

---

# Die Maschine – der beste Freund des Menschen?

Zukunftsstudie zur Interaktion zwischen Mensch und  
Maschine im Lager der Zukunft

Fachgebiet Unternehmensführung und Logistik  
Abschlussbericht des Forschungsvorhabens – Februar 2018



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

---

---

---

## Impressum

---

---

Forschungsstelle:	Technische Universität Darmstadt Fachbereich Rechts- und Wirtschaftswissenschaften Fachgebiet Unternehmensführung und Logistik Prof. Dr. Ralf Elbert
Projektförderer:	Forschungsgemeinschaft Intralogistik / Fördertechnik und Logistiksysteme e.V. (IFL) Lyoner Straße 18, 60528 Frankfurt a.M.
Projektleiter:	Jan-Karl Knigge, M.Sc.

---

Projekttitel:  
DIE MASCHINE – DER BESTE FREUND DES MENSCHEN? ZUKUNFTSSTUDIE ZUR INTERAKTION ZWISCHEN  
MENSCH UND MASCHINE IM LAGER DER ZUKUNFT

---

Projektkennwort:	Zukunft MMI
IFL-Projektnummer:	6303300
Projektlaufzeit:	März bis September 2017

---

---

---

## Inhaltsverzeichnis

---

Abbildungsverzeichnis.....	iii
Abkürzungsverzeichnis.....	v
1 Ausgangslage und Zielsetzung des Projektes.....	1
1.1 Ausgangslage.....	1
1.2 Zielsetzung und Forschungsfrage.....	1
1.3 Projektplan und Aufbau des Berichtes.....	3
2 Stand der Forschung und Systematisierung des Forschungsraumes.....	6
3 Erster Versuchsaufbau, Datenerhebung und -analyse.....	12
3.1 Konzipierung des Versuchsablaufes.....	12
3.1.1 Modellierung der realen und der virtuellen Kommissionierumgebung.....	13
3.1.2 Design der Pick-by-Voice-Pickanweisungen.....	14
3.2 Ergebnisse der ersten Versuchsreihe.....	16
4 Erweiterter Versuchsaufbau, zweite Datenerhebung und -analyse.....	20
4.1 Diskussion der Ergebnisse aus der ersten Versuchsstudie.....	20
4.2 Anpassung des Versuchsaufbaus.....	21
4.3 Ergebnisse der zweiten Versuchsreihe.....	23
5 Fazit und Ausblick.....	29
Publikationen auf Basis des Forschungsprojektes.....	31
Projektpartner und Danksagung.....	32
Literaturverzeichnis.....	33

---

---

## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 1: Die drei Dimensionen der Mensch-Maschine-Interaktion im Rahmen des Forschungsprojektes .....	2
Abbildung 2: Ursprünglicher Projektplan .....	4
Abbildung 3: Finaler Projektplan.....	5
Abbildung 4: Schematische Darstellung der in AP 1 zentralen Fragestellung .....	6
Abbildung 5: Suchanfragen und Ergebnisse der Datenbanksuche.....	7
Abbildung 6: Darstellung des systematischen Vorgehens zur Auswahl des Literatursamples ....	8
Abbildung 7: Publikationen des finalen Samples nach Veröffentlichungsjahr .....	8
Abbildung 8: Kategorisierung und Simulierbarkeit der externen Einflussfaktoren auf die Kommissionierung .....	9
Abbildung 9: Kategorisierung und Simulierbarkeit der externen Einflussfaktoren auf die Kommissionierung .....	10
Abbildung 10: Ablauf der Versuche, bestehend aus vier Durchgängen mit jeweils 12 Picks für jeden Teilnehmer .....	13
Abbildung 11: Darstellung des Kommissionierregals in der realen (a) und der virtuellen Umgebung (b) .....	14
Abbildung 12: Oberfläche des selbst entwickelten Programms zum Abspielen der Pickanweisungen und zur Erfassung von Pickfehlern und Zeiten.....	15
Abbildung 13: Draufsicht der Kommissionierumgebung, die sowohl in der realen als auch in der virtuellen Kommissionierung genutzt wurde .....	16
Abbildung 14: Durchschnittliche Zeit pro Pick in jedem Durchlauf des Versuches.....	17
Abbildung 15: Ergebnisse des NASA-TLX für jeden Teilnehmer der Gruppe V/R.....	19
Abbildung 16: Ergebnisse des NASA-TLX für jeden Teilnehmer der Gruppe R/R .....	19
Abbildung 17: Draufsicht der erweiterten Kommissionierumgebung in der realen Umgebung	21
Abbildung 18: Ablauf der Versuche in der zweiten Versuchsreihe, bestehend aus acht Durchgängen mit jeweils 16 Picks für jeden Teilnehmer.....	22
Abbildung 19: Durchschnittliche Zeit pro Pick in jedem Durchlauf des Versuches in der zweiten Versuchsreihe .....	23

---

Abbildung 20: Boxplots der Pickzeiten pro Artikel in Durchgang 1 bis 4 der Gruppe V/R .....	24
Abbildung 21: Boxplots der Pickzeiten pro Artikel in Durchgang 1 bis 4 der Gruppe R/R .....	25
Abbildung 22: Untersuchte Differenzen zwischen den Pickzeiten in der virtuellen und der realen Kommissionierzeiten .....	26
Abbildung 23: Deskriptive Statistik und Ergebnisse der Testverfahren .....	26
Abbildung 24: Ergebnisse des NASA-TLX der Probanden der Gruppe V/R .....	27
Abbildung 25: Ergebnisse des NASA-TLX der Probanden der Gruppe R/R .....	28

---

---

## Abkürzungsverzeichnis

---

AiF	Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen
AP	Arbeitspaket
IFL	Forschungsgemeinschaft Intralogistik / Fördertechnik und Logistiksysteme e.V.
NASA-TLX	NASA Task Load Index
VR	virtuelle Realität

---

# 1 Ausgangslage und Zielsetzung des Projektes

---

## 1.1 Ausgangslage

Digitalisierung und Automatisierung halten auch in der Logistik zunehmend Einzug. Insbesondere durch die Entwicklung von Konzepten im Bereich der Industrie 4.0 ergibt sich auch für die Logistik ein erhöhter Forschungsbedarf.<sup>1</sup> Nichtsdestotrotz werden nach wie vor noch etwa 80 % der Kommissionierlager manuell nach dem Person-zur-Ware-Prinzip betrieben.<sup>2</sup> Allerdings entwickelt sich auch hier die Automatisierungstechnik rasant weiter und bringt gemeinsam mit dem Thema Industrie 4.0 auch in der Kommissionierung und Lagertechnik tiefgreifende Veränderungen mit sich.<sup>3</sup> Schon heute existieren technische Möglichkeiten, die den Menschen in Kommissionierprozessen unterstützen. Pick-by-Light-, Pick-by-Voice- oder Pick-by-Vision-Systeme sind hier als Beispiele zu nennen. Hinzu kommen teil- und vollautomatisierte Systeme im Bereich Ware-zur-Person mit Hilfe mobiler Pick- und Kommissionierroboter. Individuelle menschliche Eigenschaften wie beispielsweise das Alter, die physische Konstitution oder die individuelle Wahrnehmung sowie äußere Faktoren wie Stress, Lärm oder Licht können die Wirksamkeit solcher technischen Systeme jedoch beeinflussen.<sup>4</sup>

Darüber hinaus wurden in den vergangenen Jahren auch im Bereich der virtuellen Realität (VR) große technische Fortschritte erzielt: So existieren Forschungsarbeiten, die sich mit der Fragestellung auseinandersetzen, inwiefern sich die virtuelle Realität zur Unterstützung von Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern in der manuellen Kommissionierung eignet.<sup>5</sup> Wulz (2008) nutzt beispielsweise eine VR-Simulation, um den Einfluss unterschiedlicher Kommissionierstrategien auf die Leistung der manuellen Kommissionierer zu untersuchen.<sup>6</sup> Hierbei wurden jedoch Technologien genutzt, die aufwändige und kostenintensive Installationen mit einem großen Platzbedarf benötigen, um die virtuelle Umwelt darzustellen. Seit Kurzem stehen jedoch neue, hochauflösende VR-Brillen zur Verfügung, die für einen Massenmarkt (v.a. im Bereich Gaming und Entertainment) entwickelt wurden und daher deutlich platzsparender und kostengünstiger als frühere VR-Technologien sind.<sup>7</sup> Diese Technologie könnte nun dafür geeignet sein, den Einfluss menschlicher Eigenschaften sowie äußere Einflüsse auf den Kommissionierprozess zu simulieren und dadurch systematisch zu untersuchen, wie sich die Interaktion zwischen Mensch und Maschine in der Kommissionierung in Zukunft verbessern lässt. Bisherige Untersuchungen zum Einsatz moderner VR-Technologien zur Untersuchung der Interaktion zwischen Mensch und Maschine in der Kommissionierung existieren nicht.

## 1.2 Zielsetzung und Forschungsfrage

Das Forschungsprojekt beschäftigt sich mit der Fragestellung, wie die Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine in der Kommissionierung zukünftig ausgestaltet und verbessert werden

---

<sup>1</sup> Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2016)

<sup>2</sup> Vgl. de Koster, Le-Duc und Roodbergen (2007)

<sup>3</sup> Vgl. Barreto, Amaral, und Pereira (2017) und Witkowski (2017)

<sup>4</sup> Vgl. Lee, Kim und Chang (2016), Grosse, Glock und Neumann (2015) und de Vries, de Koster und Stam (2015)

<sup>5</sup> Vgl. Reif und Walch (2008)

<sup>6</sup> Vgl. Wulz (2008)

<sup>7</sup> Vgl. Dörner et al. (2016), McGill et al. (2015)

kann. Es wird untersucht, wie sich der Einfluss der Mensch-Maschine-Interaktion auf die Prozesseffizienz in Kommissionierlagern modellieren und untersuchen lässt. Neben den beiden Dimensionen Mensch und Technologie haben darüber hinaus auch äußere Einflussfaktoren aus der Umgebung einen Einfluss auf die Mensch-Maschine-Interaktion in der Kommissionierung. Die äußeren Einflussfaktoren bilden damit eine dritte Dimension des Forschungsprojektes. Die drei Dimensionen des Forschungsprojektes mit entsprechenden Beispielen sind in Abbildung 1 dargestellt.

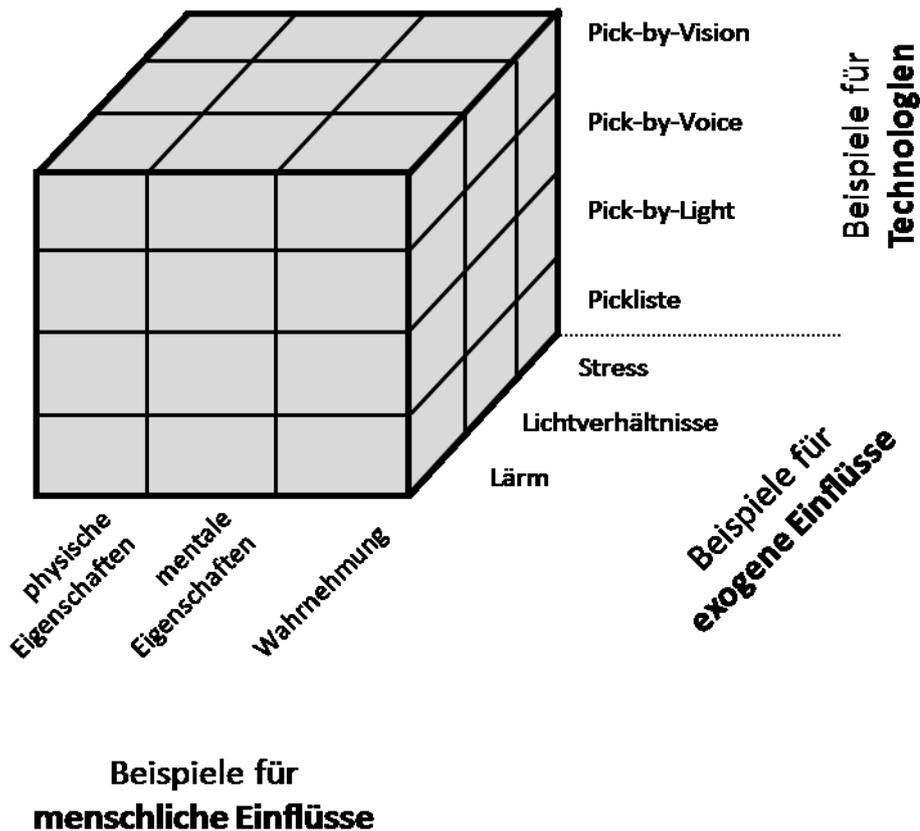


Abbildung 1: Die drei Dimensionen der Mensch-Maschine-Interaktion im Rahmen des Forschungsprojektes (eigene Darstellung)

Um das Zusammenspiel der drei verschiedenen Dimensionen bei der Kommissionierung zu untersuchen, bieten sich VR-Technologien an. Daher werden im Rahmen des Forschungsprojektes die Möglichkeiten moderner VR-Technologien für die wissenschaftliche Untersuchung und systematische Verbesserung der Interaktion zwischen Mensch und Technologie in der Kommissionierung analysiert. Die zentrale Forschungsfrage des Projektes lautet folglich:

Eignet sich die Simulation in der virtuellen Realität als Methode, die Einflüsse der Mensch-Maschine-Interaktion auf die Prozesseffizienz wissenschaftlich zu untersuchen?

Simulationen in der VR verfügen über den Vorteil, dass sich einzelne äußere Einflüsse wie beispielsweise die Farbgebung oder Lichtverhältnisse der Kommissionierungsumgebung ohne großen Aufwand anpassen können. Zudem können menschliche Probanden in Experimenten in

---

der VR integriert werden, um den Einfluss der simulierten äußeren Einflüsse und der jeweiligen, individuellen menschlichen Eigenschaften auf die Prozesseffizienz in der Kommissionierung zu untersuchen. Als Kenngrößen für die Prozesseffizienz kann hierbei neben den Durchlaufzeiten auch die Anzahl an Pickfehlern bei der Kommissionierung dienen.

Damit die in der VR erzielten Ergebnisse jedoch als valide gelten und eine Untersuchung der Mensch-Maschine-Interaktion mittels VR entsprechend als sinnvoll angesehen werden kann, muss zunächst überprüft werden, ob sich die Ergebnisse auf eine Kommissionierung in einem realen Lager übertragen lassen. Um dies zu untersuchen soll im Rahmen des Projektes ein Versuch konzipiert und durchgeführt werden, der die Übertragbarkeit von Durchlaufzeiten und Pickfehlern von virtuellen auf reale Kommissioniervorgänge zeigt. Die ursprüngliche Forschungsfrage wurde folglich mit Hilfe der beiden folgenden Teilfragen konkretisiert:

- a) Wie kann ein Versuchsaufbau konzipiert werden, mit dessen Hilfe sich die Übertragbarkeit von Durchlaufzeiten und Fehlerzahlen einer Kommissionierung in der VR auf eine reale Kommissionierung untersuchen lässt?
- b) Lassen sich die Durchlaufzeiten und Pickfehler, die in der Kommissionierung in der VR erzielt wurden, auf eine reale Kommissionierung übertragen?

### **1.3 Projektplan und Aufbau des Berichtes**

Der Projektplan sah die Einteilung des Projektes in insgesamt vier Arbeitspakete (AP) vor. Im ersten Arbeitspaket wurde zunächst der Forschungsraum systematisiert, abgegrenzt und dimensioniert werden. Das heißt, dass die Ausprägungen der drei Dimensionen des Projektes näher spezifiziert wurde und ein geeignetes Szenario identifiziert wurde, anhand dessen die Forschungsfrage beantwortet werden konnte. Konkret bedeutet dies, dass aus den unterschiedlichen, denkbaren Kombinationen aus Technologie, menschlichen und äußeren Einflüssen eine konkrete Kombination ausgewählt wurde, die in den folgenden Arbeitspaketen simuliert und untersucht wurde.

Im Rahmen des zweiten Arbeitspaketes fand die eigentliche Modellierung der Simulation und die Konzipierung des Versuchsaufbaus auf Basis des zuvor ausgewählten Szenarios statt. Ziel war dabei, einen Versuchsaufbau zu generieren, der für die Beantwortung der Forschungsfrage geeignet ist.

Im dritten Arbeitspaket wurde der Versuchsaufbau im Rahmen von Versuchen mit unterschiedlichen Probanden genutzt, um Daten zur Mensch-Maschine-Interaktion in der Kommissionierung zu erheben. Anschließend wurden diese Daten im Rahmen des vierten Arbeitspaketes hinsichtlich der Beantwortung der Forschungsfragen ausgewertet und analysiert.

Der Projektplan sah außerdem zwei Workshops während der Projektlaufzeit gemeinsam mit Praxispartnern vor. Diese Workshops fanden im Mai und Oktober 2017 an der TU Darmstadt statt. Bei den Teilnehmern handelte es sich um Manager und Entwicklungsingenieure von Lagerhausbetreibern und Herstellern von Intralogistiktechnologie. Im Rahmen der Workshops wurden die Zwischenergebnisse präsentiert und das weitere Vorgehen im Rahmen des Projek-

tes diskutiert. Zusätzlich wurden die Ergebnisse im Rahmen der Sitzung des wissenschaftlichen Beirates der IFL am 05.09.2017 weiteren Experten aus der Praxis vorgestellt und gemeinsam mit ihnen diskutiert. Der ursprüngliche Projektplan sowie die Daten der Workshops sind in Abbildung 2 dargestellt.

