

Integration von Virtual Reality und optischem Motion Capturing in die Planung und Optimierung von Materialflusssystemen

Integration of virtual reality and optical motion capturing systems into planning and optimization of material flow systems

André Terharen
Felix Feldmann
Christopher Reining
Michael ten Hompel

Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen
Fakultät Maschinenbau
Technische Universität Dortmund

Bei der Planung und Optimierung von Materialflusssystemen ist eine hinreichend präzise Erfassung der Leistungsfähigkeit des Faktor Mensch nur bedingt möglich. Die Systeme werden vielfach mit Eingabeparametern gespeist, welche bis zu einem gewissen Grad abgeschätzt werden aber in vielen Fällen nicht ausreichend empirisch abgesichert sind. Die Folge können Über- und Unterdimensionierungen sein. Durch die Kopplung von Motion Capturing mit Virtual Reality können Arbeitsplätze und -prozesse am physischen Modell gestaltet, evaluiert und optimiert werden. Die empirisch gewonnenen Daten bilden die später realisierte Leistungsfähigkeit der Komponenten des Materialflusssystemes präziser als bisher ab.

[Schlüsselwörter: Intralogistische Planung, Materialflussplanung, Virtual Reality, Motion Capturing]

In the planning and optimizing of material flow systems, the performance of the human factor is often not gathered with sufficient accuracy. In many cases, the systems are fed with input parameters, which are estimated to some extent but lack empirical verification. The result can be over- and under-dimensioning. By coupling motion capture with virtual reality, workplaces and processes can be designed, evaluated and optimized based on a physical model. The empirically obtained data represents the later realized performance of the components of the material flow system more accurately.

[Keywords: Warehouse Planning, Material Flow System, Virtual Reality, Motion Capturing]

1 EINLEITUNG

Vor dem Hintergrund der vierten industriellen Revolution und einer Social Networked Industry rückt die Perspektive Mensch bei der Planung und Optimierung von Materialflusssystemen (MFS) stärker in den Vordergrund (vgl. [VBH17a], S. 45–59; [JK17]; [THN⁺ 17]). Aktuelle Trends wie Wandlungsfähigkeit, Flexibilität und sich stetig verkürzende Entscheidungsintervalle gewinnen an Bedeutung (vgl. [VBH17b], S. 247–258). Die Implikationen für die Industrie 4.0 sind neuartige Anforderungen, welche die Integration neuer Technologien notwendig machen.

Für die Planung von MFS stehen verschiedene Planungssystematiken zur Verfügung. Die Mehrzahl der in der Literatur benannten Systematiken zur Planung und Optimierung von Materialflusssystemen stammen noch aus der Zeit vor der Postulierung einer Logistik 4.0 (vgl. [HK17a]). Darüber hinaus werden die vorhandenen Planungssystematiken in der Praxis selten angewendet [WS14]. Durch neue technologische Wegbereiter in Verbindung mit neuen Planungssystematiken, wie bspw. des *Distribution Center Design Process* von SCHMIDT [Sch18], ist die Möglichkeit gegeben diesen Zustand zu ändern.

Mit Motion Capturing (MoCap) und Virtual Reality (VR) stehen der Logistikforschung Technologien zur Verfügung, welche in den letzten Jahren einen erheblichen Entwicklungssprung vollzogen haben. Diese technologischen Wegbereiter ermöglichen eine menschenzentrierte Planung und Optimierung von MFS in der Logistik 4.0. Dies beinhaltet zum einen die empirische Absicherung von Eingabeparametern von Planungs- und Optimierungsansätzen. Zum anderen können Hypothesen über den Einfluss einer Entscheidung auf den Faktor Mensch anhand von Szenarien kosten- und zeitoptimiert validiert werden.

Das Ziel dieses Beitrags ist es, Optimierungspotenziale für die Planungssystematiken bezüglich der Betrachtung des menschlichen Faktors anhand konkreter Kriterien zu identifizieren. Es wird aufgezeigt, wie MoCap und VR dazu genutzt werden können, diese Optimierungspotenziale zu heben. Aus wissenschaftlicher Sicht ergeben sich Anknüpfungspunkte für die Integration der Logistik 4.0 in die Planungssystematiken. Für die praktische Anwendung stellt dieser Beitrag konkrete Ansätze zur Nutzbarmachung von MoCap und VR vor. In der Folge wird der Veränderungsbedarf aktueller Planungssystematiken zur Integration der Technologien formuliert.

In Abschnitt 2 werden aktuell in der Literatur verfügbare Planungssystematiken, die den Faktor Mensch als Eingabefaktor mathematischer Modelle begreifen, vorgestellt und auf ihre Verwendung in der Praxis eingegangen. Die identifizierten Defizite und Optimierungsbedarfe motivieren die Nutzung von MoCap und VR zur Planung und Optimierung von MFS. Die vorgestellten Anwendungsmöglichkeiten fließen in die Definition eines Vorgehens anhand physischer Modelle in Abschnitt 4 ein. Abschließend reflektiert Abschnitt 5 die Erkenntnisse dieses Beitrags und formuliert weitergehenden Forschungsbedarf.

2 PLANUNG UND OPTIMIERUNG ANHAND MATHEMATISCHER MODELLE

Die Planung und Optimierung von MFS weist häufig eine hohe Komplexität auf. Um dieser Komplexität entgegenzuwirken, kann sich der Logistikplaner an verschiedenen Planungssystematiken orientieren. Abbildung 1 zeigt auf, dass komplexe Systeme häufig als vereinfachtes Modell abgebildet werden, welche dann analytisch oder simulativ analysiert werden.

