

Der Einfluss einer ergonomischen Lagerplatzvergabe auf die menschliche Beanspruchung und Leistung in der manuellen Kommissionierung

Tim STEINEBACH

*Institut für Arbeitswissenschaft,
Technische Universität Darmstadt
Otto-Berndt-Straße 2, D-64287 Darmstadt*

Kurzfassung: Planungskonzepte der manuellen Kommissionierung berücksichtigen bisher weitestgehend keine menschlichen Eigenschaften. Im Rahmen dieser Arbeit sollen deshalb die biomechanischen Belastungen, die auf einen Kommissionierer wirken, in einen Lagerplatzvergabe-algorithmus integriert werden. Zu diesem Zweck wurde ein Arbeitsmodell entwickelt, mithilfe dessen Forschungsfragen abgeleitet werden. Demnach soll zunächst ein geeignetes Belastungsbewertungsverfahren gefunden werden, um ergonomische Kennwerte für einzelne Greifvorgänge bestimmen zu können. Durch eine mathematische Optimierung kann anschließend die Anordnung der Artikel in einem Lager gesucht werden, welche die physische Belastung und Beanspruchung des Kommissionierers minimiert. In einem Probandenversuch sollen die Zusammenhänge zwischen der ergonomischen Lagerplatzvergabe und der menschlichen Leistung (Qualität und Pick-Frequenz) bzw. der physiologischen Beanspruchung analysiert und mit etablierten Lagerplatzvergabe-strategien verglichen werden.

Schlüsselwörter: manuelle Kommissionierung, Lagerplatzvergabe, Optimierung, physiologische Beanspruchung

1. Motivation

Obwohl die Automatisierung mittlerweile Einzug in die Logistik erhalten hat, werden nach wie vor etwa 80% aller Kommissionierlager in Westeuropa manuell betrieben (Napolitano 2012, Michel 2017). Grund hierfür ist, dass der Mensch mit seinen kognitiven und motorischen Fähigkeiten nur in seltenen Fällen vollständig zu ersetzen ist (Arnold, 2005). Durch das Heben, Umsetzen und Tragen von SKUs (stock keeping units) mit teilweise hohen Lastgewichten können Kommissionierende jedoch hohen körperlichen Belastungen und damit Risiken für Muskel-Skelett-Erkrankungen (MSD) ausgesetzt sein. Diese Problematik wird durch den demographischen Wandel verstärkt.

Da die Kommissionierung sehr personalintensiv ist und damit bis zu 50% der Betriebskosten eines Lagers auf die Kommissionierung zurückzuführen sind (Tompkins et al. 2010), lässt sich für entsprechende Planungskonzepte ein hohes Potential erkennen. Jedoch blieben menschenbezogene Parameter, wie z.B. die physische Belastung, trotz des hohen Anteils manueller Arbeit in der Vergangenheit unberücksichtigt (Grosse et al. 2015). Durch die Vernachlässigung menschlicher Faktoren in Planungskonzepten können Kommissionierprozesse jedoch nur unvollständig und damit ggf. nicht ausreichend abgebildet werden.

In diesem Kontext kann insbesondere die Lagerplatzvergabe einen entscheidenden Einfluss auf die Qualität der Kommissionierung und die körperliche Belastung haben (Battini et al. 2016). Ziel dieser Arbeit ist deshalb die Entwicklung einer Lagerplatzvergabe unter Berücksichtigung von physischen Belastungskennwerten, um die Beanspruchung von Kommissionierern zu reduzieren. Neben der physiologischen Beanspruchung sollen in Laborversuchen und Simulationen gleichzeitig die Auswirkungen auf die benötigte Kommissionierzeit und die unterlaufenen Kommissionier-Fehler analysiert werden.

2. Stand der Forschung

Unter der Lagerplatzvergabe versteht man die Zuordnung von SKUs zu bestimmten Lagerplätzen (Petersen et al. 2005). Die meisten Planungsmodelle zur Lagerplatzvergabe orientieren sich an rein wirtschaftswissenschaftlichen Kennzahlen, wie beispielsweise die zurückgelegte Wegstrecke, Lagerkosten oder der Kommissionierleistung (Anzahl an Picks) - ohne hierbei menschbezogene Parameter mit einzubeziehen (Reyes et al. 2019, Grosse et al. 2015).