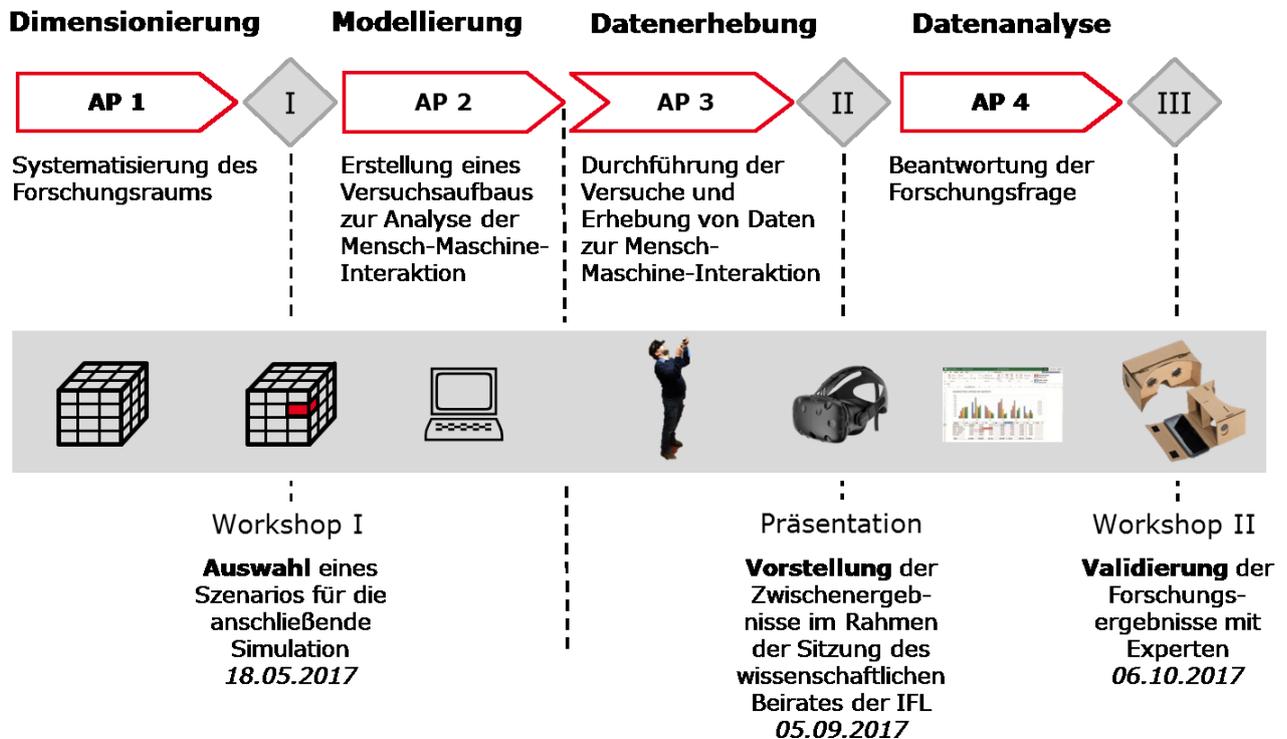


Abbildung 2: Ursprünglicher Projektplan (eigene Darstellung)

Die Diskussionen mit den Experten aus der Praxis im Rahmen der Sitzung des wissenschaftlichen Beirates der IFL sowie beim zweiten Projektworkshop haben gezeigt, dass der ursprünglich entwickelte Versuchsaufbau noch einige Limitationen aufwies und eine abschließende Beantwortung der Forschungsfrage noch nicht zuließ. Aus diesem Grund wurde beschlossen, die Forschung über den ursprünglich geplanten Projektplan und die eigentliche Projektlaufzeit hinaus zu verlängern. In einem weiteren Arbeitspaket wurde der ursprüngliche Versuchsaufbau entsprechend angepasst und erweitert, um den identifizierten Limitationen des ursprünglichen Modells zu begegnen. Anschließend wurden die Arbeitspakete drei und vier des ursprünglichen Projektplans noch einmal am neuen Modell wiederholt, um aussagekräftigere Ergebnisse zur Beantwortung der Forschungsfragen zu erzielen. Der finale Projektplan ist in Abbildung 3 dargestellt.

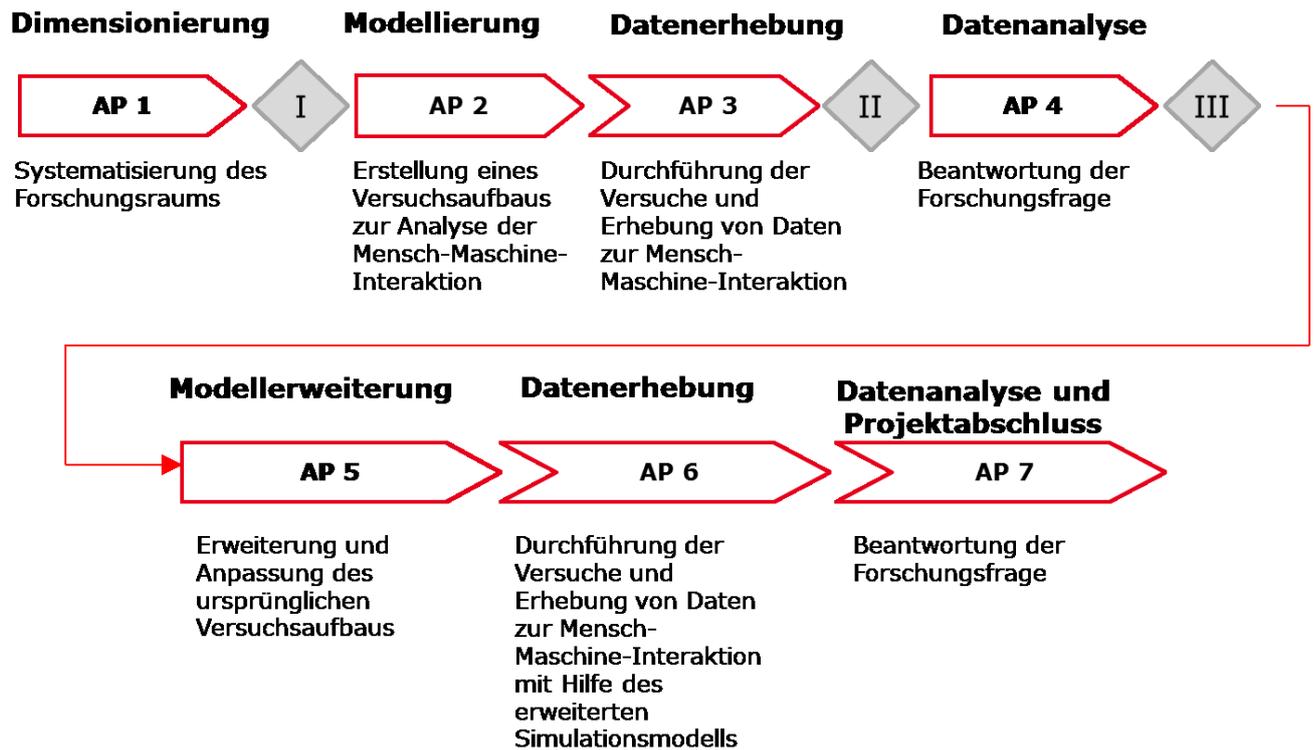


Abbildung 3: Finaler Projektplan (eigene Darstellung)

Die weitere Gliederung dieses Abschlussberichtes erfolgt basierend auf dem vorgestellten finalen Projektplan. Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse des zweiten Arbeitspaketes und die nötigen Vorarbeiten zur Systematisierung des Forschungsraumes vorgestellt. Das dritte Kapitel stellt die Ergebnisse aus den Arbeitspaketen zwei, drei und vier vor: Es wird zunächst der ursprüngliche Versuchsaufbau und die Ergebnisse der ersten Versuchsreihe präsentiert. Das vierte Kapitel stellt die anschließende Erweiterung des Versuchsaufbaus (Arbeitspaket fünf), die Durchführung der zweiten Versuchsreihe (Arbeitspaket sechs) sowie die erzielten Ergebnisse (Arbeitspaket sieben) vor. Das letzte Kapitel dieses Berichtes liefert eine Zusammenfassung der Ergebnisse sowie einen Ausblick auf zukünftig geplante Forschungsarbeiten, die auf dem Projekt aufbauen.

## 2 Stand der Forschung und Systematisierung des Forschungsraumes

Im Rahmen des ersten Arbeitspaketes wurde der Forschungsraum systematisiert. Insbesondere die beiden Dimensionen der menschlichen und der exogenen Einflüsse wurden dabei genauer betrachtet, mögliche Ausprägungsformen identifiziert und hinsichtlich der Anwendbarkeit im Rahmen des Projektes untersucht. Das Ziel bestand schließlich darin, aus den unterschiedlichen Möglichkeiten eine Kombination aus Technologie, äußerem Einflussfaktor und menschlichem Einfluss zu identifizieren, auf Basis dessen der folgende Versuchsaufbau aufgebaut werden sollte. Die zentrale Fragestellung im Rahmen des zweiten Arbeitspaketes ist in Abbildung 4 dargestellt, wobei die mögliche Auswahl einer Kombination durch rote Kästchen beispielhaft veranschaulicht wurde.

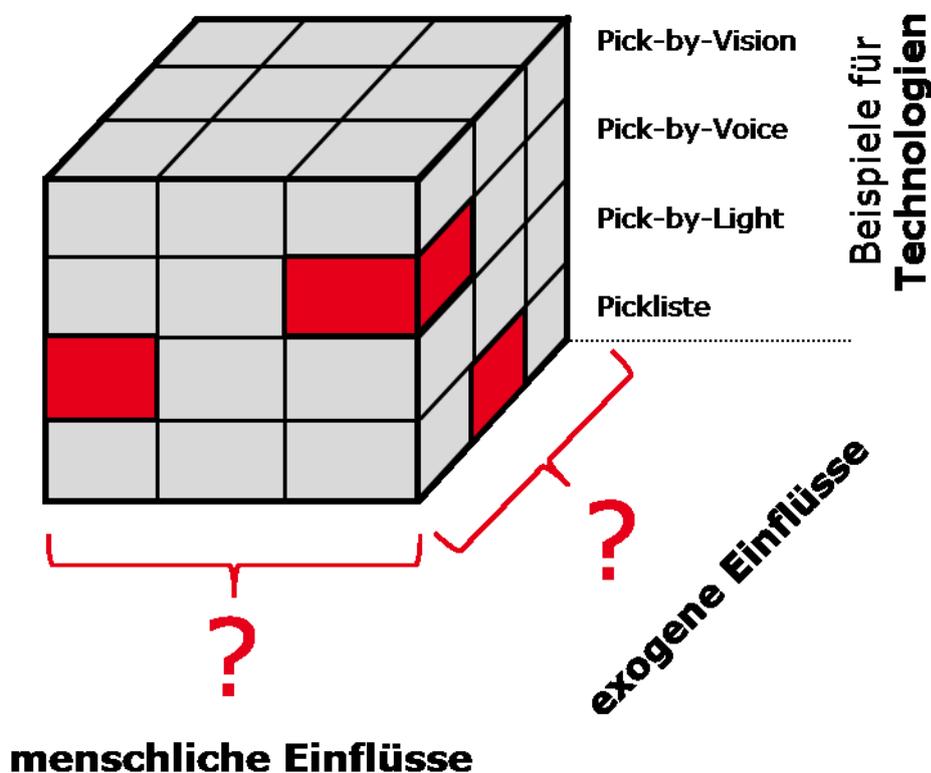


Abbildung 4: Schematische Darstellung der in AP 1 zentralen Fragestellung (eigene Darstellung)

Zur Analyse mögliche Ausprägungen der beiden Dimensionen wurde eine systematische Literaturrecherche durchgeführt in Hinblick auf menschliche Einflussfaktoren und Ergonomie in der Kommissionierung. Hierbei wurde zunächst eine Suchanfrage mittels Schlagwortsuche in den Datenbanken Scopus und Web of Science durchgeführt. Da die erste Suchanfrage Ergebnisse lieferte, die zu einem Großteil aus den Bereichen Medizin und Biochemie stammen und keinen Bezug zur vorliegenden Forschungsfrage haben, wurden die ursprünglich zur Suche verwendeten Schlagworte angepasst und in einer zweiten Suchanfrage verwendet. Die Schlagworte beider Suchanfragen und die Anzahl der gefundenen Ergebnisse sind in Abbildung 5 dargestellt. Beide Suchanfragen wurden im April 2017 durchgeführt. Die Anzahl der

gefundenen Artikel fällt bei der Datenbank Web of Science geringer aus, da das Ergebnis um solche Artikel reduziert wurde, die bereits mit Hilfe von Scopus gefunden werden konnten.

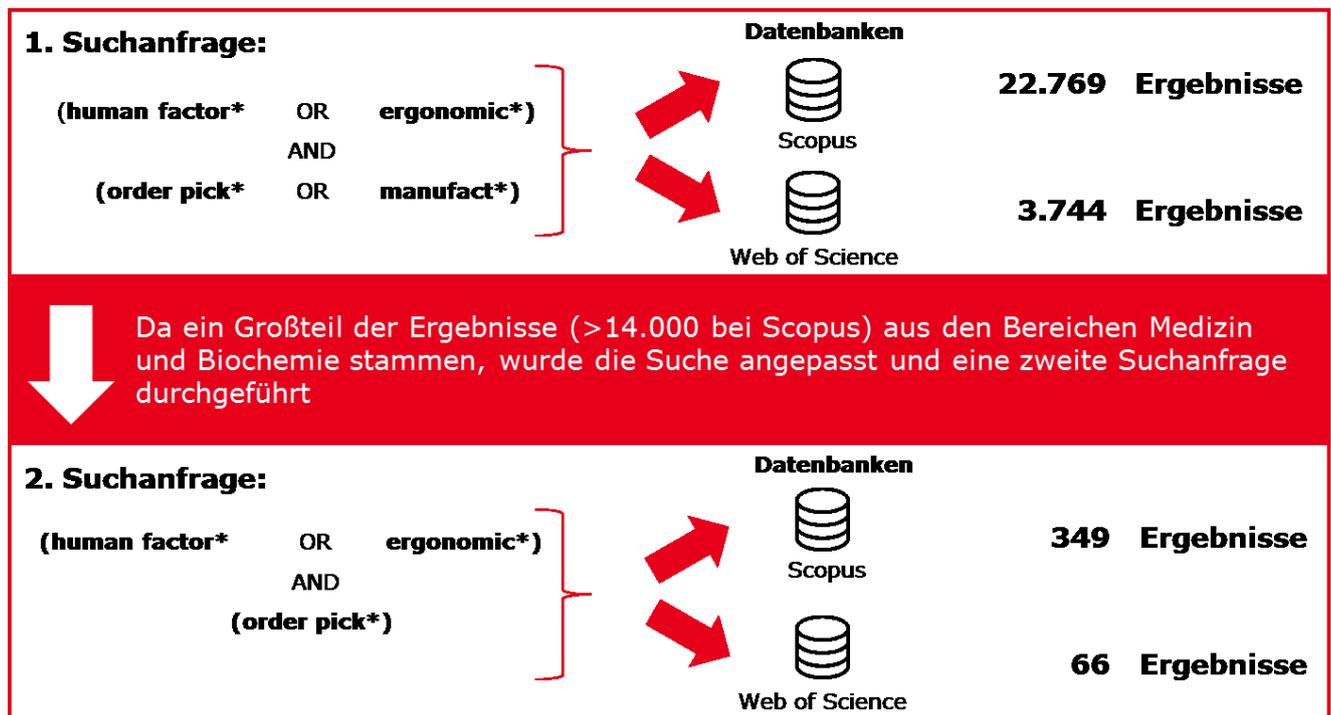


Abbildung 5: Suchanfragen und Ergebnisse der Datenbanksuche (eigene Darstellung)

Auf diese Art und Weise wurden insgesamt 415 potentiell relevante wissenschaftliche Arbeiten identifiziert. Im kommenden Schritt wurden zunächst die Abstracts der Artikel gelesen, um solche Arbeiten auszuschließen, die für die Beantwortung der Forschungsfrage nicht von Relevanz sind. Bei den verbleibenden Arbeiten wurde eine Volltextsichtung durchgeführt, um weitere, nicht relevante Arbeiten auszuschließen. Auf diese Art und Weise konnte die ursprüngliche Literaturlauswahl auf ein Sample von insgesamt 20 relevanten Arbeiten reduziert werden. In einer anschließenden Schneeballsuche konnten drei weitere Beiträge identifiziert werden, die ebenfalls in die Auswertung aufgenommen wurden, sodass ein finales Sample von 23 wissenschaftlichen Artikeln zur Auswertung im Rahmen des ersten Arbeitspaketes verblieb. Das Vorgehen zur Auswahl des Literatursamples ist in Abbildung 6 dargestellt. In Abbildung 7 wurden die Veröffentlichungen des finalen Samples nach der Jahreszahl ihrer Veröffentlichung aufgetragen. Die Grafik zeigt, dass die meisten der gefundenen Arbeiten aus dem Jahr 2016 stammen und bestätigt damit die Aktualität des Samples.