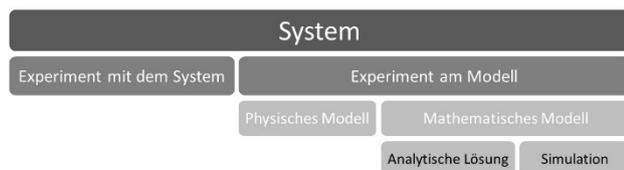


Abbildung 1. Möglichkeiten der Untersuchung eines Systems (in Anlehnung an [LK00])

Diese Vorgehensweise trifft auch auf die in diesem Beitrag behandelten MFS zu. Experimente mit dem System sind bei der Neuplanung von MFS nahezu ausgeschlossen und bei der Umplanung von MFS sehr zeit- und kostenintensiv.

2.1 VORHANDENE PLANUNGSSYSTEMATIKEN

Wie eingangs erwähnt, gibt es eine Vielzahl wissenschaftlicher Planungssystematiken. Die in Abbildung 2 aufgeführten Systematiken sind alle speziell für die Planung von MFS/Logistiksystemen ausgelegt und bestehen

aus drei bis zehn Stufen. In allen Systematiken werden Phasen der Planung identifiziert und abgegrenzt, welche iterativ durchlaufen werden. Jede Planungssystematik beinhaltet, wenn auch teilweise unter Nutzung anderer Begrifflichkeiten, die Phasen der Konzept-, Grob- und Feinplanung. Da diese Phasen aufeinander aufbauen, wird der Detaillierungsgrad hinsichtlich der einzelnen logistischen Gewerke, wie z. B. Fördertechnik, Lagertechnik, Arbeitsplatzgestaltung etc., zunehmend hoch.

Übersicht vorhandener Planungssystematiken	
Bezeichnung	Anzahl Planungsstufen
Distribution Center Design Process nach Schmidt	8
Planungssystematik nach ten Hompel et al.	7
Planungsschritte nach Günthner et al.	10
Planung von Logistiksystemen nach Gudehus	3
Planungssystematik nach Martin	5
Planungsstufen nach Arnold/Furmans	4
Planungsmodell nach VDI 2498	4

Abbildung 2. Auswahl vorhandener Systematiken für die Planung von Materialflusssystemen ([Sch18]; [HSD18]; [GDK⁺13]; [Gud12]; [Mar12]; [AF09]; [VDI2498])

Die Planung von MFS ist ein stufenweises sowie zeitintensives Vorgehen und erfordert die Zusammenarbeit vieler Akteure aus unterschiedlichen Branchen. Zu diesen Akteuren zählen neben dem Logistikplaner auch Architekten, Bauunternehmer, Brandschutz- und Sprinklerplaner, Logistikdienstleister, Generalunternehmer, externe Berater und nicht zuletzt der Endkunde bzw. Nutzer der Anlage. Da diese Akteure unterschiedliche Vorkenntnisse für MFS mitbringen, herrscht häufig eine Informationsasymmetrie im Planungsprozess. Hierbei wäre es notwendig, dass der Logistikplaner stringent nach einer der vorgestellten Planungssystematiken vorgeht, um eine hohe Transparenz entlang der Stufen zu gewährleisten. In der Praxis wird dies häufig nicht umgesetzt, da der Planer auf sein Erfahrungswissen vertraut [WS14]. Bei mangelnder Dokumentation der Vorgehensweise bzw. Nutzung eigener Planungsmodelle ist zudem zu bedenken, dass das Wissen bei einem Personalwechsel verloren gehen kann. Weiterhin können für den Kunden durch den Einsatz von externen Experten hohe und schwer kalkulierbare Kosten entstehen [TVK⁺15].

Grundlegend für den Entwurf von Prozess- und Arbeitsmittelvarianten im Zuge der Grobplanungsstufe sowie die spätere detaillierte Dimensionierung des gesamten MFS ist eine valide und transparente Datenbasis. Hierbei fällt auf, dass der Faktor Mensch in den unterschiedlichen Planungssystematiken nur bedingt empirisch erfasst wird. Gerade für die Gestaltung verschiedener Varianten in einem System mit einer großen Belegschaft können getroffene Annahmen und Erfahrungswerte zur Prozesszeit

unscharf sein und somit messbaren Einfluss auf die Systemleistung nehmen. Als Planungshilfsmittel werden beispielsweise in der 7-Stufen-Systematik nach TEN HOMPEL Zeitaufnahmen, Multimomentaufnahmen oder Interviewmethoden aufgeführt [HSD18]. Jedes dieser Hilfsmittel ist zum einen zeit- und somit kostenintensiv und birgt zum anderen die Gefahr einer subjektiven Interpretation des Planers. Zudem müssen neu geplante MFS zuerst physisch geschaffen werden, um diese im Anschluss durch die genannten Methoden zu erfassen.

