



TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Fakultät für Maschinenwesen

Lehrstuhl für Ergonomie

**Nutzerzentrierte Entwicklung von Ein- und Ausstiegskonzepten
im Nutzfahrzeubbereich unter der Betrachtung
von Bewegungsstrategien**

Jennifer Latka, M.Sc.

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität
München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender:

Prof. Dr.-Ing. Karsten Stahl

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr. phil. Klaus Bengler

2. Prof. Dr.-Ing. Johannes Fottner

Die Dissertation wurde am 22.08.2019 bei der Technischen Universität München eingereicht
und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 17.02.2020 angenommen.

Danksagung

Am Ende einer langen Arbeit, können wir uns nur schwer an die schwierigen Zeiten währenddessen erinnern. Ich habe es dennoch versucht und möchte mich ganz herzlich bedanken bei

- meinem Doktorvater Professor Dr. Klaus Bengler für die Möglichkeit am Lehrstuhl für Ergonomie zu promovieren und mein Thema frei zu gestalten. Danke auch für Ihren fachlichen Input und die zeitliche Flexibilität im Rahmen des Kooperationsprojekts.
- Andreas Zimmermann und Dr. Britta Michel für Euer Vertrauen und die Möglichkeit das Kooperationsprojekt auszuführen und selber zu gestalten. Danke, Britta, auch für dein akribisches Korrekturlesen.
- Daniel Blank für die vielen Diskussionen, die wir geführt haben, unsere Präsentationsübungen und die rettende Schokolade am Nachmittag.
- Hans Rohrmüller dafür, dass du dein ganzes Wissen über den Lkw-Einstieg mit mir geteilt und immer wieder neuen Input, meistens in Form von Videos, gebracht hast.
- Natalie Richardson für unsere wunderbare Zusammenarbeit im Rahmen des Rechtslenker-Versuchs und unseren offenen Austausch zu jeder Zeit und zu jedem Thema.
- Dr. Anna Sprung für deine Unterstützung in Statistik, dein offenes Ohr für jedes Versuchsdesign und deine hilfreiche Aufbauarbeit vor meinem letzten Versuch.
- Ingrid Bubb, meine härteste Kritikerin – Danke, dass du von Anfang an mit mir über mein Thema diskutiert, mich bei jeder Studie motiviert und jede meiner Idee hinterfragt hast. Ein herzliches Dankeschön auch für dein detailliertes Korrekturlesen.
- Dr. Jonas Schmidler, Dr. Verena Knott, Steffi Paßler und Christina Harbauer, die sich stets Zeit genommen haben eine Versuchsidee zu diskutieren und Rat zu geben.
- „meinen“ Studierenden, die viel Fleiß und Mühen in die Bearbeitung meiner Themenstellungen gesteckt haben.
- meiner Familie und meinem wunderbaren Mann für eure unendliche Unterstützung und Motivation und euer offenes Ohr zu jeder Zeit.

Damit zum Abschied noch einmal in guter Büro-Tradition:

Vielen Dank und ein schönes Leben.

– Jenny –

Kurzfassung

Das Betreten und Verlassen von Nutzfahrzeugen ist ein Unfallschwerpunkt für Berufskraftfahrer. Risikofaktoren bilden Umwelteinflüsse, das Kabinenlayout, fahrerabhängige Aspekte und die Bewegungskoordination. Nutzfahrzeughersteller beeinflussen das Kabinenlayout, welches im Rahmen der Längenänderung von Nutzfahrzeugen (EU-Richtlinien 2015/719) neue Gestaltungsmöglichkeiten erfährt. An diesem Punkt setzt die Arbeit mit der Frage an, wie die Zugangsgeometrie gestaltet werden sollte, um ein sicheres und komfortables Ein- und Aussteigen bei Nutzfahrzeugen zu gewährleisten.

Die Vorgehensweise dieser Arbeit folgt der *Design Research Methodology* (DRM) nach Blessing und Chakrabarti (2002). Demzufolge teilt sich die Arbeit in vier Abschnitte: der Aufgabendefinition, der Beobachtungs- und Analysephase der IST-Situation, der Erarbeitung der SOLL-Situation und die Nutzerevaluation.

Die Analyse des IST-Zustands zeigt, dass Lkw-Fahrer bewegliche und außenliegende Komponenten für die Zugangsgeometrie auf Grund einer hohen Anfälligkeit für Beschädigungen im Verkehrsallday ablehnen. Präferiert werden treppenartige Zugangskonzepte mit einem seitlichen Zugang vor oder hinter dem Fahrersitz oder einem Zugang durch die Kabinenrückwand. Überraschenderweise zeigt die Probandenstudie am Realfahrzeug, dass Lkw-Fahrer keine Bewegungsstrategien für die Zugangsbewegung ausbilden. Innerhalb von sechs in kurzen Zeitabständen aufeinander folgenden Bewegungswiederholungen ändert sich die genutzte Bewegungsabfolge. Dies wird auf die Diskrepanz zwischen dem Konzeptmodell der linksseitig angeordneten Zugangsgeometrie und dem Inneren Modell der Fahrer zurückgeführt.

In der dritten Phase der DRM wird im Rahmen einer Szenario-Analyse und zweier Probandenstudien an einem variablen Mock-Up ein optimierter Bewegungsablauf erarbeitet und in einer geführten Zugangsgeometrie umgesetzt. Dazu wird die Einstiegshöhe von 1500 mm mit drei Trittstufen – im gleichmäßigen Abstand (unterste Stufe auf 400 mm) und einem Versatz von 75° zueinander – erklommen. Die Auftrittsbereiche auf den Stufen sind entsprechend dem vorgegebenen Ein- und Ausstiegsmuster – linker Fuß auf der untersten Stufe, rechter Fuß auf der mittleren Stufe, linker Fuß auf der obersten Stufe – angeordnet. Die abschließende Nutzerevaluation zeigt, dass Lkw-Fahrer die Bewegungsstrategie für den Einstieg zu 67% und für den Ausstieg zu 100 % annehmen und sich dementsprechend führen lassen. Für die Einstiegsbewegung wird eine signifikant kürzere Bewegungsdauer für den geführten Zugang (Median = 5,406 s) im Gegensatz zur Seriengeometrie (Median = 7,16 s) nachgewiesen, exakter Mann-Whitney-U-Test: $U = 46,000$, $p < 0.000$, $r = 0.64$ (starker Effekt nach Cohen, 1992).

Die vorliegende Arbeit zeigt, dass für den Lkw-Zugang aktuell keine Bewegungsstrategien existieren. Allerdings lassen sich Lkw-Fahrer durch eine angepasste Gestaltung des Zugangs nach einem vorgegebenen Bewegungsmuster führen. Mit dieser Fußstrategie steigen Lkw-Fahrer schneller und effektiver ein und aus. Diese Ergebnisse sind in einer artifiziellen Situation entstanden und mögliche Einflussfaktoren, wie die Annäherung an das Fahrzeug und das Türöffnen, werden im Versuchsdesign vorgegeben beziehungsweise nicht variiert. Ansatzpunkte für weiterführende Arbeiten bietet der Fokus auf die Handstrategien oder die Untersuchung der auftretenden Handkräfte. Die Ergebnisse von Chateauroux et al. (2012) lassen bei der geführten Zugangsgeometrie die zu präferierenden symmetrischen Handkräfte erwarten.

Abstract

One of the main contributors to injuries of heavy truck drivers is the ingress and egress motion. Weather influences, the cabin layout, driver-dependent issues, and movement coordination are main risk factors which occur during ascending and descending. However, commercial vehicle manufacturers cannot influence most of these factors and are mainly limited to cabin layout design to mitigate risk. In future, new design solutions for the cabin are possible as the length regulations of commercial vehicles are going to be changed (EU-Directive 2015/719). Consequently, this thesis starts with the following essential question: How can we design a suitable truck ingress and egress geometry which enables a secure and comfortable movement?

This work follows the *Design Research Methodology* (DRM) according to Blessing and Chakrabarti (2002). Correspondent to the DRM, this work is divided into four parts: The task definition, the analysis of the current situation, the analysis of the desired situation, and the user's evaluation.

The analysis of the current ingress and egress situation shows that truck drivers refuse movable or external components for entry geometry as these can be damaged easily. Truck drivers prefer a stair-like entry geometry at the cabin side with access in front of or behind the driver's seat or a rear entry through the rear wall. Surprisingly, no motion strategies for ingress or egress motion on real vehicles are developed by the truck drivers. Even within six motion repetitions the drivers change their motion strategy. We attribute this finding to an incompatibility between the concept model of the entry geometry and the mental model of the drivers.

In the third stage of the DRM, an optimized movement is developed and built in a mock-up as guided entry geometry. The geometry covers an entry height of 1500 mm with three steps located in equal distance to each other. Only the lowermost step has a distance of 400 mm to the ground to ensure an everyday suitability. The steps are located with an inclination angle of 75°. Stepping areas at each step indicate a specific motion strategy for ingress and egress motion: Left foot on lower step, right foot on middle step, left foot on upper step. The user evaluation shows that 67 % of truck drivers adapt to the guided ingress motion. Furthermore, 100 % adapt to the egress motion. The guidance leads to a significantly shorter motion time (median = 5.406 sec) in comparison to the current entry geometry (median = 7.16 sec), Mann-Whitney-*U*-Test: $U = 46,000$, $p < 0.000$, $r = 0.64$ (strong effect according to Cohen, 1992).

One main finding within this work is, that there are no motion strategies for ingress and egress motion at current heavy truck models. However, it is possible to guide truck drivers along a predefined motion strategy due to the design of stepping areas. By the use of this foot strategy, truck drivers enter and exit the truck faster and more efficiently. These results are determined in laboratory studies which neglected impact factors like the movement towards the vehicle or the door opening. Further works should focus on hand strategies or hand forces. According to Chateauroux et al. (2012), the hand forces occurring at the guided entry geometry should be allocated symmetrically and therefore, be safer and more comfortable.

I Inhaltsverzeichnis

I	INHALTSVERZEICHNIS	VII
II	GLOSSAR	IX
1	EINLEITUNG	11
2	GRUNDLAGEN	15
2.1	Vorstellung des Nutzers „Berufskraftfahrer“	15
2.2	Vorstellung des Nutzfahrzeugtyps „Frontlenker“	18
2.3	Zusammenfassung: Arbeitssituation und Arbeitsmittel	26
3	STAND DER FORSCHUNG	27
3.1	Menschlicher Bewegungsablauf.....	27
3.1.1	Das Innere Modell als Handlungsanleitung	27
3.1.2	Bewegungsstrategien im Fahrzeugbereich.....	32
3.1.3	Bewertungsansätze für Bewegungen	35
3.1.4	Zusammenfassung: Definition von Bewegungsstrategien	36
3.2	Menschliche Informationsverarbeitung.....	37
3.2.1	Der Begriff Intuitivität	37
3.2.2	Das Innere Modell als Gestaltungsprinzip	39
3.2.3	Zusammenfassung: menschliche Informationsverarbeitung	40
4	PHASE I: AUFGABE UND VORGEHEN	41
4.1	Fragestellung	41
4.2	Vorgehensmodell	41
4.3	Anwendung der DRM	44
5	PHASE II: ANALYSE DER EINFLUSSFAKTOREN	45
5.1	Literatur-Abriss: Einflüsse auf die Zugangsbewegung	45
5.2	Nutzerbeobachtung auf dem Fernverkehrsrastplatz	46
5.2.1	Motivation: Erster Eindruck der Zugangsbewegung bei Nutzfahrzeugen	46
5.2.2	Methode: Beobachtungsstudie	46
5.2.3	Ergebnisse: Unbewusstes Wissen aus der Beobachtungsstudie.....	48
5.3	Nutzerbefragung am Fernverkehrsrastplatz	49
5.3.1	Motivation: Bewertung der Zugangsgometrie durch Lkw-Fahrer	49
5.3.2	Methode: Nutzerbefragung	49
5.3.3	Ergebnisse: Implizites Wissen aus der Nutzerbefragung	50
5.4	Experten-Workshop zu Störgeometrien und Strategien	56
5.4.1	Motivation: Zugangsgometrie im Vergleich der europäischen Hersteller	56
5.4.2	Methode: Experten-Workshop.....	56
5.4.3	Ergebnisse: Explizites Wissen aus dem Experten-Workshop.....	57
5.5	Nutzerstudie am Realfahrzeug	62
5.5.1	Motivation: Nutzerverhalten am Realfahrzeug	62
5.5.2	Methode: Probandenstudie	62
5.5.3	Ergebnisse: Identifikation von Bewegungsstrategien und Einflussfaktoren	65
5.6	Fazit der zweiten methodischen Phase in der DRM.....	85

6	PHASE III: ENTWICKELN VON ANNAHMEN.....	87
6.1	Szenario-Analyse zur Ableitung des zukünftigen Gestaltungsspielraums	87
6.1.1	Motivation: zukünftige Rolle der Zugangsgeometrie	87
6.1.2	Methode: Szenario-Analyse.....	87
6.1.3	Ergebnisse: Vorstellung des zukünftigen Gestaltungsspielraums.....	89
6.2	Untersuchung der Stufenbreite und des Stufenauszugs.....	92
6.2.1	Motivation: tatsächliche Stufennutzung der Lkw-Fahrer.....	92
6.2.2	Methode: Probandenstudie an variablen Prüfstand.....	92
6.2.3	Ergebnisse: Präferierte Stufenanordnung der Lkw-Fahrer	96
6.3	Vorgabe einer Bewegungsstrategie	99
6.3.1	Motivation: Fahrer in ihrer Bewegung führen	99
6.3.2	Methode: präskriptive Nutzerstudie am Mock-Up	100
6.3.3	Ergebnisse: Vorgabe einer Bewegungsstrategie	101
6.4	Fazit der dritten methodischen Phase in der DRM.....	106
7	PHASE IV: PRÜFEN DER ANNAHMEN	113
7.1	Evaluation einer geführten Zugangsgeometrie.....	113
7.1.1	Erarbeitung einer geführten Zugangsgeometrie.....	113
7.1.2	Methode: Nutzerevaluation am Mock-Up	118
7.1.3	Ergebnisse: Nutzerevaluation einer geführten Zugangsgeometrie.....	118
7.2	Fazit der vierten methodischen Phase in der DRM	124
8	DISKUSSION	128
8.1	Die Design Research Methodology.....	128
8.2	Methodendiskussion.....	128
8.3	Aktuelle Bewegungsstrategien im Nutzfahrzeugbereich	129
8.4	Geführte Bewegungsstrategie im Nutzfahrzeugbereich	130
9	FAZIT UND AUSBLICK	133
III	LITERATURVERZEICHNIS.....	CXXXI
IV	VERZEICHNIS ALLER BETREUTER STUDIENARBEITEN	CXLI
V	ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	CXLIII
VI	DIAGRAMMVERZEICHNIS.....	CXLVII
VII	TABELLENVERZEICHNIS.....	CXLIX
VIII	ANHANG	CLI

II Glossar

Bewegungsmuster	In Abgrenzung zu einer Bewegungsstrategie, die ein gleichbleibendes Verhalten von Beginn bis Ende unter gleichen Umständen beschreibt, definiert ein Bewegungsmuster einen zeitlich begrenzten Bewegungsteil einer Gesamtbewegung. Somit setzt sich eine Bewegungsstrategie aus mehreren Bewegungsmustern zusammen.
Center of Gravity (CoG)	Center of Gravity (engl.) ist die vertikale Projektion des CoM auf den Boden (Singh, Singh, & Kalra, 2014).
Center of Mass (CoM)	Center of Mass (engl.) ist der Punkt, an dem die gesamte Masse eines Körpers angreift (Singh et al., 2014).
Center of Pressure (CoP)	Center of Pressure (engl.) beschreibt den Punkt, an dem der resultierende, vertikale Kraftvektor angreift (Singh et al., 2014).
Design Research Methodology	Die Design Research Methodology (DRM) ist ein Rahmenwerk zur Identifizierung von Forschungsbereichen und zur Entwicklung erfolgreicher Produkte (Blessing & Chakrabarti, 2002) und das Vorgehensmodell dieser Arbeit.
Geführte Zugangsgeometrie	Der Begriff geführte Zugangsgeometrie beschreibt das erarbeitete Konzept als Ergebnis aus den durchgeführten Studien. Die geführte Zugangsgeometrie wird in Abschnitt 7.1 erarbeitet und evaluiert.
halbgeöffnete Tür	In der vorliegenden Arbeit wird die Ein- und Ausstiegsbewegung ausschließlich bei komplett geöffneter Tür betrachtet. Dies bedeutet, dass die Fahrertür bis zum Endanschlag geöffnet ist. Zwischen dem geschlossenen und dem komplett offenen Zustand, gibt es Zwischenpositionen, in die die Tür einrasten kann. Die Öffnungswinkel und Anzahl der Zwischenpositionen sind herstellerabhängig. Der Fall einer halbgeöffneten Tür bezeichnet in der vorliegenden Arbeit eine Türstellung in den Zwischenrastern, die die Fahrer beispielsweise in engen Parksituationen nutzen.
Maßkonzept	Das Maßkonzept des Fahrzeugs beschreibt die räumliche Anordnung der Baugruppen in zweidimensionaler Schnittansicht (Bubb et al., 2015).
Mock-Up	Ein Mock-Up oder auch Sitzkiste, wird erstellt, um die Innenraumverhältnisse eines konzipierten Fahrzeugs zu bewerten (Bubb et al., 2015).
Perzentil	Das x-te Perzentil bezogen auf eine Körperlänge, bedeutet, dass x % der Grundgesamtheit kleiner sind als das x-te Perzentil und dementsprechend sind 100-x % der Grundgesamtheit größer als das x-te Perzentil (Bubb et al., 2015).

Seriengeometrie	Der Begriff Seriengeometrie beschreibt die (Zugangs)Geometrie bei Frontlenkerfahrzeugen, wie sie heutzutage verwendet wird. Im späteren Verlauf der Arbeit bezieht sich der Begriff auf die Konfigurationen der aktuellen Zugangsgeometrie bei den Mock-Up Aufbauten.
Stufenauszug	Der Stufenauszug beschreibt den Versatz der Stufen zueinander in Fahrzeugquerrichtung. Je größer der Stufenauszug ist, desto treppenartiger sind die Stufen angeordnet und der Fahrer kann die nächsttiefere Stufen einsehen.
Zugangsgeometrie	Das Einsteigen in und das Aussteigen aus einem Fahrzeug sind aus biomechanischer Sicht zwei verschiedene Bewegungsabläufe. In der Literatur wird dies nicht immer sauber getrennt und die Begriffen werden teilweise als Synonyme verwendet. (Bubb et al., 2015) Daher wird in dieser Arbeit der Begriff <i>Zugangsgeometrie</i> eingeführt, der die Geometrieelemente umfasst, die ein Ein- und Aussteigen ermöglichen, wie beispielsweise Trittstufen oder Haltegriffe.

1 Einleitung

Der Einstieg in ein Fahrzeug bildet den ersten Kontakt zwischen Kunde¹ und Fahrzeug (Rigel, 2005; Singh, Singh, & Kalra, 2014). Dieser erste prägende Eindruck kann sich bis auf die Kaufentscheidung auswirken (Rigel, 2005). Im Bewusstsein dieses Einflusses sind die Fahrzeughersteller bestrebt, einen komfortablen Zugang anzubieten. Im Hinblick auf die Verkürzung von Entwicklungszyklen (Blessing, Chakrabarti, & Wallace, 1998), arbeiten Forschung und Industrie kooperativ an der virtuellen Simulation und Absicherung von Zugangsgeometrien in Personenkraftwagen (Pkw) (vgl. Andreoni, Rabuffetti, & Pedotti, 2004; Cherednichenko, Assmann, & Bubb, 2006; Dufour & Wang, 2005; Lestrelin & Trasbot, 2005), um den Kunden von Beginn an zu überzeugen.

Im Nutzfahrzeugsbereich gibt es dagegen zwei Kunden: den Käufer und den Fahrer. Der Fahrer ist der direkte Nutznießer der Fahrzeuggestaltung, da er tagtäglich mit dem Fahrzeug interagiert. Das Fahrzeug ist für den Lkw-Fahrer Arbeitsplatz, Wohnraum und Schlafzimmer in einem. Für den Käufer, zumeist der Spediteur, ist der Lastkraftwagen (Lkw) ein Investitionsgut. Er wählt das Fahrzeug vorrangig nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten aus (Hilgers, 2016). Dabei bildet der Lkw-Fahrer mit seinen Sicherheits- und Komfortansprüchen einen Kostenfaktor, den der Spediteur in die Gesamtrechnung einkalkuliert (Hilgers, 2016). Ausgaben, die zur Steigerung des Wohlbefindens und der Sicherheit des Lkw-Fahrers beitragen, wirken sich auf den Umgang mit dem Fahrzeug, die Gesundheit des Fahrers und damit auf die Kosten aus (Hilgers, 2016). Für die Hersteller von Nutzfahrzeugen ergeben sich zwei Kundenprofile mit teilweise unterschiedlichen Anforderungsschwerpunkten, die in einem Fahrzeug vereint werden müssen.

Für den Berufskraftfahrer stellt der Ein- und Ausstieg einen wesentlichen Teil seiner täglichen Arbeit dar. Entgegen der vorherrschenden Meinung steigen nicht nur Fahrer im Verteilerverkehr häufig ein und aus, auch Fernverkehrsfahrer führen diesen Bewegungsablauf im Berufsalltag häufig aus (Michel, 2014). Vor allem bei der Fahrtvorbereitung und der Abfahrtskontrolle betreten und verlassen Fernverkehrsfahrer ihr Fahrzeug bis zu achtmal innerhalb kürzester Zeit (Michel, 2014).

Berufskraftfahrer arbeiten nach einem strengen zeitlichen Ablauf, um die Waren „Just-In-Time“² anzuliefern (Michel, 2014). Dieser Zeitdruck und die daraus resultierende Hektik begünstigt Unfallgeschehen und Verletzungen rund um das Fahrzeug herum (Michel, 2014). Nach Unfalldaten der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV) macht unter anderem die Tätigkeit *Be-, Aus-, Absteigen von einer Maschine* (14,0 %) den zweitgrößten Anteil an den meldepflichtigen Arbeitsunfällen aus (vgl. Abbildung 1-1). Damit ist das Betreten und Verlassen des Fahrzeugs gefährlicher für den Lkw-Fahrer als das Führen des Fahrzeugs. Obwohl dies zeitlich den größten Anteil im Berufsalltag eines Kraftfahrers einnimmt, sind nur 5 % der meldepflichtigen Arbeitsunfälle während der Fahrt verzeichnet. Diese Zahlen gehen aus einer hochgerechneten Stichprobenstatistik aus den Berichtsjahren 2010 - 2014 der DGUV hervor. Meldepflichtige Arbeitsunfälle sind dabei alle Unfälle, bei

¹ Sämtliche Personenbezeichnungen sind synonym, in weiblicher wie männlicher Art, zu verstehen. Aufgrund der besseren Lesbarkeit wird nur die männliche Sprachform verwendet.

² Anlieferung der Waren zum Zeitpunkt der Verarbeitung um Lagerkosten zu minimieren (Bothe, 2015)

denen der Geschädigte mehr als drei Tage arbeitsunfähig ist. Die sogenannten Bagatellunfälle, bei denen der Geschädigte bis zu drei Tage arbeitsunfähig ist, sind in dieser Statistik nicht mit aufgeführt. Folglich ist davon auszugehen, dass die Dunkelziffer der Verletzungen im Zuge des Ein- und Aussteigens deutlich höher liegt. (vgl. DGUV, 2016)

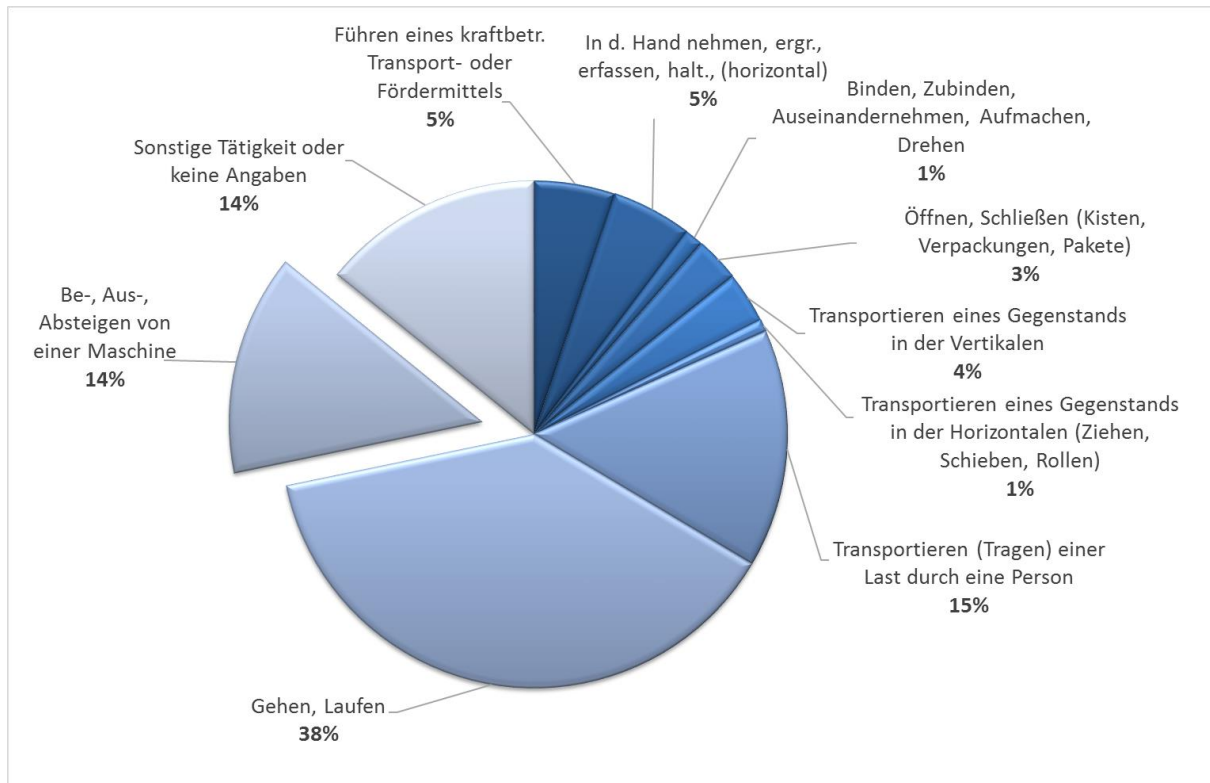


Abbildung 1-1: Stichprobenstatistik von meldepflichtigen Arbeitsunfällen der Berufsgruppe Kraftfahrer in den Berichtsjahren 2010-2014 (Werte gerundet) (DGUV, 2016)

Risikofaktoren für Stürze beim Ein- oder Ausstieg werden in äußere und innere Einflussfaktoren eingeteilt. Zu äußeren Faktoren zählen Umwelteinflüsse, wie verunreinigte oder vereiste Stufen (Patenaude, Marchand, Samperi, & Bélanger, 2001; Spielholz, et al., 2008, siehe auch Absatz 5.3.3) und das Kabinenlayout (Shorti, 2016) mit der Stufen- und Haltegriffanordnung. Innere Risikofaktoren für Stürze beschreiben fahrerabhängige Aspekte, wie physische und mentale Ermüdung, Bewegungskoordination, BMI³ und Bewegungsstrategien beim Ein- und Ausstieg (Shorti, 2016).

Nutzfahrzeughersteller beeinflussen die äußeren Einflussfaktoren in Bezug auf das Kabinenlayout, um das Risiko von Stürzen und Verletzungen der Berufskraftfahrer zu reduzieren und einen Beitrag zur Steigerung der Rentabilität und damit der Gesamtbilanz der Fahrzeuge zu leisten. Durch die EU-Richtlinien 2015/719 über die Längenänderung bei Nutzfahrzeugen eröffnen sich neue Gestaltungsmöglichkeiten für die Lkw-Fahrerkabine. Die zusätzliche Kabinenlänge soll neben der Verbesserung der Aerodynamik und damit der Wirtschaftlichkeit, zur Erhöhung der Sicherheit und des Komforts des Fahrers beitragen.

³ Body Mass Index (engl.) gibt das Verhältnis von Körpergröße zu Körpergewicht an. Der BMI ist ein Richtwert, ob eine Person normalgewichtet ist oder nicht und errechnet sich aus dem Körpergewicht in Kilogramm geteilt durch die Körpergröße in Metern zum Quadrat. Die Einordnung des errechneten BMI erfolgt in der Regel in fünf Kategorien: Untergewicht, Normalgewicht, Übergewicht, starkes Übergewicht, extreme Adipositas. (Bundesministerium für Gesundheit, 2018)

Dies bietet die Möglichkeit unfallanfällige oder von Lkw-Fahrern bemängelte Bereiche an der Fahrerkabine zu optimieren.

Der Faktor Sicherheit ist ein Aspekt in der Interaktion zwischen Mensch und Umwelt – ein Aspekt, der aufgrund von Verletzungszahlen schnell benannt wird. Allerdings gestaltet sich die Interaktion zwischen Mensch und Umwelt deutlich komplexer. Als Fachgebiet beschäftigt sich die *Ergonomics*⁴ oder auch *Human Factors* genannt mit dieser Interaktion in der Mensch-Maschine-Schnittstelle, mit dem Ziel der Optimierung zwischen *Human Well-Being* und der *Overall System Performance* (IEA, 2019).

In einem *Human Centered Design*⁵ untersucht das Fachgebiet der *Ergonomics* die Aufgabe, das Produkt, den Arbeitsplatz, die Organisation und die Umwelt als Einzelelemente und in ihrem Zusammenspiel miteinander (IEA, 2019). Ausgehend von diesem holistischen Ansatz beschäftigt sich diese Arbeit mit der ergonomischen Optimierung der Mensch-Maschine-Schnittstelle *Zugangsgeometrie bei Nutzfahrzeugen* im Sinne des Fachgebiets *Ergonomics*. Dabei wird die Mensch-Maschine-Schnittstelle des Lkw-Zugangs hinsichtlich des Bewegungsablaufs während der Ein- und Ausstiegsbewegung untersucht. Für den Pkw-Bereich existieren Bewegungsstrategien für den Zugang, im Nutzfahrzeugbereich liegen hierfür nur geringe Erkenntnisse vor. Daher werden, unter Einbezug der Lkw-Fahrer, Bewegungsstrategien für die aktuelle Fahrzeugkabine ermittelt. Auf diesen Ergebnissen aufbauend, werden Ideen und Konzepte für eine Neugestaltung der Zugangsgeometrie in Anbetracht der Längenänderung (EU-Richtlinien 2015/719) erarbeitet und evaluiert.

⁴ Der deutsche Begriff der *Ergonomie* oder *Arbeitswissenschaft* entspricht nicht gänzlich den englischen Bezeichnungen *Ergonomics* oder *Human Factors* (Schlick, Luczak, & Bruder, 2010, S. 9). Daher wird hier auf die internationale Definition des Fachbereich *Ergonomics* bzw. *Human Factors* eingegangen.

⁵ aus dem Englischen: nutzerzentrierter Ansatz

2 Grundlagen

Das Grundlagenkapitel ist in zwei Abschnitte gegliedert. Im ersten Teil wird auf die ergonomische Auslegung von Produkten eingegangen, die Nutzerpopulation der Lkw-Fahrer aus anthropometrischer Sicht vorgestellt und ein Einblick in die Arbeitssituation der Berufskraftfahrer zur Einordnung der Ergebnisse gegeben. Der zweite Teil stellt die unterschiedlichen Fahrerhaustypen vor, geht anschließend auf die Zugangsgeometrie europäischer Nutzfahrzeuge detailliert ein und zeigt Bauraumkonflikte im Umfeld der Zugangsgeometrie auf. Abschließend folgt eine kurze Zusammenfassung der Erkenntnisse, auf denen in den nachfolgenden Kapiteln aufgebaut wird.

2.1 Vorstellung des Nutzers „Berufskraftfahrer“

Im Folgenden werden die Grundlagen zur ergonomischen Auslegung erläutert und die Nutzerpopulation der Berufskraftfahrer anhand anthropometrischer Kennwerte aus vorherigen Studien vorgestellt. Abschließend gibt die Arbeitssituation der Lkw-Fahrer einen ersten Einblick in die Aufgaben und Stressauslöser der Berufskraftfahrer.

Anthropometrische Grundlagen

Der Begriff Anthropometrie umfasst die Erfassung, Auswertung und Anwendung von Körpermaßen und bildet die Basis der ergonomischen Produktauslegung. Für die ergonomische Produktauslegung wird eine Nutzerpopulation definiert, auf die das Produkt anschließend entsprechend ihrer anthropometrischen Ausprägungen angepasst wird. Um möglichst die gesamte Nutzerpopulation abbilden zu können, werden Grenzperzentile definiert und zur Auslegung herangezogen. In der Regel sind dies das 5., 50. und 95. Perzentil der definierten Grundgesamtheit. Faktoren, die die anthropometrische Ausprägung der Grundgesamtheit beeinflussen sind das Geschlecht, das Alter, die Region, das Referenzjahr, die Körperproportionen und die Korpulenz. (Bubb, Bengler, Grünen, & Vollrath, 2015)

Die geschlechtsbezogenen Unterschiede betreffen nicht nur Körpergröße und Körperbautyp, sondern auch Körperkräfte (Bubb et al., 2015): Weibliche Personen sind tendenziell kleiner als männliche und besitzen rund 50% der Maximalkraft männlicher Personen (Wakula, Berg, Schaub, & Bruder, 2009). Auch die geografische Region, in der ein Produkt vertrieben werden soll, wirkt sich auf die Anthropometrie aus (Bilger, 2004): Tendenziell sind Menschen im Norden größer als im Süden und in Europa größer als in Asien (Bubb et al., 2015; Kaiser, 2011). Neben den Vertriebsmärkten spielt auch das Referenzjahr, wann ein Produkt auf den Markt kommt, eine Rolle. Reihenmessungen zeigen, dass die nachfolgende Generationen größer werden als die vorgehenden (Kaiser, 2011). Dieser Trend wird als säkulare Akzeleration bezeichnet. In einem Zeitraum von 10 Jahren wird eine Zunahme der Körperlänge von 1 cm angenommen (Bubb et al., 2015). Nach neusten Reihenmessungen verlangsamt sich allerdings der Trend der säkularen Akzeleration, zumindest bezogen auf die Körperhöhe (Kaiser, 2011; Seidl, Trieb, & Wirsching, 2009), derweil setzt eine Akzeleration der Korpulenz ein (Kaiser, 2011). Gleichzeitig ist eine schiefe Verteilung aller Körpermaße nach rechts zu beobachten (Seidl, Trieb, & Wirsching, 2009).

Die Nutzerpopulation der Lkw-Fahrer

Die Definition einer Nutzerpopulation wird über drei Leitmaße beschrieben: Körperhöhe, Körperproportion und Korpulenz (HUMAN SOLUTIONS GmbH, 2014; Kaiser, 2011). Im Vergleich zur Durchschnittsbevölkerung haben Berufskraftfahrer ein deutlich höheres Körpergewicht (Bothe, 2015; Nagel, 2001) und damit einhergehend höhere Umfangsmaße (Nagel, 2001). Dies lässt sich nicht nur bei europäischen, sondern auch bei amerikanischen Berufskraftfahrern nachweisen (Guan, et al., 2012). In der Berufsgruppe der Lkw-Fahrer zeigt sich der demografische Wandel besonders deutlich (Michel, 2014; Lohre et al., 2014). Im Jahr 2014 lag das Durchschnittsalter der deutschen Lkw-Fahrer bei 47 Jahren, rund 45 % der befragten Fahrer waren 50 Jahre oder älter (Lohre et al., 2014). Bei der Körperhöhe existieren dagegen keine relevanten Unterschiede zwischen der Berufsgruppe der Lkw-Fahrer und der deutschen Gesamtbevölkerung (Nagel, 2001). Doch Berufskraftfahrer tendieren zu einer größeren Stammlänge und zählen damit eher zu den Sitzriesen (Nagel, 2001). Aufgrund des geringen Frauenanteils in der Berufsgruppe werden bei Probandenstudien häufig nur männliche Berufskraftfahrer betrachtet (Bothe, 2015; Nagel, 2001).

Die Arbeitssituation der Lkw-Fahrer

Die Arbeitssituation der Berufskraftfahrer begünstigt das Unfall- und Verkehrsrisiko (Michel, 2014). Daher wird die Arbeitssituation der Fahrer vorgestellt und Risikofaktoren abgeleitet. In einer Studie von Lohre et al. (2014) gaben 67% der Lkw-Fahrer an, ihren Beruf aus *Spaß am Fahren* gewählt zu haben. Dies zeigt eine intrinsische Motivation der befragten Fahrer. Nur 14,5% der Teilnehmer wählten den Beruf aufgrund fehlender Alternativen und rund 56% der Befragten würden den Beruf des Kraftfahrers erneut ergreifen (Lohre et al., 2014). Vor allem junge Fahrer und Fahrer im Nahverkehr sind mit ihrer Arbeit zufrieden (Lohre et al., 2014) – unabhängig von dem schlechten Berufsimago. Nur ca. 20% sehen ihren niedrigen sozialen Status als extrem oder sehr belastend (Ellinghaus & Steinbrecher, 2002). Das schlechte öffentliche Ansehen des Lkw-Fahrers schlägt sich aber auf die geringen Nachwuchszahlen aus (Lohre et al., 2014). Experten prognostizieren eine Verbesserung des öffentlichen Bilds in Folge des Fahrermangels, der sich vor allem im internationalen Fernverkehr aufgrund der langen Unterwegszeiten und der damit erschwerten Aufrechterhaltung sozialer Kontakte, zeigt (Lohre et al., 2014).

Zu den Arbeitsaufgaben eines Berufskraftfahrers gehören neben dem Fahren und Navigieren das Be- und Entladen des Anhängers (Ellinghaus & Steinbrecher, 2002; Lohre et al., 2014), für dessen sicheren Transport der Fahrer verantwortlich ist (Evers, 2009). Für einen reibungslosen Transport der Güter und eine zuverlässige Ankunft muss der Lkw-Fahrer Dokumente und Frachtpapiere ausfüllen, sein Fahrzeug pflegen, warten, gegebenenfalls reparieren und die Fahrtroute mit eventuell vorgegebenen Abladezeiten am Ankunftsort planen und organisieren (Ellinghaus & Steinbrecher, 2002). Aus diesen Arbeitsaufgaben ergeben sich hohe körperliche Anforderungen an einen Berufskraftfahrer: Überdurchschnittliche Körperkraft, gutes Seh- und Hörvermögen und schnelle Reaktionszeiten (Michel, 2014). Die körperlichen Anforderungen werden in regelmäßigen ärztlichen Untersuchungen überprüft (Evers, 2009; Michel, 2014). Zudem wirkt sich die Fahrhaltung mit den vorgegebenen Zwangsbedingungen äußerer Restriktionen, wie die Hände am Lenkrad und die Füße an den Pedalen, als körperlich belastend aus. Technische Innovationen, wie Assistenzsysteme, und ergonomische Verbesserungen, wie der Schwingsitz, erleichtern die Ausführung der Fahraufgabe und entlasten den Fahrer. (Evers, 2009)

Entsprechend der Einteilung von Evers (2009) lassen sich Belastungen neben den physischen, in psychische und soziale Aspekte einteilen. Unter physische Belastungen fallen

Umgebungsfaktoren wie Lärm und Hitze, körperliche Anstrengungen aufgrund von Be- und Entladetätigkeiten, die Zwangshaltung während der Fahrt und eine ungesunde Lebensweise (Evers, 2009; Michaelis, 2015). Die Fahrer klagen über Müdigkeit, Rücken- und Kopfschmerzen (Ellinghaus & Steinbrecher, 2002). Die Hälfte der Fahrer geben in Befragungen zu, einmal während der Fahrt fast eingeschlafen zu sein (Ellinghaus & Steinbrecher, 2002). Die Dunkelziffer liegt vermutlich viel höher.

Psychisch wirken sich die Faktoren Verantwortung für die Fracht, die monotone Arbeitsaufgabe, die soziale Vereinsamung und der Zeitdruck auf die Lkw-Fahrer aus (Evers, 2009; Hermann, 2004; Michaelis, 2015). Durch die Einführung des logistischen Konzepts *Just-In-Time* hat sich vor allem der Zeitdruck verstärkt (Hermann, 2004). Über 70% der Fahrer geben an, dass sie unter zeitlichem Druck stehen und empfinden diesen als sehr belastend (Ellinghaus & Steinbrecher, 2002). Die gesetzlichen Lenk- und Ruhezeiten, die eingeführt wurden, um die Fahrer zu schützen, bewirken eine Verstärkung des Stress-Effekts (Ellinghaus & Steinbrecher, 2002).

Die Arbeitszeit wirkt sich auch auf das Privatleben aus. Unregelmäßige Dienstzeiten und Nacht- oder Schichtarbeit erschweren eine soziale Teilhabe an Freizeit- und Familienunternehmungen und sorgen für eine soziale Isolation oder zumindest Einschränkung (Evers, 2009; Michaelis, 2015). Unter diesem Aspekt wirkt sich die Arbeitszeit auch als sozialer Faktor auf den Lkw-Fahrer aus. Neben den Beschäftigungszeiten zählen die Infrastruktur mit engen oder beschädigten Straßen und die steigende Verkehrsdichte mit den daraus resultierenden Konflikten mit anderen Verkehrsteilnehmern zu Stressfaktoren für die Lkw-Fahrer (Ellinghaus & Steinbrecher, 2002; Evers, 2009; Lohre et al., 2014; Michaelis, 2015). Die Belastungsfaktoren wirken stärker auf ältere Fahrer ein, die zur Zeit den größten Anteil der Fahrerpopulation stellen (Ellinghaus & Steinbrecher, 2002; Evers, 2009).

Lkw-Fahrer werden vorrangig anhand von quantitativen Kennzahlen, wie Tonnenkilometer, bewertet – ungeachtet der schwierigen Planbarkeit vieler Einflussfaktoren, wie beispielsweise Stau auf den Straßen (Lohre et al., 2014). Daher postulieren Lohre et al. (2014) die Güte des Fahrers nach qualitativen Aspekten, beispielsweise der Schadensquote, dem Auftreten beim Kunden oder den Telematikauswertungen, zu bewerten. Schließlich repräsentiert der Fahrer das Unternehmen nach außen hin (Lohre et al., 2014). Experten sind überzeugt, dass trotz einer Steigerung der wirtschaftlichen Effizienz durch längere Lkw, reduzierte Standzeiten oder geringere Leerkilometerquoten der Bedarf an Fahrern und damit gutem Personal weiter ansteigt (Lohre et al., 2014).

Die Fahrer schätzen die Freiheit, die der Beruf mit sich bringt. Doch diese Freiheit täuscht. Durch Informations- und Kommunikationstechnologien kann der Disponent die Routen und Pausenzeiten überwachen und die Fahrer zu jeder Zeit erreichen (Hermann, 2004). Schon heute arbeiten Lkw-Fahrer am gesetzlich festgelegten Limit der Arbeitszeiten (Hermann, 2004; Lohre et al., 2014). Im Durchschnitt arbeiten Berufskraftfahrer 54 Stunden die Woche, von denen 35,5 Stunden pro Woche mit Fahren verbracht werden (Lohre et al., 2014). Im Fernverkehr steigt die durchschnittliche Lenkzeit auf 42 Stunden an. Bei einer maximalen, wöchentlichen Lenkzeit von 56 Stunden und maximal 90 Stunden Lenkzeit innerhalb von zwei Wochen, ist kaum Spielraum nach oben (Lohre et al., 2014).

In Zukunft erwarten Experten Veränderungen in den Aufgaben der Berufskraftfahrer. Im Hinblick auf die Entwicklungen des automatisierten Fahrens ergibt sich für den Fahrer, neben den Aufgaben der manuellen Fahrt, in Zukunft eventuell die Möglichkeit fahrfremde Tätigkeiten während den Phasen der automatisierten Fahrt im Fahrzeug auszuführen (Lohre et al., 2014). Alle anderen Arbeiten, wie Be- und Entladen oder die Wartung und Reparatur des Fahrzeugs könnten von spezialisierten Dienstleistern erledigt werden (Lohre et al.,

2014). Durch die Ausführung von wertschöpfenden Tätigkeiten während der automatisierten Fahrt erwarten Lohre et al. (2014) steigende Anforderungen an die Fahrer. Auch in Folge der zunehmenden Technik im Fahrzeug, durch Fahrerassistenzsysteme und Vernetzung unter den Fahrern und zum Disponenten, werden sich die Anforderungen an zukünftige Fahrer ändern (Lohre et al., 2014).

2.2 Vorstellung des Nutzfahrzeugtyps „Frontlenker“

In Europa werden vorrangig Nutzfahrzeuge in Frontlenkerbauart eingesetzt. Daher wird im Folgenden die Zugangsgeometrie dieser Bauart beleuchtet und die Geometrien der verschiedenen Hersteller werden miteinander verglichen. Bedingt durch die kubische Bauweise befindet sich die Zugangsgeometrie bei der Frontlenkerbauweise in Fahrtrichtung vor der Vorderachse und weist einen leiterartigen Zugang auf (Hjelm & Bergqvist, 2009). In der folgenden Tabelle 2-1 werden die entsprechenden Fernverkehrskabinen⁶ der sieben europäischen Nutzfahrzeughersteller verglichen. Folgende Fernverkehrskabinen werden verglichen: für *MAN Truck & Bus AG* wird ein *TGX* mit *XXL* Kabine herangezogen. Das Pendant von *Mercedes Benz* ist der *Actros* mit einer *Giga Space* Kabine. *Scania* bietet in der *Baureihe S* die Kabine *Highline Flat-Floor Sleeper* für den Fernverkehr an. Bei *DAF* ist die *Baureihe XF* mit der *Space Cab* für lange Strecken ausgerüstet, während *Volvo* einen *FH* mit *Globetrotter XL* Kabine für den Fernverkehr anbietet. Von *Renault* wird aus der *Baureihe T* die *Highsleeper Cab* betrachtet und *Iveco* schickt seine Fahrer mit einem *Stralis XP* in der *HI-WAY* Kabine auf Langstrecke.

Zugangsgeometrie der europäischen Nutzfahrzeughersteller

In Tabelle 2-1 ist in der linken Spalte eine schematische Darstellung der Zugangsgeometrie bei Frontlenkerfahrzeugen dargestellt. In blau sind die Stufenabstände gekennzeichnet, die in den nebenstehenden Spalten für die Modelle angegeben sind. Die Stufenabstände werden von unten nach oben aufsteigend nummeriert. Der Abstand zwischen der untersten Stufe und dem Fahrbahnboden kann nicht betrachtet werden, da diese von der Fahrzeugkonfiguration abhängt. Aufgrund des Baukastensystems der Hersteller variiert der Abstand mit der Wahl des Fahrniveaus, der Fahrerhauslagerung, der Motorwahl, der Fahrzeugart, der Federart und des Reifendurchmessers (Rohrmüller, 2018).

⁶ Teilweise bieten die Hersteller Kabinen mit unterschiedlichen Dachhöhen für den Fernverkehr an, aufgrund des Baukastensystems ergeben sich für die Stufenabstände keine Änderungen. Der Vollständigkeit halber wird die Kabinenbezeichnung aus der Quellenangabe verwendet.

Die Zugangshöhe (Tabelle 2-1) variiert zwischen 1020 mm (Iveco Stralis) und 1280 mm (Mercedes Actros). Im Mittel überwinden Fernverkehrsfahrer eine Einstiegshöhe von 1159,14 mm ($SD = 99,11$ mm), um in einen europäischen Lkw ein- oder auszusteigen. Die durchschnittliche Einstiegshöhe wird entweder mit drei oder vier Trittstufen erklommen. Vier Hersteller bieten den Fahrer drei Trittstufen für das Ein- und Aussteigen an. Diese haben einen mittleren Abstand von 369,75 mm ($SD = 9,74$ mm), 349,25 mm ($SD = 40,61$ mm) und 367,25 mm ($SD = 11,41$ mm) in aufsteigender Reihenfolge von der Fahrbahn zum Fahrerhausboden. Dabei liegt nur beim *DAF XF* ein gleicher Stufenabstand zwischen allen Tritten vor. Beim *MAN TGX* und *Volvo FH* unterscheiden sich, laut Datenblatt, die Stufenabstände um 1 mm zueinander. *Iveco Stralis XP* bietet seinen Fahrern den unregelmäßigsten Stufenabstand von 370 mm, 290 mm und 360 mm, in aufsteigender Reihenfolge von der Fahrbahn zum Fahrerhausboden, an.

Bei den vierstufigen Fahrzeugen liegt der Abstand 1 (unterste zu zweitunterste Stufe) im Durchschnitt bei 325 mm ($SD = 13,23$ mm), der Abstand 2 (zweitunterste zu zweitoberste Stufe) im Mittel bei 307,33 mm ($SD = 14,19$ mm), der Abstand 3 (zweitoberste zu oberste Stufe) im Durchschnitt bei 302,33 mm ($SD = 15,37$ mm) und der Abstand 4 zwischen der obersten Stufe und dem Fahrerhausboden durchschnittlich bei 321,67 mm ($SD = 2,89$ mm). Die Standardabweichung der Stufenabstände für den drei- und vierstufigen Zugang bewegen sich zwischen 0,90 mm (Abstand 4 beim vierstufigen Zugang) und 40,61 mm (Abstand 2 beim dreistufigen Zugang). Damit sind die Standardabweichungen für die jeweiligen Stufenabstände gering und weist auf eine große Ähnlichkeit der Zugangskonzepte der verschiedenen Hersteller hin. Dabei weist nur der *Mercedes Actros* einen gleichmäßigen Stufenabstand von jeweils 320 mm auf. Beim *Renault T* und *Scania S* liegen die Stufenabstände im Bereich von 292 mm bis 340 mm, mit geringeren Varianzen beim *Scania S*. Die größten Varianzen liegen beim *Iveco Stralis XP* vor, bei dem die Stufenabstände zwischen 70 und 80 mm variieren.

Bei den angegebenen Werten muss beachtet werden, dass die Daten vom *MAN TGX*, *Mercedes Actros*, *DAF XF*, *Volvo FH* und *Renault T* aus Datenblätter der Hersteller stammen. Die Angaben vom *Scania S* und *Iveco Stralis XP* sind aus Fachzeitschriften entnommen, da keine Herstellerdaten in öffentlich zugänglichen Quellen existieren. Aus den Daten aus Tabelle 2-1 fällt auf, dass vor allem bei Angaben der Hersteller einheitliche Stufenabstände angegeben sind. Beim Vergleich der Herstellerangaben mit Daten aus Fachzeitschriften ergeben sich am selben Fahrerhaus unterschiedliche Messwerte in Bezug auf die Stufenabstände (vgl. DAF, 2017; Kern, 2018; Renault Trucks, 2016; Volvo Trucks, 2018).

Wie zuvor schon erwähnt sind alle Zugangsöffnungen der europäischen Hersteller vor der Vorderachse angeordnet. Die Türöffnung erstreckt sich von der A-Säule oberhalb der Trittstufen und des Vorderrads bis zur B-Säule. Da das Vorderrad in den Türausschnitt hineinragt, sind die Stufen linksseitig, außermittig zur Türmitte angeordnet – im Gegensatz zu den Haltegriffen, die an der A- und B-Säule montiert sind. *Renault* war der einzige Hersteller, der mit seinem Fahrzeug *Magnum* einen Kabinenzugang hinter der Vorderachse verkaufte. Diese Bauweise wurde beim neuen Fahrzeugmodell, der *T-Baureihe*, nicht mehr berücksichtigt und *Renault* ist zu dem Zugang vor der Vorderachse zurückgekehrt.

Frontlenkerbauart versus Haubenfahrzeug

Woher kommt diese große Ähnlichkeit der Positionierung des Kabinenzugangs? In Europa ist die Gesamtlänge des Zuges auf 18,75 m reglementiert (Appel, et al., 2013). Dabei darf der Anhänger maximal 16,40 m lang sein. In N-Amerika ist dagegen nur die Anhängerlänge gesetzlich beschränkt (Hjelm & Bergqvist, 2009). Dadurch ergibt sich ein größerer Gestaltungsspielraum für die Fahrerkabine. Die direkte Auswirkung dieser unterschiedlichen Längenbemaßung wird in der Gestaltung der Fahrerhäuser deutlich: während in Amerika die Haubenfahrzeuge weit verbreitet sind, setzen europäische Hersteller auf sogenannte Frontlenkerfahrzeuge. In Abbildung 2-1 sind die Fahrzeugtypen mit den Bemaßungsvorschriften schematisch dargestellt.

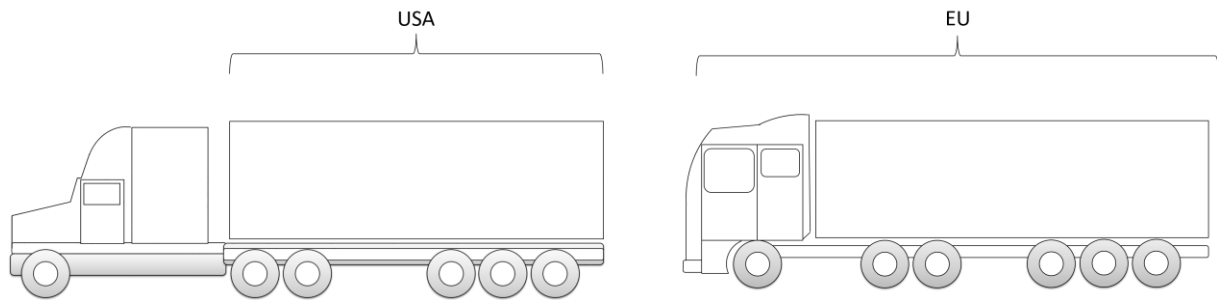


Abbildung 2-1: Längenbeschränkung im Nutzfahrzeugbereich für die USA und Europa mit den daraus abgeleiteten Fahrerhauskabinen (Haubenfahrzeug links und Frontlenkerfahrzeug rechts) nach Hjelm & Bergqvist, 2009, S. 470

Die kubische Bauweise der Frontlenkerfahrzeuge erzeugt auf minimalem Raum ein maximales Platzangebot für den Fahrer (Appel, et al., 2013; Hjelm & Bergqvist, 2009). Die Kompaktheit der Fahrerhäuser, auch CoE⁷ Lkw genannt, resultiert in einem kleinen Wendekreis und einer guten Straßenübersicht (Appel, et al., 2013; Hilgers, 2016). Allerdings führt die CoE-Kabine zu einer erhöhten Lärmbelastigung für den Fahrer durch den in kurzer räumlicher Distanz angeordnete Motor und erschwert die Erreichbarkeit des Motors für Wartung und Servicearbeiten (Appel et al., 2013). Bei Haubenfahrzeugen sitzt der Fahrer hinter dem Motor. Die Reihenanzordnung resultiert durch den langen Radstand, in einem ruhigen und stabilen Geradeauslauf. (Appel et al., 2013) Da Haubenfahrzeuge aufgrund ihrer Länge, nicht die gesamte Fahrzeugbreite ausreizen, kann ein treppenartiger Einstieg realisiert werden (Hjelm & Bergqvist, 2009). Vorteilhaft daran ist die Einsehbarkeit der nächsten Stufe beim Ein- oder Aussteigen. Zudem ist das Fahrerhaus durch die vorgelagerte Haube aerodynamischer als eine Frontlenkerkabine und verbraucht dadurch weniger Kraftstoff (Hilgers, Fahrerhaus, 2016). Dies ist vor allem in Zeiten der Ressourcenknappheit von Kraftstoffen ein Vorteil. Aufgrund der europäischen Gesetzgebung bezüglich der Längenbemessung und der Bestrebung der Spediteure ein maximales Ladevolumen zu erreichen, hat sich die kompakte Frontlenkerbauweise bei europäischen Lkw durchgesetzt und mit dieser Entscheidung die Grundform des Kabinenzugangs.