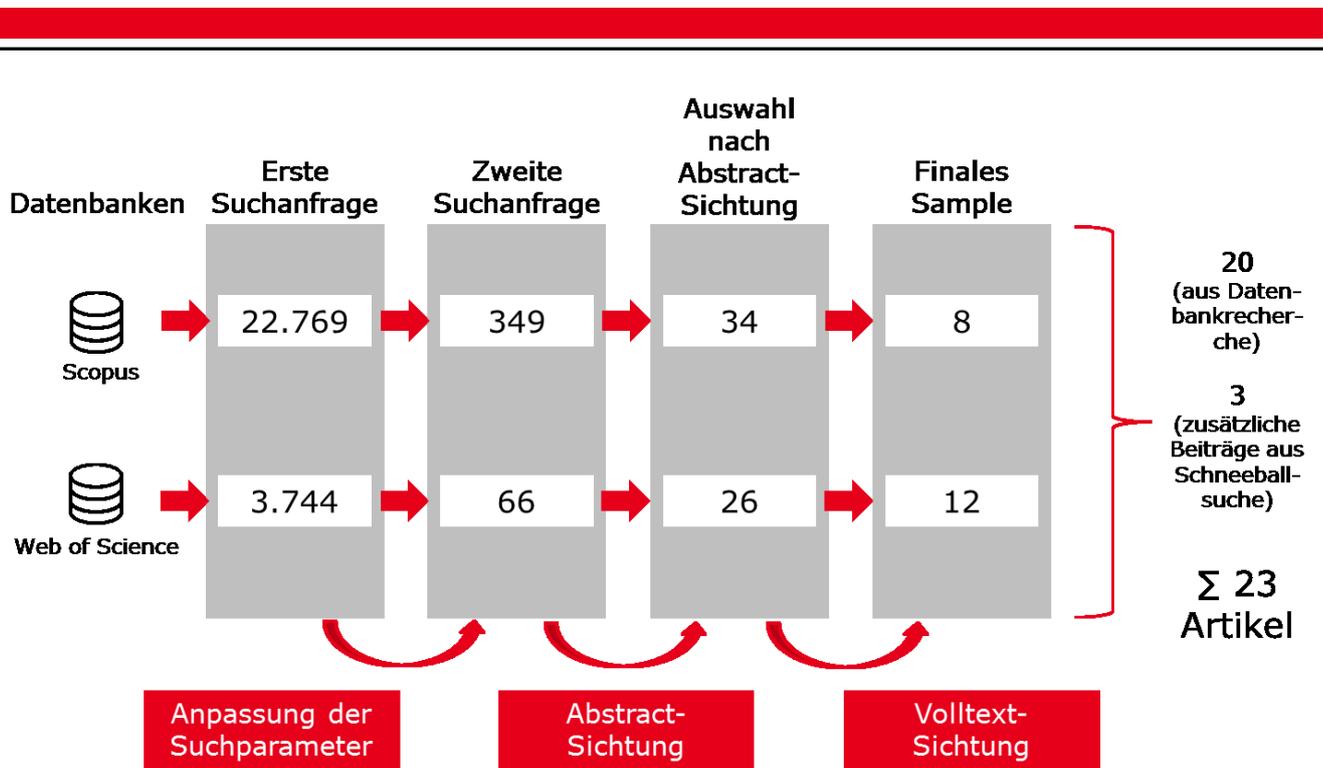


Abbildung 6: Darstellung des systematischen Vorgehens zur Auswahl des Literatursamples (eigene Darstellung)

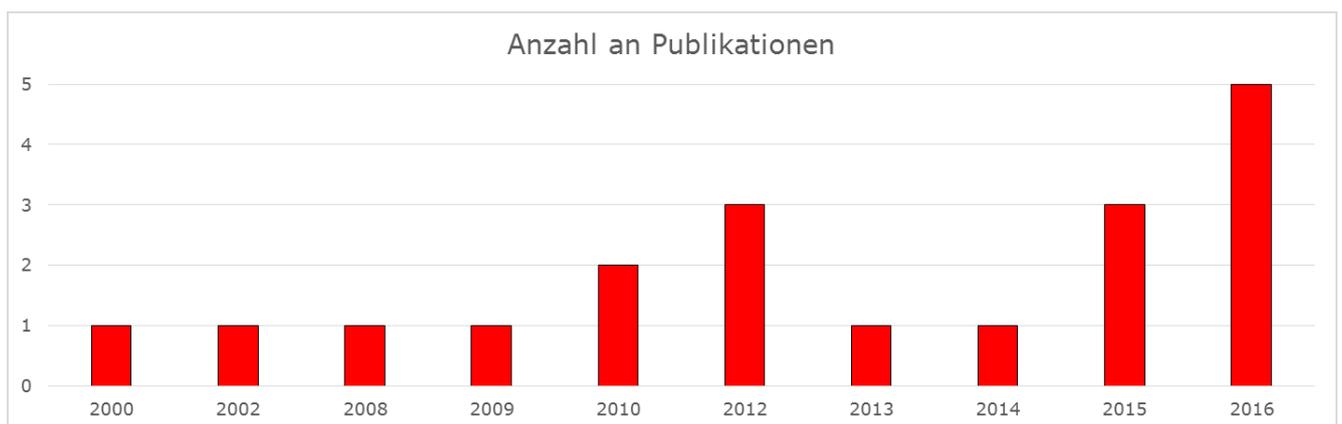


Abbildung 7: Publikationen des finalen Samples nach Veröffentlichungsjahr (eigene Darstellung)

Aus der gefundenen Literatur wurden zunächst sämtliche Einflussfaktoren auf die Kommissionierung gesammelt. In Summe konnte im Literatursample mit 190 Einflussfaktoren eine sehr hohe Anzahl möglicher menschlicher und externer Einflüsse auf die Kommissionierung gefunden werden. Durch ein systematisches Zusammenführen ähnlicher Faktoren konnte diese Anzahl auf 19 externe Einflussfaktoren sowie 36 menschliche Einflussfaktoren reduziert werden. Für eine verbesserte Übersichtlichkeit wurden anschließend Kategorien gebildet, denen die jeweiligen Einflussfaktoren zugeordnet wurden. Für externe Einflussfaktoren wurden neben der Kategorie „Umweltfaktoren“ die Kategorien „Packstück / Packliste“ sowie „psychosoziale Aspekte“ gebildet. Im Falle menschlicher Einflussfaktoren konnten acht Kategorien gebildet werden: Geschlecht, psychische Aspekte, physische Aspekte, visuelle Wahrnehmung, akustische Wahrnehmung, haptische Wahrnehmung, Kognition und Persönlichkeit. Die externen Einflüsse in den jeweiligen Kategorien sind in Abbildung 8 dargestellt. Die menschlichen Ein-

flussfaktoren werden analog in Abbildung 9 gezeigt. Um insbesondere die gestiegenen Anforderungen einer älter werdenden Gesellschaft berücksichtigen zu können, wurden hierbei die Einflussfaktoren hervorgehoben, die durch das Alter der Person beeinflusst werden. Da dies die Mehrzahl der Faktoren aus unterschiedlichen Kategorien betrifft, wurde darauf verzichtet, eine eigene Kategorie für die durch das Alter beeinflussten Faktoren zu bilden.

Mit dem Ziel, eine Entscheidung darüber zu treffen, welche der gewählten Faktoren in den anschließenden Arbeitspaketen des Projektes simuliert werden können, wurden die verschiedenen Einflussfaktoren gemäß ihrer prinzipiellen Simulierbarkeit in der VR sortiert. Die Ergebnisse wurden in Abbildung 8 und Abbildung 9 durch eine verschiedenfarbige Hinterlegung der Einflussfaktoren abgebildet, wobei grün für eine gute Simulierbarkeit, gelb für eine eingeschränkte Simulierbarkeit und rot für eine prinzipiell schlechte Simulierbarkeit des jeweiligen Faktors in der VR steht.

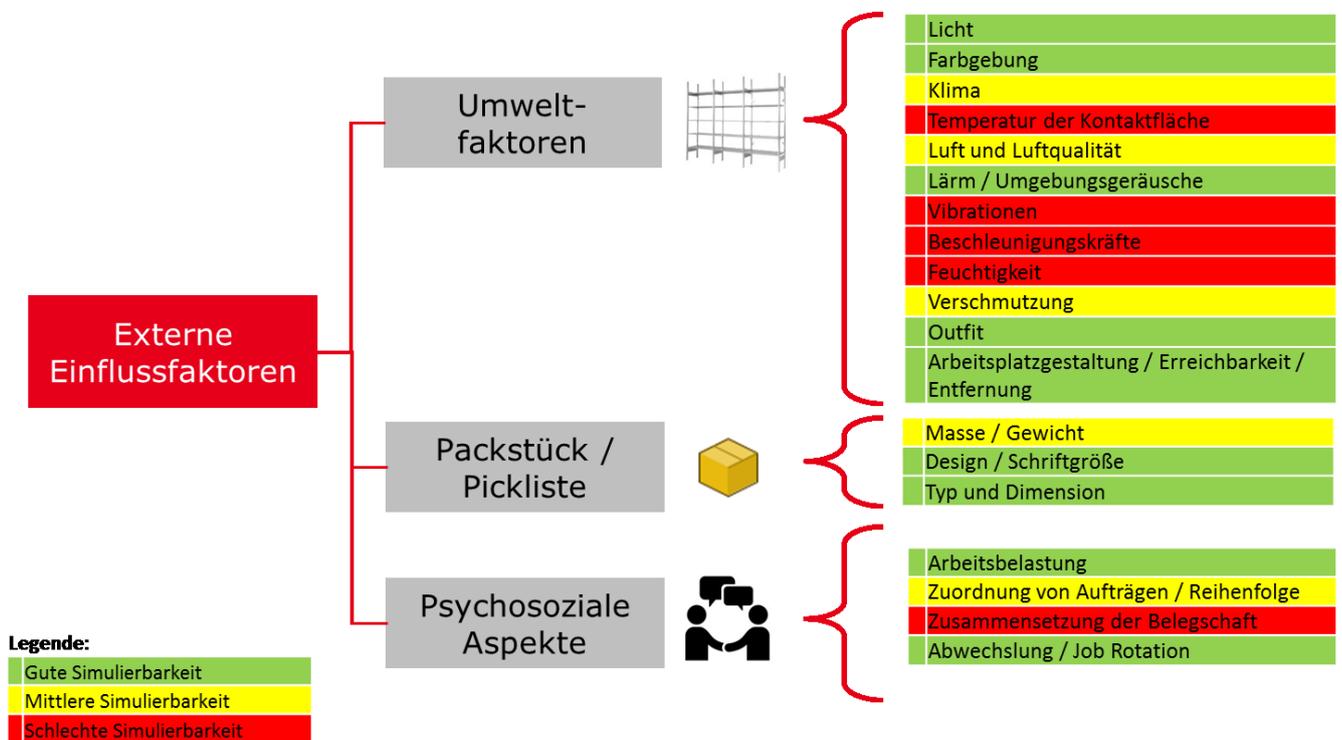


Abbildung 8: Kategorisierung und Simulierbarkeit der externen Einflussfaktoren auf die Kommissionierung (eigene Darstellung)

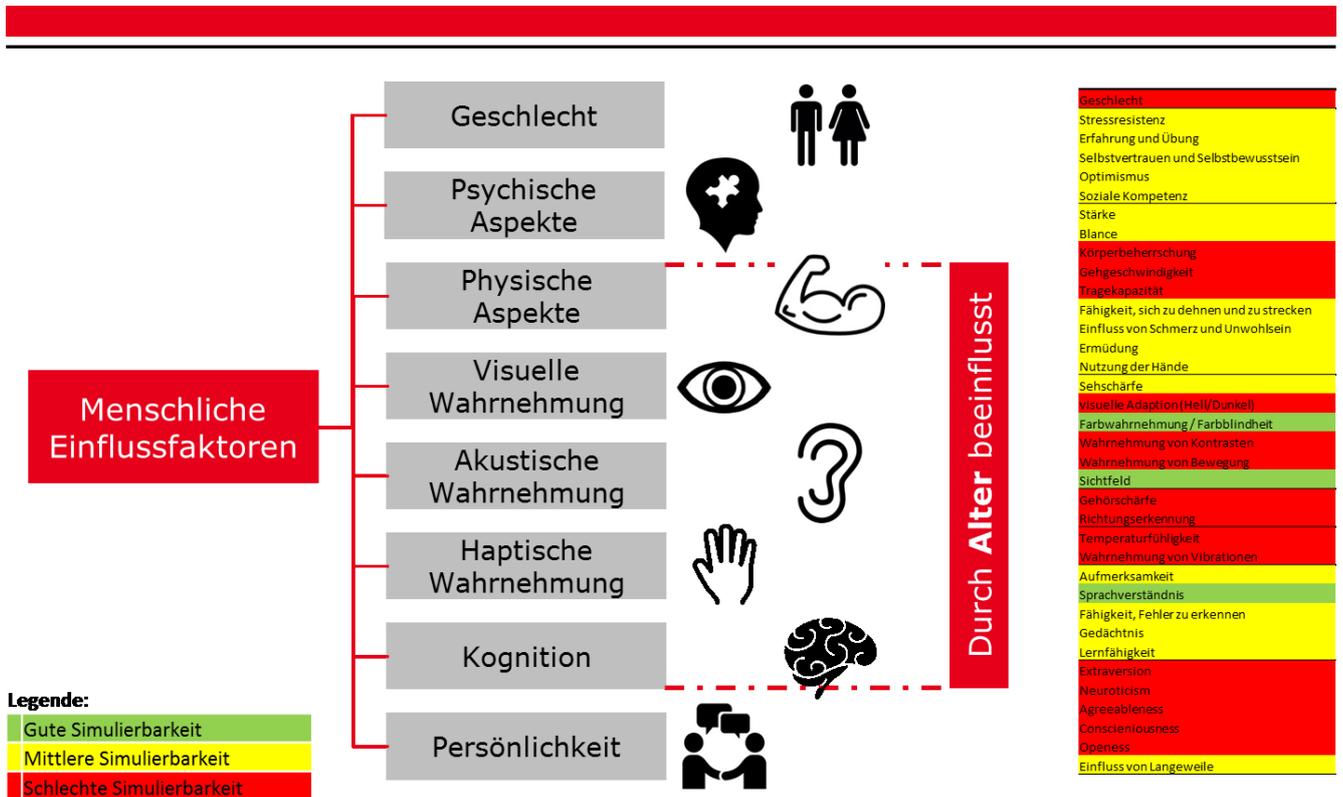


Abbildung 9: Kategorisierung und Simulierbarkeit der externen Einflussfaktoren auf die Kommissionierung (eigene Darstellung)

Im Falle der externen Einflussfaktoren zeigt sich, dass aufgrund der fehlenden Möglichkeit der meisten VR-Brillen, ein physisches Feedback aus der Simulation auf den Anwender abzubilden, insbesondere entstehende Kräfte nicht simuliert werden können. Eine Wahrnehmung unterschiedlicher Gewichte oder der Einbezug des Tastsinns des Anwenders ist daher nicht möglich. Darüber hinaus werden Einflussfaktoren wie beispielsweise die Luftqualität, das Klima, die Feuchtigkeit und die Temperatur durch die Umgebung bestimmt, in der sich der Anwender tatsächlich während der Nutzung der VR-Simulation aufhält. Diese können also ebenfalls nicht durch die Simulation verändert werden. Andere Einflüsse, wie beispielsweise die Beleuchtung, die Farbgebung oder Umgebungsgeräusche und Lärm können dagegen sehr gut mit Hilfe der Simulation dargestellt werden. Auch unterschiedliche Arbeitsplatzumgebungen und Packstücke können problemlos dargestellt werden.

Die Simulation menschlicher Eigenschaften fällt dagegen generell schwerer: Vor allem individuelle physische Merkmale wie beispielsweise das Geschlecht, das Alter, die Kraft oder die individuelle Wahrnehmung können nicht durch die Simulation verändert werden, sondern werden durch die Person des Anwenders bestimmt. Auch verschiedene soziale, psychologische und kognitive Fähigkeiten können daher im Rahmen der Simulation nicht dargestellt werden.

Aus diesem Grund wurde entschieden, auf die Simulation unterschiedlicher menschlicher Eigenschaften zu verzichten. Stattdessen sollte für die Durchführung der späteren Experimente eine möglichst heterogene Gruppe an Probanden herangezogen werden, deren individuelle Eigenschaften und Fähigkeiten möglichst mittels eines Fragebogens erfasst werden sollten.

---

Dies sollte eine Analyse des Einflusses bestimmter, individueller Eigenschaften ermöglichen, ohne dass diese durch die Simulation dargestellt werden müssen.