2.2 DEFIZITE UND OPTIMIERUNGSBEDARF

Eine grundlegende Problematik der Planungssystematiken ist, dass diese in der praktischen Umsetzung häufig ungenutzt bleiben und eher auf das Erfahrungs- und Expertenwissen der Planer zurückgegriffen wird [WS14]. Bei der Bildung von Arbeitsmittelvarianten oder der Durchsatzberechnung werden möglicherweise Berechnungen und Simulationsbausteine aus vergleichbaren Projekten aus der Vergangenheit übernommen. Dies kann geschehen, obwohl das neue Projekt diese Übertragung eigentlich nicht zulässt. Der Faktor Mensch wird bei der Auslegung von Materialflusssystemen in der Regel lediglich als Eingabewert für analytische und simulative Methoden berücksichtigt. Hier liegt gerade bei der Planung von manuellen Systemen ein großes Optimierungspotenzial.

Die Einsparung von Personal besitzt bei der Planung von MFS ein hohes Potential zur Kostenminderung und ist somit ein wichtiges Kriterium für die Auswahl intralogistischer Betriebsmittel [WS14]. Beispielsweise kann eine Erhöhung des Eingabefaktors „Zeit pro Pick“ von 3 auf 4 Sekunden den Durchsatz eines Kommissioniersystems stark reduzieren. Für die Ermittlung der erwarteten Prozesszeiten wird jedoch häufig entweder auf den Erfahrungswert der Planer oder manuelle Verfahren wie REFA oder MTM zurückgegriffen. In vielen aufgeführten Planungssystematiken fehlt der Verweis auf eine empirische Datenbasis für manuelle Tätigkeiten innerhalb von Materialflusssystemen. Für eine solche empirische Absicherung werden Experimente an physischen Modellen benötigt. Bei bereits bestehenden MFS können manuelle Zeitaufnahmen des Ist-Zustands durchgeführt werden. Für die Neuplanung sind diese Aufnahmen aktuell nur unter großem Aufwand bzw. partiell möglich.

Eine weitere Herausforderung für die Planung von komplexen Materialflusssystemen ist das in allen Planungssystematiken geforderte langfristige Planungsergebnis und die Orientierung an mittel- und langfristigen Unternehmenszielen [WS14]. Im Kontext der in der Industrie 4.0 postulierten Anforderungen nach Autonomie und Wandlungsfähigkeit muss ein Umdenken in Richtung hochflexible Planungsergebnisse stattfinden.

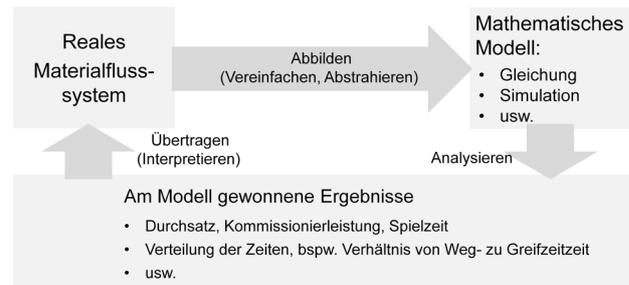


Abbildung 3. Planung und Optimierung von MFS anhand mathematischer Modelle (in Anlehnung an [AF09], S.47)

Den vorgestellten Planungssystematiken liegt der Ansatz zugrunde, die Realität durch Abstraktion und Vereinfachung in einem Modell abzubilden. Abbildung 3 zeigt, dass bei der Dimensionierung von MFS mathematische Modelle, d. h. Gleichungen, Simulationsmodelle etc. zur Analyse und Prognose des Systemverhaltens zum Einsatz kommen. An dem Modell gewonnene Erkenntnisse werden durch eine geeignete Interpretation auf die Realität übertragen.

Der Faktor Mensch wird aktuell bei der Abbildung der Realität in einem Modell als Eingabeparameter eines solchen verstanden. Beispielsweise wird in einem Kommissioniersystem die Zeit pro Pick sowie die Beschleunigung und Geschwindigkeit eines Mitarbeiters durch einen fixen Wert oder eine Verteilung angegeben. Änderungen am mathematischen Modell beeinflussen dabei nicht die Parameter, die den Faktor Mensch beschreiben. Dies liegt insbesondere daran, dass eine Wechselwirkung zwischen dem Faktor Mensch mit einer Entscheidung des Planers nur mit sehr hohem Aufwand empirisch belegbar ist.

Zusammenfassend führen folgende Kriterien zu einer Verbesserung bei dem Einsatz der Planungssystematiken:

- Empirische Datenerhebung quantitativ und objektiv
- Physisch erlebbares Modell
- Ad-hoc Anpassung und Evaluierung

Auf die Kriterien wird in den folgenden beiden Abschnitten dieses Beitrags eingegangen. Darüber hinaus werden Möglichkeiten aufgezeigt, diese umzusetzen.

3 TECHNOLOGISCHE WEGBEREITER

Durch die Verknüpfung von MoCap mit VR können Arbeitsmittelvarianten, Betriebsmittelanordnungen etc. kostengünstig und in kurzer Zeit erstellt werden. Dieses Rapid Physical Prototyping stellt bei der Planung und Optimierung von MFS einen neuartigen Ansatz dar. Es kommt bisher beispielsweise in der Materialwissenschaft [Nar14] und bei kleinen Objekten zum Einsatz [NNY+18].

Durch Rapid Physical Prototyping auf der Makro-Ebene eines MFS entstehen für Menschen physisch erlebbare Modelle. Sie bilden Szenarien ab, in denen der Faktor Mensch empirisch erhoben wird. Durch die Datenauswertung werden für die Planung und Optimierung des MFS nützliche Erkenntnisse auf objektive Weise gewonnen.

