, München.

DIN 1450 (2013). Schriften – Leserlichkeit. Beuth Verlag, Berlin.

DIN EN 614-1 (2009). Sicherheit von Maschinen - Ergonomische Gestaltungsgrundsätze - Teil 1: Begriffe und allgemeine Leitsätze. Beuth Verlag, Berlin.

DIN EN 1005-1 (2009). Sicherheit von Maschinen - Menschliche körperliche Leistung - Teil 1: Begriffe. Beuth Verlag, Berlin.

DIN EN 14943 (2005). Transportdienstleistungen – Logistik–Glossar. Beuth, Berlin.

DIN EN ISO 6385 (2016). Grundsätze der Ergonomie für die Gestaltung von Arbeitssystemen. Beuth Verlag, Berlin.

DIN EN ISO 9000 (2015). Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe. Beuth Verlag, Berlin.

DIN EN ISO 26800 (2011). Ergonomie – Genereller Ansatz, Prinzipien und Konzepte. Beuth Verlag, Berlin.

VDI 3590 (1994). Verein Deutscher Ingenieure (VDI) - VDI 3590 Blatt 1: Kommissioniersysteme - Grundlagen. Beuth Verlag, Berlin.

VDI 3657 (1993). Ergonomische Gestaltung von Kommissionierarbeitsplätzen. Beuth Verlag, Berlin.

VDI 4006-1 (2002). Verein Deutscher Ingenieure (VDI) - VDI 4006 Blatt 1: Menschliche Zuverlässigkeit – Ergonomische Anforderungen und Methoden der Bewertung. Beuth Verlag, Berlin.

VDI 4400-3 (2002). Verein Deutscher Ingenieure (VDI) - VDI 4400 Blatt 3: Logistikkennzahlen für die Distribution. Beuth Verlag, Berlin.

VDI 4481 (2019). Personalbedarfsermittlung in der Kommissionierung. Beuth Verlag, Berlin.

Studentische Arbeiten

Cadavid, E., Klösel, P., Müller, L., Zhao, Y. (2021). Physiologische Messungen in der manuellen Kommissionierung in einer Laborstudie. Tutorium an der Technischen Universität Darmstadt, Institut für Arbeitswissenschaft.

Haselberger, J. (2020). Entwicklung einer bi-objektiven Optimierung zur Lagerplatzvergabe in der manuellen Kommissionierung unter Berücksichtigung ergonomischer und zeitlicher Kriterien. Bachelorthesis an der Technischen Universität Darmstadt, Institut für Arbeitswissenschaft.

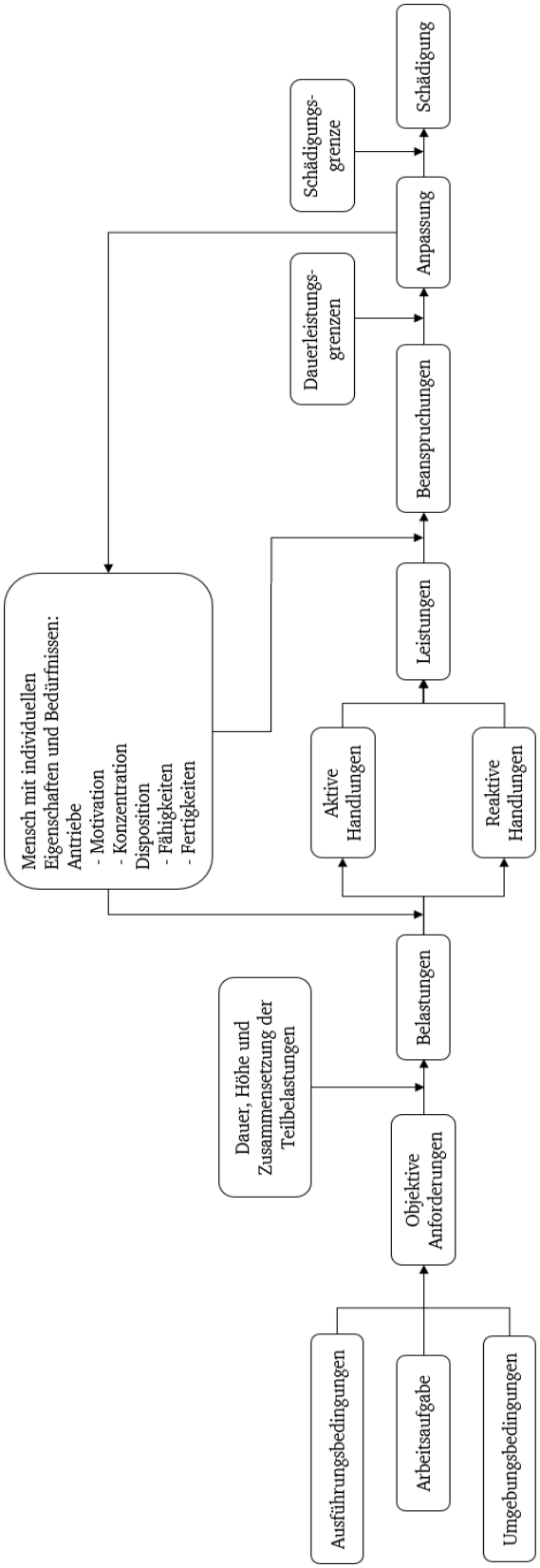
Katzenbach, J. (2021). Analyse einer ergonomischen Lagerplatzvergabestrategie in der Logistik mittels physiologischer Messungen in einer Laborstudie. Masterthesis an der Technischen Universität Darmstadt, Institut für Arbeitswissenschaft.

Kremer, T. (2019). Entwicklung und Bewertung einer Lagerplatzvergabestrategie in der manuellen Kommissionierung unter Berücksichtigung ergonomischer Kennwerte. Bachelorthesis an der Technischen Universität Darmstadt, Institut für Arbeitswissenschaft.

Wirthmann, L. (2020). Analyse und Bewertung von Einflussfaktoren auf die körperliche Belastung in der manuellen Kommissionierung durch ema-Simulation. Studienarbeit an der Technischen Universität Darmstadt, Institut für Arbeitswissenschaft.

Anhang

A Erweitertes Belastungs-Beanspruchungs-Konzept nach Rohmert (1984)



B Übersicht und Kategorisierung von Screening-Verfahren zur Belastungsbewertung

Tabelle B: Übersicht und Kategorisierung von Screening-Verfahren (vgl. Kugler et al., 2010)

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

C Layout Designs

Im Folgenden sind Prinzipskizzen der in Kapitel 2.3.1 genannten Lagerlayouts gezeigt. Die Anzahl an Regalreihen sowie die Position des Depots kann hierbei von Lager zu Lager variieren.

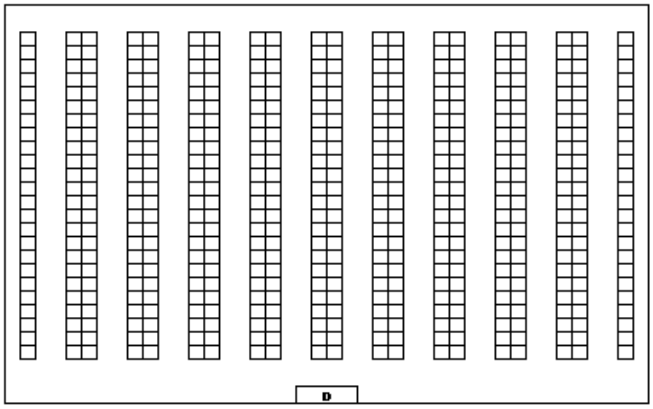


Abbildung C.1: One-block Layout (vgl. Pohl et al., 2009b)

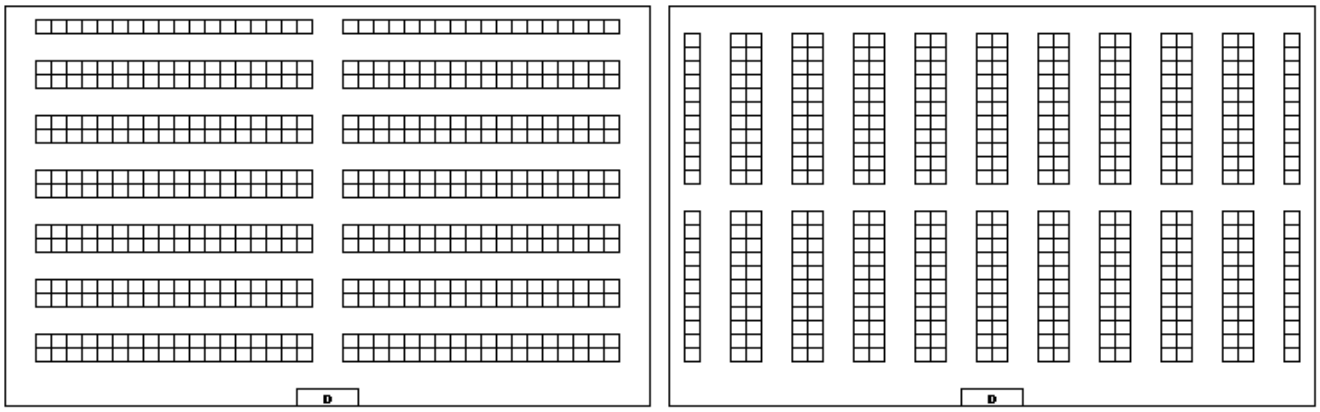


Abbildung C.2: Two-block Layouts mit verschiedenen Regalausrichtungen (vgl. Pohl et al., 2009b)

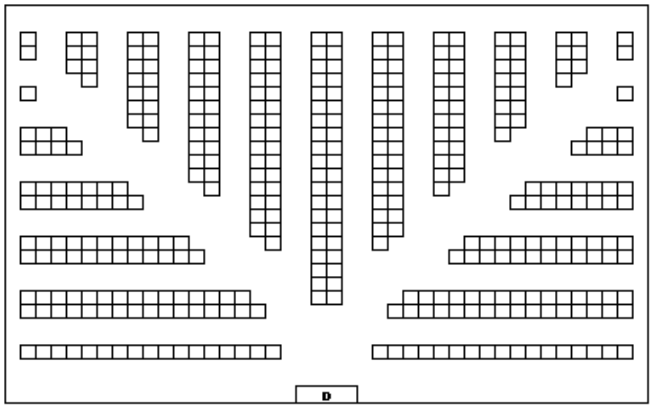


Abbildung C.3: Fishbone Layout (vgl. Pohl et al., 2011)

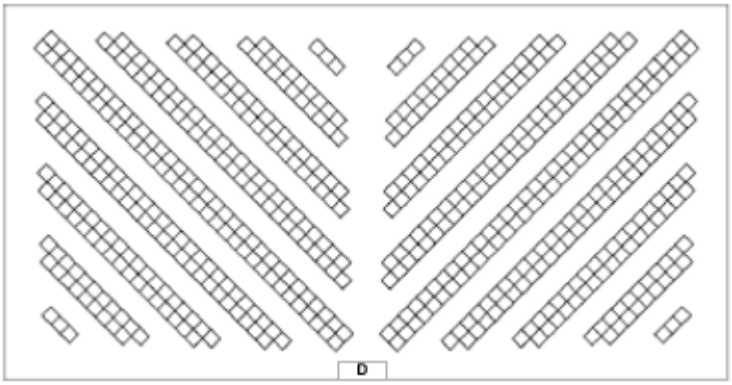


Abbildung C.4: Fishbone Layout (vgl. Masae et al., 2020a)

D Tabellarischer Literaturüberblick zur Berücksichtigung von Human Factors und Ergonomie in der Kommissionierung

Autor(en)	Artikel-Eigenschaften: Gewicht	Artikel-Eigenschaften: Volumen	Artikel-Eigenschaften: Greifbarkeit	Lagerung: Entnahmehöhe	Lagerung: Entnahmetiefe	Lagerung: Neigung	Lagerung: Zugänglichkeit	Lagerung: Technische Hilfsmittel	Lagerung: Lagerplatzvergabe	Belastungs-/ Beanspruchungsermittlung	Methodik
Battini et al. (2016)	(x)			(x)					x	Energieumsatz Garg (1978)	Optimierungsmodell
Bortolini et al. (2017)	(x)	(x)		(x)	(x)				x	REBA	Optimierungsmodell
Calzavara et al. (2017a)	(x)			(x)			x			Energieumsatz Garg (1978)	Optimierungsmodell
Calzavara et al. (2017b)	(x)			x	x	x				OWAS	Labormessung (Motion Capture)
Calzavara et al. (2019)	(x)			(x)					x	Energieumsatz Garg (1978), OWAS	Optimierungsmodell
Diefenbach & Glock (2019)	(x)			(x)					x	Energieumsatz Garg (1978)	Optimierungsmodell
Feldmann et al. (2019)				x						Leitmerkmalmethode	Labormessung (Motion Capture), Beobachtung
Gajsek et al. (2021)	(x)			(x)					x	Energieumsatz Garg (1978), OWAS	Labormessung (Motion Capture), Optimierungsmodell
Glock et al. (2019)	(x)			(x)	(x)		x	x		Druckkraft auf L4-L5 mit WATBAK	Optimierungsmodell
Goldscheid (2008)				x	x					Druckkraft auf L5-S1 mit "dem Dortmunder"	Biomechanische Simulation
Hanson et al. (2016)				x	x	x				Druckkraft auf L4-L5 mit Jack Manikin	Feldmessung (Zeit), Biomechanische Simulation
Hanson & Medbo (2018a)				x	x	x				Druckkraft auf L4-L5 mit Jack Manikin	Feldmessung (Zeit), Biomechanische Simulation
Hanson & Medbo (2018b)				x	x	x				REBA	Beobachtung (Feld)
Harari et al. (2020)				x						Druckkraft auf L5-S1 und Schultermomente mit Visual3D	Labormessung (Motion Capture) Biomechanische Simulation
Jäger et al. (2002)				x	x	x				Druck- und Scherkräfte auf L5-S1 mit "dem Dortmunder"	Labormessung, Biomechanische Simulation
Kelterborn et al. (2014)								x	(x)	Multiple-Lasten-Tool	Beobachtung (Feld)

Autor(en)	Artikel-Eigenschaften			Lagerung					Belastungs-/Beanspruchungsermittlung	Methodik
	Gewicht	Volumen	Greifbarkeit	Entnahmehöhe	Entnahmetiefe	Neigung	Zugänglichkeit	Technische Hilfsmittel	Lagerplatzvergabe	
Labus & Gajsek (2018)				x				x	Fragebogen	Befragung
Larco et al. (2017)	(x)	(x)		(x)					Borg CR-10 Skala	Befragung, Optimierungsmodell
Lee & Hwang (2020)	(x)			x					Befragung	Messung (Labor)
Marklin & Wilzbacher (1999)				x				x	NIOSH, 3DSSPP, Leitmerkmalmethode, Borg CR-10	Befragung, Beobachtung, Simulation
Marras et al. (1999)	x	x	x	x	x				Druck- und Scherkräfte auf L5-S1, EMG	Labormessung
Nookea & Vanichchinchai (2020)	(x)			(x)				(x)	Körperhaltungsanalyse (Stehen, Beugen, Strecken)	Beobachtung
Otto et al. (2017)	(x)			(x)				x	NIOSH Lifting Equation	Optimierungsmodell
Petersen et al. (2005)				(x)				x	-	Optimierungsmodell
Schäfer et al. (2009)							x	x	CUELA	Messung (Feld), Beobachtung
Skals et al. (2021a)	x			x	x				Muskuläre Beanspruchung, Gelenkwinkel	Feldmessung (Motion Capture, EMG)
Skals et al. (2021b)	x			x	x				Druck- und Schwerkräfte auf L5-S1 mit Anybody	Feldmessung, biomechanische Simulation
Snook & Ciriello (1991)	x	x	x	x					Sauerstoffverbrauch, Herzschlagrate	Messung (Labor)
Steinebach et al. (2021b)	x			x				x	Druckkraft auf L5-S1 mit 3DSSPP	Biomechanische Simulation & Optimierungsmodell
Steinebach et al. (2021c)	(x)			(x)				x	EMG, Borg RPE Skala	Labormessung
Ulin & Keyserling (2004)	(x)			(x)		x		x	Druckkraft auf L5-S1 mit 3DSSPP	Beobachtung, Befragung, Biomechanische Simulation
Wakula et al. (2021)	x			x	x	x			EAWS	Labormessung (Motion Capture)
Weisner & Deuse (2014)	(x)			x	x				Leitmerkmalmethode	Beobachtung, Simulation

In Anlehnung an die Studienarbeit Lukas Wirthmann (2020): Analyse und Bewertung von Einflussfaktoren auf die körperliche Belastung in der manuellen Kommissionierung durch ema-Simulation.

E Matrix zur Druckkraft auf L5-S1 für verschiedene Kommissioniervorgänge

Die Druckkraftwerte in kN auf das Wirbelsäulensegment L5-S1 gelten für folgende Kommissioniertätigkeiten:
Beidhändiges, körpernahes, dynamisches (1,0s), unsymmetrisches Heben/Umsetzen bei kontinuierliche Höhenänderung auf eine Ablagehöhe von 90 cm

	Lastgewicht [kg]														
Entnahmehöhe [cm]	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**
180	2,3	2,3	2,6	2,5	2,8	3,0	3,1	3,3	3,5	3,6	3,8	3,9	4,2	4,4	4,6
170	2,2	2,3	2,5	2,5	2,8	2,9	3,0	3,2	3,4	3,5	3,7	3,9	4,1	4,3	4,5
160	2,1	2,3	2,4	2,5	2,7	2,8	2,9	3,1	3,3	3,5	3,7	3,8	4,0	4,2	4,4
150	2,1	2,2	2,4	2,4	2,7	2,8	2,9	3,1	3,3	3,4	3,6	3,7	3,9	4,1	4,3
140	2,0	2,2	2,3	2,4	2,6	2,7	2,8	3,0	3,2	3,3	3,5	3,6	3,8	4,0	4,2
130	1,9	2,1	2,2	2,3	2,5	2,6	2,7	2,9	3,1	3,2	3,4	3,5	3,7	3,8	4,0
120	1,9	2,0	2,2	2,3	2,4	2,6	2,7	2,8	3,0	3,1	3,2	3,4	3,5	3,7	3,9
110	1,8	1,9	2,1	2,2	2,3	2,5	2,6	2,7	2,9	3,0	3,1	3,3	3,4	3,5	3,7
100	1,7	1,8	2,0	2,1	2,2	2,4	2,5	2,6	2,8	2,9	3,0	3,2	3,3	3,4	3,5
90	1,6	1,7	1,8	2,0	2,1	2,2	2,3	2,5	2,6	2,7	2,8	3,0	3,1	3,2	3,3
80	1,9	2,0	2,1	2,2	2,4	2,5	2,6	2,7	2,9	3,0	3,1	3,3	3,4	3,5	3,6
70	2,1	2,2	2,3	2,5	2,6	2,7	2,8	3,0	3,1	3,2	3,4	3,5	3,6	3,8	3,9
60	2,4	2,5	2,6	2,7	2,9	3,0	3,1	3,2	3,4	3,5	3,6	3,8	3,9	4,0	4,1
50	2,6	2,7	2,8	2,9	3,1	3,2	3,3	3,4	3,6	3,7	3,9	4,0	4,1	4,3	4,4
40	2,9	3,0	3,1	3,1	3,4	3,5	3,6	3,6	3,9	4,0	4,2	4,3	4,4	4,6	4,7
30	3,1	3,2	3,3	3,4	3,6	3,7	3,8	3,9	4,1	4,2	4,5	4,5	4,6	4,9	5,0
20	3,4	3,5	3,6	3,6	3,9	4,0	4,1	4,1	4,4	4,5	4,7	4,8	4,9	5,1	5,2
10	3,6	3,7	3,8	3,8	4,1	4,2	4,3	4,3	4,6	4,7	5,0	5,0	5,1	5,4	5,5

Quelle: vgl. Goldscheid (2008)

F Matrix zu Kommissionierzeiten der im Versuch verwendeten SKU

Die Kommissionierzeiten in Sekunden für das im Versuch verwendete SKU-Portfolio gelten für folgendes Kommissioniersystem:
175 cm Mensch, Kommissionierwagen unmittelbar neben dem Lagerplatz platziert, Ablagehöhe von 90 cm, eingearbeitete und durchschnittlich veranlagte Mitarbeitende, Geschwindigkeit zum Ziehen/Schieben des Wagens = 0,75 m/s; alle Zeiten sind bezüglich des Lagerlayouts von Kapitel 5.1 kalkuliert.