Eine weitere Einschränkung der meisten VR-Brillen besteht darin, dass sie eine Bewegung nur innerhalb eines relativ begrenzten Raumes mit einer Seitenlänge von etwa 4 x 4 Metern zulassen. Eine Simulation eines kompletten Kommissionierlagers und der Bewegung des Kommissionierers innerhalb dieses Lagers ist daher ebenfalls nicht möglich. Die Technik erlaubt daher nur die Darstellung der Kommissionierung an einem einzelnen Regal, wie sie beispielsweise im Rahmen einer Ware-zur-Person-Kommissionierung stattfinden kann. Somit konnten bereits erste Limitationen bei der Anwendung der VR-Technologie mittels VR-Brillen für die Untersuchung der Mensch-Maschine-Interaktion in der Kommissionierung identifiziert werden. Es wird jedoch angenommen, dass die Fragestellung, ob sich Durchlaufzeiten und Pickfehler, die im Rahmen einer Kommissionierung in der VR ermittelt wurden, auf eine reale Kommissionierung übertragen lassen, an einem einzelnen Regal untersucht werden kann.

Die Ergebnisse des ersten Arbeitspaketes wurden im Rahmen des ersten Workshops am 18.05.2017 den Experten aus der Praxis vorgestellt. Gemeinsam mit ihnen wurde eine Auswahl aus zu simulierender Technologie und den zugehörigen Einflussfaktoren für die weitere Untersuchung der Forschungsfrage und die Konzeption eines entsprechenden Versuchsaufbaus getroffen. Auf Grund der großen Relevanz für Kommissionierprozesse in der Praxis, wurde seitens der Experten ein Multi-Order-Picking mittels Pick-by-Voice-Technologie für die weiteren Untersuchungen vorgeschlagen.

Weiterhin wurde entschieden, neben der Simulation unterschiedlicher menschlicher Eigenschaften zunächst auch auf die Simulation verschiedener äußerer Einflussfaktoren zu verzichten. Der Fokus des Forschungsprojektes wurde damit noch stärker auf die Fragestellung hinsichtlich einer Übertragbarkeit der Durchlaufzeiten und Pickfehler von der virtuellen Realität auf eine reale Kommissionierung gelegt. Es wurde die Idee entwickelt, einen Versuchsaufbau zu entwerfen, der aus zwei Teilen besteht: Neben einer virtuellen Kommissionierung soll auch eine reale Kommissionierung mittels eines realen Kommissionierregals aufgebaut werden. Die Probanden sollten anschließend sowohl in der virtuellen, als auch in der realen Umgebung kommissionieren, wobei die benötigten Zeiten als auch die Pickfehler erfasst wurden. Ziel war es, diese Zeiten hinsichtlich der Übertragbarkeit miteinander zu vergleichen.

Nachdem so im Rahmen des ersten Arbeitspaketes der grundlegende Aufbau des Versuches gemeinsam mit den Vertretern aus der unternehmerischen Praxis erarbeitet wurde, wurde der Versuchsaufbau anschließend detailliert ausgearbeitet und eine erste Versuchsreihe durchgeführt und ausgewertet. Dies wird im folgenden Kapitel detailliert erläutert.

### 3.1 Konzipierung des Versuchsablaufes

Wie bereits beschrieben, wurde im Rahmen des ersten Expertenworkshops entschieden, im Rahmen des Versuchsaufbaus sowohl eine reale, als auch eine virtuelle Multi-Order-Kommissionierung mittels Pick-by-Voice-Technologie darzustellen. Hierbei sollen die Probanden bestimmte Artikel aus einem Regal gemäß einer Ansage identifizieren, greifen und die richtige Anzahl des jeweiligen Artikels in einen Warenkorb auf einem separaten Kommissionierwagen ablegen. Jeder Artikel muss einem von vier Aufträgen zugeordnet werden, die durch vier verschiedene Warenkörbe auf dem Kommissionierwagen dargestellt werden. Dabei wurde die benötigte Zeit für den Kommissioniervorgang gemessen und etwaige Pickfehler erfasst. Darüber hinaus wurde die individuell wahrgenommene Arbeitsbelastung der Teilnehmer mittels des NASA Task-Load-Index (NASA-TLX) erfasst. Der NASA-TLX ist eine relativ unkompliziert anwendbare Methode, um die individuell wahrgenommene Arbeitsbelastung bei der Erfüllung einer Aufgabe zu bestimmen. Der NASA-TLX wurde zudem bereits häufig in der Forschung zu menschlichen Einflüssen in unterschiedlichen Tätigkeiten verwendet.<sup>8</sup> Indem die Durchlaufzeiten, die Anzahl der Pickfehler und die Werte des NASA-TLX sowohl in der virtuellen als auch in der realen Kommissionierung erfasst und miteinander verglichen werden, soll gezeigt werden, ob die virtuelle Kommissionierung mit einer realen Kommissionierung vergleichbar ist. Zudem soll untersucht werden, ob sich in der virtuellen Kommissionierung Trainingseffekte einstellen, die sich auf eine reale Kommissionierung übertragen lassen. Dies würde dafür sprechen, dass sich die VR-Technologie in Zukunft auch zur Aus- und Weiterbildung von Kommissionierern einsetzen lässt.

Um dies zu untersuchen, wurden die Probanden per Zufall in zwei möglichst gleich große Gruppen unterteilt. Die erste Gruppe diente dabei als Kontrollgruppe und sollte ausschließlich in der realen Umwelt kommissionieren. Die zweite Gruppe wurde gebeten, genau die gleichen Pickanweisungen wie die Kontrollgruppe zu befolgen, davon jedoch die erste Hälfte in der virtuellen Umgebung und die zweite Hälfte am realen Kommissionierregal. Jeder Teilnehmer aus jeder der beiden Gruppen musste dabei insgesamt vier Durchgänge bestehend aus jeweils zwölf Picks, also insgesamt 48 Picks pro Teilnehmer, absolvieren. Das Unterteilen der Pickanweisungen in Durchgänge mit zwölf Picks war erforderlich, da das reale Kommissionierregal nach dieser Anzahl an Picks wieder aufgefüllt und die realen Warenkörbe geleert werden mussten. Die Position der zu kommissionierenden Artikel und die jeweilige Anzahl wurden einmalig per Zufall bestimmt und waren identisch sowie in der gleichen Reihenfolge für jeden Probanden.

Teilnehmer der Kontrollgruppe („R/R“ – real / real) absolvierten alle vier Durchgänge am realen Regal, während Teilnehmer der zweiten Gruppe („V/R“ – virtuell / real) die ersten beiden Durchgänge in der virtuellen Realität absolvierten, bevor sie für die letzten beiden Durchgänge ans reale Regal wechselten. Jeder Teilnehmer wurde gebeten, vor dem Beginn der Versu-

---

<sup>8</sup> Vgl. Hart und Staveland (1988), Hart (2006)

che einen Fragebogen zu ausgewählten persönlichen Eigenschaften (Alter, Geschlecht, Muttersprache und Erfahrung in der Kommissionierung und in der VR) ausfüllen. Ein zweiter Fragebogen wurde von allen Teilnehmern sowohl nach den ersten beiden Durchgängen als auch am Ende der Versuche ausgefüllt. Dieser Fragebogen wurde dazu genutzt, den NASA-TLX für jeden Teilnehmer für die ersten beiden und die letzten beiden Durchgänge des Versuches getrennt zu bestimmen. Das prinzipielle Vorgehen während der Versuche wird in Abbildung 10 dargestellt.

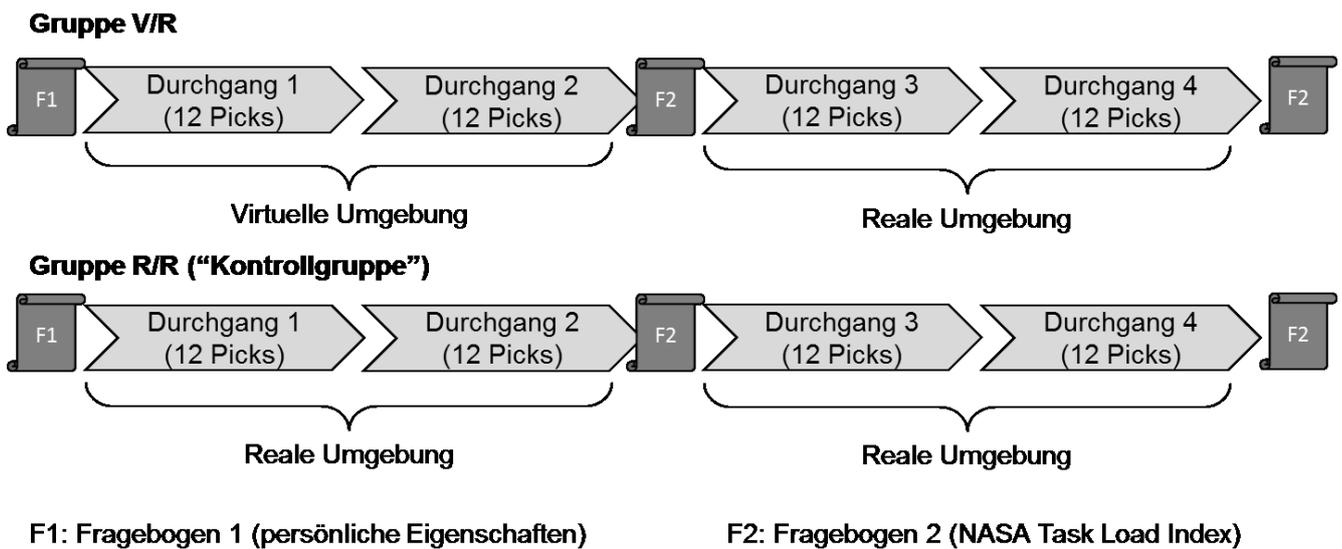


Abbildung 10: Ablauf der Versuche, bestehend aus vier Durchgängen mit jeweils 12 Picks für jeden Teilnehmer (eigene Darstellung)

### 3.1.1 Modellierung der realen und der virtuellen Kommissionierumgebung

Für die Versuche wurde ein Kommissionierregal mit insgesamt fünf Ebenen und sechs Positionen auf jeder Ebene genutzt. Die oberste und unterste Ebene des Regals wurde auf Grund der schweren Erreichbarkeit im Rahmen der Versuche nicht genutzt, sodass drei Ebenen und insgesamt 18 verschiedene Positionen, aus denen kommissioniert werden kann, verblieben. Die Ebenen wurden von unten nach oben mit „Ebene 0“ bis „Ebene 4“ benannt und nummeriert, während die einzelnen Positionen pro Ebene von links nach rechts mit „Platz 1“ bis „Platz 6“ benannt wurden. Jede Position des Regals wurde unterhalb mit einem kleinen Schild mit der Angabe der Ebene und des Platzes beschriftet.

Zur Modellierung und Darstellung der Kommissionierumgebung in der virtuellen Realität wurde die Software „Emulate 3D“ verwendet. Um die Übertragbarkeit zwischen virtueller und realer Kommissionierung zu untersuchen, wurde auf eine möglichst große Vergleichbarkeit und eine Strukturgleichheit bei der Modellierung des virtuellen Modells im Vergleich zur realen Kommissionierumgebung Wert gelegt. Durch die Strukturgleichheit sollten ungewollte Einflüsse systematisch eliminiert werden, um gezielt den Einfluss der Art der Umgebung (virtuell oder real) untersuchen zu können. Ein besonderes Augenmerk wurde beispielsweise darauf gelegt, dass sämtliche Abstände, Abmessungen und Farben im virtuellen Modell identisch zur realen Kommissionierumgebung sind.

Zur Darstellung der virtuellen Kommissionierumgebung wurde eine VR-Brille vom Typ HTC Vive genutzt, die zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung als fortschrittlichste und leistungsstärkste VR-Brille auf dem Markt angesehen wurde.<sup>9</sup> Die HTC Vive beinhaltet sowohl die VR-Brille selbst als auch zwei Controller, die es dem Nutzer erlauben, mit Gegenständen in der virtuellen Realität zu interagieren. Außerdem nutzt die HTC Vive zwei separate Infrarot-Laser, um die Position der Brille und der Controller im dreidimensionalen Raum zu bestimmen. Dies erlaubt dem Nutzer eine relative Bewegungsfreiheit innerhalb eines begrenzten Raumes.

Da es nicht möglich ist, mit Hilfe der HTC Vive das Gewicht der in der VR gegriffenen Gegenstände zu simulieren, wurden leere Pappkartons, deren Gewicht als vernachlässigbar angenommen wurde, als zu kommissionierende Artikel in der realen Umgebung eingesetzt. So sollte eine vergleichbare Wahrnehmung des Gewichtes der Packstücke in der realen und der virtuellen Umgebung gewährleistet werden. Das reale Kommissionierregal und sein Nachbau in der virtuellen Umgebung sind in Abbildung 11 dargestellt.



Abbildung 11: Darstellung des Kommissionierregals in der realen (a) und der virtuellen Umgebung (b) (eigene Darstellung)

### 3.1.2 Design der Pick-by-Voice-Pickanweisungen

Auf Basis des Feedbacks der Unternehmensvertreter im Rahmen des ersten Workshops wurde entschieden, eine Multi-Order-Kommissionierung mittels Pick-by-Voice zu verwenden. Dies wird auch in der Praxis häufig eingesetzt.<sup>10</sup> Für jeden Pick erhielten die Probanden eine von einer Computerstimme gesprochene Pickanweisung. In der Pickanweisung wurde zunächst die Ebene und die zugehörige Position des zu kommissionierenden Artikels genannt. Anschließend wurde die zu kommissionierende Anzahl sowie die Nummer des zugehörigen Auftrags, in dessen Warenkorb die Artikel gelegt werden sollen, genannt. Die Anzahl der bei jeder Ansage zu kommissionierenden Artikel war aufgrund der Größe der verwendeten Pappkartons begrenzt. Aus diesem Grund wurden mit jeder Anweisung zwischen einem und drei Artikel kommissioniert. Auch die Anzahl der verschiedenen Aufträge, für die kommissioniert wurde, war auf insgesamt vier Aufträge begrenzt, wobei von den Experten während des Workshops angenommen wurde, dass es sich dabei um eine realistische Anzahl zur Abbildung realer

<sup>9</sup> Vgl. Backa (2017)

<sup>10</sup> Vgl. Battini et al. (2015)

Kommissioniervorgänge handelt. Die Warenkörbe der vier Aufträge waren auf den beiden Ebenen eines zweistöckigen Kommissionierwagens positioniert, der sich in einem Abstand von 1,7 Meter vor dem Kommissionierregal befand. Die Probanden konnten sich in diesem Raum zwischen Regal und Kommissionierwagen frei bewegen. Da in der virtuellen Realität nur ein Artikel mit jedem Controller gegriffen werden kann, wurde den Teilnehmern vorgeschrieben, auch in der realen Umwelt maximal zwei Artikel auf einmal zu greifen.

Die Probanden hatten während der Versuche die Möglichkeit, durch eigene gesprochene Anweisungen entweder den aktuellen Auftrag zu bestätigen, um die nächste Anweisung zu erhalten („Bestätigt“), oder die aktuelle Anweisung wiederholen zu lassen („Wiederholen“). Das eigentliche Abspielen der Aufträge wurde mittels des sogenannten „Wizard-von-Oz“-Verfahrens ausgelöst: Dabei gibt ein menschlicher Protokollant („wizard“), der während der Versuche anwesend ist, vor, ein Computer zu sein, löst die Anweisungen allerdings manuell aus.<sup>11</sup> Zum Abspielen der Pickanweisungen wurde ein auf der Programmiersprache Java basierendes Programm entwickelt, mit dessen Hilfe auch Pickfehler registriert und die Zeiten zwischen jeder Pickanweisung automatisch erfasst werden konnten. Die Steuerungsoberfläche des Programms wird in Abbildung 12 gezeigt.