3.1 MOTION CAPTURING

Motion Capturing ermöglicht die Erfassung von Bewegungen und Ausgabe in ein computerlesbares Format, bspw. als CSV-Daten oder Video [BHL⁺17]. Die optische Motion Capturing Anlage am Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen FLW kann je nach Positionierung der 38 Kameras eine Fläche von bis zu 500 m² bei einer Höhe von bis zu 6 m abdecken [ZBV⁺17]. Starre Objekte, d. h. solche ohne relative Bewegung ihrer Einzelteile zueinander, wie Transportroboter, verfahrbare Regale und Handhabungsobjekte werden durch passive Marker für das MoCap-System erkennbar. Zur Erfassung von Menschen kommen spezielle Anzüge zum Einsatz. Sämtliche Bewegungen aller markierten Objekte und Menschen lassen sich mit bis zu 300 Frames pro Sekunde aufnehmen und millimetergenau auswerten. Die Ausgabe des Systems umfasst die Translations- und Rotationskoordinaten der starren Objekte sowie der Gliedmaßen des Menschen. Zudem werden die Winkelbeziehungen der Gliedmaßen zueinander ausgegeben.

Der Nutzen des Einsatzes von MoCap wird im Hinblick auf die Kriterien aus Abschnitt 2.2 deutlich. Die vom System erhobenen Daten sind quantitativ und objektiv. Die Datenerhebung und Nutzbarmachung erfolgt rein datenbasiert. Erst die Bewertung geschieht qualitativ durch einen Menschen. MoCap ist unmittelbar mit dem Einsatz physisch erlebbarer Modelle kombinierbar. Unterschiedliche Lagerszenarien lassen sich durch die Beschaffung von Regalen, Kisten bzw. mit der Hilfe von Cardboard Engineering [ND16] nachbauen. Eine Ad-Hoc Anpassung und Evaluierung dieser Szenarien ist in der Halle unmittelbar möglich. Eine abweichende Betriebsmittelanordnung kann innerhalb kürzester Zeit erstellt und eine empirische Datenaufnahme durchgeführt werden. Die Daten des MoCap-Systems lassen sich unmittelbar betrachten, exportieren und auswerten. Der Einsatz von MoCap unterstützt zudem die Betrachtung ergonomischer Parameter bereits in der Planungsphase [WD14].

Mit Methoden der Mustererkennung lassen sich das Vorkommen und die Dauer menschlicher Aktivitäten wie Laufen, Picken, etc. automatisch ausgeben [FAH16]. Durch eine attributbasierte Repräsentation menschlicher Aktivität werden die aufgenommenen Zeitreihen mit semantischen Labels beschrieben [RF18]. Die Aktivitätsklassifikation wird adaptiv, indem Aktivitäten als eine vom Anwender frei wählbare Attributkombination beliebig granular beschrieben werden. Diese Methode wird im DFG-Projekt „Adaptive, ortsabhängige Aktivitätserken-

nung und Bewegungsklassifikation zur Analyse des manuellen Kommissionierprozesses“ (HO2403/14-1) aktuell interdisziplinär erforscht. Die automatische Aktivitätserkennung beschleunigt die Bewertung der aufgenommenen Daten je Szenario. Auch der Laufweg und die Aufenthaltsdauer des Menschen können betrachtet werden. Die Aufnahme und manuelle Annotation der Daten für eine Mustererkennung ist zeitaufwändig [FAH16]. Die Nachbildung von Szenarien ermöglicht die Datenaufnahme und -annotation sowie das Training von Mustererkennungsalgorithmen bereits im Planungsstadium eines MFS und nicht erst in einem bestehenden System. Es existieren zwar MoCap-Datenbanken menschlicher Aktivitäten, wie beispielsweise die *Carnegie Mellon University Graphics Lab Motion Capture Database* [CMU18]. Ein kuratierter Datensatz typischer Aktivitäten in MFS, bspw. der Kommissionierung oder Verpackung, existiert aktuell nicht. Die Erschaffung solcher Datensätze ist vor dem Hintergrund der Vielfältigkeit denkbarer Aktivitätsausprägungen nur in einem Umfeld möglich, das unterschiedliche Szenarien mit geringen Aufwand physisch erlebbar werden lässt.

3.2 KOPPLUNG MIT VIRTUAL REALITY

Durch die Weiter- und Neuentwicklung verschiedener Formen der Darstellung von virtuellen Welten, wurden und werden im Bereich der VR neue Möglichkeiten geschaffen. Dies zeigt sich insbesondere bei der Durchsetzung von VR-Anwendungen am Endkonsumentenmarkt. Oculus Rift, HTC Vive oder Google Daydream sind Beispiele für in der Darstellung hochwertige, aber, im Vergleich zu früheren Lösungen, preiswerte Head Mounted Displays (HMD) zur Darstellung des VR-Inhalts.

Diese VR-Technik wird vorwiegend im Computer-spielebereich eingesetzt, allerdings gibt es immer mehr Bestrebungen diese ebenfalls in der Industrie einzusetzen. Insbesondere in der Logistik, und speziell in der Intralogistik, ergeben sich vielfältige Anwendungsmöglichkeiten. Dies wurde bereits vor ca. 10 bis 15 Jahren an der TU München gesehen, weshalb dort einige Forschungen in der Verknüpfung von VR und Intralogistik durchgeführt wurden (z. B. [Wul08], [RW08]).