Gestaltungsrichtlinien der Berufsgenossenschaft

Nicht nur der Gesetzgeber nimmt Einfluss auf die Gestaltung der Zugangsgeometrie, auch die Berufsgenossenschaft legt Richtlinien fest, die die Nutzfahrzeughersteller für einen sicheren Gebrauch erfüllen müssen. Für die Zugangsgeometrie ist die BG-Vorschrift D29 zur Unfallverhütung bei Fahrzeugen relevant. Diese Gestaltungsrichtlinien sichern eine gefahrenlose Benutzung von Fahrzeugen in ihrem gesamtheitlichen Einsatzzweck vom Be- und Entladen über den Transport und die Ladungssicherung bis zum Betreten und Verlassen des Fahrzeugs. Der Abstand zwischen den Stufen darf, abgesehen von Sonderfahrzeugen, maximal 400 mm betragen. Dabei wird ein gleichmäßiger Stufenabstand empfohlen mit einer maximalen Abweichung von 10 %. Der Abstand der untersten Stufe vom Boden darf im unbeladenen Zustand maximal 500 mm sein. Für Sonderfahrzeuge, wie Feuerwehr- oder Baustellenfahrzeuge, darf der Abstand vom Boden zur untersten Stufe maximal 650 mm betragen. Stufen müssen eine Auftrittstiefe von mindestens 80 mm aufweisen. Die Fußraumtiefe, der Abstand von der Vorderkante der Stufe bis zum festen Bauteil, muss mindestens 150 mm sein. Dasselbe Mindestmaß gilt für die Fußraumhöhe, wobei die BGV-D29 ein Maß von 190 mm empfiehlt. Die Stufen müssen eine Auftrittsbreite von mindestens 300 mm aufweisen, empfohlen werden 400 mm.

In Bezug auf die Trittsicherheit müssen außenliegende Trittstufen Roste, Lochbleche oder Streckbleche aufweisen, innenliegende Trittstufen, die nicht bewittert oder während der Fahrt

⁷Cabin-over-Engine (engl.) für Kabine oberhalb des Motors

eingeschmutzt werden können, müssen Profilierungen, Riffelbleche oder geeignete Überzüge für einen sicheren Stand aufweisen. Für Griffe schreibt die BGV-D29 einen Durchmesser zwischen 16 – 38 mm vor. Empfohlen werden 25 mm Griffdurchmesser. Die Griffhöhe muss mindestens 150 mm mit einem Mindestabstand von 50 mm zu umgebenden Bauteilen sein. Die Unterkante des Haltegriffs darf maximal 1650 mm vom Fahrbahnboden entfernt sein und mindestens 500 mm oberhalb der obersten Stufe beziehungsweise des Fahrerhausbodens enden. Empfohlen wird eine Mindestlänge von 900 mm oberhalb des Fahrerhausbodens. (BGV-D29). Nach der BGV-D29 sind „Aufstiege, bestehend aus Stufen bzw. Sprossen und Haltestangen bzw. Haltegriffen, [...] dann zweckmäßig ausgebildet, wenn sich eine Person jeweils gleichzeitig an drei Punkten abstützen kann (mit 2 Händen und einem Fuß oder mit 2 Füßen und einer Hand)“ (BGV-D29). Diese Vorgabe kann nur bei einer rückwärtsgerichteten Ausstiegsbewegung realisiert werden, bei der der Fahrer mit dem Gesicht zum Lkw ausgerichtet ist. Mit drei gleichzeitigen Haltepunkten wird verhindert, dass der Fahrer seine Balance verliert und somit das Risiko für Stürze vermindert (Fathallah & Cotnam, 2000; Patenaude et al., 2001; Shorti, 2016). Patenaude et al. (2001) finden heraus, dass die Fahrer bei der zum Fahrzeug gerichteten Ein-/Ausstiegstechnik dazu tendieren alle oder fast alle Trittstufen zu nutzen. Ein Faktor, der das Risiko von Verletzungen beim Betreten und Verlassen, reduziert. Zudem bekommen die Fahrer das rückwärtige Ein- und Aussteigen in der Fahrschule vermittelt (Borgdorf, 2015).

Maßketten und Zielkonflikte bei der Bauraumvergabe

Im Folgenden werden die indirekten Einflussfaktoren, resultierend aus den umgebenden Bauteilen und den gesetzlichen Vorgaben, auf die Gestaltung der Zugangsgeometrie beleuchtet. Hierzu werden zwei Experten für die Zugangsgeometrie – einmal aus der Fahrerhausentwicklung und einmal aus dem Gesamtfahrzeugbereich – befragt (Rohrmüller, 2018; Schmid-Marchfelder, 2018). Aufgrund der Komplexität eines Fahrzeugaufbaues kann nicht dem Anspruch gerecht werden, eine vollständige und umfassende Darstellung der Einflussfaktoren und ihrer Auswirkungen auf die Gestaltung aufzuzeigen. Je detaillierter die Zielkonflikte betrachtet werden, desto weiter fasst sich der Bogen der beeinflussenden Bauteile. Daher werden die unmittelbaren Einflussfaktoren auf die Gestaltung der Zugangsgeometrie aufgeführt. Auf die Zwangsbedingungen, die auf diese Bauteile herrschen, wird nicht weiter eingegangen.

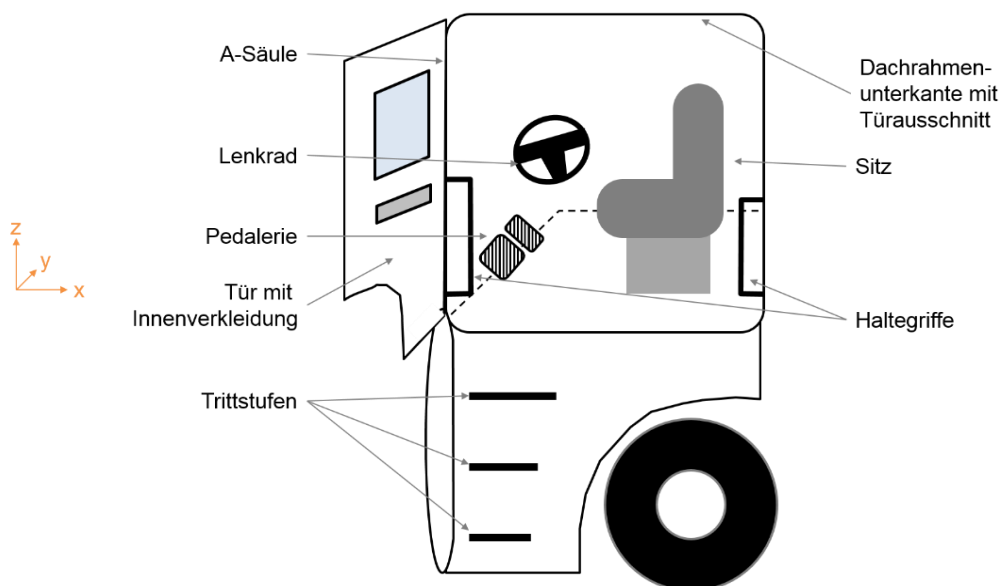


Abbildung 2-2: Skizze der Zugangsgeometrie bei Nutzfahrzeugen in der Seitenansicht (eigene Darstellung)

Die Zugangsgeometrie eines Nutzfahrzeugs kann in Hilfsgeometrie und Störgeometrie eingeteilt werden. Als Hilfsgeometrie zählen die Trittstufen, die am Einstiegskotflügel befestigt sind, und die Haltegriffe, die direkt die Ein- und Ausstiegsbewegung unterstützen. Elemente mit einer lokalen Nähe zur Zugangsgeometrie, die die Bewegung oder den Bewegungsweg des Fahrers einschränken, werden als Störgeometrien bezeichnet. Hierzu zählen der Sitz, das Lenkrad und die Pedalerie, als Elemente des Fahrerarbeitsplatzes und damit der Ziel- bzw. Ausgangsposition für den Ein- und Ausstieg, sowie das Vorderrad, das durch seine Position den Zugang wesentlich begrenzt. Die Innenverkleidung der Fahrertüre mit Ablagefach und Getränkehalter begrenzt den Bewegungsfreiraum des Fahrers in Fahrzeuginnenrichtung des Fahrzeugs. Die Türöffnung mit der Dachrahmenunterkante, der Position der A-Säule und des Türausschnitts, bestimmen die Abmessungen des Durchstiegs vom Aufstieg in das Fahrerhaus hinein bzw. andersherum. (Rohrmüller, 2018)

Die beiden Haupteinflussbereiche auf die Gestaltung der Zugangsgeometrie sind zum einen die gesetzlichen Vorgaben auf nationaler und internationaler Ebene und der Berufsgenossenschaft und zum anderen das Hersteller-Portfolio. Aufgrund der Verwendung von Baukastensystemen und Carry-over-Parts⁸ werden einzelne Bauteile bei verschiedenen Fahrzeugkonfigurationen eingesetzt. Dadurch werden dieselben Bauteile für unterschiedliche Einstieghöhen verbaut und müssen für alle eingesetzten Fahrzeugvarianten adaptierbar sein. Ein Beispiel ist die Einstiegs-Kotflügelvariante, die Trittstufen für verschiedene Einstieghöhen und diese entsprechend der Vorgabe aus der BGV-D29 in möglichst gleichmäßigen Abstand anordnet. Dafür sind mehrere Anschraubpunkte für die Trittstufen am Einstiegskotflügel vorgesehen. Es ergeben sich unweigerlich ungleichmäßige Stufenabstände. Die folgenden Abschnitte gehen auf die entsprechenden Maßketten für die Zugangsgeometrie ein. (Rohrmüller, 2018; Schmid-Marchfelder, 2018)

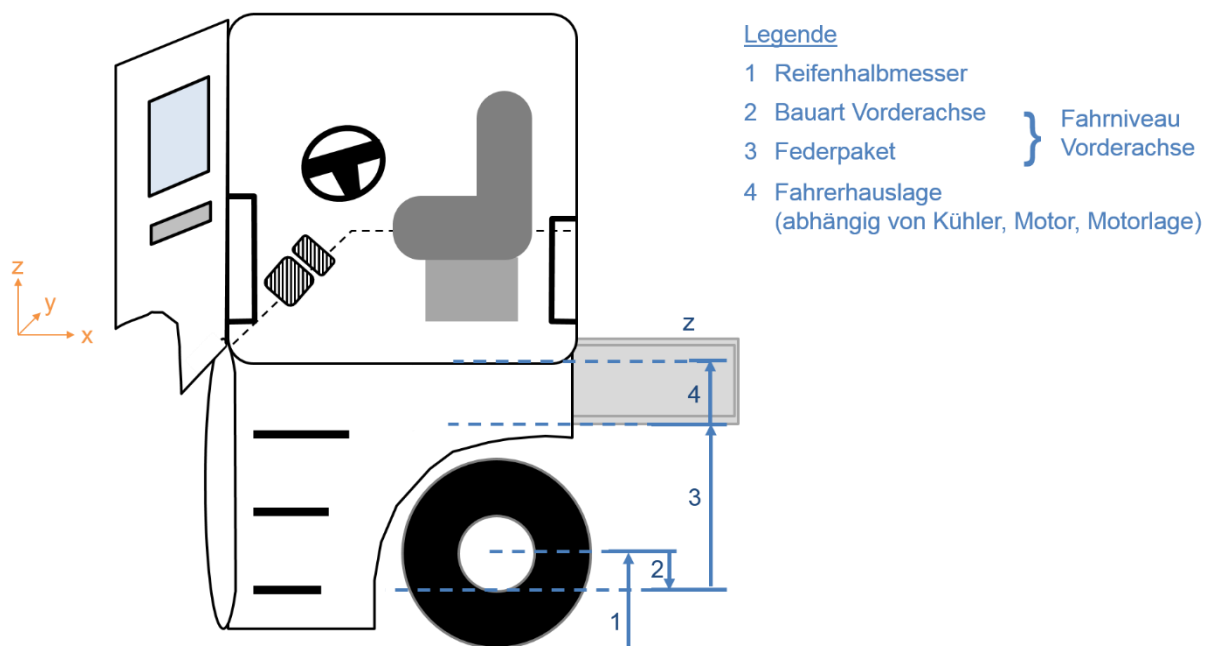


Abbildung 2-3: Maßkette der Einstiegsgeometrie in Fahrzeughochrichtung in blau nach Rohrmüller (2018)

Die Maßkette entlang der Fahrzeughochachse (z-Richtung) stellt sich wie folgt dar: Ausgehend vom Fahrbahnboden bauen der Reifenhalmhöhe, das Fahrniveau der Vorderachse und die Fahrerhauslage in vertikaler Richtung auf. Das Fahrniveau der Vorderachse setzt sich aus der

⁸ Übernahme-Bauteile von Konzernpartnern oder auslaufenden Baureihen, bei denen die Kosten einer Neuentwicklung entfallen.

Bauart der Vorderachse und dem Federpaket zusammen und gibt das Maß von Mitte des Vorderrads bis zur Rahmenunterkante vor. Von der Rahmenunterkante bis zum Fahrerhausboden wird der Abstand durch die Wahl der Fahrerhauslage bestimmt, die sich wiederum aus der Kühlergröße, der Motorgröße und der Motorlage ergibt. Die Vielzahl an Wahlmöglichkeiten ermöglicht den Käufern umfangreiche Kombinationsmöglichkeiten und daraus resultierende Einstieghöhen. Die Variantenvielfalt erschwert die Verwendung von Übernahmebauteilen und erhöht die Komplexität in der Auslegung der Zugangsgeometrie. (Rohrmüller, 2018)

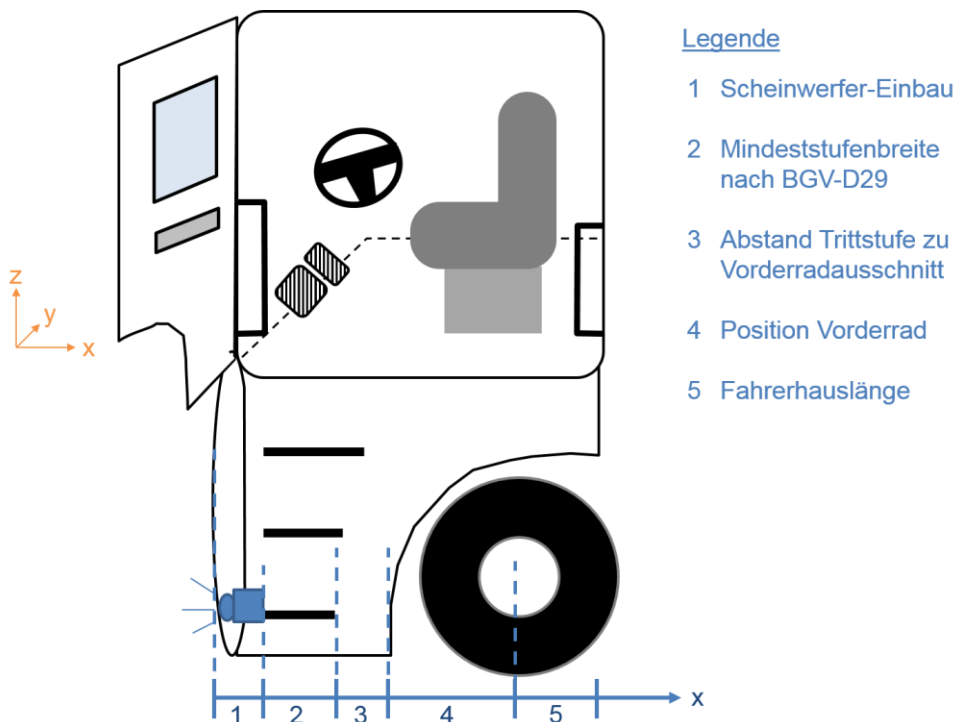


Abbildung 2-4: Maßkette der Einstiegsgeometrie in Fahrzeuginnenrichtung in blau (eigene Darstellung)

In Abbildung 2-4 wird die Maßkette, die sich auf die Anordnung der Zugangsgeometrie in Fahrzeuginnenrichtung (x-Richtung) auswirkt, abgebildet. Die Gesamtlänge, die für das Fahrerhaus zur Verfügung steht, berechnet sich für einen Gliederzug ausgehend von der Gesamtlänge des Zuges von 18,75 m abzüglich der Systemlänge (Ladelänge des Lkw und Ladelänge des Anhängers und Abstand Lkw zu Anhänger) von 16,40 m (Borgdorf, 2015) und eines herstellerindividuellen Freiraums zwischen Fahrerhaus und Beginn des Aufbaus. Aus dieser Rechnung ergibt sich die Fahrerhauslänge, auf der der Scheinwerfer-Einbau (Segment 1), die Stufenbreiten (Segment 2), der Kotflügel (Segment 3) und die Position der Vorderachse (Segment 4) unterkommen. Zudem beeinflusst die Aerodynamik und damit die Fahrerhausform den bereitstehenden Bauraum. Die Position der Vorderachse ist ein Kompromiss zwischen hohen Achslasten, erzeugt durch die Einzellasten des leeren Fahrzeugs (Motor, Achsen, Rahmen und Fahrerhaus) und der Nutzlast des Fahrzeugs. Je weiter die Position der Vorderachse zur Fahrzeugfront rückt, desto geringer wird die Vorderachslast, doch desto größer wird der Wendekreis. Entsprechend der Position der Vorderachse (Segment 4) bildet sich der Radausschnitt beziehungsweise Kotflügel (Segment 3) aus. Die Trittbretter müssen eine Mindestbreite von 300 mm nach BGV-D29 aufweisen (Segment 2) und positionieren sich in Fahrzeuginnenrichtung an dem Radausschnitt. Somit sind die Trittbretter entlang der positiven y-Achse von der Position der Vorderachse abhängig, entlang der negativen y-Achse begrenzt die Fahrerhausform und -länge, so wie der Bauraum des Scheinwerfers, Nebelscheinwerfers und Blinkers die Position der Trittbretter. Dies sind die Zielkonflikte, in Rahmen derer die Trittbretter in Fahrzeuginnenrichtung positioniert werden müssen. (Rohrmüller, 2018)

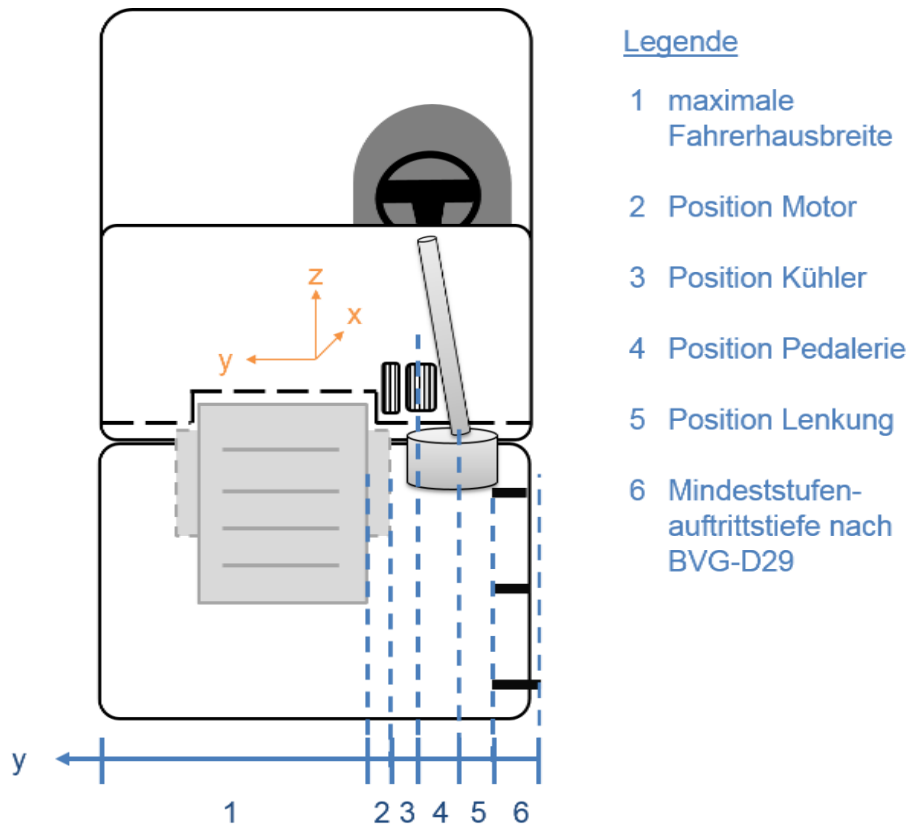


Abbildung 2-5: Maßkette der Einstiegsgeometrie in Fahrzeugquerrichtung in blau (eigene Darstellung)

Die Maßkette für die Fahrzeugquerrichtung (y -Richtung) ist in Abbildung 2-5 bei einem schematischen Fahrzeug in Frontansicht dargestellt. Die maximale Fahrzeugbreite (Position 1-6 in Abbildung 2-5) ist in der EU, der Schweiz und Norwegen gesetzlich auf 2,55 m begrenzt (Borgdorf, 2015). In den anderen Ländern ist die Fahrzeugbreite auf 2,50 m begrenzt. Diese Breite teilen sich die Stufentiefe (Segment 6), die Position der Lenksäule (Segment 5), die Position der Pedalerie (Segment 4), die Wahl des Motors (Segment 3) und damit verbunden der Kühlerbreite (Segment 2). Die Stufentiefe ist von der BGV-D29 auf mindestens 80 mm festgelegt. Der Freiraum um die Pedalerie, festgelegt in der Richtlinie ECE R-35, regelt den Mindestfreiraum um die einzelnen Pedale herum und stellt sicher, dass der Fahrer auch mit Sicherheitsschuhen nicht mehrere Pedale zur gleichen Zeit betätigt. Der Freiraum um die Pedalerie wirkt sich auf die Position der Lenksäule und des Motors aus. Hinzu kommen weitere Elemente, wie der Wassertank, die ebenfalls unterhalb des Fahrerhauses angeordnet sind. Die Summe aller Komponenten unterhalb des Fahrerhauses begrenzt den Bauraum der Stufen in Fahrzeugquerrichtung und damit den Stufenauszug. Die Situation in Fahrzeugquerrichtung ist, wie bei den anderen zwei Fahrzeugrichtungen, stark vereinfacht dargestellt und wird der komplexen Lage nur in Ansätzen gerecht, dennoch gibt sie einen Überblick über die auftretenden Zielkonflikte bei der Auslegung der Zugangsgeometrie. (Rohrmüller, 2018)

2.3 Zusammenfassung: Arbeitssituation und Arbeitsmittel

Das Grundlagenkapitel zeigt die schwierige Arbeitssituation der Lkw-Fahrer auf, die unter enormen zeitlichen und psychischen Druck stehen, ihre Waren pünktlich, sicher und im Rahmen der gesetzlichen Vorgaben abzuliefern. Dabei sind die Fahrer weitestgehend von ihrem sozialen Umfeld isoliert und verrichten körperlich anstrengende Aufgaben. Um Zeit einzusparen, kommt es zu Fehlnutzungen der Zugangsgeometrie. Fahrer springen aus dem Fahrzeug heraus oder nutzen die vorgesehenen Haltegriffe nicht (Fathallah & Cotnam, 2000).

In Bezug auf die Fahrzeuggeometrie ergeben sich geringe Gestaltungsspielräume für Veränderungen. Bauraumkonflikte beschränken neue Lösungsansätze und führen zu geringen Unterschieden in der Zugangsgeometrie zwischen den Herstellern. Nur grundlegende Änderungen des Status Quo bieten Potential für Neuerungen an der Fahrerkabine und dem Fahrerhauszugang. Die Diskussion zur Längenänderung der Fahrerkabine in der EU-Richtlinie 2015/719 löst einen fundamentalen Neubeginn in der Gestaltung des Fahrerhauses aus und gibt den Anstoß, die Zugangsgeometrie grundlegend zu analysieren und Verbesserungen abzuleiten.

3 Stand der Forschung

Das folgende Kapitel präsentiert den aktuellen Stand der Forschung in Bezug auf den menschlichen Bewegungsablauf mit der Definition und Vorstellung von Bewegungsstrategien beim Ein- und Aussteigen bei Fahrzeugen, Möglichkeiten zur Bewegungsaufzeichnung und Bewertungsansätze für Bewegungen. Zudem wird in diesem Kapitel auf die menschliche Informationsverarbeitung im Sinne einer intuitiven Mensch-Maschine-Schnittstelle eingegangen. Am Ende jedes Abschnitts folgt eine kurze Zusammenfassung der Inhalte.

3.1 Menschlicher Bewegungsablauf

3.1.1 Das Innere Modell als Handlungsanleitung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit Bewegungsstrategien beim Lkw-Ein- und Ausstieg. Daher definiert dieser Abschnitt den Begriff *Bewegungsstrategie* und benennt zugehörige Merkmale und Einflussfaktoren. Der Duden beschreibt den Begriff der Strategie als „genauen Plan des Vorgehens, der dazu dient, ein militärisches, politisches, psychologisches, wirtschaftliches o.ä. Ziel zu erreichen, und in dem man diejenigen Faktoren, die in die eigene Aktion hineinspielen könnten, von vornherein einzukalkulieren versucht“ (Bibliographisches Institut GmbH, 2018). Diese Definition setzt Planung und Vorbereitung voraus. Cherednichenko (2007) teilt diese Vorbereitungszeit in drei Ebenen ein: die *Planungsebene* entwickelt einen Gesamtplan zur Erreichung des Hauptziels, die anschließende *Führungsebene* detailliert den Gesamtplan in Teilziele auf dem Weg zum Hauptziel, die dritte und letzte Ebene einer Bewegung bildet die *Stabilisierungsebene*, in der die Bewegung ausgeführt wird. (Cherednichenko, 2007).

Menschliche Bewegungssteuerung

Die drei Ebenen der Planung, Führung und Stabilisierung nach Cherednichenko (2007) legen den makroskopischen Bewegungsrahmen von der Vorbereitung bis zur Ausführung fest. Auf mikroskopischer Ebene der Bewegungsstabilisation tritt das biomechanische Problem der Überbestimmtheit auf. Sie ergibt sich daraus, dass der menschliche Körper über mehr Muskeln verfügt als zur Steuerung der vorhandenen Gelenkfreiheitsgrad notwendig sind (Damsgaard, Rasmussen, Christensen, Surma, & de Zee, 2006). Entwickler digitaler Menschmodelle lösen das Überbestimmtheitsproblem in Form von Optimierungsalgorithmen (Prochel, 2009), im menschlichen Körper wird dies über das zentrale Nervensystem gesteuert (Damsgaard et al., 2006). Es zeigt sich, dass über das zentrale Nervensystem gesteuerte Bewegungen, trotz des Überbestimmtheitsproblem, beim wiederholten Durchführen einer bestimmten Aufgabe Ähnlichkeiten in der Ausführung auftreten (Authier, Gagnon, & Lortie, 1995; Rasmussen, Damsgaard, & Voigt, 2001). Cherednichenko (2007) und Bubb et al. (2015) führen dies auf ein *Inneres Modell* des Nutzers zurück, das das zentrale Nervensystem mit dem ersten Eindruck bildet und mit jeder Wiederholung der Bewegung festigt.

Die menschliche Bewegungssteuerung nach einem *Inneren Modell* über das zentrale Nervensystem erfolgt nicht willkürlich, sondern als eine „Ausführung [...] in einzigartigen Bewegungsmuster mit intraindividuelle Variabilität“ (Cherednichenko, 2007). Dabei gibt es ein Hauptziel, das mit der Bewegung erreicht werden soll. Im Fall des Lkw-Einstiegs ist das Hauptziel das Erreichen des Fahrersitzes im Inneren des Fahrzeugs, ausgehend von einer stehenden Position außerhalb vom Fahrzeug. Für den Ausstieg kehren sich Hauptziel und Ausgangsposition um. Das jeweilige Hauptziel wird in mehrere zeitlich vorausgehende Teilziele unterteilt

(Cherednichenko, 2007). Diese Teilziele werden als einzelne Bewegungsphasen bezeichnet, die sequentiell ablaufen, bis das Hauptziel erreicht ist (Cherednichenko, 2007; Rigel, 2005). Die Einteilung logisch aufeinander aufbauender Teilziele zur Erreichung des Hauptziels muss rückwärts, also vom Hauptziel ausgehend, geplant werden (Cherednichenko, 2007). Folglich bewegen sich Menschen strategisch nach einem *Inneren Modell*, das vom Hauptziel ausgehend geplant und in mehrere Teilziele untergliedert wird.

Bockholt et al. (2017) teilen Bewegungsstrategien in Hauptstrategien – am meisten verwendet – und Nebenstrategien – weitere vorkommende Strategien – ein. Zusätzlich werden Substrategien unterteilt – zeitlich begrenzte Abweichungen einzelner Bewegungsschritte innerhalb einer Haupt- oder Nebenstrategie (Bockholt, et al., 2017; Rigel, 2005). Die Einteilung der Haupt- und Nebenstrategien erfolgt über die Beschreibung von *Bewegungsphasen*, die jeweils ein Teilziel zur Erreichung des Hauptziels definieren. Jede *Bewegungsphase* besitzt einen eindeutigen Start- und Endpunkt. Der Endpunkt der vorhergehenden Phase ist der Startpunkt der nachfolgenden Phase. Dies gewährleistet, dass sich die *Bewegungsphasen* nicht überlappen (Cherednichenko, 2007; Rigel, 2005). Der Start- und Endpunkt beziehungsweise die Handlung innerhalb einer Bewegungsphase wird anhand eines *führenden Körperteils* festgemacht, das die Haupthandlung während den Phasen beschreibt. Zudem werden die relativen Positionen und Zustände der passiven Körperteile betrachtet. (Authier, Gagnon, & Lortie, 1995; Chateauroux, Wang, & Roybin, 2012; Cherednichenko, 2007; Rigel, 2005; Wagner, Reed, & Chaffin, 2005)

Das Bewegungsmodell des *führenden Körperteils* beruht auf der Forschung von Arlt (1998) und sagt aus, dass der Endeffektor einer Gliedkette die Bewegung führt. Die Gliedkette zwischen Endeffektor und Ansatzpunkt unterstützt die Bewegung, ohne dass die Bewegung der Zwischenglieder gesteuert werden muss. Damit kann die Bewegung eines Körpers durch das bewegungsbestimmende Körperteil beschrieben werden (Cherednichenko, 2007; Rigel, 2005). Nach Rigel (2005) kann ein *führendes Körperteil* drei Zustände annehmen: aktiv, passiv und inaktiv. Ein passives, *führendes Körperteil* hält einen Mindestabstand zu der Umgebungsgeometrie ein. Ein aktives, *führendes Körperteil* ist gleichzeitig noch ein Bewegungstreiber. Ein inaktives, *führendes Körperteil* wird nicht bewegt. (Rigel, 2005)

Neben der modellhaften Vorstellung des *führenden Körperteils* verwendet Rigel (2005) *Schutzabstände* nach Arlt (1998) zur Simulation einer Bewegung. Jedes Körperteil hält während der Bewegungsausführung einen Mindestabstand zur umgebenden Geometrie ein (Arlt, 1998). Dieser Mindestabstand beruht auf Erfahrungswerten der ausführenden Person, um Stoßen mit oder Verletzungen durch die Umgebungsgeometrie vorzubeugen (Arlt, 1998). Der Abstand zwischen Körperteil und umgebender Geometrie ist abhängig von der Beschaffenheit der Umgebung, der Körperhaltung und der Bewegungsgeschwindigkeit (Arlt, 1998). Beispielsweise halten wir zu einem hart und spitz erscheinendem Dachholm beim Einstieg in einen Pkw erfahrungsgemäß mehr Abstand als zu einem abgerundeten, gepolsterten Dachholm. Wir gehen davon aus, dass eine Berührung mit dem spitzen, harten Dachholm schmerzhaft für uns endet, gegensatz zu einem gepolsterten Dachholm, der bei einer Berührung eventuell sogar nachgibt.

Einflussfaktoren auf die Wahl einer Bewegungsstrategie

Nach der Einteilung einer Bewegung in *Bewegungsphasen* und der Beschreibung der modellhaften Vorstellung von *Schutzabständen* und dem *führenden Körperteil*, geht der folgende Abschnitt auf Einflussgrößen bei Bewegungsstrategien ein. Der Fahrzeugeinstieg ist eine komplexe Ganzkörperbewegung (Chateauroux et al., 2012; Cherednichenko, 2007). Diese Komplexität des Bewegungsablaufs, die Fahrzeuggeometrie und die Anthropometrie bilden drei Kategorien, in die sich die Einflussfaktoren der Einstiegsbewegung untergliedern lassen (Bockholt et al., 2017; Bubb et al., 2015).

Bezüglich der Anthropometrie haben Körperhöhe, Stammlänge und Korpulenz einen Einfluss auf die Bewegungsstrategie (Chateauroux et al., 2012; Reed, Ebert, & Hoffman, 2010; Reed, Hoffman, & Ebert-Hamilton, 2011; Rigel, 2005). Die anthropometrischen Parameter beeinflussen die Einstiegsbewegung in direkter Weise hinsichtlich des Platz- und Raumbedarfs der Zugangsöffnung sowie Erreichbarkeit von Haltemöglichkeiten (Chateauroux et al., 2012). Individuelle Größen wie Alter, Beweglichkeit oder körperliche Einschränkungen wirken sich indirekt über notwendige Anpassungen oder Hilfsvorrichtungen zur Durchführung der Ein- und Ausstiegsbewegung aus (Brenner, 2013).

Auf Seite der fahrzeugabhängigen Faktoren weisen Studien den Türöffnungswinkel bei Lkw und Pkw (Chateauroux et al., 2012) und die Höhe der Dachrahmenunterkante im Pkw als Einflussfaktoren auf die Zugangsbewegung nach (Brenner, 2013). Zwischen der Anzahl der Einstiegsstufen eines Lkw und der Wahl einer Bewegungsstrategie wurde noch kein Zusammenhang festgestellt (Chateauroux et al., 2012; Reed et al., 2011). Dies könnte an der geringen Probandenanzahl liegen (Chateauroux et al., 2012) oder an der zu groben Unterteilung der Bewegungsstrategien (*facing-inward* / *facing-outward*) (Reed et al., 2011). Um den Einfluss der Anzahl der Trittstufen zu untersuchen, wird die Wahl des Startfußes als Prädiktor verwendet.

Systeme zur Bewegungserfassung

Zur Identifizierung von Bewegungsstrategien beim Ein- und Aussteigen finden sich in der Literatur sowohl qualitative als auch quantitative Vorgehen. Qualitativ werden Bewegungsstrategien anhand von Videodaten analysiert. Ein Beispiel führt Rigel (2005) zur Bestimmung von Ein- und Ausstiegsstrategien beim Pkw mittels Videodaten durch. Als quantitative Methode wird hauptsächlich das optische Bewegungserfassungssystem VICON verwendet (Ait El Menceur, Pudlo, Gorce, & Lepoutre, 2009; Chateauroux, Wang, & Tasbot, 2007; Chateauroux et al., 2012; Lu, Tada, Endo, & Mochimaru, 2016; Shorti, 2016; Wirsching, Stechow, & Enderlein, 2016). Ein neuauftauchendes Messsystem zur Erfassung von Bewegungen nutzt von Beetzen (2015) beim Lkw-Einstieg mit dem videobasierten System Microsoft Kinect. Die optische Bewegungserfassung, unabhängig ob infrarotbasiert wie bei Vicon oder videobasiert wie bei Microsoft Kinect, bedingt die Durchführung der Versuche an einem Mock-Up. Andernfalls kommt es zu Verdeckungen der Sensoren durch die Fahrzeuggeometrie und Lücken in der Bewegungsaufzeichnung (von Beetzen, 2015; Wirsching, Stechow, & Enderlein, 2016). Nur die qualitativ ausgewertete Studie von Rigel (2005) wird an einem Realfahrzeug durchgeführt.

Bewegungen können optisch, mechanisch, magnetisch, akustisch oder inertial erfasst werden (Kisch, 2017). Die Vor- und Nachteile der Aufnahmemöglichkeiten werden im Folgenden nach Kitagawa und Windsor (2008) dargestellt. Die optische Bewegungserfassung zählt zu den genauesten Methoden. Mehrere Kameras senden Lichtimpulse aus, die auf am Probanden befestigte Marker treffen. Die Marker reflektieren das Licht. Wird ein Marker über zwei Kameras erfasst, berechnet sich die Position des Markers im Raum über Triangulation. Dadurch wird eine hohe Messgenauigkeit mit einer hohen Erfassungsrate erzielt. Allerdings bedingt das optische Erfassungssystem eine umfangreiche Nacharbeit der Rohdaten aufgrund verdeckte Marker. Bei der Versuchsvorbereitung liegt ein Augenmerk auf den Lichtverhältnissen im Aufnahmebereich, da diese einen Einfluss auf störende Reflektionen haben. (Kitagawa & Windsor, 2008)

Bei der mechanischen Messung von Bewegungen sind Stäbe entlang der Körpersegmente angebracht, die wiederum mit Potentiometern verbunden sind. Die Potentiometer messen die Längen- und Winkeländerungen der Körpersegmente während einer Bewegung. Das Messsystem ist echtzeitfähig, gut zu transportieren und kostengünstiger als optische Systeme. Bei der mechanischen Messung tritt keine Okklusion auf und ein großer Messbereich wird abgedeckt. Allerdings kann anhand des mechanischen Messsystems keine globale Position bestimmt werden und die Abtastrate ist geringer als bei optischen Systemen. Zudem schränken die Stäbe entlang der Körpersegmente die Bewegungsfreiheit der Probanden ein. (Kitagawa & Windsor, 2008)

Magnetische Sensoren messen die Körperbewegung in Bezug zu einem externen Magnetfeld. Hierbei kann ein sogenannter Drift auftreten – eine Störung des magnetischen Sensors durch metallische Gegenstände oder magnetische oder elektrische Felder in der Umgebung – und damit eine Verfälschung der Messergebnisse. Die Abtastrate ist geringer als bei optischen Systemen und die Kabelverbindungen zur Aufnahme der Messsignale schränken die Versuchsperson in ihrer Bewegungsfreiheit ein. Vorteile der magnetischen Sensoren sind die Echtzeitfähigkeit, der Wegfall der Datennachbearbeitung und die geringeren Kosten im Vergleich zu anderen Systemen. Zudem können magnetische Systeme mehrere Objekte im Raum ohne Verdeckungen erfassen. (Kitagawa & Windsor, 2008)

Mit Ultraschall werden Bewegungen akustisch erfasst. Somit wird eine große Bewegungsfreiheit bei geringen Kosten gewährleistet. Allerdings sind die Daten fehleranfällig durch die Reflexionen des Ultraschalls an Wänden oder Gegenständen in der Umgebung. Des Weiteren ergibt sich eine inhärente Verzögerung der Datenaufzeichnung und es erfolgt keine Momentaufnahme aller Messpunkte zu einem bestimmten Zeitpunkt. (Kitagawa & Windsor, 2008)

Inertiale Messsysteme kombinieren verschiedene Sensoren, um die Nachteile der einzelnen Systeme auszugleichen. Inertialsensoren vereinen ein Magnetometer zur Ausrichtung und Stabilisierung der Position am Erdmagnetfeld, ein Gyroskop zur Ermittlung der Orientierung des Objekts im Raum und einen Beschleunigungssensor. Auch bei diesem System treten Sensordrifts aufgrund von umliegenden metallhaltigen Gegenständen oder elektrischen Feldern auf. (Kisch, 2017) Eine Übersicht der verschiedenen Messarten ist in Tabelle 3-1 dargestellt.

Tabelle 3-1: Übersicht über Vor- und Nachteile von Bewegungserfassungssystemen (Kisch, 2017)

	Vorteile	Nachteile
optisch	hohe Messgenauigkeit	umfangreiche Nachbearbeitung
	hohe Erfassungsrate	Berechnung der Rotationsdaten
	Erfassung mehrerer Objekte gleichzeitig möglich	Aufnahmebereich begrenzt durch Kameras
	Bewegungsfreiheit der Objekte innerhalb des Aufnahmebereich	Überprüfung der Lichtverhältnisse
	hohes Aufnahmenvolumen	hohe Kosten für Ausrüstung
	Erzeugung von Skelettdaten	Verdeckung der Marker
mechanisch	echtzeitfähig	keine globale Position
	geringere Kosten als optische Systeme	Einschränkung der Bewegungsfreiheit
	keine magnetische oder elektrische Störung	niedrigere Abtastrate als optische Systeme
	protabel	
	großer Messbereich	
	keine Okklusion	
magnetisch	keine Nachbearbeitung der Daten	Anfälligkeit der Sensoren für Störungen (magnetischer / elektrischer Art)
	echtzeitfähig	Bewegungseinschränkung
	Erfassung mehrere Objekte gleichzeitig	geringere Abtastrate im Vergleich zu optischen Systemen
	keine Okklusion	
	geringere Kosten als optische Systeme	

akustisch	große Bewegungsfreiheit	Verfälschung der Aufnahmen durch Reflexionen an Wänden oder Gegenständen
	keine Okklusion	inhärente Verzögerung
	geringere Kosten als optische Systeme	keine Momentaufnahme aller Punkte zu einem bestimmten Zeitpunkt
inertial	keine Okklusion	keine globale Position
	geringere Kosten als optische Systeme	Verzerrung der Messergebnisse durch Sensordrift
	echtzeitfähig	Anfälligkeit der Sensoren für Störungen (magnetischer / elektrischer Art)

Identifizierung von Bewegungsstrategien

Die Art der Bewegungsaufnahme wirkt sich auf das Ermitteln von Bewegungsstrategien aus. Stenlund, Lindbeck und Karlsson (2002) und Drury, Law und Pawenski (1982) filmen die Haltungen und Bewegungspositionen ihrer Probanden und leiten aus den Videodateien Halte- und Tragepositionen bzw. Arbeitstechniken ab. Stenlund et al. (2002) beobachten Greifpositionen und Arbeitstechniken von Malern bei der Überkopf-Arbeit. Drury et al. (1982) untersuchen Halte- und Tragepositionen von Kisten im industriellen Umfeld. Anhand der Videoaufnahmen unterteilen Drury et al. (1982) die Gesamtbewegung in Bewegungsphasen und notieren die Greifposition der Hände der Probanden während der Halte- und Trageaktion. Dazu wird die Greiffläche an der Kiste in neun Bereiche eingeteilt und der Bereich, in dem der Proband zum Tragen der Kiste greift, wird in ein vorgefertigtes Formular eingetragen (Drury et al., 1982).

Eine weitere Möglichkeit Bewegungsstrategien zu erfassen, ist die Auswertung kinematischer und physiologischer Kenndaten, wie Geschwindigkeitsverläufe von Gelenkwinkel (Chateauroux et al., 2012), EMG-Signale (Hase & Stein, 1999), Orientierung und Position der Füße (Shorti, 2016; Wagner, Reed, & Chaffin, 2005), Center of Pressure (CoP) (Hase & Stein, 1999) oder Center of Mass (CoM) Daten (Wagner, Reed, & Chaffin, 2005).

Anhand der Muskelaktivität und des CoP ziehen Hase und Stein (1999) Rückschlüsse auf die Bewegungsstrategien beim Geradeausgehen und bei Richtungsänderungen. Wagner et al. (2005) finden in ihrer Studie heraus, dass sich die laterale Bewegung des CoM und die Position und Orientierung des führenden Fußes als Vorhersage-Variablen für Fußpositionen bei Greif- und Tragetätigkeiten eignen, im Gegensatz zu der anterior/posterior Bewegung des CoM und der Position und Orientierung des nachziehenden Fußes.

Shorti (2016) und Chateauroux et al. (2012) bestimmen Bewegungsstrategien anhand von Motion Capture Daten aus optischen Bewegungserfassungssystemen. Über Fußtrajektorien und Kraftdaten (Shorti, 2016) beziehungsweise dem Geschwindigkeitsprofil und der Kontaktkräfte (Chateauroux et al. 2012) erfassen sie den Kontakt der Füße mit den einzelnen Trittstufen des Mock-Up-Aufbaus oder mit dem Boden und leiten daraus das Fuß- und Handverhalten ab. Chateauroux et al. (2012) definieren dabei einen Kontakt zwischen Endeffektor und Geometrie sobald das Geschwindigkeitsprofil des Endeffektors unter einen Schwellenwert von 10 % der Maximalgeschwindigkeit des Endeffektors fällt oder eine Kontaktkraft aufgezeichnet wird. Die Ergebnisse werden durch visuelle Inspektion validiert (Chateauroux et al., 2012).

Eine weitere Möglichkeit anhand von Motion Capture Daten Bewegungsstrategien zu untersuchen zeigen Park, Martin, Choe, Chaffin und Reed (2005) in ihrer Arbeit. Sie bauen auf die Untersuchungen von Zhang, Nussbaum und Chaffin (2000) auf. Diese entwickeln einen Index zur Quantifizierung des Bewegungsanteils der Beinsegmente im Verhältnis zum Oberkörper, um so zwischen den Bewegungsstrategien back-lift – aus dem Rücken heraus anheben – und leg-lift – aus den Beinen heraus anheben – zu differenzieren (Zhang, Nussbaum,

& Chaffin, 2000). Park et al. (2005) greifen diese Idee auf und entwickeln den *Joint Contribution Vector (JCV)*, um Bewegungsmuster systematisch zu unterscheiden.

Der JCV quantifiziert den Anteil eines individuellen Gelenkfreiheitsgrads am Erreichen des globalen Ziels der Bewegung. Mit Hilfe des JCV wird bestimmt, welcher Gelenkfreiheitsgrad eine essentielle Rolle für die Bewegungsausführung spielt und Bewegungstechniken werden abgeleitet. Der Vorteil des JCV Index ist, dass dieser nicht an eine Aufgabe gebunden ist und Bewegungsmuster direkt anhand von Motion Capture Daten identifiziert werden können. Allerdings ergeben sich drei Einschränkungen bei der Verwendung des JCV Index: aufgrund der separaten Normalisierung der Bewegungsrichtungen kommt es zu einer Überrepräsentation von kleinen Bewegungskomponenten: bei Bewegungsausführungen mit einer Hand, werden Bewegungen der unbeteiligten Hand ignoriert. Die dritte Einschränkung bezieht sich auf die Anwendbarkeit: zyklische Bewegungen, wie Treppen steigen, oder Bewegungssequenzen mit Nulldurchgang können nicht anhand des JCV Index beschrieben werden. (Park et al., 2005)

3.1.2 Bewegungsstrategien im Fahrzeugbereich

Nach den theoretischen Grundlagen zu Bewegungsstrategien stellt folgender Abschnitt Strategien aus dem Fahrzeugbereich vor. Zuerst werden Ein- und Ausstiegsstrategien am Pkw und anschließend am Lkw betrachtet. Im Pkw-Bereich werden die Ein- und Ausstiegsbewegung in unterschiedliche Strategien mit verschiedenen Detailtiefen unterteilt. Rigel (2005) beobachtet vier Einstiegsstrategien: den *Hürdenspringer*, den *Fädler*, den *Schlüpf*er und den *Plumpser*. Er unterteilt die Gesamtbewegung entsprechend dem *führenden Körperteil* in Bewegungsphasen und beschreibt die zeitliche Abfolge und Interaktionen der Extremitäten für jede Bewegungsphase. Analog zu den vier Einstiegsstrategien werden für den Fahrzeugausstieg die rückwärtige Bewegung als *Aus-Hürdenspringer*, *Aus-Fädler*, *Aus-Schlüpf*er und *Aus-Plumpser* definiert.

Andreoni und Knie (1997) grenzen fünf Strategien für den Einstieg und drei Strategien für den Ausstieg ab und benennt diese nach dem jeweils *führenden Körperteil*. Die fünf Einstiegsstrategien sind *one-foot forward motion*, *one-foot lateral sliding*, *one-foot backward motion*, *two-feet trunk forward* und *two-feet trunk backward* und die drei Ausstiegsstrategien *one-foot parallel to the vehicle*, *one-foot head forward* und *two-feet lying strategy*.

Chatearoux et al. (2007) und Reed und Huang (2008) definieren jeweils zwei Einstiegsstrategien. Die Ausstiegsbewegung ist bei beiden kein Gegenstand ihrer Betrachtungen. Chatearoux et al. (2007) beobachten die Bewegung *Right-leg-first* und *Buttock-first*, Reed und Huang (2008) unterteilen die Einstiegsbewegung in *Head-first* und *Hip-first*.

Ait El Menceur et al. (2009) wenden eine Weiterentwicklung der *Joint Contribution Vector (JCV)* Methode nach Park et al. (2005) an und erhalten aus ihrer Analyse zwei Einstiegsbewegungen. Bei der einen drehen sich die Probanden zuerst mit dem Rücken zum Fahrzeug und senken das Gesäß auf den Fahrersitz ab, bei der anderen stellen die Probanden zuerst den rechten Fuß in das Fahrzeug und steigen anschließend ein. Lu, Tada, Endo und Mochimaru (2016) untersuchen die Einstiegsbewegung auf die Rückbank eines Minivans mit Schiebetüren und stellen ihre Ergebnisse in einem Dendrogramm mit sieben unterschiedlichen Strategien dar. Unterteilungsmerkmal ist auch hier das *führende Körperteil* (Kopf oder Hüfte).

Bewegungsstrategien im Pkw-Bereich nach Rigel (2005)

Da im späteren Verlauf der Arbeit auf die Bewegungsstrategien von Rigel (2005) referenziert wird, werden diese im Folgenden detailliert vorgestellt. Die am häufigsten genutzte Einstiegsstrategie im Pkw-Bereich nach Rigel (2005) ist der *Schlüpf*er. Mit 97 % Anteil bei den Frauen und 77 % Anteil bei den Männern liegt die *Schlüpf*er-Strategie vor dem *Fädler* mit 3 % bei den

Frauen und 20 % bei den Männern. Bei den Männern werden zwei weitere Bewegungsabläufe beobachtet: der *Plumpser* (2 %) und der *Hürdenläufer* (1 %).

Beim *Schlüpfer* steigt der Fahrer zuerst mit dem rechten Fuß in das Fahrzeug und senkt im nächsten Schritt die Hüfte auf dem Fahrersitz ab. Anschließend wird der linke Fuß in das Fahrzeug hineingeholt und der rechte Fuß wird unter dem Lenkrad hindurch auf das Fahrpedal geführt. Die *Fädler*-Strategie unterscheidet sich zur *Schlüpfer*-Strategie im zeitlichen Ablauf. Ein *Fädler* startet die Einstiegsbewegung ebenfalls mit dem rechten Fuß. Doch wird dieser in einer Bewegung vom Fahrbahnboden aus unter dem Lenkrad hindurchgeführt und befindet sich auf der rechten Seite der Lenkradverkleidung bevor die Hüfte auf dem Fahrersitz abgesetzt wird. Abschließend wird der linke Fuß in das Fahrzeug geführt. Beim Einstiegsvorgang nach der *Plumps*-Strategie senkt der Fahrer – mit dem Rücken zum Fahrzeug – das Gesäß auf den Fahrersitz ab, dreht die Hüfte vom Türausschnitt zum Lenkrad und holt in dieser Drehbewegung die Beine in das Fahrzeug hinein. Bei der *Hürden*-Strategie steigt der Fahrer gleichzeitig mit dem Kopf und dem rechten Bein durch den Türausschnitt in das Fahrzeug hinein. Anschließend wird die Hüfte auf dem Sitz abgesenkt und das linke Bein nachgeholt.

Im Pkw-Bereich sind die Untersuchungen zum Betreten und Verlassen des Fahrzeugs vom Wunsch zur virtuellen Simulation und Bewertung der Bewegung in einem frühen Entwicklungsstadium getrieben (Chateauroux et al., 2007; Reed & Huang, 2008; Rigel, 2005). Daher liegt der Fokus hauptsächlich auf der Einstiegsbewegung. Im Nutzfahrzeugsbereich ist der Sicherheitsaspekt der Hauptgrund zur Analyse der Zugangsbewegung (Fathallah & Cotnam, 2000; Giguère & Marchand, 2005; Patenaude et al., 2001; Reed et al., 2011; Shorti, 2016). Da der Ausstieg einen Unfallschwerpunkt bei Berufskraftfahrern bildet, beschäftigen sich zwei Studien mit der Ausstiegsbewegung beim Verlassen von Nutzfahrzeugen (Chateauroux et al., 2012; Shorti, 2016). Zur Einstiegsbewegung in den Lkw existieren zum aktuellen Zeitpunkt keine veröffentlichte Studien.