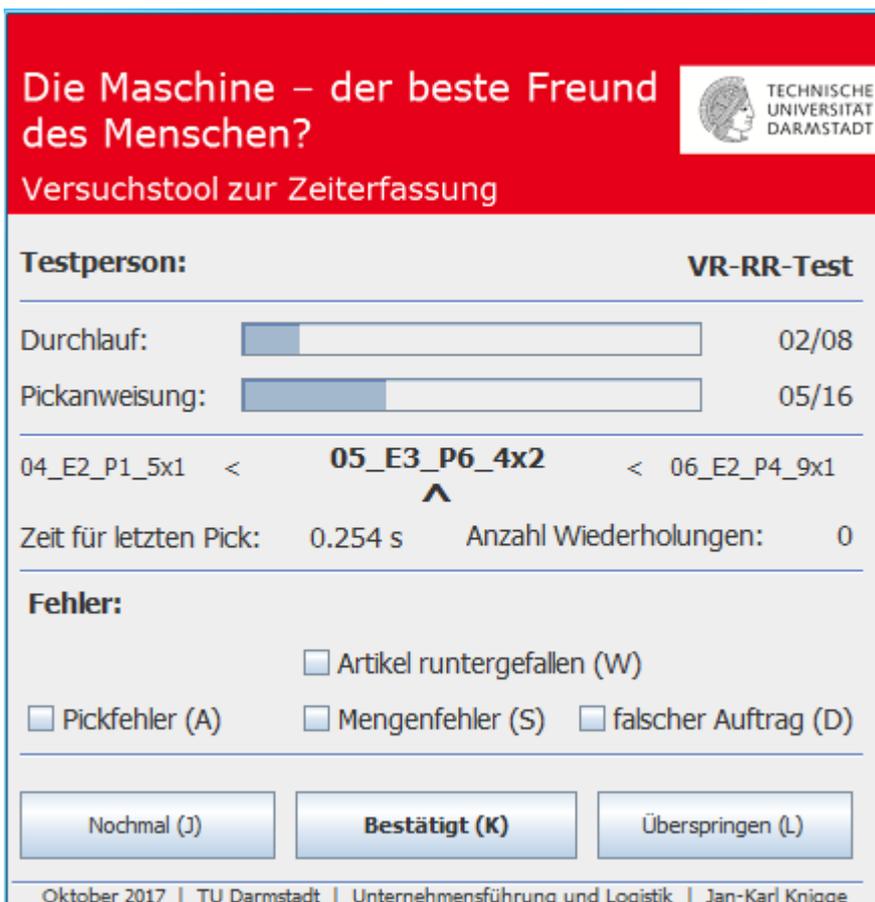


Abbildung 12: Oberfläche des selbst entwickelten Programms zum Abspielen der Pickanweisungen und zur Erfassung von Pickfehlern und Zeiten (eigene Darstellung)

<sup>11</sup> Vgl. Green und Wie-Haas (1985)

Anstatt regulärer Pick-by-Voice-Headsets, wie sie in der Praxis genutzt werden, wurden Lautsprecher zum Abspielen der Pickanweisungen verwendet. Dies ermöglichte dem anwesenden Protokollanten selbst, die Anweisungen zu hören. Um den Einfluss der Messabweichung zu minimieren, die dadurch entsteht, dass ein menschlicher Protokollant das Abspielen der Anweisungen auslöst und um die Vergleichbarkeit der Experimente zu gewährleisten, wurde darauf geachtet, dass die gleiche Person in allen Durchläufen als Protokollant eingesetzt wurde. Außerdem wurde sichergestellt, dass die Lautsprecher sowohl in der virtuellen, als auch in der realen Umgebung in der gleichen Entfernung und auf der gleichen Höhe standen. Darüber hinaus wurden sämtliche Durchläufe in den gleichen Räumen im gleichen Gebäude durchgeführt. Jeder Teilnehmer absolvierte zudem alle Durchläufe am gleichen Tag. Damit sollte sichergestellt werden, dass auch die Umgebungseinflüsse sowohl in der realen Umgebung, als auch während der virtuellen Kommissionierung identisch waren. Jeder Durchlauf wurde darüber hinaus auf Video aufgezeichnet, um eine exakte Messung der Pickzeiten und ein Erfassen der Pickfehler im Nachgang zur Durchführung der Versuche zu ermöglichen. Abbildung 13 zeigt eine Draufsicht der Kommissionierumgebung.

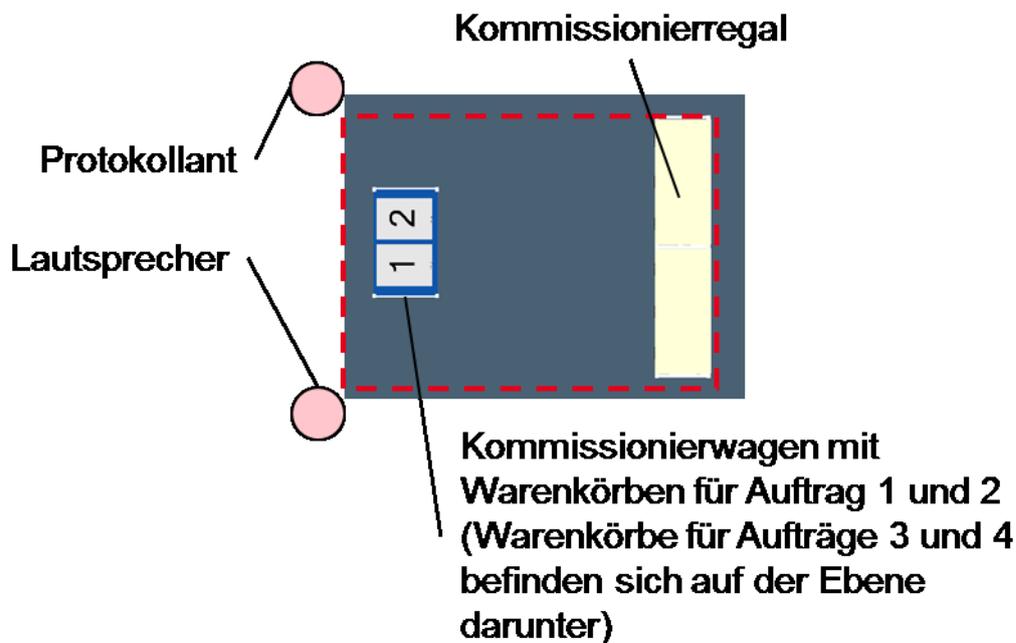


Abbildung 13: Draufsicht der Kommissionierumgebung, die sowohl in der realen als auch in der virtuellen Kommissionierung genutzt wurde (eigene Darstellung)

### 3.2 Ergebnisse der ersten Versuchsreihe

Der Versuchsaufbau wurde im Rahmen einer ersten Versuchsreihe mit elf Probandinnen und Probanden<sup>12</sup> durchgeführt. Alle Probanden besaßen zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung keinerlei Vorkenntnisse in der Kommissionierung. Die Gruppe der Teilnehmer setzte sich aus insgesamt vier Studierenden, sechs wissenschaftlichen Mitarbeitern und einer administrativen

<sup>12</sup> Im weiteren Verlauf wird die männliche Form verwendet. Die Verwendung männlicher Sprache erfolgt im Interesse von Klarheit, Kürze und Einfachheit verbunden mit der Bitte, nicht das grammatikalische Maskulinum auf das biologische Geschlecht zu reduzieren.

Fachkraft der TU Darmstadt zusammen. Acht Probanden waren zum Zeitpunkt der Versuche unter 30 Jahre alt, während nur eine Versuchsperson älter als 50 Jahre alt war. Jeder Teilnehmer erhielt für seine Teilnahme eine Aufwandsentschädigung in Höhe von fünf Euro. Darüber hinaus wurde ein zusätzlicher Bonus in Höhe zwischen null und fünf Euro in Abhängigkeit von der erreichten Geschwindigkeit und Fehlerzahl eines jeden Teilnehmers im Vergleich zum Rest der Gruppe ausbezahlt, um einen zusätzlichen Ansporn zu erzielen. Jeder Teilnehmer wurde einer der beiden Gruppen per Zufall zugeordnet, wobei sechs Personen der Gruppe R/R und fünf Personen der Gruppe V/R zugeteilt wurden. Die ungerade Gesamtzahl der Probanden ließ zwei exakt gleichgroße Gruppen leider nicht zu. Zusätzlich konnte ein Teilnehmer der Gruppe R/R aufgrund eines Fehlers bei der Versuchsdurchführung nicht in den finalen Auswertungen berücksichtigt werden, sodass hier nur noch die Ergebnisse von vier Teilnehmern ausgewertet werden konnten.

Abbildung 14 zeigt die durchschnittliche Pickzeit für einen einzelnen Artikel in jedem Durchlauf beider Gruppen. Die Grafik zeigt, dass die durchschnittlichen Pickzeiten beider Gruppen relativ dicht beieinander liegen, was auf eine prinzipielle Vergleichbarkeit der Pickzeiten in der virtuellen und der realen Umgebung schließen lässt. Allerdings ist erkennbar, dass die durchschnittlichen Pickzeiten der Gruppe V/R in jedem Durchgang über den durchschnittlichen Pickzeiten der Gruppe R/R liegen.

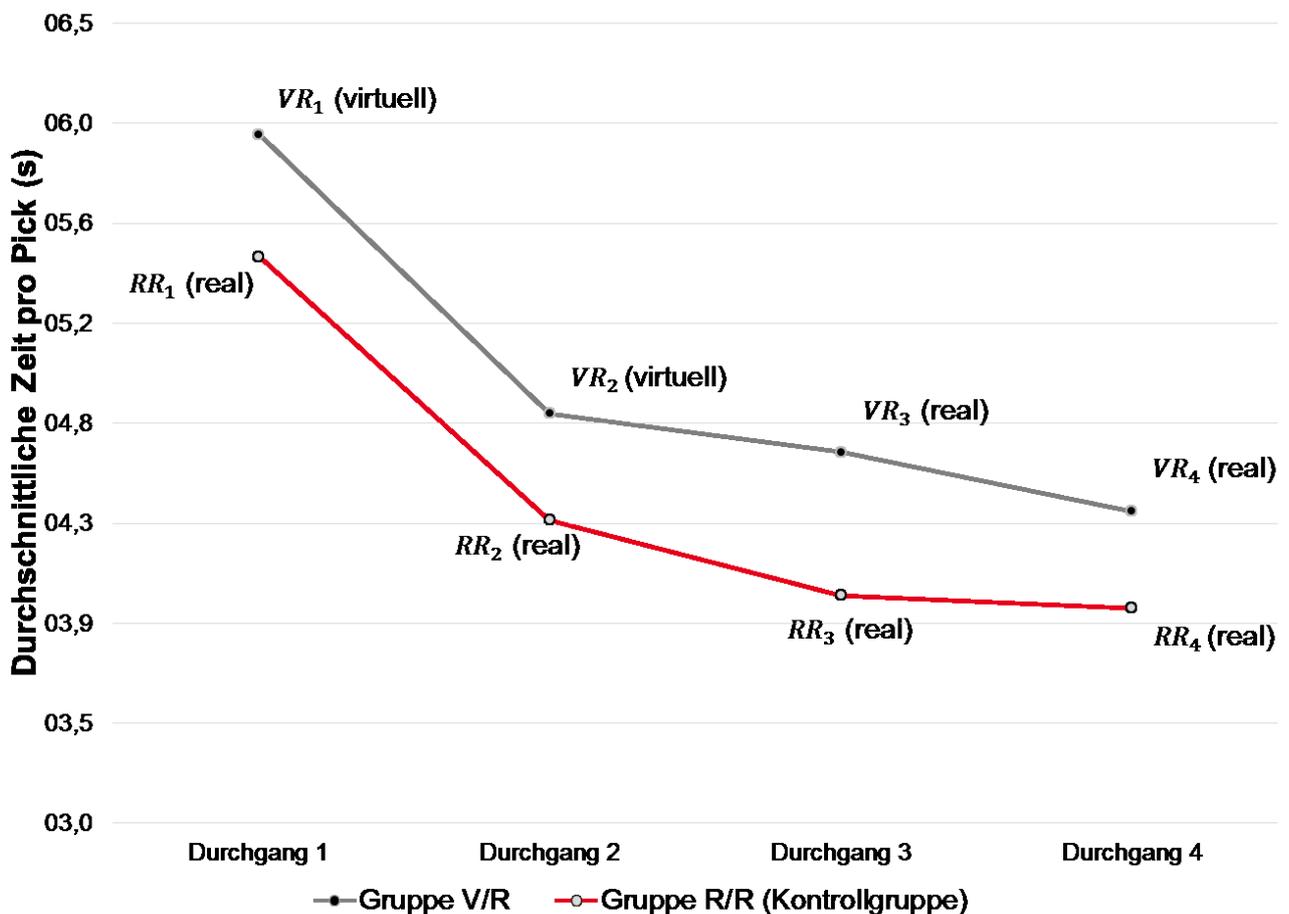


Abbildung 14: Durchschnittliche Zeit pro Pick in jedem Durchlauf des Versuches (eigene Darstellung)

---

Die abnehmenden Kurven in Abbildung 14 lassen außerdem auf einen Lerneffekt schließen. Die Verbesserung der durchschnittlichen Pickzeiten ist dabei bei beiden Gruppen zwischen dem ersten und dem zweiten Durchlauf am größten. In späteren Durchläufen wird der Lerneffekt erkennbar kleiner. In diesem Zusammenhang fällt außerdem auf, dass die Gruppe V/R im dritten Durchgang, nachdem die Teilnehmer von der virtuellen in die reale Umgebung gewechselt sind, geringere durchschnittliche Pickzeiten aufweisen, als die Gruppe R/R in ihrem ersten Durchgang (der Punkt  $VR_3$  in Abbildung 14 liegt unterhalb des Punktes  $RR_1$ ). Dies deutet darauf hin, dass der in der virtuellen Umgebung erzielte Lerneffekt auch auf die reale Kommissionierung übertragen werden kann. Allerdings scheint das virtuelle Training nicht den gleichen Effekt wie ein vergleichbares Training in der realen Umwelt zu zeigen: Der Punkt  $VR_3$  liegt über dem Punkt  $RR_3$  in Abbildung 14.

Darüber hinaus wurden auch die Ergebnisse des NASA-TLX ausgewertet. Basierend auf den Antworten jedes Teilnehmers in den Fragebögen berechnet der NASA-TLX eine Zahl zwischen 0 und 100, wobei höhere Zahlen für eine größere wahrgenommene Arbeitsbelastung durch die Aufgabe stehen. Der NASA-TLX wurde für jeden Teilnehmer zweimal erfasst: Einmal nach Ende des zweiten Durchgangs und ein zweites Mal nach Durchgang vier. Wie Abbildung 15 und Abbildung 16 zeigen, nimmt der NASA-TLX für alle Teilnehmer Werte zwischen 40 und 60 an, was allgemein auf mittlere bis hohe wahrgenommene Arbeitsbelastung und somit eine anspruchsvolle Aufgabe schließen lässt.<sup>13</sup> Interessanterweise nahmen alle Teilnehmer der Gruppe V/R die Arbeitsbelastung der virtuellen Kommissionierung (also Durchgang 1 und 2) als geringer wahr, als die Arbeitsbelastung in der realen Kommissionierung (also Durchgang 3 und 4). Ein ähnlicher Trend ist für die Gruppe R/R in Abbildung 16 nicht feststellbar. Das deutet darauf hin, dass die geringer wahrgenommene Arbeitsbelastung in der virtuellen Kommissionierung mit der virtuellen Umgebung zusammenhängt und nicht dadurch zustande kommt, dass frühere Durchgänge generell als weniger anspruchsvoll wahrgenommen werden. Diese Besonderheit deutet unter Umständen auf eine nur eingeschränkte Vergleichbarkeit und Übertragbarkeit der Ergebnisse hin. Allerdings war die Anzahl der Teilnehmer in der ersten Versuchsreihe relativ klein. Eine detaillierte, statistische Auswertung der Daten war aus diesem Grund nicht möglich. Stattdessen wurde beschlossen, weitere Versuche mit einer größeren Anzahl an Teilnehmern durchzuführen, um weitere Ergebnisse für eine detaillierte Analyse zu generieren.