Für die Nutzung von VR in der Intralogistik kommen verschiedene Anwendungsfälle infrage. Zunächst können geplante Anlagen mittels VR visualisiert werden. Planer und Kunden können Anlagen, welche vormals nur als 2D-Plan verfügbar waren oder aufwendig visualisiert werden mussten [vgl. WS14], direkt in hoher Qualität virtuell begehen. Hierdurch können Planungsfehler vor der Realisierung verringert und die Partizipation aller Beteiligten (vgl. Kapitel 2.1) erhöht werden. Insbesondere der Interpretationsspielraum, welcher sich häufig aus der Ausgestaltung von Pflicht- und Lastenheft ergibt, wird mit der Diskussion am physisch erlebbaren Modell zu einem großen Teil aufgelöst.

Die Partizipation kann zusätzlich in der Weise erhöht werden, dass Mitarbeiter im virtuellen Raum zukünftige oder bestehende Arbeitsplätze designen und verändern. Diese können im Anschluss ad-hoc getestet und evaluiert werden. Dabei kann das System eine Bewertung anhand vorgegebener Kriterien vornehmen und die erzielte Leistung messen. Als Ergebnis entsteht durch mehrere Iterationen ein für den Anwendungsfall optimierter Arbeitsplatz. Die durch die Mitarbeiter verfügbare Leitung am Arbeitsplatz ist dabei empirisch aufgenommen.

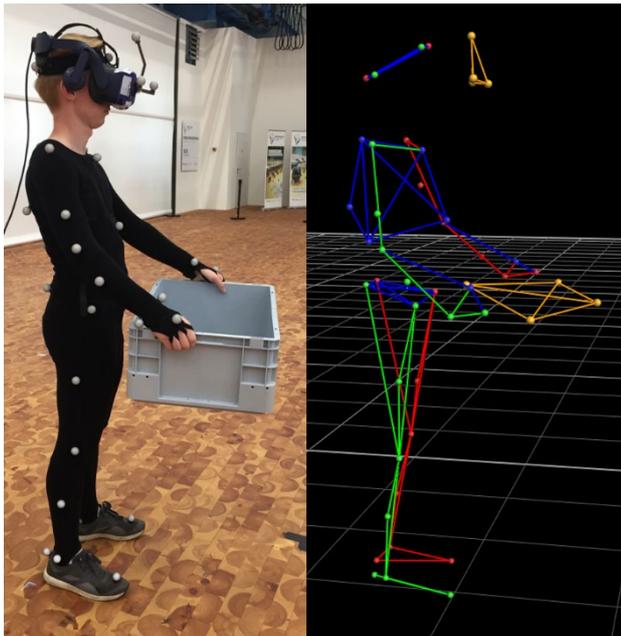


Abbildung 4. Kopplung von MoCap und VR – Repräsentation im MoCap und reales Bild

Die im vorherigen Abschnitt beschriebene Motion Capturing Anlage am Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen FLW kann für die Positionsbestimmung des VR-Systems genutzt werden. Die technische Umsetzung wurde bereits bei CHAGUÉ und CHARBONNIER [CC16], sowie bei KASAPAKIS et al. [KGD18] beschrieben. Hierbei wird der Nutzer bzw. die technischen Interaktionsgeräte wie das HMD und die Controller mit visuellen Markern versehen, sodass sie als einzelne Objekte identifiziert werden können. Neue HMDs, wie HTC Vive oder Oculus Rift, verwenden Infrarot-basierte Sensoren für die Ortung und Positionserkennung im Raum. Die hierbei verfügbare Fläche ist auf maximal 10 m x 10 m begrenzt, weshalb sie auf den Einsatz bei Szenarien mit geringem Bewegungsradius beschränkt sind. Durch die Nutzung des Motion Capturing Systems für die Positionsbestimmung kann die nutzbare Fläche deutlich vergrößert werden. Im Forschungszentrum am FLW wird hierbei eine Fläche von 500 m² nutzbar. Anwendungsfälle, wie bspw. die Darstellung einer Person-zur-Ware Kommissionierung, können dabei problemlos ohne einen Bruch in der Immersion abgebildet werden. Zusätzlich können in dem genannten Szenario mehrere Personen

gleichzeitig und kollaborativ arbeiten. Daneben können reale Objekte ebenfalls mit optischen Markern versehen werden und virtuell repräsentiert werden. Dies erhöht die Immersion beim Nutzer und die Validität der aufgenommenen Daten durch das System, bspw. beim Heben oder Hantieren mit Lasten.

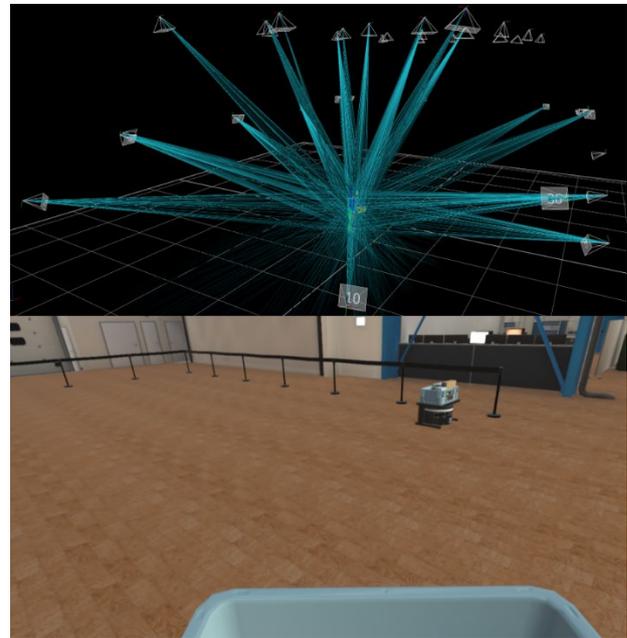


Abbildung 5. Kopplung von MoCap und VR – Repräsentation im MoCap mit Camera Rays und Bild aus dem HMD