Petersen et al. (2005) gehörten zu den ersten Autoren, die menschliche Eigenschaften in ihre mathematischen Modelle einbezogen und konnten zeigen, dass ein sogenannter „Golden-Zone“-Ansatz, also das Picken von Schnelldrehern in Lagerhöhen zwischen Schulter und Hüfte, zu geringeren Kommissionierzeiten führten. Die Belastung bzw. Beanspruchung des Kommissionierers wurde jedoch nicht evaluiert.

Ferner wurde in Modellentwicklungen oder simulativen Untersuchungen häufig das Energy Expenditure Modell (Garg et al. 1978) genutzt, um den Energieumsatz von Kommissionierern abzuschätzen (Battini et al. 2016, Calzavara et al. 2019). Es entstanden zwei Zielfunktionen, wobei erstere die Kommissionierzeit und zweitere den Energieumsatz minimieren soll. Anschließend wurden pareto-effiziente Lösungen gefunden. Calzavara et al. 2019 nutzten zusätzlich das OWAS-Verfahren zur Bewertung von Körperhaltungen bei der Kommissionierung von verschiedenartig angeordneten und unterschiedlich hoch befüllten Paletten. Ein heuristischer Ansatz unterstützt bei der Entscheidung bezüglich der Zuordnung von SKU zu bestimmten Paletten.

In der Arbeit von Larco et al. (2017) wurden in Regressionsmodellen die Einflussfaktoren von Greifhöhe, Gewicht und Zugriffshäufigkeit statistisch mithilfe von zuvor per Borgs CR-10 Skala (Borg 1982) subjektiv erhobenen Beanspruchungswerten bei Kommissionierern quantifiziert. Diese Werte werden anschließend in einem bi-objektiven Optimierungsmodell bezüglich einer Lagerplatzvergabe implementiert, um die Beanspruchung bzw. die Kommissionierzeit zu minimieren. Otto et al. (2017) hingegen nutzen die Lifting Equation von NIOSH (Waters et al. 1994) um SKUs in bestimmten Greifhöhen Belastungswerte zuzuordnen. Zusätzlich kombinieren Sie diesen Ansatz der Lagerplatzvergabe mit einem Zoning-Problem (Zuordnung von Kommissionierern zu bestimmten Zonen im Lager). Mit einer Tabu-Suche und zwei verschiedenen Heuristiken werden belastungsminimierende Lösungen gefunden. Die Ergebnisse wurden mittels Computersimulation evaluiert. Zeitliche Aspekte wurden nicht untersucht.

Bortolini et al. 2017 untersuchten ein ähnliches Problem in einem „assembly line balancing problem“ aus dem Montage-Kontext. Mithilfe des REBA-Verfahrens und der Berücksichtigung der Bauteileigenschaften Lastgewicht, geometrische Abmessungen und Handhabbarkeit werden einzelne Bauteile bestimmten Lagerplätzen an der Montagestation zugeordnet.

Auffällig ist, dass es bei den vorgestellten Publikationen mehrheitlich um mathematische Modelle handelt, die lediglich in Computersimulationen überprüft wurden. Eine Evaluierung der Lagerplatzvergabealgorithmen in Probandenversuchen sowie die Erhebung von Beanspruchungsdaten nach Anwendung der Modelle wurde nicht durchgeführt.

Hinzu kommt, dass einige der genutzten Belastungsbewertungsverfahren für kommissioniertypische Tätigkeiten nicht gut geeignet sind, wie bspw. die NIOSH-Formel. Diese berücksichtigt nur langsam und gleichmäßig ausgeführte Hebevorgänge bei konstantem Gewicht (Waters et al. 1994).