---

<sup>13</sup> Vgl. Grier (2015)

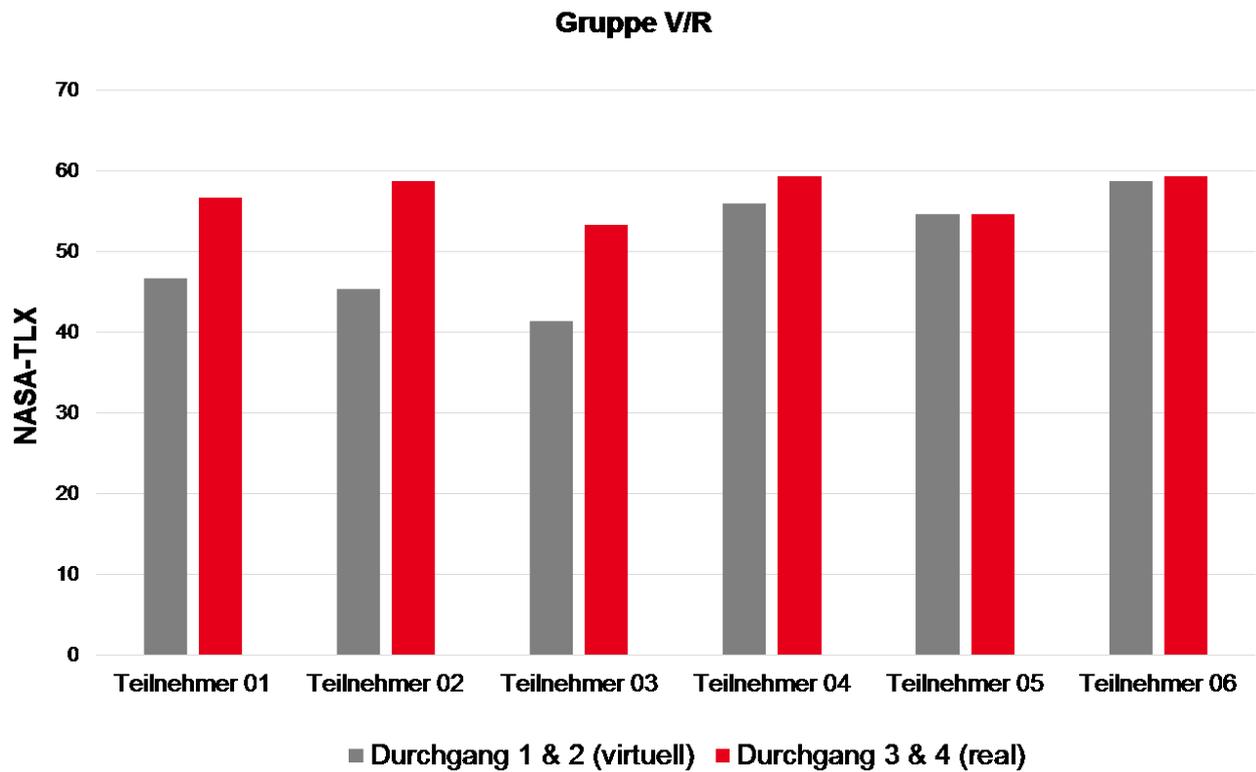


Abbildung 15: Ergebnisse des NASA-TLX für jeden Teilnehmer der Gruppe V/R (eigene Darstellung)

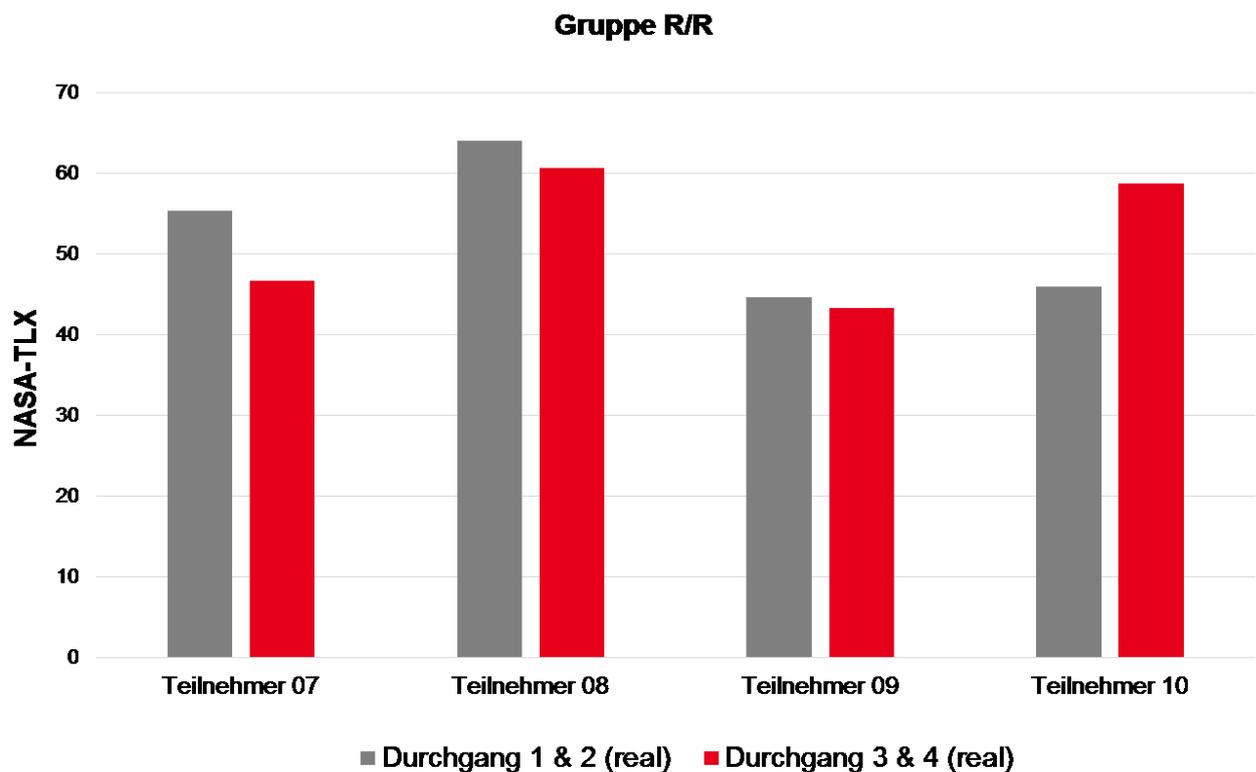


Abbildung 16: Ergebnisse des NASA-TLX für jeden Teilnehmer der Gruppe R/R (eigene Darstellung)

### 4.1 Diskussion der Ergebnisse aus der ersten Versuchsstudie

Die oben genannten Ergebnisse wurden im Rahmen des zweiten Workshops am 06.10.2017 den Experten aus der Praxis präsentiert und gemeinsam diskutiert. Das Feedback der Experten half, die Schwachstellen des Versuchsaufbaus zu identifizieren. Gleichzeitig wurde beschlossen, den Versuchsaufbau zu modifizieren, um den erkannten Limitationen zu begegnen, und weitere Versuche mit zusätzlichen Teilnehmern auch nach Ende der offiziellen Projektlaufzeit durchzuführen.

Ein Kritikpunkt der Workshopteilnehmer bestand darin, dass die Teilung der Kommissionieraufgabe in vier Durchläufe mit jeweils zwölf Picks und die dadurch entstehenden Pausen zwischen den Durchläufen die Abbildung eines realistischen Stresslevels bei der Kommissionierung verhinderten. Daher wurde entschieden, kleinere Packstücke sowie zusätzliche Regale für den erweiterten Versuchsaufbau zu verwenden. Dies ermöglichte eine höhere Anzahl an Picks pro Durchgang und gewährleistete gleichzeitig kürzere Pausen zwischen den einzelnen Durchgängen. Des Weiteren wurde bemängelt, dass bei einer Anzahl von lediglich ein bis drei Artikeln pro Pickanweisung ein starker Einfluss der zufällig bestimmten Anzahl an Artikeln auf die Ergebnisse zu erwarten sei, da durch beidhändiges Greifen zwei Artikel in annähernd der gleichen Zeit gegriffen werden können, wie ein einzelner Artikel. Aus diesem Grund wurde beschlossen, auch die Anzahl der zu kommissionierenden Artikel pro Anweisung zu erhöhen.

Darüber hinaus war auch die gesamte Anzahl der Picks in der ersten Versuchsstudie zu gering, um Lernkurven und potentielle Trainingseffekte auf Basis detaillierter statistischer Auswertungen zu untersuchen. Die Workshop-Teilnehmer schlugen daher eine höhere Anzahl an Durchgängen pro Proband vor. Um eine geeignete Anzahl an Durchgängen für die weiteren Versuche zu bestimmen, wurden Vorversuche ausschließlich am realen Regal mit vier Mitarbeitern der TU Darmstadt mit jeweils insgesamt 20 Durchgängen bestehend aus jeweils sechzehn Pickanweisungen durchgeführt. Wie zuvor wurden auch hierbei die benötigten Zeiten pro Artikel sowie die Pickfehler gemessen. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass nach etwa acht Durchgängen keine signifikante Verbesserung der Pickzeiten mehr erkennbar war. Stattdessen setzte ab diesem Punkt aufgrund von Ermüdungserscheinungen teilweise sogar eine Verschlechterung der Pickzeiten ein. Zudem wurde die Dauer der Versuche bei mehr als acht Durchgängen als unzumutbar für freiwillige Probanden betrachtet. Aus diesem Grund wurde die Zahl von acht Durchgängen mit jeweils sechzehn Pickanweisungen für die zweite Versuchsstudie festgelegt.

Darüber hinaus konnten noch weitere Einschränkungen der ursprünglichen Versuchsstudie identifiziert werden: Die Versuche wurden mit Teilnehmern durchgeführt, die größtenteils unter 30 Jahre alt waren. Für zukünftige Versuche sei daher eine heterogenere Gruppe an Probanden wünschenswert. Dies würde darüber hinaus auch ermöglichen, den Einfluss des Alters sowie weiterer individueller Einflussfaktoren wie beispielsweise Sprachkenntnisse oder Sehschwächen auf die Ergebnisse zu untersuchen. Auch wurde vorgeschlagen, die Versuche noch einmal mit erfahrenen Kommissionierern zu wiederholen, um den Versuchsaufbau sowie

die erzielten Ergebnisse zu validieren und den Einfluss von Vorkenntnissen in der Kommissionierung zu untersuchen.

## 4.2 Anpassung des Versuchsaufbaus

Um eine höhere Anzahl an Pickenweisungen pro Teilnehmer und kürzere Unterbrechungen zwischen den Durchläufen zu ermöglichen, wurden zum einen kleinere Packstücke verwendet und zum anderen ein zweites Kommissionierregal und ein weiterer Kommissionierwagen angeschafft. Als neue Packstücke wurden ebenfalls leere Pappkartons verwendet, die jedoch kleinere Abmessungen (6x6x12 cm) aufweisen und einfarbig sind. So können insgesamt 20 Packstücke pro Position im Regal gelagert werden. Ebenfalls können bis zu 20 Packstücke für jeden Auftrag gepickt werden, bevor der Kommissionierwagen geleert werden muss.

Das zusätzliche Kommissionierregal und der zweite Kommissionierwagen sind in ihren Abmessungen, Farben und dem Aufbau identisch zu denen, die bereits in der ersten Versuchsreihe verwendet wurden. Im Prinzip wurde der ursprüngliche Versuchsaufbau am Kommissionierwagen gespiegelt, sodass sich auf der gegenüberliegenden Seite noch einmal ein identischer Aufbau aus Regal und Kommissionierwagen befindet. Hierdurch ist ein schneller Wechsel am Ende jedes Durchlaufes möglich: Nach der letzten Pickenweisung eines Durchlaufes erhält der Proband einen kurzen Hinweis und wechselt ohne nennenswerten Zeitverlust an das gegenüberliegende Regal, wo er die Kommissionierung wie zuvor fortsetzen kann. In dieser Zeit hat ein Mitarbeiter die Möglichkeit, den Kommissionierwagen auf der anderen Seite zu leeren und das Kommissionierregal wieder aufzufüllen, bevor ein erneuter Wechsel stattfindet. Abbildung 17 zeigt eine Draufsicht des erweiterten Versuchsaufbaus. Dieser wurde lediglich in der realen Umgebung verwendet. In der virtuellen Umgebung ist der Aufbau eines zweiten Regals nicht erforderlich, da das Modell mit einem Klick auf den Ausgangszustand zurückversetzt werden kann und daher kein manuelles Wiederauffüllen erforderlich ist.

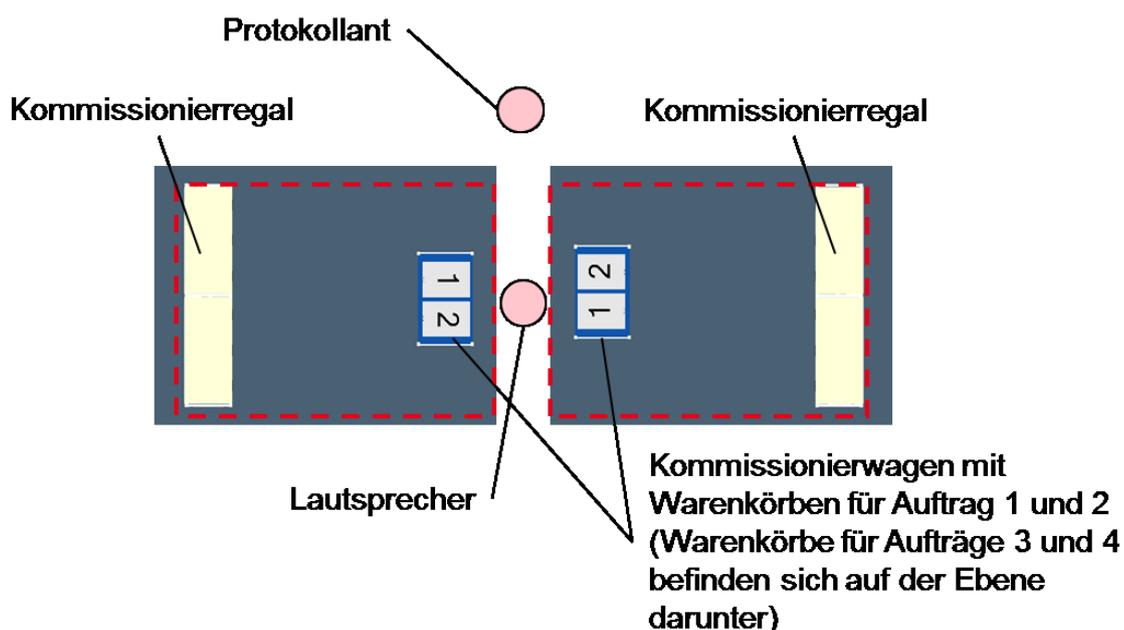


Abbildung 17: Draufsicht der erweiterten Kommissionierumgebung in der realen Umgebung (eigene Darstellung)

Durch den neuen Versuchsaufbau konnte sowohl die Anzahl an Picks pro Durchgang, als auch die Anzahl der zu kommissionierenden Packstücke pro Durchgang erhöht werden. In jedem der insgesamt acht Durchgänge erhielt jeder Proband daher sechzehn Pickanweisungen mit einer Anzahl zwischen einem und neun Artikeln pro Pick. Daraus ergeben sich insgesamt 128 Pickanweisungen, die jeder Teilnehmer im Laufe des Versuches zu absolvieren hatte. Wie zuvor wurden die Pickanweisungen per Zufall erstellt und jeder Proband erhielt die gleichen Anweisungen in der gleichen Reihenfolge. Auch die Einteilung der Teilnehmer in Gruppen erfolgte wie zuvor: Die Gruppe V/R absolvierte die ersten vier Durchgänge in der virtuellen Realität und die zweiten vier Durchgänge am realen Kommissionierregal. Teilnehmer der Gruppe R/R absolvierten alle Durchgänge am realen Regal.

Wie in der vorherigen Versuchsreihe wurden auch diesmal wieder Fragebögen verwendet. Neben persönlichen Eigenschaften zum Alter und den Vorkenntnissen in der Kommissionierung sowie dem NASA-TLX wurde diesmal auch die persönliche Einstellung der Teilnehmer hinsichtlich der virtuellen Realität ermittelt. Dies wurde einmal vor den Versuchen und ein weiteres Mal am Ende ermittelt. So sollte überprüft werden, ob sich die persönliche Einstellung hinsichtlich der Potentiale von VR auf die Ergebnisse auswirkt und ob sich die Einstellung durch die Versuchsdurchführung verändert. Dadurch wurden insgesamt drei verschiedene Fragebögen verwendet. Der erweiterte Versuchsablauf ist in Abbildung 18 schematisch dargestellt.

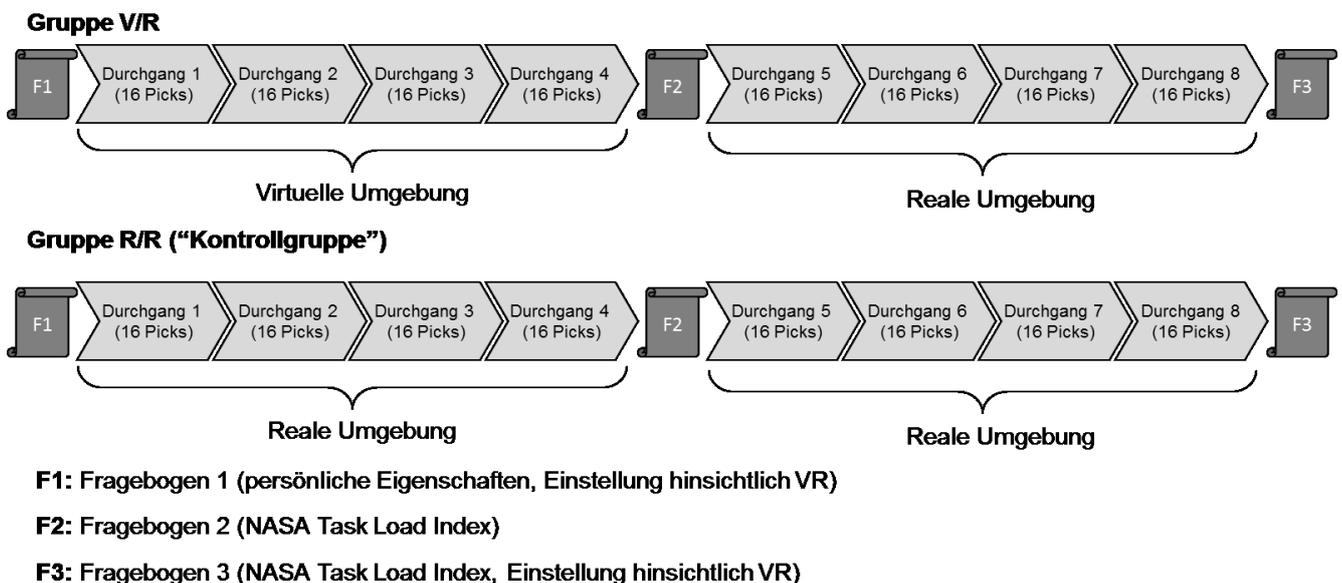


Abbildung 18: Ablauf der Versuche in der zweiten Versuchsreihe, bestehend aus acht Durchgängen mit jeweils 16 Picks für jeden Teilnehmer (eigene Darstellung)

Wie zuvor wurden die Pickanweisungen als Pick-by-Voice-Anweisungen von einer Computerstimme vorgelesen. Auch im erweiterten Versuchsaufbau wurde das Wizard-von-Oz-Verfahren sowie das selbst entwickelte Programm zum Abspielen der Aufträge und zur Zeiterfassung verwendet (siehe Abschnitt 3.1.2).