Lagerplätze 1-20:

	Greifzeit + Wegzeit																			
SKU-Nr.	LP 1: 1-A-1	LP 2: 1-D-2	LP 3: 1-G-3	LP 4: 1-J-4	LP 5: 1-M-5	LP 6: 2-B-2	LP 7: 2-E-3	LP 8: 2-H-4	LP 9: 2-K-5	LP 10: 2-N-1	LP 11: 3-B-3	LP 12: 3-E-4	LP 13: 3-H-5	LP 14: 3-K-1	LP 15: 3-N-2	LP 16: 4-C-4	LP 17: 4-F-5	LP 18: 4-I-1	LP 19: 4-L-2	LP 20: 4-O-3
1	1,67	1,88	1,88	2,20	2,52	1,71	1,70	2,02	2,34	2,83	0,97	1,29	1,61	2,09	2,31	1,11	1,43	1,92	2,13	2,12
2	1,67	1,88	1,88	2,20	2,52	1,71	1,70	2,02	2,34	2,83	0,97	1,29	1,61	2,09	2,31	1,11	1,43	1,92	2,13	2,12
3	1,69	1,92	1,90	2,24	2,54	1,74	1,72	2,06	2,36	2,84	0,99	1,33	1,63	2,11	2,34	1,15	1,45	1,93	2,16	2,14
4	1,69	1,92	1,90	2,24	2,54	1,74	1,72	2,06	2,36	2,84	0,99	1,33	1,63	2,11	2,34	1,15	1,45	1,93	2,16	2,14
5	1,69	1,92	1,90	2,24	2,54	1,74	1,72	2,06	2,36	2,84	0,99	1,33	1,63	2,11	2,34	1,15	1,45	1,93	2,16	2,14
6	1,69	1,92	1,90	2,24	2,54	1,74	1,72	2,06	2,36	2,84	0,99	1,33	1,63	2,11	2,34	1,15	1,45	1,93	2,16	2,14
7	1,91	2,14	2,10	2,45	2,75	1,96	1,92	2,27	2,58	3,06	1,18	1,54	1,84	2,33	2,56	1,36	1,67	2,15	2,38	2,34
8	1,67	1,88	1,88	2,20	2,52	1,71	1,70	2,02	2,34	2,83	0,97	1,29	1,61	2,09	2,31	1,11	1,43	1,92	2,13	2,12
9	1,67	1,88	1,88	2,20	2,52	1,71	1,70	2,02	2,34	2,83	0,97	1,29	1,61	2,09	2,31	1,11	1,43	1,92	2,13	2,12
10	1,69	1,92	1,90	2,24	2,54	1,74	1,72	2,06	2,36	2,84	0,99	1,33	1,63	2,11	2,34	1,15	1,45	1,93	2,16	2,14
11	3,38	3,84	3,80	4,47	5,08	3,48	3,44	4,12	4,72	5,69	1,97	2,65	3,26	4,22	4,68	2,30	2,90	3,87	4,33	4,28
12	3,38	3,84	3,80	4,47	5,08	3,48	3,44	4,12	4,72	5,69	1,97	2,65	3,26	4,22	4,68	2,30	2,90	3,87	4,33	4,28
13	3,38	3,84	3,80	4,47	5,08	3,48	3,44	4,12	4,72	5,69	1,97	2,65	3,26	4,22	4,68	2,30	2,90	3,87	4,33	4,28
14	3,81	4,27	4,19	4,91	5,51	3,91	3,84	4,55	5,15	6,12	2,37	3,00	3,69	4,65	5,11	2,73	3,33	4,30	4,76	4,68
15	3,34	3,77	3,76	4,40	5,04	3,41	3,41	4,05	4,69	5,65	1,94	2,58	3,22	4,19	4,61	2,22	2,87	3,83	4,25	4,25
16	8,45	9,60	9,49	11,18	12,69	8,71	8,60	10,29	11,81	14,22	4,93	6,63	8,14	10,55	11,71	5,74	7,25	9,67	10,82	10,71
17	8,36	9,42	9,40	11,00	12,60	8,53	8,51	10,11	11,72	14,13	4,84	6,45	8,05	10,46	11,53	5,56	7,16	9,58	10,64	10,62
18	8,45	9,60	9,49	11,18	12,69	8,71	8,60	10,29	11,81	14,22	4,93	6,63	8,14	10,55	11,71	5,74	7,25	9,67	10,82	10,71
19	8,45	9,60	9,49	11,18	12,69	8,71	8,60	10,29	11,81	14,22	4,93	6,63	8,14	10,55	11,71	5,74	7,25	9,67	10,82	10,71
20	8,45	9,60	9,49	11,18	12,69	8,71	8,60	10,29	11,81	14,22	4,93	6,63	8,14	10,55	11,71	5,74	7,25	9,67	10,82	10,71
21	9,53	10,68	10,48	12,26	13,77	9,79	9,59	11,37	12,89	15,30	5,92	7,71	9,22	11,63	12,79	6,82	8,33	10,75	11,90	11,70
22	8,45	9,60	9,49	11,18	12,69	8,71	8,60	10,29	11,81	14,22	4,93	6,63	8,14	10,55	11,71	5,74	7,25	9,67	10,82	10,71
23	8,45	9,60	9,49	11,18	12,69	8,71	8,60	10,29	11,81	14,22	4,93	6,63	8,14	10,55	11,71	5,74	7,25	9,67	10,82	10,71
24	16,89	19,20	18,98	22,37	25,39	17,41	17,21	20,59	23,61	28,44	9,87	13,26	16,28	21,11	23,41	11,48	14,51	19,33	21,63	21,42
25	16,71	18,84	18,80	22,01	25,21	17,05	17,03	20,23	23,43	28,26	9,69	12,90	16,10	20,93	23,05	11,12	14,33	19,15	21,27	21,24
26	16,89	19,20	18,98	22,37	25,39	17,41	17,21	20,59	23,61	28,44	9,87	13,26	16,28	21,11	23,41	11,48	14,51	19,33	21,63	21,42
27	16,71	18,84	18,80	22,01	25,21	17,05	17,03	20,23	23,43	28,26	9,69	12,90	16,10	20,93	23,05	11,12	14,33	19,15	21,27	21,24
28	16,89	19,20	18,98	22,37	25,39	17,41	17,21	20,59	23,61	28,44	9,87	13,26	16,28	21,11	23,41	11,48	14,51	19,33	21,63	21,42
29	38,11	42,71	41,92	49,05	55,10	39,15	38,37	45,50	51,55	61,19	23,69	30,84	36,89	46,53	51,14	27,29	33,33	42,98	47,59	46,80
30	33,79	38,39	37,96	44,73	50,78	34,83	34,41	41,18	47,23	56,87	19,73	26,52	32,57	42,21	46,82	22,97	29,01	38,66	43,27	42,84
31	33,79	38,39	37,96	44,73	50,78	34,83	34,41	41,18	47,23	56,87	19,73	26,52	32,57	42,21	46,82	22,97	29,01	38,66	43,27	42,84
32	33,43	37,67	37,60	44,01	50,42	34,11	34,05	40,46	46,87	56,51	19,37	25,80	32,21	41,85	46,10	22,25	28,65	38,30	42,55	42,48
33	50,68	57,59	56,94	67,10	76,17	52,24	51,62	61,77	70,84	85,31	29,60	39,78	48,85	63,32	70,23	34,45	43,52	57,99	64,90	64,26
34	57,16	64,07	62,80	73,58	82,65	58,72	57,56	68,25	77,32	91,79	35,54	46,26	55,33	69,80	76,71	40,93	50,00	64,47	71,38	70,20
35	50,68	57,59	56,94	67,10	76,17	52,24	51,62	61,77	70,84	85,31	29,60	39,78	48,85	63,32	70,23	34,45	43,52	57,99	64,90	64,26
36	50,14	56,51	56,40	66,02	75,63	51,16	51,00	60,69	70,30	84,77	29,06	38,70	48,31	62,78	69,15	33,37	42,98	57,45	63,82	63,72
37	67,57	76,79	75,93	89,46	101,6	69,65	68,82	82,36	94,45	113,7	39,47	53,03	65,13	84,43	93,64	45,93	58,03	77,32	86,54	85,67
38	67,57	76,79	75,93	89,46	101,6	69,65	68,82	82,36	94,45	113,7	39,47	53,03	65,13	84,43	93,64	45,93	58,03	77,32	86,54	85,67
39	76,21	85,43	83,85	98,10	110,2	78,29	76,74	91,00	103,1	122,4	47,39	61,67	73,77	93,07	102,3	54,57	66,67	85,96	95,18	93,59
40	84,47	95,99	94,91	111,8	126,9	87,07	86,03	102,9	118,1	142,2	49,33	66,29	81,41	105,5	117,1	57,41	72,53	96,65	108,2	107,1

Lagerplätze 21-40:

	Greifzeit + Wegzeit																			
SKU-Nr.	LP 21: 5-C-5	LP 22: 5-F-1	LP 23: 5-I-2	LP 24: 5-L-3	LP 25: 5-O-4	LP 26: 6-A-1	LP 27: 6-D-2	LP 28: 6-G-3	LP 29: 6-J-4	LP 30: 6-M-5	LP 31: 7-A-2	LP 32: 7-D-3	LP 33: 7-G-4	LP 34: 7-J-5	LP 35: 7-M-1	LP 36: 8-B-3	LP 37: 8-E-4	LP 38: 8-H-5	LP 39: 8-K-1	LP 40: 8-N-2
1	1,17	1,65	1,86	1,86	2,10	1,20	1,42	1,41	1,73	2,05	1,62	1,61	1,93	2,25	2,74	1,44	1,76	2,08	2,56	2,77
2	1,17	1,65	1,86	1,86	2,10	1,20	1,42	1,41	1,73	2,05	1,62	1,61	1,93	2,25	2,74	1,44	1,76	2,08	2,56	2,77
3	1,18	1,67	1,90	1,88	2,21	1,22	1,45	1,43	1,77	2,07	1,65	1,63	1,97	2,27	2,75	1,45	1,79	2,09	2,58	2,81
4	1,18	1,67	1,90	1,88	2,21	1,22	1,45	1,43	1,77	2,07	1,65	1,63	1,97	2,27	2,75	1,45	1,79	2,09	2,58	2,81
5	1,18	1,67	1,90	1,88	2,21	1,22	1,45	1,43	1,77	2,07	1,65	1,63	1,97	2,27	2,75	1,45	1,79	2,09	2,58	2,81
6	1,18	1,67	1,90	1,88	2,21	1,22	1,45	1,43	1,77	2,07	1,65	1,63	1,97	2,27	2,75	1,45	1,79	2,09	2,58	2,81
7	1,40	1,88	2,11	2,07	2,43	1,44	1,67	1,63	1,99	2,29	1,87	1,83	2,19	2,49	2,97	1,65	2,01	2,31	2,79	3,02
8	1,17	1,65	1,86	1,86	2,10	1,20	1,42	1,41	1,73	2,05	1,62	1,61	1,93	2,25	2,74	1,44	1,76	2,08	2,56	2,77
9	1,17	1,65	1,86	1,86	2,10	1,20	1,42	1,41	1,73	2,05	1,62	1,61	1,93	2,25	2,74	1,44	1,76	2,08	2,56	2,77
10	1,18	1,67	1,90	1,88	2,21	1,22	1,45	1,43	1,77	2,07	1,65	1,63	1,97	2,27	2,75	1,45	1,79	2,09	2,58	2,81
11	2,37	3,33	3,79	3,75	4,43	2,45	2,91	2,86	3,54	4,14	3,31	3,26	3,94	4,55	5,51	2,91	3,59	4,19	5,15	5,62
12	2,37	3,33	3,79	3,75	4,43	2,45	2,91	2,86	3,54	4,14	3,31	3,26	3,94	4,55	5,51	2,91	3,59	4,19	5,15	5,62
13	2,37	3,33	3,79	3,75	4,43	2,45	2,91	2,86	3,54	4,14	3,31	3,26	3,94	4,55	5,51	2,91	3,59	4,19	5,15	5,62
14	2,80	3,77	4,23	4,15	4,86	2,88	3,34	3,26	3,97	4,58	3,74	3,66	4,37	4,98	5,94	3,30	4,02	4,62	5,59	6,05
15	2,33	3,30	3,72	3,71	4,36	2,41	2,83	2,83	3,47	4,11	3,23	3,23	3,87	4,51	5,47	2,87	3,51	4,15	5,12	5,54
16	5,92	8,33	9,49	9,38	11,07	6,11	7,27	7,16	8,85	10,36	8,27	8,16	9,85	11,36	13,77	7,27	8,96	10,47	12,89	14,04
17	5,83	8,24	9,31	9,29	10,89	6,02	7,09	7,07	8,67	10,27	8,09	8,07	9,67	11,27	13,68	7,18	8,78	10,38	12,80	13,86
18	5,92	8,33	9,49	9,38	11,07	6,11	7,27	7,16	8,85	10,36	8,27	8,16	9,85	11,36	13,77	7,27	8,96	10,47	12,89	14,04
19	5,92	8,33	9,49	9,38	11,07	6,11	7,27	7,16	8,85	10,36	8,27	8,16	9,85	11,36	13,77	7,27	8,96	10,47	12,89	14,04
20	5,92	8,33	9,49	9,38	11,07	6,11	7,27	7,16	8,85	10,36	8,27	8,16	9,85	11,36	13,77	7,27	8,96	10,47	12,89	14,04
21	7,00	9,41	10,57	10,37	12,15	7,19	8,35	8,15	9,93	11,44	9,35	9,15	10,93	12,44	14,85	8,26	10,04	11,55	13,97	15,12
22	5,92	8,33	9,49	9,38	11,07	6,11	7,27	7,16	8,85	10,36	8,27	8,16	9,85	11,36	13,77	7,27	8,96	10,47	12,89	14,04
23	5,92	8,33	9,49	9,38	11,07	6,11	7,27	7,16	8,85	10,36	8,27	8,16	9,85	11,36	13,77	7,27	8,96	10,47	12,89	14,04
24	11,84	16,67	18,97	18,75	22,14	12,23	14,53	14,31	17,70	20,72	16,53	16,32	19,70	22,73	27,55	14,53	17,93	20,95	25,77	28,08
25	11,66	16,49	18,61	18,57	21,78	12,05	14,17	14,13	17,34	20,54	16,17	16,14	19,34	22,55	27,37	14,35	17,57	20,77	25,59	27,72
26	11,84	16,67	18,97	18,75	22,14	12,23	14,53	14,31	17,70	20,72	16,53	16,32	19,70	22,73	27,55	14,53	17,93	20,95	25,77	28,08
27	11,66	16,49	18,61	18,57	21,78	12,05	14,17	14,13	17,34	20,54	16,17	16,14	19,34	22,55	27,37	14,35	17,57	20,77	25,59	27,72
28	11,84	16,67	18,97	18,75	22,14	12,23	14,53	14,31	17,70	20,72	16,53	16,32	19,70	22,73	27,55	14,53	17,93	20,95	25,77	28,08
29	28,01	37,65	42,26	41,47	48,60	28,77	33,38	32,59	39,72	45,77	37,39	36,59	43,72	49,77	59,42	33,03	40,17	46,22	55,87	60,47
30	23,69	33,33	37,94	37,51	44,28	24,45	29,06	28,63	35,40	41,45	33,07	32,63	39,40	45,45	55,10	29,07	35,85	41,90	51,55	56,15
31	23,69	33,33	37,94	37,51	44,28	24,45	29,06	28,63	35,40	41,45	33,07	32,63	39,40	45,45	55,10	29,07	35,85	41,90	51,55	56,15
32	23,33	32,97	37,22	37,15	43,56	24,09	28,34	28,27	34,68	41,09	32,35	32,27	38,68	45,09	54,74	28,71	35,13	41,54	51,19	55,43
33	35,53	50,00	56,91	56,26	66,42	36,68	43,59	42,94	53,10	62,17	49,60	48,95	59,10	68,18	82,65	43,60	53,78	62,85	77,32	84,23
34	42,01	56,48	63,39	62,20	72,90	43,16	50,07	48,88	59,58	68,65	56,08	54,89	65,58	74,66	89,13	49,54	60,26	69,33	83,80	90,71
35	35,53	50,00	56,91	56,26	66,42	36,68	43,59	42,94	53,10	62,17	49,60	48,95	59,10	68,18	82,65	43,60	53,78	62,85	77,32	84,23
36	34,99	49,46	55,83	55,72	65,34	36,14	42,51	42,40	52,02	61,63	48,52	48,41	58,02	67,64	82,11	43,06	52,70	62,31	76,78	83,15
37	47,37	66,67	75,88	75,02	88,55	48,91	58,12	57,26	70,79	82,89	66,13	65,27	78,81	90,90	110,2	58,13	71,70	83,80	103,1	112,3
38	47,37	66,67	75,88	75,02	88,55	48,91	58,12	57,26	70,79	82,89	66,13	65,27	78,81	90,90	110,2	58,13	71,70	83,80	103,1	112,3
39	56,01	75,31	84,52	82,94	97,19	57,55	66,76	65,18	79,43	91,53	74,77	73,19	87,45	99,54	118,8	66,05	80,34	92,44	111,7	120,9
40	59,21	83,33	94,85	93,77	110,7	61,13	72,65	71,57	88,49	103,6	82,67	81,59	98,51	113,6	137,7	72,67	89,63	104,7	126,9	140,4

G Java-Code der ergonomischen Lagerplatzvergabe

Im Folgenden werden die beiden Code-Klassen „Excel Controller“ sowie „Zuordnung_erweitert“ aufgeführt. Beide sind zum Import der notwendigen Kennwerte, zur Optimierung bzw. zum Export der Ergebnisse notwendig.