Des Weiteren wurde der Einfluss einer potentiell geringeren Beanspruchung auf die Qualität der Kommissionierung (Anzahl an Fehlern) bisher nicht untersucht. Außerdem wurden meist keine realitätsnahen Datensätze verwendet, sondern zufällige Verteilungen bezüglich des Gewichts und der Zugriffshäufigkeit angenommen.

3. Arbeitsmodell und Forschungsfragen

Zur Strukturierung des vorliegenden Promotionsvorhabens wurde ein Arbeitsmodell (Abbildung 1) entwickelt und im Folgenden vorgestellt.

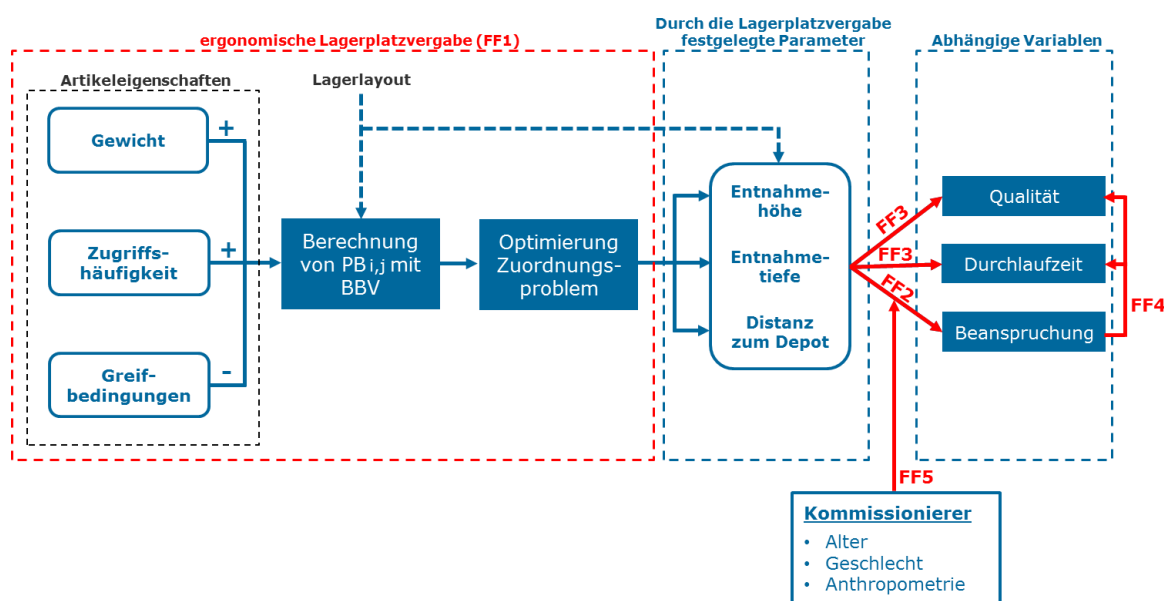


Abbildung 1: Arbeitsmodell

Der linke Teil des Arbeitsmodells bildet hierbei das Konzept der ergonomischen Lagerplatzvergabe ab. Im Mittelpunkt steht ein Belastungsbewertungsverfahren (BBV). Eingangswerte hierfür sollen durch die Eigenschaften der SKU - Lastgewicht, durchschnittliche Zugriffshäufigkeit und Greifbedingungen - gegeben sein. Mithilfe des BBV sollen nun für denkbare Lagerlayouts, die sich z.B. durch die Art und Anordnung der Regale unterscheiden, Greifvorgänge durch Belastungskennwerte quantifiziert werden können. Diese Werte werden anschließend in ein Optimierungsmodell weitergegeben um somit eine belastungsminimierte Lagerplatzvergabe zu bestimmen. Die Entnahmehöhe, Entnahmetiefe sowie die Distanz zum Depot jedes SKU werden schließlich durch die gefundene Lagerplatzvergabe festgelegt.