Fußstrategien im Nutzfahrzeugsbereich

Bei den in Nord-Amerika weit verbreiteten Haubenfahrzeugen werden zwei Ausstiegsstrategien unterschieden: entweder steigen die Fahrer mit dem Rücken zum Fahrzeug (*facing outwards*) oder rückwärts mit Blick in den Fahrzeuginnenraum aus (*facing inward*) (Reed et al., 2011; Shorti, 2016). Dabei wird die nach innen gewandte Ausstiegsbewegung empfohlen, da die auftretenden Bodenreaktionskräfte geringer sind (Fathallah & Cotnam, 2000; Reed et al., 2011), die Nutzung aller Stufen wahrscheinlicher ist (Fathallah & Cotnam, 2000) und die Tendenz hinauszuspringen sinkt (Patenaude et al., 2001). Besonders das Hinaus-Springen aus dem Fahrzeug erhöht das Verletzungsrisiko (Patenaude et al., 2001). Nach der Unterteilung in die Körperorientierung beim Aussteigen beschreibt Shorti (2016) das Bewegungsmuster der Füße.

Shorti (2016) teilt die Bewegungsphasen anhand der Übergänge von einer Trittstufe zur nächsten ein und klassifiziert die Bewegungsstrategien über den *führenden Fuß* (Shorti, 2016). Daraus erhält Shorti (2016) acht mögliche Schrittkombinationen, die in Tabelle 3-2 dargestellt sind. Der Fahrer betritt eine Stufe entweder zuerst mit dem linken Fuß – LFF (engl. *left foot first*) – oder mit dem rechten Fuß – RFF (engl. *right foot first*). Entsprechend der Abfolge der Interaktionen ergibt sich ein *Step-by-Step* Verhalten, bei dem der Fahrer mit demselben Fuß wie zuvor den nächsten Schritt ausführt oder ein *Step-over-Step* Verhalten, bei dem der Anfangsfuß von Stufe zu Stufe alterniert. Zwischen den einheitlichen Schrittverhalten können alle Mischformen auftreten. Die Kombinationen sind in Tabelle 3-2 aufgeführt.

Tabelle 3-2: Fußverhalten beim Ausstieg aus einem Habenfahrzeug (Shorti, 2016, S. 38)

oberste Stufe	unterste Stufe	Fahrbahn	Fußverhalten
LFF (1)	LFF (1)	LFF (1)	111: Schritt-für-Schritt
LFF (1)	LFF (1)	RFF (0)	110: Schritt-für-Schritt-über-Schritt
LFF (1)	RFF (0)	LFF (1)	101: Schritt-über-Schritt
LFF (1)	RFF (0)	RFF (0)	100: Schritt-über-Schritt-für-Schritt
RFF (0)	RFF (0)	RFF (0)	000: Schritt-für-Schritt
RFF (0)	RFF (0)	LFF (1)	001: Schritt-für-Schritt-über-Schritt
RFF (0)	LFF (1)	RFF (0)	010: Schritt-über-Schritt
RFF (0)	LFF (1)	LFF (1)	011: Schritt-über-Schritt-für-Schritt

Beim Aussteigen aus einem Hauben-Lkw sind 47,6 % der Fahrer nach außen und 52,4 % nach innen gewandt. Die Mehrheit der Fahrer (59,5 %) nutzt ein *Step-over-Step* (101) Verhalten, beginnend mit dem linken Fuß. Die zweithäufigste Ausstiegsform (22,8 %) ist das *Schritt-über-Step-by-Step* Verhalten (100), ebenfalls beginnend mit dem linken Fuß. Alle Kombinationen aus Tabelle 3-2 treten auf, allerdings liegt der Anteil der anderen Kombinationen bei unter 10 %. Die Fahrer, die während des Aussteigens nach innen gewandt sind, nutzen zu 72,6 % das 101 Verhalten und zu circa 10 % das 110 Fußverhalten. Die nach außen gewandten Fahrer starten mehrheitlich (45,2 %) mit dem linken Fuß in einem *Step-over-Step* Verhalten (101), gefolgt von einem 100 Verhalten bei 43,2 % der Fahrer.

Bei den europäischen CoE-Lkw beobachten Chateauroux et al. (2012) ausschließlich das nach innen gewandte Ausstiegsverhalten. Die Probanden erheben sich aus ihrem Fahrersitz und stellen sich mit dem Rücken zum Schweller. Zwei Drittel der Teilnehmer stellen bei der Ausstiegsbewegung den linken Fuß auf die oberste Stufe, ein Drittel beginnen mit dem rechten Fuß.

Handstrategien im Nutzfahrzeugbereich

Shorti (2016) definiert das Handverhalten bei Haubenfahrzeugen anhand des ersten Kontakts zum Haltegriff während des Aufstehens aus dem Fahrersitz. Die Mehrheit der Teilnehmer (64,4 %) greift zuerst mit der linken Hand an die Haltestange der A-Säule. Immerhin 31,9 % der Fahrer nutzen zuerst die rechte Hand und 3,7 % von ihnen nutzen keine Hand zum Festhalten beim Aussteigen aus dem Mock-Up. Dabei hat weder die dominante Hand noch die Blickrichtung einen signifikanten Einfluss auf die Wahl der Greifhand. (Shorti, 2016)

Dagegen nutzen beim Aussteigen aus CoE-Lkw alle Teilnehmer die linke Hand, um sich am linken Haltegriff aus dem Fahrersitz herauszuziehen. Chateauroux et al. (2012) unterscheiden vier Handstrategien: das Verhalten 2H-S1, bei dem beide Hände parallel an den Stangen hinuntergleiten, während der Fahrer auf die oberste Stufe steigt, das Verhalten 2H-S1&S2, bei dem die Hände sich bei jedem Schritt mitbewegen, das Verhalten 2H-S2, bei dem die Hände beim Schritt auf die oberste Stufe greifen und sich beim Schritt auf die mittlere Stufe mitbewegen und das Verhalten LH-S1, bei dem sich nur die linke Hand beim Schritt auf die oberste Stufe bewegt. Diese vier Gruppierungen des Handverhaltens decken 87,5 % aller auftretenden Muster ab, alle weiteren sind individuelle Ausführungen (Chateauroux et al., 2012).

3.1.3 Bewertungsansätze für Bewegungen

Eine einfach zu erfassende Messgröße zur Bewertung von Bewegungen vermuten Chateauroux et al. (2012) und Sabbah (2010) in der Bewegungsdauer. Sabbah (2010) weist beim Pkw eine Korrelation zwischen der Einstiegsdauer und den subjektiven Diskomfortwerten nach. Mit einer Abnahme der mittleren Einstiegsdauer sinken die Diskomfortbewertungen ($R^2 = 0,78$ bei Frauen des 5. Perzentils und $R^2 = 0,89$ bei Männern des 95. Perzentils).

Auch Chateauroux et al. (2012) zeigen einen Einfluss der Lkw-Einstiegskonfiguration auf die Bewegungsdauer. Die Anzahl der Stufen hat einen signifikanten Einfluss auf die Bewegungsdauer (Chateauroux et al., 2012). Dies bedeutet, dass der Stufenabstand zwischen den einzelnen Trittbrettern eine untergeordnete Rolle in Bezug auf die Bewegungsdauer spielt. Es dauert signifikant länger eine bestimmte Höhe mit mehr Stufen in einem kleineren Abstand zu erklimmen als mit weniger Stufen in einem größeren Abstand (vgl. Konfiguration C02 und C04 aus Chateauroux et al., 2012).

Neben der Stufenanzahl beeinflusst auch der Türöffnungswinkel die mittlere Bewegungsdauer. Die mittlere Bewegungsdauer beim Türöffnungswinkel von 45° einer dreistufigen Konfiguration ($MT = 6,61$ s; $SD = 0,94$ s) ist ähnlich dem für einen vierstufigen Zugang ($MT_{classic} = 6,7$ s; $SD_{classic} = 0,65$ s; $MT_{leiterartig} = 6,49$ s; $SD_{leiterartig} = 0,79$ s) (Chateauroux et al., 2012). Allerdings ist die Bewegungsdauer probandenabhängig (Chateauroux et al., 2012). Bei den Fußstrategien zeigen sich keine signifikanten Unterschiede bei der Bewegungsdauer (Chateauroux et al., 2012). Ausgehend von diesen Beobachtungen vermuten Chateauroux et al. (2012), dass eine längere Bewegungsdauer ein Indikator für Diskomfort sein könnte.

Choi und Lee (2015) betrachten anstelle der Bewegungsdauer die Muskelkraft, um auf den Diskomfort während der Ein- und Ausstiegsbewegung bei Lkw zu schließen. Als Parameter zur Bewertung der Bewegung nutzen Choi und Lee (2015) das freiwillige, maximale Kontraktionsverhältnis (MVC⁹) der Muskeln. Dieses wird anhand des biomechanischen Menschmodells LifeMOD ermittelt und mit EMG-Messungen¹⁰ validiert. Die Korrelation zwischen dem MVC Ratio und der subjektiven Diskomfortbewertung ist hoch ($R > 0,84$, $R^2 > 71\%$, $p < 0,001$) (Choi & Lee, 2015). Allerdings bedingt dieses Vorgehen einen aufwendigen und kostenintensiven Versuchsaufbau mit kalibrierten Kraftmessplatten. Um eine Aussage treffen zu können, müssen die Messparameter mit einem biomechanischen Menschmodell analysiert werden.

Dufour und Wang (2005) nähern sich der Bewertung des Diskomforts über ihr Konzept der *Neutralen Bewegung* an. Damit erweitern Dufour und Wang (2005) die Idee der *Neutralen Haltung*. Über Stützhaltungen zwischen der Ausgangsposition und der Endhaltung definieren sie einen Bewegungskorridor für die Gelenkfreiheitsgrade, die an der Bewegung beteiligt sind. Liegt die Bewegung innerhalb des Korridors dieser *Neutralen Bewegung* ist der auftretende Diskomfort gering. Dabei wird der empfundene Diskomfort in den einzelnen Gelenken entsprechend den Untersuchungen von Kee und Karwowski (2003) gewichtet. Die Herausforderung liegt in der Bestimmung der Bewegungsgrenzen für die Gelenkwinkel. Dufour und Wang (2005) orientieren sich in ihrer Arbeit an den Bewegungsmessungen von Kapandji (1994).

Singh et al. (2014) schlagen anhand einer Literaturrecherche vor, den Fahrzeugeinstieg hinsichtlich dynamischer Stabilitätsparameter zu bewerten. Für Singh et al. (2014) liegt der Schlüssel in der menschlichen Balance. Die Haltungskontrolle wird quantitativ über die Trajektorien

⁹ Maximum voluntary contraction (MVC) ratio

¹⁰ Elektromyographie erfasst die Aktivität der durch neuronale Impulse erregte Muskelfasern. Somit kann unter anderem auf die muskuläre Beanspruchung während einer Aufgabe geschlossen werden. (Konrad, 2001)

des CoP und CoM sowie die Bewegungsschwingung gemessen. Der CoG bzw. die Verschiebung des CoG ist ein indirektes Maß für die Haltungsschwankung und eignet sich damit, um die Fähigkeit des Balance-halten zu überprüfen (Singh et al., 2014). Singh et al. (2014) empfehlen diese Untersuchungen mit dem Wii Balance Board und der Microsoft Kinect durchzuführen, als kostengünstige Alternative zu Kraftmessplatten und Vicon.

3.1.4 Zusammenfassung: Definition von Bewegungsstrategien

Trotz des biomechanischen Überbestimmtheitsproblems führt das zentrale Nervensystem eine wiederholte Bewegung nach einem ähnlichen Muster aus (Authier et al., 1995; Rasmussen et al., 2001). Das zentrale Nervensystem lenkt den Menschen nach einem *Inneren Modell*, das sich mit jeder Wiederholung festigt (Bubb et al., 2015; Cherednichenko, 2007). So bilden sich Bewegungsstrategien aus.

Die Identifikation von Bewegungsstrategien erfolgt über die Einteilung der Bewegungsaufgabe in Teilziele (Bockholt et al., 2017). Der Zeitraum von einem Teilziel zum nächsten ist eine Bewegungsphase. Bewegungsphasen laufen streng sequentiell ab, daher werden sie anhand des aktiv führenden Körperteils definiert und beschrieben (Cherednichenko, 2007; Rigel, 2005). Somit bestimmt das *führende Körperteil* den Beginn und das Ende einer Bewegungsphase und die Hauptaktion, die innerhalb einer Bewegungsphase ausgeführt wird. Neben dem *führenden Körperteil* werden die anderen Körperteile, ihre Zustände und ihre relativen Positionen verzeichnet (Authier et al., 1995; Chateauroux et al., 2012; Cherednichenko, 2007; Rigel, 2005; Wagner et al., 2005). In der Literatur zeigt sich, dass sich die Einteilung von Bewegungsstrategien in Bezug auf ihre Detailtiefe und teilweise auch in Bezug auf das *führende Körperteil* unterscheiden (vgl. Sabbah, Bubb, & Bengler, 2010). Folglich scheint es im Ermessen der Autoren zu liegen, in welchem Detailgrad ein Bewegungsablauf als Strategie gewertet wird und welches Körperteil als *führendes* gewählt wird.

Im Fahrzeugbereich wirken sich die Anthropometrie der Nutzer und die Fahrzeuggeometrie auf die Ein- und Ausstiegsbewegung aus. Die anthropometrische Ausprägung beeinflusst die Gestaltung der Zugangsöffnung und die Erreichbarkeit von Halte- und Trittbereichen (Chateauroux et al., 2012). Hierbei sind vor allem die Faktoren der Körperhöhe, der Korpulenz sowie Arm- und Beinlängen relevant. Aber auch das Alter, die Beweglichkeit und körperliche Einschränkungen wirken sich auf die Gestaltung von Halte- und Trittmöglichkeiten aus (Brenner, 2013).

Bei den anthropometrischen Parametern werden im Rahmen dieser Arbeit die Erkenntnisse aus dem Pkw-Bereich auf Nutzfahrzeuge übertragen. Dies wird aufgrund der vergleichbaren anthropometrischen Eigenschaften beider Nutzerpopulationen entschieden (vgl. auch Abschnitt 2.1). Im Hinblick auf die Fahrzeuggeometrie zeigen Studien am Lkw, dass sich der Türöffnungswinkel auf die Bewegung auswirkt (Chateauroux et al., 2012). Dagegen konnte bisher noch kein Zusammenhang zwischen der Anzahl der Stufen und der Wahl der Bewegungsstrategien festgestellt werden (Chateauroux et al., 2012; Reed et al., 2011).

Um Bewegungsstrategien zu identifizieren, müssen die Bewegungen analysiert werden. Hierzu können Bewegungsabläufe nach einem zuvor festgelegten Schema aus Videodaten kategorisiert (Drury et al., 1982; Stenlund et al., 2002) oder anhand kinematischer oder physiologischer Daten aus Motion Capturing ausgewertet werden (Chateauroux et al., 2012; Hase & Stein, 1999; Shorti, 2016; Wagner et al., 2005).

In dieser Arbeit werden vier Ansätze zur Bewertung von Bewegungen vorgestellt: anhand der Bewegungsdauer, der Muskelaktivität, der Gelenkwinkel und der Balance.

Zur Erfassung der Balance und der Muskelaktivität sind umfangreiche und kostspielige Versuchsaufbauten notwendig. Diese Analysemöglichkeiten sind in späteren Stadien der Forschung interessant, sobald die grundsätzliche Bewegungsform in und aus einem Lkw feststeht. Dann können aufwendige Versuchsaufbauten zielgerichtet aufgebaut werden und Bewegungen detailliert bewertet werden. In einem früheren Entwicklungsstadium eignen sich daher die Erfassung der Bewegungsdauer und der Gelenkwinkel, da diese verhältnismäßig einfach umgesetzt werden können und mit rudimentären Ergebnissen aus der Literatur verglichen werden können. Daher wird in vorliegender Arbeit die Bewegungsdauer erfasst und über ein inertiales Messsystem die auftretenden Gelenkwinkel der Probanden.

3.2 Menschliche Informationsverarbeitung

3.2.1 Der Begriff Intuitivität

Nach Mohs et al. (2006a) rückt der Begriff *Intuitivität* bei der Gestaltung von Mensch-Maschine-Schnittstellen immer stärker in den Fokus und avanciert zu einem Verkaufsargument. Dennoch ist bis heute noch nicht abschließend geklärt, was Intuitivität ist und viel wichtiger noch, wie ein Produkt intuitiv gestaltet wird.

Die Wissenschaft nähert sich dem Begriff der *Intuitiven Interaktion* über verschiedene Modellvorstellungen. Baylor (1997) identifiziert drei Komponenten der *Intuition: Immediacy, Sensing Relationships* und *Reasoning*. *Immediacy* gibt den Zeitpunkt an, wann Intuition auftritt. Intuition ist nicht planbar oder willentlich hervorzurufen. In Zusammenspiel mit der Komponente *Sensing Relationships* erzeugt *Immediacy* die sogenannte *Insight*, den Willen etwas ändern zu wollen. Die Komponente *Sensing Relationships* stellt dabei Verknüpfungen und Verbindungen zwischen verschiedenen Ideen und Objekten her. Dies zeigt sich beispielsweise in der Verbindung mit der Komponente *Reasoning*, die gemeinsam Metaphern und Analogien erzeugen. Das *Reasoning* läuft dabei ohne metakognitive Kontrolle ab. Im Gegensatz zum *Analytical Reasoning*, das auf eine konkrete Antwort abzielt (z.B. ein Beweis oder eine numerische Lösung), fokussiert sich das *Intuitive Reasoning* auf das Verständnis. (Baylor, 1997).

Blackler und Kollegen (2007) definieren den Begriff des intuitiven Gebrauchs wie folgt:

„Intuitive use of products involves utilising knowledge gained through other experience(s). Therefore, products that people use intuitively are those with features they have encountered before. Intuitive interaction is fast and generally non-conscious, so people may be unable to explain how they made decisions during intuitive interaction.“ (Blackler & Hurtienne, 2007, S. 37)

Nach dieser Definition findet ein intuitiver Gebrauch unter Voraussetzung eines gewissen Vorwissens statt. Eine intuitive Bedienung funktioniert demnach schnell und unbewusst. Die Nutzer können ihre Entscheidungsfindung nicht unbedingt erklären. (Blackler & Hurtienne, 2007) Blackler und Kollegen legen einer intuitiven Handlung die Modellvorstellung des *Continuum of Intuitive Interaction* zu Grunde. Dieses besteht aus drei Prinzipien, die den Transfer von Bekanntem auf Unbekanntes durch die Nutzung von physischer *Affordance* über wahrgenommene *Affordance* und Metaphern zu *Compatible Mapping* und *External Consistency* beschreibt. (Blackler & Hurtienne, 2007)

Die Forschungsgruppe *Intuitive Use of User Interfaces (IUUI)* steht im Austausch mit Blackler und Kollegen und haben parallel ein ähnliches Verständnis zum Begriff der Intuitivität entwickelt. Sie definieren eine intuitive Interaktion wie folgt:

„Ein technisches System ist im Rahmen einer Aufgabenstellung in dem Maße intuitiv benutzbar, in dem der jeweilige Benutzer durch unbewusste Anwendung von Vorwissen effektiv interagieren kann.“ (Mohs et al., 2006a, S. 80)

Auch diese Definition einer intuitiven Interaktion beinhaltet die Elemente des unbewussten Anwendens von Vorwissen. In Unterscheidung zu Blackler und Kollegen nutzt die Forschungsgruppe IUUI nicht die Bediengeschwindigkeit, sondern die Effektivität nach DIN EN ISO 9241-11. Nur wenn der Nutzer eine Interaktion als effizient wahrnimmt und eine minimale, kognitive Belastung benötigt, ist es eine intuitive Interaktion.

Im Gegensatz zum *Continuum of Intuitive Interaction* von Blackler und Kollegen definiert die IUUI ein *Continuum of Knowledge*. Damit postuliert die IUUI, dass sich nicht die intuitive Interaktion verändert, sondern das dafür notwendige Vorwissen. Das *Continuum of Knowledge* legt vier Quellen fest, aus denen sich das Vorwissen speist. Die grundlegendste Quelle zur Generierung von Vorwissen ist das angeborene Wissen, gefolgt von dem durch Sinneserfahrungen und Kultur geprägten Wissen. Das höchste Level bildet die Expertise, die durch Beruf oder Hobbies aufgebaut wird. Je grundlegender eine Interaktion auf das Level des Vorwissens zurückgreift, umso mehr Nutzer sind in der Lage die Bedienung zu entschlüsseln und umso häufiger wird die Bedienung entschlüsselt (Mohs et al., 2006a; 2006b; Naumann et al., 2007)

Mit dem INTUI-Modell entwickeln Diefenbach und Ullrich (2015) ein weiteres Modell zur Erklärung intuitiver Interaktionen. Dieses Modell besteht aus vier Komponenten: *Gut Feeling*, *Verbalizability*, *Effortlessness* und *Magical Experience*. Das *Gut Feeling* umfasst Aspekte einer unbewussten, nicht analytisch getroffenen Entscheidung. Dieser Entscheidungsprozess kann im Nachhinein nicht rekonstruiert werden. Die Nutzer erinnern sich nicht oder können das Vorgehen sehr schwer bis gar nicht beschreiben. Es ist nicht zu verbalisieren. (Diefenbach & Ullrich, 2015) Durch die unbewusste Entscheidung ist der Prozess schnell und ohne oder mit minimalem, kognitiven Aufwand durchführbar (Diefenbach & Ullrich, 2015; Norman, 2002). Die *Magical Experience* drückt aus, dass eine Entscheidung nicht geraten wird, sondern auf Vorwissen basiert. Die Größen *Effortlessness* und *Verbalizability* zahlen auf die Gebrauchstauglichkeit ein, während *Gut Feeling* und *Magical Experience* mit dem Konzept der User Experience verknüpft werden. (Diefenbach & Ullrich, 2015)

Über alle Modelle hinweg treten acht Komponenten der Intuitivität auf: Effektivität (IUUI), Vorwissen (Baylor, IUUI, *Continuum of Intuitive Interaction*, INTUI), Unbewusstheit (Baylor, IUUI, *Continuum of Intuitive Interaction*, INTUI), Schnelligkeit (Baylor, *Continuum of Intuitive Interaction*), Verbalisierung (*Continuum of Intuitive Interaction*, INTUI), Aufwandfrei (IUUI, *Continuum of Intuitive Interaction*, INTUI), *Gut Feeling* (INTUI) und magische Erfahrung (INTUI).

Die Komponente Effektivität geht auf die Definition in der DIN EN ISO 9241-11 zurück. Die Komponente des Vorwissens wird in den Modellen unterschiedlich bewertet. Während Blackler und Kollegen das Vorwissen nicht weiter spezifizieren (Blackler & Hurtienne, 2007), definiert die Forschungsgruppe IUUI das *Continuum of Knowledge* mit einem veränderlichen Vorwissen über die Zeit. Diefenbach und Ullrich (2015) bemessen dagegen die Transferleistung mit dem Konstrukt der *Domain Transfer Distance* als Abstand zwischen dem Anwendungsbereich und dem Ursprung des Vorwissens. Bei Baylor ist das Vorwissen abhängig von der Art der Intuition, die auftritt: Novizen erleben eine *Immature Intuition*, während bei Experten eine *Mature Intuition* eintritt (Baylor, 2001). In dem Zwischenbereich zwischen Laie und Experte tritt aufgrund des Wissenstands keine Intuition auf.

In allen Modellen ist das unbewusste Anwenden von Wissen eine Voraussetzung, dass eine Interaktion als intuitiv angesehen wird (Tretter, Ullrich, & Diefenbach, 2015). Unabhängig der psychologischen Diskussion, ob eine Handlung oder Entscheidung überhaupt unbewusst sein

kann (Bengler, 2019), wird das Unbewusste im Rahmen einer intuitiven Interaktion als schnelle und automatische Reaktion ohne kognitiven Aufwand gesehen (Baylor, 1997; Blackler & Hurtienne, 2007; Diefenbach & Ullrich, 2015; Naumann, et al., 2007; Norman, 2002). Es greift auf allgemeine Trends und Erlebnisse zurück, um vergangene Erfahrungen auf aktuelle zu übertragen (Baylor, 1997; Blackler & Hurtienne, 2007; Diefenbach & Ullrich, 2015; Norman, 2002). Dabei besteht die Gefahr, dass das Unbewusstsein falsch generalisiert und sich durch beobachtete, scheinbare Regelmäßigkeiten und Strukturen verzerren lässt (Norman, 2002). Entgegen dem Unbewusstsein nutzt das bewusste Denken Logik, Mathematik und Entscheidungstheorien um Lösungen zu generieren. Allerdings arbeitet das Bewusstsein langsam und mühsam (Norman, 2002). Mohs et al. (2006b) unterscheiden zwischen einer bewussten und unbewussten Handlung anhand der selektiven Aufmerksamkeit. Bei einer bewussten Handlung liegt der Aufmerksamkeitsfokus auf dieser Handlung. Bubb et al. (2015) dagegen definieren die Grenze über die Art und Weise, wie diese Handlung vorbereitet und verarbeitet wird. Finden die Nutzer ein *Inneres Modell*, nachdem sie handeln können, ist die Handlung unbewusst, sobald kein inneres Modell für die Ausführung einer Handlung abgerufen werden kann, muss bewusst nach einer Lösungsstrategie gesucht werden.

Die Schnelligkeit einer intuitiven Interaktion resultiert aus der minimalen, kognitiven Verarbeitungszeit (Blackler & Hurtienne, 2007) und zählt zu der Komponente *Aufwandsfreiheit* nach Diefenbach und Ullrich (2015). Die Verbalisierung beschreibt das Phänomen, dass die Nutzer ihren Entscheidungsprozess nicht erklären können (Diefenbach & Ullrich, 2015). Dies trifft vor allem auf implizites Wissen und implizite Fähigkeiten zu (Schneider, 2010).

Abschließend ein Hinweis zur sogenannten *Intuitivitäts-Illusion*. Die *Intuitivitäts-Illusion* beschreibt das Phänomen, dass die Nutzer eine Interaktion als intuitiv bezeichnen, obwohl sie ohne vorherige Einleitung gescheitert wären (Tretter et al., 2015). Ursache hierfür liegt in dem menschlichen Erinnerungsvermögen, das sich nach einem Ereignis nicht mehr unbeeinflusst an den Wissenstand vor dem Ereignis erinnert (Tretter et al., 2015). Die Erinnerung ist verzerrt. Christensen-Szalanski und Willham (1991) weisen dieses Phänomen experimentell nach.

3.2.2 Das Innere Modell als Gestaltungsprinzip

Der Begriff des Inneren Modells findet sowohl bei der Planung des menschlichen Bewegungsablaufs (Cherednichenko, 2007) als auch bei der menschlichen Informationsverarbeitung (Bubb et al., 2015) Anwendung. Norman unterscheidet zwischen dem *Target System*, dem *Mental Model* des Anwenders, dem *Conceptual Model* des *Target Systems* und dem wissenschaftlichen Konzept des *Mental Model* (Norman, 2014). Das *Target System* ist dabei das Produkt oder der Prozess mit dem der Nutzer interagiert. Es kommuniziert mit dem Anwender über das *System Image* – die äußere Formsprache, eine Anleitung oder Labels (Norman, 2002). Dem *System Image* liegt das *Conceptual Model* des Designers¹¹ zu Grunde (Norman, 2013). Ein *Conceptual Model* unterstützt den Nutzer dabei, die Anwendung zu verstehen und korrekt zu nutzen (Norman, 2013). Daher gehört ein gutes *Conceptual Model* zu den sieben Gestaltungsprinzipien von Norman (2013). Das *Mental Model* des Nutzers entwickelt sich über die Interaktion mit einem Produkt oder Prozess (Norman, 2013) und wird durch Erfahrung, Training und Anleitung geprägt (Norman, 2002).

Das schwierige in dem Gestaltungsprozess ist es, eine Übereinstimmung zwischen dem *Conceptual Model* des Entwicklers und dem *Mental Model* des Anwenders über das *System Image*

¹¹ In der Literatur wird häufig vom *Conceptual Model* des Designers gesprochen. Nach Meinung des Autors steht der Designer an dieser Stelle stellvertretend für alle Experten und Abteilungen, die gemeinschaftlich im Rahmen des Entwicklungsprozesses die äußere Form und Funktion eines Produkts oder Prozesses bestimmen.

zu kreieren. Das *Mental Model* kann sich von Anwender zu Anwender unterscheiden. Es kann auch sein, dass ein Anwender mehrere *Mental Models* zu einem Produkt oder Prozess hat, die sich teilweise sogar widersprechen. (Norman, 2002)

Um eine Übereinstimmung zwischen dem *Conceptual Model* der Designer und dem *Mental Model* der Nutzer zu finden, definiert Norman (2013) sieben *Principles of Design: Discoverability, Feedback, Conceptual Model, Affordance, Signifiers, Mappings, Constraints*.

Die *Discoverability* visualisiert alle möglichen Aktionen und zeigt ihren aktuellen Status an. Interagiert der Nutzer mit dem Produkt muss eine kontinuierliche Rückmeldung, das *Feedback*, über die Ergebnisse der Interaktion und den aktuellen Status des Systems erfolgen. Ein gutes *Conceptual Model* vermittelt dem Nutzer ein Gefühl von Kontrolle und erhöht das Verständnis für das System. Die *Affordance* fordert den Nutzer auf, eine gewünschte Aktion auszuführen, beispielsweise über die Formgebung. Diese kann durch *Signifiers* unterstrichen werden und für die Auffindbarkeit der gewünschten Aktionen, sowie der Kommunikation der Rückmeldung sorgen. Besteht eine Beziehung zwischen einer Bedingung und ihrer Aktion, wird dies als *Mapping* bezeichnet. Die siebte Gestaltungsregel stellt *Constraints* auf, die entweder physikalischer, logischer, semantischer oder kultureller Natur sind, um Handlungen gezielt zu führen und eine einfache Interpretation der Ausführung zu ermöglichen. (Norman, 2013)

3.2.3 Zusammenfassung: menschliche Informationsverarbeitung

Die Definition einer intuitiven Interaktion zwischen Mensch und Maschine weist, je nach Modell, verschiedene Merkmale auf. Ein zentrales Element über verschiedene Modelle hinweg bildet die unbewusste Anwendung von Vorwissen (Baylor, 1997; Blackler & Hurtienne, 2007; Diefenbach & Ullrich, 2015; Mohs et al., 2006b). Der Begriff des Unbewussten wird dabei unter anderem anhand der selektiven Aufmerksamkeit eingegrenzt (Mohs, et al., 2006a). Die intuitive Interaktion erfordert einen geringen kognitiven Aufwand (Blackler & Hurtienne, 2007; Diefenbach & Ullrich, 2015; Naumann, et al., 2007), dessen Entscheidungsprozess von den Anwendern nur schwer oder gar nicht beschrieben werden kann (Blackler & Hurtienne, 2007; Diefenbach & Ullrich, 2015). Um eine Handlung derart unbewusst auszuführen, muss der Nutzer ein *Inneres Modell* in seinem Kopf hinterlegt haben, das bei der Ausführung abgerufen wird (Bubb et al., 2015). Allerdings ist es schwierig im Nachgang einer Aufgabe zu prüfen, wie groß der Anteil des Vorwissens an der erfolgreichen Ausführung war, da die Menschen einer Verzerrung der Erinnerung unterliegen (Christensen-Szalanski & Willhan, 1991).

Ein *Inneres Modell* wird in das *Conceptual Model* des Designers und in das *Mental Model* des Nutzers unterteilt. Dabei kommunizieren beide über das *System Image*, die äußere Form eines Produkts (Norman, 2002). Nur wenn beide Modelle – von Designer und von Nutzer – übereinstimmen, ist der Nutzer in der Lage eine Aufgabe erfolgreich auszuführen. Norman (2013) sieht ein gutes *Conceptual Model* als eins von sieben Gestaltungsprinzipien für gutes Design an.

4 Phase I: Aufgabe und Vorgehen

4.1 Fragestellung

Die Zugangsbewegung zählt zu den Unfallschwerpunkten bei Berufskraftfahrern (DGUV, 2016). Dennoch zeigt die Literaturrecherche, dass zum Thema Ein- und Ausstieg im Nutzfahrzeubereich kaum Erkenntnisse über Bewegungsabläufe und Einflussfaktoren existieren – im Gegensatz zum Pkw-Bereich. Während am Pkw sowohl die Ein- als auch die Ausstiegsbewegung in zahlreichen Studien analysiert wurde, gibt es im Nutzfahrzeubereich zwei Arbeiten, die sich mit der Ausstiegsstrategie beschäftigen (Chateauroux et al., 2012; Shorti, 2016): eine bezieht sich auf amerikanische Haubenfahrzeuge und eine auf europäische Frontlenkerkabinen. Zur Einstiegsbewegung im Lkw gibt es keine Literatur. Dabei bildet das Wissen über den Bewegungsablauf für den Ein- und Ausstieg die Grundlage zur Bewertung und damit auch zur Veränderung der Zugangsgeometrie.

Um die Gesetzesänderung zur Längenvorschrift bei Nutzfahrzeugen (EU-Richtlinien 2015/719) als Anstoß zur Veränderung der Zugangsgeometrie zu nutzen, muss im ersten Schritt der aktuelle Zugang analysiert werden (Kapitel 5). Daher ist das erste Ziel dieser Arbeit Bewegungsstrategien an Frontlenkerfahrzeugen für die Zugangsbewegung und Einflussfaktoren auf die Wahl dieser Strategien zu identifizieren.

Aufbauend auf die Analyse der aktuellen Situation, ist die Grundlage geschaffen, um die Zugangsgeometrie zu verändern. Dies erfolgt im zweiten Teil der Arbeit (Kapitel 6), in dem in einem nutzerzentrierten Ansatz ein optimierter Bewegungsablauf hinsichtlich des Inneren Modells der Fahrer und der Bewegungsdauer für die Ein- und Ausstiegsbewegung bei Nutzfahrzeugen erarbeitet wird.

4.2 Vorgehensmodell

Die Gestaltung von Produkten ist ein Gebiet, das ständigen Neuerungen unterliegt (Blessing & Chakrabarti, 2002). Zahlreiche Einflussfaktoren wirken auf den Entwicklungsprozess ein, beeinflussen sich gegenseitig und erzeugen somit eine hohe Komplexität (Blessing & Chakrabarti, 2002). Um diese Komplexität und den stetig steigenden Zeit- und Qualitätsdruck (Blessing et al., 1998) zu bewältigen, nutzen Entwickler Vorgehensmodelle (Lindemann, 2009). Sie unterstützen bei der Planung, Durchführung und Reflexion von Prozessen oder Produkten (Lindemann, 2009). Obwohl große Einigkeit herrscht, dass die Anwendung von Vorgehensmodellen in der Forschung und Industrie sinnvoll ist (Blessing & Chakrabarti, 2002; König, 2012; Lindemann, 2009), hängt der Erfolg eines Gestaltungsprozesses von der Auswahl eines geeigneten Vorgehensmodells ab (König, 2012; Lindemann, 2009). Gelingt dies, läuft der Entwicklungsprozess effektiver und effizienter ab (Lindemann, 2009), ohne Verzögerungen oder Fehlentwicklungen (König, 2012), und ein marktfähiges Produkt wird entwickelt (VDI 2221).

König (2012) und Lindemann (2009) stellen fest, dass es nicht das eine Vorgehensmodell für jeden Anwendungsfall gibt. Vorgehensmodelle unterscheiden sich zwischen den Disziplinen, für die sie entwickelt wurden. Dabei ist die Anwendbarkeit monodisziplinärer Vorgehensmodelle für ein interdisziplinäres Team in der Regel eingeschränkt. Neben der Disziplin sind manche Vorgehensmodelle auf ein bestimmtes Ziel ausgerichtet und weisen damit eine eingeschränkte Übertragbarkeit auf andere Problemstellungen auf. Vorgehensmodelle unterscheiden

sich in ihrem Aufbau, den Inhalten, der grafischen Darstellung und dem Detaillierungsgrad, den sie adressieren. (König, 2012; Lindemann, 2009)

Zwei häufig angewendete Vorgehensmodelle im Forschungsgebiet sind in der VDI Richtlinie 2221 und in der DIN EN ISO 9241-210 definiert. Die VDI Richtlinie 2221 schlägt ein sequentielles Vorgehensmodell auf Ebene der Makrologik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Produkte vor (Lindemann, 2009). Dementgegen präferiert die DIN EN ISO 9241-210 einen menschenzentrierten Ansatz, in dem iterativ und partizipativ entwickelt wird (DIN EN ISO 9241-210; König, 2012). Neben diesen beiden exemplarisch genannten Vorgehensmodellen mit ihren individuellen Ausprägungen existieren zahlreiche weitere Abläufe, angepasst auf spezifische Anwendungsfälle oder ausgerichtet an bestimmte Optimierungsaspekte (vgl. Lindemann, 2009).

Zur Auswahl eines Vorgehensmodells, wird zunächst der vorliegende Anwendungsfall genauer betrachtet. Die Zugangsgeometrie bildet eine passive Interaktion mit dem Menschen – passiv aus dem Grund, da nach dem Verständnis des Autors, der Interaktionsgegenstand *Zugangsgeometrie* dem Anwender keine veränderbaren Informationen bei der Nutzung zur Verfügung stellt. Dementgegen ist eine aktive Interaktion, sobald der Interaktionsgegenstand dem Nutzer veränderbare Informationen bereitstellt, beispielsweise über eine Displayanzeige.

Das Vorgehensmodell nach VDI 2221 beschreibt einen konstruktiven Prozess einer detaillierten Umsetzung eines Produkts. Die vorliegende Arbeit zielt auf die Erstellung von Grobkonzepten der Zugangsgeometrie ab und nicht auf eine detaillierte Konstruktion, die die VDI 2221 anleitet. Somit eignet sich das Vorgehen nicht für die Aufgaben.

Die DIN EN ISO 9241-210 zeigt einen „Prozess zur Gestaltung gebrauchstauglicher interaktiver Systeme“ auf. Das Vorgehensmodell nach DIN EN ISO 9241-210 ist damit für Konzeptstudien anwendbar und legt den Fokus auf die Gebrauchstauglichkeit. Allerdings geht dieser Prozess von rechnergestützten und interaktiven Systemen mit Statusrückmeldung aus – folglich aktiven Rückmeldungssystemen und keinen passiven Geometrien.

Der Ansatz aus DIN EN ISO 9241-210 zur Einbindung der Nutzer in den Entwicklungsprozess soll im Folgenden beibehalten werden, da dieser auch im Fachbereich der Ergonomie stark verankert ist. Ebenso wie der interdisziplinäre Charakter des Vorgehensmodells. Beide Aspekte werden im Rahmenwerk *Design Research Methodology* von Blessing und Chakrabarti (2002) angesprochen. Ausgehend von diesen Überlegungen wird die *Design Research Methodology* nach Blessing und Chakrabarti (2002) als methodisches Gerüst für diese Arbeit ausgewählt.

Design Research Methodology

Um erfolgreiche Produkte zu gestalten, entwickeln Blessing und Chakrabarti (2002) die *Design Research Methodology* (DRM). Das Grundgerüst der DRM ist in Abbildung 4-1 schematisch dargestellt. Es teilt sich in vier Phasen: die Definition eines Erfolgskriteriums, die Aufdeckung von Einflussfaktoren und ihre gegenseitige Vernetzung, die Entwicklung einer Methode oder eines Werkzeugs zur Verbesserung des Zustands und als vierte Phase die Nutzerevaluation der entwickelten Methode oder des entwickelten Werkzeugs. Wichtig sind die Verkettungen der Phasen untereinander und die Rückspiegelung der Ergebnisse.

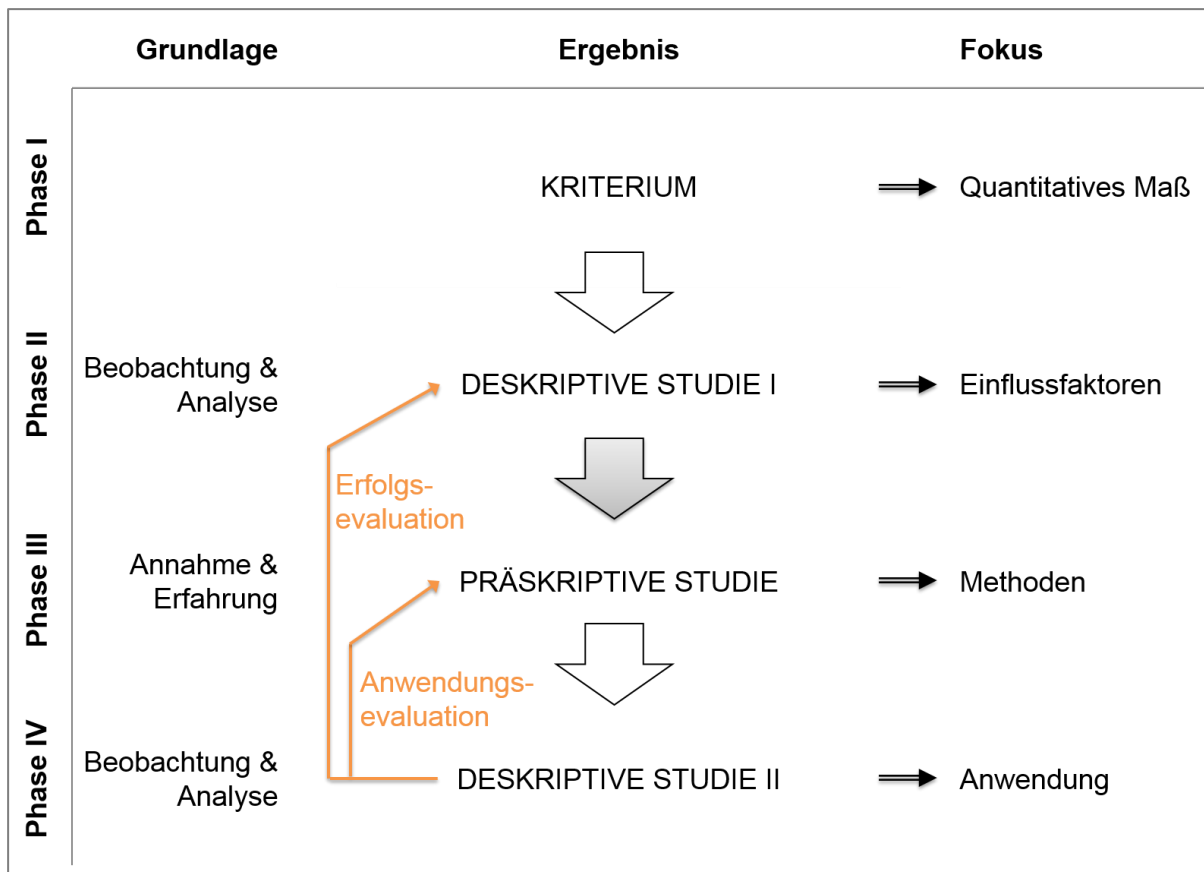


Abbildung 4-1: Aufbau der Design Research Methodology nach Blessing und Chakrabarti (2002, S. 3)

Die DRM beginnt mit der Definition eines messbaren Erfolgskriteriums (Phase I). Anhand dieses Kriteriums wird das Ziel der Forschung beschrieben, die deskriptive Studie ausgerichtet und der Erfolg der Design Methode mit der zweiten deskriptiven Studie gemessen.

Nach der Definition eines Erfolgskriteriums folgt in Phase II die erste deskriptive Studie mit dem Ziel, direkte und indirekte Einflussfaktoren auf das Kriterium zu beleuchten. Aufgrund der Komplexität der Gestaltung beeinflussen sich die Faktoren gegenseitig und eine Literaturrecherche ist nicht ausreichend, um alle gegenseitigen Verknüpfungen aufzudecken.

Der in Abbildung 4-1 grau hinterlegte Pfeil stellt die Ergebnisse aus der deskriptiven Studie dar, die direkt in die Gestaltung der präskriptiven Studie fließen. Die präskriptive Studie in Phase III dient der Entwicklung einer Methode oder eines Werkzeugs zur Erzeugung der gewünschten Endsituation.

Die in Phase III entwickelte Methode wird in der zweiten deskriptiven Studie angewendet und evaluiert. Hierbei wird sowohl die Methode (Anwendungsevaluation: *Werden die erwarteten Faktoren angesprochen und verhalten sich diese Faktoren wie erwartet?*), als auch der Erfolg (Erfolgsevaluation: *Beeinflusst die entwickelte Methode das messbare Erfolgskriterium in die gewünschte Richtung?*) evaluiert. Diese Rückkopplungen sind in Abbildung 4-1 in orange dargestellt. Aus der zweiten deskriptiven Studie können konkrete Vorschläge zur Verbesserung der Methode oder die Vorstellung einer Anwendung abgeleitet werden.

Die DRM ist kein starres Gerüst. Projektabhängig muss entschieden werden, welche Phase in welcher Tiefe durchgeführt wird. Die DRM ist ein iterativer Prozess, der einen allgemeinen strukturellen Rahmen vorgibt. Wichtig an der DRM sind die Verknüpfungen zwischen den Phasen, die in Abbildung 4-1 in grau und orange dargestellt sind.

4.3 Anwendung der DRM

Die DRM strukturiert diese Arbeit in vier methodische Blöcke. In Phase I wird das Erfolgskriterium und die Aufgabenstellung aus dem Theorieblock in Kapitel 2 und II abgeleitet. Um eine Verbesserung bei der Zugangsgeometrie zu erreichen, wird zunächst die IST-Situation analysiert. Dies geschieht in Kapitel 4.2 mit der Kernfrage, welche Bewegungsstrategien Lkw-Fahrer für das Betreten und Verlassen nutzen und welche Faktoren die Wahl einer Bewegungsstrategie beeinflussen (vgl. Phase II in Abbildung 4-2). Für eine umfassende Analyse werden verschiedene Perspektiven betrachtet: Nutzer und Experten. Abschließend werden im Rahmen einer Probandenstudie die auftretenden Bewegungsabläufe identifiziert. Die Festlegung der Bewegungsstrategien folgen dabei den Kriterien aus Abschnitt 3.1.4. Angelehnt an die Erkenntnisse aus der Literatur aus Abschnitt 3.1.1 werden als Einflussfaktoren anthropometrisch-demographische Faktoren (Körperhöhe, BMI, Alter), individuelle Vorlieben (starker Fuß) und Berufserfahrung (Stufenerfahrung) untersucht. Als Erfolgskriterium zur Untersuchung der Bewegungsstrategien wird die Bewegungsdauer für das Ein- und Ausstiegsverhalten herangezogen.

Aufbauend auf die Analyse der IST-Situation in Phase II des DRM, beleuchtet Phase III in Kapitel 6 die gewünschte SOLL-Situation der Lkw-Fahrer in Bezug auf die Stufenanordnung (vergleiche Abbildung 4-2). Die hier gewonnenen Erkenntnisse werden in einem Mock-Up Aufbau umgesetzt und im Rahmen einer Nutzerevaluation in Phase IV der DRM anhand der auftretenden Bewegungsstrategien und der Bewegungsdauer geprüft. Der Ablauf der Arbeit ist in Abbildung 4-2 abgebildet.

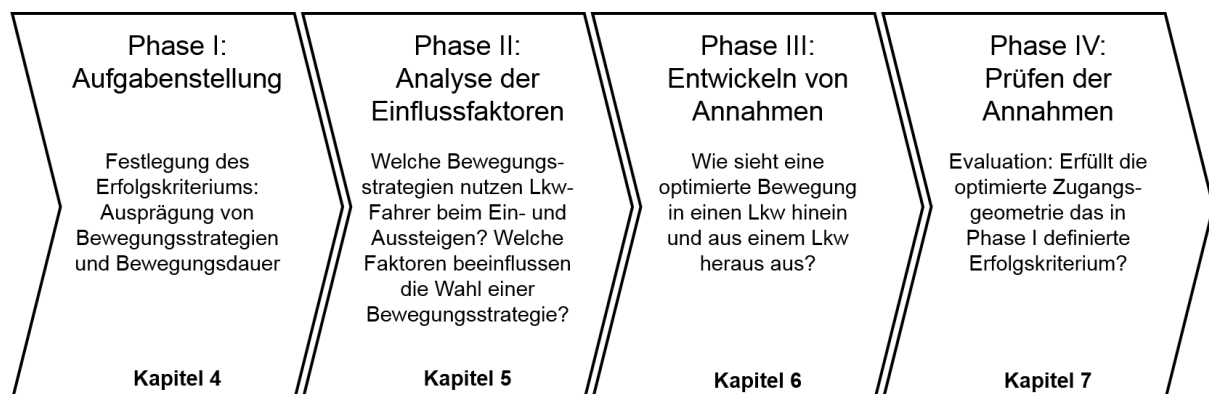


Abbildung 4-2: Einteilung dieser Arbeit zur Erreichung einer optimalen Zugangsgeometrie für den Lkw-Ein- und Ausstieg

5 Phase II: Analyse der Einflussfaktoren

Kapitel 5 bildet die zweite Phase in der DRM: die Analyse der Einflussfaktoren und ihre gegenseitigen Beeinflussungen auf das Bewegungsverhalten beim Nutzfahrzeugzugang. Da die Phase II der DRM die Einflussfaktoren aus der Literaturrecherche aus Kapitel 1 beinhaltet, werden diese in Abschnitt 5.1 zusammengefasst. Anschließend werden die vier deskriptiven Studien aufgeführt, die die gegenseitige Beeinflussung von Einflussfaktoren analysieren.

In der ersten Studie werden Berufskraftfahrer beim Ein- und Aussteigen auf einem Fernverkehrsrastplatz beobachtet. Durch die Beobachtungsstudie kann ein natürliches Verhalten betrachtet und somit ein erster Eindruck gebildet werden. Das unbewusste Wissen der Lkw-Fahrer in Bezug auf ihren Bewegungsablauf kann mit den Ergebnissen aus den nachfolgenden Versuchen in artifiziellen Situationen abschließend verglichen werden. Die zweite Studie beinhaltet eine Nutzerbefragung. Im Rahmen dieser wird auf das implizite Wissen der Fahrer zurückgegriffen und ihre Wunsch-Vorstellungen und Prioritäten für den Zugang abgefragt. Anschließend folgt ein Experten-Workshop, um auf explizites Wissen zurückzugreifen. In dem Workshop werden konkrete Beispiele an Fahrzeugkabinen analysiert direkte Vergleichen zwischen den Kabinen verschiedener Hersteller gezogen. Die letzte Studie im Rahmen der zweiten Phase der DRM bildet eine Probandenstudie an zwei Realfahrzeugen, einem zweistufigen Lkw als Repräsentant für den Verteilerverkehr und einem dreistufigen Lkw als Repräsentant für den Fernverkehr. Die Probandenstudie zielt darauf ab, Bewegungsstrategien für das Betreten und Verlassen, sowie deren Einflussfaktoren zu identifizieren.

5.1 Literatur-Abriss: Einflüsse auf die Zugangsbewegung

Die hohe Unfallrate der Berufskraftfahrer beim Ein- und Aussteigen ist unter anderem auf das Kabinenlayout – die geometrische Anordnung der Haltegriffe und Trittstufen – zurückzuführen (Shorti, 2016). Anthropometrische Inkompatibilitäten, wie schwierig zu erreichende Haltegriffe (Fathallah & Cotnam, 2000), einseitig hohe Handkräfte aufgrund der asymmetrischen Anordnung der Stufen (Chateauroux et al., 2012) oder vorwärts gerichtetes Aussteigen (Reed et al., 2011; Shorti, 2016) führen unter Zeitdruck (Fathallah & Cotnam, 2000; Hermann, 2004) zu hohen Unfallzahlen während dem Betreten und Verlassen der Fahrerkabine. Menschen führen Bewegungen nach einem *Inneren Modell* aus, dass sich über die Bewegungswiederholungen festigt (Cherednichenko, 2007). Daher ist davon auszugehen, dass Berufskraftfahrer über die Zeit Bewegungsstrategien entwickeln.

Im Nutzfahrzeugbereich untersuchen Chateauroux et al. (2012) und Shorti (2016) Ausstiegsstrategien bei CoE und Haubenfahrzeugen. Es zeigt sich, dass sowohl Hand- als auch Fußstrategien probandenspezifisch sind. Chateauroux et al., (2012) vermuten einen Einfluss der Anthropometrie, vor allem auf die Wahl der Handstrategien. Shorti (2016) weist nach, dass sich der BMI auf die Fußstrategien auswirken. Korpulente Fahrer verwenden eher das weniger beanspruchende *Step-by-Step* Fußverhalten als das *Step-over-Step* Verhalten. Die Haltegriffe spielen während den Zeitpunkten der Gewichtsverlagerung von einem Fuß auf den anderen eine wichtige Rolle, um die Bewegung zu stabilisieren (Chateauroux et al., 2012). Durch den Griff an beide Haltestangen während der Gewichtsverlagerung ist die 3-Punkte Regel der BGV-D29 erfüllt. Chateauroux et al. (2012) empfehlen daher durchgängige Haltestangen, um ein Umgreifen zu vermeiden und den Fahrern ein Entlanggleiten an den Haltestangen zu ermöglichen. So sichern sich die Fahrer gegen Aus- oder Abrutschen ab. Die asymmetrische Stufenanordnung

der CoE-Kabinen (vgl. Abschnitt 2.2) wirkt sich auf die Handkräfte aus (Chateauroux et al., 2012). Bei den linksseitig angeordneten Stufen ist die Haltekraft in der linken Hand signifikant höher als in der rechten Hand. Eine symmetrische Anordnung der Stufen bewirkt eine gleichmäßige Verteilung der Handkräfte (Chateauroux et al., 2012). Zudem minimiert die durchgängige Nutzung der Haltegriffe und aller zur Verfügung stehender Trittstufen das Risiko einer Verletzung (Fathallah & Cotnam, 2000).

Die bisherigen Untersuchungen stellen Bewegungsstrategien von Lkw-Fahrern unzureichend da. Die Ausstiegsuntersuchungen von Shorti (2016) an Haubenfahrzeugen können nur bedingt auf CoE Fahrzeuge übertragen werden und in der Studie von Chateauroux et al. (2012) an CoE Fahrzeugen nehmen sechs Personen mit Lkw-Führerschein teil, davon nur zwei Lkw-Fahrer. Hier stellt sich die Frage, inwieweit unerfahrene Teilnehmer ein gefestigtes *Inneres Modell* und eine Bewegungsstrategie entwickelt haben. Einstiegsuntersuchungen existieren für den Nutzfahrzeugbereich nicht. Da Bewegungsstrategien in Folge der geometrischen Anordnung zu Unfällen beim Ein- und Aussteigen führen (Fathallah & Cotnam, 2000; Shorti, 2016), werden im ersten Schritt die Bewegungsstrategien der Lkw-Fahrer und Einflussfaktoren auf die Wahl einer Bewegungsstrategie untersucht. In Vorbereitung auf eine Studie zur Identifikation von Bewegungsstrategien (Abschnitt 5.5), werden Lkw-Fahrer während der Ein- und Ausstiegsbewegung beobachtet (Abschnitt 5.2) und Experten zu Strategien befragt (Abschnitt 5.4).