Klasse „Excel Controller“:

```
import ilog.concert.IloException;
import ilog.concert.IloNumVar;
import ilog.cplex.IloCplex;
import ilog.cplex.IloCplex.UnknownObjectException;

import java.io.FileInputStream;
import java.io.FileNotFoundException;
import java.io.FileOutputStream;
import java.io.IOException;
import java.util.Date;
import java.util.Iterator;

import org.apache.poi.openxml4j.exceptions.InvalidFormatException;
import org.apache.poi.ss.usermodel.Cell;
import org.apache.poi.ss.usermodel.Row;
import org.apache.poi.ss.usermodel.Sheet;
import org.apache.poi.ss.usermodel.Workbook;
import org.apache.poi.ss.usermodel.WorkbookFactory;
import org.apache.poi.xssf.usermodel.XSSFWorkbook;

public class ExcelController {


      // Mit dieser Methode werden die berechneten Belastungswerte und
Kommissionierzeiten aus Excel geladen


      public double[][] getBelastungswerte(int sheetnumber, int rows, int startPos, int
endPos) throws InvalidFormatException, FileNotFoundException, IOException {
       //Datenpfad anpassen

            Workbook wb = new XSSFWorkbook(new
FileInputStream("C://Users//t.steinebach//HESSENBOX-DA//Dissertation//Java-
Optimierung//Import-Dateien/Input.xlsx"));   // Pfad ggf. anpassen

            Sheet sheet = wb.getSheetAt(sheetnumber);     // Erste und zweite Mappe der
Exceldatei wird geladen (Anpassung in Zuordnungsstrategie)



            double[][] matrix = new double[rows][endPos - startPos + 1];
            // Werte werden in ein Array abgespeichert

            for (int i = 1; i < rows+1; i++) {


                  Row row = sheet.getRow(i);
```

```
                Iterator<Cell> iterator = row.iterator();

                int j = 0;
                while (iterator.hasNext()) {
                      Cell c = iterator.next();
                      if (j >= startPos && j <= endPos) {
                            try {
                                  matrix[i-1][j-startPos] = c.getNumericCellValue();
                                  } catch (IllegalStateException e) {
                                  e.printStackTrace();
                            }
                      }
                      j++;
                }
                j = 0;
          }

          //    Die folgenden Code-Zeilen koennen auskommentiert bleiben, sie sind zur
Ueberpruefung, ob die richtigen Werte aus Excel geladen werden.
      /*
          for(int i = 0; i < rows; i++) {
                System.out.println("");
          for(int j = 0; j < (endPos - startPos + 1); j++) {
                System.out.print(matrix[i][j] + ", ");
                }
          }

      */
          return matrix;
      }



      public static double[][] exportDataToExcel(String fileName, String tabName,
IloNumVar[][] binMatrix,IloCplex cplex, int writeFile) throws FileNotFoundException,
IOException, UnknownObjectException, IloException
      {
          double[][] SolVec = new double[binMatrix.length][1];
          if (writeFile==0)
          {
          for(int i = 0; i < binMatrix.length; i ++)
          {
                for(int j = 0; j < binMatrix[i].length; j ++)
                {
                      double a = cplex.getValue(binMatrix[i][j]);
                      if(a==1)
                {
                      SolVec[i][0] = j+1;
                }
                }
          }
          }
          else
          {
         //Create new workbook and tab
           Workbook wba = new XSSFWorkbook();
           FileOutputStream fileOut = new FileOutputStream(fileName);
           Sheet sheet = wba.createSheet(tabName);

           //Create 2D Cell Array
```

```
            Row[] row = new Row[binMatrix.length];
            Cell[][] cell = new Cell[row.length][];
            //Define and Assign Cell Data from Given
            for(int i = 0; i < row.length; i ++)
            {
                row[i] = sheet.createRow(i);
                cell[i] = new Cell[binMatrix[i].length];

                for(int j = 0; j < cell[i].length; j ++)
                {
                    cell[i][j] = row[i].createCell(j);
                    double a = cplex.getValue(binMatrix[i][j]);

                    if(a==1)
                    {
                      //System.out.println(j+1);//
                          nur um die Ausgabe im Command Window auszugeben
                      cell[i][0].setCellValue(j+1);

                      SolVec[i][0] = j+1;
                      //System.out.println(SolVec[i][0]);
                    }

                }

            }


          double b=cell[1][1].getNumericCellValue();
          System.out.println(b);
          //Export Data

            wba.write(fileOut);
            fileOut.close();
            System.out.println("File exported successfully");


             }
             return SolVec;
        }

      public static void exportpareto(double[][] pmat, double step) throws
FileNotFoundException, IOException, UnknownObjectException, IloException
      {
            Workbook wba = new XSSFWorkbook();
            FileOutputStream fileOut = new
FileOutputStream("////AWI//WinProfile$//redirection//t.steinebach//Desktop//JavaSKUOutput/
paretoValues.xlsx");
          Sheet sheet = wba.createSheet("Sheet 1");

          Row[] row = new Row[(int) step+2];
          Cell[][] cell = new Cell[(int) step+2][];

          for(int i = 0; i < step+2; i++)
          {
              row[i] = sheet.createRow(i);

                cell[i] = new Cell[pmat[0].length];

            for(int j = 0; j< 5; j++)
```

```
            {
            cell[i][j] = row[i].createCell(j);

            }
          }


            for(int i = 1; i < step+2; i++)
            {
             for(int j = 1; j< 5; j++)
             {
             cell[i][j].setCellValue(pmat[i-1][j-1]);
             cell[i][0].setCellValue((i-1)/step);
             }
            }
          cell[0][0].setCellValue("Lambda");
          cell[0][1].setCellValue("Belastung");
          cell[0][2].setCellValue("Zeit");
          cell[0][3].setCellValue("relative Belastung");
          cell[0][4].setCellValue("relative Zeit");
          wba.write(fileOut);
            fileOut.close();
           // System.out.println("File exported successfully");
      }

}
```

Klasse „Zuordnung_erweitert“:

```
import java.io.FileNotFoundException;
import java.io.FileReader;
import javax.swing.JOptionPane;
import javax.swing.JOptionPane;
import java.io.IOException;

//notwendige Bibliothek fuer Excel-Einlesen wird importiert
import org.apache.poi.openxml4j.exceptions.InvalidFormatException;
import org.apache.poi.openxml4j.exceptions.OpenXML4JException;

import com.sun.xml.bind.v2.runtime.Name;

// CPLEX Bibliothek wird importiert
import ilog.concert.*;
import ilog.cplex.*;

public class Zuordnung_erweitert {

	static double[][] belastungswerte;
	static double[][] kommissionierzeit;
	static double belastungOpt;
	static double zeitOpt;
	static double[][] belastungswerte_norm;
	static double[][] kommissionierzeit_norm;
	static double[][] kombi;
	static double [][] SolVec;
	static double[][] belastungVec;
	static double[][] zeitVec;
	static double ttime;
	static double tstress;
	//static double timeMax;
	//static double stressMax;
	static double[][] paretoMat;

	public static void main(String[] args) throws InvalidFormatException,
FileNotFoundException, IOException, IloException
	{


		 //siehe Zeile 39
		int anzahlSKU = 40; //ggf. anpassen

		int anzahlLagerplaetze = 40; //ggf. anpassen

		//In diesem Bereich sind die Variablen die man anpassen kann

	//=================================================================================
==================================

		double step = 20;
	// Anzahl an Iterationen n+1 (Anzahl an Lambda-Berechnungen)

		int n = 1 ;
	// Modus 1: Pareto Berechnung, Modus 2: Einzeloptimierung

		double Lambda = 0.55;
	// Lambda-Wert (nur relevant bei Einzeloptimierung)
```

```
            int writeFile = 1;
      // Optimierungs Excel File schreiben 1=an 0=aus


      //=================================================================================
==================================

            zeitVec = new double [anzahlSKU][1];
            belastungVec = new double [anzahlSKU][1];
            paretoMat = new double [(int) step+1][10];


            switch(n)
            {

            case 1:

                  for (int z = 0; z <= step; z++)
                  {
                  ExcelController e = new ExcelController();
                  belastungswerte = e.getBelastungswerte(0,40,16,56);
      //ggf. anpassen; Sheet, Reihe (entspricht SKUs), Start Spalte, Ende Spalte

                  kommissionierzeit = e.getBelastungswerte(1,40,11,51);
      //ggf. anpassen; s. oben

                  belastungOpt = berechneOptimierung("Belastungswerte" ,
belastungswerte, anzahlSKU, anzahlLagerplaetze, writeFile); //Ggf. anpassen, wenn die
Beschriftung(nicht die Anzahl) in Zeile 36 geaendert wird

                  zeitOpt = berechneOptimierung("Kommissionierzeit", kommissionierzeit,
anzahlSKU, anzahlLagerplaetze, writeFile);
                  double alpha = (double) z/step ;


                  KombiTest(alpha,belastungOpt, zeitOpt);
      //Ggf. anpassen, wenn die Bezeichnungen in Z. 39 + 40 geaendert werden
                  berechneBiOptimierung(alpha, belastungswerte, kommissionierzeit,
writeFile);

                  belastungswerte = e.getBelastungswerte(0,40,16,56);
                  kommissionierzeit = e.getBelastungswerte(1,40,11,51);
                  for(int i = 0 ; i < anzahlSKU; i++ )
                  {
                  zeitVec[i][0]=kommissionierzeit[i][(int) SolVec[i][0]-1];
                  belastungVec[i][0]=belastungswerte[i][(int) SolVec[i][0]-1];
                  ttime = ttime + zeitVec[i][0];
                  tstress = tstress + belastungVec[i][0];
                  }
                  paretoMat[z][0]=ttime;

                  ttime=0;

                  paretoMat[z][1]=tstress;

                  tstress=0;

                  }
                  double timeMax = (double) paretoMat[0][1];
```

```
                    System.out.println(timeMax);
                    double stressMax =(double) paretoMat[(int)step][0];
                    System.out.println(stressMax);
                    for(int i = 0; i<=step; i++)
                    {

                    paretoMat[i][2]=(double) paretoMat[i][0]/stressMax;
                    paretoMat[i][3]=(double) paretoMat[i][1]/timeMax;
                    }

/*                  for(int i = 0 ; i < 50; i++)
                    {
                          paretoMat[i][3]=(double) paretoMat[i][0]/paretoMat[0][0];
                          System.out.print(paretoMat[i][3]);
                          paretoMat[i][4]=(paretoMat[i][1])/(paretoMat[(int)step][1]);
                          System.out.print(paretoMat[i][4]);
                    }
*/
                    for(int z = 0; z <= step; z++)
                    {
                    System.out.print(paretoMat[z][0] + " ");
                    System.out.print(paretoMat[z][1] + " | ");
                    System.out.print(paretoMat[z][2] + " ");
                    System.out.println(paretoMat[z][3]);
                    }
                    ExcelController.exportpareto(paretoMat,step);
                    break;


              case 2 :
                    ExcelController e = new ExcelController();
                    belastungswerte = e.getBelastungswerte(0,40,16,56);
        //ggf. anpassen; Sheet, Reihe (entspricht SKUs), Start Spalte, Ende Spalte
                    //System.out.println(belastungswerte[0][0]);

                    kommissionierzeit = e.getBelastungswerte(1,40,11,51);
        //ggf. anpassen; s. oben
                    //System.out.println(kommissionierzeit[0][0]);

                    belastungOpt = berechneOptimierung("Belastungswerte" ,
belastungswerte, anzahlSKU, anzahlLagerplaetze, writeFile);
//Ggf. anpassen, wenn die Beschriftung (nicht die Anzahl) in Zeile 36 geaendert wird
                    zeitOpt = berechneOptimierung("Kommissionierzeit", kommissionierzeit,
anzahlSKU, anzahlLagerplaetze, writeFile);

                    //double alpha = 0.5;
                    KombiTest(Lambda, belastungOpt, zeitOpt); //Ggf. anpassen, wenn die
Bezeichnungen in Z. 39 + 40 geaendert werden, Optimalen Werte Belastung + Zeit werden
uebergeben fuer Normierung

                    berechneBiOptimierung(Lambda, belastungswerte, kommissionierzeit,
writeFile); //Gewichtung wird uebergeben und urspr. Werte Zeit + Belastung um Werte fuer
Gewichte direkt zu erhalten

                    belastungswerte = e.getBelastungswerte(0,40,16,56);
                    kommissionierzeit = e.getBelastungswerte(1,40,11,51);
                    for(int i = 0 ; i < 40; i++ )  // ggf. anpassen
                    {
                    zeitVec[i][0]=kommissionierzeit[i][(int) SolVec[i][0]-1];
                    belastungVec[i][0]=belastungswerte[i][(int) SolVec[i][0]-1];
```

```
                        ttime = ttime + zeitVec[i][0];
                        tstress = tstress + belastungVec[i][0];
                        }
                        System.out.println(ttime);
                        System.out.println(tstress);
                        break;
                }


        }

        public static double berechneOptimierung (String name, double [][] eingangswerte,
int anzahlSKU, int anzahlLagerplaetze, int writeFile) throws IloException,
FileNotFoundException, IOException  {

                IloCplex cplex = new IloCplex();

                IloNumVar[][] binMatrix = new IloNumVar[anzahlSKU][anzahlLagerplaetze];
                // Ein Array fuer die binaeren Entscheidungsvariablen wurde angelegt, hier:
Loesung = Binaermatrix

                for (int i = 0; i < anzahlSKU; i++)
                {// i Zeilenindex

                        for (int j = 0; j < anzahlLagerplaetze; j++)        // j Spaltenindex
                        {

                                binMatrix[i][j] = cplex.boolVar();

                        }
                }

                /* Ausdruck der Zielfunktion - jeder Term der Zielfunktion wird einzeln
                ueber die Methode addTerm() hinzugefuegt.
                In dieser Methode werden die Entscheidungsvariablen mit den
                Vorfaktoren aus Excel multipliziert. */

                IloLinearNumExpr objective = cplex.linearNumExpr(); //Addition der lin.
Funktionen fuer jeden Lagerplatz und jedes SKU

                for (int i = 0; i < anzahlSKU; i++)
                {

                        for (int j = 0; j < anzahlLagerplaetze; j++)
                        {

                                objective.addTerm(eingangswerte[i][j], binMatrix[i][j]);
//Zielfunktion

                        }
                }

                // Optimierung der Zielfunktion

                cplex.addMinimize(objective);

                /* Erste und zweite Nebenbedinung - in jeder Zeile und jeder Spalte darf
                genau eine 1 existieren. D.h.: jedes SKU muss genau einem Lagerplatz
                zugeordnet werden. */
```

```
            // Erste Nebenbedingung

            IloNumExpr[] zeilensumme1 = new IloNumExpr [anzahlLagerplaetze];

            for(int i = 0; i < anzahlSKU; i++)
            {

                  for (int j = 0; j < anzahlLagerplaetze; j++)
                  {

                              zeilensumme1 [j] = binMatrix[i][j];

                  }

                        cplex.addEq(cplex.sum(zeilensumme1), 1);

            }

                  // Zweite Nebenbedingung

            IloNumExpr[] spaltensumme1 = new IloNumExpr [anzahlSKU];

            for(int j = 0; j < anzahlLagerplaetze; j++)
            {

                        for (int i = 0; i < anzahlSKU; i++)
                        {

                              spaltensumme1 [i] = binMatrix[i][j];

                        }

                        cplex.addEq(cplex.sum(spaltensumme1), 1);

            }

            // Loesen mit Cplex und Ausgabe des Zielfunktionwerts

            try
            {

                  if(cplex.solve())
                  {

                        System.out.println("Solution status= " + cplex.getStatus());
                        System.out.println("objective = " + cplex.getObjValue());
                        System.out.println("bestobjective = " +
cplex.getBestObjValue());
                        System.out.println("value = " + cplex.getValue(objective));

                        System.out.println();

                        // Ausgabe der Binaermatrix in der Console, wird nicht
                        benoetigt, da direkter Export in Excel erfolgt

                  /*
                        for (int i = 0; i < anzahlSKU; i++) {
                              System.out.println("" + i);
                              for (int j = 0; j < anzahlLagerplaetze; j++) {
```

```
                                        System.out.print(cplex.getValue(binMatrix[i][j]) +
" ");
                                }
            */

                        //Speichern der BinaerMatrix in Excel
                        //Speicherort anpassen


                                        String
Filename="////AWI//WinProfile$//redirection//t.steinebach//Desktop//JavaSKUOutput/BinaryOu
tput" + name + ".xlsx";
                                        SolVec=ExcelController.exportDataToExcel(Filename,
"Daten", binMatrix, cplex, writeFile);


                        // Ausgabe der Binaermatrix in der Console

                        }

                  else
                  {
                        System.out.println("Model not solved");
                        cplex.end();
                  }
            }

            catch (IloException exc)
            {

            exc.printStackTrace();

            }

            return cplex.getBestObjValue();


}

      public static double [][] KombiTest (double lambdavar, double OptimumBelastung,
double OptimumZeit)
      {

            int dim = 40;
            kombi = new double [dim][dim];

            double[][] belastungswerte_norm = belastungswerte;
            double[][] kommissionierzeit_norm = kommissionierzeit;


            for (int i=0; i<dim;i++)
            {

                  for (int j=0; j<dim;j++)
                  {

                        belastungswerte_norm[i][j]= lambdavar*((belastungswerte
[i][j]/OptimumBelastung)-1);
```

```
                        kommissionierzeit_norm[i][j]= (1-
lambdavar)*((kommissionierzeit[i][j]/OptimumZeit)-1);


      kombi[i][j]=belastungswerte_norm[i][j]+kommissionierzeit_norm[i][j];

                  }
            }
            System.out.println(kombi[1][1]);
            System.out.println(belastungswerte_norm[1][1]);
            System.out.println(kommissionierzeit_norm[1][1]);
            return kombi;

      }

      public static void berechneBiOptimierung (double lambda, double[][] WerteBelastung,
double [][] WerteZeit, int writeFile) throws IloException, FileNotFoundException,
IOException  {

            IloCplex cplex = new IloCplex(); //generelle Klasse um Optimierungsprobleme
            zu formulieren + zu loesen

            int anzahlSKU = 40; // Ist entsprechend der Anwendung anzupassen
            int anzahlLagerplaetze = 40; // Ist entsprechend der Anwendung anzupassen


            IloNumVar[][] binMatrix = new IloNumVar[anzahlSKU][anzahlLagerplaetze];
            //IloNumVar: Modellvariablen
            // Ein Array fuer die binaeren Entscheidungsvariablen wurde angelegt, hier:
            Loesung = Binaermatrix

                  for (int i = 0; i < anzahlSKU; i++) { // i Zeilenindex
                  for (int j = 0; j < anzahlLagerplaetze; j++) { // j Spaltenindex
                        binMatrix[i][j] = cplex.boolVar(); //Bool. Variable (Aufruf
                        ueber cplex Klasse) = Eintrag in der Zelle der Matrix
                  }
            }

            /* Ausdruck der Zielfunktion - jeder Term der Zielfunktion wird einzeln
            ueber die Methode addTerm() hinzugefuegt.
            In dieser Methode werden die Entscheidungsvariablen mit den
            Vorfaktoren aus Excel multipliziert. */


            IloLinearNumExpr objectiveBi = cplex.linearNumExpr();

                  for (int i = 0; i < anzahlSKU; i++) {

                  for (int j = 0; j < anzahlLagerplaetze; j++) {
                        objectiveBi.addTerm(kombi[i][j], binMatrix[i][j]);
//Zielfunktion
                        }
                  }

            // Optimierung der Zielfunktion


            cplex.addMinimize(objectiveBi);

            /* Erste Nebenbedingung - in jeder Zeile und jeder Spalte darf genau eine 1
```

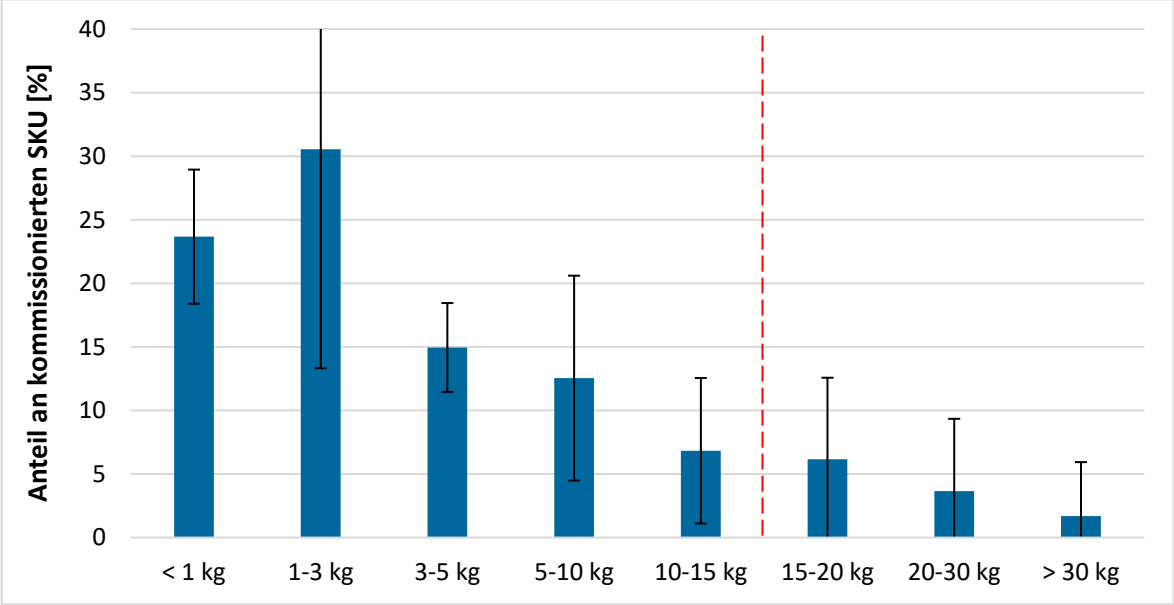
```
            existieren. D.h.: jedes SKU muss genau einem Lagerplatz zugeordnet
            werden. */


                  IloNumExpr[] zeilensumme1 = new IloNumExpr [anzahlLagerplaetze];

                  for(int i = 0; i < anzahlSKU; i++) { //alt

                        for (int j = 0; j < anzahlLagerplaetze; j++) {

                              zeilensumme1 [j] = binMatrix[i][j];

                        }

                        cplex.addEq(cplex.sum(zeilensumme1), 1);

                  }

                  /* Zweite Nebenbedingung - in jeder Zeile und jeder Spalte darf genau
                  eine 1 existieren. D.h.: jedes SKU muss genau einem Lagerplatz
                  zugeordnet werden. */


                  IloNumExpr[] spaltensumme1 = new IloNumExpr [anzahlSKU];

                  for(int j = 0; j < anzahlLagerplaetze; j++) { //alt

                        for (int i = 0; i < anzahlSKU; i++) {

                              spaltensumme1 [i] = binMatrix[i][j];

                        }

                        cplex.addEq(cplex.sum(spaltensumme1), 1);

                  }

            // Loesen mit Cplex und Ausgabe des Zielfunktionwerts

            try {

                  if(cplex.solve()) {

                        System.out.println("Solution status= " + cplex.getStatus());
                        System.out.println("objective = " + cplex.getObjValue());
                        System.out.println("bestobjective = " +
cplex.getBestObjValue());
                        System.out.println("value = " + cplex.getValue(objectiveBi));

                        System.out.println();

                        // Ausgabe der Binaermatrix in der Console // kann
auskommentiert bleiben, Daten werden automatisch in Excel exportiert

                  /*
                        for (int i = 0; i < anzahlSKU; i++) {
                              System.out.println("" + i);
                              for (int j = 0; j < anzahlLagerplaetze; j++) {
                                    System.out.print(cplex.getValue(binMatrix[i][j]) +
" ");
```

```
                                }
            */

                        //Speichern der BinaerMatrix in Excel
                        //Speicherort anpassen!


                        String
Filename="////AWI//WinProfile$//redirection//t.steinebach//Desktop//JavaSKUOutput/BinaryOu
tput" + "Bi" + lambda + ".xlsx";
                        SolVec = ExcelController.exportDataToExcel(Filename, "Daten",
binMatrix, cplex, writeFile);


                  }

            else {
                        System.out.println("Model not solved");
                        cplex.end();
                  }
            }

            catch (IloException exc) {
            exc.printStackTrace();

            }

      }
}
```