Fraglich bleibt, wie sich diese ergonomische Lagerplatzvergabe auf die Beanspruchung und Leistung des Kommissionierers auswirkt, bzw. inwiefern dies von den Eigenschaften des Kommissionierers abhängt. Diese Forschungsfragen (FF) wurden anhand des Arbeitsmodells abgeleitet und wie folgt formuliert:

- FF1: Wie muss eine ergonomische Lagerplatzvergabe unter Berücksichtigung biomechanischer Belastungen gestaltet werden?
- FF2: Wie verändert sich die körperliche Beanspruchung bei einer ergonomischen im Vergleich mit einer wegstreckenminimierten Lagerplatzvergabe?
- FF3: Wie verändert sich die Kommissionierleistung (Durchlaufzeit und Qualität) durch eine ergonomische Lagerplatzvergabe?
- FF4: Besteht ein Zusammenhang zwischen der Beanspruchung und der Kommissionierleistung (Durchlaufzeit bzw. Qualität)?
- FF5: Besteht ein Zusammenhang zwischen menschenbezogenen Eigenschaften und der Beanspruchung?

Im Folgenden wird sich vor allem auf die Bearbeitung der FF1 fokussiert und für die restlichen Forschungsfragen lediglich ein Ausblick gegeben.

4. Entwicklung eines Algorithmus zur ergonomischen Lagerplatzvergabe

4.1 Auswahl eines Belastungsbewertungsverfahrens

Die ergonomische Lagerplatzvergabe soll insbesondere für Kommissionierlager anwendbar sein, in denen hohe Lastgewichte gehandhabt werden. Dementsprechend sollte die Bewertung von biomechanischen Belastungen bzw. von Belastungen des Muskel-Skelett-Apparats – insbesondere der Wirbelsäule – ermöglicht werden (Goldscheid 2008). Ferner sollen mit dem BBV einzelne Greifvorgänge bewertbar und der Zusammenhang von Lastgewicht, Zugriffshäufigkeit und Greifhöhe stetig abbildbar sein.

Wie in Kapitel 2 dargelegt wurden in der Vergangenheit beispielsweise das OWAS-Verfahren und die NIOSH-Formel in der Kommissionierung genutzt. Das OWAS-Verfahren wird hier jedoch nicht weiterverfolgt, da dieses nicht die absolute Häufigkeit bestimmter Lasthandhabungen berücksichtigt, obwohl diese eine zentrale Einflussgröße auf die Gesamtbelastung ist (Goldscheid 2008). Ebenso eignet sich die NIOSH-Formel nicht, um verschiedene Lastgewichte und unterschiedliche Körperhaltungen während der Pick-Vorgänge zu bewerten.

Eines der detailliertesten Verfahren zur Bestimmung der Wirbelsäulenbelastung ist das biomechanische Modell „Der Dortmunder“. Dieses berücksichtigt dreidimensionale Körperhaltungen, die Skelettstruktur, sowie die Modellierung der relevanten Muskeln und errechnet hieraus statische und dynamische Druckkraftwerte in der Bandscheibe L5-S1 (Jäger et al. 2000). Hierzu liegen bereits zahlreiche Werte für verschiedene Lasthandhabungen in Tabellenform vor (z.B. Jäger et al. 2001, Jäger et al. 2002). Goldscheid (2008) hat diesen Ansatz genutzt, um die Wirbelsäulenbelastung für die in der Kommissionierung vorkommenden Lasthandhabungen konkret zu bestimmen. Dieses Verfahren soll in dieser Arbeit zur Bestimmung der Eingangswerte für den Lagerplatzvergabe-Algorithmus genutzt werden.

4.2 Vorbereitung der Daten für den Lagerplatzvergabealgorithmus

Mithilfe der Werte, welche mit dem Belastungsbewertungsverfahren „Der Dortmunder“ errechnet werden, kann nun die Wirbelsäulenbelastung bestimmter Greifvorgänge von bestimmten SKU quantifiziert werden. Insbesondere gilt es, für jede Kombination aus einem spezifischen SKU und einer bestimmten Entnahmehöhe, die durch die Regale im Kommissionierlager vorgegeben wird, einen Druckkraftwert zu ermitteln.