5.2 Nutzerbeobachtung auf dem Fernverkehrsrastplatz

5.2.1 Motivation: Erster Eindruck der Zugangsbewegung bei Nutzfahrzeugen

Um einen ersten Eindruck der Zugangsbewegung von Berufskraftfahrern zu erhalten, werden die Fahrer auf einem Lkw-Rastplatz an einer Autobahn beobachtet. Der Fokus der Studie liegt auf der Identifikation von Bauteilen mit denen ein Fahrer während der Ein- und Ausstiegsbewegung interagiert. Zudem werden die interagierenden Körperteile den entsprechenden Bauteilen zugeordnet, um erste Bewegungsabfolgen zu erkennen.

5.2.2 Methode: Beobachtungsstudie

Das wissenschaftliche Beobachten unterscheidet sich von der Alltagsbeobachtung in seiner Zielgerichtetheit des zu beobachteten Aspekts, der im Vorfeld systematisch geplant, definiert und standardisiert dokumentiert durchgeführt wird, um die Intersubjektivität zu gewährleisten (Graumann, 1966; Laatz, 1993). Die Zielgerichtetheit der Beobachtungsmethodik setzt ein gewisses Maß an Planung voraus. Bortz und Döring (2006) definieren dazu Kriterien, die eine Alltagsbeobachtung von einer systematischen Beobachtung unterscheidet.

Theorie

Eine systematische Beobachtung legt das Beobachtungsziel und den Beobachtungsrahmen vorab fest (Bortz & Döring, 2006). Der Beobachtungsrahmen grenzt den Beobachtungsort und die Beobachtungszeit sowie die Art der Protokollierung ab (Bortz & Döring, 2006). Die Methode der Beobachtung eignet sich vor allem dann, wenn zu befürchten ist, dass das direkte Befragen zu einem bestimmten Verhalten nicht korrekt wiedergegeben wird aufgrund von Selbstdarstellung (Bortz & Döring, 2006; Häder, 2015), sozialer Erwünschtheit (Bortz & Döring, 2006) oder da die Handlung unbewusst durchgeführt wird (Häder, 2015). Auch wenn ein Geschehen durch die Ausdrücke in Mimik oder Gestik der Beteiligten gedeutet werden soll, ist die systematische Beobachtung besser anzuwenden als Befragungen oder schriftliche Protokolle (Häder, 2015).

Systematische Beobachtungen dokumentieren ein Ereignis im Moment des Auftretens und werden nicht im Nachgang rekonstruiert (Häder, 2015). Erinnerungen beinhalten ein gewisses Fehlerpotential (Häder, 2015) und ein Maß an Ungenauigkeit. Abgesehen davon, dass Beobachtungen manchmal der einzige mögliche Weg sind, um an Informationen zu kommen (Häder, 2015), ist die Beobachtungsmethodik eine geeignete Methode, um einen ersten Eindruck zu sammeln und anschließend Hypothesen abzuleiten (Häder, 2015). Doch die Methode der wissenschaftlichen Beobachtung hat Grenzen. Häder (2015) führt den hohen Kosten- und Zeitaufwand einer Beobachtung im Vergleich zu einer Befragung als eine Limitation an. Zudem wird ein Themenkomplex in einer Befragung umfassender beleuchtet als mit der Beobachtungsmethodik (Häder, 2015). Zuletzt ist die Befragung als Methode in der empirischen Sozialforschung weiter verbreitet und in der Literatur ausführlicher und differenzierter erforscht als die Methode der Beobachtung (Häder, 2015).

In Abwägung der Vor- und Nachteile wird im ersten Schritt dieser Arbeit die Methode der wissenschaftlichen Beobachtung zur Bildung eines ersten Eindrucks der unbewussten Handlung des Ein- und Aussteigens bei Nutzfahrzeugen in einem natürlichen Umfeld angewendet. Um die Lkw-Fahrer in ihrem alltäglichen Bewegungsablauf nicht zu beeinflussen, wird eine nicht-teilnehmende, verdeckte, non-reaktive Form der Beobachtung gewählt (Bortz & Döring, 2006). Dabei handelt es sich um eine direkte und unvermittelte Feldbeobachtung (Häder, 2015) einer Ereignisstichprobe (Bortz & Döring, 2006).

Probandenkollektiv

Aufgrund der non-reaktiven Form der Beobachtung, können keine demografischen Daten erhoben werden. Es werden ausschließlich männliche Fahrer beobachtet, was aufgrund der geringen Anzahl weiblicher Fernfahrer nicht verwundert (Lohre et al., 2014). In Bezug auf die Nationalität, Alter oder Fahrzeug gibt es keine Ausschlusskriterien. Insgesamt werden 19 Ein- und Ausstiegsvorgänge beobachtet. Davon finden 16 an einem dreistufigen und drei an einem vierstufigen Lkw statt.

Ablauf

Die Beobachtung wird nach den Modellierungsregeln von Bortz und Döring (2006) gestaltet. Im ersten Schritt wird die Ein- und Ausstiegsbewegung selektiert. Das Ereignis des Betretens und Verlassens der Fahrerkabine wird aus dem Handlungskontext herausgelöst und auf die Bewegung an sich und mögliche Störeinflüsse reduziert. Die Klassifikation der Bewegung erfolgt anhand eines Beobachtungsprotokolls über die Zuordnung der interagierenden Körperteile zu den Geometrieelementen. Über Häufigkeitsverteilungen werden die beobachteten Ereignisse systematisiert und im Gesamtkontext relativiert (Bortz & Döring, 2006). Das Beobachtungsprotokoll ist halbstandardisiert und im Anhang I (Seite CLIII) aufgeführt. Aufgrund der verdeckten Form der Beobachtung können keine Videoaufnahmen während der Beobachtung eingesetzt werden. Ein Beobachter protokolliert die Interaktionen und Auffälligkeiten während der Zugangsbewegung der Lkw-Fahrer. Erfahrungsgemäß füllen sich Autobahnraststätten ab dem späten Nachmittag, sobald die Fahrer entsprechend den gesetzlichen Lenk- und Ruhezeiten einen Übernachtungsplatz suchen. Daher wird die Beobachtungsstudie werktags ab 15:30 Uhr begonnen. Nach circa 17:00 Uhr ist der Parkplatz so voll, dass die Fahrzeuge dicht nebeneinander parken. In dieser Situation ist keine distanzierte Beobachtung der Fahrerbewegungen mehr möglich und die Zugangssituation hat sich aufgrund der halbgeöffneten Tür geändert.

5.2.3 Ergebnisse: Unbewusstes Wissen aus der Beobachtungsstudie

Die Studie zeigt, dass die Bewegungen in das Fahrzeug hinein und aus dem Fahrzeug heraus nicht durch reines Beobachten protokolliert werden kann. Die Ein- und Ausstiegsbewegung ist eine komplexe Ganzkörper-Bewegungen, deren Ablauf die Interaktion aller vier Extremitäten erfordert. Zudem sind die Möglichkeiten der Interaktion zwischen den Extremitäten und der Zugangsgeometrie zahlreich und die Variationen groß. Die Interaktionswechsel finden in einem sehr kurzen Zeitrahmen statt. Damit ist die reine Beobachtung nicht geeignet, den Bewegungsablauf des Ein- und Aussteigens umfassend zu erfassen.

Für die Fahrer ist das Einsteigen ein flüssiger Bewegungsablauf vom Herantreten an das Fahrzeug, Öffnen der Türe, Hochklettern und auf den Fahrersitz schwingen. Teilweise steigen die Fahrer mehrmals Tür hintereinander bei geöffneter ein und aus und überprüfen Funktionen am Fahrzeug. Folglich nehmen die Fahrer nicht nach jedem Einsteigen die Fahrhaltung auf dem Fahrerplatz ein. Teilweise steigen sie im Fahrzeuginneren durch oder steigen die Trittstufen hoch, um etwas aus dem Fahrzeug herauszuholen. Steigt ein Fahrer in sein Fahrzeug mit dem Ziel dort länger zu verweilen, gibt es Fahrer, die entweder mit beiden Füßen auf der obersten Stufe zum Halten kommen und ihre Straßenschuhe ausziehen und stehen lassen oder einen Straßenschuh auf der zweitobersten und einen auf der obersten Stufe ausziehen. Zu einem späteren Zeitpunkt erzählen Lkw-Fahrer, dass die Kabine neben ihrem Arbeitsplatz ihr Wohn- und Schlafzimmer ist (vgl. auch Michel, 2014) und dies betreten sie nicht mit Straßenschuhen. Diese Besonderheit des Schuhwechsels tritt nur bei Fernfahrern auf.

Beim Aussteigen wird das gegenteilige Verhalten beobachtet: die Fahrer ziehen ihre Straßenschuhe, die auf der obersten oder den obersten beiden Stufen stehen, an und steigen anschließend aus. Wird der Zwischenhalt zum Schuhwechsel nicht durchgeführt, ist das Öffnen der Tür und das Hinabsteigen der Stufen ein flüssiger Bewegungsablauf. Ein Fahrer öffnet zum Aussteigen die Fahrertüre mit der linken Hand und steigt während des Öffnens auf die oberste Stufe hinab. Während des weiteren Ausstiegsvorgangs nutzt er den Griff an der Innenseite der Tür als Halteoption und hält sich mit der rechten Hand am Haltegriff an der A-Säule fest. Damit ist der Fahrer mit seiner Körperachse zur A-Säule orientiert und nutzt einen kompakten Raum zum Aussteigen. Ein weiterer Fahrer erzählt zu einem späteren Zeitpunkt, dass die Haltestange an der B-Säule kürzer ist als die an der A-Säule. Zusammen mit den linksseitig angeordneten Trittstufen, nimmt der Fahrer eine nach rechts unten schräge Körperhaltung ein, die bei ihm das Gefühl des „Herausfallens“ hervorruft.

Über alle Ein- und Ausstiegsbeobachtungen hinweg werden der Türgriff an der Innenseite der Tür, die Haltestangen an der A- und B-Säule und das Lenkrad identifiziert. Die Tür bzw. der Türgriff werden in engen Parksituationen als Halteoption verwendet. Parken zwei Lkw nebeneinander, kann die Fahrertür nicht komplett geöffnet werden. In diesem Fall halten die Fahrer während der Ein- und Ausstiegsbewegung die Tür fest, um das Nachbarfahrzeug nicht zu beschädigen. Die Tür kann dabei entweder durch die Federbewegung des Fahrzeugs, einem unbewussten Anstoßen an der Tür durch den Fahrer oder durch den Wind aufgestoßen werden.

Zudem werden Verhaltensweisen beobachtet, die offensichtlich vom gedachten Vorgehen abweichen. Ein Fahrer hält während des Aussteigens einen Gegenstand in der Hand und greift gleichzeitig den Gegenstand und die Haltestange. Zudem wird beobachtet, dass Fahrer nicht alle Trittstufen für das Ein- und Aussteigen nutzen. Sowohl beim dreistufigen (2 Fahrer) als auch beim vierstufigen (1 Fahrer) Lkw lassen Fahrer jeweils die unterste Stufe aus.

5.3 Nutzerbefragung am Fernverkehrsrastplatz

5.3.1 Motivation: Bewertung der Zugangsgeometrie durch Lkw-Fahrer

Im zweiten Schritt zur Erfassung der Einflussfaktoren auf die Ein- und Ausstiegsbewegung wird eine Nutzerbefragung¹² durchgeführt. Ziel der Studie ist es die Sicht der Berufskraftfahrer auf die Zugangsgeometrie zu erfassen. Die Befragung zeigt Verbesserungspotentiale und die Gewichtung verschiedener Bewertungsaspekte aus Sicht der Lkw-Fahrer auf.

5.3.2 Methode: Nutzerbefragung

An der Befragung nehmen 35 Berufskraftfahrer teil. Zwei der Teilnehmer werden aufgrund bewusster Antwortmustern von der Auswertung ausgeschlossen. Die verbleibenden 33 Probanden, alle männlich, haben ein Durchschnittsalter von 48,5 Jahren ($SD = 11,5$ Jahre). Abgesehen von einem Teilnehmer, fahren alle mehr als 80.000 km pro Jahr mit dem Lkw. Jeder Proband hat sein eigenes Fahrzeug und muss dies nicht mit Kollegen teilen. Die Fahrzeuge haben zu 78,8 % drei und zu 21,2 % vier Einstiegsstufen.

Die Angaben der Berufskraftfahrer zeigen, dass das Ein- und Aussteigen einen wichtigen Anteil im Arbeitsalltag ausmacht. Im Durchschnitt steigen die Fahrer 19,5 mal ($SD = 9,9$ mal; Wertebereich = 3-55 mal) pro Arbeitstag ein und aus. Auf einen 8-h Arbeitstag hochgerechnet, bedeutet dies, dass die Fahrer alle 25 min das Fahrzeug betreten oder verlassen. Dieser Wert ist für Fernfahrer hypothetisch zu sehen. Bei ihnen ballen sich die Ein- und Ausstiegsvorgänge vor Fahrtbeginn, während den Pausenzeiten und nach Fahrtende. Die Angabe der Fernfahrer bestätigt die Beobachtungen von Michel (2014), dass entgegen der allgemeinen Meinung nicht nur Fahrer im Verteilerverkehr häufig ein- und aussteigen, sondern auch Fernfahrer.

Die Umfrage findet an einem Fernverkehrsrastplatz statt. Im ersten Teil der Studie zeichnen die Teilnehmer ihre Wunschvorstellung von einem Lkw-Zugang auf. Dazu steht ihnen eine schematische Seitenansicht eines Nutzfahrzeugs im Maßstab 1:14,5 auf einem DIN A3 Blatt zur Verfügung. Als Peripherie sind der Türausschnitt, der Fahrersitz, das Lenkrad und die Instrumententafel abgebildet. Die Fahrer positionieren ein maßstabsgenaueres Vorderrad entlang der unteren Rahmenkante. Die Skizzen werden grafisch analysiert.

Im zweiten Teil der Studie bewerten die Probanden die 17 Zugangskonzepte (Abbildung 5-1) in permutierter Reihenfolge. Die Konzepte stehen den Fahrern als 3D-Bilder in verschiedenen Ansichten zur Verfügung. Die Konzepte unterscheiden sich im Stufenauszug (leiterartig oder treppenartig), der Zugangsseite (Fahrerseite vor dem Fahrersitz, Fahrerseite hinter dem Fahrersitz, Beifahrerseite, Rückwand, Vorderseite und weiteren Sonderformen), ausklappbare oberste / unterste Stufe, Steh-Lift, Sitz-Lift und Rampe. Die Konzepte werden auf einer fünfstufigen Likert-Skala nach den Aspekten Alltagstauglichkeit, Zugangskomfort, körperliche Anstrengung, Zugangsgeschwindigkeit, zusätzliche Gefährdung im Falle eines Unfalls, Verkehrssicherheit und Benutzbarkeit im Alter bewertet. Diese Daten werden mit einem Friedman-Test mit einer posthoc-Korrektur nach Dunn-Bonferroni ausgewertet. Das Signifikanzniveau liegt bei $\alpha = 0.05$. Die Effektgröße wird nach Cohen (1992) berechnet. Ab $r = 0.1$ liegt ein schwacher Effekt vor, ein mittlerer Effekt tritt ab $r = 0.3$ auf und ein starker Effekt ist ab $r = 0.5$.

¹² Die Nutzerbefragung fand im Rahmen der Studienarbeit von Hüger (2017) statt. Sofern nicht anders angegeben, sind die Ergebnisse vom Autor ausgewertet.

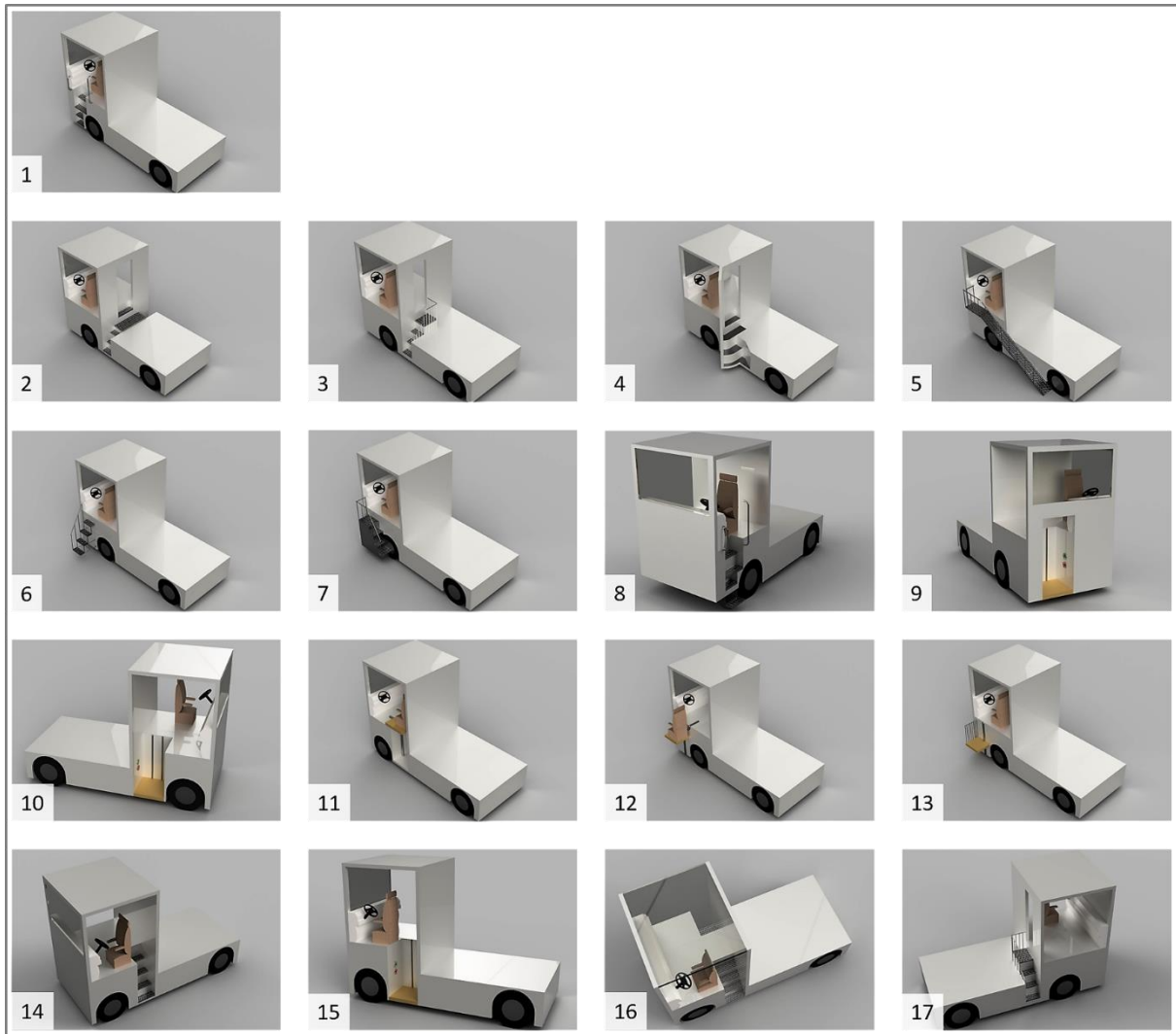


Abbildung 5-1: Zugangskonzepte für die Nutzerbefragung nach Hüger (2017)

5.3.3 Ergebnisse: Implizites Wissen aus der Nutzerbefragung

Die grafischen Lösungen aus dem ersten Teil der Nutzerbefragung sind in Abbildung 5-2 und Abbildung 5-3 dargestellt. Die schwarzen Linien zeigen die Einzellösungen der Fahrer und in Rot sind die Mittelwerte der jeweiligen Cluster dargestellt.

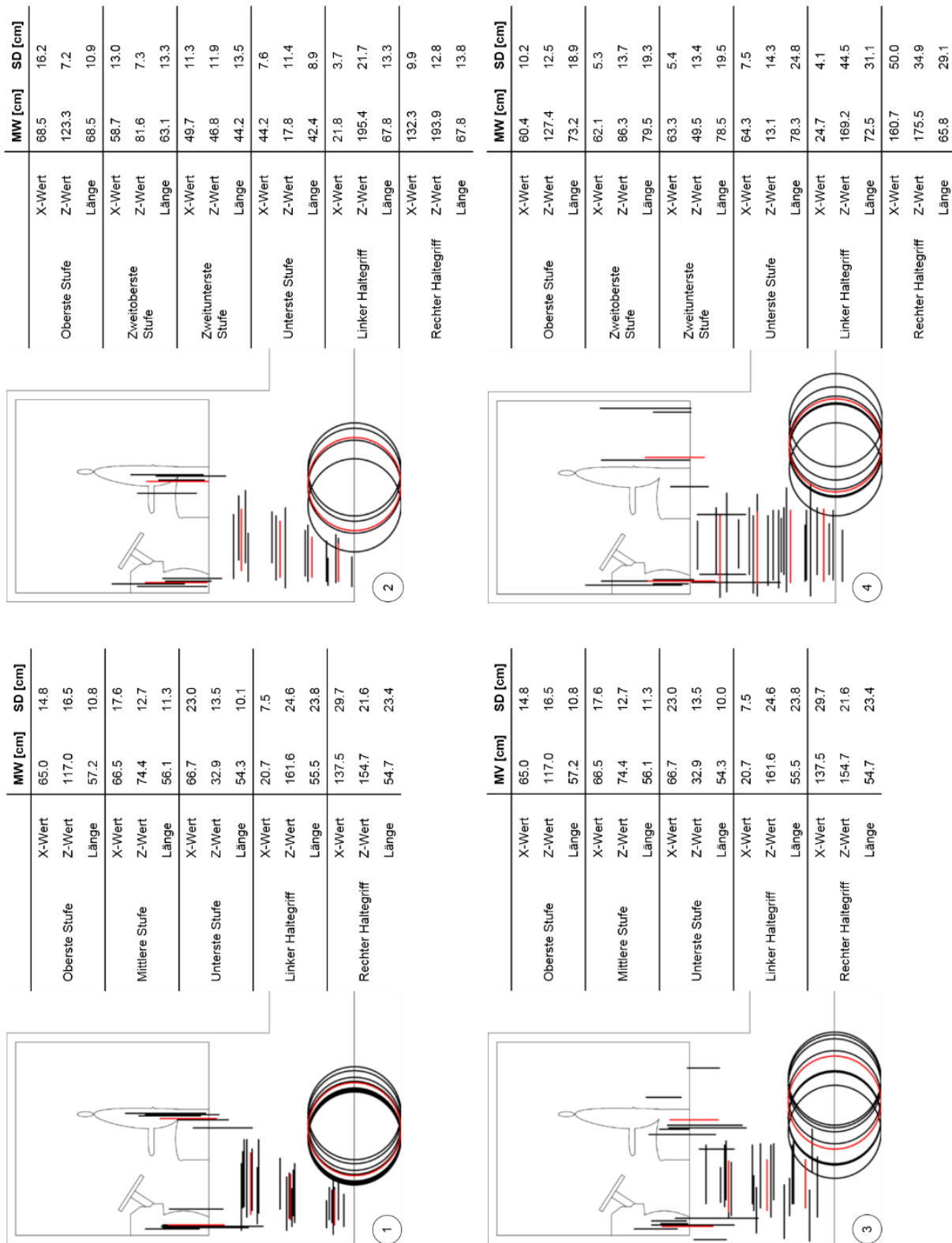


Abbildung 5-2: Ergebnisse aus dem ersten Teil der Nutzerbefragung – Teil 1 nach Hüger (2017)

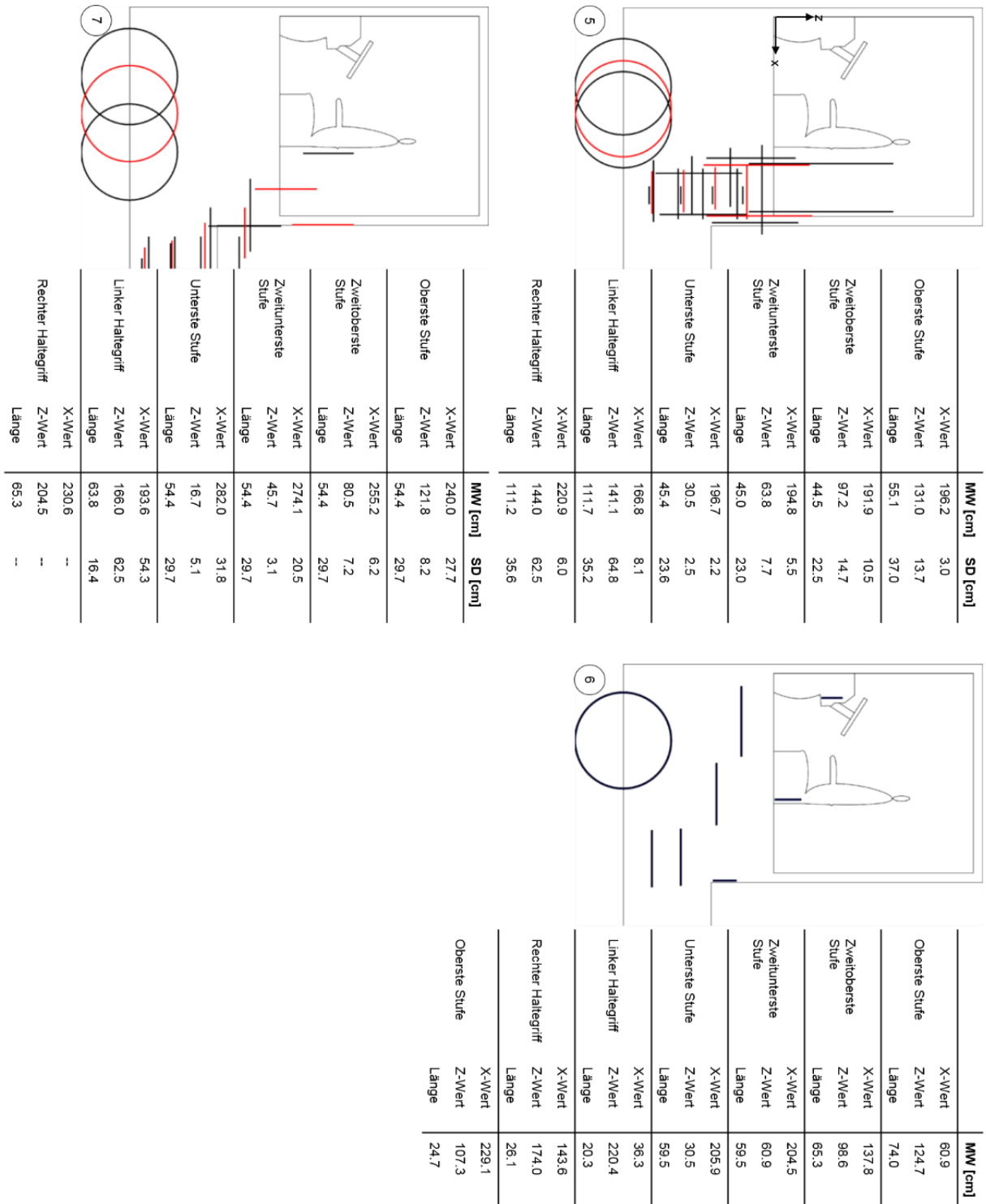


Abbildung 5-3: Ergebnisse aus dem ersten Teil der Nutzerbefragung – Teil 2 nach Hüger (2017)

Die Zeichnungen der Fahrer lassen sich in sieben Gruppen einteilen. Vier Gruppen lassen den Fahrer vor der Vorderachse, linksseitig zur Zugangsöffnung ein- bzw. aussteigen. Dazu verwenden die Gruppen 1 und 2 drei Trittstufen und die Gruppen 3 und 4 vier Trittstufen (Abbildung 5-2). Innerhalb dieser Gruppen unterscheiden sich die Stufenbreiten der einzelnen Trittstufen: bei den Gruppen 1 und 3 wünschen sich die Fahrer unterschiedlich breite Stufen, während bei Gruppe 2 und 4 die einzelnen Trittstufen gleichbreit gezeichnet werden. Die fünfte Gruppe präferiert einen Zugang an der Fahrzeugseite hinter dem Fahrersitz. Während sich ein Fahrer ein Treppenaufgang über die Fahrzeugseite hinweg wünscht (Abbildung 5-3). Die siebte Gruppe bevorzugt einen Zugang über die Kabinenrückwand (Abbildung 5-3).

In Bezug auf den zweiten Teil der Nutzerbefragung, unterscheiden sich die 17 Zugangskonzepte aus Abbildung 5-1 signifikant, $\chi^2(17) = 93,266$, $p < 0.000$. In Abbildung 5-4 ist die Verteilung der mittleren Ränge für alle Zugangskonzepte dargestellt. Konzept 16 erreicht den höchsten Rang mit einem Wert von 12,12 aus 17, gefolgt von dem aktuellen Zugangsmodell. Konzept 5 erzielt den niedrigsten Rang.

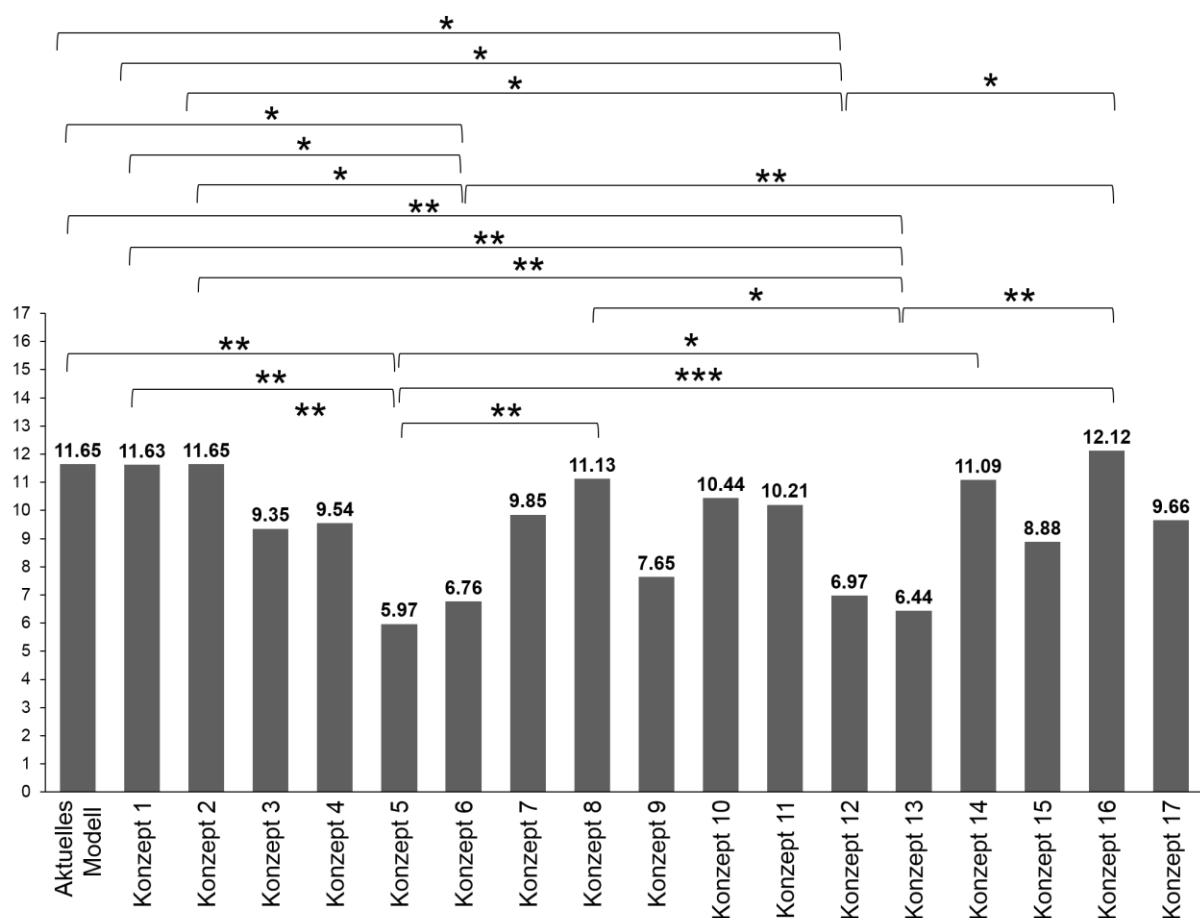


Abbildung 5-4: Verteilung der Ränge der Zugangskonzepte (*signifikant $p \leq 0.05$, **sehr signifikant $p \leq 0.01$, *** hoch signifikant $p < 0.00$)

Im Folgenden werden die Ergebnisse der post-hoc Tests für jeden abgefragten Aspekt betrachtet. Beispielhaft für die Zugangskonzepte werden Konzept 2, 5, 13, 16 und das aktuelle Modell aufgeführt. Konzept 2 repräsentiert einen Zugang durch die Kabinenrückwand, während Konzept 5 eine externe Rampe darstellt. In Konzept 13 wird ein Lift-System abgebildet und Konzept 16 bietet einen Zugang seitlich vom Fahrzeug hinter dem Fahrersitz an.

In Tabelle 5-1 sind die Ergebnisse der post-hoc Tests für alle bewerteten Aspekte aufgelistet. In Bezug auf den Aspekt der Alltagstauglichkeit liegt ein hoch signifikanter Unterschied zwischen den Einstiegs Konzepten vor, $\chi^2(17) = 178,379$, $p < 0.000$. Auch beim Einstiegs komfort kommt es zu hoch signifikanten Unterschieden, $\chi^2(17) = 73,089$, $p < 0.000$. Die Konzepte unterscheiden sich hoch signifikant für den Aspekt der Benutzbarkeit im Alter, $\chi^2(17) = 91,034$, $p < 0.000$. Ebenso unterscheiden sich die Konzepte im Punkt der zusätzlichen Gefährdung im Falle eines Unfalls hoch signifikant, $\chi^2(17) = 113,223$, $p < 0.000$. Die Fahrer sehen hoch signifikante Unterschiede zwischen den Zugangskonzepten im Bereich der körperlichen Anstrengung, $\chi^2(17) = 133,136$, $p < 0.000$, und für die Zugangsgeschwindigkeit, $\chi^2(17) = 113,694$, $p < 0.000$. Zuletzt treten hoch signifikante Unterschiede im Bereich der Verkehrssicherheit zwischen den zu bewertenden Konzepten auf, $\chi^2(17) = 152,176$, $p < 0.000$.

Tabelle 5-1: Ergebnisse der post-hoc Tests für alle bewerteten Aspekte

Alltagstauglichkeit				Körperliche Anstrengung			
Paarweiser Vergleich	z-Wert	p-Wert angepasst	Effektgröße <i>r</i>	Paarweiser Vergleich	z-Wert	p-Wert angepasst	Effektgröße <i>r</i>
K 5 – K 1	5,713	0,000	1,01	K 5 – K 1	5,713	0,000	1,01
K 5 – K 2	4,741	0,000	0,84	K 5 – K 2	4,741	0,000	0,841
K 5 – K 8	-5,713	0,000	1,01	K 5 – K 8	-5,713	0,000	1,01
K 5 – K 14	3,980	0,011	0,70	K 5 – K 14	3,980	0,011	0,70
K 5 – K 16	-4,765	0,000	0,84	K 5 – K 16	-4,765	0,000	0,84
K 5 – akt. Modell	6,228	0,000	1,10	K 5 – akt. Modell	6,228	0,000	1,10
K 12 – K 2	4,671	0,000	0,83	K 12 – K 2	4,671	0,000	0,83
K 12 – K 16	-4,695	0,000	0,83	K 12 – K 16	-4,695	0,000	0,83
K 12 – akt. Modell	6,158	0,000	1,09	K 12 – akt. Modell	6,158	0,000	1,09
K 13- K 1	-5,409	0,000	0,96	K 13 – K 1	5,409	0,000	0,96
K 13 – K 2	4,437	0,001	0,78	K 13 – K 2	4,437	0,001	0,78
K 13 – K 8	5,409	0,000	0,96	K 13 – K 8	5,409	0,000	0,96
K 13 – K 14	-3,676	0,036	0,65	K 13 – K 14	-3,676	0,036	0,65
K 13 – K 16	-4,460	0,001	0,79	K 13 – K 16	-4,460	0,001	0,79
K 13 – akt. Modell	5,924	0,000	1,05	K 13 – akt. Modell	5,924	0,000	1,05
K 9 – K 2	4,367	0,002	0,77	K 9 – K 2	4,367	0,002	0,77
K 9 – K 16	-4,390	0,002	0,78	K 9 – K 16	-4,390	0,002	0,77
K 9 – akt. Modell	5,854	0,000	1,03	K 9 – akt. Modell	5,854	0,000	1,03
K 6 – K 2	4,250	0,003	0,75	K 6 – K 2	4,250	0,003	0,75
K 6 – K 16	-4,273	0,000	0,76	K 6 – K 16	-4,273	0,003	0,76
K 6 – akt. Modell	5,737	0,000	1,01	K 6 – akt. Modell	5,737	0,000	1,01
K 10 – K 2	3,793	0,023	0,65	K 10 – K 2	3,793	0,023	0,67
K 10 – K 16	3,817	0,021	0,66	K 10 – K 16	3,817	0,21	0,67

K 10 – akt. Modell	5,280	0,000	0,93
K 15 – K 2	3,700	0,033	0,65
K 15 – K 16	-3,723	0,030	0,66
K 15 – akt. Modell	5,186	0,000	0,92

K 10 – akt. Modell	5,280	0,000	0,93
K 15 – K 2	3,700	0,033	0,65
K 15 – K 16	-3,723	0,030	0,66
K 15 – akt. Modell	5,186	0,000	0,92

Einstiegskomfort			
Paarweiser Vergleich	z-Wert	p-Wert angepasst	Effektgröße <i>r</i>
K 5 – K 2	3,817	0,021	0,67
K 5 – K 9	-3,899	0,005	0,73
K 5 – K 10	-4,613	0,001	0,82
K 5 – K 11	-4,460	0,001	0,79
K 5 – K 12	-4,355	0,002	0,77
K 5 – K 15	-4,859	0,000	0,86
K 5 – K 16	-3,899	0,015	0,92

Geschwindigkeit			
Paarweiser Vergleich	z-Wert	p-Wert angepasst	Effektgröße <i>r</i>
K 12 – K 2	4,507	0,001	0,80
K 12 – K 16	-4,648	0,001	0,82
K 12 – akt. Modell	4,999	0,000	0,88
K 13 – K 1	5,128	0,000	0,91
K 13 – K 2	4,121	0,006	0,73
K 13 – K 7	4,566	0,001	0,81
K 13 – K 8	3,723	0,030	0,66
K 13 – K 16	-4,261	0,003	0,75
K 15 – K 2	3,758	0,26	0,66
K 15 – K 16	-3,899	0,015	0,69
K 15 – akt. Modell	4,250	0,003	0,75
K 10 – akt. Modell	3,875	0,016	0,69

Benutzbarkeit im Alter			
Paarweiser Vergleich	z-Wert	p-Wert angepasst	Effektgröße <i>r</i>
K 5 – K 10	-4,343	0,002	0,76
K 5 – K 11	-3,817	0,021	0,67
K 5 – K 12	-4,039	0,008	0,71
K 5 – K 15	-4,004	0,010	0,71
akt. Modell – K 10	-3,781	0,024	0,67

Verkehrssicherheit			
Paarweiser Vergleich	z-Wert	p-Wert angepasst	Effektgröße <i>r</i>
K 6 – K 2	6,673	0,000	1,18
K 6 – K 16	-6,767	0,000	1,20
K 6 – akt. Modell	5,022	0,000	0,89
K 5 – K 1	4,332	0,002	0,77
K 5 – K 2	6,018	0,000	1,06
K 5 – K 3	3,922	0,013	0,69
K 5 – K 8	4,683	0,000	0,83
K 5 – K 11	-3,817	0,021	0,67
K 5 – K 14	-4,027	0,009	0,71
K 5 – K 16	-6,111	0,000	1,08
K 5 – K 17	-4,121	0,006	0,73
K 5 – akt. Modell	4,367	0,002	0,77

Zusätzliche Gefährdung im Falle eines Unfalls			
Paarweiser Vergleich	z-Wert	p-Wert angepasst	Effektgröße <i>r</i>
K 13 – K 1	4,905	0,000	0,87
K 13 – K 2	3,746	0,027	0,66
K 13 – K 8	4,308	0,003	0,76
K 13 – K 14	-4,109	0,006	0,73
K 13 – K 16	-4,870	0,000	0,86
K 13 – akt. Modell	4,835	0,000	0,85
K 5 – K 1	4,765	0,000	0,84
K 5 – K 2	3,606	0,048	0,64
K 5 – K 8	-4,168	0,005	0,74

K 5 – K 14	-3,969	0,011	0,70	K 13 – K 1	4,109	0,006	0,73
K 5 – K 16	-4,730	0,000	0,84	K 13 – K 2	5,795	0,000	1,02
K 5 – akt. Modell	4,695	0,000	0,83	K 13 – K 3	3,700	0,033	0,65
K 6 – K 16	-4,671	0,000	0,83	K 13 – K 8	4,460	0,001	0,79
K 6 – akt. Modell	4,636	0,001	0,82	K 13 – K 11	3,591	0,050	0,63
K 9 – K 16	-4,226	0,004	0,75	K 13 – K 14	-3,805	0,022	0,67
K 9 – akt. Modell	4,191	0,004	0,74	K 13 – K 16	-5,009	0,000	0,89
K 12 – K 16	-4,180	0,004	0,74	K – K 17	-3,899	0,015	0,69
K 12 – akt. Modell	4,144	0,005	0,73	K 13 – akt. Modell	4,144	0,005	0,73

Die Bewertung der 17 Zugangskonzepte zeigt, dass Lkw-Fahrer eine innenliegende Geometrie bevorzugen. Bei Bauteilen, die über die Fahrzeugseiten hinausstehen oder beweglich sind, besteht die Gefahr, dass diese im Falle eines Unfalls so beschädigt werden, dass die Fahrer sie nicht mehr zum Aussteigen nutzen können. Diese Bedenken stehen im Gegensatz zu der grafischen Lösung im ersten Teil (Gruppe 6). Treppenartige Konzepte und Liftsysteme werden ein hoher Einstiegskomfort und eine niedrige körperliche Anstrengung zugeordnet. Liftsysteme haben den Vorteil, dass sie auch im Alter gut benutzbar sind. Einen Nachteil von Liftsystemen sehen die Fahrer in der Benutzungsgeschwindigkeit, die sie im Vergleich zu den anderen Konzepten als niedrig einschätzen. Konzepte mit einem treppenartigen Zugang, unabhängig ob der Zugang vor oder hinter dem Fahrersitz ist, favorisieren die Fahrer und bewerten diese in den Aspekten Alltagstauglichkeit und Verkehrssicherheit am besten.

5.4 Experten-Workshop zu Störgeometrien und Strategien

5.4.1 Motivation: Zugangsgeometrie im Vergleich der europäischen Hersteller

In den vorherigen Abschnitten 5.2.2 und 5.2.3 werden Lkw-Fahrer zur Zugangsgeometrie und ihren individuellen Vorlieben beobachtet und befragt. Hierbei steht das implizit erworbene Wissen der Lkw-Fahrer im Fokus. Dieses wird im Folgenden durch das explizite Sonderwissen (Littig, 2008) von Experten in einem Workshop ergänzt.

5.4.2 Methode: Experten-Workshop

Als Experten werden Mitarbeiter der Benchmark-Abteilung eines europäischen Nutzfahrzeugherstellers ausgewählt. Die vier Experten betreuen die Bereiche *Fernverkehr*, *Baustellenverkehr*, *Verteilerverkehr* und *Bus*. Es werden bewusst Experten aus unterschiedlichen Sektoren zu diesem Workshop geladen, um ein breites Feld zu beleuchten und Anregungen und Vergleiche aus anderen Segmenten zu ziehen und gegebenenfalls auf den Fernverkehr zu übertragen.

Der tägliche Arbeitsalltag der Experten wird vom Analysieren, Bewerten und Vergleichen von Produkten bestimmt. Sie ermitteln Stärken und Schwächen der Fahrzeuge und führen diese auf grundlegende Ursachen zurück (Sabisch & Tintelnot, 1997). Durch diese Arbeitsinhalte bauen die Teilnehmer ein explizites, praxiswirksames Wissen (Bogner, Littig, & Menz, 2014) auf, auf das nicht über andere Quellen zugegriffen werden kann (Littig, 2008). Anhand des expliziten Wissens werden die Ergebnisse der Hauptversuche eingeordnet und erste Anhaltspunkte für Einflussfaktoren auf das Bewegungsverhalten identifiziert.

Nach der Empfehlung von Mey und Mruck (2010) werden im Vorfeld Fragen ausgearbeitet und ausformuliert, um zielgerichtet durch den Workshop zu führen und jeder Zeit dem Gespräch neue Impulse zu geben und den Gesprächsfaden nicht abreißen zu lassen. Dieser Fragenkatalog dient zugleich zur Kontrolle, dass am Ende des Workshops alle relevanten Aspekte abgearbeitet sind. (Mey & Mruck, 2010)

1. Was stört Sie am Ein-/Ausstieg?
2. Gibt es Störgeometrien, an denen Sie sich beim Ein-/Aussteigen öfters anstoßen?
3. Wo halten Sie sich fest beim Ein-/Aussteigen, wenn Sie nichts in den Händen halten?
4. Wo halten Sie sich fest beim Ein-/Aussteigen, wenn Sie Unterlagen in den Händen halten?
5. Fehlen Ihnen Halte- und Griffmöglichkeiten beim Ein-/Aussteigen?
6. Haben Sie eine Strategie beim Ein-/Aussteigen?
7. Wie würden Sie den Lkw Ein-/Ausstieg in Bezug auf Sicherheit bewerten?
8. Wie würden Sie den Lkw Ein-/Ausstieg in Bezug auf Komfort bewerten?

Zum Transkribieren der Ergebnisse werden die Diskussionen aufgezeichnet (Bogner et al., 2014; Mey & Mruck, 2010). Mit der Fotokamera kann zudem eine Dokumentation an Anschauungsobjekten erfolgen, sofern dies möglich ist. Der Ablauf des Workshops ist an Bogner et al. (2014) angelehnt. In Abschnitt 5.4.3 werden die Ergebnisse der Expertenbefragung zusammengefasst. Da Bogner et al. (2014) postulieren, dass Spezialisten das Gebiet ihrer Expertise richtig darstellen, werden die Aussagen der Befragten als wahr angenommen. Die Resultate sind, sofern nicht anders gekennzeichnet, für alle befragten Fahrzeugsegmente gültig.

5.4.3 Ergebnisse: Explizites Wissen aus dem Experten-Workshop

Als erste Störgeometrie wird die Blinkerwarze genannt. Diese befindet sich seitlich jeweils am rechten und linken Kotflügel und zeigt den Fahrtrichtungswunsch an. Nach einstimmiger Meinung der Experten begünstigt eine hervorstehende Blinkerwarze, wie sie in Abbildung 5-5 rechts zu sehen ist, Kollisionen beim Ein-/Aussteigen des Fahrers am Schienbein oder auf Kniehöhe. Dieser Zustand verschärft sich bei teilgeöffneter Tür – eine Situation, wie sie oft im Alltag von Lkw-Fahrern aufgrund enger Parkplatzsituationen an Raststätten oder bei Anlieferungen auftritt. Flach in den Kotflügel integrierte Blinkerwarzen, wie in Abbildung 5-5 links dargestellt, verringern das Verletzungsrisiko der Fahrer.



Abbildung 5-5: flach integrierte Blinkerwarze im Kotflügel (li) und hervorstehende Blinkerwarze (re) in Gelb eingekreist

Neben der hervorstehenden Blinkerwarze, sind in Abbildung 5-5 im rechten Bild zwei weitere Störelemente sichtbar: der breite Kotflügel, der in den Eingangsbereich hineinragt und diesen verkleinert, und die Teilung zwischen der fahrwerkfesten, untersten Stufe und dem kippbaren Fahrerhaus. Die Breite des Kotflügels macht sich vor allem in Situationen mit halbgeöffneter Tür bemerkbar, wenn der Fahrer sich vom Anhänger her der Fahrertür annähert und zwischen der halbgeöffneten Tür und dem Kotflügel einsteigt. In dieser Situation verdeckt der Kotflügel die tieferliegenden Trittstufen und der Fahrer muss seinen Fuß um den Kotflügel herumfädeln, um auf die Trittstufen steigen zu können. Die Teilungsfuge zwischen der mittleren und der untersten Stufe resultiert aus der Möglichkeit das Fahrerhaus zu kippen. Um den Motor in Falle von Instandhaltungsmaßnahmen zu erreichen, wird die Kabine mit allen fahrerhausfesten Bauteilen – wie die obere und mittlere Trittstufe – nach vorne gekippt. Fahrwerksfeste Bauteile – wie die unterste Stufe und der Kotflügel – werden nicht gekippt. Die dadurch entstehende Teilungsfuge liegt im rechten Bild der Abbildung 5-5 unterhalb der Blinkerwarze. Besonders beim Absteigen vom Fahrerhaus, wenn der Fahrer die nächsttiefere Stufe nicht einsieht, passiert es, dass der Fahrer in die Teilungsfuge tritt, keinen sicheren Halt findet und abrutscht.

Die Experten weisen darauf hin, dass der von der BGV-D29 empfohlene einheitliche Stufenabstand von den Herstellern nicht eingehalten wird und bestätigen damit die Analyse der europäischen Fernfahrerinnen in Abschnitt 2.2. Zudem schätzen sie den maximalen Abstand von 400 mm zwischen den Tritten als zu groß ein. Ein Experte befürwortet mehr Stufen mit geringeren Abständen zueinander. Der Abstand zwischen der untersten Stufe und dem Fahrbahnboden darf nach BGV-D29 zum Schutz vor Beschädigungen auf max. 500 mm angehoben werden. Der vergrößerte Abstand zwischen der Fahrbahn und der untersten Stufe erschwert, aus Sicht der Experten, vor allem die Einstiegsbewegung.

Der nächste Kritikpunkt der Experten bezieht sich auf die Rutschfestigkeit der Trittbretter. Die Trittsicherheit der Stufen muss bei allen Wetter- und Witterungsverhältnissen sichergestellt sein. Die BGV-D29 schlägt Lochbleche, Roste, Profilierungen, Riffelbleche oder geeignete Überzüge vor, um die Trittsicherheit von außenliegenden und witterungsgeschützten Stufen zu gewährleisten. In Abbildung 5-6 sind zwei Varianten dargestellt, die die Trittsicherheit in unterschiedlicher Weise umsetzen. Beide Umsetzungen sind BGV-D29-konform. In dem linken Bild in Abbildung 5-6 weisen die Trittbretter große Zwischenräume auf, durch die Schnee und Matsch hindurchfällt, während bei dem rechten Trittbrett in Abbildung 5-6 kleinere Lochöffnungen verwendet werden. Wie in Abbildung 5-6 zu sehen, bleiben Schnee- und Matschrückstände auf den Trittflächen zurück. Diese Schnee- und Matschrückstände erhöhen das Ausrutsch- und damit Verletzungsrisikos der Fahrer. Die zackigen Stufenkanten im linken Bild von Abbildung 5-6 bieten zudem einen sicheren Halt auf dem Trittbrett, im Gegensatz zu den nach oben glatten ausgestülpten Lochöffnungen im rechten Bild der Abbildung 5-6.



Abbildung 5-6: Stufen mit großen Zwischenräumen und gezackten Kanten (links), Stufen mit glatt ausgetüpten Lochöffnungen auf der Schnee und Matsch liegen bleibt (rechts)



Abbildung 5-7: unterste Trittstufe bei Baustellenfahrzeugen (Sawade, 2017)

Im Baustellenbereich wird die unterste Stufe beweglich ausgeführt, um Beschädigungen im Baustellenbetrieb zu reduzieren. Die Ausführung dieser flexiblen, untersten Stufe ist herstellerabhängig. In Abbildung 5-7 sind vier Ausführungen dargestellt. Die Pfeile und ihre Größe geben die Bewegungsrichtung und den Bewegungsumfang an. Die unterste Stufe in Bild 1 und 3 aus Abbildung 5-7 ist in Fahrzeuginnen- und -außenrichtung beweglich. Die Stufe in Bild 2 ist minimal beweglich und in Bild 4 einklappbar und damit nur in Fahrzeuginnenrichtung beweglich. Vor allem die Beweglichkeit in Fahrzeuginnenrichtung, wie in Bild 1 und 3, führt zu einem „schwammigen“ Einstieg, bei dem die flexible Stufe durch die beim Einstieg wirkenden Kräfte in Fahrzeuginnenrichtung ausweicht und der Fahrer mit dem Schienbein an das nächsthöhere Geometrieelement, im Regelfall die nächsthöhere Trittstufe, anstößt.

Neben der Stufenausführung kritisieren die Experten die Stufenausrichtung. In der Draufsicht in Abbildung 5-8 ist diese Thematik für die Fahrerseite dargestellt. Die Stufe ist an die Fahrerhausform angepasst, zur Fahrertür ausgerichtet und somit weg vom Fahrer gedreht, der sich vom linken Seitenrand her annähert. Aus Fahrersicht verdeckt der Kotflügel einen Teil der Trittstufe. Die effektive Trittsfläche, die in Abbildung 5-8 in blau angedeutet ist, reduziert sich.