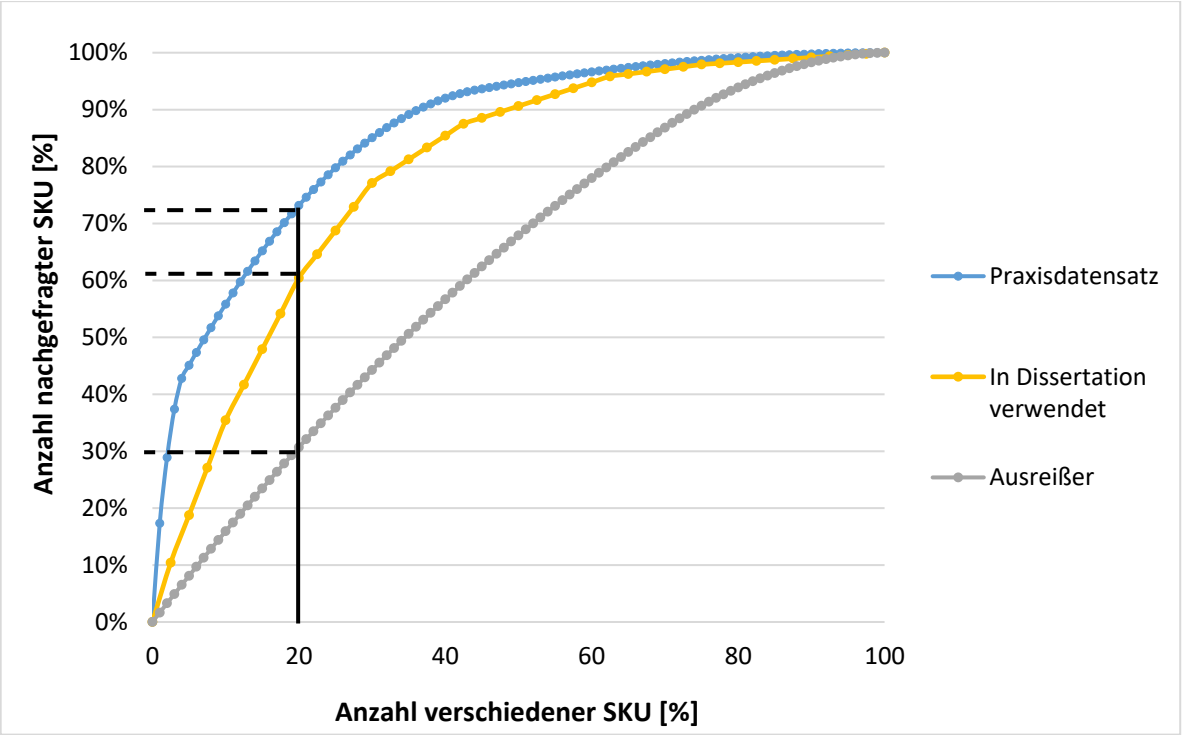
H SKU-Portfolio: Orientierung an Praxiserhebung

Im Rahmen des IGF-Vorhabens 21292 N/2 „Planungskonzepte manueller Lagerhaltungsprozesse“, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages, wurde mittels Fragebogen und einem anschließenden Interviews Daten aus insgesamt zehn Industrieunternehmen gesammelt.

Im Folgenden ist die Gewichtsverteilung der Fragebogenstudie dargestellt. Die Informationen wurden den WMS der Partnerunternehmen entnommen. Im Versuch wurden aus ethischen Gründen keine Lastgewichte > 15 kg verwendet.



Nachfolgend ist die Nachfrageverteilung der Artikel aufgetragen. Aus den Praxisdatensätzen ergibt sich in etwa eine 20-70-Verteilung (vgl. Battini et al., 2016; Larco et al., 2017). Dies bedeutet, dass 20 % der Artikel für 70 % der Picks (bzw. der Nachfrage) sorgen. Die 20-70 Verteilung wurde mit den 40 im Versuch zur Verfügung stehenden SKU versucht gut nachzubilden. Da es aus versuchstechnischen Gründen nicht möglich war, einzelne SKU deutlich häufiger als fünfmal je Szenario kommissionieren zu lassen, konnte die Kurve nicht ganz so steil ansteigend gestaltet wreden, wie die Kurve aus der Fragebogenstudie. Die entstehende Nachfrageverteilung ist dieser mit einer 20-60-Verteilung jedoch recht nah. Zum Vergleich ist die Nachfrageverteilung eines Unternehmens gezeigt, die als Ausreißer gilt (etwa 20-30-Verteilung) und nicht in dem „Interviewdatensatz“ verwendet wurde.



Weitere Informationen können ab Juli 2022 dem Abschlussbericht des Forschungsvorhabens entnommen werden.

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

I Übersicht über das SKU-Portfolio

Folgendes SKU-Portfolio wurde in Anlehnung an die Datenanalyse der Industrieunternehmen für die Kommissionierversuche erstellt:

SKU Nr.	Zugriffshäufigkeit	Lastgewicht [kg]
1	0,1	0,25
2	0,1	0,5
3	0,1	1
4	0,1	2
5	0,1	3
6	0,1	6
7	0,1	11
8	0,1	0,75
9	0,1	0,25
10	0,1	3
11	0,2	1
12	0,2	4
13	0,2	5
14	0,2	9
15	0,2	0,5
16	0,5	2
17	0,5	0,75
18	0,5	2
19	0,5	3
20	0,5	5
21	0,5	15
22	0,5	1
23	0,5	3
24	1	4
25	1	0,5
26	1	3
27	1	0,25
28	1	2
29	2	12
30	2	3
31	2	5
32	2	0,5
33	3	1
34	3	14
35	3	3
36	3	0,75
37	4	8
38	4	2
39	4	10
40	5	7

J Fragebogenteil A, B und C

ID

Technische Universität Darmstadt
Institut für Arbeitswissenschaft

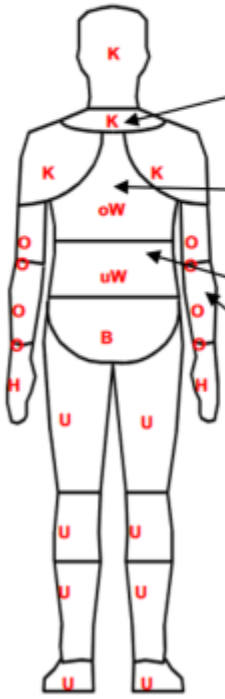
iad

Fragebogen A: Angaben zu Ihrer Person (vor dem Versuch)

A1	Alter:	_____ Jahre
A2	Geschlecht:	weiblich ☐ männlich ☐
A3	Körpergröße:	_____ cm
A4	Haben Sie gesundheitliche Beschwerden des Muskel-Skelett-Systems? Wenn ja, bitte beschreiben und auf nächster Seite ergänzen.	
A5	Wie viele Stunden pro Woche treiben Sie Sport?	_____ Stunden
A6	Welche Hand ist ihre Dominante?	links ☐ rechts ☐
A7	In welcher Branche übten Sie Kommissioniertätigkeiten aus?	Automobil ☐ Chemie & Pharma ☐ Elektronik & IT ☐ Energie & Umwelt ☐ Handel ☐ Luft- und Raumfahrt ☐ Maschinenbau ☐ Telekommunikation & Internet ☐ Textilien ☐ Sonstiges: ☐ _____
A8	Wie viele Jahre haben Sie Erfahrung in der Kommissionierung?	< 1 Jahr ☐ > 1 Jahr ☐ > 3 Jahre ☐ > 5 Jahre ☐ > 10 Jahre ☐
A9	Wie schätzen Sie Ihre Pickleistung im Vergleich mit Ihren Kollegen ein? (Pickleistung = Anzahl an Picks je Stunde)	☐ viel besser ☐ etwas besser ☐ gleich ☐ etwas schlechter ☐ viel schlechter
A10	Wie schätzen Sie Ihre Pickqualität im Vergleich mit Ihren Kollegen ein? (Pickqualität = Anzahl an fehlerhaft gepickten Artikeln)	☐ viel besser ☐ etwas besser ☐ gleich ☐ etwas schlechter ☐ viel schlechter

Ergänzung zu Frage A4:

Haben Sie Symptome, die auf arbeitsbedingte Tätigkeiten zurückzuführen sind?



Kopf-Schulter-Nacken (K)				
keine Symptome	kaum Symptome	mittelstarke Symptome	eher starke Symptome	starke Symptome

oberer Rücken (oW)				
keine Symptome	kaum Symptome	mittelstarke Symptome	eher starke Symptome	starke Symptome

unterer Rücken (uW)				
keine Symptome	kaum Symptome	mittelstarke Symptome	eher starke Symptome	starke Symptome

obere Extremitäten (O)				
keine Symptome	kaum Symptome	mittelstarke Symptome	eher starke Symptome	starke Symptome

ID

Technische Universität Darmstadt
Institut für Arbeitswissenschaft

iad

Fragebogen B: Borg RPE (während des Versuchs vom Versuchsleiter auszufüllen)

		vor Beginn des Szenarios	nach der Hälfte der Picks im Szenario	nach Beendigung des Szenarios
B1	Subjektive Beanspruchung Szenario 1			
B2	Subjektive Beanspruchung Szenario 2			
B3	Subjektive Beanspruchung Szenario 3			
B4	Subjektive Beanspruchung Szenario 4			

Bitte die subjektive Beanspruchung nach der Borg RPE-Skala angeben!

6 Überhaupt nicht anstrengend
7
8 Extrem leicht
9 Sehr leicht
10
11 Leicht
12
13 Etwas anstrengend
14
15 Anstrengend schwer
16
17 Sehr anstrengend
18
19 Extrem anstrengend
20 Maximale Anstrengung

Fragebogen C: Ergänzende Angaben (nach dem Versuch auszufüllen)

Bitte kreuzen Sie an, inwiefern Sie den folgenden Aussagen bezüglich der durchgeführten Kommissionierszenarien zustimmen:

		1 stimme nicht zu	2 stimme eher nicht zu	3 weder noch	4 stimme eher zu	5 stimme voll zu
C1	Die Artikelgewichte im Versuch waren vergleichbar mit jenen aus meiner Kommissioniererfahrung.					
C2	Die Tätigkeiten im Versuch waren vergleichbar körperlich anstrengend mit jenen aus meiner Kommissioniererfahrung.					
C3	Die technische Ausstattung im Versuch war vergleichbar mit jener aus meiner Kommissioniererfahrung.					
C4	Das Lagerlayout (die Anordnung der Regale) war vergleichbar mit jenem aus meiner Kommissioniererfahrung.					
C5	Das Messequipment hat mich kaum bei meiner Arbeit eingeschränkt.					

Falls Sie bei einer der Fragen die Antwort „1" oder „2" gewählt haben, geben Sie an, inwiefern der Versuch abweicht:

zu C1: Die Artikelgewichte im Versuch waren... ☐ leichter ☐ schwerer

zu C2: Der Versuch war... ☐ anstrengender ☐ weniger anstrengend

zu C3: Beschreiben sie die Abweichung: _____

zu C4: Beschreiben Sie die Abweichung: _____

zu C5: Beschreiben Sie die Einschränkungen: _____

Sonstige Anmerkungen: _____

_____

_____

K MATLAB-Auswerteskript für EA-Werte

Zur Auswertung der Ruhewerte (Katzenbach, 2021):

```
% Skript um Ruhe-Datensätze aus .mat Datei auszulesen und Ruhewerte in .xlsx auszugeben
clear all;
source = 'Quelle eingeben';
load(source);

n_muscles = length(channelNames); % Anzahl Muskeln

% Quantilwerte zur Ausreißerbeseitigung, aktuell auf 5 und 95, alle Werte
% außerhalb dieser Quantile werden aus dem Datensatz entfernt
k_top = 95;
k_buttom = 5;


% Eingabe von Probenandenname
prompt = "Enter Name:";
dlgtitle = 'Input';
dims = [1 50];
answer = inputdlg(prompt,dlgtitle,dims);

prob_name = string(answer{1,1});

% Fasse alle Datensätze zusammen und plotte
Combine = [Data{1, :}];
plot(Combine)

Combine2 = Combine;
s = 1;
del_index = [];

%Allocate & Pre-Allocate Arrays
Name(1:n_muscles, 1) = prob_name;
Muscle = string(channelNames)';
Amount(1:n_muscles, 1) = length(Combine2(:,1));
Mean = zeros(n_muscles, 1);
Std = zeros(n_muscles, 1);
Var = zeros(n_muscles, 1);
Max = zeros(n_muscles, 1);
Min = zeros(n_muscles, 1);
dynEA = zeros(n_muscles, 1);

Data_ber = cell(1, n_muscles);

% Bereinige Daten (5% und 95% Quantil für jeden Muskel) und speichere
% Daten in Zellen ab
for i=1:n_muscles
    Combine2 = Combine(:, i);
    a = prctile(Combine2(:, 1), k_buttom);
    b = prctile(Combine2(:, 1), k_top);
    Combine2_ber = Combine2;
    Combine2_ber(Combine2_ber(:,1)<a | Combine2_ber(:,1)>b,:)=[];
    c = prctile(Combine2(:, 1), 5);
    d = prctile(Combine2(:, 1), 95);
    Data_ber{1, i} = Combine2_ber;
    Mean(i, 1) = mean(Combine2_ber(:, 1));
    Std(i, 1) = std(Combine2_ber(:, 1));
    Var(i, 1) = var(Combine2_ber(:, 1));
    Min(i, 1) = min(Combine2_ber(:, 1));
    Max(i, 1) = max(Combine2_ber(:, 1));
    dynEA(i, 1) = d - c;
end

% Speichere deskriptive Daten in Tabelle
Z = table(Name, Muscle, Amount, Mean, Std, Var, Min, Max, dynEA);

% Schreibe Taebelle in Excel Sheet
filename = "EMG_Ruhemessung_" + prob_name + ".xlsx";
writetable(Z,filename);
```