In den Abbildungen 4 und 5 ist die Kopplung von VR und MoCap zu sehen. In Abbildung 4 ist der Versuchsaufbau dargestellt. Die Person trägt einen Anzug mit an vorgegebenen Stellen angebrachten Markern. Ebenso sind die beiden starren Objekte, das HMD und der Kleinladungsträger, mit Markern versehen. Auf der rechten Seite der Abbildung 4 ist die entsprechende Repräsentation im MoCap zu sehen. Dies ist auch in Abbildung 5 dargestellt, allerdings aus einer anderen Perspektive. Hierbei sind oben die Kameras mit ihren Rays sowie das Systemvolumen erkennbar. Der untere Teil zeigt die Egoperspektive des menschlichen Anwenders, also das Bild des HMD. Die Halle, inkl. ihrer Objekte, wie dem Kleinladungsträger, sind hierbei maßstabsgetreu nachgebildet.

4 NUTZEN EINES VORGEHENS ANHAND PHYSISCHER MODELLE

In diesem Kapitel wird ein Vorgehen vorgestellt, welche die in Kapitel 2.2 besprochenen Defizite und Optimierungsbedarfe bei der Planung von MFS behebt. Hierfür werden die in Kapitel 3 vorgestellten technologischen Wegbereiter MoCap und VR genutzt.

Der Kernaspekt der in Kapitel 2.2 beschriebenen Herausforderungen bei der Planung von MFS ist die Annahme

von Eingabeparametern, welche nicht empirisch abgesichert sind. Um die Herausforderungen zu adressieren, müssen mathematische Modelle um eine experimentelle Komponente erweitert werden. Dies hat zur Folge, dass die in Abbildung 3 dargestellte Planung von MFS durch eine weitere Dimension erweitert werden muss. Die resultierende Veränderung der Denkweise ist in Abbildung 6 dargestellt.

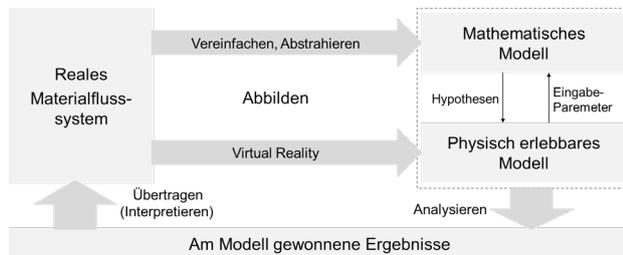


Abbildung 6. Planung und Optimierung von MFS anhand mathematischer Modelle (in Anlehnung an [AF09], S.47)

Es wird ersichtlich, dass hierdurch neue Iterationsschritte bei der Planung entstehen. Die in Kapitel 2 vorgestellten Planungssystematiken lassen die Integration dieser kleinteiligen Planungsschritte nur bedingt zu. Allerdings wird es, besonders auf die in Kapitel 1 genannten Anforderungen an die Planung von MFS, unerlässlich, den Faktor Mensch vermehrt in die Planung und Dimensionierung einfließen zu lassen.

Andere Methoden zur Bewertung manueller Prozesse, wie Zeit- und Ablaufstudien, setzen einen vordefinierten Prozess voraus. Dies bedeutet, dass der Mitarbeiter bereits feste Vorgaben hat wie der Prozess auszuführen ist. Im Gegensatz dazu kann in einer freien Testumgebung der Mitarbeiter den Prozess ohne vorher definierte Schritte ausführen um das Ziel zu erreichen. Durch die aufgenommenen Daten können Arbeitsplatz und Prozess sukzessive optimiert werden.

Die Umsetzung innerhalb einer geeigneten Planungssystematik wird mittels MoCap und VR angegangen. Hierfür werden geplante MFS oder einzelne Arbeitsplatzvarianten in einer VR-Umgebung umgesetzt. Das benötigte physische Modell ist hierbei virtuell, allerdings ist es durch VR *physisch erlebbar*. Durch die hohe Immersion in die virtuelle Welt nimmt der Nutzer das Modell als physisch vorhanden wahr.

Da die Arbeitsplätze und Prozesse in VR abgebildet sind, können diese bereits im Planungsstadium evaluiert werden. Durch das MoCap und die Anwendung können unterschiedlichste Parameter wie Ergonomie, Leistung etc. erfasst werden. Anpassungen prozessualer und gestalterischer Natur verschiedener Varianten des Arbeitsplatzes können untersucht und im Anschluss miteinander verglichen werden. Mithilfe iterativer Anpassungen kann der Arbeitsplatz optimiert werden. Der final generierte Arbeitsplatz kann im Anschluss in die Realität überführt werden.

Die erfassten Kennzahlen des Arbeitsplatzes liefern im Anschluss die empirisch belegten Eingabeparameter für die mathematische Optimierung, sowie für die Gesamtauslegung des MFS. Eine Unter- oder Überdimensionierung aufgrund Annahmen hinsichtlich der Leistungsfähigkeit der Arbeitsplätze inklusive des Faktors Mensch sind hierdurch hinfällig, was insbesondere Investitions- und Betriebskosten spart.