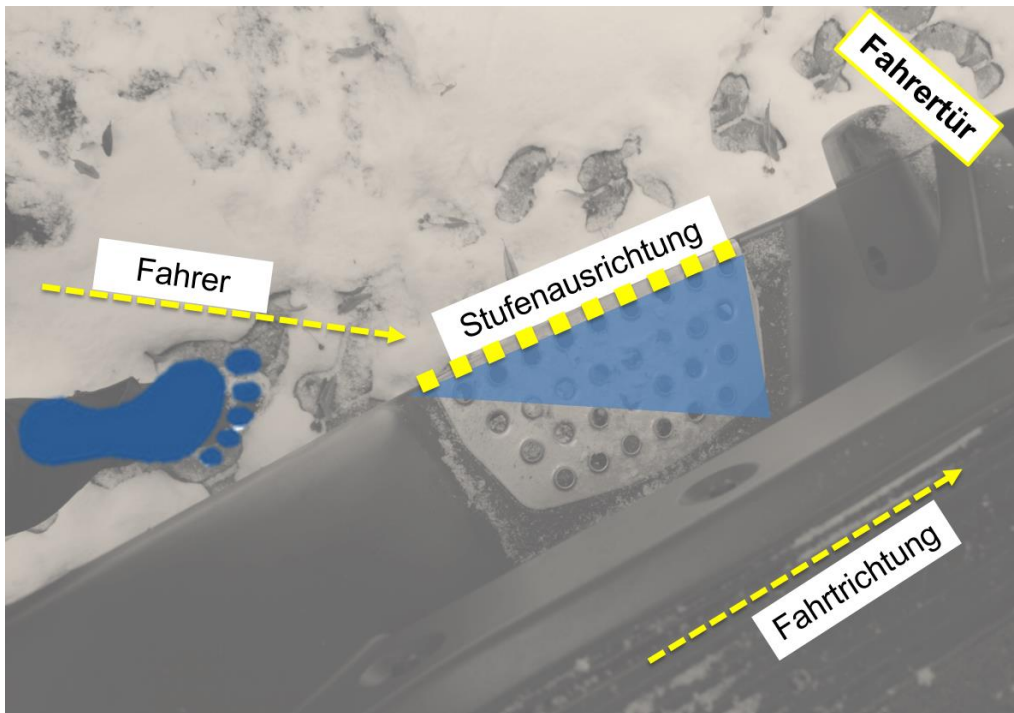


Abbildung 5-8: Stufenausrichtung in der Draufsicht ist zur Tür gewandt und damit vom Fahrer abgewandt

Die Experten fordern, dass die Haltegriffe – ohne Umgreifen – vom Fahrbahnboden aus erreicht werden. Beim Baustellenfahrzeug in Abbildung 5-9 ist der Haltegriff an der B-Säule so hoch angeordnet, dass die Konstrukteure einen zusätzlichen Einstiegsgriff im Kotflügel vorgesehen haben. Der zusätzliche Haltegriff kann nun auch von kleinen Personen zum Einsteigen genutzt werden, allerdings birgt das Umgreifen in der Bewegung ein Sicherheitsrisiko. Diese Einschätzung teilen auch Chateauroux et al. (2012) aus ihren Untersuchungen zum Ausstiegsverhalten.



Abbildung 5-9: zusätzlicher Einstiegsgriff beim Baustellenfahrzeug

Gerade, vertikale Haltestangen liegen an der A-Säule im spitzen Winkel zwischen der Fahrertür und der Instrumententafel. Vor allem im Falle einer halbgeöffneten Tür, zum Beispiel in engen Parksituationen auf dem Rastplatz, sind diese schwer zu erreichen. Abhilfe schafft ein gebogener Haltegriff zur Mitte der Türöffnung, wie in Abbildung 5-10 zu sehen ist.



Abbildung 5-10: Ein zur Mitte der Türöffnung hin gebogener Haltegriff an der A-Säule (hier der Beifahrerseite des Tatra Phoenix) erleichtert das Einsteigen bei halbgeöffneter Tür

Ebenso wie den befragten Fahrer aus Abschnitt 5.3.3, fällt auch den Experten auf, dass die Tür nicht in den vorgesehenen Rasterpunkten arretiert, sondern durch Schwankungen des luftgedeckten Fahrerhauses beim Ein- oder Aussteigen, durch den Wind oder am Berg auf- bzw. zu schwingt. Somit muss der Fahrer beim Ein-/Aussteigen die Tür festhalten, um Beschädigungen am eigenen oder am Nachbarfahrzeug zu vermeiden.

In der Idealausführung der Experten sind die Trittstufen treppenartig angeordnet, so dass die nächsttiefere Stufe einsehbar ist. Die Trittstufen sind dabei symmetrisch zur Einstiegsöffnung und den Haltegriffen angeordnet. Die treppenartige Anordnung der Trittstufen wird um einen eingezogenen Fahrerhausboden ergänzt, der dem Fahrer die Sicht auf die oberste Trittstufe ermöglicht. Neben der guten Einsehbarkeit der nächsttieferen Stufe, gestattet der eingezogene Fahrerhausboden einen sicheren Stand auf der obersten Trittstufe beim Aussteigen aus dem Fahrzeug. Die Tür soll in ihrer Breite so schmal wie möglich sein, damit ein weites Aufschwingen möglich ist. Abschließend verweisen die Experten auf den um 30-45° drehbaren Fahrersitz im Reise- und Stadtbuss, der das Zu- und Aussteigen erleichtert. Bei den Bussen steigt der Fahrer allerdings vom Innenraum auf den Fahrersitz und nicht von außen, wie beim Lkw.

Nach Meinung der Experten ist der Startfuß beim Einstiegen abhängig von individuellen Vorlieben. Beim Aussteigen startet allerdings die Mehrheit der Fahrer mit dem linken Fuß auf der obersten Stufe. Um diese zu erreichen, bleibt der Fahrer auf dem Sitz sitzen und schiebt sein Gesäß nach links. Diese Darstellung der Experten beruht nicht auf explorativen Studien und widerspricht den Untersuchungsergebnissen von Chateauroux et al. (2012), bei denen sich alle Fahrer vor dem Aussteigen im Fahrzeug aufrichten bevor sie auf die oberste Stufe treten.

Ein Sicherheitsmerkmal ist die Beleuchtung des Zugangsbereichs, sowohl außerhalb als auch innerhalb des Fahrzeugs. Bei den meisten Herstellern erhellt sich die gesamte Innenraumbeleuchtung beim Öffnen der Tür. Allerdings sollte auch der Fahrbahnboden ausgeleuchtet werden, damit der Fahrer sieht wohin er beim Aussteigen tritt. Manche Hersteller bieten hierfür eine *Coming Home – Leaving Home* Funktion an, bei der die Fahrzeugbeleuchtung bis zu 2 min nach dem Verlassen nachleuchtet. Ein weiteres Sicherheitsmerkmal stellt die Ausführung der Stufenkanten und -oberflächen dar, wie bereits ausgeführt.

Während des Workshops bestätigen die Experten zwei Anmerkungen der Lkw-Fahrer aus Abschnitt 5.2.3 und 5.3.3: Sie fordern einen Platz im Zugangsbereich, um Straßenschuhe trocken und sauber zu verstauen und merken an, dass das Ein- und Aussteigen mit Gegenständen in den Händen häufig erfolgen. Ein Experte beschreibt seine Strategie beim Ausstieg mit Gegenständen

den in der Hand wie folgt: Der Gegenstand wird in der rechten, türabgewandten Hand festgehalten, der kleine Finger dieser Hand greift am rechten Haltegriff zur Stabilisierung der Bewegung, während die linke Hand die Greifhand wird. Neben den Haltegriffen wird das Lenkrad zum Greifen genutzt. Dies birgt die Gefahr, dass sich das Lenkrad während der Bewegung mit dreht, wenn die Lenkradsperre nicht eingerastet ist. Das Lenkrad wird als Halteoption genutzt, da es sich mittig zur Einstiegsöffnung befindet, solange es sich nicht in Parkposition¹³ befindet.

5.5 Nutzerstudie am Realfahrzeug

5.5.1 Motivation: Nutzerverhalten am Realfahrzeug

Nachdem Erkenntnisse zur Zugangsgeometrie bei Nutzfahrzeugen aus Sicht eines neutralen Beobachters, der Nutzer und von Experten zusammengetragen sind, beschäftigt sich die vierte Studie mit der Identifikation von Bewegungsstrategien und ihren Einflussfaktoren. Die Probandenstudie¹⁴ ergänzt das gesammelte Wissen entsprechend der zweiten Phase in der DRM.

5.5.2 Methode: Probandenstudie

Probandenkollektiv

Voraussetzung zur Teilnahme an der Studie ist der Besitz des Führerscheins Klasse C oder höher. Die Fahrerlaubnis Klasse C befähigt zum Führen von Fahrzeugen über 3.500 kg und ist die Grundlage, um die Fahrerlaubnis CE – Fahrzeuge der Klasse C mit Anhänger oder Sattelanhänger – anzutreten (Borgdorf, 2015). Durch diese Vorbedingung ist sichergestellt, dass die Teilnehmer den Lkw-Zugang kennen und sich bei ihnen ein inneres Modell zum Betreten und Verlassen der Fahrzeugklasse gefestigt hat (vgl. Abschnitt 3.1).

An dem Versuch nehmen 36 Probanden teil. Die demographischen und anthropometrischen Daten der auswertbaren 34 Probanden werden – sofern möglich – mit den Mittelwerten aus der Studie von Bothe (2015) mit 152 Lkw-Fahrern (*Ref_Truck*) und der SizeGERMANY (*Ref_SizeGERMANY*) Datenbank (Human Solutions GmbH, 2010) verglichen.

Die 34 Probanden sind zwischen 23 und 64 Jahren alt ($M = 42,58$; $SD = 12,08$; $M_{Ref_Truck} = 44$) und besitzen den Lkw-Führerschein im Mittel seit 19,15 Jahren ($SD = 12,63$; $M_{Ref_Truck} = 20$). Die Körperhöhe der zwei weiblichen und 32 männlichen Probanden liegt im Bereich von 152 cm bis 192 cm ($MW = 180$; $SD = 7,65$; $MW_{Ref_Truck} = 176$; $MW_{Ref_SizeGERMANY} = 180$). Siebzöehn Probanden fahren Lkw mit drei Trittstufe, während 11 Teilnehmer zweistufige Fahrzeuge verwenden. Sechs Fahrer haben entweder einen ein- oder vierstufigen Einstieg oder wechseln regelmäßig das Fahrzeug und die damit verbundene Anzahl der Trittstufen. Die Anzahl der im Berufsalltag vorrangig genutzten Trittstufen wird als Einflussfaktor *Stufenerfahrung* erfasst.

¹³Bei Nutzfahrzeugen kann der Fahrer das Lenkrad in eine sogenannte Parkposition einrasten, um den Fahrern mehr Raum für den Ein- und Ausstieg zur Verfügung zu stellen. Dabei wird das Lenkrad zur Instrumententafel in eine horizontale Position gestellt.

¹⁴ Die Probandenstudie wurde in Teilen veröffentlicht (Hebe & Bengler, 2019). Die aus der Veröffentlichung entnommenen Stellen werden gekennzeichnet und aus Gründen der Verständlichkeit teilweise wiederholt und ergänzt. Die Studie wird im Rahmen von Studienarbeiten durchgeführt (Gröbner, 2017; Najgeboren, 2017; Neuhaus, 2017; Schweiger, 2017). Für diese Arbeit werden die Versuchsdaten vom Autor ausgewertet.

In einem *Within-Subject-Design*¹⁵ steigen die Probanden in randomisierter Reihenfolge in einen zweistufigen und einen dreistufigen Lkw ein und aus. Während der Ein- und Ausstiegsbewegung wird die Bewegung der Lkw-Fahrer mit dem inertialen Bewegungserfassungssystem CAPTIV aufgezeichnet. Um möglichst realitätsnahe Ein- und Ausstiegsbewegungen aufzeichnen zu können, findet die Versuchsreihe an zwei Realfahrzeugen statt. Ein MAN TGM mit zwei Trittstufen repräsentiert das Segment des Verteilerverkehrs, während ein MAN TGX mit drei Stufen das Segment des Fernverkehrs abbildet. Die Wechsel zwischen einer geraden und einer ungeraden Anzahl an Trittstufen wird bewusst gewählt, um eine Änderung in den menschlichen Bewegungsstrategien zwischen beiden Fahrzeugen zu provozieren. Die Versuchsteilnehmer werden zu einer *Studie zur Bewertung des Sitzkomforts in Nutzfahrzeugen* eingeladen, um ihren Fokus weg von der Ein- und Ausstiegsbewegung zu lenken. Dies reduziert den Hawthorne-Effekt¹⁶ und führt zu einer natürlichen Ein- und Ausstiegsbewegung.

Ablauf

Beide Versuchsfahrzeuge werden auf einem privaten, gepflasterten Parkplatz in kurzer Distanz zueinander aufgestellt, um den Fahrzeugwechsel für den Aufbau des Messequipments und den Laufweg für den Probanden kurz zu halten. Die Probanden tragen Kleidung, die sie nicht in ihrer Bewegungsfreiheit eingeschränkt. Am Türgriff oberhalb der Dachrahmenunterkante wird eine Kamera GoPro Hero 3+ positioniert, die die Bewegung der Probanden in einer Draufsicht aufzeichnet. Auf einem Stativ außerhalb vom Fahrzeug, rechtwinklig zur Zugangsgeometrie, wird die Ein- und Ausstiegsbewegung des Teilnehmers von hinten aufgenommen.

Der Versuchsablauf ist in drei Teile gegliedert und wird von zwei Personen geleitet. Zuerst füllt der Proband die Einwilligungserklärung zur pseudonymisierten Speicherung und Verarbeitung seiner Daten aus, anschließend folgt ein demographischer Fragebogen. Im Anschluss wird jeder Teilnehmer anthropometrisch vermessen – Körperhöhe, Stammlänge, Ober- und Unterarmlänge, Oberschenkel- und Unterschenkellänge – ebenso wie die individuelle Beweglichkeit im oberen Sprunggelenk, im Kniegelenk, im Hüftgelenk, im Handgelenk, im Ellenbogengelenk und im Schultergelenk ermittelt wird. Während ein Versuchsleiter die anthropometrische Vermessung des Probanden vornimmt, bereitet der zweite Versuchsleiter die beiden Fahrzeuge und das inertielle Messsystem CAPTIV für den letzten Teil des Versuchsablaufs, der Bewegungserfassung beim Ein- und Aussteigen, vor. Nach der Vermessung des Probanden führt der erste Versuchsleiter den Teilnehmer zu den Versuchsfahrzeugen. Dort werden die Sensoren des Bewegungserfassungssystems über Klettbinden am Versuchsteilnehmer angebracht und kalibriert. Bevor jeder Proband in den zwei- und dreistufigen Lkw ein- und aussteigt, bekommt er eine Zusammenfassung zur Einführung, Definition und Bewertungsmöglichkeit des Sitzkomforts bzw. das Ansitzgefühl (siehe Anhang II Seite CLV) ausgehändigt. Mit dieser schriftlichen Zusammenfassung wird der Sitzkomfort in den Fokus des Probanden gerückt. Nachdem sich der Versuchsteilnehmer die Zusammenfassung über den Sitzkomfort durchgelesen hat, steigt er in den ersten Lkw sechsmal ein und aus. Anschließend wird das Fahrzeug gewechselt und der Proband betritt und verlässt das zweite Fahrzeug ebenfalls mit sechs Wiederholungen. Mit welchem der beiden Fahrzeuge der Proband beginnt wird im Vorfeld der Versuche in randomisierter Reihenfolge festgelegt, um Reihenfolgeeffekte zu vermeiden.

¹⁵ Das *Within-Subject-Design* beschreibt einen Versuchsaufbau mit Messwiederholung. Jeder Versuchsteilnehmer durchläuft jede Versuchsbedingung. (Field, 2013)

¹⁶ Der Hawthorne-Effekt beschreibt ein verändertes Verhalten der Probanden, die sich im Wissen über die Teilnahme an einer Studie befinden. Eine Übersicht über verschiedene Definitionen des Hawthorne-Effekts und Kritik an der Verwendung des Begriffs finden sich in Olson, Verley, Santos und Salas (2004).

Durch die sechsmalige Wiederholung der jeweiligen Bewegung werden bewusst Lerneffekte eingebaut. Diese stützen sich auf die Untersuchungsergebnisse von Cherednichenko (2007), der bis zur sechsten Wiederholung eine Optimierung der Bewegung feststellt, bevor eine Ermüdung und einer damit einhergehenden Bewegungsänderung einsetzt. In Bezug auf die Wiederholungen der Ein- und Ausstiegsbewegung lässt sich in der Literatur kein einheitliches Vorgehen feststellen. Es variiert zwischen einer vom Probanden wählbaren Anzahl an Wiederholung (Chateauroux et al., 2012) über zwei Wiederholungen pro Konfiguration (Patenaude et al. 2001; Reed et al., 2010b) und vier Wiederholungen pro Konfigurationen (Ait El Menceur et al., 2009; Causse et al., 2009) bis hin zu fünf bis neun Wiederholungen (Latif & Christianson, 1988; Lu, Tada, Endo, & Mochimaru, 2016). Bei der Auswertung der Bewegungsstrategien in Abschnitt 5.5.2 wird die jeweils sechste Bewegung herangezogen.

Dieser Versuchsaufbau und -ablauf adressiert drei Fragestellungen:

Bewegungsstrategien

Lassen sich Bewegungsstrategien für den Lkw-Einstieg und Lkw-Ausstieg identifizieren?

Wenn ja, welche Bewegungsstrategien lassen sich für den Lkw-Einstieg und Lkw-Ausstieg beobachten?

Einflussfaktoren auf die Wahl einer Bewegungsstrategie

Können Einflussfaktoren auf die Wahl der Bewegungsstrategien festgelegt werden?

Wenn ja, welche Einflussfaktoren können auf die Wahl der Bewegungsstrategien ermittelt werden?

Bewegungsdauer

Gibt es einen signifikanten Unterschied in den Bewegungsdauern in Abhängigkeit der Bewegungsrichtung bzw. der Stufenanzahl?

Gibt es einen signifikanten Unterschied in den Zeiten der Bewegungsphasen in Abhängigkeit der Bewegungsrichtung bzw. der Stufenanzahl?

Gibt es einen signifikanten Unterschied in der Bewegungsdauer in Bezug auf den Startfuß in Abhängigkeit der Bewegungsrichtung bzw. der Stufenanzahl?

Die Untersuchung der Bewegungsdauer und der Bewegungsphasen wird mit einem t-Test für abhängige Stichproben geprüft. Das α -Niveau beträgt 0.05 und der Effekt wird nach Cohen berechnet, wobei $r = 0.10$ einem schwachen Effekt, $r = 0.30$ einem mittleren Effekt und $r = 0.50$ einem starken Effekt entspricht. Die Bewegungsdauer in Bezug auf den Startfuß wird mit einem Mann-Whitney- U -Test durchgeführt, da das zu untersuchende Merkmal nicht normalverteilt ist und die zu vergleichenden Gruppen sich in ihrer Gruppengröße unterscheiden.

Der demographische Fragebogen nimmt die zu prüfenden Einflussfaktoren auf. Hierzu werden die Stufenerfahrung, der bevorzugte Fuß, die Körperhöhe und die Eingruppierung in einen Gewichtsbereich erfasst. Basierend auf der Stufenerfahrung wird geprüft, ob die Probanden einen Strategiewechsel vornehmen, wenn sie vom Fahrzeug mit ihrer gewohnten Stufenanzahl auf das andere Versuchsfahrzeug wechseln. Die Frage nach dem bevorzugten Fuß bezieht sich auf die Wahl des Startfußes einer Bewegungsstrategie. Ist dieser Startfuß abhängig von dem bevorzugten Fuß oder von der vorgegebenen Geometrie? Die Körperhöhe wird erfasst und in Ver-

bindung mit der Eingruppierung in den Gewichtsbereichen zum Body Mass Index (BMI) verrechnet. Die Eingruppierung in Gewichtsbereiche wird gewählt, da sich alle Probanden aus der Nutzerbefragung in Abschnitt 5.3 weigerten ihr Körpergewicht anzugeben. Um zumindest einen Richtwert in Bezug auf das Körpergewicht zu erhalten, wird der Informationsverlust über die Angabe eines genauen Wertes in Kauf genommen.

In dieser Studie werden als Einflussfaktoren auf die Wahl einer Bewegungsstrategie die Prädiktoren Stufenerfahrung, starker Fuß, Alter, BMI und Körpergrößengruppe berücksichtigt. In einer logistischen Regression (Field, 2013) wird der Einfluss dieser Prädiktoren auf die Einstiegsstrategie anhand der Wahl des ersten Fußes auf der untersten Stufe und der Wahl des ersten Fußes auf dem Kabinenboden untersucht, dies jeweils für den zwei- und dreistufigen Lkw. Zur Untersuchung der Auswirkung der Prädiktoren auf die Wahl der Ausstiegsstrategien wird das Kriterium der Wahl des ersten Fußes auf die oberste Trittstufe herangezogen – jeweils wieder für den zwei- und dreistufigen Lkw.

5.5.3 Ergebnisse: Identifikation von Bewegungsstrategien und Einflussfaktoren

Zu Beginn der Auswertung werden Bewegungsphasen eingeteilt (Rigel, 2005). Damit diese ohne zeitliche Überlappung ablaufen, werden sie anhand des führenden Fußes bestimmt. Für den dreistufigen Einstieg ergeben sich sieben Schlüsselpositionen mit sechs Bewegungsphasen, dargestellt in Abbildung 5-11. Der Fahrer beginnt den Einstieg in einer stehenden, aufrechten Haltung mit frontalem Blick zur Zugangsgeometrie. Die erste Interaktion zwischen Fahrer und Zugangsgeometrie findet mit der untersten Stufe statt (Phase I). Entsprechend der Anzahl der Trittbretter definieren sich die Schlüsselpositionen für Phase II und III. Dabei ist es unabhängig davon, ob der Fahrer mit demselben Fuß auf die nächste Stufe steigt – ein *Step-by-Step* Verhalten – oder den Fuß alterniert in einem *Step-over-Step* Verhalten. Nach dem Aufstieg betritt der Fahrer die Kabine und erzeugt Schlüsselposition IV, die erste Interaktion zwischen führendem Fuß und Fahrerhausboden. Anschließend holt der Fahrer den zweiten Fuß in die Kabine (Phase V) und nimmt in Phase VI die Fahrhaltung ein. Bei der Fahrhaltung sitzt der Fahrer auf dem Sitz mit beiden Händen am Lenkrad und die Füße an den Pedalen. Beim zweistufigen Einstieg entfällt die Interaktion mit der mittleren Stufe. Damit ergeben sich für den zweistufigen Lkw sechs Schlüsselpositionen und fünf Bewegungsphasen für den Einstieg.

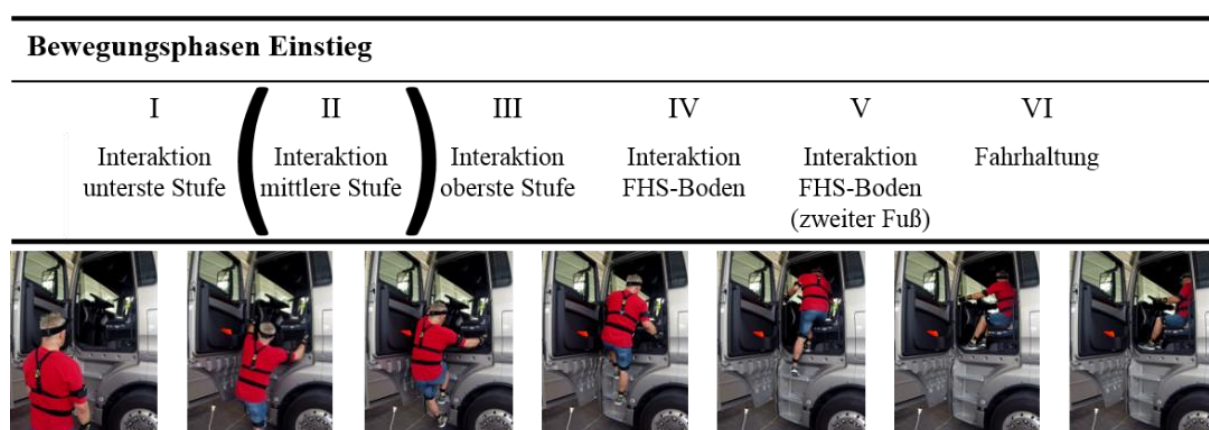


Abbildung 5-11: Bewegungsphasen für den dreistufigen Einstieg nach Hebe und Bengler (2019)

Die Ausstiegsbewegung aus einem dreistufigen Lkw lässt sich in fünf Schlüsselpositionen und vier Bewegungsphasen einteilen. Analog zu den Bewegungsphasen beim Einstieg entfällt beim zweistufigen Lkw eine Bewegungsphase. Die Ausstiegsbewegung beginnt aus der Fahrhaltung. Die erste Phase endet, sobald der führende Fuß auf der obersten Stufe platziert ist. Anschließend werden die weiteren Bewegungsphasen entsprechend des führenden Fußes auf den nächsten

Treppenstufen definiert bis der Fahrer mit beiden Füßen auf dem Fahrbahnboden ankommt. Die Bewegungsphasen für den Ausstieg sind in Abbildung 5-12 dargestellt.

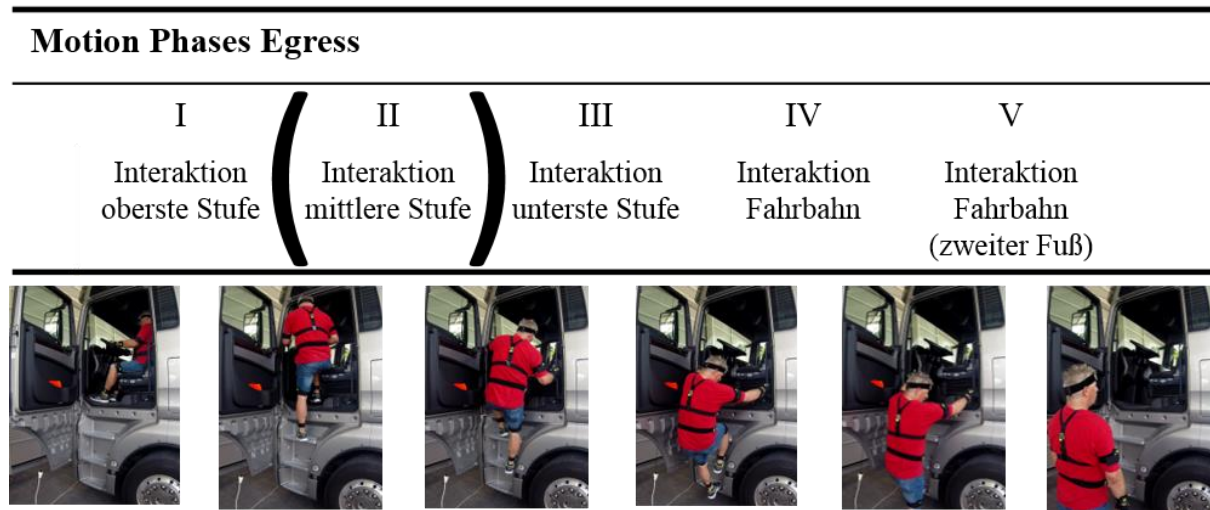


Abbildung 5-12: Bewegungsphasen für den dreistufigen Ausstieg nach Hebe und Bengler (2019)

Nach der Definition der Phasen folgt die Auswertung der Bewegungsstrategien. Aufgrund des fehlenden Absolutbezugs der CAPTIV-Bewegungsdaten werden die Strategien qualitativ (Rigel, 2005) klassifiziert. Für jede Extremität wird ein Bewegungscode angelegt. Dieser beschreibt die Interaktion jeder Extremität mit den Schlüsselpunkten in Abbildung 5-13 zu den Start- und Endpunkten jeder Bewegungsphase. Demnach besteht der Bewegungscode aus derselben Anzahl an Elementen wie Schlüsselpositionen in den Bewegungsphasen existieren und beschreibt die zeitliche Abfolge genutzter Griff- oder Trittelemente für jede Extremität. Somit wird die auftretende Variantenvielfalt der Ein- und Ausstiegsbewegung analysiert.

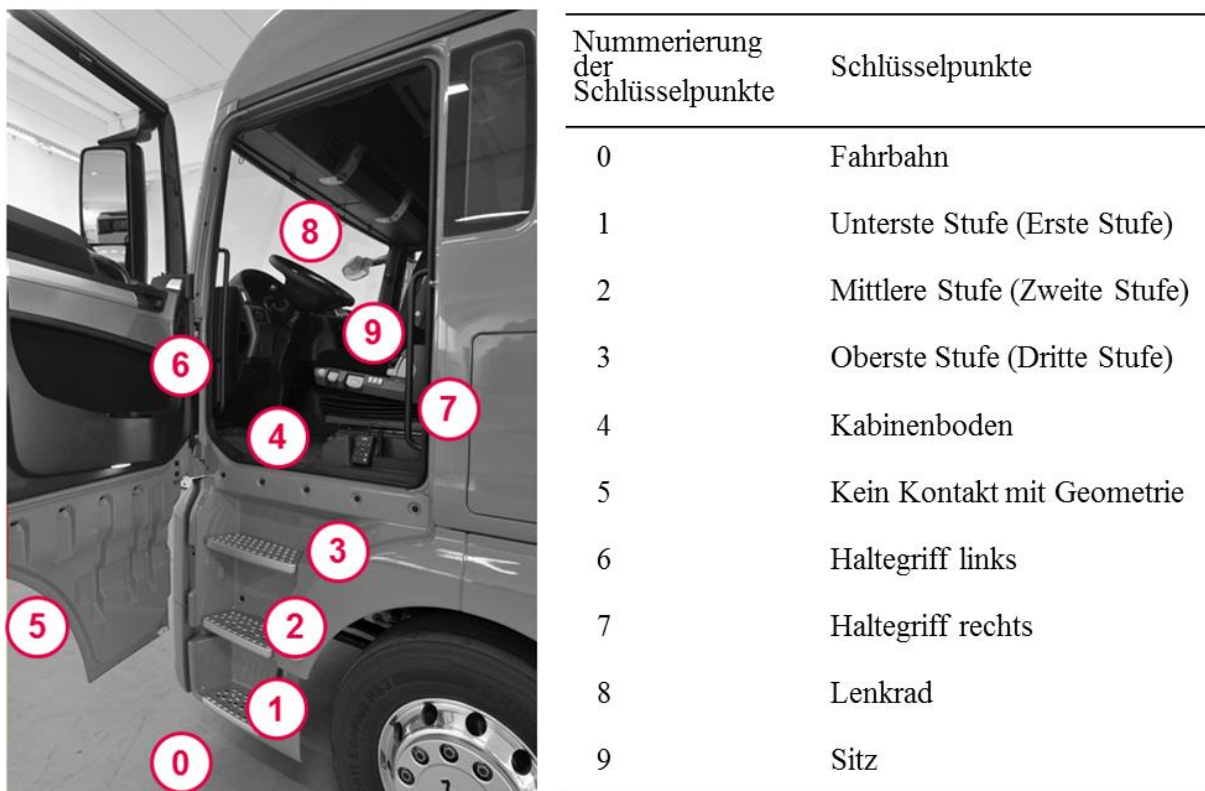


Abbildung 5-13: Kodierung der Schlüsselpunkte zur Geometrie

BewegungsCodes für die dreistufige Einstiegsbewegung

Die codierten Bewegungsmuster für die linke und rechte Hand und den linken und rechten Fuß beim dreistufigen Einstieg sind in Abbildung 5-14 dargestellt. Entsprechend der Legende sind die Bewegungsmuster nach den Körpergrößen eingeteilt, wobei lila den *kleinen* Versuchspersonen zugeordnet ist, während grün die *mittelgroßen* Probanden repräsentiert und die Versuchspersonen der Körperhöhengruppe *groß* in blau dargestellt sind. Die rote Linie in den Schaubildern in Abbildung 5-14 kennzeichnet eine 10 %-Schwelle der auftretenden BewegungsCodes.

Für die Hände treten mehr Varianten auf als für die Füße. Für das Fußverhalten zeigen sich zwei Hauptstrategien: Die Probanden steigen entweder mit dem linken oder dem rechten Fuß auf die unterste Stufe und dann in einem *Step-over-Step* Fußverhalten auf. Die Strategie *Linker Fuß Zuerst (LFZ)* wird in Abbildung 5-14 durch den Bewegungscode *0113344* mit dem linken Fuß und dem Pendant *0022444* am rechten Fuß abgebildet. Mit dieser Strategie steigen 76,47 % der Fahrer in den dreistufigen Lkw ein, 20,58 % der Probanden beginnen beim Einsteigen mit dem rechten Fuß auf der untersten Stufe – *Rechter Fuß Zuerst (RFZ)*. Circa jede dritte *kleine* Person (36,36 %) verwendet die *RFZ*-Strategie (vgl. Abbildung 5-14). Bei den *mittelgroßen* (18,18 %) und *großen* Probanden (9,09 %) verringert sich der Anteil der *RFZ*-Nutzer. Alle Probanden nutzen das *Step-over-Step* Verhalten (Shorti, 2016). Zwei Fahrer weichen abschnittsweise von diesem Fußverhalten ab. Eine Versuchsperson beginnt mit dem rechten Fuß den Einstieg. Auf der obersten Stufe führt dieser Teilnehmer einen Belastungswechsel der Füße durch und setzt den rechten Fuß als ersten Fuß auf den Fahrerhausboden, im Gegensatz zu dem, bei der *RFZ*-Strategie erwarteten linken Fuß. Diese Sonderform wird in der Abbildung 5-14 am linken Fuß durch den Code *0022344* abgebildet und am rechten Fuß mit dem Code *0113444*. Ein weiterer Proband lässt die unterste Stufe aus und stellt den linken Fuß von der Fahrbahn direkt auf die mittlere Stufe. In Abbildung 5-14 zeigt dies der Code *0003344* beim rechten Fuß.

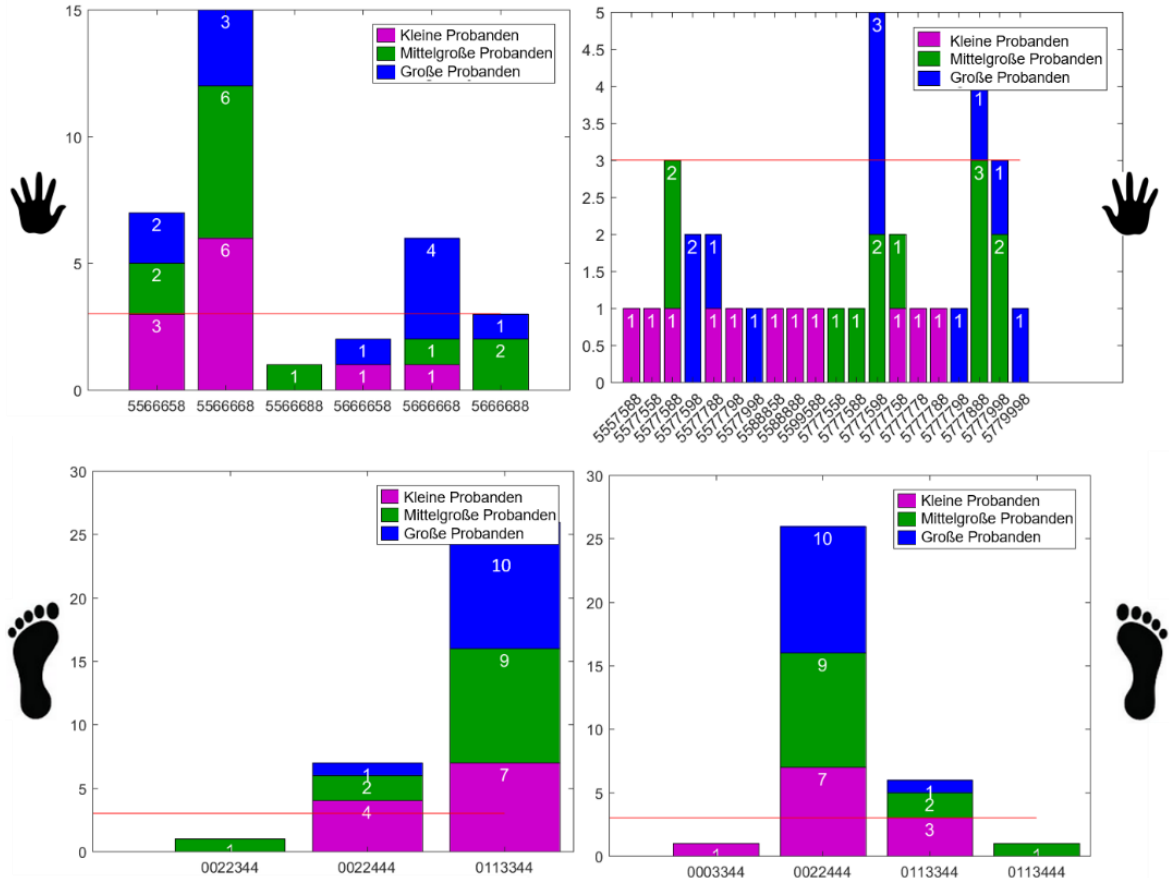


Abbildung 5-14: BewegungsCodes beim dreistufigen Einstieg anhand der BewegungsCodes für die linke Hand (links oben), die rechte Hand (rechts oben), den linken Fuß (links unten) und den rechten Fuß (rechts unten)

Für die Abfolge der Hände treten mehr Bewegungsabfolgen als für die Füße auf. Abbildung 5-14 zeigt sechs verschiedene Bewegungsabfolgen für die linke Hand und 20 Bewegungsmuster für die rechte. Bei den Bewegungsmustern der linken Hand variieren der Zeitpunkt, an dem vom Haltegriff an die A-Säule gegriffen wird – *vor* oder *nach* dem Erreichen der untersten Stufe – und der Zeitpunkt, an dem die linke Hand vom Haltegriff zum Lenkrad wechselt – *vor* oder *nachdem* der zweite Fuß den Fahrerhausboden erreicht oder *keinen Greifpunkt* während der Fuß umgesetzt wird. Kumuliert über alle Versuchspersonen tritt die Bewegungsabfolge 556668 am häufigsten auf. Hierbei drückt sich die Versuchsperson von der untersten Stufe nach oben ab und greift während dieses „Hochdrück-Vorgangs“ (*Push*) nach den Haltegriffen. Dieses Vorgehen verwenden die meisten *kleinen* (6 von 11) und die meisten *mittelgroßen* Probanden (6 von 12) mit der linken Hand, wie in Abbildung 5-14 dargestellt. Die Mehrheit der *großen* Versuchsteilnehmer (4 von 11) greift nach dem linken Haltegriff bevor der erste Fuß auf der untersten Stufe steht. Das unterschiedliche Vorgehen lässt sich auf die Körperhöhe und damit der Reichweite *großer* Versuchspersonen zurückführen. Aufgrund der genutzten Variantenvielfalt der rechten Hand und der zeitlichen Abfolge der Greifoptionen wird nicht von einer Bewegungsstrategie gesprochen. Die Variantenvielfalt weist auf dieselbe Problematik wie bei Hausfahrzeugen hin (Shorti, 2016): einer Fehlanordnung der Haltegriffe.

Bewegungsabfolgen für die dreistufige Ausstiegsbewegung

In Abbildung 5-15 sind die Bewegungsmuster für den dreistufigen Ausstieg dargestellt. Die oberen beiden Diagramme zeigen die Bewegungsmuster für die linke und rechte Hand, die unteren beiden Diagramme zeigen die für den linken und rechten Fuß auf. Die eingezeichnete rote Linie kennzeichnet eine 10 %-Schwelle, oberhalb derer mehr als 10 % der Probanden dasselbe Bewegungsmuster anwenden.

Die Mehrheit der Probanden (26 von 34 Versuchspersonen) lösen ihre Fahrhaltung auf, indem sie das Gesäß auf dem Fahrersitz nach links verschieben und gleichzeitig den linken Fuß auf die oberste Stufe stellen. Anschließend folgt das schrittweise Hinabsteigen der Stufen bis der Versuchsteilnehmer mit beiden Füßen auf der Fahrbahn steht. Diese Strategie wird in Abbildung 5-15 mit dem Bewegungscode 433110 abgebildet. Alle Versuchspersonen der Körperhöhengruppe *groß* und circa 81,8 % der *mittelgroßen* Probanden verwenden diese Bewegungsabfolge. Das entsprechende Pendant für den rechten Fuß wird durch den Bewegungscode 442200 beschrieben und zeigt das schrittweise Hinabsteigen der Stufen auf. Fast die Hälfte der *kleinen* (5 von 11 Personen) und zwei (ca. 18,2 %) der *mittelgroßen* Versuchspersonen nutzen die Strategie mit dem Bewegungscode 442200 in Abbildung 5-15. Diese Personen richten sich aus der Fahrhaltung im Fahrzeug auf, positionieren sich mit dem Rücken zur Ausstiegsöffnung an der Türschwelle und beginnen das Hinabsteigen der Stufen mit dem rechten Fuß auf der obersten Stufe. Diese Strategie entspricht der Ausstiegsstrategie *Right Foot First (RFF)* von Chateauroux et al. (2012). Die Ausstiegsstrategie *Left Foot First (LFF)* von Chateauroux et al. (2012), bei der sich die Fahrer im Fahrerhaus aufrichten, mit dem Rücken zum Schweller stellen und mit dem linken Fuß auf die obersten Stufen steigen, verwendet kein Proband in dieser Studie.

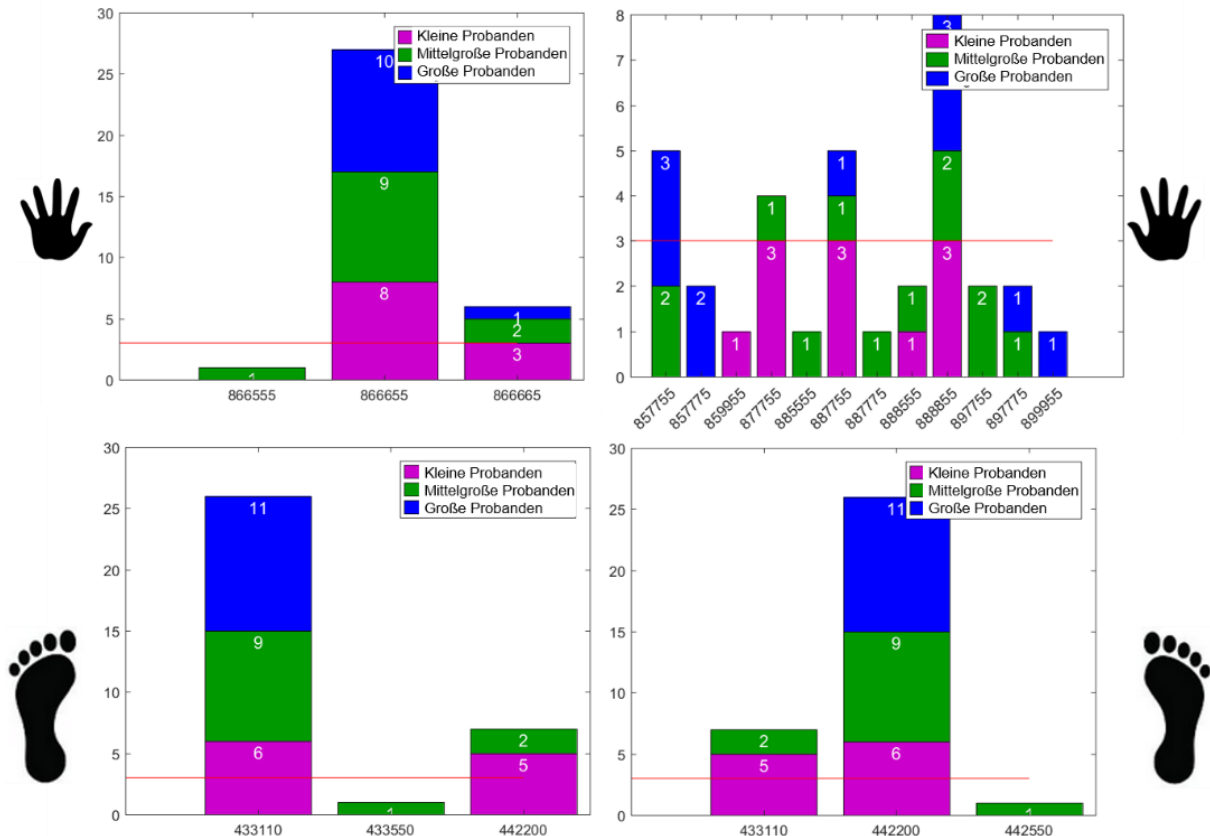


Abbildung 5-15: Bewegungsabfolgen beim dreistufigen Ausstieg anhand der Bewegungsabfolgen für die linke Hand (links oben), die rechte Hand (rechts oben), den linken Fuß (links unten) und den rechten Fuß (rechts unten)

Im Vergleich zum Einsteigen, treten beim Aussteigen weniger Varianten von Greifabläufen der Hände auf. Auch hier zeigt sich, dass bei der rechten Hand mehr Varianten in den Greifabläufen auftreten als bei der linken Hand. Für die linke Hand nutzen die meisten Probanden (79,41 %) die linke Haltestange. In der vorletzten Phase wird der Griff von der linken Haltestange gelöst und bis zum Ende des Ausstiegsvorgangs nicht mehr zum Greifen genutzt. Sechs Probanden greifen die linke Haltestange bis zum Ende des Ausstiegsvorgangs. Ein *mittelgroßer* Teilnehmer lässt die linke Haltestange noch eine Phase früher los. Für die rechte Hand treten zwölf verschiedene Greifabfolgen auf. Vier dieser Greifabfolgen werden von mehr als 10 % der Probanden genutzt. Am häufigsten unterstützen die Fahrer ihre Ausstiegsbewegung durch den Griff der rechten Hand an das Lenkrad. Bis zur vorletzten Bewegungsphase wird das Lenkrad als Greifoption genutzt, bevor der Griff gelöst wird und die rechte Hand nicht mehr zum Greifen verwendet wird. Neben dem Lenkrad wird auch die rechte Haltestange als Greifoption für die rechte Hand genutzt. Hier unterscheidet sich der Zeitpunkt an dem die rechte Haltestange ge-griffen und losgelassen wird. Die Fahrer lassen entweder die rechte Hand länger am Lenkrad (887755), greifen sofort den rechten Haltegriff (877755) oder verwenden die rechte Hand zeitweise nicht als Halteunterstützung (857755).

Bewegungsabfolgen für die zweistufige Einstiegsbewegung

Die zeitlichen Abfolgen der Interaktionsmuster für den zweistufigen Einstieg sind in Abbildung 5-16 für die linke Hand (links oben), die rechte Hand (rechts oben), den linken Fuß (links unten) und den rechten Fuß (rechts unten) dargestellt. An den Bewegungsmustern der Füße ist zu erkennen, dass beim zweistufigen Einstieg nur zwei Varianten auftreten: entweder starten die Fahrer die Einstiegsbewegung mit dem linken Fuß (Bewegungscode 011444 für den linken Fuß und 002244 für den rechten Fuß) oder mit dem rechten Fuß (Bewegungscode 002244 für den

linken Fuß und 011444 für den rechten Fuß). Die meisten Probanden ($n = 26$) steigen in den zweistufigen Lkw mit dem linken Fuß ein. Kein Fahrer nutzt das *Step-by-Step* Fußverhalten für den zweistufigen Einstieg, jeder Versuchsteilnehmer verwendet das von Shorti (2016) klassifizierte *Step-over-Step* Verhalten. Aus jeder Körpergrößengruppe startet die Mehrheit die Einstiegsbewegung mit dem linken Fuß.

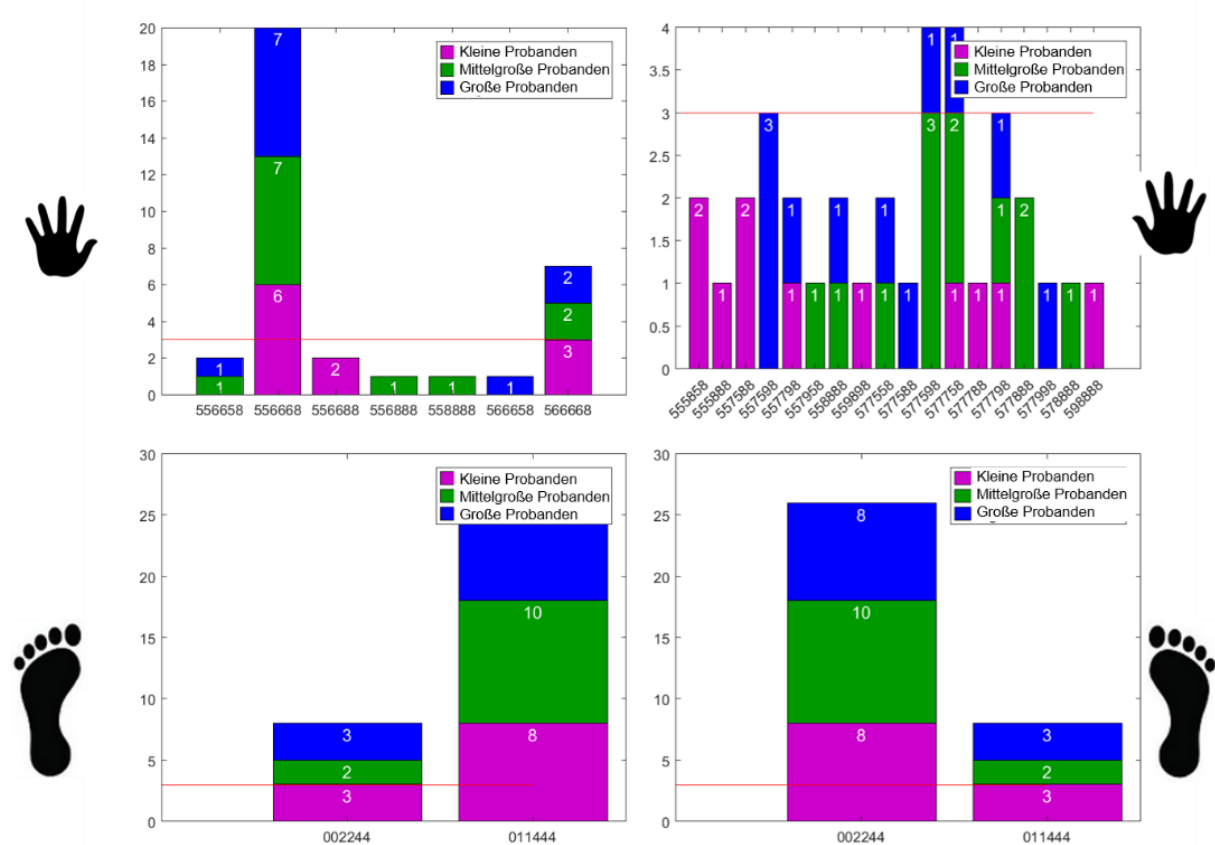


Abbildung 5-16: Bewegungs-codes beim zweistufigen Einstieg anhand der Bewegungs-codes für die linke Hand (links oben), die rechte Hand (rechts oben), den linken Fuß (links unten) und den rechten Fuß (rechts unten)

Für die Hände treten beim zweistufigen Einstieg sieben Varianten für die linke Hand – eine Variante mehr als beim dreistufigen Einstieg – und 18 Varianten für die rechte Hand auf – 20 beim dreistufigen Einstieg. Auch hier zeigt sich die hohe Variabilität in der zeitlichen Abfolge der Greifoptionen. Dies gilt insbesondere für die rechte Hand. Die meisten Fahrer nutzen die linke Haltestange zum Greifen mit der linken Hand. Ebenso wie beim dreistufigen Einstieg, variiert beim zweistufigen Einstieg der Zeitpunkt an dem die linke Hand an die Haltestange greift. Acht Probanden nutzen beim Einsteigen das Lenkrad als Greifoption (Bewegungscode 556888 und 558888 für die linke Hand). Mit der rechten Hand greifen die Fahrer an die rechte Haltestange, das Lenkrad oder den Sitz als Unterstützung der Bewegung.

Bewegungs-codes für die zweistufige Ausstiegsbewegung

In Abbildung 5-17 sind die Bewegungs-codes der linken (links oben) und rechten Hand (rechts oben), des linken (links unten) und rechten Fuß (rechts unten) für den zweistufigen Ausstieg abgebildet. Analog zum zweistufigen Einstieg treten zwei verschiedene Fußstrategien auf. Siebenundzwanzig Versuchsteilnehmer beginnen die Ausstiegsbewegung mit dem linken Fuß, 7 Fahrer starten mit dem rechten Fuß. Die Anzahl der Personen, die den Ausstieg mit dem rechten Fuß beginnen, nimmt mit den Körpergrößengruppen ab. Bei der Gruppe der *kleinen* Fahrer ist die Verteilung des Startfußes ausgewogen, sechs Probanden starten mit dem linken Fuß und fünf mit dem rechten. Bei der *mittelgroßen* Gruppe sind es zwei Teilnehmer, die mit

dem rechten Fuß den Ausstieg beginnen, während zehn der Teilnehmer den linken Fuß nutzen. Die Fahrer der *großen* Gruppe beginnen den Ausstieg ausschließlich mit dem linken Fuß. Dieses Verhalten ist vergleichbar mit dem Ausstiegsverhalten aus dem dreistufigen Lkw.