Zur Auswertung der einzelnen Szenarien in den Kommissionierversuchen (Katzenbach, 2021):

```
% Skript um Datensätze aus .mat Datei auszulesen und Statisiken in .xlsx auszugeben
% Version 2.0 - hier werden keine Daten außerhalb 5 & 95% Quantil gelöscht
clear all;
source = 'Quelle eintragen';
load(source);

% Quantilwerte zur Ausreißerbeseitigung, aktuell auf 0 und 100, um alle Daten zu behalten
% Werden hier Werte ungleich 0 und 100 eingetragen, so werden alle Werte
% außerhalb dieser Quantile aus dem Datensatz entfernt
k_top = 100;
k_buttom = 0;

% Quantilsberechnung für statische und dyn Beanspruchung
q_top = 95;
q_buttom = 5;

n_muscles = length(channelNames); % Anzahl Muskeln ermitteln

% Zeilenbezeichnung für Abfragefenster
M_promt = cell(1, n_muscles);
for i=1:n_muscles
    M_promt{1, i}  = "Enter Rest Measurement " + channelNames{1,i};
end

% Eingabefenster für Probanden Nummer, Durchgang, Lambda und Ruhewerte
prompt = [{"Enter Name:", "Enter Test Run:", "Enter Lambda:", }, M_promt];
dlgtitle = 'Input';
dims = [1 50];
answer = inputdlg(prompt,dlgtitle,dims);

% Antworten einlesen
prob_name = string(answer{1,1});
run_number = string(answer{2,1});
val_lambda = string(answer{3,1});
Ruhe = str2double(string(answer(4:end)));

% Jedem Messwert entsprechenden Marker zuordnen
arr_markers = [];
s = 1; % in Zeile eins wird zuerst in arr_markers geschrieben
for i=0:length(Markers)
    if i == length(Markers)
        e = length_sec * samplingRate;
    else
        e = (Markers(i+1)*samplingRate)-1;
    end
    arr_markers(int32(s):int32(e)) = i;
    s = e + 1;
end
arr_markers = arr_markers';

% Fasse alle Datensätze plus Marker zusammen, speichere als CSV und plotte
Combine = [Data{1, :}, arr_markers];
filename = strcat('EMG_Combined_' + prob_name + '_lambda_', num2str(val_lambda), '.csv');
writematrix(Combine, filename);
plot(Combine)

Combine2 = Combine;
s = 1;

% Lösche alle Werte, die sich nicht zwischen ungeradem und geradem Marker
% befinden
del_index = [];

for i=0:1:length(Markers)
    if i == length(Markers)
        e = length_sec * samplingRate;
    else
        e = (Markers(i+1)*samplingRate)-1;
    end

    if rem(i, 2) == 0
        del_index = [del_index, [s:e]];
    end

    s = e + 1;
end
```

```
Combine2(int32(del_index),:) = [];

% Allocate & Pre-Allocate Arrays
% Über alle Picks hinweg (ohne Laufwege)
Name(1:n_muscles, 1) = prob_name;
Run(1:n_muscles, 1) = run_number;
Muscle = string(channelNames)';
Lambda(1:n_muscles, 1) = val_lambda;
Amount = zeros(n_muscles, 1);
Mean = zeros(n_muscles, 1);
Std = zeros(n_muscles, 1);
Var = zeros(n_muscles, 1);
Max = zeros(n_muscles, 1);
Min = zeros(n_muscles, 1);
statEA = zeros(n_muscles, 1);
dynEA = zeros(n_muscles, 1);

% Werte für gesamte Versuchsdauer (inklusive Laufwege)
T_Name(1:n_muscles, 1) = prob_name;
T_Run(1:n_muscles, 1) = run_number;
T_Muscle = string(channelNames)';
T_Lambda(1:n_muscles, 1) = val_lambda;
T_Amount(1:n_muscles, 1) = zeros(n_muscles, 1);
T_Mean = zeros(n_muscles, 1);
T_Std = zeros(n_muscles, 1);
T_Var = zeros(n_muscles, 1);
T_Max = zeros(n_muscles, 1);
T_Min = zeros(n_muscles, 1);
T_statEA = zeros(n_muscles, 1);
T_dynEA = zeros(n_muscles, 1);

Data_ber = cell(1, n_muscles);
T_Data_ber = cell(1, n_muscles);

% Speiche Daten für einzelne Picks
zeilen = n_muscles * length(Markers)/2;
X_Name = strings(zeilen, 1);
X_Run = zeros(zeilen, 1);
X_Lambda = zeros(zeilen, 1);
X_Muscle = strings(zeilen, 1);
X_Pick = zeros(zeilen, 1);
X_Amount = zeros(zeilen, 1);
X_Mean = zeros(zeilen, 1);
X_Std = zeros(zeilen, 1);
X_Var = zeros(zeilen, 1);
X_Min = zeros(zeilen, 1);
X_Max = zeros(zeilen, 1);
X_statEA = zeros(zeilen, 1);
X_dynEA = zeros(zeilen, 1);

% Bereinige Daten (k_button und k_top Quantil für jeden Muskel) und speichere
% Daten in Zellen ab (inklusive der Markerbereiche)
% Berechne deskriptive Statistiken über alles hinweg (inkl. Laufwege)
for i=1:n_muscles
    T_Combine = Combine(:, [i, n_muscles + 1]);
    a = prctile(T_Combine(:, 1), k_buttom);
    b = prctile(T_Combine(:, 1), k_top);
    T_Combine_ber = T_Combine;
    T_Combine_ber(T_Combine_ber(:,1)<a | T_Combine_ber(:,1)>b,:)=[];
    c = prctile(T_Combine_ber(:, 1), q_buttom);
    d = prctile(T_Combine_ber(:, 1), q_top);
    T_Data_ber{1, i} = T_Combine_ber;
    T_Amount(i, 1) = length(T_Combine_ber);
    T_Mean(i, 1) = mean(T_Combine_ber(:, 1));
    T_Std(i, 1) = std(T_Combine_ber(:, 1));
    T_Var(i, 1) = var(T_Combine_ber(:, 1));
    T_Min(i, 1) = min(T_Combine_ber(:, 1));
    T_Max(i, 1) = max(T_Combine_ber(:, 1));
    T_statEA(i, 1) = c - Ruhe(i,1);
    T_dynEA(i, 1) = d - c;
end

% Bereinige Daten (k_button und k_top Quantil für jeden Muskel) und speichere
% Daten in Zellen ab (inklusive der Markerbereiche)
% Berechne deskriptive Statistiken über alle Picks hinweg (ohne Laufwege)
for i=1:n_muscles
    Combine3 = Combine2(:, [i, n_muscles + 1]);
```

```
    a = prctile(Combine3(:, 1), k_buttom);
    b = prctile(Combine3(:, 1), k_top);
    Combine3_ber = Combine3;
    Combine3_ber(Combine3_ber(:,1)<a | Combine3_ber(:,1)>b,:)=[];
    c = prctile(Combine3_ber(:, 1), q_buttom);
    d = prctile(Combine3_ber(:, 1), q_top);
    Data_ber{1, i} = Combine3_ber;
    Amount(i, 1) = length(Combine3_ber);
    Mean(i, 1) = mean(Combine3_ber(:, 1));
    Std(i, 1) = std(Combine3_ber(:, 1));
    Var(i, 1) = var(Combine3_ber(:, 1));
    Min(i, 1) = min(Combine3_ber(:, 1));
    Max(i, 1) = max(Combine3_ber(:, 1));
    statEA(i, 1) = c - Ruhe(i,1);
    dynEA(i, 1) = d - c;
end

% Berechne deskriptive Statistiken pro einzelnem Pick
zeile = 1; % Zeile in die die Werte geschrieben werden
for i=1:n_muscles
    for j=1:length(Markers)/2
        marker = (j*2)-1;
        c = prctile(Data_ber{1,i}(Data_ber{1,i}(:,2) == marker, 1), q_buttom);
        d = prctile(Data_ber{1,i}(Data_ber{1,i}(:,2) == marker, 1), q_top);
        X_Name(zeile, 1) = prob_name;
        X_Run(zeile, 1) = run_number;
        X_Lambda(zeile, 1) = val_lambda;
        X_Muscle (zeile, 1) = string(channelNames{1, i});
        X_Pick (zeile, 1) = j;
        X_Amount(zeile, 1) = length(Data_ber{1,i}(Data_ber{1,i}(:,2) == marker, 1));
        X_Mean(zeile, 1) = mean(Data_ber{1,i}(Data_ber{1,i}(:,2) == marker, 1));
        X_Std(zeile, 1) = std(Data_ber{1,i}(Data_ber{1,i}(:,2) == marker, 1));
        X_Var(zeile, 1) = var(Data_ber{1,i}(Data_ber{1,i}(:,2) == marker, 1));
        X_Min(zeile, 1) = min(Data_ber{1,i}(Data_ber{1,i}(:,2) == marker, 1));
        X_Max(zeile, 1) = max(Data_ber{1,i}(Data_ber{1,i}(:,2) == marker, 1));
        X_statEA(zeile, 1) = c - Ruhe(i,1);
        X_dynEA(zeile, 1) = d - c;
        zeile = zeile + 1;
    end
end


% Erstelle drei Tabellen: 1) Über den gesamten Ablauf hinweg [T], 2) über
% die gesamten Picks hinweg [Z], 3) pro Abschnitt [Y]
T = table(T_Name, T_Run, T_Lambda, T_Muscle, T_Amount, T_Mean, T_Std, T_Var, T_Min, T_Max, T_statEA,
T_dynEA); % Gesamtbetrachtung (inkl. Laufwege)
Z = table(Name, Run, Lambda, Muscle, Amount, Mean, Std, Var, Min, Max, statEA, dynEA); %
Abschnittszusammenfassung (alle Abschnitte, ohne Laufwege)
Y = table(X_Name, X_Run, X_Lambda, X_Muscle, X_Pick, X_Amount, X_Mean, X_Std, X_Var, X_Min, X_Max,
X_statEA, X_dynEA); % einzelne Abschnitte

% Schreibe Werte in Excel Sheet (im gleichen Ordner)
filename = "EMG_PicksOverall_" + prob_name +  "_" + val_lambda + ".xlsx";
writetable(Z,filename);
filename2 = "EMG_Abschnitte_" + prob_name +  "_" + val_lambda + ".xlsx";
writetable(Y,filename2);
filename = "EMG_Overall_" + prob_name +  "_" + val_lambda + ".xlsx";
writetable(T,filename);
```

L Borg RPE Skala und Anleitung

Die Borg RPE Skala (Borg, 1970) sowie die entsprechende Anleitung (Borg, 2004) sind im Folgenden abgedruckt. Ferner wurde ein License Agreement zur Nutzung der Borg RPE Skala bei der „BorgPerception AB“ für diese Versuche eingeholt. Eine validierte deutsche Übersetzung wurde von der BorgPercetion AB mitgeliefert.

Borg RPE Skala (Borg, 1970):

6	**Keine Anstrengung**	Keine Ermüdung der Muskeln Atemlosigkeit oder Atemnot.
7	**Extrem leicht**	Sehr, sehr leichte Belastung.
8		
9	**Sehr leicht**	Wie nach einem kurzen, langsamen Spaziergang. Reden fällt sehr leicht.
10		
11	**Leicht**	Entspricht leichtem Sport in Ihrem Tempo.
12	**Mäßig**	
13	**Recht anstrengend**	Recht mühsam. Ziemlich außer Atem. Reden fällt nicht so leicht.
14		
15	**Anstrengend**	Schwer und mühsam. Obere Grenze für Fitnesstraining, wie beim Laufen oder schnellem Spaziergang.
16		
17	**Sehr anstrengend**	Sehr mühsam. Sie sind sehr erschöpft und außer Atem. Reden fällt sehr schwer.
18		
19	**Extrem anstrengend**	Die größte Anstrengung, die Sie je erlebt haben.
20	**Maximale Anstrengung**	Maximale Erschöpfung.

Anleitung (Borg, 2004):

Anleitung zum Gebrauch der Borg-RPE-Skala

- Die Skala wird zu Beginn der Belastung (zum Beispiel Ergometrietest) dem Probanden gezeigt. Man kann die Skala mit dem erklärenden Text dem Betreffenden auch schon vor dem Belastungstest (zum Beispiel im Wartezimmer) zum Lesen geben.

- Folgende Anleitung ist zu benutzen:
  „Wir wollen Ihr Anstrengungsempfinden während der Belastung bestimmen, das heißt wir wollen feststellen, wie anstrengend für Sie das Ergometertreten (beziehungsweise die Laufbandleistung ist. Das Anstrengungsempfinden hängt von der Beanspruchung und Ermüdung der Muskulatur ab, ferner von Atemlosigkeit (beziehungsweise Luftnot) oder Brustschmerzen."

- Auf dieser Skala bedeutet **6**: überhaupt nicht anstrengend und **20** bedeutet maximale Anstrengung.
- **9**: entspricht einer sehr leichten" Anstrengung, wie bei einer Normalperson das normale Gehen im eigenen Tempo.
- **13**: auf der Skala ist: „etwas anstrengend", man kann bei der Belastung aber gut weitermachen.
- **15**: ist „anstrengend" und „schwer", aber Fortfahren ist noch möglich.
- **17**: „sehr anstrengend". Sie können die Belastung noch weitermachen, sie müssen sich aber sehr anstrengen und sind bald erschöpft.
- **19:** „sehr sehr anstrengend", für die meisten Personen ist dies eine sehr anstrengende Belastung, die stärkste, die sie jemals erlebt haben.

- Versuchen Sie, Ihr Anstrengungsempfinden so spontan und ehrlich wie möglich anzugeben, ohne über die aktuelle Belastung nachzudenken. Versuchen Sie, die Anstrengung weder zu über- noch unterschätzen. Ihre eigene Empfindung von Leistung und Anstrengung ist wichtig, nicht die im Vergleich zu anderen. Schauen Sie auf die Skala und die begleitenden Worte, und geben Sie eine Zahl an.

- Haben Sie noch Fragen?

M Checkliste zur Versuchsdurchführung

Versuchs-abschnitt	Nr.	Tätigkeit	Dauer
Vorbereitung des Versuchs	1	Hochfahren der Systeme: EMG-Laptop, RFID-Laptop (Excel öffnen), Polar Beat App öffnen, Fragebogen bereitlegen, Klebestreifen für Vorverstärker vorbereiten	-
	2	SKU entsprechend des Szenarios einräumen	-
Begrüßung	3	Abholung Proband*in am roten Zahnrad und Begrüßung der Versuchsteilnehmer*in	3 min
	4	Einverständniserklärung Datenschutz, Hygienekonzept und Fragebogen A ausfüllen	5 min
Vorbereitung der Messung	5	Anlegen des Polar-Gurts (mit Wasser befeuchten) und Kontrolle mit App	2 min
	6	Hautvorbereitung (Rasieren + Desinfizieren) und Anlegen des EMG-Systems (Elektroden + Verkabelung), Testen der Funktionalität: reagiert das EMG-Signal klar erkennbar auf Innervierung; Nulllinien-Offset?; Kamera? Auf dominanter Körperseite (Fragen: Rechts- oder Linkshänder?) Kanal 1: m. multifidus Kanal 2: m. erector spinae (Iliocostalis/lumbar) Kanal 3: m. trapezius pars descendens + Referenzelektrode (C7) Kanal 4: m. deltoideus acromialis Kanal 5: m. biceps brachii • Rückenmuskeln im Liegen markieren und im Sitzen (leicht vorgebeugt) bekleben • Fixieren der Vorverstärker mit Klebetape, in vorgebeugter Körperhaltung • Prüfung: Kontakt zwischen T-Shirt, Unterhemd oder Polar-Gurt mit Elektroden vermeiden!	10 min
	7	Ruhemessung auf Liege (EMG + Herzschlagrate)	3 min
	8	MVC-Messung der 5 Muskeln (eine Übung je Muskel; 3 Mal durchführen)	5 min
	9	Erklärung der Pickliste und der Kommissionieraufgabe mit Standardtext (siehe unten)	2 min
Probeszenario	10	Aushändigen der Übungspickliste und Durchführung des Übungsdurchgangs, ggf. Fragen klären	7 min
	11	Kurze Pause (RFID-System resetten)	5 min

	12	Erklärung Borg RPE Skala mit Anleitung	2 min
Szenario 1	13	Aushändigen der Pickliste für Szenario 1	ca. 25 min
	14	Borg RPE: „Wie belastet fühlen Sie sich?“	
	15	Start von Kommissionierszenario 1: - EMG-Messung starten (läuft die Zeit/Kamera?) - Polar-Messung starten - RFID-System: neue Spalte wählen	
	16	Mehrfach gepickte SKU nachlegen!	
	17	Nach der Hälfte der Picks Borg RPE: „Wie belastet fühlen Sie sich?“	
	18	Ende des Kommissionierszenarios: EMG, Polar und Zeitmessung beenden	
	19	Borg RPE: „Wie belastet fühlen Sie sich?“	
Pause 1	20	EMG-Messung, Polar-Messung und RFID-Excelliste mit entsprechender Namenskonvention speichern; EMG-Akku laden	10 min
	21	Umräumen des Lagers zu LPV von Szenario 2	
Szenario 2	22	Aushändigen der Pickliste für Szenario 2	ca. 25 min
	23	Borg RPE: „Wie belastet fühlen Sie sich?“	
	24	Start von Kommissionierszenario 2: - EMG-Messung starten (läuft die Zeit/Kamera?) - Polar-Messung starten - RFID-System: neue Spalte wählen	
	25	Mehrfach gepickte SKU nachlegen!	
	26	Nach der Hälfte der Picks Borg RPE: „Wie belastet fühlen Sie sich?“	
	27	Ende des Kommissionierszenarios: EMG, Polar und Zeitmessung beenden	
	28	Borg RPE: „Wie belastet fühlen Sie sich?“	
Pause 2	29	EMG-Messung, Polar-Messung und RFID-Excelliste mit entsprechender Namenskonvention speichern; EMG-Akku laden	10 min
	30	Umräumen des Lagers zu LPV von Szenario 3	
Szenario 3	31	Aushändigen der Pickliste für Szenario 3	ca. 25 min
	32	Borg RPE: „Wie belastet fühlen Sie sich?“	
	33	Start von Kommissionierszenario 3: - EMG-Messung starten (läuft die Zeit/Kamera?) - Polar-Messung starten - RFID-System: neue Spalte wählen	
	34	Mehrfach gepickte SKU nachlegen!	
	35	Nach der Hälfte der Picks Borg RPE: „Wie belastet fühlen Sie sich?“	

	36	Ende des Kommissionierszenarios: EMG, Polar und Zeitmessung beenden	
	37	Borg RPE: „Wie belastet fühlen Sie sich?“	
Pause 3	38	EMG-Messung, Polar-Messung und RFID-Excelliste mit entsprechender Namenskonvention speichern; EMG-Akku laden	10 min
	39	Umräumen des Lagers zu LPV von Szenario 4	
Szenario 4	40	Aushändigen der Pickliste für Szenario 4	ca. 25 min
	41	Borg RPE: „Wie belastet fühlen Sie sich?“	
	42	Start von Kommissionierszenario 4: - EMG-Messung starten (läuft die Zeit/Kamera?) - Polar-Messung starten - RFID-System: neue Spalte wählen	
	43	Mehrfach gepickte SKU nachlegen!	
	44	Nach der Hälfte der Picks Borg RPE: „Wie belastet fühlen Sie sich?“	
	45	Ende des Kommissionierszenarios: EMG, Polar und Zeitmessung beenden	
	46	Borg RPE: „Wie belastet fühlen Sie sich?“	
Pause 4	47	EMG-Messung, Polar-Messung und RFID-Excelliste mit entsprechender Namenskonvention speichern	3 min
	48	Akku EMG-Gerät an Ladestation anschließen	
Abschluss	49	Proband*in Fragebogen Teil C ausfüllen	3 min
	50	Einsammeln aller Fragebögen und Picklisten	1 min
	51	Abnahme der Messsysteme (EMG, Polar)	3 min
	52	Übergabe der Aufwandsentschädigung und Quittung unterschreiben	1 min
	53	Danksagung und Verabschiedung	1 min
Nachbereitung	54	Übertragung der Ergebnisse (Zeit, Herzschlagfrequenz, Fehler)	

Standardtext:
Sie sind im folgenden Versuch Kommissionierer/Kommissioniererin in einem Lager. Ihre Aufgabe ist es, in vier Durchgängen verschiedene Artikel entsprechend einer Kommissionierliste **in einem möglichst zügigen Tempo, dass Sie einen kompletten Arbeitstag halten können,** von dem entsprechenden Lagerplatz zum Depot zu bringen. Am Depot stellen Sie den Artikel bitte auf der entsprechenden Rollenbahn ab. Zum Transport steht Ihnen ein Kommissionierwagen zur Verfügung, den Sie bitte immer nutzen. Jeder Artikel wird einzeln geholt und zum Depot gebracht!
Die zu kommissionierenden Artikel entnehmen Sie einer Pickliste. Der Lagerplatz ist durch eine Kombination aus Buchstaben und Zahlen angegeben, z. B. 3-B-5.
Dies bedeutet, dass der Artikel sich in Regalreihe 3, auf Platz B (horizontale Komponente) und in Regalebene 5 (vertikale Komponente) befindet.

- Die Regalreihen sind von links nach rechts aufsteigend von Regalreihe 1 bis Regalreihe 8 nummeriert
- Die Plätze sind von A bis O benannt, wobei A ganz vorne und O ganz hinten im Regal angeordnet ist
- Die Regalebenen sind von unten nach oben mit 1 bis 5 durchnummeriert

In einem Probedurchgang werden Sie diese Zuordnung üben.
Ihre beiden Ziele sind: Möglichst kurze Kommissionierzeit in einem Tempo, welches Sie einen Arbeitstag lang halten können und dabei möglichst wenige Fehler.
Als erstes wird Ihnen nun eine Pickliste zur Übung mit 20 Artikeln ausgehändigt. Die Artikel des Übungsdurchgangs sind alle sehr leicht – falls der Artikel nicht vorrätig ist, gehen Sie zum nächsten Artikel über.

N Positives Votum der Ethikkommission und Hygienekonzept

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Technische Universität Darmstadt | Karolinenplatz 5 | 64289 Darmstadt

Herrn
Dr.-Ing. Jurij Wakula
Fachbereich 16

L1|01 507– im Hause

Prof. Dr. Wolfgang Ellermeier
Stellv. Vorsitzender der Ethikkommission

Kontakt über:
Geschäftsstelle der Ethikkommission
Andreas Brenneis

Karolinenplatz 5
64289 Darmstadt

Tel. +49 6151 16 - 20543
ethikkommission@tu-darmstadt.de

03.12.2020

Ihr Antrag EK 49/2020: Analyse des Einflusses einer ergonomischen Lagerplatzvergabe auf die menschliche Leistung und die Beanspruchung in der manuellen Kommissionierung

Sehr geehrter Herr Dr. Wakula

haben Sie Dank für Ihren Antrag vom 11.11.2020. Die hat Ethikkommission den Antrag eingehend erörtert. Sie bewertet das darin beschriebene Vorhaben grundsätzlich als unkritisch, gibt jedoch folgenden Hinweis:

- Das Alter der Versuchspersonen sollte aus Gründen der Datensparsamkeit in Clustern erhoben werden (etwa: 20-24, 25-29, usw.) und bei der Angabe des Geschlechts sollten auch die Optionen „divers" und „keine Angabe" möglich sein.

Aktuell gibt die Ethikkommission zu allen Anträgen zudem durchgängig den Hinweis, dass die Vorgaben der hessischen Landesregierung und die Regelungen und Hinweise der TU Darmstadt zur Corona-Pandemie berücksichtigt werden müssen.

Die Ethikkommission erteilt ein positives Votum mit den genannten Hinweisen.

Mit freundlichem Gruß und den besten Wünschen für Ihre Forschungen

Prof. Dr. Wolfgang Ellermeier
Stellv. Vorsitzender der Ethikkommission

Seite: 1/1

Hygienekonzept für empirische Labor-Studien am IAD

Vor dem Versuch (Probandenauswahl):

- Für die Teilnahme an den Studien dürfen bei den Versuchsteilnehmenden und Versuchsleitenden innerhalb der letzten Woche keine Krankheitszeichen des Coronavirus vorgekommen sein. Typische Krankheitszeichen sind Husten, Schnupfen, Halskratzen und Fieber. Die Krankheitssymptome können bis zu 14 Tage nach Ansteckung auftreten.
- Versuchsteilnehmenden und Versuchsleitenden aus einer Risikogruppe ist die Partizipation an der Studie nicht gestattet (Robert-Koch-Institut [1]):
    - Menschen ab dem 60. Lebensjahr
    - Menschen mit Grunderkrankungen wie Herzkreislaufstörungen, Diabetes, Atemwegserkrankungen, Leber-, Niere- oder Krebserkrankungen – unabhängig vom Alter
    - Menschen mit unterdrücktem Immunsystem (also einer Immunschwäche)
    - Menschen, die gewisse Medikamente einnehmen, die die Immunabwehr unterdrücken (wie z. B. Cortison)
- Den Versuchsteilnehmenden wird eine Schutzausrüstung vom IAD gestellt (Mundschutzmasken und ggf. Handschuhe o.Ä.). [2]
- Getränke werden in Einwegflaschen zur Verfügung gestellt.
- Es darf nur eine Versuchsperson je Zeitslot (vor- bzw. nachmittags) an den Versuchen teilnehmen.
- Die Versuchsteilnehmenden bestätigen schriftlich, dass sie die Hinweise dieses Dokuments zur Kenntnis genommen haben.