### 4.3 Ergebnisse der zweiten Versuchsreihe

Eine zweite Versuchsreihe unter Verwendung des erweiterten Versuchsaufbaus wurde im November 2017 am Fachgebiet Unternehmensführung und Logistik durchgeführt. Bei den Probanden handelte es sich um Studierende, die sich freiwillig zur Teilnahme bereiterklärt hatten. Insgesamt nahmen an der zweiten Versuchsreihe 17 Personen teil, von denen acht per Zufall der Gruppe V/R zugewiesen wurden und neun der Gruppe R/R. Es wurde dabei bewusst darauf verzichtet, auf die gleichen Probanden wie in der ersten Versuchsreihe zurückzugreifen. So konnte sichergestellt werden, dass keiner der Teilnehmer über Vorkenntnisse im Bereich Kommissionierung oder in der konkreten Kommissionierumgebung verfügte. Jeder Teilnehmer erhielt eine Aufwandsentschädigung in Höhe von zehn Euro für seine Teilnahme. Zusätzlich wurde ein Bonus zwischen null und maximal fünf Euro abhängig von den erzielten Pickzeiten und der Anzahl an Fehlern im Vergleich zu den anderen Probanden ausbezahlt.

In den erhobenen Pickzeiten pro Artikel für jeden Teilnehmer wurden zunächst Ausreißer identifiziert und eliminiert. Als Ausreißer galten dabei jene Werte, die größer waren als das obere Quartil zuzüglich des 1,5-fachen Interquartilabstandes. So sollten Fehler bei der Bedienung der VR-Equipments, Unklarheiten bei der Versuchsdurchführung oder falsche Eingaben des Protokollanten aus den Daten eliminiert werden.

Abbildung 19 zeigt die durchschnittlichen Pickzeiten pro Artikel für jede der beiden Gruppen in jedem Durchgang. Hierbei ist zu erkennen, dass die durchschnittlichen Pickzeiten beider Gruppen relativ dicht beieinander liegen. Ausnahme bildet lediglich der erste Durchgang, mit einer deutlich höheren durchschnittlichen Pickzeit pro Artikel in der virtuellen Umgebung.

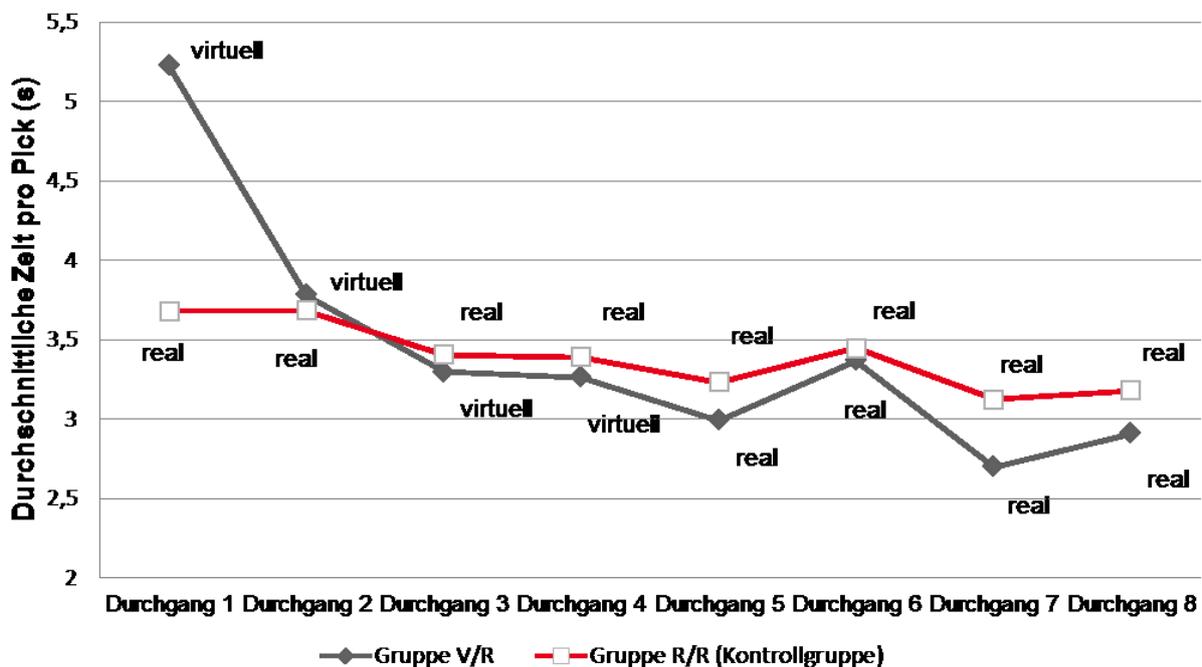


Abbildung 19: Durchschnittliche Zeit pro Pick in jedem Durchlauf des Versuches in der zweiten Versuchsreihe (eigene Darstellung)

Für die Fragestellung, ob eine Kommissionierung in der virtuellen Realität mit einer realen Kommissionierung vergleichbar ist, sind vor allem die ersten vier Durchgänge von Interesse, die im Folgenden im Detail betrachtet werden sollen. Die ersten vier Durchgänge wurden von Gruppe V/R in der virtuellen Umgebung absolviert, während Teilnehmer der Gruppe R/R die gleichen Pickaufträge in der gleichen Reihenfolge am virtuellen Regal kommissionierten. Für diese vier Durchgänge zeigen Abbildung 20 und Abbildung 21 die Pickzeiten jedes Teilnehmers pro Artikel in Form von Boxplots. Hierbei fällt vor allem die breite Streuung der ermittelten Pickzeiten im ersten Durchgang der Gruppe V/R auf.

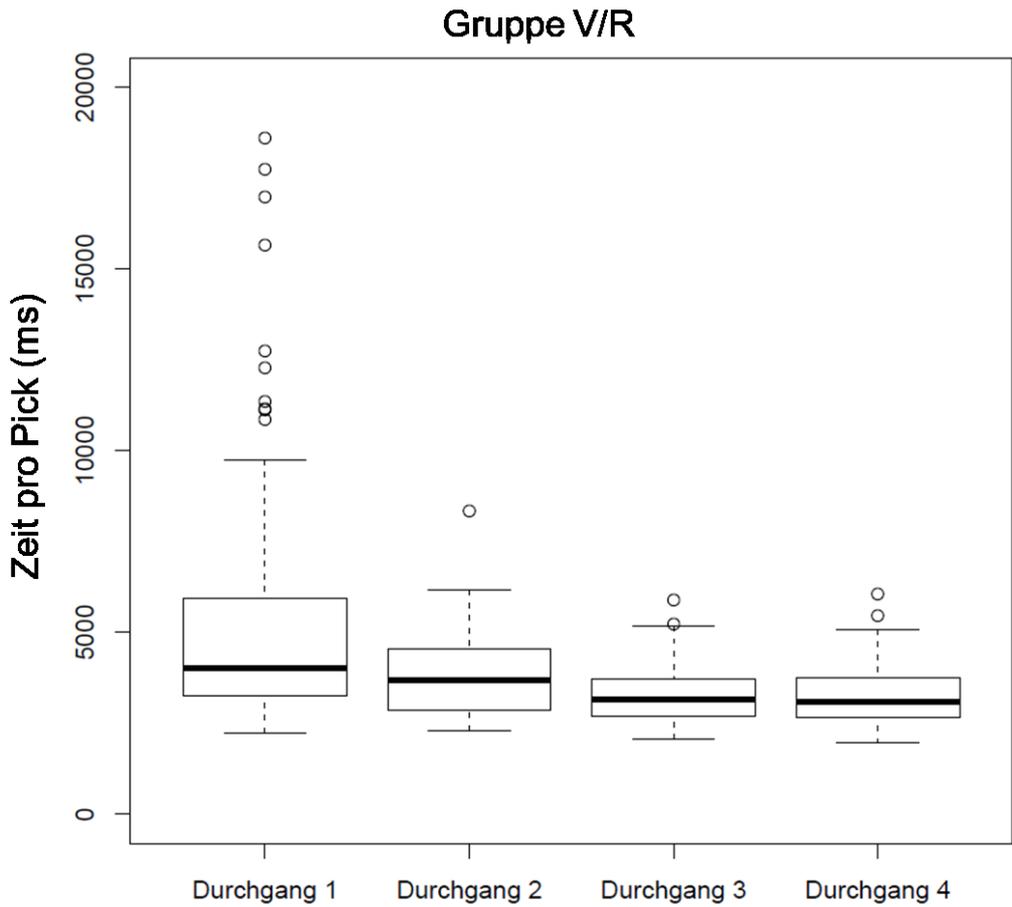


Abbildung 20: Boxplots der Pickzeiten pro Artikel in Durchgang 1 bis 4 der Gruppe V/R (eigene Darstellung)

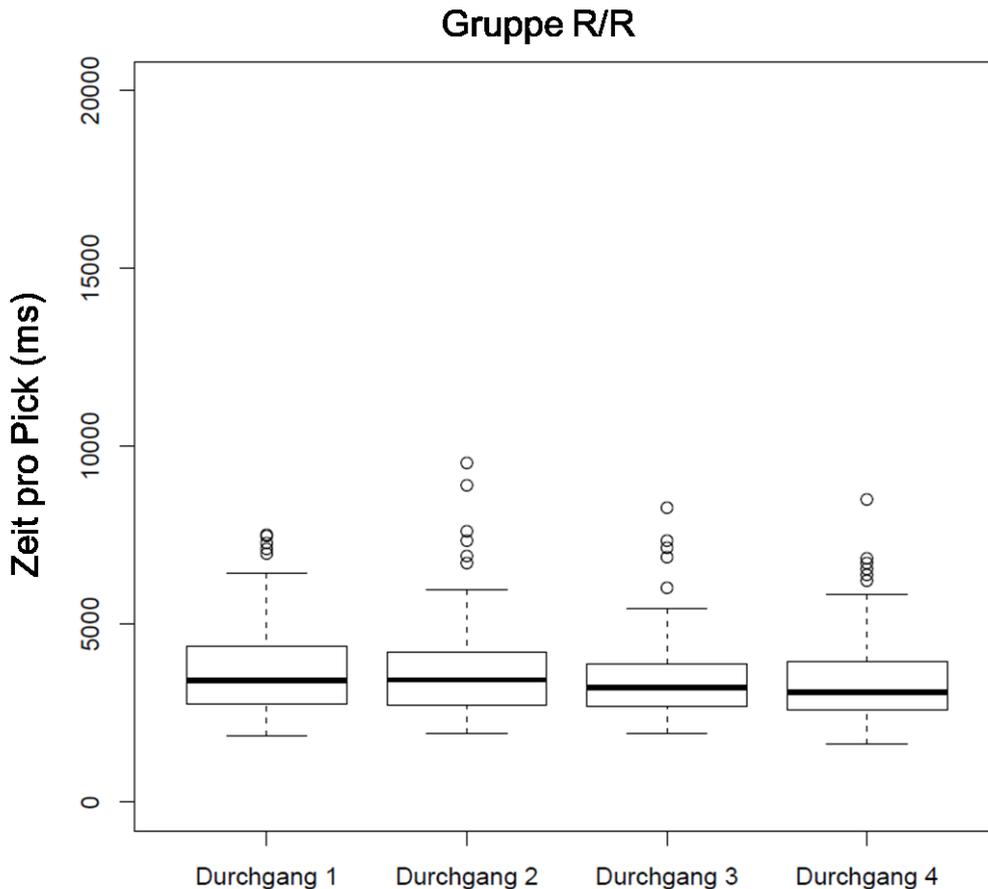


Abbildung 21: Boxplots der Pickzeiten pro Artikel in Durchgang 1 bis 4 der Gruppe R/R (eigene Darstellung)

Um zu überprüfen, ob die in der virtuellen Realität ermittelten Pickzeiten mit Pickzeiten in der realen Kommissionierung vergleichbar sind, wurden anschließend umfangreiche statistische Analysen durchgeführt. Es wird hierbei angenommen, dass eine Vergleichbarkeit der Pickzeiten gegeben ist, wenn der Erwartungswert der Pickzeiten pro Artikel in jedem Durchgang für beide Gruppen gleich ist, also die einzelnen  $\Delta$  in Abbildung 22 für Durchgang eins bis vier jeweils gleich null sind. Um dies zu überprüfen wurde die Stichprobe zunächst mittels einer Levene-Test auf Homoskedastizität getestet. Da diese bei einem Signifikanzniveau von  $\alpha = 0,15$  für alle Durchgänge verworfen werden muss, wurde im Folgenden ein zweiseitiger Welch-Test mit dem Signifikanzniveau von  $\alpha = 0,05$  durchgeführt um die Hypothese zu überprüfen, ob die Erwartungswerte der Pickzeiten pro Artikel für beide Gruppen in jedem Durchgang identisch sind. Die Ergebnisse in Abbildung 23 zeigen, dass diese Hypothese lediglich im ersten Versuchsdurchgang verworfen werden kann. Dies deckt sich mit den Erkenntnissen auf Basis von Abbildung 19. Es wird vermutet, dass die deutlich höheren Pickzeiten im ersten Durchgang von Gruppe V/R dadurch zustande kommen, dass sich die Probanden zunächst mit der noch ungewohnten virtuellen Umgebung und dem Umgang mit der Technologie vertraut machen mussten. Bereits im zweiten Durchgang treten diese Randeffekte jedoch nicht mehr auf, sodass eine Vergleichbarkeit der Pickzeiten vermutet werden kann.

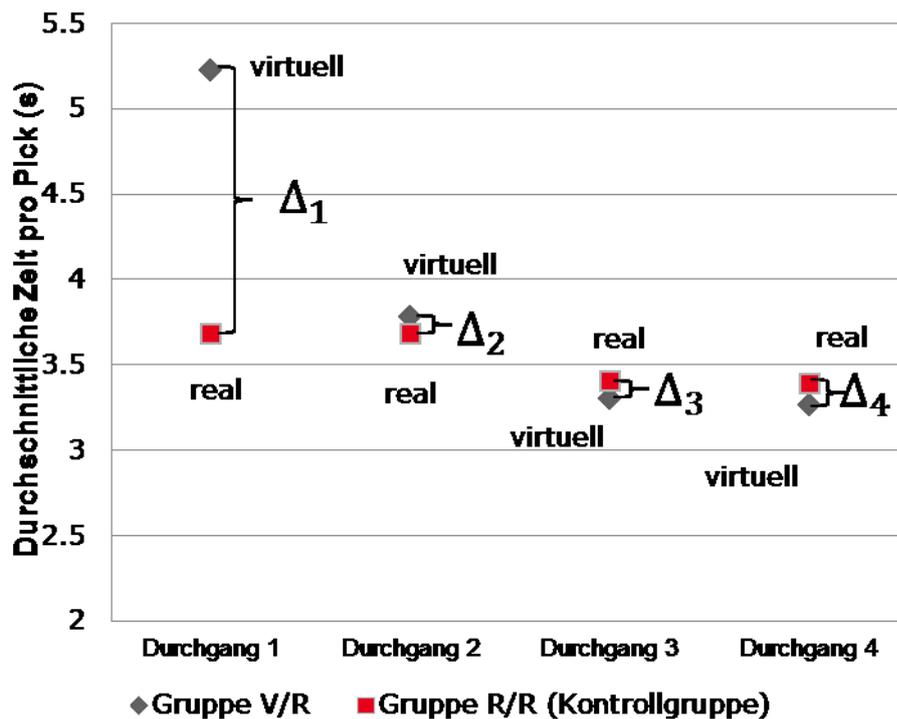


Abbildung 22: Untersuchte Differenzen zwischen den Pickzeiten in der virtuellen und der realen Kommissionierzeiten (eigene Darstellung)

$\Delta$	Gruppe V/R		Gruppe R/R		Levene's test		zweiseitiger t-Test (Welch-Test)	
	Anzahl der Pickzeiten	Durchschnittliche Pickzeit pro Artikel	Anzahl der Pickzeiten	Durchschnittliche Pickzeit pro Artikel	Test Statistik F	p-Wert	Test Statistik T	p-Wert
1	113	5328,46	127	3680,98	44,60	<10 <sup>-9</sup>	4,95	<10 <sup>-5</sup>
2	118	3772,27	133	3698,80	2,60	0,11	0,05	0,63
3	120	3285,49	140	3424,70	3,61	0,06	-1,22	0,23
4	118	3262,31	132	3399,78	11,11	0,0009	-1,08	0,28

Abbildung 23: Deskriptive Statistik und Ergebnisse der Testverfahren (eigene Darstellung)