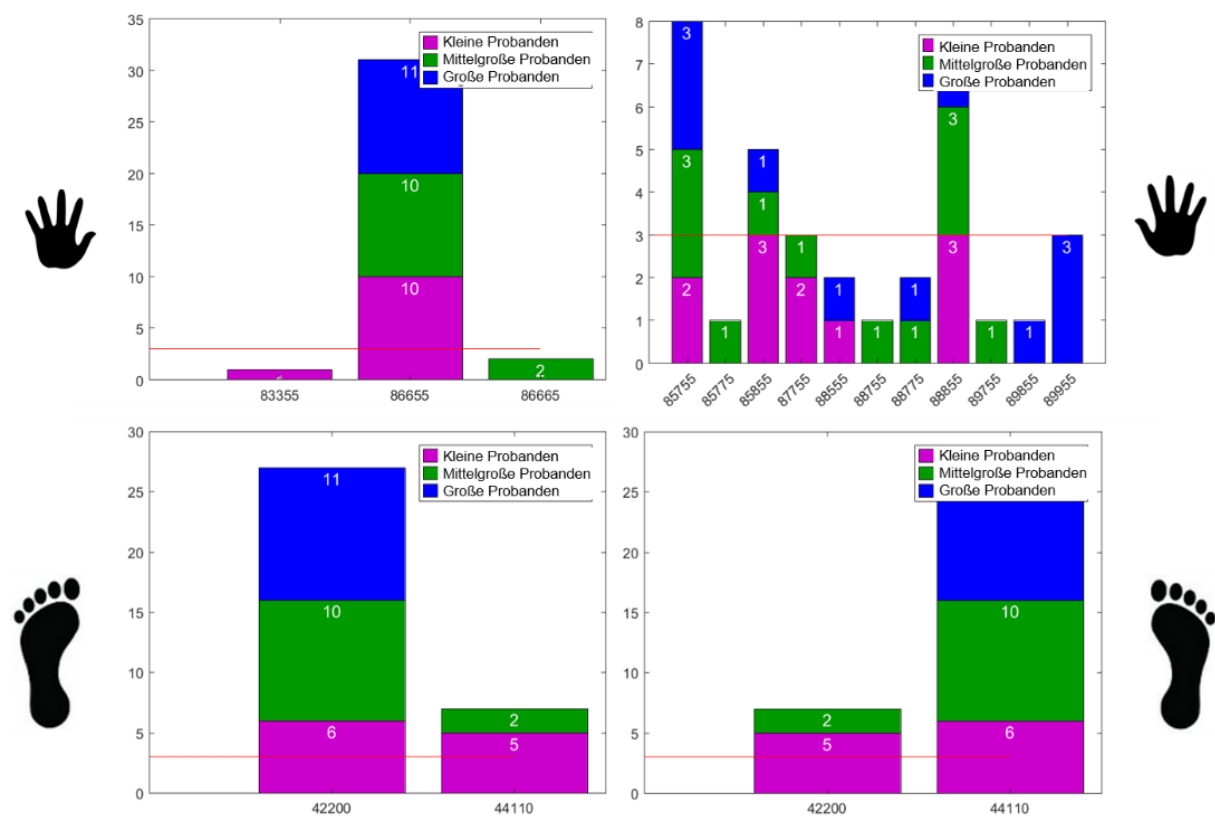


Abbildung 5-17: Bewegungsabfolgen beim zweistufigen Ausstieg anhand der Bewegungsabfolgen für die linke Hand (links oben), die rechte Hand (rechts oben), den linken Fuß (links unten) und den rechten Fuß (rechts unten)

Analog zum dreistufigen Ausstieg treten beim zweistufigen Ausstieg im Vergleich zum Einstieg weniger Varianten der Bewegungsabfolgen für die Hände auf. Die meisten Teilnehmer (91,17 %) nutzen die linke Haltestange zum Greifen (Bewegungscode 86655). Zwei *mittelgroße* Probanden halten sich mit der linken Hand bis zum Ende des Ausstiegsvorgangs am Haltegriff fest (Bewegungscode 86665 für die linke Hand) und ein Fahrer der *kleinen* Gruppe nutzt den Türgriff der offenen Türe zum Festhalten mit der linken Hand (Code 3 entspricht hier dem Türgriff). Für die rechte Hand treten 11 verschiedene Greifabfolgen auf, von denen drei von mehr als 10 % der Probanden genutzt werden. Die Fahrer verwenden die rechte Haltestange, den Sitz und das Lenkrad zum Greifen. Auffällig ist, dass bei jeder der 11 Varianten die rechte Hand zeitweise nicht zum Greifen genutzt wird. Die Fahrer scheinen beim zweistufigen Ausstieg die Greifunterstützung der rechten Hand nicht zu brauchen.

Beschreibung der Einstiegsstrategien

Die Bewegungsabfolgen aus den vorherigen Abschnitten zeigen eine Variantenvielfalt an Bewegungsabfolgen für die Extremitäten auf. Eine stichprobenartige Prüfung zeigt, dass die Fahrer ihre Ein- und Ausstiegsbewegung während den sechs Wiederholungen ändern. Es scheinen keine einheitlichen Bewegungsstrategien für den Lkw-Zugang zu existieren, die eine Mehrheit der Fahrer für das Ein- und Aussteigen nutzen. Zeitlich begrenzt treten Bewegungsabfolgen auf, die mehrere Probanden verwenden. Dies tritt nicht über den gesamten Bewegungsablauf auf. In Abgrenzung zu der Definition einer Bewegungsstrategie in Abschnitt 3.1.1 werden die zeitlich begrenzten Bewegungsabfolgen in dieser Arbeit als *Bewegungsmuster* bezeichnet und nachfolgend in Dendrogrammen dargestellt.

In Abbildung 5-18 ist das Dendrogramm dieser Stichprobe für den Einstieg in Nutzfahrzeuge zu sehen. Der Bewegungsablauf ist in fünf Phasen eingeteilt. In der ersten Phase wird die Wahl des Fußes auf der untersten Stufe betrachtet. Die nächste Phase bezieht sich auf die Unterstützung der Hände während der Einstiegsbewegung. Für den Einsatz der Hände werden zwei Methoden beobachtet: das *Hochdrücken* und das *Hochziehen*. Entscheidend ist der Zeitpunkt, wann der Fahrer an die Haltestange greift oder auf das Trittbrett steigt. Setzt der Fahrer erst den Fuß auf die unterste Stufe und greift im Anschluss seine Greifpunkte, wird dieses Verhalten dem *Hochdrücken* zugeordnet. Ist schon mindestens eine Hand an einer Greifoption, wenn der erste Fuß auf die unterste Stufe gesetzt wird, wird dies als *Hochziehen* kategorisiert.

Die dritte Phase, die Kletterphase, wird in Anlehnung an die von Shorti (2016) beobachtete Unterscheidung zwischen einem *Step-by-Step* Verhalten und einem *Step-over-Step* Verhalten eingeführt. Anschließend folgt die Kategorie der Haupt-Greifpunkte der linken Hand. Da die Säulendiagramme der Bewegungscodes zeigen, dass die Greifabfolge der rechten Hand individuell abhängig ist, fokussiert sich diese vierte Kategorie auf die linke Hand.

In der letzten Kategorie des Dendrogramms wird die Bewegung in die Kabine hinein bis zur Einnahme der Fahrhaltung eingeteilt. Hier sind drei Bewegungsformen zu beobachten. Entweder steigt der Fahrer zuerst mit beiden Beinen in die Kabine (*Zweiter Fuß zuerst*) und nimmt anschließend die Sitzhaltung ein oder der Fahrer setzt sich zuerst auf den Fahrersitz ab und zieht danach den zweiten Fuß in die Fahrerkabine hinein (*Gesäß zuerst*) oder der Fahrer zieht während des Absitzens auf den Fahrersitz den zweiten Fuß in die Kabine hinein (*Gesäß und zweiter Fuß zur gleichen Zeit*).

Erster Fuß Erste Stufe	Unter- stützung Hände	Kletter- phase	Haupt- Greifpunkte linke Hand	Einnahme der Fahrhaltung	Zweistufiger Lkw		Dreistufiger Lkw	
					N [-]	% [%]	N [-]	% [%]
Linker Fuß	Hoch- ziehen	Step-over- Step	Linker Haltegriff	Gesäß und zweiter Fuß zur gleichen Zeit	0	0	1	2.9
					0	0	3	8.8
Rechter Fuß	Hoch- drücken	Step-over- Step	Linker Haltegriff	Zweiter Fuß zuerst	5	14.7	2	5.9
					0	0	7	20.6
Erster Fuß auf unterster Stufe	Hoch- ziehen	Step-over- Step	Lenkrad	Gesäß und zweiter Fuß zur gleichen Zeit	0	0	8	23.5
					19	55.9	5	14.7
Rechter Fuß	Hoch- drücken	Step-over- Step	Linker Haltegriff	Gesäß zuerst	2	5.9	0	0
					1	2.9	1	2.9
Linker Fuß	Hoch- drücken	Step-over- Step	Linker Haltegriff	Gesäß zuerst	4	11.8	0	0
					3	8.8	6	17.6

Abbildung 5-18: Dendrogramm für den Lkw-Einstieg

Abbildung 5-18 zeigt die Bewegungscluster, die beim Einsteigen in den zweistufigen und den dreistufigen Lkw auftreten. In den letzten beiden Spalten wird jeweils links die Absolutzahl N und rechts der entsprechende Prozentsatz angegeben. In Abbildung 5-18 ist zu erkennen, dass für den zweistufigen Einstieg weniger Varianten auftreten als für den dreistufigen Einstieg. Mehr als die Hälfte der Teilnehmer startet beim zweistufigen Lkw mit dem linken Fuß auf der untersten Stufe und drückt sich aus der Kraft ihrer Beinmuskeln hinauf, um nach den Haltegriffen zu greifen. Während eines *Step-over-Step* Einstiegsverhalten, nutzen diese Fahrer vorrangig den linken Haltegriff. Im Fahrerhaus angekommen, setzen die Fahrer zuerst beide Füße in die Kabine und nehmen anschließend die Fahrhaltung ein. Beim Einstieg in den dreistufigen Lkw lassen sich unterschiedliche Bewegungspfade erkennen, die ungefähr gleichverteilt innerhalb der Probandengruppe auftreten. Die meisten Teilnehmer starten die Einstiegsbewegung in den dreistufigen Lkw mit dem linken Fuß. Anschließend drücken sich die Fahrer nach oben und klettern in einem *Step-over-Step* Verhalten die Trittbretter hinauf. Dabei nutzen sie vorrangig den linken Haltegriff. In der letzten Kategorie teilen sich die Bewegungsverhalten auf drei Bewegungskategorien auf: *Gesäß zuerst* (8 Fahrer, 23,5 %), *Gesäß und zweiter Fuß zur gleichen Zeit* (7 Fahrer 20,6 %) und *zweiter Fuß zuerst* (5 Fahrer 14,7 %). Beim dreistufigen Einstieg ist eine Person nicht im Dendrogramm ausgeführt, da diese zu gleichen Anteilen sich am linken Haltegriff und am Lenkrad festhält. Damit existiert kein Haupt-Greifanteil.

Fast drei Viertel der Teilnehmer starten sowohl beim zweistufigen als auch beim dreistufigen Einstieg mit dem linken Fuß (jeweils 26 Teilnehmer) auf der untersten Trittstufe. Ähnliches Ergebnis liegt beim *Hochdrücken* vor – 28 für den zweistufigen und 26 Fahrer für den dreistufigen Einstieg drücken sich auf der untersten Stufe aus der Beinkraft nach oben und greifen anschließend nach Haltepunkten. In dieser Versuchsreihe wird das von Shorti (2016) beschriebene *Step-by-Step* Verhalten nicht beobachtet. Alle Fahrer nutzen zum Einsteigen ein *Step-over-Step* Muster. Der Haupt-Greifpunkt der linken Hand ist der linke Haltegriff. Für den zweistufigen Lkw nutzen zwei Probanden das Lenkrad als vorrangigen Haltegriff. Aufgrund der niedrigen Fahrzeughöhe kann der Fahrer das Lenkrad erreichen und von Anfang an als Haltegriff verwenden. Hinsichtlich der Einnahme der Fahrhaltung ergeben sich deutliche Unterschiede zwischen dem zweistufigen und dem dreistufigen Einstieg. Mit 79,41 % steigen die meisten Fahrer erst mit beiden Füßen in die zweistufige Kabine, bevor sie sich auf den Sitz niederlassen. Beim dreistufigen Einstieg nutzen nur 39,39 % der Teilnehmer die Strategie *zweiter Fuß zuerst*. Fast ebenso viele (36,36 %) setzen sich zuerst auf den Fahrersitz und ziehen anschließend den zweiten Fuß in das Fahrzeug hinein (*Gesäß zuerst*). Die restlichen 24,24 % ziehen den zweiten Fuß beim Hinsetzen in die Kabine.

Beschreibung der Ausstiegsstrategien

Das Dendrogramm für den Lkw-Ausstieg ist in Abbildung 5-19 dargestellt. Auch hier lassen sich keine einheitlichen Bewegungsstrategien identifizieren. Zeitweise treten einheitliche Bewegungsmuster auf, aber es gibt nicht einzelne Bewegungsabfolgen, die die Fahrer von Anfang bis Ende gleich ausführen. Die Ausstiegsbewegung lässt sich in vier Bewegungssequenzen aufteilen. Zu Beginn wird die Körperhaltung klassifiziert: Stellt der Fahrer seinen Fuß in sitzender Haltung auf die oberste Trittstufe (vgl. Abschnitt 5.4.3) oder erhebt er sich aus dem Sitz (vgl. Chateauroux et al., 2012). Als nächstes wird die Wahl des ersten Fußes auf der obersten Stufe unterteilt, anschließend die Hauptgreif-Punkte für die linke und rechte Hand benannt.

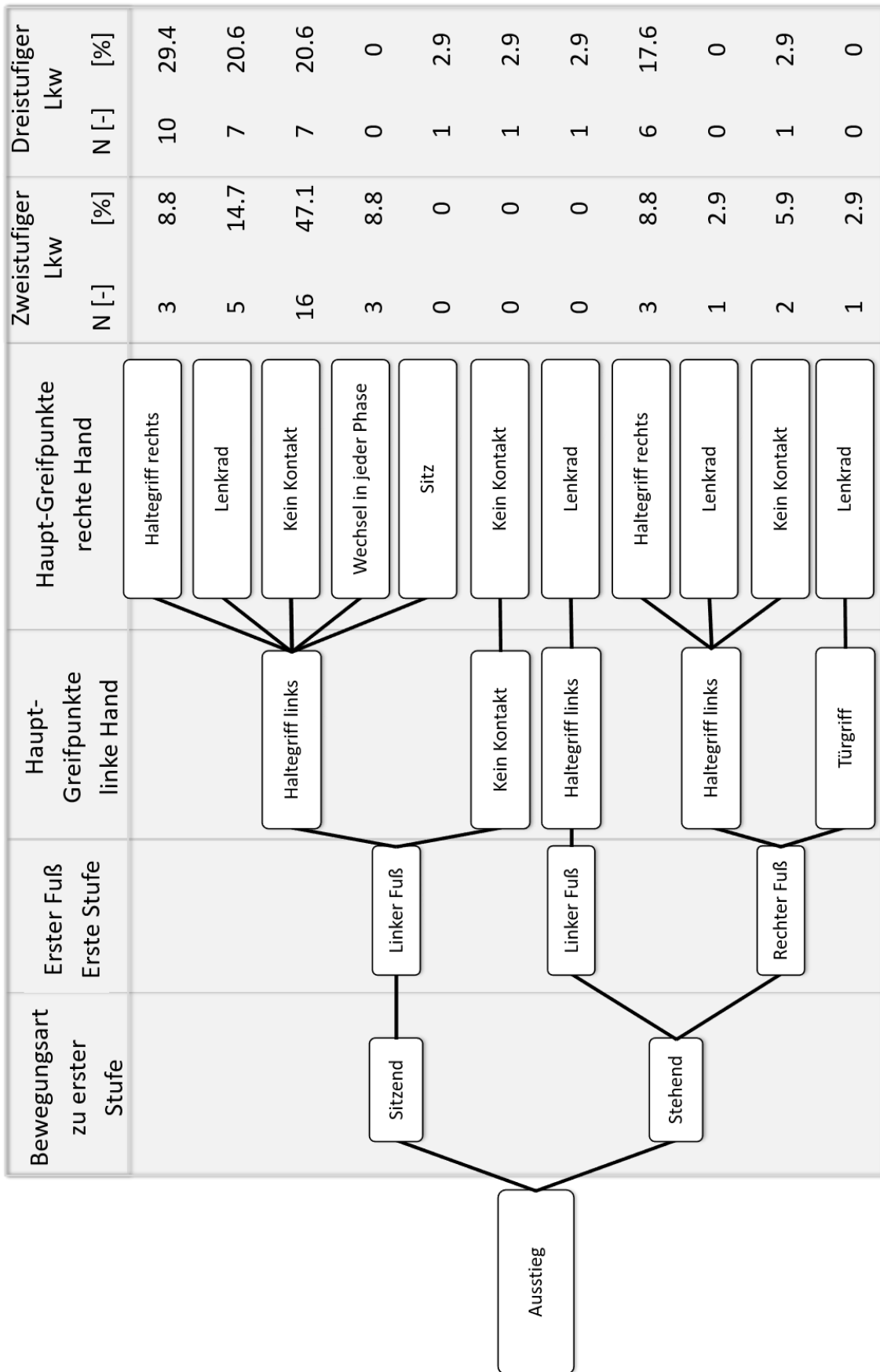


Abbildung 5-19: Dendrogramm für den Lkw-Ausstieg

Mit 47,10 % stellen die meisten Probanden beim zweistufigen Ausstieg ihren linken Fuß auf die oberste Trittstufe. Dabei bleiben sie mit dem Gesäß auf dem Fahrersitz sitzen. Mit der linken Hand halten sie sich am linken Haltegriff fest. Die rechte Hand wird die meiste Zeit nicht zum Greifen eingesetzt. Fast ein Drittel der Teilnehmer (29,41 %) stellen in der sitzenden Haltung ihren linken Fuß auf die oberste Stufe. Sie halten sich beim Absteigen an der linken Haltestange und rechten Haltestange fest. Vergleichbar mit dem Einstiegsverhalten, gibt es beim dreistufigen Ausstieg mehr Bewegungsvarianten als beim zweistufigen.

Achtzehn Probanden starten beim zweistufigen Ausstieg aus der sitzenden Haltung und 16 Teilnehmer beginnen aus der stehenden Haltung heraus ihre Ausstiegsbewegung. Damit treten beide Bewegungsarten ungefähr gleichhäufig auf. Beim dreistufigen Ausstieg verschiebt sich dieses Verhältnis deutlich in Richtung der sitzenden Haltung. Sechszwanzig Fahrer verlassen das Fahrzeug in einer sitzenden Haltung beim dreistufigen Lkw, acht stellen sich im Fahrerhaus auf. Wenn die Fahrer aus der sitzenden Haltung heraus den Ausstieg beginnen, ist der erste Fuß auf der obersten Stufe immer der linke Fuß. Beginnen die Fahrer den Ausstieg aus einer stehenden Haltung, setzen die meisten zuerst den rechten Fuß auf die oberste Stufe. Wie schon in den gestapelten Säulendiagrammen zu sehen ist (vgl. Abbildung 5-17), treten viele Varianten für die Haupt-Greifpunkte der rechten Hand auf, im Gegensatz zur linken Hand.

Instabile Phasen während der Ein- und Ausstiegsbewegung

Beim Betrachten der Dendrogramme fällt auf, dass manche Fahrer (22 beim zweistufigen Lkw und neun beim dreistufigen Lkw) beim Aussteigen die rechte Hand gar nicht oder kaum als Greifunterstützung nutzen (Hauptgreifpunkt rechte Hand: *Kein Kontakt*). Dies bedeutet, dass die Fahrer sich zeitweise nur an zwei Punkten während der Bewegung abstützen, entgegen der BGV Richtlinie (BGV-D29) und dem was die Fahrer in der Fahrschule lernen (Borgdorf, 2015). Diese *instabilen* Phasen treten für die Einstiegsbewegung in Phase II auf, wenn der Fahrer mit dem ersten Fuß auf der untersten Stufe steht und den zweiten Fuß vom Fahrbahnboden auf die mittlere Stufe anhebt. Zehn Teilnehmer (29,41 %) am dreistufigen Zugang greifen nach den Halteoptionen, beim zweistufigen Einstieg sind es 12 Fahrer (35,29 %). Das sind die Fahrer, die sich aus der Beinkraft *hochdrücken* (vgl. Abbildung 5-18). Vor allem kleine Fahrer sind auf die *Hochdrück*-Technik angewiesen, da sie vom Fahrbahnboden nicht beide Haltestangen erreichen. Dieser Umstand ist auf die Besonderheit der Frontlenkerkabine mit den linksseitig angeordneten Trittstufen zurückzuführen, die in Abschnitt 2.2 vorgestellt werden. Sobald beide Füße auf den Trittstufen stehen, treten keine *instabilen* Phasen mehr auf: Die Fahrer verwenden immer mindestens eine Hand zur Unterstützung der Bewegung. Erst wenn die Fahrer im Fahrerhaus ankommen, erreichen zwei Fahrer beim dreistufigen Lkw und ein Fahrer beim zweistufigen Lkw die Fahrerposition freihändig ohne die Hände zum Abstützen zu verwenden.

Bei der Ausstiegsbewegung treten *instabile* Phasen am Ende der Bewegung in Phase IV auf. Analog zum Einstieg lösen 24 Probanden beim dreistufigen Lkw und 30 Teilnehmer beim zweistufigen Lkw ihre Hände von den Haltestangen sobald der Fuß auf der mittleren Stufe zum Hinabsteigen auf den Fahrbahnboden ansetzt. Der zweite Fuß verweilt in dieser Zeit auf der untersten Trittstufe. So lassen sich die Fahrer auf den Fahrbahnboden „herabfallen“.

Einflussfaktoren auf die Ein- und Ausstiegsbewegung

Die logistische Regression zeigt keinen signifikanten Einfluss der Prädiktoren auf die Wahl des ersten Fußes auf der untersten Stufe (siehe Tabelle 5-2) oder des ersten Fußes im Fahrerhaus (siehe Tabelle 5-3) für die Einstiegsbewegung. Bei der Ausstiegsbewegung zeigt sich ein signifikanter Einfluss des Prädiktors Körpergrößengruppe, sowohl für den zweistufigen, als auch für den dreistufigen Ausstieg (siehe Tabelle 5-4).

Tabelle 5-2: statistische Kennwerte für die logistische Regression – 2-stufiger und 3-stufiger Einstieg – erster Fuß auf der untersten Stufe

	95% CI für Odds Ratio				
	eingeschlossen	b	Lower	Odds	Upper
3 stufig Einstieg	Konstante	-4,082			
	Stufenerfahrung zweistufig	-1,111	0,036	0,329	3,051
	Stufenerfahrung dreistufig	0,887	0,173	2,428	34,099
	$R^2 = .107$ (Nagelkerke), $.071$ (Cox & Snell), Modell $\chi^2(2) = 2.508$, $p = .285$				
	starker Fuß	0,155	0,153	1,167	8,876
	$R^2 = .109$ (Nagelkerke), $.073$ (Cox & Snell), Modell $\chi^2(3) = 2.564$, $p = .464$				
	Alter	0,045	0,947	1,046	1,155
	$R^2 = .112$ (Nagelkerke), $.074$ (Cox & Snell), Modell $\chi^2(4) = 2.628$, $p = .622$				
	BMI	0,039	0,784	1,039	1,379
	$R^2 = .123$ (Nagelkerke), $.082$ (Cox & Snell), Modell $\chi^2(5) = 2.906$, $p = .715$				
Körpergrößengruppe	1,252	0,717	3,498	17,057	
$R^2 = .241$ (Nagelkerke), $.160$ (Cox & Snell), Modell $\chi^2(6) = 5.932$, $p = .431$					
2stufig Einstieg	Konstante	-4,364			
	Stufenerfahrung zweistufig	1,515	0,204	4,551	101,676
	Stufenerfahrung dreistufig	0,251	0,155	1,286	10,634
	$R^2 = .011$ (Nagelkerke), $.007$ (Cox & Snell), Modell $\chi^2(2) = 0.253$, $p = .881$				
	starker Fuß	-1,301	0,040	0,272	1,844
	$R^2 = .120$ (Nagelkerke), $.080$ (Cox & Snell), Modell $\chi^2(3) = 2.819$, $p = .420$				
	Alter	-0,003	0,906	0,997	1,097
	$R^2 = .136$ (Nagelkerke), $.090$ (Cox & Snell), Modell $\chi^2(4) = 3.216$, $p = .522$				
	BMI	0,234	0,921	1,264	1,734
	$R^2 = .232$ (Nagelkerke), $.154$ (Cox & Snell), Modell $\chi^2(5) = 5.701$, $p = .336$				
Körpergrößengruppe	0,009	0,301	1,009	3,386	
$R^2 = .232$ (Nagelkerke), $.154$ (Cox & Snell), Modell $\chi^2(6) = 5.701$, $p = .457$					

Tabelle 5-3: statistische Kennwerte für die logistische Regression – 2-stufiger und 3-stufiger Einstieg – erster Fuß im Fahrerhaus

	95% CI für Odds Ratio				
	eingeschlossen	b	Lower	Odds	Upper
3 stufig Einstieg	Konstante	-4,364			
	Stufenerfahrung zweistufig	1,515	0,204	4,551	101,676
	Stufenerfahrung dreistufig	0,251	0,155	1,286	10,634
	$R^2 = .011$ (Nagelkerke), $.007$ (Cox & Snell), Modell $\chi^2(2) = 0.253$, $p = .881$				
	starker Fuß	-1,301	0,040	0,272	1,844
	$R^2 = .120$ (Nagelkerke), $.080$ (Cox & Snell), Modell $\chi^2(3) = 2.819$, $p = .420$				
	Alter	-0,003	0,906	0,997	1,097
	$R^2 = .136$ (Nagelkerke), $.090$ (Cox & Snell), Modell $\chi^2(4) = 3.216$, $p = .522$				
	BMI	0,234	0,921	1,264	1,734
	$R^2 = .232$ (Nagelkerke), $.154$ (Cox & Snell), Modell $\chi^2(5) = 5.701$, $p = .336$				
Körpergrößengruppe	0,009	0,301	1,009	3,386	
$R^2 = .232$ (Nagelkerke), $.154$ (Cox & Snell), Modell $\chi^2(6) = 5.701$, $p = .457$					
2stufig Einstieg	Konstante	6,936			
	Stufenerfahrung zweistufig	1,630	0,394	5,101	66,075
	Stufenerfahrung dreistufig	-0,734	0,021	0,480	10,903
	$R^2 = .154$ (Nagelkerke), $.098$ (Cox & Snell), Modell $\chi^2(2) = 3.511$, $p = .173$				
	starker Fuß	0,093	0,113	1,097	10,608
	$R^2 = .166$ (Nagelkerke), $.106$ (Cox & Snell), Modell $\chi^2(3) = 3.806$, $p = .283$				
	Alter	-0,107	0,792	0,899	1,020
	$R^2 = .208$ (Nagelkerke), $.132$ (Cox & Snell), Modell $\chi^2(4) = 4.832$, $p = .305$				
	BMI	-0,032	0,705	0,968	1,329
	$R^2 = .217$ (Nagelkerke), $.138$ (Cox & Snell), Modell $\chi^2(5) = 5.061$, $p = .408$				
Körpergrößengruppe	-1,820	0,023	0,162	1,166	
$R^2 = .249$ (Nagelkerke), $.390$ (Cox & Snell), Modell $\chi^2(6) = 9.738$, $p = .136$					

Tabelle 5-4: statistische Kennwerte für die logistische Regression – 2-stufiger und 3-stufiger Ausstieg – erster Fuß auf der obersten Stufe

	95% CI für Odds Ratio			
	eingeschlossen	b	Lower	Upper
3 stufig Ausstieg	Konstante	2,210		
	Stufenerfahrung zweistufig	0,020	0,007	1,020
	Stufenerfahrung dreistufig	2,411	0,149	11,149
	$R^2 = .108$ (Nagelkerke), $.069$ (Cox & Snell), Modell $\chi^2(2) = 2.432$, $p = .296$			
	starker Fuß	2,480	0,287	11,936
	$R^2 = .167$ (Nagelkerke), $.107$ (Cox & Snell), Modell $\chi^2(3) = 3.843$, $p = .279$			
	Alter	-0,225	0,634	0,798
	$R^2 = .207$ (Nagelkerke), $.132$ (Cox & Snell), Modell $\chi^2(4) = 4.811$, $p = .307$			
	BMI	0,385	0,863	1,470
	$R^2 = .255$ (Nagelkerke), $.163$ (Cox & Snell), Modell $\chi^2(5) = 6.034$, $p = .303$			
Körpergrößengruppe	-3,794	0,001	0,023	
$R^2 = .664$ (Nagelkerke), $.424$ (Cox & Snell), Modell $\chi^2(6) = 18.760$, $p = .005$				
2stufig Ausstieg	Konstante	2,048		
	Stufenerfahrung zweistufig	-0,338	0,007	0,713
	Stufenerfahrung dreistufig	-0,051	0,012	0,950
	$R^2 = .020$ (Nagelkerke), $.013$ (Cox & Snell), Modell $\chi^2(2) = 0.433$, $p = .805$			
	starker Fuß	1,574	0,173	4,828
	$R^2 = .067$ (Nagelkerke), $.043$ (Cox & Snell), Modell $\chi^2(3) = 1.478$, $p = .687$			
	Alter	-0,228	0,642	0,796
	$R^2 = .087$ (Nagelkerke), $.055$ (Cox & Snell), Modell $\chi^2(4) = 1.939$, $p = .747$			
	BMI	0,528	0,903	1,695
	$R^2 = .183$ (Nagelkerke), $.117$ (Cox & Snell), Modell $\chi^2(5) = 4.222$, $p = .518$			
Körpergrößengruppe	-4,972	0,000	0,007	
$R^2 = .683$ (Nagelkerke), $.436$ (Cox & Snell), Modell $\chi^2(6) = 19.486$, $p = .003$				

Da sich beim zwei- und dreistufigen Ausstieg bei der Körpergröße ein signifikanter Einfluss im Modell zeigt, wird die logistische Regression erneut berechnet. Diesmal wird nur der Einflussfaktor der Körpergröße in das Modell mitaufgenommen. Es zeigt sich, dass je größer ein Fahrer ist, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass der Fahrer mit dem linken Fuß zuerst auf die oberste Stufe steigt (siehe Tabelle 5-5). Abschließend bestätigt ein G*Power Test, dass die Ergebnisse der logistischen Regression nicht auf eine zu geringe Anzahl der Teilnehmer zurückzuführen ist.

Tabelle 5-5: statistische Kennwerte für die logistische Regression – 2-stufiger und 3-stufiger Ausstieg – erster Fuß auf der untersten Stufe

	95% CI für Odds Ratio			
	b	Lower	Odds	Upper
3 stufig	Konstante	1,752		
	Körpergröße	-1,845	0,032	0,158
	$R^2 = .326$ (Nagelkerke), $.208$ (Cox & Snell), Modell $\chi^2(1) = 7.919$, $p = .005$			
2stufig	Konstante	1,752		
	Körpergröße	-1,845	0,032	0,158
	$R^2 = .326$ (Nagelkerke), $.208$ (Cox & Snell), Modell $\chi^2(1) = 7.919$, $p = .005$			

Bewegungsdauer für die Ein- und Ausstiegsbewegung

In der Literatur wird ein Zusammenhang zwischen der Bewegungsdauer und dem auftretenden Diskomfort beschrieben (Chateauroux et al., 2012; Sabbah, 2010). In Bezug auf die Bewegungsdauer beim Ein- und Aussteigen werden drei Analysen durchgeführt: zum ersten wird die Bewegungsdauer der Gesamtbewegung hinsichtlich der Bewegungsrichtung untersucht, anschließend werden die einzelnen Phasen der Bewegungen genauer betrachtet, um herauszufinden in welchen Phasen zeitliche Unterschiede auftreten, zum Abschluss werden die Bewegungszeiten im Hinblick auf die Arbeitsschritte analysiert.

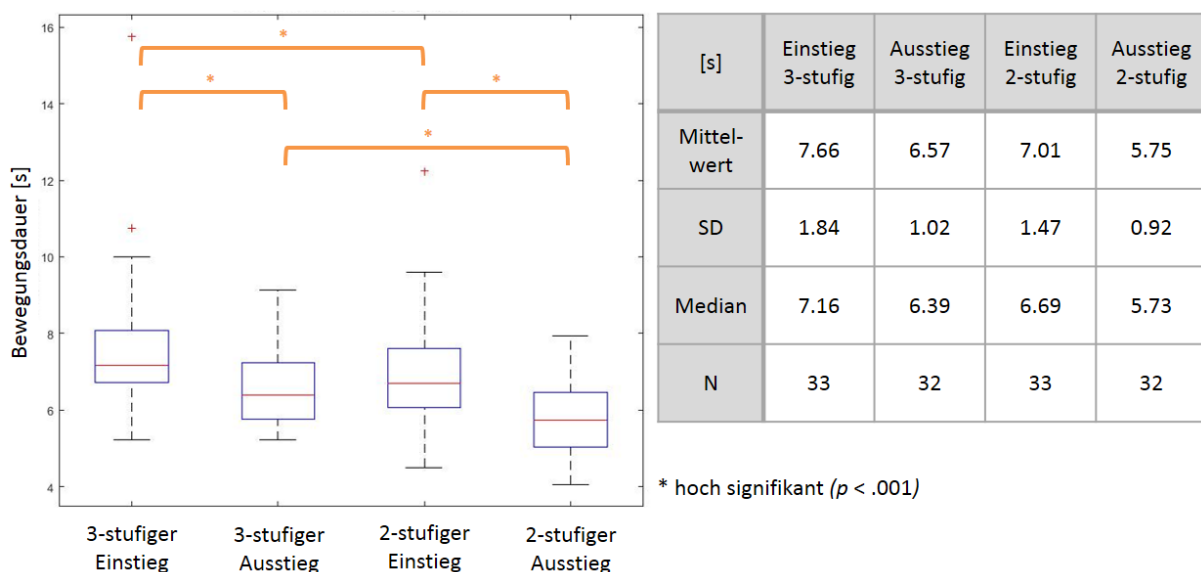


Abbildung 5-20: Bewegungsdauer für den zwei- und dreistufigen Ein- und Ausstieg

Wie in Abbildung 5-20 dargestellt, brauchen die Fahrer im Durchschnitt 7,01 s ($SD = 1,47$ s) für den Einstieg in den zweistufigen Lkw, während sie 7,66 s ($SD = 1,84$ s) beim dreistufigen brauchen. Beim zweistufigen Lkw dauert die Ausstiegsbewegung durchschnittlich 5,57 s ($SD = 0,92$ s) im Gegensatz zur Ausstiegsdauer beim dreistufigen Lkw von im Mittel 6,57 s ($SD = 1,02$ s). Damit dauert sowohl die Einstiegs- ($t(32) = -3.715, p = 0.000$) als auch die Ausstiegsbewegung ($t(31) = -4.677, p = 0.000$) bei einem dreistufigen Lkw länger als bei einem zweistufigen Lkw. Der Manipulationscheck ist erfolgreich und die Daten sind plausibel.

Die Einstiegsbewegung dauert jeweils beim zwei- und dreistufigen Lkw signifikant länger als die Ausstiegsbewegung, $t_{2\text{-stufig}}(31) = 5.928, p_{2\text{-stufig}} = 0.000; t_{3\text{-stufig}}(31) = 3.977, p_{3\text{-stufig}}(31) = 0.000$. Die Probanden steigen im Durchschnitt innerhalb von 7,66 s ($SD = 1,84$ s) in den dreistufigen Lkw ein und benötigen für den Ausstieg durchschnittlich 6,57 s ($SD = 1,02$ s). Beim zweistufigen Lkw dauert der Einstieg im Mittel 7,01 s ($SD = 1,47$ s), während der Ausstieg durchschnittlich innerhalb von 5,75 s ($SD = 0,92$ s) ausgeführt wird. Dieses Ergebnis ist überraschend. Da die Ausstiegsbewegung als die schwierigere Bewegung beim Zugang gilt, wurde eine vorsichtige, langsame Ausstiegsbewegung erwartet.

Bewegungsdauer nach Ein- und Ausstiegsphasen

Um herauszufinden in welchen Abschnitten der Zugangsbewegung Zeitunterschiede auftreten, werden die Gesamtbewegungen in einen Zeitanteil zur Stufenerklimmung und einen Zeitanteil zum Hinsetzen bzw. Aufstehen unterteilt. Der Zeitwert *Stufenschritt* startet beim Einsteigen mit dem Ablösen des ersten Fußes vom Fahrbahnboden zur untersten Stufe und endet mit dem ersten Kontakt eines Fußes mit dem Fahrerhausboden. Diese Zeitspanne wird durch die Anzahl der Stufen geteilt. Somit gibt der Zeitwert *Stufenschritt* eine durchschnittliche Zeit pro Stufenschritt an. Für den Ausstieg startet die Zeitspanne zur Berechnung des Zeitwerts *Stufenschritt*, sobald der Fahrer den ersten Fuß auf die oberste Stufe setzt und endet, wenn beide Füße den Fahrbahnboden berühren. Der Zeitwert *Sitzen* beschreibt die Zeitspanne zwischen dem ersten Fußkontakt mit dem Fahrerhausboden bis die Fahrhaltung eingenommen ist beim Einstieg bzw. vom letzten Moment in dem die Fahrhaltung gehalten wird bis zum Erreichen der obersten Stufe beim Ausstieg. Durch die Zeitwerte *Sitzen* und *Stufenschritt* wird die Gesamtzeit der Ein- und Ausstiegsbewegung in zwei Phasen eingeteilt, um zu analysieren, in welchen Phasen die signifikanten Unterschiede zwischen der Einstiegs- und Ausstiegsbewegung entstehen.

Entsprechend der deskriptiven Daten aus Tabelle 5-6, dauert ein durchschnittlicher Stufenschritt beim dreistufigen Einstieg 0,722 s ($SD = 0,128$ s), beim zweistufigen Einstieg 0,732 s ($SD = 0,191$ s), beim dreistufigen Ausstieg 1,804 s ($SD = 0,892$ s) und beim zweistufigen Ausstieg 1,862 s ($SD = 1,029$ s). Das Hinabsteigen vom Lkw dauert anhand der Mittelwerte der deskriptiven Daten mehr als doppelt so lange pro Stufenschritt als das Hinaufsteigen. Dabei sind die Standardabweichungen der Stufenschritte beim Einstieg fast um Faktor 5 geringer als die vom Aussteigen. Die um mehr als doppelt so lange Dauer eines Stufenschritts während des Aussteigens im Vergleich zum Einsteigen deutet auf die Unsicherheiten beim Aussteigen durch die schwierige Einsehbarkeit der nächsttieferen Stufe hin. Die großen Standardabweichungen beim Aussteigen im Vergleich zum Einsteigen zeigen, dass manche Fahrer deutlich langsamer und eventuell vorsichtiger aussteigen als andere. Dies könnte ein Hinweis auf Fahrer sein, die sich in ihrem Berufsalltag bereits beim Aussteigen verletzt haben.

Tabelle 5-6: Deskriptive Statistik zur Bewegungsdauer unterteilt in Bewegungsphasen

	Stufenschritt E3 drei-stufiger Einstieg	Stufenschritt E2 zwei-stufiger Einstieg	Stufenschritt A3 drei-stufiger Ausstieg	Stufenschritt A2 zwei-stufiger Ausstieg
MW [s]	0,722	0,732	1,804	1,862
SD [s]	0,128	0,191	0,892	1,029
N	34	34	34	34
	Sitzen E3 drei-stufiger Einstieg	Sitzen E2 zwei-stufiger Einstieg	Sitzen A3 drei-stufiger Ausstieg	Sitzen A2 zwei-stufiger Ausstieg
MW [s]	4,826	5,382	0,870	0,909
SD [s]	1,407	2,277	0,122	0,149
N	34	34	34	34

Die Phase des *Hinsetzens* nach der ersten Interaktion eines Fußes mit dem Fahrerhausboden bis zur Einnahme der Fahrerposition dauert im Durchschnitt für den dreistufigen Einstieg 4,826 s ($SD = 1,407$ s) und 5,382 s ($SD = 2,277$ s) für den zweistufigen Einstieg. Beim Aussteigen dauert der durchschnittliche Vorgang vom Lösen der Fahrhaltung bis zum ersten Schritt auf die oberste Stufe für den dreistufigen Lkw 0,870 s ($SD = 0,122$ s) und für den zweistufigen Lkw 0,909 s ($SD = 0,149$ s). Hier zeigt sich, dass die signifikant längere Einstiegsdauer im Vergleich zur Ausstiegsdauer aus der Phase des *Hinsetzens* resultiert.

Die Anzahl der Stufen hat keinen Einfluss auf die Zeitdauer pro Stufenschritt, weder beim Betreten ($t(33) = -0.384$, $p = 0.352$, $r = 0.07$), noch beim Verlassen ($t(33) = 0.765$, $p = 0.225$, $r = 0.13$) des Fahrzeugs. Allerdings zeigen sich Unterschiede in der Bewegungsrichtung. Die *Zeiteinheit pro Stufe* ist für den dreistufigen Einstieg hoch signifikant länger als für den Ausstieg ($t(33) = -7.234$, $p < 0.000$, $r = 0.78$). Dasselbe gilt für den zweistufigen Lkw ($t(33) = -6.724$, $p < 0.000$, $r = 0.76$). Die Phase des *Hinsetzens* dauert beim dreistufigen Einsteigen signifikant länger als beim zweistufigen ($t(33) = -1.996$, $p = 0.027$, $r = 0.33$), analog dauert die Phase des *Aufstehens* beim dreistufigen Ausstieg signifikant länger als beim zweistufigen Lkw ($t(33) = -2.668$, $p = 0.006$, $r = 0.42$). Im Vergleich der Phasen des *Hinsetzens* bzw. *Aufstehens* für den dreistufigen und zweistufigen Lkw ergeben sich hoch signifikante Unterschiede. Die Phase des *Hinsetzens* dauert sowohl beim dreistufigen Lkw ($t(33) = 16.552$, $p = 0.000$, $r = 0.94$), als auch beim zweistufigen Lkw ($t(33) = 11.835$, $p = 0.000$, $r = 0.90$) signifikant länger als die *Aufsteh*-Phase bei den jeweiligen Ausstiegen. Die statistischen Analysen weisen starke Effekte für die Unterschiede zwischen dem Ein- und Aussteigen auf – unabhängig von der Stufenanzahl und sowohl für den *Stufenschritt* als auch für das *Hinsetzen / Aufstehen*.

Bewegungsdauer nach Startfuß

Im folgenden Abschnitt wird untersucht, ob sich die Wahl des Startfußes auf die Bewegungsdauer beim Ein- und Aussteigen auswirkt. Tabelle 5-7 stellt die deskriptive Statistik da.

Tabelle 5-7: Deskriptive Statistik für den Ein- und Ausstieg am dreistufigen (oberen) und am zweistufigen Lkw (unten)

Startfuß am 3-stufigen Lkw	Einstieg mit linkem Fuß	Einstieg mit rechtem Fuß	Ausstieg mit linkem Fuß	Ausstieg mit rechtem Fuß
MW [s]	7,20	9,13	6,42	6,89
SD [s]	1,15	3,09	0,91	1,22
Spannweite [s]	5,22-10,75	7,06-15,75	5,22-8,69	5,59-9,13
Median [s]	6,95	7,88	6,36	6,61
MW ohne Ausreißer [s]	7,05	7,63	--	--
SD ohne Ausreißer [s]	0,89	0,59	--	--
N	24	7	24	6
Startfuß am 2-stufigen Lkw	Einstieg mit linkem Fuß	Einstieg mit rechtem Fuß	Ausstieg mit linkem Fuß	Ausstieg mit rechtem Fuß
MW [s]	7,17	6,33	5,66	5,85
SD [s]	1,14	1,40	1,00	0,59
Spannweite [s]	5,50-8,66	4,50-8,47	4,06-7,94	4,06-7,94
Median [s]	6,73	5,94	5,50	5,78
MW ohne Ausreißer [s]	6,95	--	--	--
SD ohne Ausreißer [s]	1,08	--	--	--
N	24	7	24	6

Aus Tabelle 5-7 ist den deskriptiven Werten zu entnehmen, dass der dreistufige Einstieg, beginnend mit dem linken Fuß, im Durchschnitt 7,20 s ($SD = 1,15$ s) dauert. Fahrer, die ihre Einstiegsbewegung in den dreistufigen Lkw mit dem rechten Fuß beginnen, benötigen durchschnittlich 9,13 s ($SD = 3,09$ s). Beim zweistufigen Lkw dauert das Einsteigen durchschnittlich 7,17 s ($SD = 1,14$ s), wenn die Fahrer mit dem linken Fuß auf die unterste Stufe treten und 6,33 s ($SD = 1,40$ s) mit dem rechten Fuß auf der untersten Stufe. Zusätzlich werden die Mittelwerte und Standardabweichungen ohne Ausreißer – mehr als zwei Standardabweichungen über dem Mittelwert – berechnet. Für den dreistufigen Einstieg ergibt sich eine durchschnittliche Einstiegsdauer mit dem linken von Fuß von 7,05 s ($SD = 0,89$ s) und mit dem rechten Fuß von 7,63 s ($SD = 0,59$ s). Beim zweistufigen Lkw liegt die durchschnittliche Einstiegsdauer

Beim dreistufigen Einstieg dauert die Bewegung mit dem linken Fuß (Median = 6,95 s) signifikant kürzer als mit dem rechten Fuß (Median = 7,88 s), $U = 35.000$, $p = 0.021$. Der Unterschied weist eine mittlere Effektstärke nach Cohen (1992) auf, $r = 0.42$. Beim zweistufigen

Einstieg lässt sich statistisch kein signifikanter Unterschied zwischen der Bewegungsdauer beginnend mit dem linken (Median = 6,73 s) oder dem rechten Fuß (Median = 5,94 s) nachweisen, $U = 47.000$, $p = 0.80$. ohne Ausreißer bei 6,95 s ($SD = 1,08$ s). Beim dreistufigen Einstieg ist eine Bewegung, beginnend mit dem linken Fuß, schneller als die Bewegung beginnend mit dem rechten Fuß. Dieses Verhältnis kehrt sich beim zweistufigen Einstieg um.

Beim Aussteigen dauert die Bewegung aus dem dreistufigen Fahrzeug im Durchschnitt 6,42 s ($SD = 0,91$ s) beginnend mit dem linken und 6,89 s ($SD = 1,22$ s) dem rechten Fuß. Die Ausstiegsbewegung aus dem zweistufigen Lkw dauert im Durchschnitt mit dem linken Fuß 5,66 s ($SD = 1,00$ s) und mit dem rechten Fuß 5,85 s ($SD = 0,59$ s). Für den Ausstieg zeigen sich keine signifikanten Unterschiede in der Bewegungsdauer hinsichtlich des Startfußes, weder für den zweistufigen ($U = 57.000$, $p = 0.437$) noch für den dreistufigen ($U = 56.000$, $p = 0.407$) Lkw.

5.6 Fazit der zweiten methodischen Phase in der DRM

Der Lkw-Ein- und Ausstieg ist eine komplexe Ganzkörperbewegung, die nicht durch reine Beobachtung erfasst und kategorisiert werden kann. Die Beobachtung ermöglicht einen ersten Eindruck der Halte- und Trittoptionen während des Betretens und Verlassens und von Auffälligkeiten im Bewegungsablauf. Lkw-Fahrer benutzen den Türinnengriff, das Lenkrad und die Haltestangen an der A- und B-Säule während des Ein- und Ausstiegsvorgangs. Entgegen den Richtlinien der Berufsgenossenschaft und dem Erlernten aus der Fahrschule steigen die Fahrer mit Gegenständen in den Händen ein und aus. Damit limitieren sie ihre Greifoptionen. Doch auch mit freien Händen scheinen die Haltegriffe für die Fahrer nicht adäquat nutzbar zu sein, treten gerade hier zahlreiche Bewegungsvarianten beim Ein- und Aussteigen auf. Dies bestätigt die Beobachtungen von Fathallah und Cotnam (2000) und Shorti (2016) einer unstimmgigen Anordnung der Haltegriffe. Auch im Fußverhalten sind Abweichungen von dem in der Fahrschule erlerntem Verhalten zu erkennen. Die Fahrer lassen teilweise Trittstufen aus oder ziehen während des Ein- und Aussteigens ihre Straßenschuhe aus und stellen diese auf den Trittstufen ab. Da selbst geübte Lkw-Fahrer ihren Bewegungsablauf innerhalb sechs kurz aufeinander folgenden Bewegungswiederholungen variieren zeigt dies eine **Inkompatibilität zwischen dem Inneren Modell der Fahrer und dem Konzeptmodell der Zugangsgeometrie**.

Die Lkw-Fahrer signalisieren eine Bereitschaft die Zugangsgeometrie nezugestalten und zeigen sich offen gegenüber grundlegenden Veränderungen, wie ein Zugang hinter dem Fahrersitz oder durch die Rückwand der Kabine. Dabei legen die Fahrer Wert auf einen treppenartigen Zugang. Außenliegende Elemente der Zugangsstruktur werden auf Grund der Verkehrssicherheit, Alltagstauglichkeit und der zusätzlichen Gefährdung im Falle eines Unfalls abgelehnt. Als Sicherheitsmerkmal dient eine gute Ausleuchtung der Trittbereiche. Ein Sonderfall des Zugangs stellt die Ein- und Ausstiegssituation bei halbgeöffneter Tür dar. Diese sollte bei der Anordnung der Haltegriffe und Trittbretter berücksichtigt werden. Dieser Sonderfall wird in der vorliegenden Arbeit nicht weiter betrachtet.

Ausgehend von der Inkompatibilität zwischen dem *Konzeptmodell* der Zugangsgeometrie und dem Inneren Modell der Fahrer liegt im Folgenden der Fokus auf dem Ein- und Ausstiegsverhalten der Fahrer, losgelöst von aktuellen strukturellen Restriktionen, um daraus eine Optimierung der Zugangsgeometrie im Sinne der Fahrer abzuleiten. Da sich Hand- und Fußverhalten beim Ein- und Aussteigen unabhängig voneinander zeigen (Shorti, 2016), liegt der weitere Fokus dieser Arbeit auf dem Fußverhalten. Die Betrachtungsweisen des Handverhaltens müssen in nachfolgenden Arbeiten detailliert betrachtet werden.

6 Phase III: Entwickeln von Annahmen

Die dritte Phase der DRM hat das Ziel, eine Methode oder ein Modell der verbesserten Situation zu entwickeln (Blessing & Chakrabarti, 2002). Davon ausgehend werden in Kapitel 6 drei Studien durchgeführt. Die übergreifende Fragestellung in diesem Kapitel bezieht sich auf die gewünschte Zugangssituation aus Sicht der Nutzer: Wie wünschen sich die Lkw-Fahrer die Zugangsgeometrie losgelöst von den bisherigen Bauraumvorgaben? Dafür wird im ersten Schritt die zukünftige Zugangssituation anhand einer Szenario-Analyse beleuchtet und geklärt, welche Relevanz die Zugangsgeometrie unter dem Einfluss zukünftiger Entwicklungen, wie beispielsweise dem automatisierten Fahren, im Berufsalltag der Lkw-Fahrer in kommenden Zeiten spielt (Abschnitt 6.1). Im Anschluss werden im Rahmen einer Probandenstudie, ausgehend von einem Zugangskonzept über die Kabinenseite, die optimale Stufenbreite und der bevorzugte Stufenauszug an einem variabel einstellbaren Prüfstand ermittelt (Abschnitt 6.2). In einer dritten Studie wird der präferierte Startfuß bei der Einstiegsbewegung analysiert (Abschnitt 6.3).

6.1 Szenario-Analyse zur Ableitung des zukünftigen Gestaltungsspielraums

6.1.1 Motivation: zukünftige Rolle der Zugangsgeometrie

Mit einer Szenario-Analyse wird der zukünftige Gestaltungsspielraum der Zugangsgeometrie beleuchtet. Im Zentrum steht die Frage, welche Rolle der Ein- und Ausstieg bei Nutzfahrzeugen unter Berücksichtigung technischer Weiterentwicklungen und gesetzlicher Änderungen spielt. Der Zeithorizont ist bis 2035 festgelegt.

6.1.2 Methode: Szenario-Analyse

Theorie

Die Gestaltung neuer Konzepte beruht auf Annahmen, wie sich Einflussbereiche über die Zeit entwickeln. Diese Annahmen treffen die Hersteller zum Entwicklungszeitpunkt und projizieren diese in zukünftige Zeitschritte. Daraus lassen sich künftige Anwendungsfälle konstruieren. Bedingt durch Entscheidungen der Gegenwart ist die nahe Zukunft weitestgehend festgelegt und Szenarien sind mit geringen Unsicherheiten abschätzbar. (Geschka & Hammer, 1990; von Reibnitz, 1992)

Je weiter das geplante Szenario in der Zukunft liegt ist, desto weiter öffnet sich das Möglichkeitsspektrum und die Ausprägungen der Anwendungsfälle potenzieren sich. Diesen Gedanken stellen Geschka und Hammer (1990) und von Reibnitz (1992) in einem Szenario-Trichter, wie in Abbildung 6-1, dar. Mit aufsteigender Zeitachse nehmen die Unsicherheiten in Bezug auf die Entwicklung von Einflussfaktoren zu und damit die Anzahl möglicher, auftretender Nutzungszusammenhänge. Ein Störereignis, in Abbildung 6-1 mit einem Pfeil gekennzeichnet, verändert die Entwicklung eines Szenarios (vgl. Szenario A und A1).

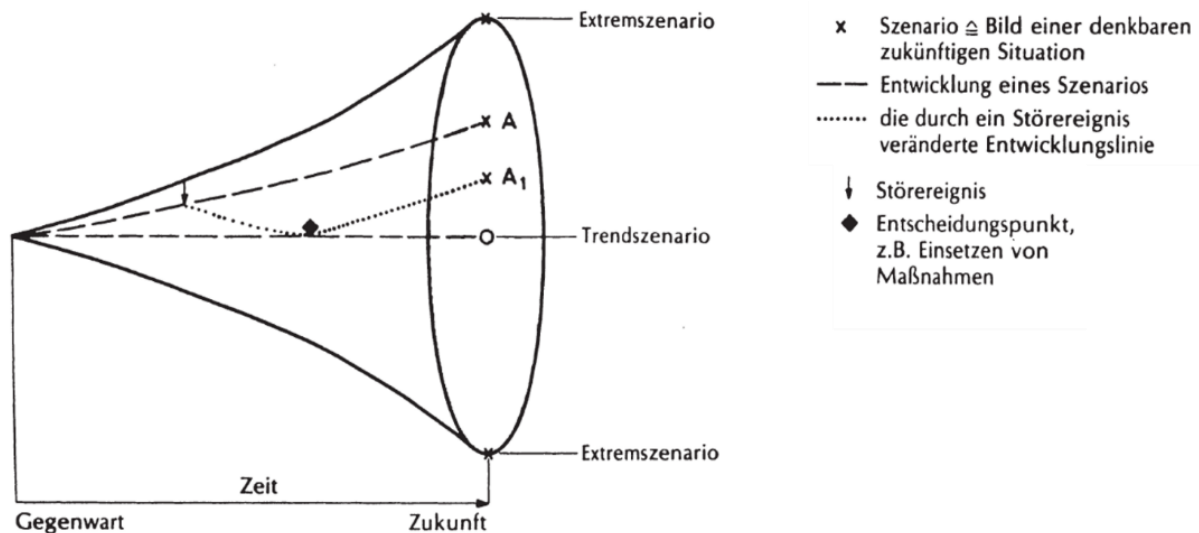


Abbildung 6-1: Szenario-Trichter: entlang der Zeitachse wächst die Variantenvielfalt zukünftiger Entwicklungen (Geschka & Hammer, 1990, S. 315)

Um das gesamte Spektrum möglicher Zukunftsszenarien aufzuspannen, empfehlen Geschka und Hammer (1990) die beiden Extremszenarien am oberen und unteren Rand des Szenario-Trichters zu erarbeiten. Alle möglichen Nutzungsfelder befinden sich zwischen diesen beiden Extremszenarios. Für die Entwicklung von Zukunftsszenarien analysieren Geschka und Hammer (1990) Einflussbereiche auf den Nutzungskontext und projizieren diese in spätere Zeitschritte. Das methodische Vorgehen ist in acht Schritten aufgeteilt (Geschka & Hammer, 1990): Im ersten Schritt wird die Aufgabenstellung konkret formuliert (Geschka & Hammer, 1990) und die aktuelle Situation analysiert (von Reibnitz, 1992). Anschließend folgt die Identifizierung und Priorisierung der Einflussbereiche auf den zu beschreibenden Anwendungsfall (Geschka & Hammer, 1990; von Reibnitz, 1992). Die aktuelle Situation der Einflussfaktoren wird durch wertneutrale Deskriptoren abgebildet. Welche im dritten Schritt, der Trendprojektion, in künftige Zeitschritte übertragen werden (Geschka & Hammer, 1990; von Reibnitz, 1992). Eine Auswahl der in die Zukunft projizierten Deskriptoren werden anschließend zusammengeführt und liefern die Grundlage für die Erarbeitung unterschiedlicher Zukunftsszenarien.