Bei Versuchsbeginn:

- Die Versuchsteilnehmenden werden von den Versuchsleitenden im Bereich unmittelbar vor dem Maschinenbaugebäude (Nähe rotes Zahnrad) mit einem Mindestabstand von 1,5 m [3] empfangen und in das Labor geführt.
- Die Versuchsleitenden werden regelmäßig auf das Corona-Virus getestet.
- Den Versuchsteilnehmenden wird ebenfalls ein kostenloser Corona-Schnelltest angeboten. Die Durchführung ist jedoch keine zwingende Voraussetzung für die Teilnahme am Versuch.
- Beim Eintreten in das Labor ist sowohl von den Versuchsleitenden als auch den Versuchsteilnehmenden Handdesinfektionsmittel zu nutzen.
- Entsprechend der 20m²-Regel dürfen max. 4 Personen gleichzeitig im Labor (ca. 90 m²) mit den entsprechenden Mindestabständen aufhalten [4].
- Die Nutzung von medizinischen Mundschutzmasken ist Pflicht.
- Es sind Wasser, Seife, Papierhandtücher und geschlossene Müllbehälter in ausreichender Menge zur Verfügung zu stellen.
- Die Versuchsteilnehmenden bereiten ihre Haut bei EMG-Versuchen möglichst selbst vor (rasieren, desinfizieren).
- Das Anbringen der Elektroden kann nur durch den Versuchsleitenden vorgenommen werden. Hierbei sind von dem Versuchsleitenden Einweghandschuhe zu tragen, die nach der Anbringung der Elektroden entsorgt werden. Zusätzlich zur Mundschutzmaske wird ein Gesichtsschutz aus Kunststoff (Visier aus Plexiglas) beim Anbringen der Elektroden getragen.

Während des Versuchs:

- Es wird versucht in jeder Situation einen Sicherheitsabstand von 1,5 m voneinander einzuhalten.
- Nach Möglichkeit sind die Hände von dem Gesicht fernzuhalten.
- Die Tür zum Labor ist offen zu halten, damit die Nutzung von Türklinken vermieden werden kann.
- Es ist darauf zu achten, dass die Lüftung des Labors während des Versuchs ständig eingeschaltet ist.

Nach dem Versuch:

- Alle Versuchsgegenstände (z. B. Liege, Werkzeuge) sind nach jedem Versuch mit Desinfektionsmittel gründlich zu reinigen. [5]
- Der Fußboden des Labors wird nach den Versuchen ebenfalls gereinigt.
- Das Polar-Brustgurt wird nach jedem Versuchsteilnehmenden desinfiziert.

Referenzen:

[1] https://www.rki.de/DE/Content/InfAZ/N/Neuartiges_Coronavirus/Risikogruppen.html
[2] https://www.rki.de/DE/Content/Infekt/EpidBull/Archiv/2020/19/Art_02.html
[3] https://www.rki.de/DE/Content/InfAZ/N/Neuartiges_Coronavirus/Hygiene.html
[4] https://www.ihk-berlin.de/service-und-beratung/recht-und-steuern/gewerberecht/corona-geschaefte-laeden-und-dienstleistungen-4764616
[5] https://www.rki.de/DE/Content/InfAZ/N/Neuartiges_Coronavirus/Reinigung_Desinfektion.html

Kenntnisnahme:

Name: **Geburtsdatum:**

Vorname: **Telefon/Email:**

Adresse:

Ich bestätige hiermit, dass Ich die in dem mir vorgelegten Hygienekonzept gemachten Anmerkungen zur Kenntnis genommen habe, mir eines Restrisikos bewusst bin und freiwillig an der Studie teilnehmen möchte.

---------- ----------

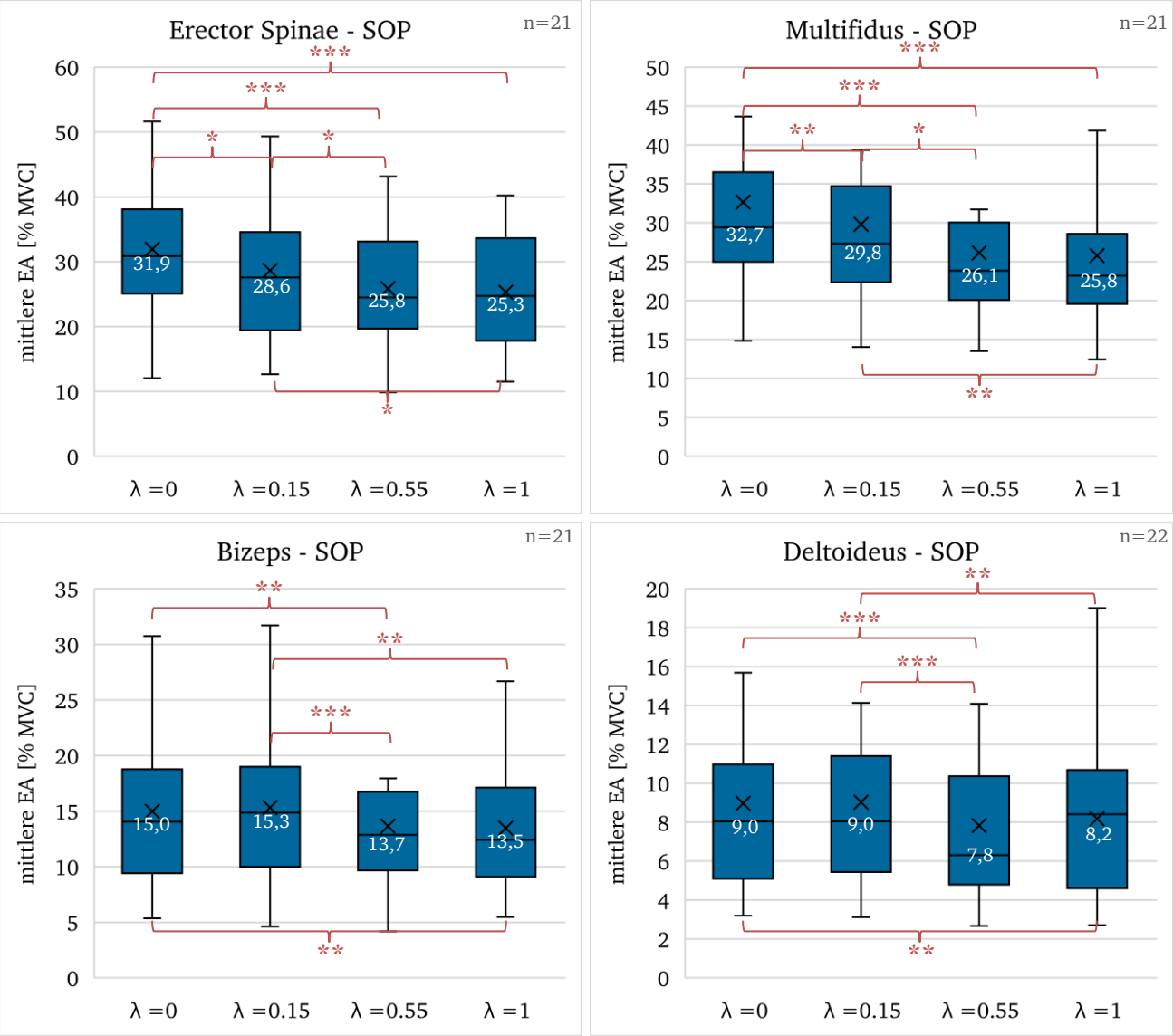
Ort/Datum Unterschrift

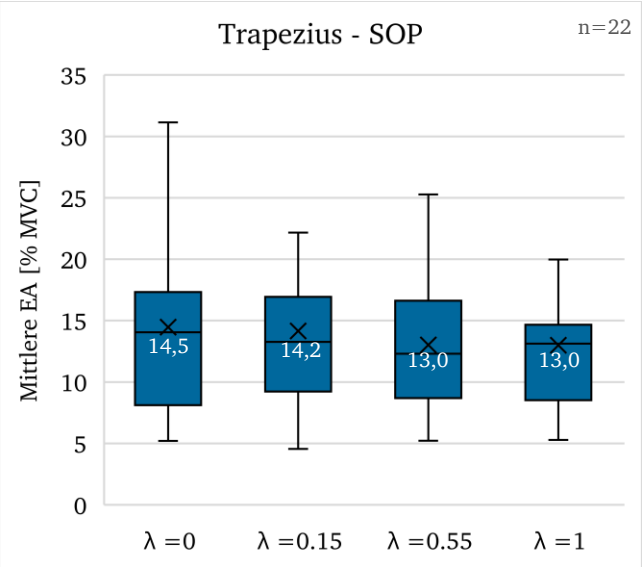
O Weitere Ergebnisse der muskulären Beanspruchung

O.1 Box-Plot Diagramme zur muskulären Beanspruchung getrennt nach SOP und MOP

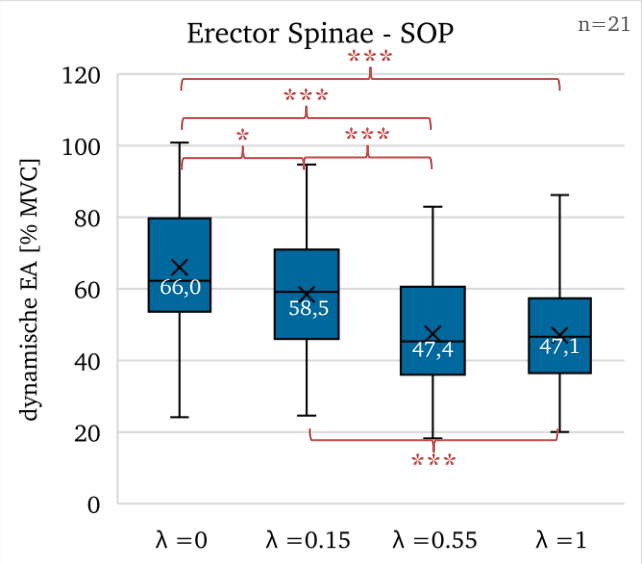
Nachfolgend werden die Box-Plot-Diagramme der mittleren und dynamischen EA für SOP und MOP dargestellt (vgl. Katzenbach, 2021). Die Mittelwerte sind in weiß abgebildet. Signifikante Unterschiede der Mittelwertdifferenzen werden mit einer Klammer gekennzeichnet (*α=0,05; ** α=0,01; *** α=0,001; Bonferroni-korrigiert).

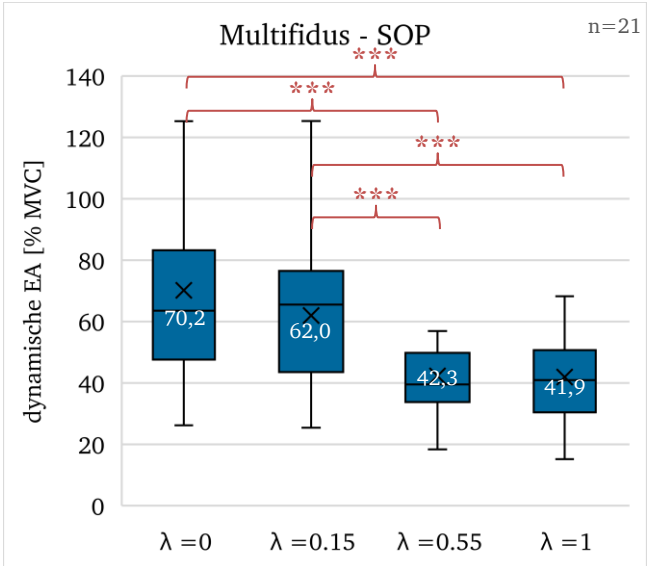
Single-Order Picking, mittlere EA:

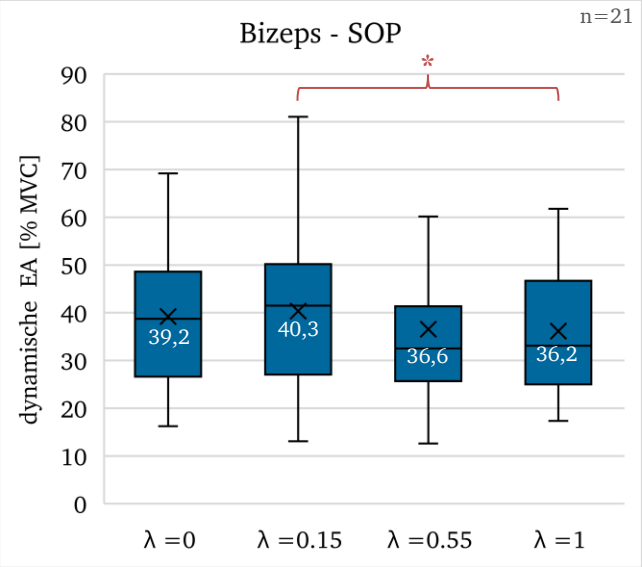


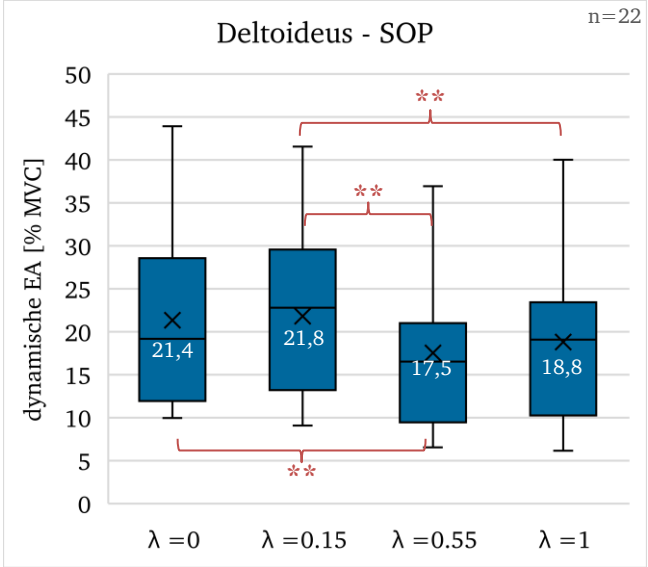


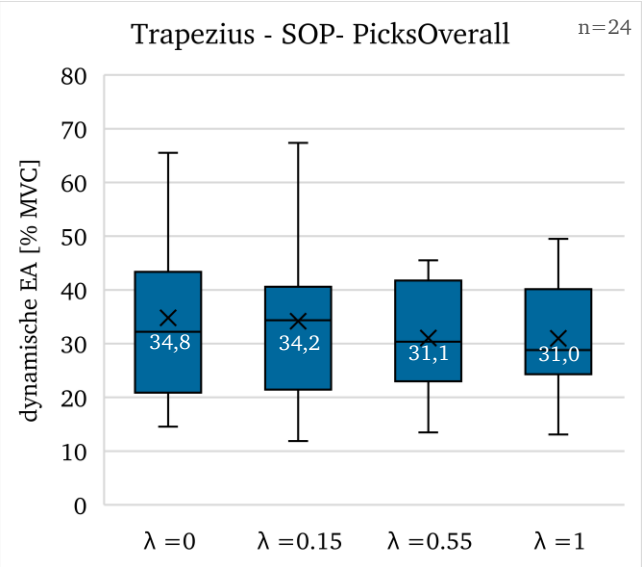
Single-Order Picking, dynamische EA:



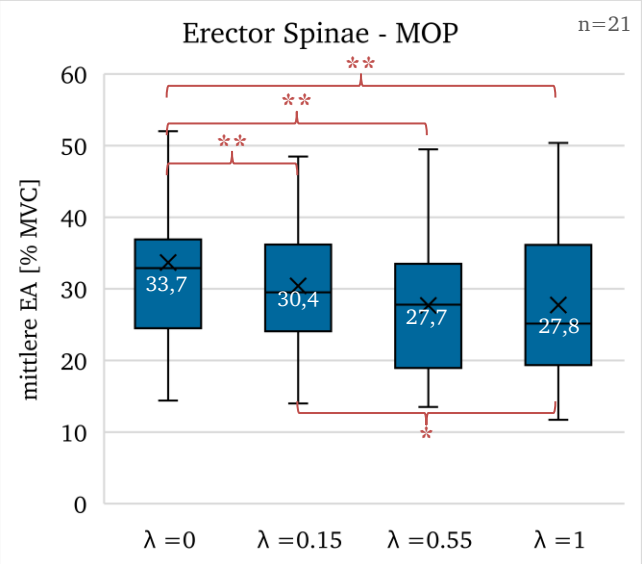


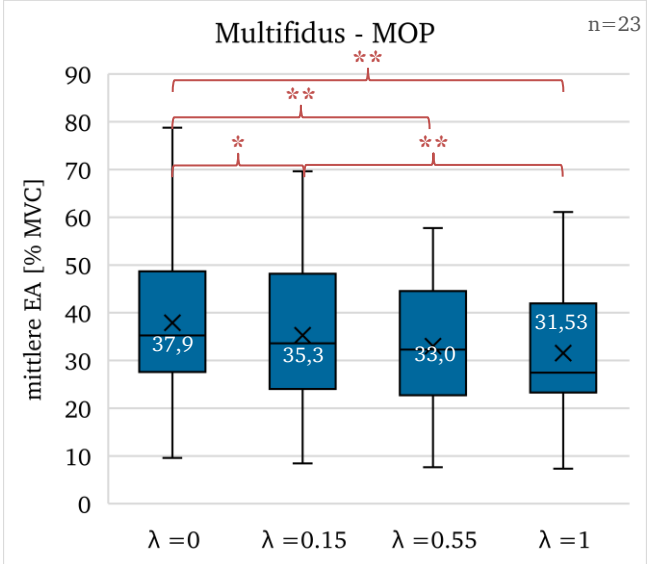


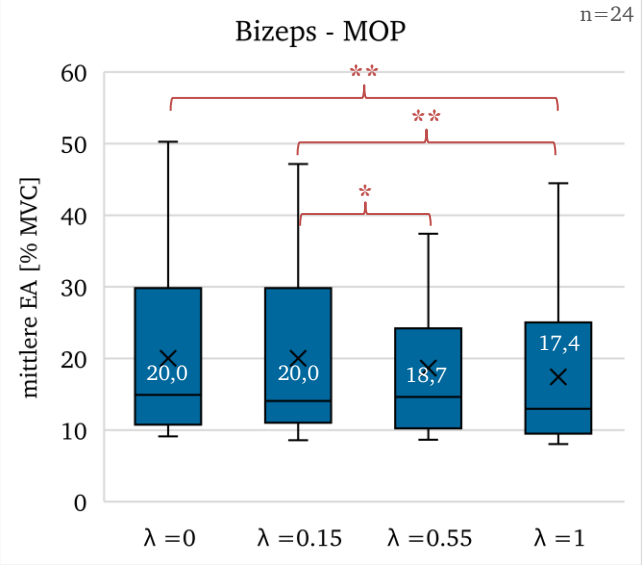


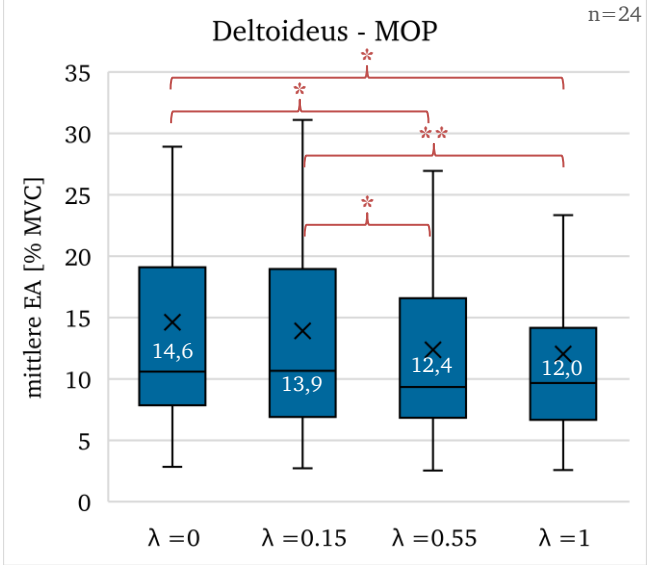


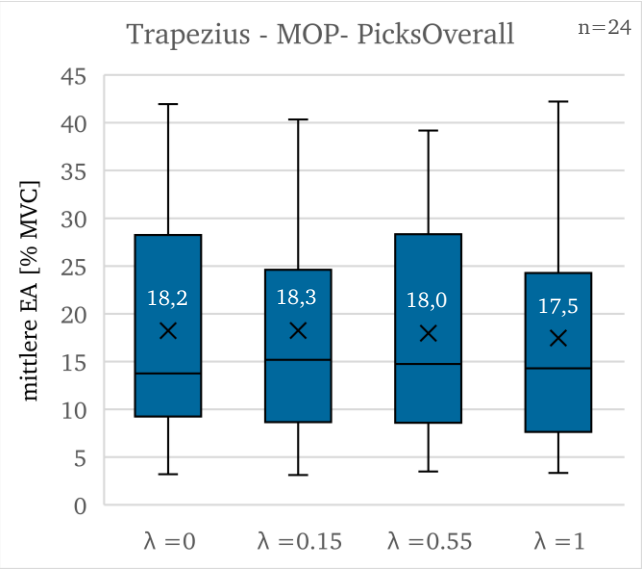
Multi-Order Picking, mittlere EA:



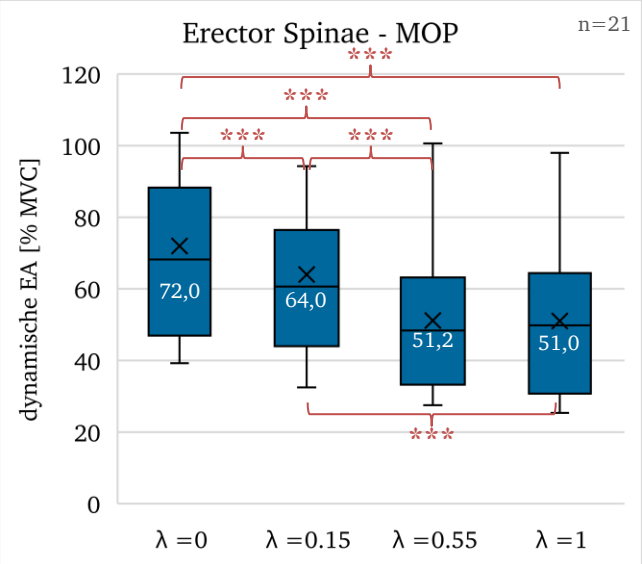


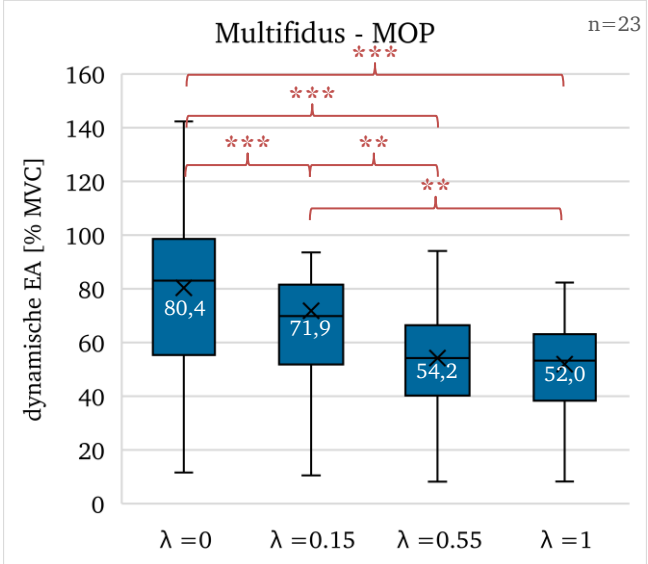


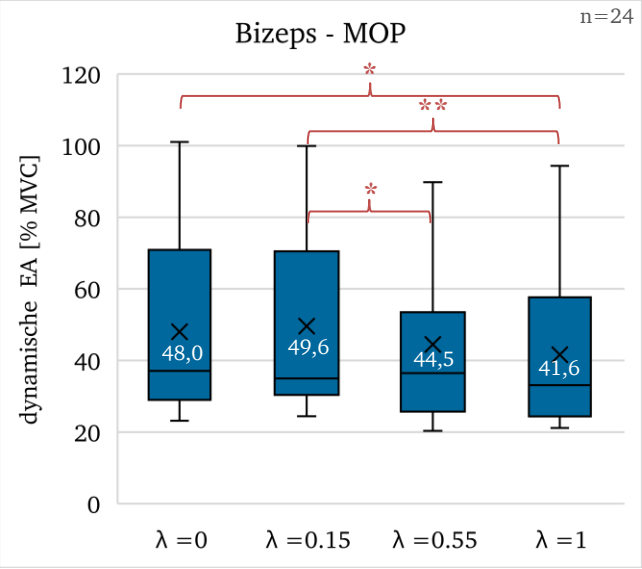


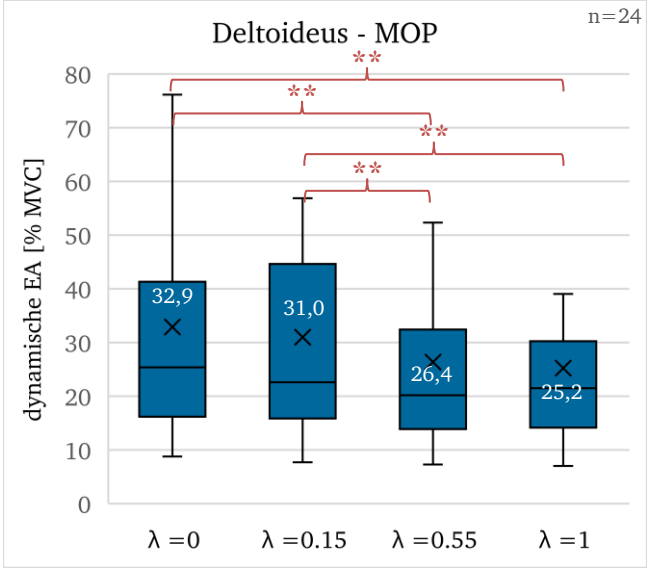


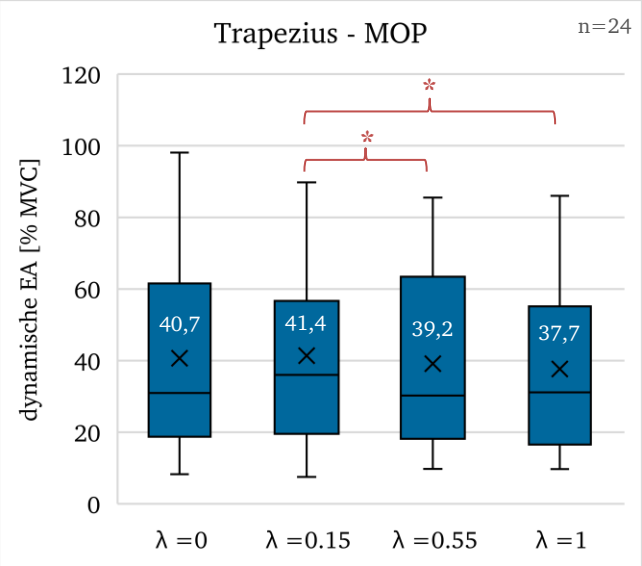
Multi-Order Picking, dynamische EA:





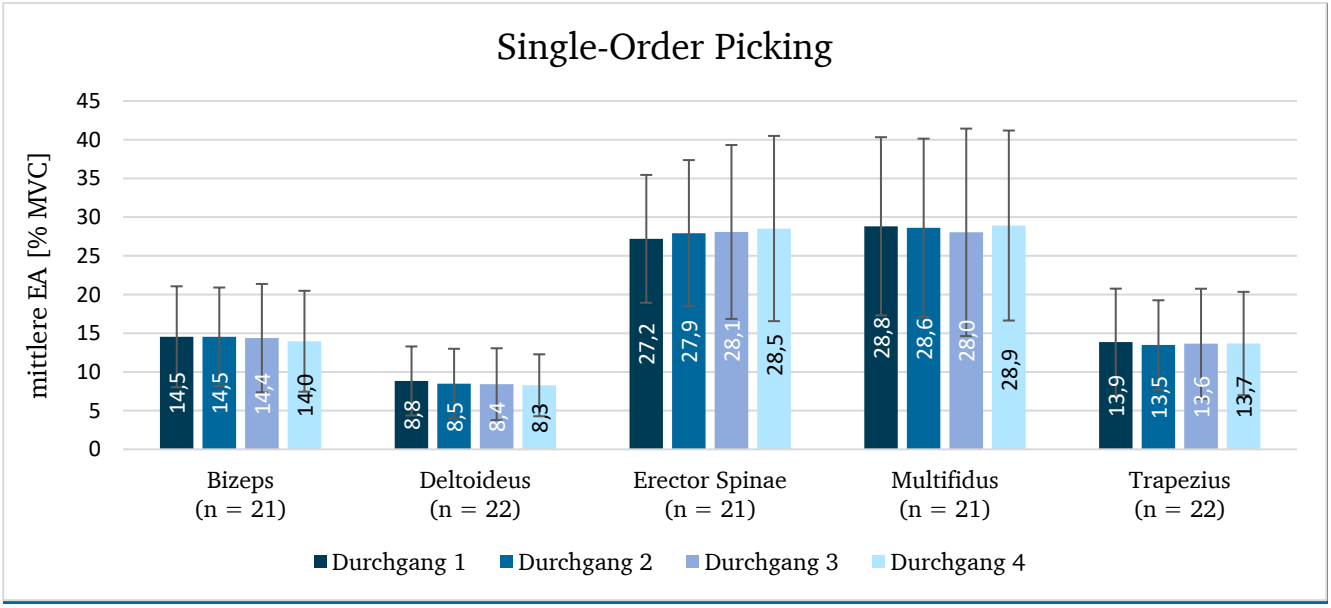


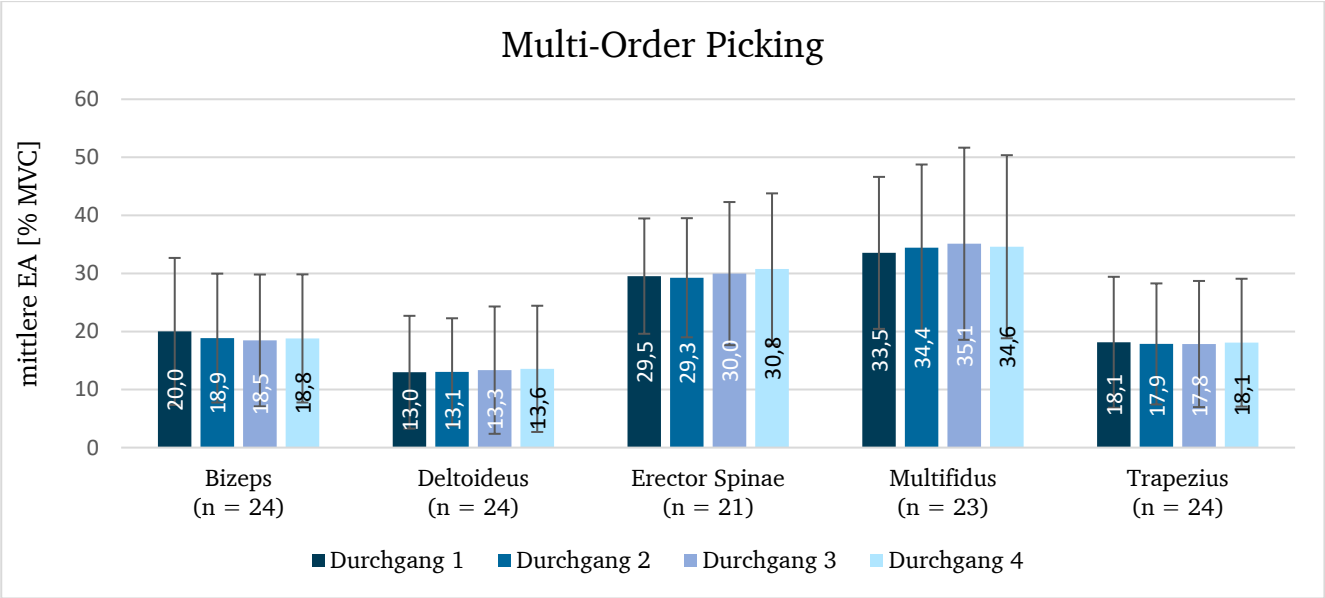




O.2 Reihenfolgeeffekte der muskulären Beanspruchung

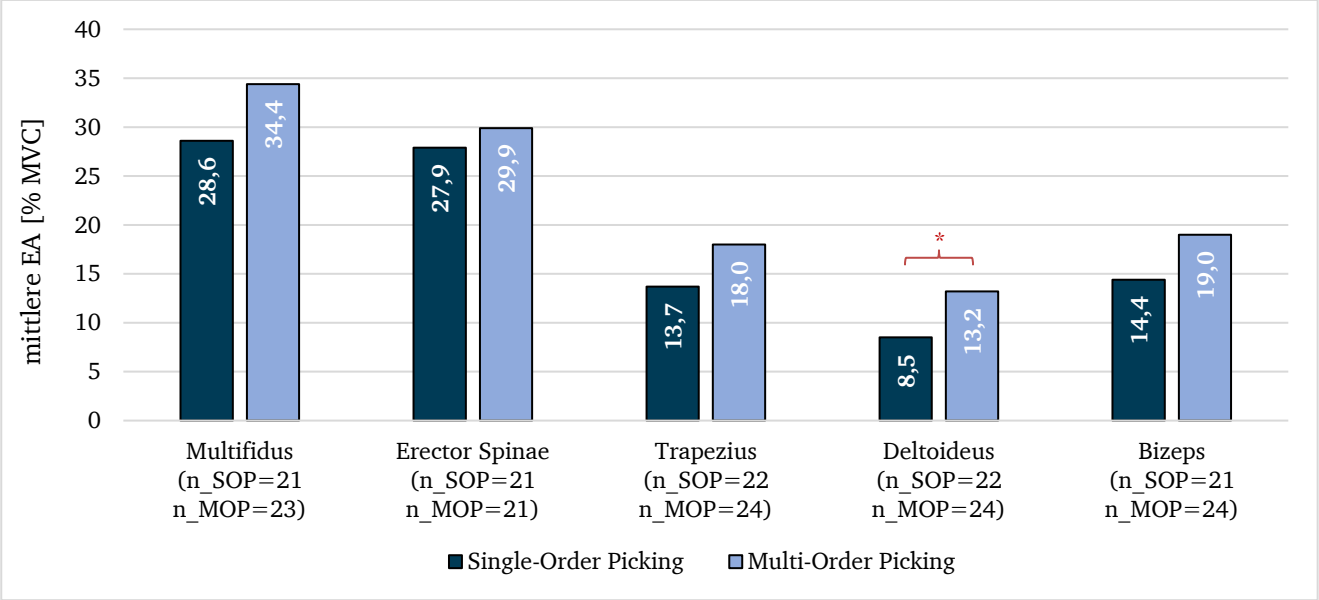
Im Folgenden werden die mittleren EA der einzelnen Muskeln entsprechend ihrer tatsächlichen Reihenfolge im Versuch gemittelt. So sind in jedem Durchgang alle λ-Gewichtungen vertreten. Weder beim SOP noch beim MOP sind signifikante Unterschiede feststellbar. Eine Ermüdung in späteren Durchgängen lässt sich in den entsprechenden Muskeln nicht durch zunehmende EA nachweisen.





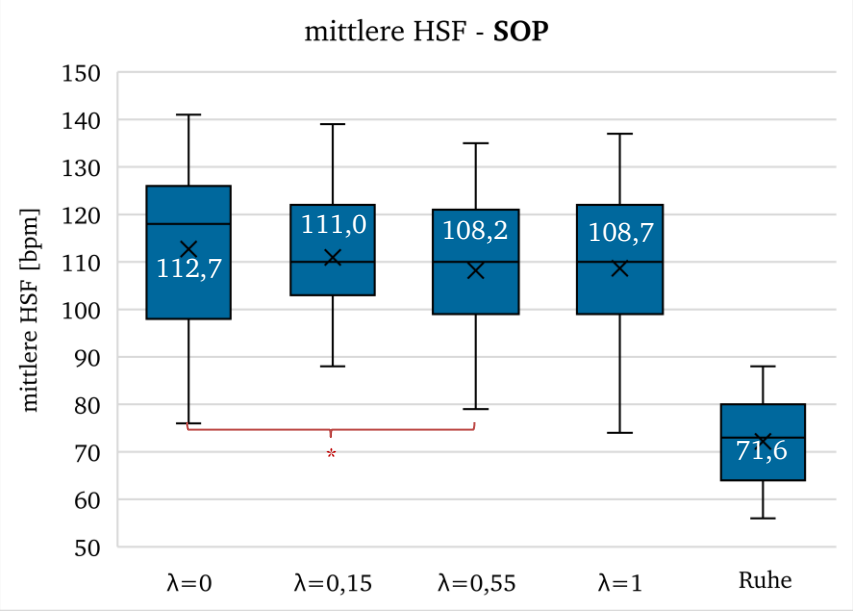
O.3 Vergleich der muskulären Beanspruchung zwischen SOP und MOP

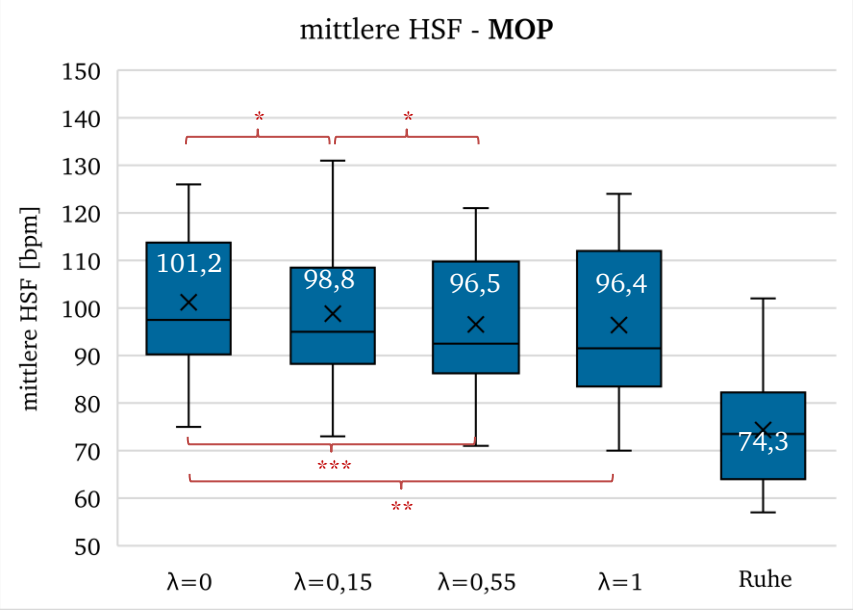
In der nachfolgenden Grafik ist ein Vergleich der mittleren EA von SOP und MOP über aller Szenarien hinweg gegeben. Signifikante Unterschiede bestehen nur für den m. deltoideus. Die tendenziell etwas höheren mittleren EA für die MOP-Szenarien sind vermutlich auf den etwas höheren Anteil an Frauen und das höhere Alter der Teilnehmenden aus der MOP-Gruppe zurückzuführen. Es wird davon ausgegangen, dass die muskuläre Beanspruchung unabhängig von der Picking-Strategie ist.