Mittels der Umsetzung in VR können zusätzlich die operativen Mitarbeiter früh in den Planungsprozess eingebunden werden. Ähnlich wie beim Cardboard Engineering können die Mitarbeiter ihren zukünftigen Arbeitsplatz mitgestalten und wertvolles Feedback liefern. Die finale VR-Umsetzung kann im Anschluss für weitere Maßnahmen, wie Qualifizierungsmaßnahmen weiterentwickelt werden (z. B. in einem Serious Game, vgl. [HK17b]). So können die Mitarbeiter bereits vor der Realisierung des MFS am zukünftigen Arbeitsplatz geschult werden, was zu einer deutlichen Leistungssteigerung während des Betriebsanlaufes führen kann.

5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Mit bestehenden Systematiken zur Planung und Optimierung von MFS können nur bedingt die Anforderungen der Industrie 4.0 erfüllt werden. Besonders Eingabeparameter des Faktors Mensch werden für mathematische Modelle nicht oder nur mit hohem Aufwand empirisch erfasst. Dies führt zu einer ungenauen Planung und Optimierung der MFS.

Die Kopplung von MoCap und VR ermöglicht Experimente am physischen Modell. Durch eine iterative Vorgehensweise können Arbeitsplätze optimiert und die gewonnenen Ergebnisse als Eingabeparameter für die mathematische Optimierung genutzt werden. Diese Ergebnisse sind deutlich detaillierter und empirisch belegt, was zu einer präziseren Leistungsberechnung und Dimensionierung von MFS führt.

In weiteren Schritten werden die angeführten Überlegungen am Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen FLW in vivo umgesetzt. Im Anschluss werden die praktische Anwendbarkeit im Fokus stehen und weitere Untersuchungen mit Hilfe von Industriepartnern angestrebt.

FÖRDERHINWEIS

Dieses Paper wurde im Rahmen der Forschungsprojekte „Leistungszentrum Logistik und IT“ sowie dem „Innovationslabor Hybride Dienstleistungen in der Logistik“ erstellt.

LITERATUR

- [AF09] D. Arnold und K. Furmans, *Materialfluss in Logistiksystemen*, 6., erw. Aufl. Berlin: Springer, 2009. – ISBN 978-3-642-01404-8
- [BHL⁺17] Y. Bai, H. Hu, Y. Li, C. Zhao, L. Luo, und R. Wang, „Research Methods for Human Activity Space Based on Vicon Motion Capture System“, in *2017 5th International Conference on Enterprise Systems (ES)*, 2017, S. 202–206. – DOI 10.1109/ES.2017.40
- [CC16] S. Chagué und C. Charbonnier, „Real Virtuality: A Multi-user Immersive Platform Connecting Real and Virtual Worlds“, in *Proceedings of the 2016 Virtual Reality International Conference*, New York, NY, USA, 2016, S. 4:1–4:3. – ISBN 978-1-4503-4180-6
- [CMU18] CMU, „Carnegie Mellon University Graphics Lab Motion Capture Database“, Juni-2018. [Online]. Verfügbar unter: <http://mocap.cs.cmu.edu/>.
- [FAH16] S. Feldhorst, S. Aniol, und M. ten Hompel, „Human Activity Recognition in der Kommissionierung – Charakterisierung des Kommissionierprozesses als Ausgangsbasis für die Methodenentwicklung“, *Logist. J. Proc.*, Bd. 2016, Nr. 10, Okt. 2016. – DOI 10.2195/lj_Proc_feldhorst_de_201610_01
- [GDK⁺13] W. A. Günthner, J. Durchholz, E. Klenk, und J. Boppert, „PLANUNG Methoden zur Planung schlanker Logistikprozesse“, in *Schlanke Logistikprozesse*, Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2013, S. 17–131. – ISBN 978-3-642-38271-0
- [Gud12] T. Gudehus, „Planung und Realisierung“, in *Logistik 1*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2012, S. 63–94. – ISBN 978-3-642-29358-0
- [HK17a] M. ten Hompel und S. Kerner, „Logistik 4.0“, *Inform.-Spektrum*, Bd. 38, Nr. 3, S. 176–182, Juni 2015. – DOI 10.1007/s00287-015-0876-y
- [HK17b] M. Henke und S. Kaczmarek, *Gamification in der Logistik: effektiv und spielend zu mehr Erfolg*, 1. Auflage. München: Huss, 2017. – ISBN 978-3-946350-40-8
- [HSD18] M. Ten Hompel, T. Schmidt, J. Dregger, *Materialflusssysteme: Förder- und Lagertechnik*; 4.Aufl. Berlin: Springer, 2018. – ISBN 978-3-662-56180-5
- [JK17] J. Jost, T. Kirks, M. Ten Hompel, M. Henke, und U. Clausen, „Herausforderungen der Mensch-Technik-Interaktion in der Intralogistik“, *Fraunhofer IML*, 2017. – DOI 10.24406/iml-n-462114
- [KGD18] V. Kasapakis, D. Gavalas, und E. Dzardanova, „Creating Room-Scale Interactive Mixed-Reality Worlds Using Off-the-Shelf Technologies“, in *Advances in Computer Entertainment Technology*, Bd. 10714, A. D. Cheok, M. Inami, und T. Romão, Hrsg. Cham: Springer International Publishing, 2018, S. 1–13. – ISBN 978-3-319-76269-2
- [LK00] A. Law, D.W. Kelton, „Simulation modeling and analysis“, *McGraw-Hill series in industrial engineering and management science*. 3rd edition, Boston 2000 – ISBN 978-0070592926
- [Mar12] H. Martin, „Lagerlogistik“, in *Praxiswissen Intralogistikplanung*, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2012, S. 67–216. – ISBN 978-3-8348-8106-9
- [Nar14] R. Narayan, Hrsg., *Rapid prototyping of biomaterials: principles and applications*. Oxford Cambridge Philadelphia New Delhi: WP, Woodhead Publishing, 2014. – ISBN 978-0-85709-721-7
- [ND16] M.-N. Nguyen und N.-H. Do, „Re-engineering Assembly Line with Lean Techniques“, *Procedia CIRP*, Bd. 40, S. 590–595, Jan. 2016. – DOI 10.1016/j.procir.2016.01.139
- [NNY⁺18] M. Nebeling, J. Nebeling, A. Yu, und R. Rumble, „ProtoAR: Rapid Physical-Digital Prototyping of Mobile Augmented Reality Applications“, in *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, New York, NY, USA, 2018, S. 353:1–353:12. – ISBN 978-1-4503-5620-6
- [RF18] F. M. Rueda und G. A. Fink, „Learning Attribute Representation for Human Activity Recognition“, *ArXiv180200761 Cs*, Feb. 2018. Verfügbar unter: <http://arxiv.org/abs/1802.00761>