Das Ziel der Alternativenbündelung ist es, in sich konsistente und stabile, aber in ihrer Ausführung sehr verschiedene Szenarien zu entwerfen (Geschka & Hammer, 1990; von Reibnitz, 1992). Die Alternativenbündelung bildet den Kern der Szenarien-Technik. Die hierbei gebildeten Anwendungsumfelder werden im fünften Schritt der Szenario-Analyse interpretiert und ausformuliert (Geschka & Hammer, 1990; von Reibnitz, 1992). Nachdem die Szenarien erarbeitet sind, werden die Konsequenzen auf den Untersuchungsgegenstand abgeleitet und Chancen und Risiken abgeschätzt (Geschka & Hammer, 1990; von Reibnitz, 1992). Anschließend folgen eine Analyse möglicher Störereignisse (von Reibnitz, 1992) zur Abschätzung der Stabilität der erarbeiteten Szenarien gegenüber externen Veränderungen (Geschka & Hammer, 1990) und die Ableitung von Maßnahmen im Schritt des Szenario-Transfers (Geschka & Hammer, 1990; von Reibnitz, 1992).

Probandenkollektiv

Vier Experten aus den Bereichen der Serienentwicklung des Fahrerhauses, der Ergonomie und des automatisierten Fahrens. Alle Experten arbeiten seit mindestens 5 Jahren in ihrem Gebiet und haben sich eine Expertise aufgebaut.

Ablauf

Die Expertenrunde bearbeitet die Aufgabenteile der *Trendprojektion*, *Alternativenbündelung* und mögliche *Störereignisse*. Die anderen Arbeitsteile der Szenario-Analyse werden in einem Team aus dem Autor mit dem Studierenden Pitzl (2018) vor- beziehungsweise nachbereitet. Das exakte Vorgehen ist in der Masterarbeit nachzulesen (Pitzl, 2018).

Die Aufgabenanalyse lautet:

Wie wirken sich die zukünftigen Trends auf die Fahrerhausgestaltung (Innenraum, Fahrerarbeitsplatz) und den Fahrerhauszugang aus?

Der Betrachtungszeitraum ist bis 2035 mit dem Fokus auf den Fernverkehr definiert. Bei der nachfolgenden Einflussanalyse ergeben sich sechs Einflussbereiche, die anhand einer Einflussmatrix (Lindemann, 2009) und eines Einflussportfolios (Lindemann, 2009) kategorisiert werden. Daraus leitet sich folgende Rangfolge der Einflussbereiche ab:

- A Politik und Gesetzgebung
- B Kunden
- C Technik
- D Wirtschaft
- E Wettbewerb
- F Gesellschaft

Der Einfluss der *Politik und Gesetzgebung* beinhaltet dabei Umweltvorgaben, Längen- und Gewichtsvorschriften, die gesetzlich geförderte Vereinbarkeit zwischen Beruf und Familie, die Infrastruktur und die Regelungen hinsichtlich Lenk- und Ruhezeiten für Berufskraftfahrer. Der Bereich *Kunden* beschreibt die Kundengruppen, ihre Verhalten und ihre Anforderungen, den demographischen Wandel und das Berufsbild des Lkw-Fahrers. Alternative Antriebe, automatisiertes Fahren, Digitalisierung, Individualisierung und Unterstützungssysteme sind Deskriptoren des Einflussbereichs *Technik*. Der Bereich *Wirtschaft* umfasst die Einkommens- und Verkehrsentwicklung, während der Einfluss *Wettbewerb* Entwicklungen und Produkte aktueller und neuer Parteien beinhaltet. Abschließend beeinflusst der Bereich *Gesellschaft* durch Wertewandel, Konsumverhalten und Rollenbilder zukünftige Entwicklungstendenzen und die Akzeptanz bzw. Annahme dieser innerhalb der Gesellschaft. Die nachfolgende Trendprojektion und Alternativenbündelung finden im Rahmen eines Experten-Workshops statt. Die vier Experten projizieren den aktuellen Zustand der Deskriptoren in die Zeitschritte 2025 und 2035 und bündeln diese zu möglichen Szenarien. Zusätzlich werden Störereignisse und ihre Auswirkungen gesammelt. Im Nachgang des Workshops werden die gebildeten Szenarien überarbeitet, interpretiert und ausformuliert.

6.1.3 Ergebnisse: Vorstellung des zukünftigen Gestaltungsspielraums

Anhand der Szenario-Analyse nach Geschka und Hammer (1990) werden zwei mögliche Anwendungsfälle für das Jahr 2035 erarbeitet. Die beiden Anwendungsfälle spannen die Reichweite des Szenario-Trichters auf. Zukünftige Anwendungsfälle können auch zwischen diesen beiden Szenarien liegen. Die Szenarien werden in Zusammenarbeit zwischen dem Autor und dem Studierenden Pitzl im Rahmen seiner Studienarbeit entwickelt (Pitzl, 2018).

Szenario A

In Europa ist umfangreiches automatisiertes Fahren (Stufe 4) gesetzlich zulässig, technisch ausgereift und daher im Fernverkehr flächendeckend umgesetzt. Über weite Strecken kann der Lkw vollkommen automatisiert fahren, ein Fahrer wird nur in besonderen Situationen wie etwa auf den letzten Teilstrecken im städtischen Umfeld bis zur Anlieferung an der Laderampe oder bei sehr schlechten Straßenverhältnissen benötigt. In solchen Bedarfsfällen steigt dann planmäßig ein Fahrer zu.

Ein großer Vorteil für die Speditionen hierbei ist der Wegfall von Unterbrechungen der Fahrt durch vorgeschriebene Ruhepausen für den Fahrer. Dadurch kann der Lkw deutlich besser ausgelastet werden. Zusammen mit der automatisierten Fahrweise steigt durch intensive Vernetzung der Lkw sowohl untereinander als auch mit den Speditionen und Logistikkunden die Zuverlässigkeit, Planbarkeit und Termintreue der Transporte. Die Lkw stellen dabei für die Speditionen ein reines Investitionsgut dar und sind weitgehend auch herstellerübergreifend standardisiert. Zum einen lässt sich so eine Kostenreduzierung erzielen, zum anderen wird der ständige Wechsel zwischen verschiedenen Lkw für die Fahrer wesentlich erleichtert.

Das Berufsbild des Fahrers wandelt sich insbesondere aufgrund der Automatisierung der Lkw grundlegend. So reist der Fahrer nicht mehr mit dem Fahrzeug über mehrere Tage während einer Tour mit, sondern ist nur noch in einem begrenzten Gebiet tätig. Dort übernimmt er vergleichbar mit einem Lotsen täglich mehrere Lkw und steuert sie den letzten Teil ihrer Touren abseits der Autobahn bis zum Ziel. Die regionale Gebundenheit ermöglicht so eine wesentlich verbesserte Vereinbarkeit von Beruf und Familie. Die reine Fahrtätigkeit ist dabei nur ein Teil der täglich anfallenden Aufgaben. Durch häufiges Ein- und Aussteigen sowie mehrfaches Wechseln der Lkw gestaltet sich der Arbeitsalltag abwechslungs- und bewegungsreicher. Zeitlich sowie örtlich gut planbare Pausen erleichtern zudem eine gesunde Ernährungsweise. Diese Faktoren tragen zu einer Attraktivitätssteigerung des Fahrerberufs insbesondere auch bei Frauen bei und ermöglichen zudem eine Ausübung dessen als Nebenjob. In der Folge herrscht auf dem Arbeitsmarkt ein großes Angebot an Fahrern unterschiedlichen Alters, Geschlechts und (Aus-) Bildungsgrades.

Weiter zunehmender globaler Handel führt zu stetig steigendem Transportaufkommen. Trotz besserer Ausnutzung des Verkehrsraums durch Platooning¹⁷ und sinkendem Bedarf an Rastplätzen droht auch aufgrund zu geringer Investitionen in die Infrastruktur ein Verkehrsinfarkt auf der Straße. Ein möglichst großer Teil der zulässigen Gesamtfahrzeuglänge wird daher als Ladefläche genutzt, um die maximale Transportmenge erzielen zu können. Der zunehmende Güterverkehr stellt auch eine große Umweltbelastung da, weswegen durch den Gesetzgeber flächendeckend besonders emissionsarme Antriebssysteme vorgeschrieben sind. So werden Lkw mit alternativen Bio-Kraftstoffen, Hybridantrieben und vor allem mit Elektroantrieben eingesetzt. (Pitzl, 2018, S. 40-41)

In Szenario A werden nur auf der sogenannten *Last Mile* ein Fahrer benötigt, daher ist die Kabine schmal gestaltet mit einem treppenartigen, innenliegenden Zugang. Der Fahrer führt seine Fahrtätigkeit im Stehen aus. Dazu kann er sich an eine Polsterrolle an der Kabinenrückwand

¹⁷Platooning (engl.) bezeichnet eine Kolonnenfahrt mehrerer Fahrzeuge, gekoppelt durch digitale Systeme, die in geringem Abstand hintereinander herfahren. Der geringe Fahrzeugabstand verspricht eine bessere Straßenausnutzung, eine verbesserte Aerodynamik und einen geringeren Kraftstoffverbrauch (Maurer, Gerdes, Lenz, & Winner, 2016)

anlehnen. Der Fahrerarbeitsplatz ist mittig positioniert und große Scheibenöffnungen gewähren dem Fahrer eine gute Rundumsicht. Rechts neben dem Lenkrad befindet sich eine Ablage für Unterlagen und ein Bildschirm für digitale Anzeigen. Die Bedienung der pedallosen Anordnung ist rechts vom Lenkrad angebracht und soll für jeden Nutzer intuitiv zu bedienen sein. Konzeptionelle Umsetzungen für eine pedallose Bedienung finden sich beispielsweise bei Karg (2011) oder Mundi (2018). Das Szenario A zeigt, dass in Zukunft Fahrer für Lkw gebraucht werden – wenn auch nur für kurze Strecken. Das Ein- und Aussteigen bleibt ein Themenschwerpunkt, da der Fahrer häufig das Fahrzeug wechseln muss. Allerdings werden die eingesetzten Fahrer keine Berufskraftfahrer im heutigen Sinne mehr sein, sondern ungeübte Nebenjobber. Damit muss der Zugang zu den Fahrzeugen so gestaltet sein, dass ihn auch ungeübte Personen sicher und komfortabel nutzen können.

Szenario B

Erhebliche Unterschiede in der Gesetzgebung der einzelnen Länder in Europa verhindern einen flächendeckenden Einsatz von autonom fahrenden Lkw. So ist teilweise ein hohes Automatisierungsniveau erlaubt, in anderen Ländern ist dies auf wenige bestimmte Streckenabschnitte begrenzt oder es sind, wenn überhaupt, nur einzelne Techniken wie etwa Platooning auf der Autobahn zulässig. Auf längeren Mehrtagestouren durch unterschiedliche Länder muss also stets ein Fahrer an Bord sein, der je nach entsprechend gültiger Gesetzeslage den Lkw steuert oder zumindest überwacht und bei Bedarf eingreifen kann. Wie bisher zählt dabei jede Bewegung des Fahrzeugs als Lenkzeit, dementsprechend müssen auch die Ruhezeiten durch Pausen z.B. an Rastplätzen eingehalten werden.

Für den Beruf des Lkw-Fahrers bedeutet dies einerseits eine Aufgabenverlagerung bzw. -erweiterung, da er während einer automatisiert gefahrenen Phase durchaus anderen Tätigkeiten wie etwa administrativen Aufgaben, Essenszubereitung, Kommunikation mit der Familie oder einer Freizeitbeschäftigung nachgehen kann. Mit einiger Vorlaufzeit kann er dabei jederzeit wieder die Steuerung des Lkws übernehmen. Andererseits muss der Fahrer weiterhin mit dem Fahrzeug mitreisen und meist auch darin übernachten.

Zwar verbessert sich durch die beschriebenen Nebenaufgaben während der Fahrt das Image des Berufes geringfügig, allerdings erfordern diese auch entsprechende Erfahrung und Qualifikation des Fahrers und führen insbesondere in Kombination mit Faktoren wie der weiterhin schlechten Vereinbarkeit von Beruf und Familie in zu einem Unterangebot an Fahrern auf dem Arbeitsmarkt. In der Folge werden zum einen verstärkt auch sehr schlecht ausgebildete oder eingewanderte Arbeitskräfte eingesetzt, zum anderen müssen die Fahrzeughersteller den gestiegenen Anforderungen der spezialisierten Fahrer an den Lkw hinsichtlich Individualisierbarkeit und Komfort gerecht werden. Dazu zählen in besonderem Maße auch die Unterstützung einer gesunden Ernährung und Lebensweise durch das Fahrzeug. Aus Sicht der Speditionen ist dabei neben geringen Fahrzeugkosten vor allem ein geringes erforderliches Qualifikationsniveau der Fahrer zur einfachen und schnellen Personalgewinnung von großer Bedeutung.

Zur Verbesserung von Komfort, Sicherheit und Aerodynamik nicht aber als zusätzliche Ladefläche erlaubt der Gesetzgeber eine Vergrößerung des Fahrerhauses über die bisherigen Maße hinaus. Zudem sind zur Reduzierung der Umweltbelastung durch den zunehmenden Güterverkehr emissionsarme Antriebssysteme, z.B. Elektroantriebe gesetzlich vorgeschrieben. (Pitzl, 2018, S. 41-42)

In dem Szenario B muss der Fahrer mit dem Fahrzeug mitreisen und für bestimmte Wegstrecken die Fahrzeugführung übernehmen. Durch die Technik des automatisierten Fahrens und der daraus resultierenden fahrfremden, wertschöpfenden Tätigkeiten wird der Beruf des Kraftfahrers aufgewertet. Dies zeigt sich in einer geräumigen Fahrerkabine mit großem Bett, einem Panoramadach, einer Küchen- und einer Nasszelle. Dem Fahrer steht eine vollständig eingerichtete Unterkunft zur Verfügung, mit der er autark reist. Der Fahrerarbeitsplatz und der Büroarbeitsplatz befinden sich im vorderen Teil der Kabine, mittig ist der Fahrerarbeitsplatz zur manuellen Fahrt angeordnet und auf der rechten Seite steht dem Fahrer ein Schreibtisch zur Ausführung fahrfremder Tätigkeiten zur Verfügung. Über den Drehstuhl kann der Fahrer die Arbeitsplätze wechseln. Das Szenario B zeigt ein Innenraumkonzept, das den Fahrer mit seinen Tätigkeiten aufwertet – im Vergleich zum heutigen Fahrerimage (vgl. Lohre et al., 2014). Die Kabinengestaltung zeigt die Aufwertung durch eine nutzerzentrierte Gestaltung. Konsequenterweise muss sich die nutzerzentrierte Gestaltung auf alle Bereiche und somit auch auf den Zugang erstrecken. Im Konkurrenzkampf um erfahrene Fahrer, rundet ein sicherer und komfortabler Kabinenzugang ein stimmiges Gesamtkonzept ab und erhöht die Chancen der Arbeitgeber auf gutes Personal.

6.2 Untersuchung der Stufenbreite und des Stufenauszugs

6.2.1 Motivation: tatsächliche Stufennutzung der Lkw-Fahrer

Der Hauptunterschied in der Ein- und Ausstiegsgeometrie zwischen amerikanischen und europäischen Nutzfahrzeugen liegt in der Stufenbreite und dem Stufenauszug. Daher rücken diese beiden Aspekte in den Fokus der ersten präskriptiven Studie.

Nachdem sichergestellt ist, dass in Zukunft der Zugang ein themenschwerpunkt bei der Fahrerhausentwicklung darstellt, wird eine Probandenstudie mit Lkw-Fahrern an einem variablen Mock-Up durchgeführt. Aufbauen auf einem treppenartigen Konzept an der Kabinenseite werden die Stufenbreite und der Stufenauszug variiert, um die favorisierte Ausführung der Nutzer zu definieren.

6.2.2 Methode: Probandenstudie an variablen Prüfstand

Nachdem die Zugangsbewegung in Zukunft weiterhin relevant bleibt, trotz technischer und gesetzlicher Änderungen, wird in der nächsten Probandenstudie¹⁸ die detaillierte Ausgestaltung der von den Fahrern gewünschten Zugangsgeometrie betrachtet.

Probandenkollektiv

Für die Auswahl der Versuchsteilnehmer gelten dieselben Voraussetzungen wie in der Studie aus Abschnitt 5.5. An dem Versuch nehmen 27 Personen teil. Alle sind im Besitz eines gültigen Lkw-Führerscheins. Zwei der Teilnehmer sind weiblich, 25 männlich. Durchschnittlich sind die Probanden 40,33 Jahre alt ($SD = 11,73$ Jahre, Wertebereich = 23 bis 63 Jahre). Die Teilnehmer wiegen im Mittel 82,9 kg ($SD = 17,74$ kg, Wertebereich = 53,3 bis 133,8 kg), das bei einer Durchschnittsgröße von 1,79 m ($SD = 0,087$ m; Wertebereich = 1,57 bis 1,92 m) einem BMI

¹⁸ Der Versuch wird von vier Studierenden durchgeführt, die die Ergebnisse jeweils nach unterschiedlichen Schwerpunkten auswerten (Lechner, 2018; Orabi, 2018; Schweiger, 2018; Zipse, 2018). Die vorliegenden Ergebnisse sind, sofern nicht anderweitig gekennzeichnet, vom Autor selber ausgewertet und nicht aus den Studienarbeiten übernommen.

von $25,71 \text{ kg/m}^2$ ($SD = 4,65 \text{ kg/m}^2$, Wertebereich = 18,44 bis $37,46 \text{ kg/m}^2$) entspricht. In Anbetracht der vorrangig männlichen Versuchsteilnehmer liegt das Probandenkollektiv an der Grenze zum Übergewicht (Bundesministerium für Gesundheit, 2018). Nach eigener Angabe steigen die Teilnehmer pro Woche durchschnittlich 25,90 mal in ihren Lkw ein und aus ($SD = 40,00$ mal, Wertebereich = 1 bis 180 mal). In einem Within-Subject-Design durchlaufen alle Probanden alle Versuchsbedingungen.

Ablauf

Die Probandenstudie wird an dem variablen Mock-Up LEAVA (siehe Maududi, 2017) durchgeführt. Das Einstiegsmodul LEAVA (Lkw-Ein- und Ausstieg variabel auslegen) ist in den Punkten Stufenanzahl, Stufenhöhe, Stufenbreite und Stufenauszug einstellbar (vgl. Abbildung 6-2).



Abbildung 6-2: Einstiegsmodul LEAVA

Der Versuch teilt sich in zwei Abschnitte: im ersten wird die Stufenbreite variiert, im zweiten Abschnitt der Stufenauszug. Über alle Versuchsteile bleiben der Türöffnungswinkel von 90° , der Türdurchgang, die Stufenanzahl von drei Trittstufen, die Stufentiefe von 160 mm und die Position von Lenkrad, Pedalerie und Sitz unverändert.

Im ersten Versuchsteil steigen die Teilnehmer in die Realfahrzeuggeometrie, abgebildet in Abbildung 6-3, ein und anschließend in eine Variante mit durchgängiger Stufenbreite, dargestellt in Abbildung 6-4. Hierbei wird der Einfluss der Stufenbreite auf die Wahl der Ein- und Ausstiegsstrategie untersucht sowie eine optimale Stufenposition und Stufenbreite für den Ein- und Ausstieg ermittelt. Folgende Fragestellungen werden adressiert:

Optimale Stufenbreite und Stufenposition

Welche Auftrittsbereiche nutzen die Fahrer bei maximaler Stufenbreite für den Ein- und Ausstieg?

Bewegungsstrategien

Wirkt sich die Stufenbreite auf die Wahl des Startfußes bei der Ein- und Ausstiegsbewegung aus?

Konfiguration 1: Realfahrzeug

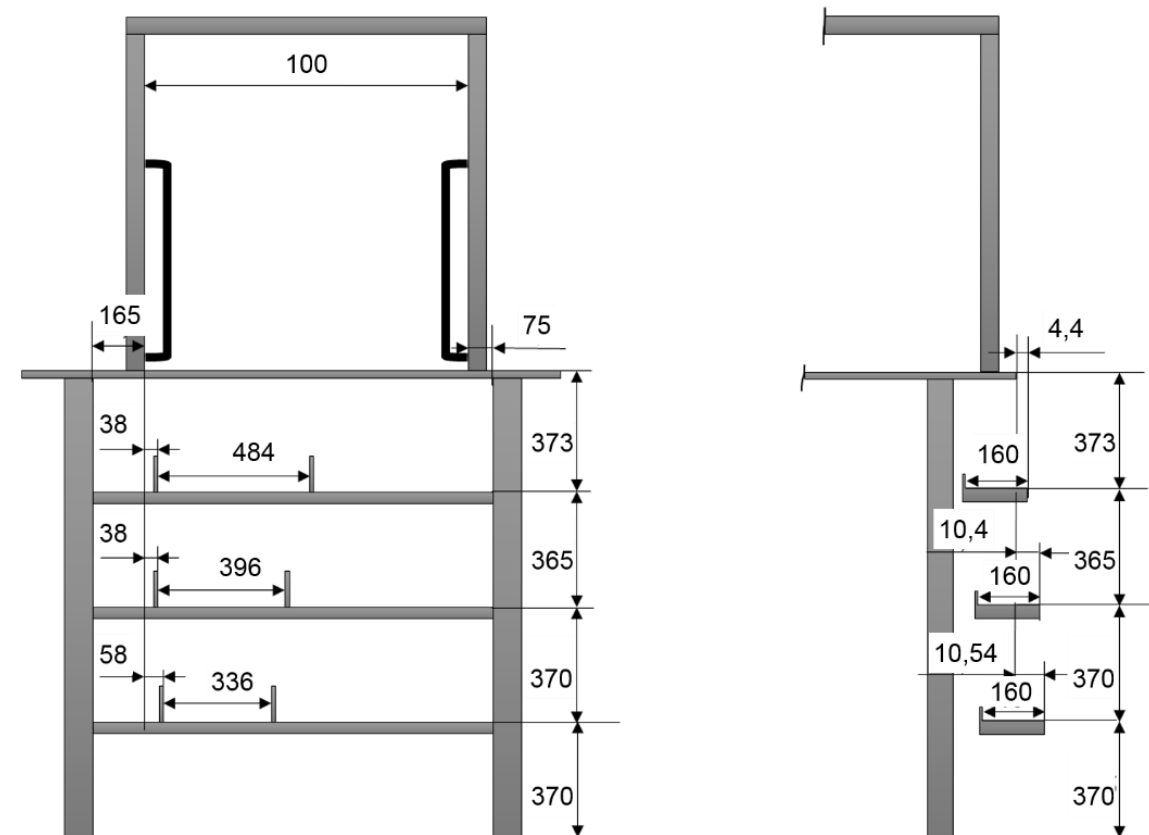


Abbildung 6-3: Maße [mm] der Realfahrzeuggeometrie am Einstiegsmodul LEAVA nach Schweiger (2018, S. 50)

**Konfiguration 2:
Stufenauszug Realfahrzeug mit unbegrenzter Stufenbreite**

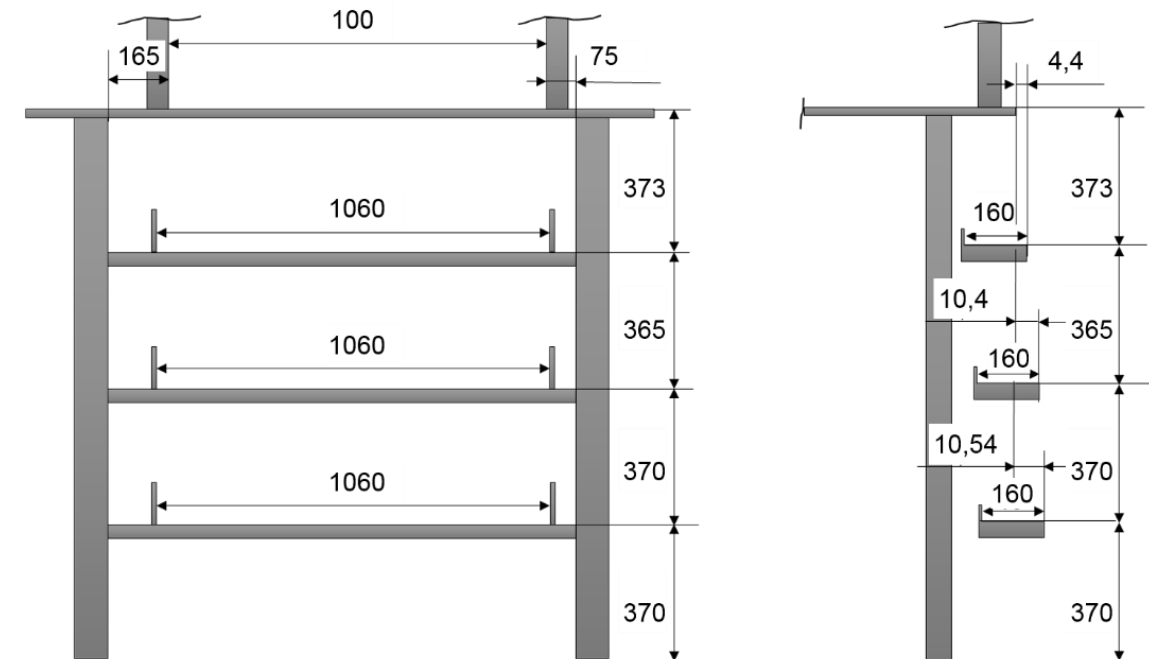


Abbildung 6-4: Maße [mm] am Einstiegsmodul LEAVA aufbauend auf der Realfahrzeuggeometrie mit unbegrenzter Stufenbreite nach Schweiger (2018, S. 50)

Im zweiten Teil der Studie wird der Stufenauszug und damit die Überlappung der Stufen variiert. In einem Dominanzpaarvergleich (Bortz & Döring, 2006) bewerten die Probanden in randomisierter Reihenfolge die Zugangskonfigurationen. Die drei Einstiegskonfigurationen sind in Abbildung 6-5 dargestellt. Die Stufenbreite und die Stufenhöhen bleiben unverändert (vgl. Abbildung 6-4). In zweiten Teil der Studie lauten die Fragestellungen wie folgt:

Subjektiv präferierter Stufenauszug

Welchen Stufenauszug bevorzugen die Probanden beim Ein- und Aussteigen (ca. 90° Seriene geometrie, 75° oder 60° ohne Überlappung der Stufenbreiten) unter den gegebenen Rahmenbedingungen?

Optimale Stufenbreite und Stufenposition 2

Welche Auftrittsbereiche nutzen die Fahrer bei maximaler Stufenbreite für den Ein- und Ausstieg bei den verschiedenen Stufenauszügen?

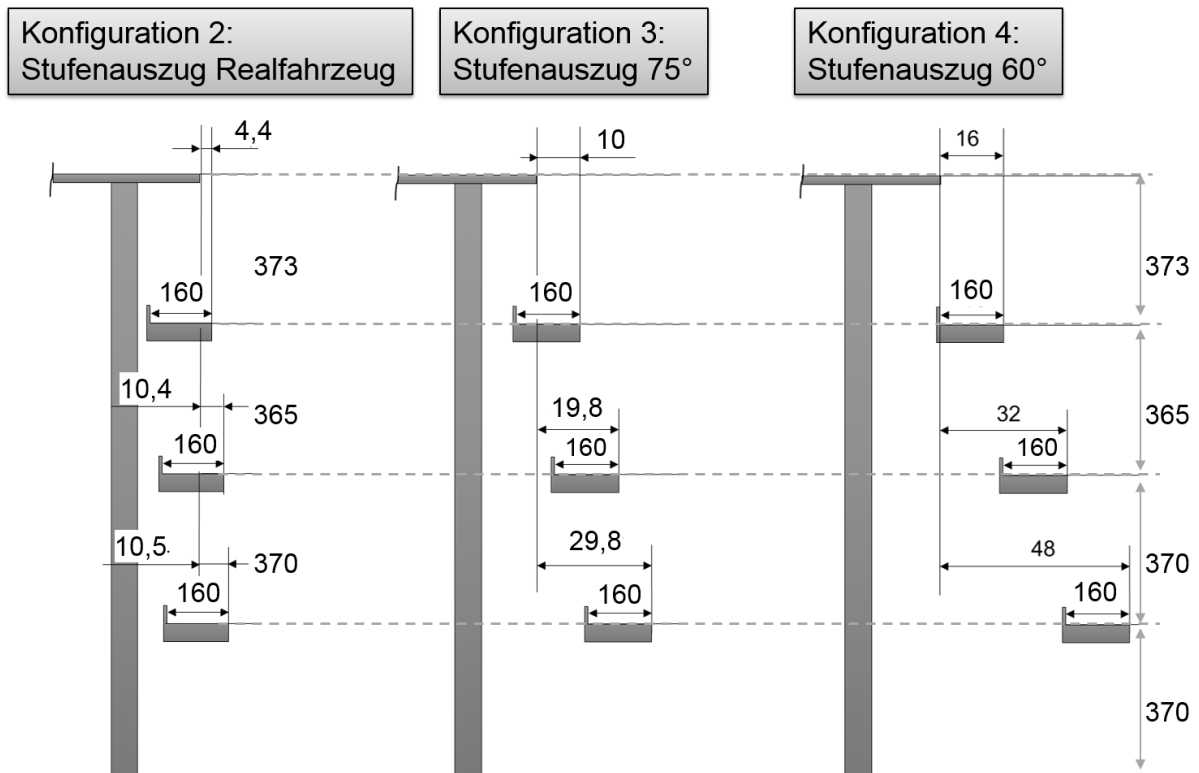


Abbildung 6-5: Maße [mm] am Einstiegsmodul LEAVA für den Dominanzpaarvergleich nach Schweiger (2018, S. 51)

Für den Dominanzpaarvergleich ergeben sich drei verschiedene Stufenauszugswinkel, die in Abbildung 6-5 dargestellt sind. In der Realfahrzeugkonfiguration zeigt sich eine maximale Überlappung der Trittstufen, nur zwischen der mittleren und oberen Stufe ist ein Stufenauszug von 10 mm vorhanden. Der Stufenauszugswinkel beträgt ca. 90° . Für die dritte und vierte Konfiguration ergibt sich ein Stufenauszugswinkel von 75° bzw. 60° (Saginus, Marklin, Seeley, & Stone, 2014). In der vierten Konfiguration (Stufenauszugswinkel 60°) treten keine Überlappungen der Trittstufen auf. Um Reihenfolgeeffekte zu vermeiden werden die Konfigurationen für den Dominanzpaarvergleich randomisiert. Für jeden Durchgang im Dominanzpaarvergleich steigen die Probanden bei jeder Konfiguration jeweils zweimal ein und aus. Damit ergibt sich für den Dominanzpaarvergleich in Summe zwölf Ein- und Ausstiegsvorgänge. Nach jeweils vier Zugangsvorgängen werden die Konfigurationen umgebaut und der Proband erhält eine fünfminütige Ruhepause. Die Bewegungen der Probanden werden aus drei Kameraperspektiven aufgezeichnet. Die tatsächlich genutzten Auftrittsflächen werden anhand von Markierungen im Abstand von 6,2 cm an der Stirnfläche der jeweiligen Stufe ermittelt.

6.2.3 Ergebnisse: Präferierte Stufenanordnung der Lkw-Fahrer

Im Dominanzpaarvergleich des Stufenauszugs favorisieren die meisten Probanden ($n = 17$) einen Stufenauszug von 75° . Jeweils vier Probanden (14,81 %) bevorzugen den Stufenauszug aus dem Realfahrzeug ($\alpha = \sim 0^\circ$) beziehungsweise den Stufenauszug ohne Überlappung der Stufen ($\alpha = 60^\circ$). Bei zwei Probanden kommt es zu einer Inkonsistenz ihrer Angaben im Dominanzpaarvergleich, so dass sie keiner Konfiguration zugeordnet werden können.

Abbildung 6-6 vergleicht das Maßkonzept der Seriengeometrie (links) mit den genutzten Auftrittsbereichen der Fahrer bei einem Stufenauszug von 75° (rechts). Die Türöffnung der Seriengeometrie ist 1000 mm breit. Im Abstand von 658 mm zur A-Säule, der linken Begrenzung der Türöffnung, liegt die Vorderkante des Fahrersitzes. Die gestrichelten Linien geben jeweils die Mitte der Türöffnung und der einzelnen Trittstufen an. Die Stufenmitte und der Abstand der

linken Kante der Trittstufe werden zur A-Säule bemaßt. Beim Serienkonzept liegen alle Zugangsstufen in der linken Hälfte der Türöffnung. Von der untersten Stufe zur obersten Stufe wird die Stufenbreite größer. Die unterste Stufe ist um 20 mm weiter zur Türmitte positioniert als die mittlere und obere Stufe und weist einen Abstand von 58 mm zur A-Säule auf.

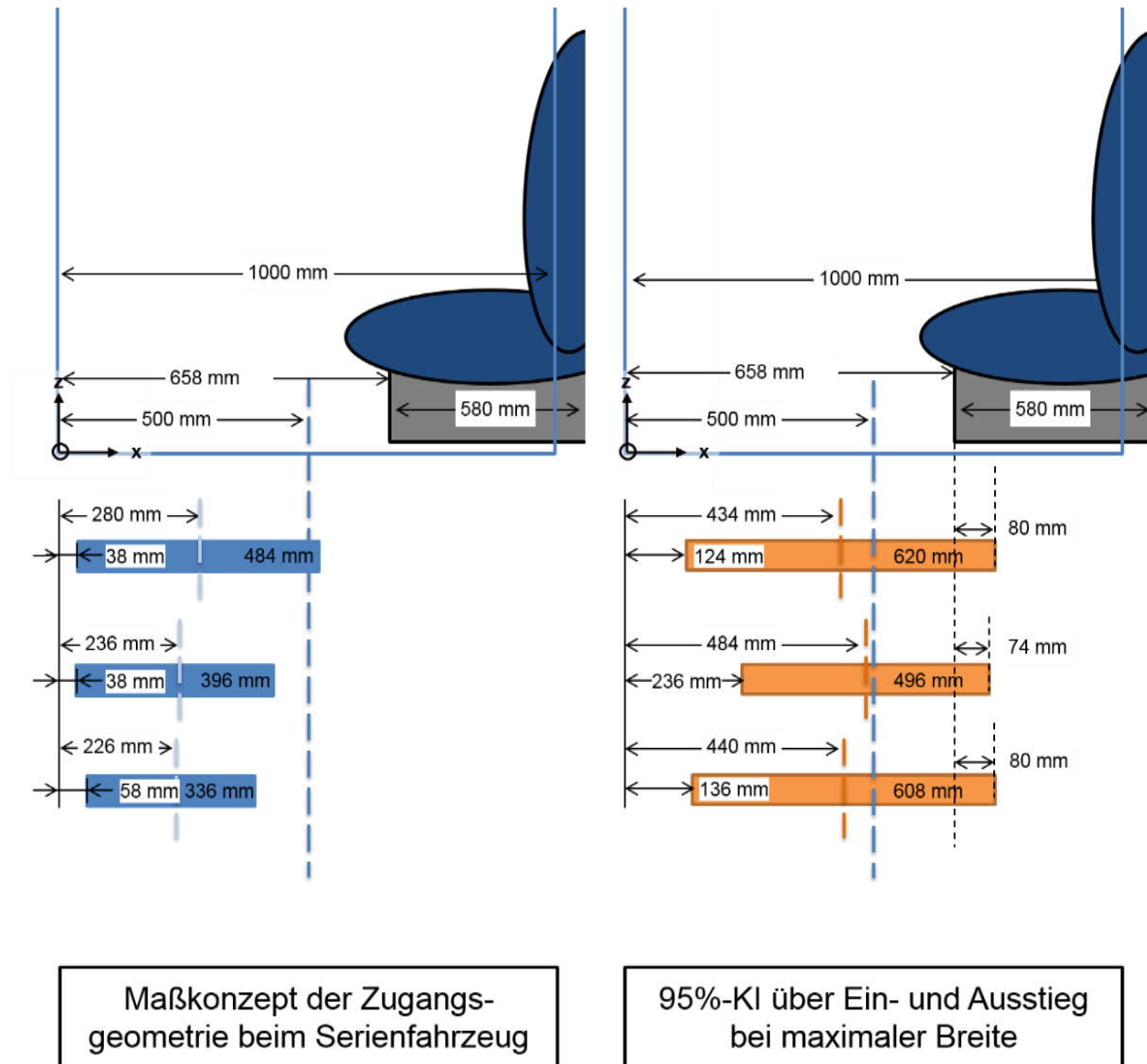


Abbildung 6-6: Maßkonzept der Zugangsgeometrie im Vergleich zwischen Seriengeometrie und favorisierter Konfiguration

In der rechten Skizze in Abbildung 6-6 ist das 95 % Konfidenzintervall der genutzten Stufenbreite bei dem favorisierten Stufenauszug von 75° und maximaler Stufenbreite dargestellt (nach Zipse, 2018), in der linken Skizze sind die Maße des Serienkonzepts veranschaulicht. Allgemein sind die genutzten Auftrittsflächen breiter und weiter zur Türmitte verschoben im Vergleich zum Serienkonzept. Die unterste Stufe verschiebt sich im Vergleich zur Seriengeometrie um 78 mm weiter nach rechts. Die Probanden nutzen auf der untersten Stufe eine Breite von 608 mm. Die mittlere Stufe befindet sich um 198 mm zur Mitte der Türöffnung. Die Teilnehmer nutzen eine Trittsfläche von 496 mm. Die oberste Stufe verschiebt sich um 86 mm in Richtung der B-Säule und wird über eine Breite von 620 mm genutzt. Trotz einer Verschiebung der Trittschufen zur Mitte der Türöffnung, scheint im Abstand von maximal 744 mm zur A-Säule einen

Anschlag für die nutzbare Auftrittsfläche zu existieren. In diesem Abstand liegt die Überlap-
 pung zwischen der mittleren Sitzposition und der Auftrittsfläche bei 80 mm. Dies legt die Ver-
 mutung nahe, dass die Position des Sitzes einen Anschlag für die genutzte Auftrittsfläche liefert.

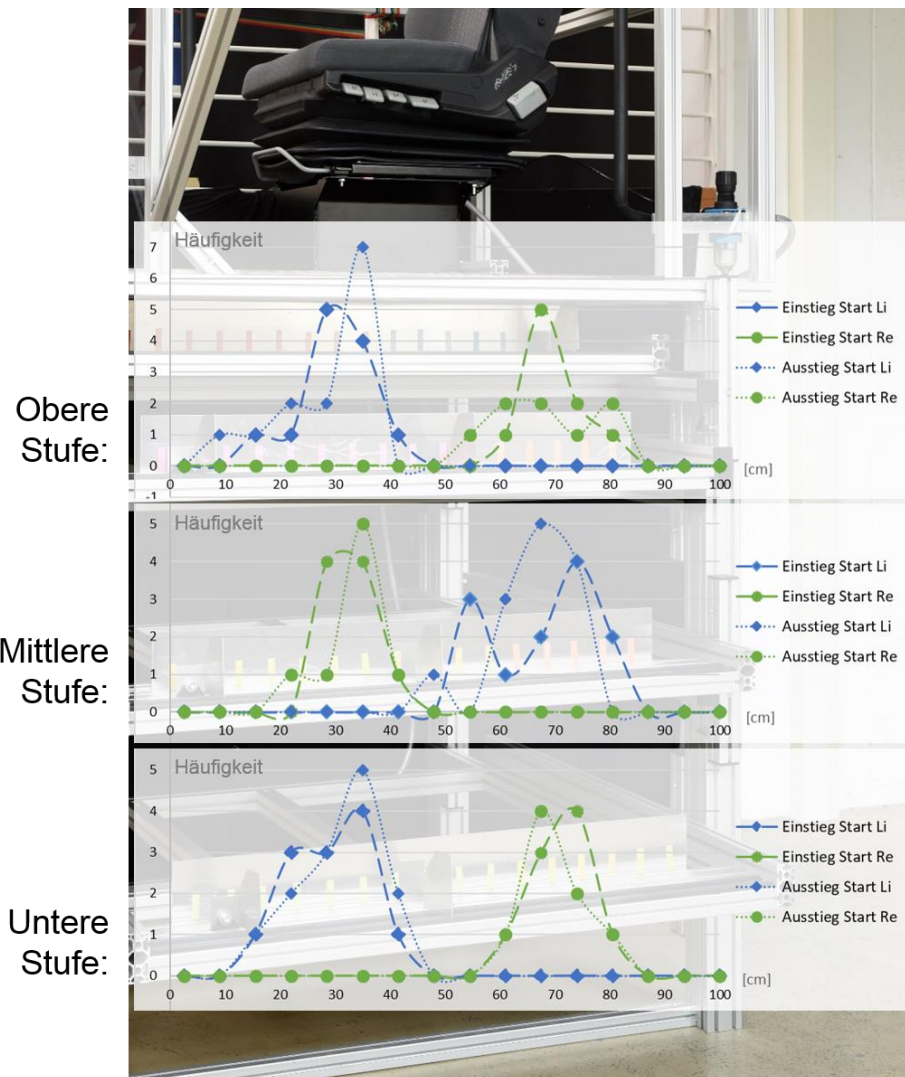


Abbildung 6-7: Die linke Begrenzung der Auftrittsflächen beim Stufenauszug von 75°, aufgeteilt nach dem linken und rechten Fuß und der Ein- und Ausstiegsbewegung

In Abbildung 6-7 sind die genutzten Auftrittsflächen aufgeteilt nach der Nutzung mit dem linken und dem rechten Fuß. Auf der untersten Stufe steigen die Fahrer ($n_{\text{Einstieg}} = 12$, $n_{\text{Ausstieg}} = 13$), die mit dem linken Fuß beginnen, in einem Wertebereich von 15,5 cm bis 41,5 cm ausgehend von der A-Säule. Der rechte Fuß ($n_{\text{Einstieg}} = 9$, $n_{\text{Ausstieg}} = 8$) wird auf der untersten Stufe im Bereich von 61,0 cm bis 80,5 cm aufgesetzt. Die mittlere Stufe betreten die Fahrer mit dem linken Fuß ($n_{\text{Einstieg}} = 9$, $n_{\text{Ausstieg}} = 8$) in einem Wertebereich von 48,0 cm bis 80,5 cm und mit dem rechten Fuß ($n_{\text{Einstieg}} = 12$, $n_{\text{Ausstieg}} = 13$) in einem Bereich von 22,0 cm bis 41,5 cm. Auf der obersten Stufe setzten die Fahrer ihren linken Fuß ($n_{\text{Einstieg}} = 12$, $n_{\text{Ausstieg}} = 13$) im Wertebereich von 9,0 cm bis 41,5 cm und ihren rechten Fuß ($n_{\text{Einstieg}} = 9$, $n_{\text{Ausstieg}} = 8$) im Bereich von 54,5 cm bis 80,5 cm auf. Abbildung 6-7 zeigt eine Verteilung der Auftrittsflächen. Die Auftrittsflächen für den entsprechenden Fuß unterscheiden sich zwischen dem Auf- und dem Abstieg um maximal eine Markermarkierung und sind fast als identisch anzusehen.

Tabelle 6-1: Übersicht über den Startfuß beim Einstieg über die verschiedenen Studien und Konfigurationen hinweg

	Start mit linkem Fuß	Start mit rechtem Fuß
Realfahrzeugstudie Stufenauszug: Realfahrzeug Stufenanordnung: linksseitig	79 %	21 %
LEAVA-Studie – Konfiguration 1 Stufenauszug: Realfahrzeug Stufenanordnung: linksseitig	78 %	22 %
LEAVA-Studie – Konfiguration 2 Stufenauszug: Realfahrzeug Stufenbreite: maximal	56 %	44 %
LEAVA-Studie – Konfiguration 3 Stufenauszug: 75° Stufenbreite: maximal	52 %	48 %
LEAVA-Studie – Konfiguration 4 Stufenauszug: 60° Stufenbreite: maximal	56 %	44 %

Tabelle 6-1 gibt eine Übersicht, mit welchem Fuß die Probanden die Einstiegsbewegung in den verschiedenen Studien und Konfigurationen beginnen¹⁹. Bei einer linksseitigen Anordnung der Stufen starten 79 % (*Realfahrzeugstudie*) bzw. 78 % (*LEAVA – Konfiguration Realfahrzeug*) mit dem linken Fuß auf der untersten Stufe – haben die Probanden dagegen die Möglichkeit die gesamte Stufenbreite zu nutzen, relativiert sich dieser Wert auf 52 % (*LEAVA – Konfiguration 3*) bis 56 % (*LEAVA – Konfiguration 4*). Diese Beobachtung legt den Schluss nahe, dass die Wahl des Startfußes geometrieabhängig ist. Vor allem unter der Berücksichtigung, dass 70,6 % der Probanden den rechten Fuß als ihren starken Fuß angeben und nur 29,4 % den linken. Diese Erkenntnis sollte in der nachfolgenden Studie näher untersucht werden.

6.3 Vorgabe einer Bewegungsstrategie

6.3.1 Motivation: Fahrer in ihrer Bewegung führen

In der vorhergehenden Studie zeigt sich, dass die Wahl des Startfußes bei der Einstiegsbewegung geometrieabhängig ist. Da 70,6 % der Lkw-Fahrer im Rahmen dieser Studie angeben, dass der rechte Fuß ihr starker ist, wird in der nächsten Studie eine Zugangsgeometrie aufgebaut, die die Fahrer durch ihre Gestaltung darin unterstützen soll die Einstiegsbewegung mit dem rechten Fuß auf der untersten Stufe zu beginnen.

¹⁹ Die Dendrogramme für die Ein- und Ausstiegsbewegungen über die Probandenstudien finden sich in Anhang III (Seite CLIII) und Anhang IV (Seite CLV).

6.3.2 Methode: präskriptive Nutzerstudie am Mock-Up

Um den Startfuß der Einstiegsbewegung²⁰ weiter zu analysieren wird das Mock-Up moVE (modulares Versuchsfahrerhaus mit Einstieg) im Rahmen der Studienarbeiten von Bergknapp (2019) und Laqua (2019) aufgebaut. Ausgehend von den Ergebnissen aus der Studie in Abschnitt 6.1.3 wird die Zugangsgeometrie angepasst, so dass die Fahrer mit dem rechten Fuß auf der untersten Stufe die Einstiegsbewegung beginnen. Zudem wird über einen Einzug von 300 mm am Fahrerhausboden ein Stufenauszug von 75° realisiert. Nach einer Erreichbarkeitsanalyse durch Hänisch (2019) werden die Haltegriffe auf der obersten Stufe mit einer Länge von 142 mm montiert. Die Abmaße der Zugangsgeometrie sind in Abbildung 6-8 abgebildet. Die grün gekennzeichneten Flächen geben die Auftrittsbereiche vor.

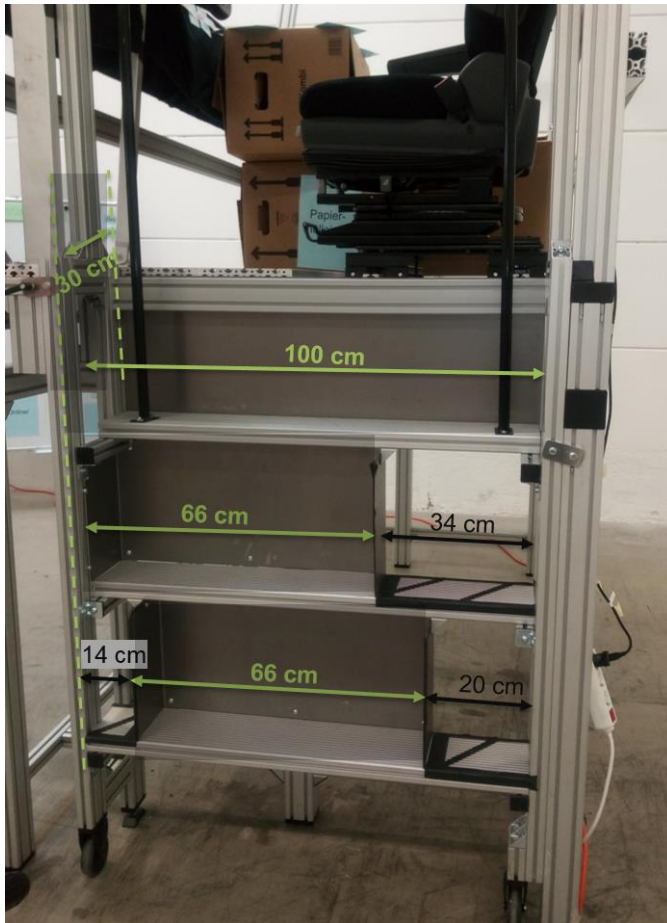


Abbildung 6-8: Zugangsgeometrie der zwei präskriptiven Studie

Probandenkollektiv

An der dritten Studie in der zweiten Phase der DRM nehmen 26 Lkw-Fahrer teil (25 männlich, 1 weiblich). Im Durchschnitt sind die Probanden 1,83 m groß ($SD = 0,07\text{m}$; Wertebereich = 1,70 bis 1,98 m; $Körperhöhe_{5,P} = 1,71\text{ m}$; $Körperhöhe_{50,P} = 1,82\text{ m}$; $Körperhöhe_{95,P} = 1,95\text{ m}$) und 86,38 kg schwer ($SD = 13,3\text{ kg}$; Wertebereich = 64,5 bis 111,3 kg). Daraus ergibt sich ein mittlerer BMI der Probanden von 25,8 kg/m^2 , der an der unteren Grenze zum Übergewicht liegt. Durchschnittlich sind die Fahrer 42,9 Jahre alt ($SD = 14,3\text{ Jahre}$; Wer-

²⁰ Der Versuch findet im Rahmen der Studienarbeit von Hänisch (2019) statt. Die Ergebnisse werden vom Autor ausgewertet, sofern nicht anders angegeben.

tebereich = 20 bis 66 Jahre). Nach eigenen Angaben geben 18 Fahrer den rechten als ihren präferierten Fuß an, sechs Fahrer den linken. Zwei Fahrer geben an, dass sie keinen präferierten Fuß haben. Fünf Probanden sind Linkshänder und 21 Rechtshänder. Die Versuchsteilnehmer besitzen seit durchschnittlich 20,6 Jahren ($SD = 13,9$ Jahre; Wertebereich = 1 bis 44 Jahre) den Lkw-Führerschein und steigen nach eigenen Angaben im Mittel 11,9 mal ($SD = 7,1$ mal) pro Tag ein und aus. Die Voraussetzung zur Teilnahme an dem Versuch ist der Besitz der Führerschein Klasse C oder höher.

Ablauf

In einem Within-Subject-Design steigen alle Probanden in abwechselnder Reihenfolge sechsmal mit dem Nachbau der Seriengeometrie und sechsmal mit der optimierten Zugangsgeometrie in das Mock-Up ein und aus²¹. Zwischen den beiden Zugangskonzepten findet ein weiterer Versuchsteil statt, der für diese Arbeit nicht relevant ist, den Fahrern aber zur Erholung und Ablenkung dient. Die sechs Wiederholungen des Ein- und Aussteigens pro Konfiguration gehen auf Cherednichenko (2007) zurück. Die Lkw-Fahrer werden nach jedem Ein- und Ausstiegsvorgang von der Versuchsleitung dazu aufgefordert, entsprechend der *Thinking Aloud* Methode (Häder, 2015), ihre ersten Eindrücke zu berichten. Die Bewegung der Fahrer und die auditiven Äußerungen werden über zwei Kameras aufgenommen. Beginnt der Fahrer die Einstiegsbewegung an dem optimierten Zugang in der sechsten Wiederholung nicht mit dem rechten Fuß, wird er gebeten weitere zwei Wiederholungen beginnend mit dem rechten Fuß auszuführen und zu kommentieren.

6.3.3 Ergebnisse: Vorgabe einer Bewegungsstrategie

In dieser Probandenstudie wird der Startfuß der Einstiegsbewegung näher beleuchtet. Es wird versucht den Fahrern eine Bewegungsstrategie mit ihrem starken rechten Fuß als Startfuß für die Einstiegsbewegung und mit dem linken Fuß als Startfuß für die Ausstiegsvorgang durch die Gestaltung der Zugangsgeometrie vorzugeben.

²¹ Die Durchführung der Studie wurde von der Ethikkommission der Technischen Universität München am 29.01.2019 genehmigt (Zeichen 575/18 S).