P Weitere Ergebnisse der Herz-Kreislauf Beanspruchung

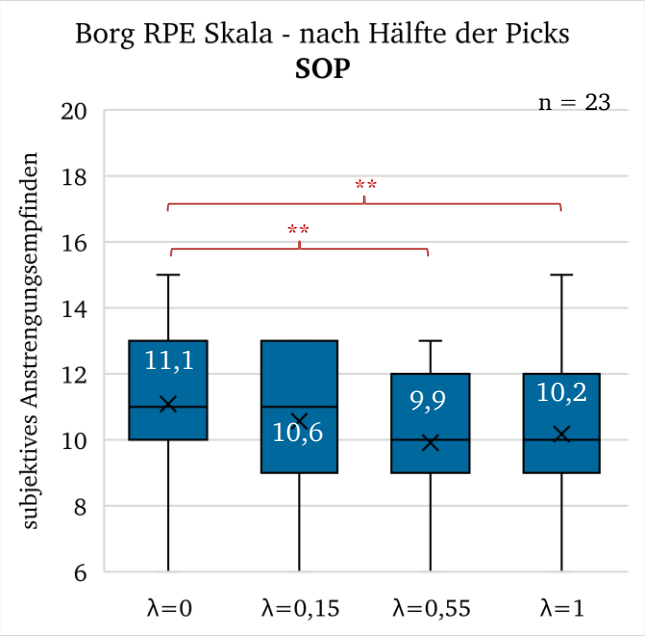
Im Folgenden sind die Box-Plot-Diagramme der Herzschlagfrequenz bei einer Einzelbetrachtung von Single-Order Picking bzw. Multi-Order Picking abgebildet. Die Signifikanzen der Post-hoc Tests sind anhand der Sterne abzulesen (*α=0,05; ** α=0,01; *** α=0,001).

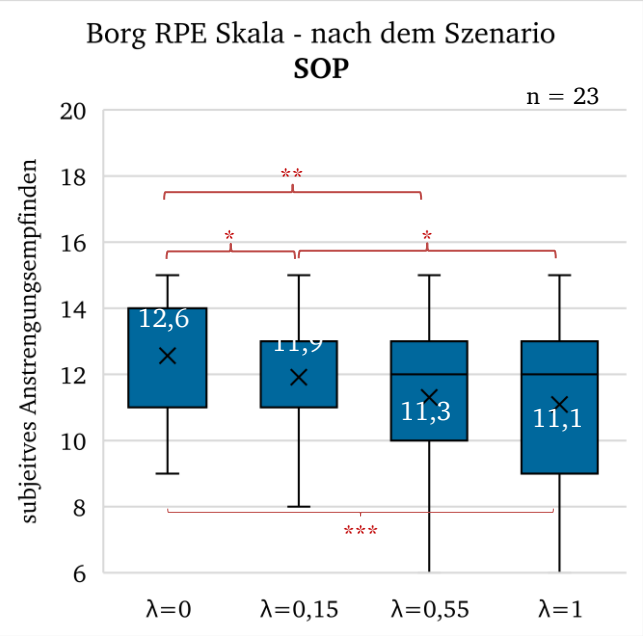


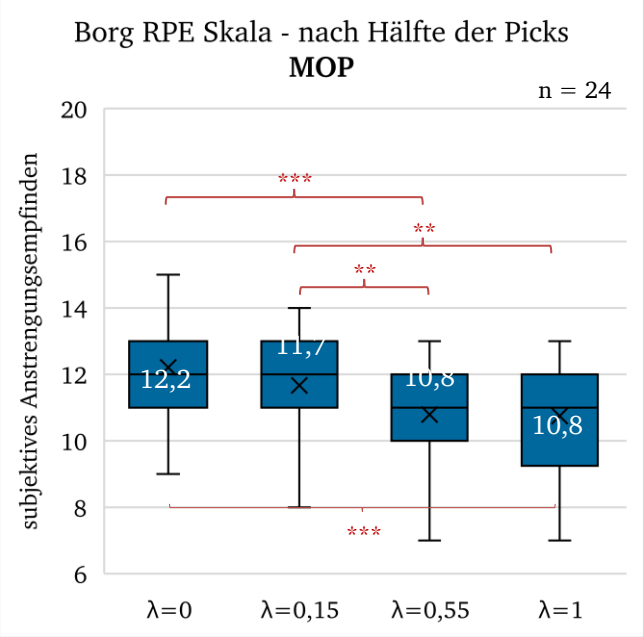


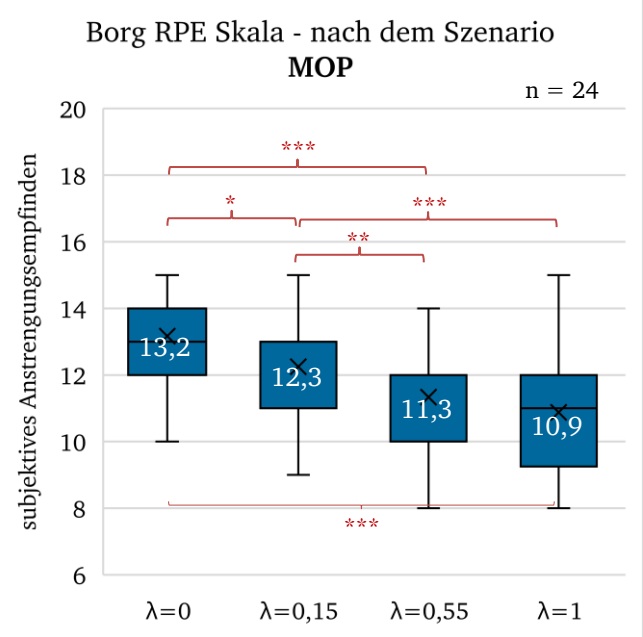
Q Weitere Ergebnisse des subjektiven Anstrengungsempfindens

Im Folgenden sind die Box-Plot-Diagramme des subjektiven Anstrengungsempfindens bei einer Einzelbetrachtung von Single-Order Picking bzw. Multi-Order Picking abgebildet. Es werden zwei Zeitpunkte betrachtet – nach der Hälfte aller Picks sowie unmittelbar nach Beendigung des Szenarios. Die Signifikanzen der Post-hoc Tests sind anhand der Sterne abzulesen (*α=0,05; ** α=0,01; *** α=0,001).



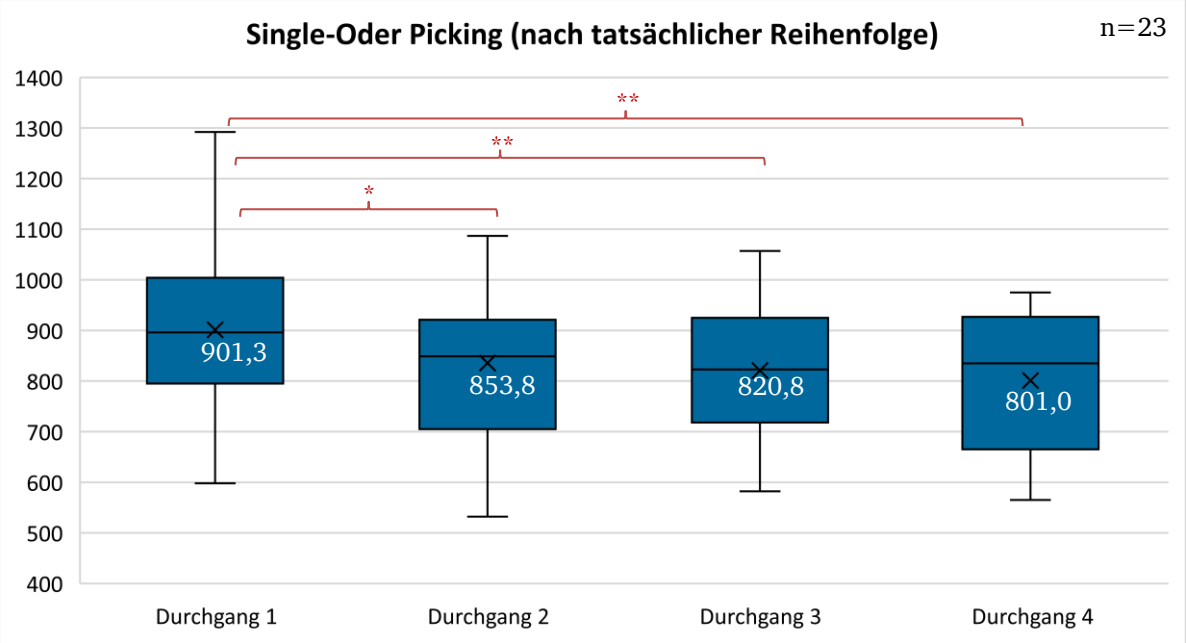


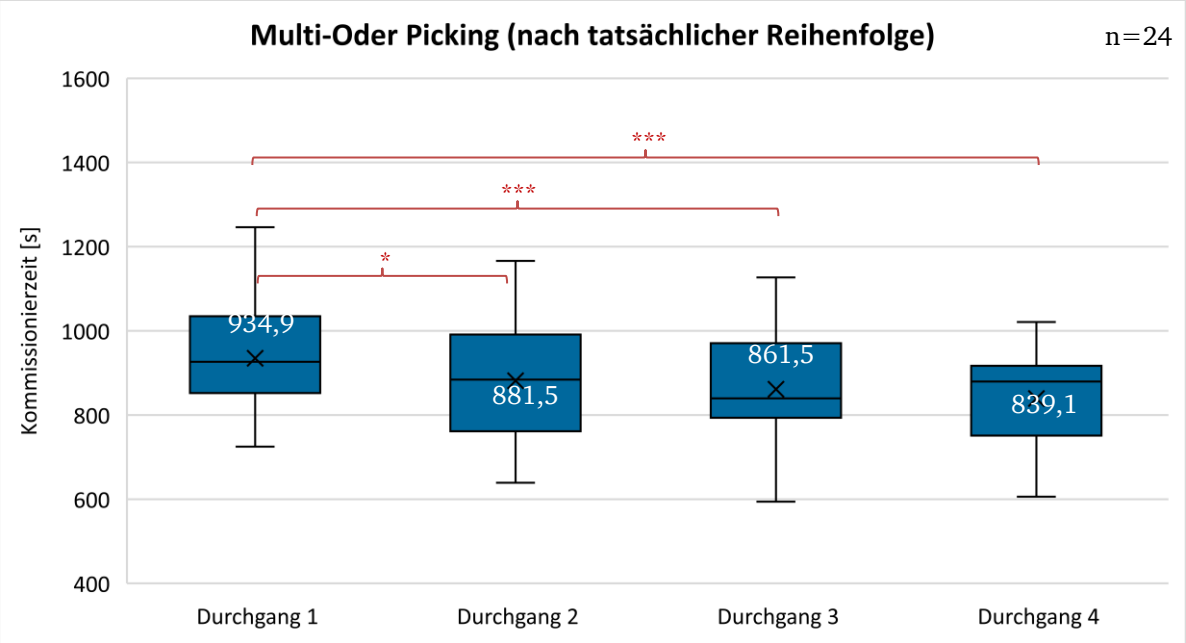




R Weitere Ergebnisse bezüglich der Kommissionierzeit

Im Folgenden sind für SOP und MOP die Kommissionierzeiten nach ihrer tatsächlichen Reihenfolge den Durchgangsnummern 1 bis 4 zugeordnet, um zu überprüfen, ob Lerneffekte zu erkennen sind.

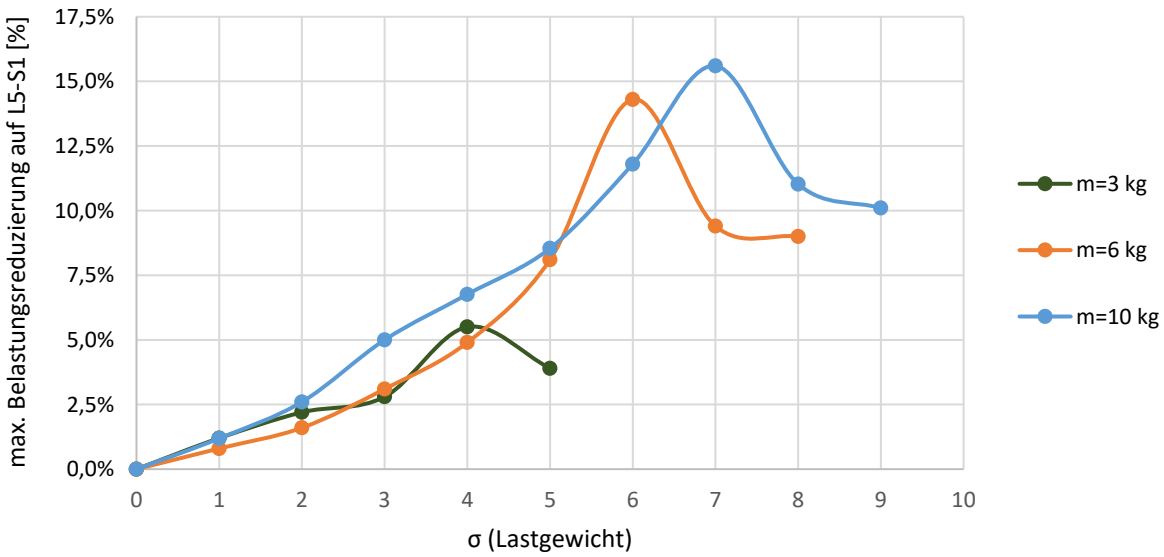




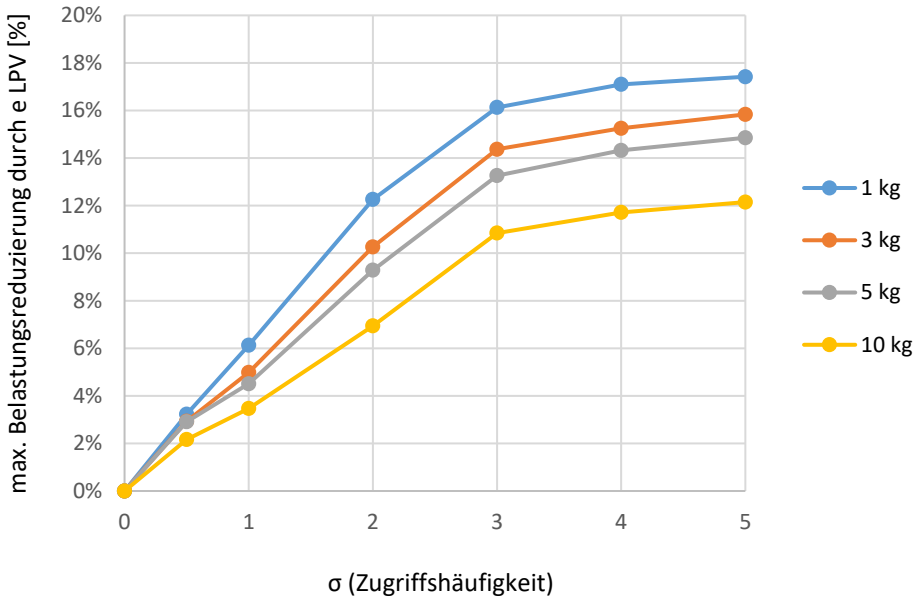
S Abhängigkeit des Optimierungspotentials der eLPV von der Heterogenität des SKU-Portfolios

Das Potential zur Belastungs- bzw. Zeitreduzierung der eLPV ist stark abhängig von der Heterogenität des SKU-Portfolios. Untenstehend sind Grafiken abgebildet, die darstellen, wie groß das Optimierungspotential in Abhängigkeit der Standardabweichung des Lastgewichtes bzw. der Zugriffshäufigkeit ist. Das kalkulierte Optimierungspotential ergibt sich aus dem relativen Unterschied zwischen der kumulierten Wirbelsäulenbelastung bei $\lambda=1$ und $\lambda=0$.

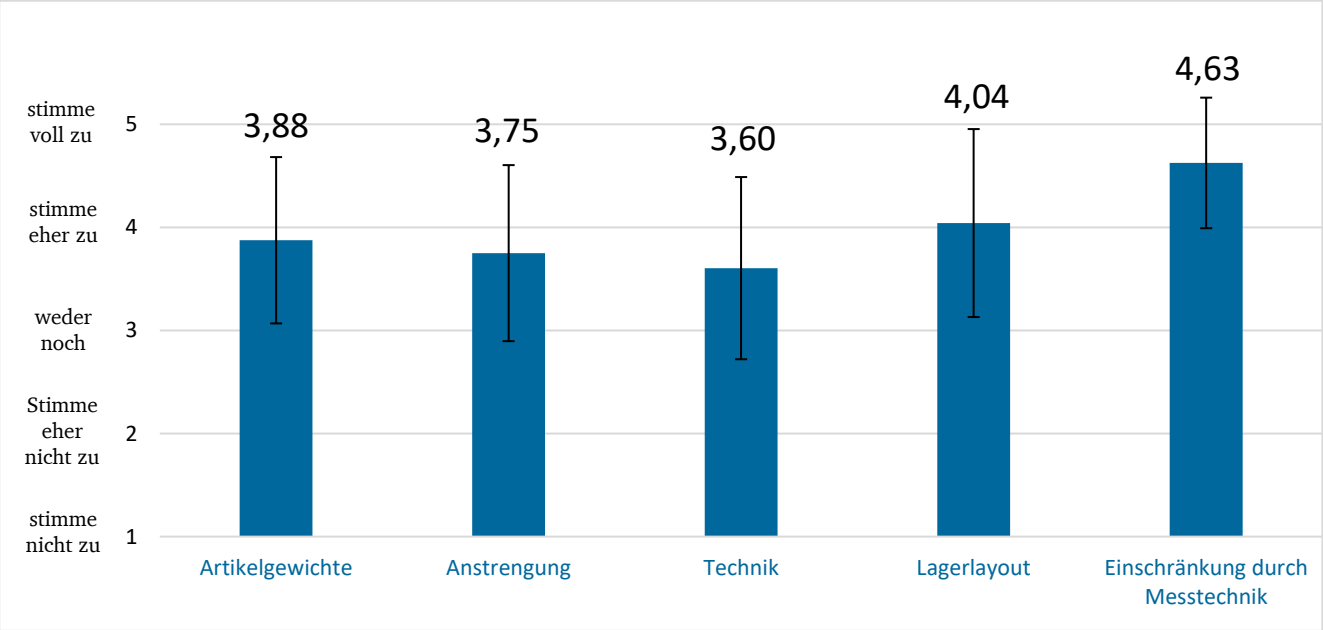
Hierfür wurden für jeden in der Grafik abgebildeten Punkt zufällige Datensätze mit 100 SKU generiert, die einen bestimmten Mittelwert bzw. Standardabweichung besitzen. Zur Untersuchung des Einflusses der Heterogenität des Lastgewichts wurde die Zugriffshäufigkeit für jeden Artikel konstant auf eins gesetzt. Es gibt Datensätze mit drei verschiedenen Durchschnittsgewichten (3 kg, 6 kg, 10 kg), die jedoch unterschiedliche Standardabweichungen besitzen.



Zur Untersuchung des Einflusses der Heterogenität der Zugriffshäufigkeit wurden Datensätze mit vier konstanten Lastgewichten generiert (1 kg, 3 kg, 5 kg und 10 kg). Die Zugriffshäufigkeit liegt für alle Datensätze bei durchschnittlich $\sigma = 3$ – die Standardabweichung der Zugriffshäufigkeit wird jedoch variiert.



T Ergebnisse von Fragebogenteil C



Bitte kreuzen Sie an, inwiefern Sie den folgenden Aussagen bezüglich der durchgeführten Kommissionierszenarien zustimmen:

		1 stimme nicht zu	2 stimme eher nicht zu	3 weder noch	4 stimme eher zu	5 stimme voll zu
C1	Die Artikelgewichte im Versuch waren vergleichbar mit jenen aus meiner Kommissioniererfahrung.					
C2	Die Tätigkeiten im Versuch waren vergleichbar körperlich anstrengend mit jenen aus meiner Kommissioniererfahrung.					
C3	Die technische Ausstattung im Versuch war vergleichbar mit jener aus meiner Kommissioniererfahrung.					
C4	Das Lagerlayout (die Anordnung der Regale) war vergleichbar mit jenem aus meiner Kommissioniererfahrung.					
C5	Das Messequipment hat mich kaum bei meiner Arbeit eingeschränkt.					