Darüber hinaus wurden die Ergebnisse des NASA-TLX analysiert. Abbildung 24 zeigt die Ergebnisse der Probanden aus der Gruppe V/R, Abbildung 25 die der Gruppe R/R. Da zwei Probanden den zugehörigen Fragebogen nicht vollständig ausfüllten, kann die Analyse nur für 15 der ursprünglich 17 Probanden durchgeführt werden. Ähnlich wie in der ersten Versuchsreihe

wurden dabei größtenteils Werte oberhalb von 40 ermittelt, was auf eine anspruchsvolle Aufgabe schließen lässt.<sup>14</sup> Abbildung 24 und Abbildung 25 zeigen außerdem anhand von Pfeilen, wie sich die individuelle Wahrnehmung der Arbeitsbelastung nach Durchgang 5 bis 8 im Vergleich zu Durchgang 1 bis 4 verändert hat. Wie zu erwarten sind die Ergebnisse im Falle der Gruppe R/R dicht beieinander – hier fand keine Veränderung der Aufgabe statt. Die leicht höheren Werte in Durchgang 5 bis 8 bei den meisten Probanden können auf eine steigende Ermüdung im Verlauf der Versuche zurückgeführt werden. In der Gruppe V/R dagegen ist der Unterschied deutlicher ausgeprägt: Sechs von acht Probanden bewerten die Kommissionierung in der VR als weniger anspruchsvoll, obwohl es sich hierbei um die ersten Durchläufe und damit den ersten Kontakt der Probanden mit der Aufgabenstellung der Versuchsumgebung handelt. Hier scheint eine Übertragbarkeit der Ergebnisse zwischen virtueller und realer Kommissionierung offensichtlich nur bedingt zu gelten. Tiefergreifende Analysen sind allerdings nötig, um eine belastbare Begründung für die Unterschiede bei der individuellen Arbeitsbelastung abzuleiten. Sollte sich die geringer wahrgenommene Arbeitsbelastung in zukünftigen Versuchen bestätigen, kann dies sogar von Vorteil für die Technologie sein: *Eventuell eignet sich die Technologie gerade dadurch zur Aus- und Weiterbildung von Mitarbeitern in der Kommissionierung, da sie vergleichbare Umgebungen simulieren kann, ohne dass die Tätigkeit in der virtuellen Umgebung als so belastend empfunden wird, wie in der realen Umwelt.*

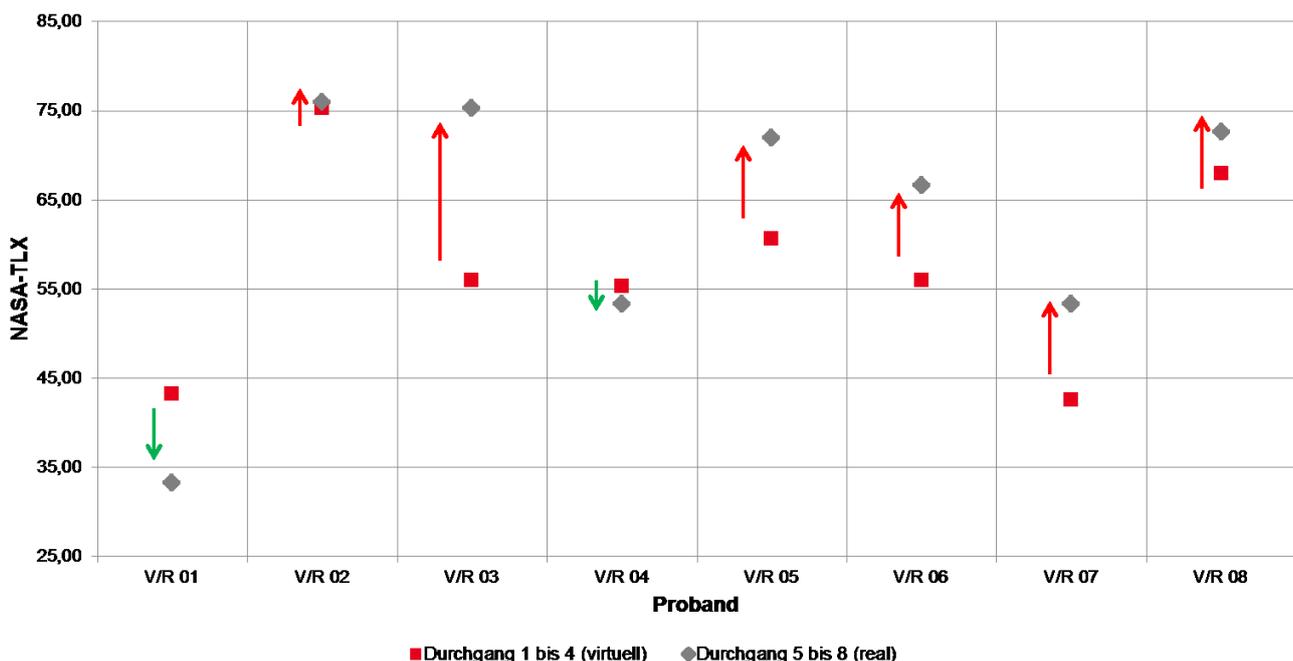


Abbildung 24: Ergebnisse des NASA-TLX der Probanden der Gruppe V/R(eigene Darstellung)

<sup>14</sup> Vgl. Grier (2015)

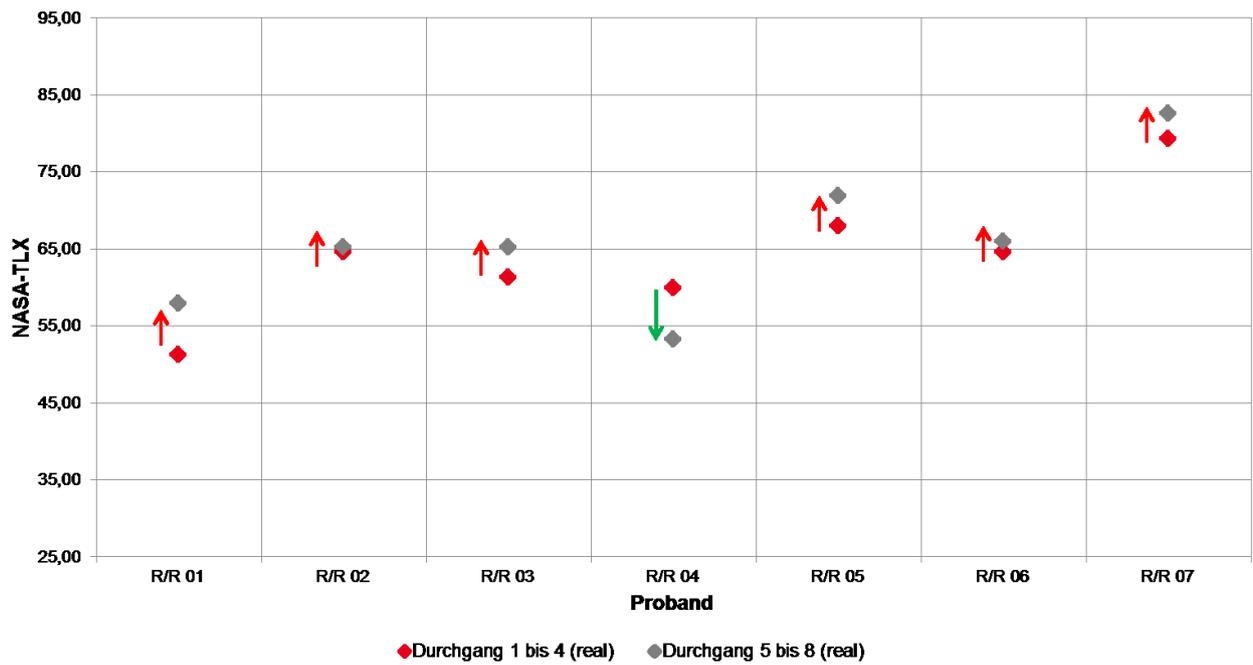


Abbildung 25: Ergebnisse des NASA-TLX der Probanden der Gruppe R/R(eigene Darstellung)

---

## 5 Fazit und Ausblick

---

Im Rahmen des Forschungsprojektes „Die Maschine – der beste Freund des Menschen? Zukunftsstudie zur Interaktion zwischen Mensch und Maschine im Lager der Zukunft“ konnten erste, vielversprechende Erkenntnisse gesammelt werden, die eine Nutzung von VR-Technologie in der manuellen Kommissionierung vorbereiten. So konnten zunächst mögliche menschliche und äußere Einflussfaktoren auf die manuelle Kommissionierung identifiziert werden, die als prinzipiell geeignet für eine Untersuchung mittels einer VR-Simulation angesehen werden. Außerdem konnten grundlegende Limitationen aber auch die Vorteile und spezifischen Stärken moderner VR-Simulationen mittels VR-Brillen herausgearbeitet werden. In diesem Zusammenhang wurde erkannt, dass für eine detaillierte Untersuchung der Mensch-Maschine-Interaktion in der Kommissionierung mittels VR zunächst überprüft werden muss, ob sich Ergebnisse aus der VR-Simulation auf eine reale Kommissionierung übertragen lassen.

Aus diesem Grund wurde ein Versuchsaufbau entwickelt, der die Übertragbarkeit der Ergebnisse zwischen VR und realer Kommissionierung analysiert. Anschließend wurde der Versuchsaufbau in einer ersten Versuchsreihe erfolgreich getestet. Anhand der dabei ermittelten Ergebnisse kann eine solche Übertragbarkeit bereits vermutet werden. Da aber gleichzeitig eine Reihe von Limitationen des ersten Versuchsaufbaus identifiziert werden konnten, wurde entschieden, einen zweiten, erweiterten Versuchsaufbau zu entwickeln.

Der erweiterte Versuchsaufbau wurde anschließend in einer zweiten Versuchsreihe mit einer größeren Anzahl an Probanden durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Hypothese, dass die durchschnittliche Zeit pro Pick in der VR und in der realen Kommissionierung identisch ist, nur für die ersten sechzehn Picks verwerfen lässt. Das Forschungsprojekt hat so gezeigt, dass eine prinzipielle Übertragbarkeit der Zeiten pro Pick zwischen der virtuellen und der realen Kommissionierung angenommen werden kann. Darüber hinaus wurde die individuelle Arbeitsbelastung der Probanden während der Versuchsdurchführung mittels des NASA-TLX ermittelt. Hierbei können deutliche Unterschiede zwischen der realen und der virtuellen Kommissionierung festgestellt werden. Allerdings sind weitere Versuche und Auswertungen nötig, um belastbare Aussagen treffen zu können.

Aus diesem Grund wird die Auswertung der erhobenen Daten auch nach dem offiziellen Ende des Forschungsprojektes fortgeführt. Ziel ist es, neben der Übertragbarkeit der Pickzeiten zu untersuchen, ob sich im Laufe der Versuchsdurchführung Lern- oder Trainingseffekte bei den Probanden einstellen. Weiterhin soll analysiert werden, ob sich diese Lerneffekte, die in der virtuellen Kommissionierung erzielt wurden, auf eine reale Kommissionierung übertragen lassen. Auch sollen die Ergebnisse hinsichtlich der individuellen Einstellung der Probanden bezüglich der VR-Technologie und wie sich diese durch die Kommissioniererfahrung in der VR verändert, ausgewertet werden.

Da die Ergebnisse des Forschungsprojektes vor allem dazu dienen, die prinzipielle Übertragbarkeit und damit die Eignung der VR-Technologie für den Einsatz in der Kommissionierung nachzuweisen, können nun darauf aufbauend konkrete Anwendungen der Technologie entwickelt werden. Aus diesem Grund soll ein weiteres Forschungsprojekt, das derzeit über die For-

---

schungsgemeinschaft Intralogistik / Fördertechnik und Logistiksysteme e.V. (IFL) bei der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen beantragt wird, die Nutzung von VR in der Kommissionierung bei kleinen und mittleren Unternehmen vorbereiten. Das neue Projekt soll auf den bestehenden Versuchsaufbau zurückgreifen und diesen erweitern, um zu zeigen, wie Unternehmen die VR dazu nutzen können, geeignete Konfigurationen der eingesetzten Kommissioniertechnologien (Pick-by-Voice, Pick-by-Light, Pick-by-Vision) gemäß ihrer spezifischen Anforderungen zu ermitteln. Außerdem soll untersucht werden, wie Unternehmen die VR zur Schulung ihrer Mitarbeiter im Umgang mit der eingesetzten Kommissioniertechnologie nutzen können. Das vorliegende Forschungsprojekt hat somit wichtige Grundlagen für die weitere Forschung aber auch für mögliche Anwendungen moderner VR-Technologien in der manuellen Kommissionierung gelegt.

---

## Publikationen auf Basis des Forschungsprojektes

---

### Publikationen

- Elbert, R., Knigge, J., Sarnow, T., 2018. Transferability of order picking performance and training effects achieved in a virtual reality using HMDs. *16th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing*. 11-13 Juli 2018. [unter Begutachtung]
- Elbert, R., Knigge, J., Sarnow, T. 2018. Learning curves in virtual reality order picking compared to real order picking – an experimental study [working title]. *Computers and Industrial Engineering (CAIE). Special Issue: Novel applications of learning curves in production planning and logistics*. [in Bearbeitung]

### Vorträge

- Knigge, J., 2017: Die Maschine – der beste Freund des Menschen? Zukunftsstudie zur Interaktion zwischen Mensch und Maschine im Lager der Zukunft. Anlass: *VDMA Mitgliederversammlung Lagertechnik*. Giebelstadt, 19.10.2017.
- Elbert, R, Knigge, J. (2017): Vorstellung der Projektergebnisse im Projekt „Die Maschine – der beste Freund des Menschen? Zukunftsstudie zur Interaktion zwischen Mensch und Maschine im Lager der Zukunft.“ Anlass: *Sitzung des Wissenschaftlichen Beirates der IFL*. Frankfurt am Main, 05.09.2017.

---

## Projektpartner und Danksagung

---

Neben der IFL als Projektförderer gilt unser besonderer Dank auch den folgenden Unternehmen, die das Projekt aktiv als Projektpartner durch Ihre Teilnahme an den Projektworkshops unterstützt haben:

- Dematic Europe GmbH
- Jungheinrich AG
- KION Group AG
- Linde Material Handling GmbH
- LogoSys Logistik GmbH & Co. KG
- MLOG Logistics GmbH
- STILL GmbH
- Ubimax GmbH
- Viatore Software GmbH
- Wegener + Stapel Fördertechnik GmbH

---

---

## Literaturverzeichnis

---

- Backa, F.S., 2017. *Markteinführungsstrategien für Virtual-Reality-Brillen. Erfolg durch die Nutzung von Netzwerkeffekten*. Hamburg: Igel Verlag RWS.
- Barreto, L., Amaral, A. und Pereira, T., 2017. Industry 4.0 implications in logistics: an overview. *Procedia Manufacturing*, 13, S.1245–1252.
- Battini, D., Calzavara, M., Persona, A. und Sgarbossa, F., 2015. A comparative analysis of different paperless picking systems. *Industrial Management & Data Systems*, 115(3), S. 483-503.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), 2016. Forschungsagenda Industrie 4.0 – Aktualisierung des Forschungsbedarfes. Ergebnispapier, Oktober 2016.
- Dörner, R., Broll, W., Grimm, P. und Jung, B., 2016. Virtual Reality und Augmented Reality (VR/AR): Auf dem Weg von der Nische zum Massenmarkt. *Informatik-Spektrum*, 39(1), S. 30–37.
- Green, P. und Wei-Haas, L., 1985. The rapid development of user interfaces: experiences with the wizard of oz method. *Proceedings of the human factors society*, 29(5), S. 470-474.
- Grier, R.A., 2015. How High Is High? A Meta-Analysis of Nasa-Tlx Global Workload Scores. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 59(1), S. 1727-1731.
- Grosse, E. H., Glock, C. H. und Neumann, W. P., 2015. Human factors in order picking system design: A content analysis. *IFAC-PapersOnLine*, 28(3), S.320–325.
- Hart, S.G., 2006. Nasa-Task Load Index (NASA-TLX); 20 Years later. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 50(9), S. 904-908
- Hart, S.G. und Staveland, L.E., 1988. Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research. In: Hancock, P.A., Meshkati, N. (Hsg.). *Human mental workload*, S. 139-183, Amsterdam: North Holland Press.
- de Koster, R., Le-Duc, T. und Roodbergen, K. J., 2007. Design and control of warehouse order picking: A literature review. *European Journal of Operational Research*, 182(2), S.481–501.
- Lee, E. Y., Kim, M. K. und Chang, Y. S., 2016. Development of an Advanced Picking Station Considering Human Factors. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 26(6), S.700–712.
- McGill, M., Boland, D., Murray-Smith, R. und Brewster, S., 2015. A Dose of Reality : Overcoming Usability Challenges in VR Head-Mounted Displays. *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, Seoul, Republic of Korea, April 18th -23rd 2015, S. 2143–2152.

- 
- Reif, R. und Walch, D., 2008. Augmented & Virtual Reality applications in the field of logistics. *Visual Computer*, 24(11), S.987–994.
- de Vries, J., de Koster, R. und Stam, D., 2016. Exploring the Role of Picker Personality in Predicting Picking Performance with Pick by Voice, Pick to Light and RF-Terminal Picking. *International Journal of Production Research*, 54(8), S.2260–2274.
- Witkowski, K., 2017. Internet of Things, Big Data, Industry 4.0 - Innovative Solutions in Logistics and Supply Chains Management. *Procedia Engineering*, 182, S.763–769.
- Wulz, J.R., 2008. *Menschintegrierte Simulation in der Logistik mit Hilfe der Virtuellen Realität*, Dissertation. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München.