- [RW08] R. Reif und D. Walch, „Augmented & Virtual Reality applications in the field of logistics“, *Vis. Comput.*, Bd. 24, Nr. 11, S. 987–994, Nov. 2008. – DOI 10.1007/s00371-008-0271-7
- [Sch18] M. Schmidt, *Distribution Center Design Process: ein systemtechnikorientiertes Vorgehensmodell zur Konzeptplanung von Logistikzentren*. Dortmund: Verlag Praxiswissen, 2018. – ISBN 978-3-86975-129-0
- [THN⁺ 17] C. Tüllmann, M. ten Hompel, A. Netzsträter, und C. Prasse, *Social Networked Industry ganzheitlich gestalten*, Dortmund, 2017. – DOI 10.24406/IML-N-462112.
- [TVK⁺15] J. Tödter, V. Viereck, T. Krüger-Basjmeleh, und T. Wittmann, „Steigerung des Autonomiegrades von autonomen Transportrobotern im Bereich der Intralogistik – technische Entwicklungen und Implikationen für die Arbeitswelt 4.0“, in *Zukunft der Arbeit in Industrie 4.0*, A. Botthof und E. A. Hartmann, Hrsg. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015, S. 69–75. – ISBN 978-3-662-45914-0
- [VBH17a] B. Vogel-Heuser, T. Bauernhansl, und M. Ten Hompel, Hrsg., *Handbuch Industrie 4.0. Bd. 3: Logistik, 2.*, erweiterte und bearbeitete Auflage. Berlin: Springer Vieweg, 2017. – ISBN 978-3-662-53250-8
- [VBH17b] B. Vogel-Heuser, T. Bauernhansl, und M. Ten Hompel, Hrsg., *Handbuch Industrie 4.0. Bd. 4: Allgemeine Grundlagen, 2.* Auflage. Berlin: Springer Vieweg, 2017. – ISBN 978-3-662-53253-9
- [VDI2498] VDI 2498: Vorgehen bei einer Materialflussplanung - Grundlagen“, VDI 2498, 2011.
- [WD14] K. Weisner und J. Deuse, „Assessment Methodology to Design an Ergonomic and Sustainable Order Picking System Using Motion Capturing Systems“, *Procedia CIRP*, Bd. 17, S. 422–427, Jan. 2014. – DOI 10.1016/j.procir.2014.01.046
- [WS14] Alexandra Wunderle und Tobias Sommer, „Erfahrung und Augenmaß zählen“, 2014. Verfügbar unter: http://www.hebezeuge-foerdermittel.de/sites/default/files/Fachartikel/HF0814_Planung_von_Intralogistiksystemen_0.pdf
- [Wul08] J. R. Wulz, *Menschintegrierte Simulation in der Logistik mit Hilfe der Virtuellen Realität*. Mün-chen: Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluß Logistik (fml), TU München, 2008. – ISBN 978-3-9811819-3-7
- [ZBV⁺17] F. Zeidler, H. Bayhan, A. K. Ramachandran Venkatapathy, und M. ten Hompel, „Referenzfeld zur Erforschung und Entwicklung neuartiger hybrider Formen der Zusammenarbeit von Menschen und Maschinen in der Logistik“, *Logist. J. Proc.*, Bd. 2017, Nr. 10, Okt. 2017. – DOI 10.2195/lj_Proc_zeidler_de_201710_01

André Terharen, M.Sc., wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen an der TU Dortmund

Felix Feldmann, M.Sc., wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen an der TU Dortmund

Christopher Reining, M.Sc., wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen an der TU Dortmund

Prof. Dr. Dr. h. c. Michael ten Hompel, Inhaber des Lehrstuhls für Förder- und Lagerwesen an der TU Dortmund und geschäftsführender Leiter des Fraunhofer-Instituts für Materialfluss und Logistik IML

Adresse: Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen, TU Dortmund, Joseph-von-Fraunhofer-Str. 2-4, 44227 Dortmund, Germany,
Phone: +49 231 755-2765, Fax: +49 231 755-4768,
E-Mail: andre.terharen@tu-dortmund.de