In Abbildung 2 wird dieses Prinzip beispielhaft verdeutlicht. Dargestellt ist ein Regal mit 10 SKU, die ihren Lagerplätzen belastungsminimierend zugeordnet werden sollen. Zunächst ist es erforderlich, die physischen Belastungskennwerte $PB_{i,j}$ (i-tes SKU, j-te Regalebene) eines jeden SKU für jede Entnahmehöhe mithilfe der Druckkrafttabellen zu bestimmen. Insgesamt müssen für dieses Beispiel somit bei einem Regal mit fünf Regalebenen und 10 SKU 50 Belastungswerte ermittelt werden.

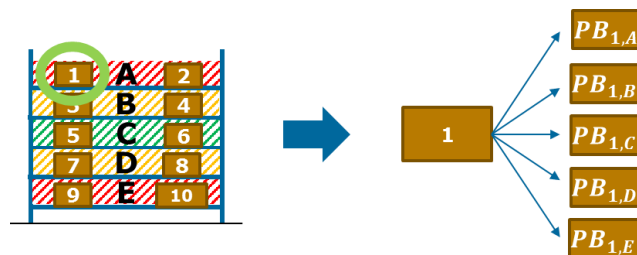


Abbildung 2: Ermittlung von Belastungswerten mit dem BBV für die Lagerplatzvergabe

4.3 Mathematische Formulierung des Lagerplatzvergabealgorithmus

Der Algorithmus hat die Aufgabe, die SKU ihren Lagerplätzen so zuzuordnen, dass die entstehende Gesamtbelastung des Kommissionierers durch die Pick-Vorgänge minimiert wird. Folgende mathematische Zielfunktion (1) kann formuliert werden:

$$\min \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J PB_{i,j} \cdot x_{i,j} \quad (1)$$

Hierbei beschreibt $x_{i,j}$ eine Binärvariable, die den Wert eins annimmt, wenn SKU i der Regalebene j zugeordnet wird. Des Weiteren müssen in dem Optimierungsmodell einige Nebenbedingungen eingehalten werden:

$$\sum_{i=1}^I x_{i,j} \leq y \quad \forall j \quad (2) \quad \sum_{j=1}^J x_{i,j} = 1 \quad \forall i \quad (3) \quad x_{i,j} \in \{0; 1\} \quad (4)$$

Nebenbedingung (2) stellt hierbei sicher, dass pro Regalebene maximal y SKU Platz finden. In Nebenbedingung (3) wird gewährleistet, dass jedes SKU genau einer Regalebene zugeordnet wird.

Der hier dargestellte Algorithmus kann auf beliebige Lagerlayouts und Regalarten angewendet werden – unabhängig von der Gesamtanzahl an SKU.

5. Fazit und Ausblick

In diesem Promotionsvorhaben soll als nächstes ein Versuchskonzept entwickelt werden, dessen Ziel es ist, den oben dargestellten Algorithmus zu evaluieren. Hierfür sollen neben einer subjektiven Abfrage der Beanspruchung mittels Borg-Skala auch eine physiologische Messung (EMG) stattfinden. Ermittelt werden soll außerdem die benötigte Zeit sowie die vom Kommissionierer getätigte Anzahl an Pick-Fehlern. Die Ergebnisse einer nach der vorgestellten ergonomischen Lagerplatzvergabe durchgeführten Kommissionierung sollen dabei mit jenen einer wegstrecken-minimierten Lagerplatzvergabe verglichen werden. Eine Diskussion, bis zu welchem Grad eine ergonomische Lagerplatzvergabe einer wegstreckenminimierenden vorzuziehen ist, soll ermöglicht werden.

6. Literatur

- Arnold D, Furmans K. (2005) Materialfluss in Logistiksystemen. Springer-Verlag, Berlin.
- Battini D, Glock CH, Grosse EH, Persona A, Sgarbossa F (2016) Human energy expenditure in order picking storage assignment: A bi-objective method. *Computers & Industrial Engineering*, 94:147-157.
- Borg G (1982) A category scale with ratio properties for intermodal and interindividual comparisons. *Psychophysical judgment and the process of perception*, 25-34.
- Bortolini M, Faccio M, Gamberi M, Pilati F (2017) Multi-objective assembly line balancing considering component picking and ergonomic risk. *Computers & Industrial Engineering*, 112:348-367.
- Calzavara M, Glock CH, Grosse EH, Sgarbossa F (2019) An integrated storage assignment method for manual order picking warehouses considering cost, workload and posture. *International Journal of Production Research*, 57(8):2392-2408.
- Garg A, Chaffin DB, Herrin GD (1978) Prediction of metabolic rates for manual materials handling jobs. *The American Industrial Hygiene Association Journal*, 39(8):661-674.
- Goldscheid C (2008) Ermittlung der Wirbelsäulenbelastung in manuellen Kommissioniersystemen. Dissertation. Shaker-Verlag, Aachen.
- Grosse EH, Glock CH, Jaber MY, Neumann WP (2015) Incorporating human factors in order picking planning models: Framework and research opportunities. *International Journal of Production Research*, 53 (3):695-717.
- Jäger M, Luttmann A, Gollner R, Laurig W (2000) Der Dortmunder: Biomechanische Modellbildung zur Bestimmung und Beurteilung der Belastung der Lendenwirbelsäule bei Lastenhandhabungen. Prävention von arbeitsbedingten Gesundheitsgefahren und Erkrankungen. 105-124.
- Jäger M, Jordan C, Theilmeier A, Luttmann A (2001) 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.
- Larco JA, De Koster R, Roodbergen KJ, Dul J (2017) Managing warehouse efficiency and worker discomfort through enhanced storage assignment decisions. *International Journal of Production Research*, 55(21):6407-6422.
- Michel R (2017) 2017 Warehouse/DC Operations Survey. In the thick of e-commerce adjustments. *Logistics Management*, 56 (11):52-58.
- Napolitano M (2012) 2012 warehouse/DC operations survey: Mixed signals. *Modern Materials Handling*, 51 (11):48-56.
- Petersen CG, Siu C, Heiser DR (2005) Improving order picking performance utilizing slotting and golden zone storage. *International Journal of Operations & Production Management*, 25(10):997-1012.
- 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.
- Schneider E, Irastorza, X. (2010) OSH in figures: work-related musculoskeletal disorders in the EU - facts and figures. European Agency for Safety and Health at Work, Luxembourg.
- Waters TR, Putz-Anderson V, Garg A (1994) Applications manual for the revised NIOSH lifting equation. 1-164.



Gesellschaft für
Arbeitswissenschaft e.V.

Digitale Arbeit, digitaler Wandel, digitaler Mensch?

66. Kongress der
Gesellschaft für Arbeitswissenschaft

TU Berlin
Fachgebiet Mensch-Maschine-Systeme

HU Berlin
Professur Ingenieurpsychologie

16. – 18. März 2020, Berlin

GfA-Press

Bericht zum 66. Arbeitswissenschaftlichen Kongress vom 16. – 18. März 2020

**TU Berlin, Fachgebiet Mensch-Maschine-Systeme
HU Berlin, Professur Ingenieurpsychologie**

Herausgegeben von der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.
Dortmund: GfA-Press, 2020
ISBN 978-3-936804-27-0

NE: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft: Jahresdokumentation

Als Manuskript zusammengestellt. Diese Jahresdokumentation ist nur in der Geschäftsstelle erhältlich.
Alle Rechte vorbehalten.

© **GfA-Press, Dortmund**
Schriftleitung: Matthias Jäger

im Auftrag der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

Ohne ausdrückliche Genehmigung der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V. ist es nicht gestattet:

- den Kongressband oder Teile daraus in irgendeiner Form (durch Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) zu vervielfältigen,
- den Kongressband oder Teile daraus in Print- und/oder Nonprint-Medien (Webseiten, Blog, Social Media) zu verbreiten.

Die Verantwortung für die Inhalte der Beiträge tragen alleine die jeweiligen Verfasser; die GfA haftet nicht für die weitere Verwendung der darin enthaltenen Angaben.

Screen design und Umsetzung

© 2020 fröse multimedia, Frank Fröse

office@internetkundenservice.de · www.internetkundenservice.de