Tabelle 6-2: Übersicht über den Startfuß der dritten Studie am moVE

		Zugang Serie		Zugang geführt		Zugang geführt	
		6. Ein-/Ausstieg		1. Ein-/Ausstieg		6. Ein-/Ausstieg	
		N	[%]	N	[%]	N	[%]
Einstieg	Startfuß links	17	65,38	14	53,85	15	57,70
	Startfuß rechts	9	34,62	12	46,15	11	42,31
	Startfuß = starker Fuß	12	50,00	11	45,83	10	41,67
	Startfuß = starker Fuß = linker Fuß	5	83,33	3	50,00	3	50,00
	Startfuß = starker Fuß = rechter Fuß	7	38,89	8	44,44	7	38,89
Ausstieg	Startfuß links	18	69,23	23	88,46	25	96,15
	Startfuß rechts	8	30,77	3	11,54	1	3,65

Tabelle 6-2 zeigt eine Übersicht über den jeweiligen Startfuß für den Ein- und Ausstieg bei der sechsten Wiederholung für den Serienzugang und die erste und sechste Wiederholung bei der geführten Geometrie. Durch die Betrachtung der ersten Ausführung, wird die erste intuitive Handlung beobachtet und mit der Bewegung aus der sechsten Wiederholung verglichen. Für die geführte Geometrie ist beim Einsteigen in Bezug auf den Startfuß kaum ein Unterschied zwischen der ersten und der sechsten Wiederholung zu erkennen. Über die Hälfte der Fahrer – 53,85 % bei der ersten Wiederholung und 57,70 % bei der sechsten Wiederholung – beginnen den Einstieg mit dem linken Fuß. Dabei ist dies für 3 Fahrer auch ihr starker Fuß. Bei der Seriengeometrie starten 65,38 % der Fahrer mit dem linken Fuß, circa 13-14 % weniger als bei den vorherigen Versuchen (vgl. Abschnitt 6.2.3). Bei der Seriengeometrie steigen fünf von sechs Linksfüßern mit dem linken Fuß zuerst ein, bei der geführten Geometrie sind drei aus sechs Linksfüßern. Bei den Rechtsfüßern liegt der Anteil der Personen, die mit ihrem starken rechten Fuß einsteigen, bei 38,89 – 44,44 %. Für den Ausstieg zeigt sich eine Änderung im Verhalten – während bei der Seriengeometrie fast ein Drittel der Fahrer (30,77 %) mit dem rechten Fuß den Ausstieg beginnen, nutzt bei der geführten Geometrie ein Fahrer den rechten Fuß um den Ausstieg zu beginnen, alle andere beginnen mit dem angedachten, linken Fuß.

Circa 60 % der Fahrer nutzen bei dem geführten Zugang denselben Fuß für den Ein- und Ausstieg (15 Personen bei der ersten Wiederholung, 16 Personen bei der sechsten Wiederholung)

– bei der Seriengeometrie sind es 19 Fahrer (73,08 %). Zwölf Fahrer beginnen den Einstieg für den Serienzugang und den geführten Zugang (erste und sechste Wiederholung) mit demselben Fuß – sieben jeweils mit dem linken Fuß und fünf mit dem rechten Fuß. Beim Vergleich über die sechs Wiederholungen steigt der Anteil der Personen, die für beide Zugänge denselben Startfuß nutzen auf 20 an – sowohl für die Seriengeometrie als auch für die geführte Geometrie. Dreizehn von ihnen starten mit dem linken Fuß und sieben mit dem rechten. Beim Wechsel des Startfußes zwischen der ersten und der sechsten Wiederholung an der geführten Geometrie, zeigt sich, dass sechs Fahrer den Startfuß von rechts nach links wechseln, fünf wechseln von links nach rechts. Die Mehrheit der Fahrer ($n = 15$) beginnen sowohl bei der ersten als auch bei der sechsten Wiederholung mit demselben Fuß.

Tabelle 6-3: deskriptive Statistik zu der Anzahl der genutzten Schritte

	Anzahl der Schritt	geführter Einstieg	Serien-Einstieg	geführter Ausstieg	Serien-Ausstieg
gesamt	Median	5	5	5	6
	MW	5,12	5,12	5,12	5,96
	SD	0,326	0,431	0,326	0,720
	N	26	26	26	26
	Min.	5	5	5	5
	Max.	6	7	6	7
Startfuß links	Median	5	5	5	6
	MW	5,0	5,12	5,08	5,94
	SD	0,000	0,485	0,277	0,873
	N	15	17	25	18
	Min.	5	5	5	5
	Max.	5	7	6	7
Startfuß rechts	Median	5	5	6	6
	MW	5,27	5,11	6,00	6,00
	SD	0,467	0,333	--	0,000
	N	11	9	1	8
	Min.	5	5	6	6
	Max.	6	6	6	6

Um die Effektivität der Zugangskonzepte zu vergleichen, werden in Tabelle 6-3 die deskriptiven Werte für die Anzahl der Fußschritte dargestellt, die für den Ein- und Ausstiegsvorgang benötigt werden. Es wird stets die sechste Wiederholung betrachtet. Für den Ein- und Ausstieg an der geführten Geometrie und der Seriengeometrie benötigen die meisten Fahrer fünf Schritt (Median 5), um vom Fahrbahnboden aus die Fahrhaltung zu erreichen. Für den Serien-Ausstieg brauchen die meisten Probanden (Median 6) sechs Fußschritte. Bei der Seriengeometrie gibt es Fahrer, die bis zu sieben Fußschritte für den Ein- und Ausstieg brauchen. Tabelle 6-4 gibt einen Aufschluss darüber, wie häufig die Anzahl der Schritte für die verschiedenen Konzepte auftreten. Die geführte Geometrie wird in den meisten Fällen (23 mal beim Ein- und Aussteigen) in

fünf Fußschritten absolviert. Dabei werden 15 bzw. 23 Ausführungen mit dem linken Fuß gestartet. Drei Fahrer steigen in die geführte Geometrie mit sechs Schritten ein (3 mal mit rechts beginnend) und aus (2 mal mit links und einmal mit rechts beginnend). Beim Einstieg in die Serien-Geometrie steigen 24 Fahrer mit fünf Schritten ein und jeweils einer benötigt sechs bzw. sieben Schritte. Beim Ausstieg aus der Serien-Geometrie werden durchschnittlich mehr Arbeitsschritte benötigt: Sieben Fahrer steigen mit fünf Fußschritten aus (Startfuß links), 13 Personen brauchen sechs Fußschritte (Startfuß links 5 Personen, Startfuß rechts 8 Personen) und sechs Fahrer steigen in sieben Schritten aus (Startfuß links). Durchschnittlich benötigen Fahrer 5,06 Schritte für die Einstiegsbewegung beginnend mit dem linken Fuß, während die Personen, die mit dem rechten Fuß die Einstiegsbewegung beginnen im Durchschnitt 5,2 Schritt benötigen. Für die Ausstiegsbewegung ergeben sich im Durchschnitt mit den linken Startfuß 5,44 Schritte und mit dem rechten Startfuß 6 Schritte. Dies zeigt, dass der linke Fuß als Startfuß der effektivere Weg in das Fahrzeug hinein bzw. aus dem Fahrzeug hinaus im Bezug auf die Anzahl der Schritte darstellt.

Tabelle 6-4: Häufigkeitsverteilung über die Anzahl der gebrauchten Schritte aufgeteilt nach Zugangskonzepte und Startfuß

Zugangs-konzept		Startfuß	Anzahl gebrauchter Schritte		
			5	6	7
Einstieg	geführt	links	15	0	0
		rechts	8	3	0
	Serie	links	16	0	1
		rechts	8	1	0
Ausstieg	geführt	links	23	2	0
		rechts	0	1	0
	Serie	links	7	5	6
		rechts	0	8	0

In Tabelle 6-3 und Tabelle 6-4 geht die sechste Wiederholung jeder Zugangsgeometrie ein. Die Fahrer, die in der sechsten Wiederholung mit dem linken Fuß in den geführten Zugang einsteigen, werden gebeten dies erneut mit dem rechten Fuß als Startfuß auszuprobieren. Somit sind alle Probanden mit dem rechten Fuß eingestiegen. Nach der Auswertung der *Thinking Aloud* Methode gibt eine Mehrheit der Fahrer ihren freiwählbaren Startfuß als den geeigneten an (80,77 %), ein Drittel dieser Personen (26,92 %) bevorzugt den rechten Fuß als Startfuß beim Einsteigen und zwei Drittel den linken Fuß (57,69 %). Eine Person gibt den linken Fuß als bevorzugten Startfuß an, obwohl sie mit dem rechten Fuß einsteigt. Auf Nachfrage und Ausprobieren gibt der Proband an, das Einsteigen mit dem linken Fuß angenehmer wahrzunehmen. Vier Fahrer haben keinen präferierten Startfuß für die Einstiegsbewegung (15,38 %).

Die Fahrer, die den rechten Fuß bevorzugen, geben dies ohne Erklärung an. Die Fahrer, die den linken Fuß bevorzugen, begründen dies mit dem Übergang vom Aufstieg in das Fahrerhaus. Im

Folgendes wird diese Situation entsprechend der Erklärungen der Fahrer rekonstruiert. Beginnen die Fahrer die Einstiegsbewegung mit dem linken Fuß, stehen sie mit dem linken Fuß auf der obersten Stufe. Aufgrund der aufrechten Sitzhaltung und der entsprechenden Lenkradposition, ist im Lkw mehr Freiraum zwischen Lenkrad und Sitz als im Pkw. Diesen Freiraum nutzen die Fahrer, um den rechten Fuß am Lenkrad vorbeizufädeln und in die Kabine hineinzustellen. Führt der Fahrer den rechten Fuß am Sitz und Lenkrad vorbei, schafft er sich dadurch Raum, um seinen linken Fuß in die Kabine zu stellen. Startet der Fahrer die Einstiegsbewegung mit dem rechten Fuß, tritt er mit dem linken Fuß in die Kabine und stellt diesen von ihm aus gesehen vor das Lenkrad ab. Damit verkleinert er sich den Einstiegsraum für den nachziehenden rechten Fuß. Diese Situation des Übergangs ist in Abbildung 6-9 für den linken (links in blau) und den rechten (rechts in grün) Startfuß abgebildet. Die Begründung der Fahrer für den linken Fuß als Startfuß spiegelt sich auch in der Effektivität des Einsteigens in Abbildung 6-9 wider.

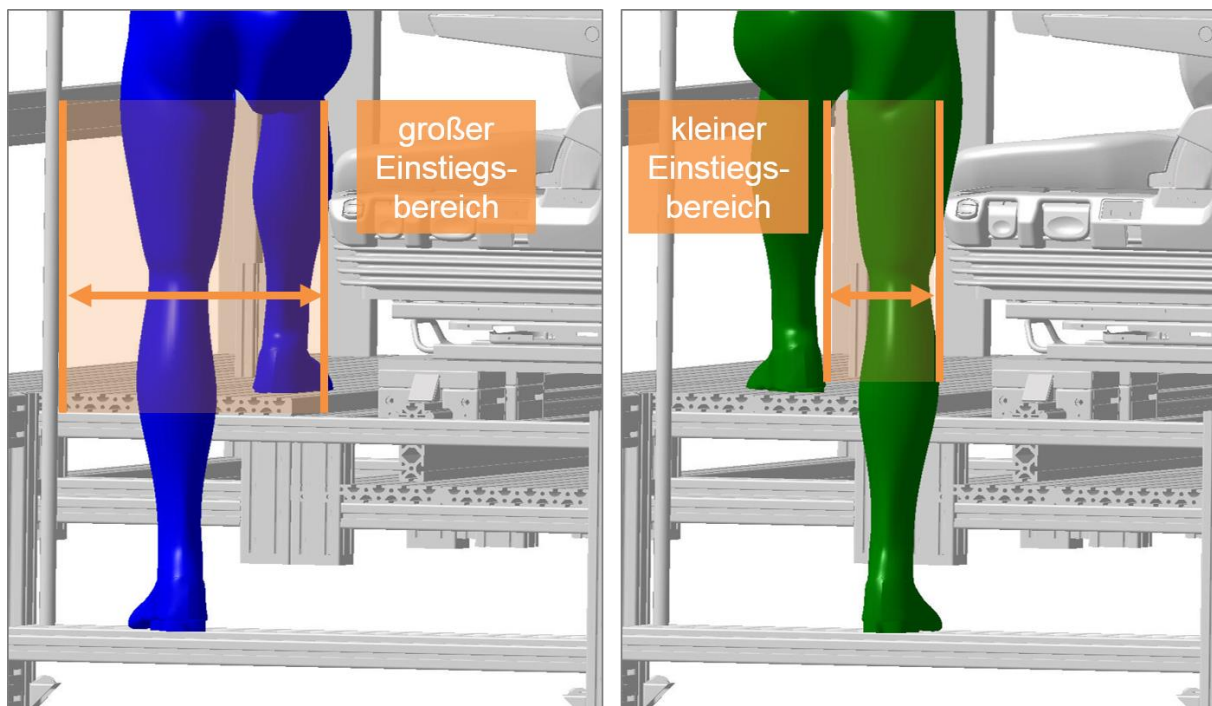


Abbildung 6-9: Übergang vom Aufstieg in die Kabine, wenn der Fahrer mit dem linken (in Blau links) / rechten (in Grün rechts) auf der untersten Stufe beginnt

Nachdem die Fahrer den Übergang vom Aufstieg in die Kabine als ausschlaggebenden Faktor für die Wahl des Startfußes beim Einstieg angeben, wird dieser im Folgenden eingehend betrachtet. Die bisher gewählte Unterteilung nach dem Zeitpunkt, wann der zweite Fuß in die Kabine geholt wird, hilft an diesem Punkt nicht weiter. Daher werden Teile aus den Definitionen nach Rigel (2005) verwendet und die Begrifflichkeiten des *Fädlers* und des *Schlüpfers* entlehnt. Der Fokus liegt auf der Positionierung des rechten Fußes in Bezug zum Lenkrad bzw. der Lenksäule. Dabei beschreibt der *Fädler* das Verhalten, wenn der rechte Fuß sich beim ersten Kontakt mit dem Fahrerhausboden rechts von – hinter – dem Lenkrad befindet. Beim *Schlüpfer* wird der rechte Fuß zuerst auf der linken Seite – vor – dem Lenkrad aufgestellt. In Bezug auf Abbildung 6-9 stellt das linke Bild einen *Fädler* dar, der unter dem Lenkrad hindurch fädelt und seinen Fuß direkt auf die rechte Seite vom Lenkrad aufstellt, das rechte Bild stellt einen *Schlüpfer* dar, zuerst der den linken Fuß auf der linken Seite vom Lenkrad aufstellt und dann weiter in die Kabine einsteigt.

Ausgehend von diesen Begrifflichkeiten werden alle bisherigen Studien hinsichtlich der Fädler- und der Schlüpfer-Strategie analysiert und in Tabelle 6-5 dargestellt. Der Anteil der Fädler ist

bei allen Einstiegsconfigurationen sehr hoch. Im Realfahrzeug nutzen mit 73,53 % die meisten Fahrer die Fädler-Strategie. Bei der geführten Zugangsgeometrie in der moVE-Studie nutzen alle Fahrer die Fädler-Strategie. Der Anteil der Fädler liegt in den Mock-Up Studien vermutlich höher, da eine Lenksäulenverkleidung fehlt und die Fahrer sich nur am Lenkrad orientieren. Dies bestätigt den linken Fuß als Startfuß für die Einstiegsbewegung beim Lkw – nicht nur für die Seriengeometrie (vgl. Abschnitt 5.5.2). Tabelle 6-5 zeigt, dass die Fädler-Strategie die bevorzugte Art ist den Übergang von den Stufen in den Kabinenboden zu gestalten und unterstützt die Erklärung der Fahrer aus Abbildung 6-9.

Tabelle 6-5: prozentualer Anteil der Fädler und Schlüpfen beim Einstiegsverhalten über die verschiedenen Studien hinweg

	Realfahr- zeug- Studie	LEAVA-Studie				moVE-Studie	
	Real- fahrzeug [%]	Konfig. 1 [%]	Konfig. 2 [%]	Konfig. 3 [%]	Konfig. 4 [%]	Serien- Zugang [%]	geführter Zugang [%]
Fädler	73,53%	85,71%	81,82%	85,71%	80,95%	96,15%	100,00%
Schlüpfen	26,47%	14,29%	18,18%	14,29%	19,05%	3,85%	0,00%

Auch beim Ausstieg resultiert der Bewegungsablauf, beginnend mit dem linken Fuß, in einem effektiven Ausstieg. Mit dem linken Fuß kann der Fahrer in einer sitzenden Haltung den Fuß auf die oberste Stufe abstellen, den Körperschwerpunkt aus dem Sitz herauschieben und das linke Bein belasten. Anschließend setzt der Fahrer den rechten Fuß auf die mittlere Stufe. Damit ist der Fahrer innerhalb zwei Schritte auf den Trittstufen. Stellt der Fahrer erst den rechten Fuß auf die oberste Stufe, braucht er schon zwei Schritte, um sich aus dem Sitz zu erheben und mit dem Rücken an die Türschwelle (vgl. Chateauroux et al., 2012) zu stellen.

6.4 Fazit der dritten methodischen Phase in der DRM

Die Szenario-Analyse zeigt, dass der Lkw-Zugang in Zukunft ein wichtiges Themengebiet im Nutzfahrzeugbereich bleibt. Der Fokus zukünftiger Zugangskonzepte bewegt sich dabei auf einer Skala mit den Endpunkten *Sicherheit* und *Komfort*. Tritt ein Anwendungsfall in Richtung Szenario A ein, bei dem die Fahrer häufig ein- und aussteigen, liegt der Fokus mehr auf dem Aspekt der *Sicherheit*: Tritt ein Anwendungsfall in Richtung Szenario B ein, bei dem der Beruf des Kraftfahrers durch die Innenraumgestaltung aufgewertet wird, rückt der Aspekt des *Komforts* in den Vordergrund. Die beiden Gesichtspunkte der *Sicherheit* und des *Komforts* werden auch in der Längenänderung der Nutzfahrzeuge in EU2015/719 verankert: Neben der Verbesserung der Aerodynamik, erwarten die Verfasser eine Erhöhung der Sicherheit und des Komforts des Fahrers durch das zusätzliche Volumen (EU2015/719). Die Szenario-Analyse zeigt, dass die Notwendigkeit zur Überarbeitung der Zugangsgeometrie vorhanden ist und die Änderung der Längenvorschrift für Nutzfahrzeuge gibt den entsprechenden Gestaltungsspielraum für eine solche Überarbeitung.

Losgelöst von den bisherigen Bauraumeinschränkungen durch die Bauart des Frontlenkers, entscheiden sich die Fahrer für einen Stufenauszug von 75° und Auftrittsbrereiche zwischen 496 und 620 mm Breite und einem Abstand von 124 bis 236 mm von der A-Säule. Es liegt die Vermutung nahe, dass die Auftrittsflächen nach rechts von der Position des Sitzes begrenzt werden. Die Wahl des Startfußes ist geometrieabhängig. Bei einer linksseitigen Anordnung der

Stufen nutzen 78 bis 79 % der Fahrer den linken Fuß zum Einsteigen, bei einer maximal nutzbaren Stufenbreite relativiert sich dieser Anteil auf bis zu 52 %. Dabei nutzen die Fahrer jeweils unterschiedliche Auftrittsbereiche für den linken und den rechten Fuß.

Die Analyse des Startfußes in der zweiten präskriptiven Studie zeigt, dass 80,77 % der Fahrer ($N = 21$) einen bevorzugten Fuß für den Einstieg entwickelt haben. Zwei Drittel dieser Fahrer präferieren den linken Fuß beim Einsteigen, während 33,33 % angeben, lieber mit dem rechten Fuß einzusteigen. Die Personen, die den Einstieg mit links beginnen, begründen dies mit einem effektiven Übergang vom Aufstieg in die Kabine. Dieser effektive Bewegungsablauf in das Fahrerhaus hinein begünstigt die häufig verwendete *Fädler*-Strategie. Beim Aussteigen zeigen sich keine individuellen Vorlieben: hier greift die vorgesehene Führung. Alle bis auf einen Fahrer nutzen bei der geführten Geometrie den linken Fuß beim Aussteigen und benötigen insgesamt weniger Schritte im Vergleich zur Seriengeometrie. Eine klare Fußstrategie gibt dem Fahrer Sicherheit, reduziert Fehlritte und reduziert damit die Unfallwahrscheinlichkeit. Damit sind es 38,89 % mehr Fahrer, die mit dem linken Fuß aussteigen, als bei der Seriengeometrie. Im Vergleich zur starken Führung der Ausstiegsbewegung, kann mit der Zugangsgeometrie keine eindeutige Führung der Fahrer erreicht werden. Daher wird für die abschließende Nutzerevaluation vorgeschlagen, die Einstiegsbewegung stärker zu führen, mit dem Ziel, dass die Fahrer sowohl die Einstiegs- als auch die Ausstiegsbewegung mit dem linken Fuß beginnen. Ausgehend von dem Grundgedanken, dass Intuitivität auf einem Vorwissen basiert (Hurtienne, 2007), wird der Unterschied zwischen dem trainierten Kollektiv der Lkw-Fahrer zu einem unvoreingenommenen und untrainiertem Kollektiv von Nicht-Lkw-Fahrern untersucht.

7 Phase IV: Prüfen der Annahmen

Kapitel 7 umfasst die vierte Phase der DRM. In dieser Phase wird geprüft, ob die gewünschten Faktoren merklich geändert wurden und ob diese Änderung zu einem Erfolg geführt hat. Dafür werden die bisherigen Ergebnisse zusammengeführt und in einem Mock-Up Aufbau umgesetzt. Diese geführte Zugangsgeometrie wird in einer abschließenden Nutzerevaluation geprüft.

7.1 Evaluation einer geführten Zugangsgeometrie

7.1.1 Erarbeitung einer geführten Zugangsgeometrie

Bei einem linksseitig angeordneten Zugang beginnen 79 % der Lkw-Fahrer mit dem linken Fuß auf der untersten Stufe die Einstiegsbewegung. Hat der Fahrer die Möglichkeit über die gesamte Zugangsbreite aufzutreten (vgl. Abschnitt 6.2), relativiert sich dieser Wert auf 52 % bei einem Stufenauszug von 75°. Die Mehrheit der Fahrer (57,69 %) gibt an, dass der linke Fuß ihr präferierter Startfuß für den Einstieg sei, 26,92 % bevorzugen den rechten Fuß und 15,38 % haben keine Präferenz für einen Startfuß. Zudem zeigt sich, dass die Einstiegsbewegung beginnend mit dem linken Fuß signifikant kürzer dauert als mit dem rechten Fuß (vgl. erste deskriptive Studie in Abschnitt 5.5.2) und effektiver ist (vgl. zweiten präskriptive Studie in Abschnitt 5.5.2). Bei dem an einem CoE-Lkw beobachteten *Step-over-Step* Verhalten (Chateauroux et al., 2012; Hebe & Bengler, 2019) beginnend mit dem linken Fuß, tritt der Fahrer mit dem rechten Fuß zuerst in die Kabine und stellt diesen rechts neben das Lenkrad (vgl. *Fädler*-Strategie von Rigel (2005) und Abschnitt 6.3.3). Somit muss der Fahrer nur noch den linken Fuß nachholen und nimmt die Fahrhaltung mit einer minimalen Anzahl von Arbeitsschritten ein. Diese Bewegungsführung für das Einstiegsverhalten ist in Abbildung 7-1 bebildert.

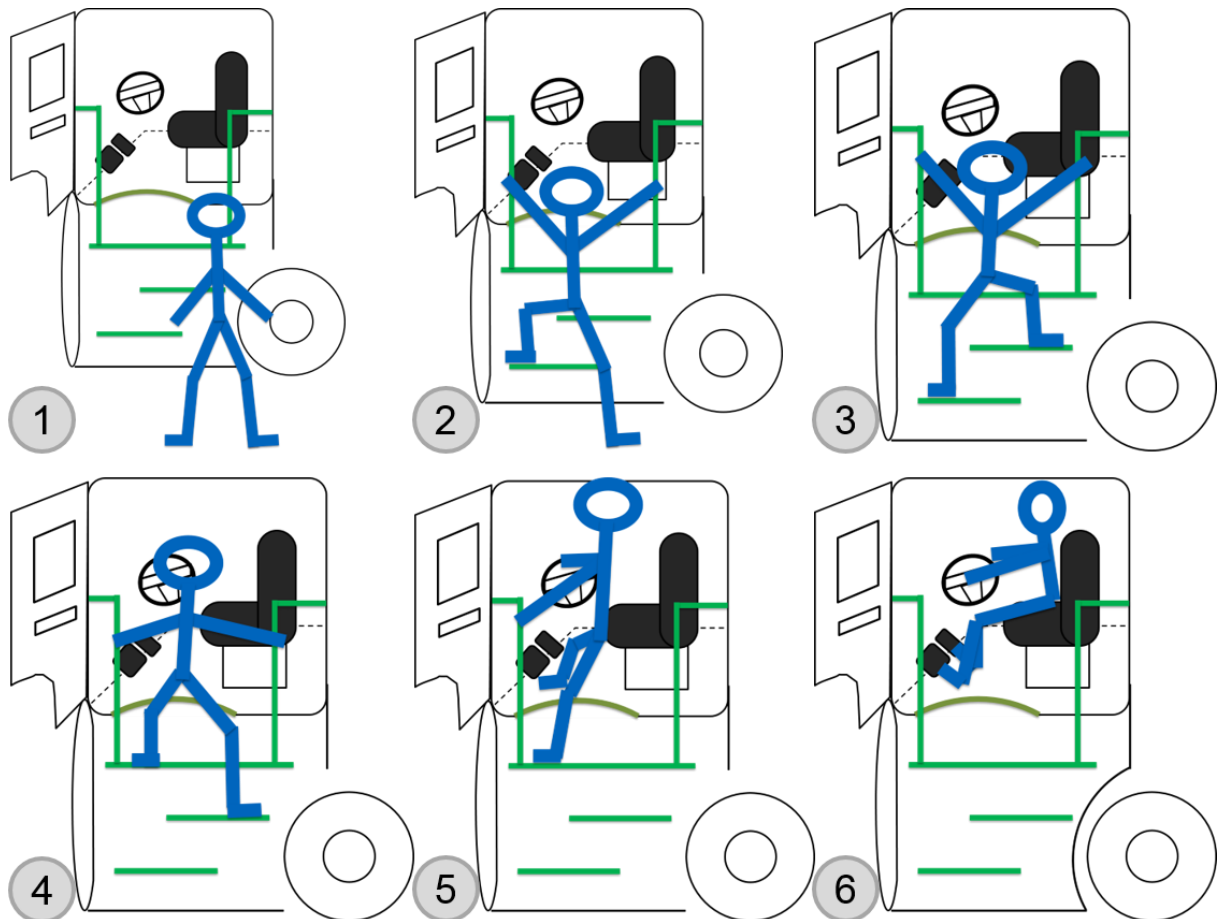


Abbildung 7-1: angestrebtes Einstiegsverhalten in einen dreistufigen Lkw hinein

Für den Ausstieg zeigt sich in Abschnitt 6.3.3, der zweiten präskriptiven Studie, dass die Fahrer zu 96,15 % den linken Fuß auf die oberste Stufe stellen und so den Abstieg in einem *Step-over-Step* Verhalten durchführen. Dies bestätigt eine funktionierende Führung auf dem kürzesten Weg. Im Gegensatz zur leiterartigen Anordnung der Stufen beim Serienzugang, sieht der Fahrer dank des Einzugs am Fahrerhausboden, die oberste, links von ihm angeordnete Stufe gut ein und erreicht diese gut. Mit dieser Übereinkunft steigen die Fahrer sowohl beim Einstieg als auch beim Ausstieg mit dem linken Fuß auf die unterste und oberste Stufe und mit dem rechten Fuß auf die mittlere Stufe und den Fahrerhausboden. Das beschriebene Ausstiegsverhalten ist in Abbildung 7-2 dargestellt: die Fahrer betreten die oberste Stufe mit dem linken Fuß und steigen in einem *Step-over-Step* Verhalten hinab bis sie mit beiden Füßen auf dem Fahrerhausboden ankommen.

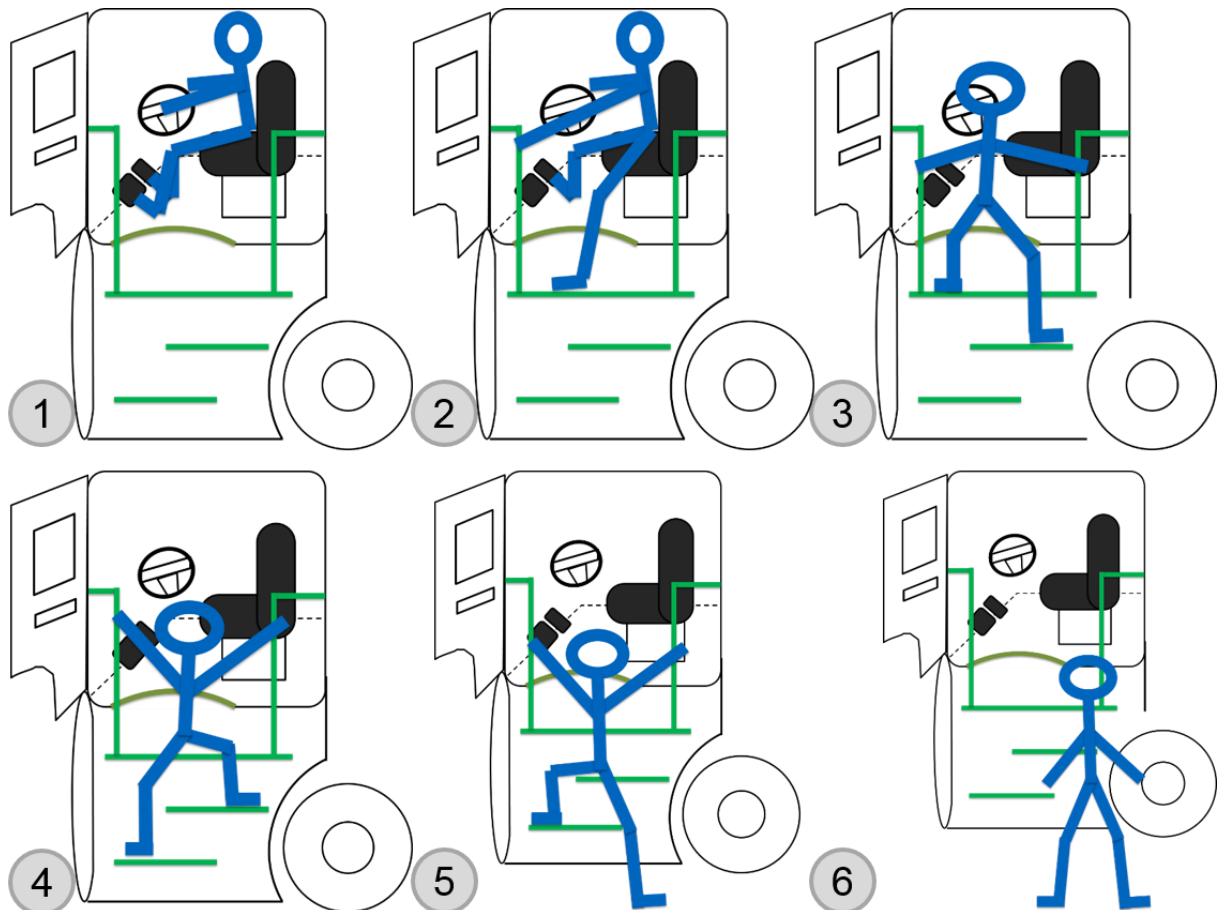


Abbildung 7-2: angestrebtes Ausstiegsverhalten aus einen dreistufigen Lkw heraus

Um das in Abbildung 7-1 und Abbildung 7-2 angestrebte Fußverhalten zu erreichen, wird die Zugangsgeometrie aus Abbildung 7-3 wie folgt ausgearbeitet. Der Zugang wird zwischen Fahrersitz und Lenkrad realisiert und entspricht damit einem der favorisierten Konzepte aus der Befragung der Lkw-Fahrer aus Abschnitt 5.3.3. Das Ein- und Ausstiegskonzept erhält einen treppenartigen Zugang mit einem Stufenauszug von 75° , den die Fahrer in Abschnitt 6.2.3 wählen und die Experten in Abschnitt 5.4.3 empfehlen. Hierzu wird der Fahrerhausboden um 300 mm eingezogen und die Stufen in Fahrzeugquerrichtung gleichmäßig verteilt. Die Einstiegshöhe von 1500 mm überwinden drei Trittstufen im regelmäßigen Abstand von 367 mm zueinander. Die unterste Stufe wird in einem Abstand von 400 mm über dem Fahrbahnboden angeordnet, um die Praxistauglichkeit des Konzepts zu erhöhen (vgl. BGV-D29). Die Auftrittsflächen werden entsprechend den Erkenntnissen aus Abschnitt 6.2.3 definiert. Die unterste Auftrittsfläche beginnt in einem Abstand vom 160 mm von der A-Säule entfernt und ist 570 mm breit. Die mittlere Auftrittsfläche ist 48 cm breit und weist einen Abstand von 445 mm zur A-Säule auf. Die oberste Stufe ist durchgängig über eine Türöffnungsbreite von 1000 mm. Die Auftrittsflächen für die mittlere und unterste Stufe leiten sich aus den Ergebnissen aus Abschnitt 6.2.3 ab. Die Maße des Zugangskonzepts sind in Abbildung 7-3 dargestellt.

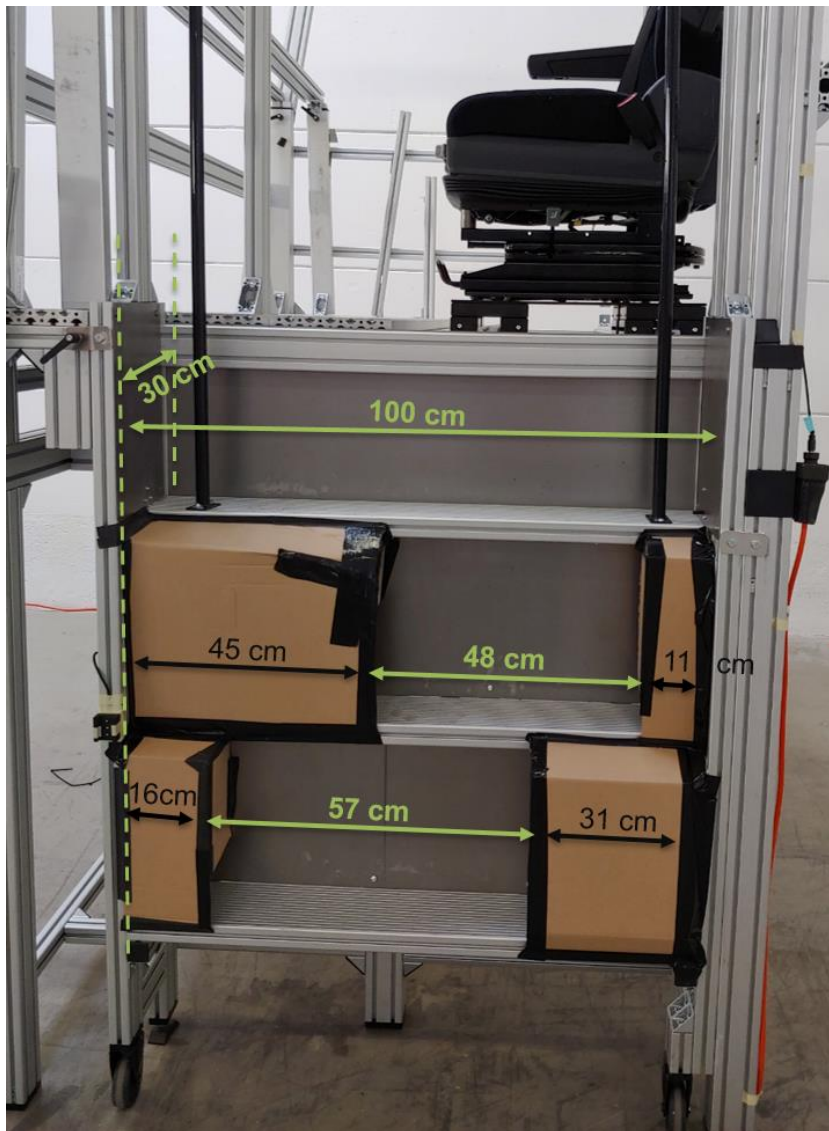


Abbildung 7-3: Darstellung der geführten Zugangsgeometrie

Nach der Empfehlung von Chateauroux et al. (2012) werden durchgängige Haltestangen verwendet. Die Haltestangen werden, nach Untersuchungen von Hänisch (2019), auf der obersten Trittstufe montiert. Somit erreicht das 5. Perzentil der Nutzerpopulation – in Bezug auf die Körperhöhe (1,61 m) – diese vom Fahrbahnboden aus. Die Haltestangen weisen eine Länge von 142 cm auf, um ein 95. Perzentil der Nutzerpopulation – in Bezug auf die Körperhöhe (1,92 m) – während des Übergangs der Stufen in das Fahrerhaus hinein den entsprechenden Halt zu gewährleisten (Hänisch, 2019). Der Sitz und das Lenkrad befinden sich an unveränderter Position zur Serienkabine. Durch die Neuordnung der Haltegriffe erreichen auch kleine Fahrer (5. Perzentil) die Haltestangen von der Fahrbahn aus. Mit dieser Anordnung wird angestrebt, die instabilen Phasen aus Abschnitt 5.5.2, die beim Betreten und Verlassen des Realfahrzeug auftreten, zu vermeiden.

Nachdem sich diese Arbeit auf ein kompatibles *Concept Model* der Zugangsgeometrie fokussiert, beleuchtet der folgende Abschnitt, in wie weit die weiteren *Design Principles* nach Norman (2013) berücksichtigt werden. Das *Concept Model* bietet den Nutzern den kürzesten (Abschnitt 6.3.3) und schnellsten (Abschnitt 5.5.2) Weg für den Ein- und Ausstieg bei Nutzfahrzeugen an. Das *Concept Model* ist durch die freien Trittflächen im Zugangsbereich erkennbar und auffindbar (*Discoverability*). Durch die Abdeckung der nicht zu nutzenden Bereiche, werden die Fahrer aufgefordert, das gewünschte Fußverhalten auszuführen (*Affordance*). Zudem

erschweren die Platzierung der Trittflächen das gegenläufige Fußverhalten (rechts – links – rechts) und setzen dem Nutzer damit physikalische Rahmenbedingungen – *Constraints*. Die ausschlaggebende Stelle für das *Feedback* ist der Übergang von den Trittstufen in die Kabine. Hier zeigt sich, ob der Fahrer beim Einsteigen auf der untersten Stufe mit dem linken Fuß angefangen hat, um nach dem *Step-over-Step* Verhalten mit dem rechten Fuß in die Kabine einzutreten. Beim Aussteigen bekommt der Fahrer das *Feedback* unmittelbar, da der Übergang von Kabine zu den Trittstufen die erste Handlung für den Abstieg ist. Die beiden Design-Prinzipien *Signifiers* und *Mapping* werden in diesem Zugangskonzept aus Abbildung 7-3 nicht adressiert. *Signifiers* wären beispielsweise Fußabdrücke auf den Trittstufen, um den Fahrer anzudeuten, mit welchem Fuß er auf die Stufen treten soll. Die Nutzung von *Signifiers* wird bewusst nicht eingesetzt, um zu prüfen, ob eine geometrische Führung ausreichend ist, die Nutzer in ihrer Bewegung zu lenken. Zudem wäre eine Verwendung von *Signifiers* nicht auf Augenhöhe der Nutzer möglich und würde den Nutzer zwingen auf die Trittstufen hinunter zu schauen. Dies verhindert eine sichere Nutzung.

7.1.2 Methode: Nutzerevaluation am Mock-Up

Nach der Analyse der aktuellen Zugangsgeometrie und der Untersuchung des präferierten Startfußes werden die Ergebnisse in Absatz 7.1.1 zu einer geführten Zugangsgeometrie zusammengeführt und evaluiert. Da eine intuitive Nutzung auf das Vorwissen zurückgreift (vgl. Abschnitt 3.2), werden in der abschließenden Evaluation sowohl Experten – erfahrene Probanden mit Lkw-Führerschein – als auch unerfahrene Novizen betrachtet.

In der zweiten deskriptiven Studie, der Nutzerevaluation, nehmen 30 Probanden teil. Die Teilnehmeranzahl setzt sich aus zwei gleich großen Gruppen zusammen: den Unerfahrenen ($n_{\text{Unerfahren}} = 15$) – Personen ohne Lkw-Führerschein – und den Erfahrenen – Berufskraftfahrer ($n_{\text{Berufskraftfahrer}} = 15$). Bei der Gruppe der Unerfahrenen nehmen sieben männliche und acht weibliche Probanden mit einem Durchschnittsalter von 26,6 Jahren ($SD = 2,56$ Jahren, *Wertebereich* = 23 bis 35 Jahre) teil. Ein Proband aus der Gruppe der Unerfahrenen ist Linkshänder, einer Beidhänder und die 13 verbleibenden Probanden geben an, Rechtshänder zu sein. Bei vier Unerfahrenen ist der linke Fuß der präferierte und 11 präferieren den rechten Fuß. Drei der unerfahrenen Teilnehmer sind unter 5 mal in einen Lkw ein- und ausgestiegen, vier zwischen fünf und 20 mal und acht der Unerfahrenen sind zum Versuchszeitpunkt mehr als 20 mal in einen Lkw ein- und ausgestiegen.

Bei der Gruppe der Berufskraftfahrer nehmen 14 Männer und eine Frau teil. Im Durchschnitt ist diese Gruppe 50,6 Jahre alt ($SD = 11,62$ Jahre; *Wertebereich* = 19 bis 66 Jahre). Einer der Berufskraftfahrer ist Linkshänder, drei Personen sind Beidhänder und 11 Lkw-Fahrer geben an, Rechtshänder zu sein. Als starken Fuß identifizieren drei Fahrer den linken Fuß, 11 Fahrer geben den rechten Fuß an und ein Proband gibt keinen präferierten Fuß an. Die Fahrer besitzen seit durchschnittlich 26,93 Jahren ($SD = 13,64$ Jahren, *Wertebereich* = 1 bis 47 Jahre) ihren Lkw-Führerschein. Acht von 15 Berufskraftfahrer fahren fünf Tage die Woche Lkw. Diese Fahrer sind hauptberuflich Lkw-Fahrer. Sechs Fahrer sind nebenberuflich als Lkw-Fahrer beschäftigt und fahren zwischen einem und vier Tagen in der Woche Lkw. Zwei Probanden fahren aus gesundheitlichen Gründen temporär keinen Lkw, sind sonst hauptberuflich ($n = 1$) bzw. nebenberuflich ($n = 1$) als Lkw-Fahrer tätig. Ein Proband aus der Gruppe der Berufskraftfahrer gibt an, sechs Tage die Woche als Berufskraftfahrer tätig zu sein. Dabei legen die Fahrer im Durchschnitt 52.073,33 km ($SD = 42.161,70$ km, *Wertebereich* = 0 km bis 125.000 km, *Modalwert* = 60.000 km) zurück. Acht Probanden aus der Gruppe der Berufskraftfahrer nutzen in der Regel dasselbe Fahrzeug für ihre berufliche Tätigkeit, sechs der Fahrer wechseln häufig ihr Fahrzeug und ein Proband wechselt ab und zu mal. Die meisten Fahrer ($n_{\text{Berufskraftfahrer}} = 9$) nutzen einen Lkw mit drei Trittstufen, jeweils zwei Fahrer haben ein Fahrzeug mit vier oder drei

bis vier Trittstufen und jeweils ein Fahrer nutzt ein Fahrzeug mit einer bzw. zwei bis drei Trittstufen. Kein Fahrer nutzt ein Fahrzeug mit zwei Trittstufen. Im Durchschnitt steigen die Fahrer 16,27 mal pro Arbeitstag ($SD = 9,58$ mal, Wertebereich = 4 bis 35 mal, Modalwert = 10 mal) in ihren Lkw ein und aus.

In einem Within-Subject-Design steigen beide Gruppen jeweils sechsmal in die Seriengeometrie und in das geführte Zugangskonzept zu verschiedenen Zeitpunkten ein. Die Bewegungsdauer wird anhand von Lichtschranken erfasst. Die Lichtschranken sind in den seitlichen Stufenbegrenzungen eingebaut. Neben der Bewegungsdauer wird erfasst, ob die Nutzer das angeordnete Fußverhalten nutzen und ob sie das Fußverhalten über die sechs Wiederholungen anpassen. Die Bewegung wird über zwei Videokameras (Seitenansicht und Draufsicht) aufgenommen und entsprechend dem Codierung-Schema aus Abschnitt Nutzerstudie am Realfahrzeug 5.5 ausgewertet. Die geführte Zugangsgeometrie ist in Abschnitt 7.1.1 aufgeführt. Da die verschiedenen Merkmale in den beiden Nutzergruppen nicht normalverteilt sind, wird der Mann-Whitney-U-Test zur Berechnung der zentralen Tendenz genutzt. Das α -Niveau liegt bei 0.05.

Bewegungsstrategien

Die Bewegungsstrategie beim Ein- und Aussteigen bei Nutzfahrzeugen kann durch geometrieleitete Führung beeinflusst werden, so dass der Nutzer die Ein- und Ausstiegsbewegung jeweils mit dem linken Fuß auf der untersten bzw. obersten Stufe beginnt und in einem *Step-by-Step* Verhalten ein- bzw. aussteigt.

Unerfahrene Fahrer nehmen die Bewegungsstrategie eher an als erfahrene Fahrer.

Bewegungsdauer

Nutzen die Probanden die vorgegebenen Bewegungsstrategie bewegen sie sich schneller als bei der Seriengeometrie.

Sowohl die unerfahrenen als auch die erfahrenen Fahrer bewegen sich schneller mit der vorgegebenen Bewegungsstrategie als bei der Seriengeometrie.

7.1.3 Ergebnisse: Nutzerevaluation einer geführten Zugangsgeometrie

Bewegungsstrategien

Für die Auswertung der Fußstrategien wird zuerst die sechste Wiederholung betrachtet. Bei der Gruppe der Unerfahrenen werden zwei Fußstrategien für den Einstieg beobachtet: 60 % fangen den Einstieg mit dem linken Fuß an – links, rechts, links – und steigen zuerst mit dem rechten Fuß auf den Fahrerhausboden. Somit nutzen 60 % der Unerfahrenen nach der sechsten Wiederholung die geführte Fußstrategie. Die verbleibenden 40 % nutzen die entgegengesetzte Fußstrategie und beginnen mit dem rechten Fuß den Einstieg und steigen mit dem linken Fuß zuerst auf den Fahrerhausboden. Beide Bewegungsabläufe sind in Abbildung 7-4 dargestellt.

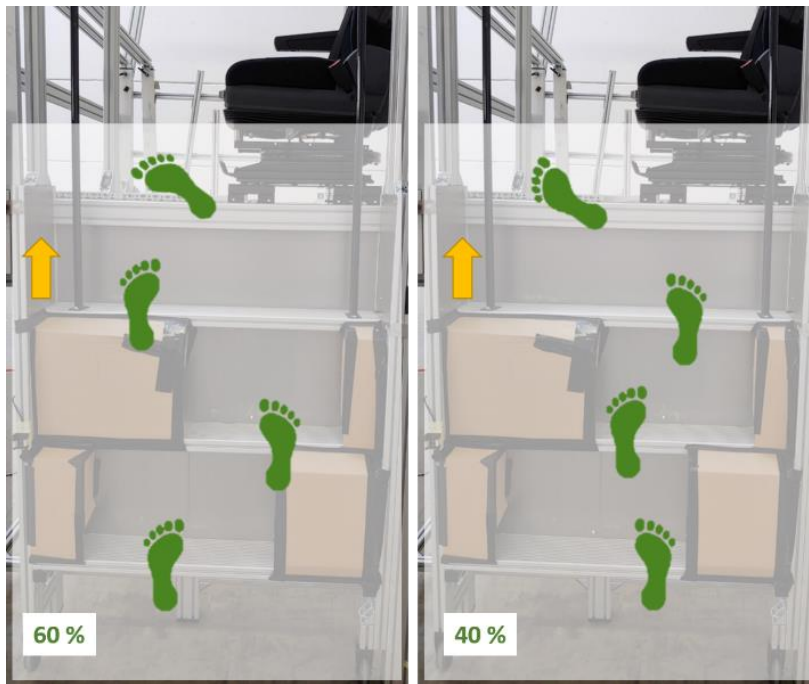


Abbildung 7-4: beobachtete Fußstrategien beim Einstieg der unerfahrenen Teilnehmer

Bei den erfahrenen Probanden werden drei Fußstrategien für den Einstieg beobachtet: zwei Drittel der Fahrer beginnen die Einstiegsbewegung mit dem linken Fuß und führen den beabsichtigten Bewegungsablauf aus. Ein Fünftel der Lkw-Fahrer beginnen den Einstieg mit dem rechten Fuß und wechseln auf der obersten Trittstufe den führenden Fuß, so dass sie mit dem rechten Fuß zuerst die Kabine betreten. Diese Gruppe erkennt den Vorteil mit dem rechten Fuß zuerst in die Kabine zu steigen, dennoch hat sich bei ihnen nach sechs Wiederholungen nicht gefestigt mit welchem Fuß die dafür auf der untersten Stufe anfangen müssen. Die verbleibenden 13,33 % beginnen mit dem rechten Fuß auf der untersten Stufe und kommen mit dem linken Fuß in der Kabine an. Dargestellt sind die drei beobachteten Fußstrategien in Abbildung 7-5.



Abbildung 7-5: beobachtete Fußstrategien beim Einstieg der erfahrenen Teilnehmer

Für den Ausstieg werden bei den unerfahrenen Probanden zwei Bewegungsstrategien beobachtet: 73,33 % der Fahrer beginnen den Ausstieg mit dem linken Fuß auf der obersten Stufe, 26,67 % beginnen mit dem rechten Fuß auf der obersten Stufe. Die beiden beobachteten Fußstrategien sind in Abbildung 7-6 dargestellt.



Abbildung 7-6: beobachtete Fußstrategien beim Ausstieg der unerfahrenen Teilnehmer

Von den unerfahrenen Teilnehmern, die mit dem linken Fuß die Ausstiegsbewegung beginnen, starten 46,67 % in einer sitzenden Haltung, während 26,67 % aus einer stehenden Haltung auf die oberste Stufe steigen. Die Personen, die den Ausstieg mit dem rechten Fuß auf der obersten Stufe beginnen, starten immer in einer stehenden Haltung, wie zusammenfassend in Abbildung 7-7 dargestellt ist.



Abbildung 7-7: beobachtete Fußstrategien mit Bewegungsart zur obersten Stufe beim Ausstieg der unerfahrenen Teilnehmer

Bei der Gruppe der Lkw-Fahrer wird nur eine Fußstrategie für den Ausstieg beobachtet. Alle erfahrenen Versuchsteilnehmer steigen nach der geführten Strategie aus. Beim Ausstieg scheint die Führung von allen Fahrern – unabhängig ihrer Körpergröße (vgl. Abschnitt 5.5.2) – erkannt und angenommen worden zu sein. Dieses Ausstiegsverhalten ist in Abbildung 7-8 abgebildet. Alle bis auf ein Fahrer stellen den linken Fuß in einer sitzenden Haltung auf die oberste Stufe und steigen nach einem *Step-over-Step* Verhalten aus, wie in Abbildung 7-9 dargestellt ist.



Abbildung 7-8: beobachtete Fußstrategie beim Ausstieg der erfahrenen Teilnehmer

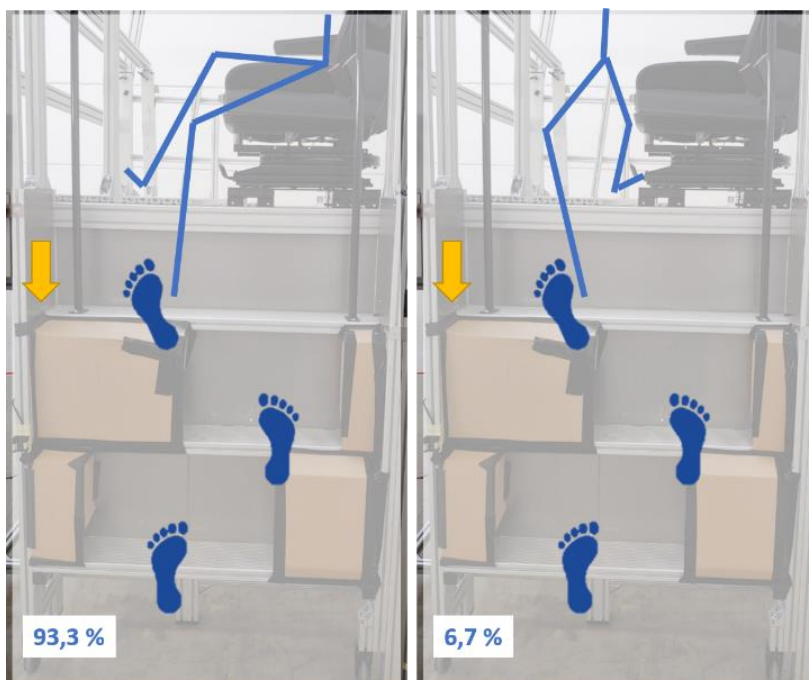


Abbildung 7-9: beobachtete Fußstrategien und Bewegungsart beim Ausstieg der erfahrenen Teilnehmer

In Diagramm 7-1 ist die Entwicklung des genutzten Startfußes für beide Gruppen während der Einstiegsbewegung für die erste, dritte und sechste Wiederholung an der geführten Geometrie zu sehen. Bei der Gruppe der Unerfahrenen stagniert der Wert derer, die den linken Fuß als

Startfuß nutzen bei 60 % über alle sechs Wiederholungen. Fünf unerfahrene Probanden wechseln ihren Startfuß über die Wiederholungen. Bei diesen Wechsels ist kein Muster für die Wahl des Startfußes über die Probanden hinweg zu erkennen. Bei der Gruppe der Lkw-Fahrer ist ein leichter Anstieg von Nutzer, die den linken Fuß als Startfuß wählen, von 60 % auf 67 % zwischen der ersten und der dritten Wiederholung zu verzeichnen. Bei der Gruppe der Lkw-Fahrer wechseln zwei Fahrer ihren Startfuß zwischen der dritten und sechsten Wiederholung, die anderen Fahrer bleiben bei der Wahl ihres Startfußes über die sechs Wiederholungen.

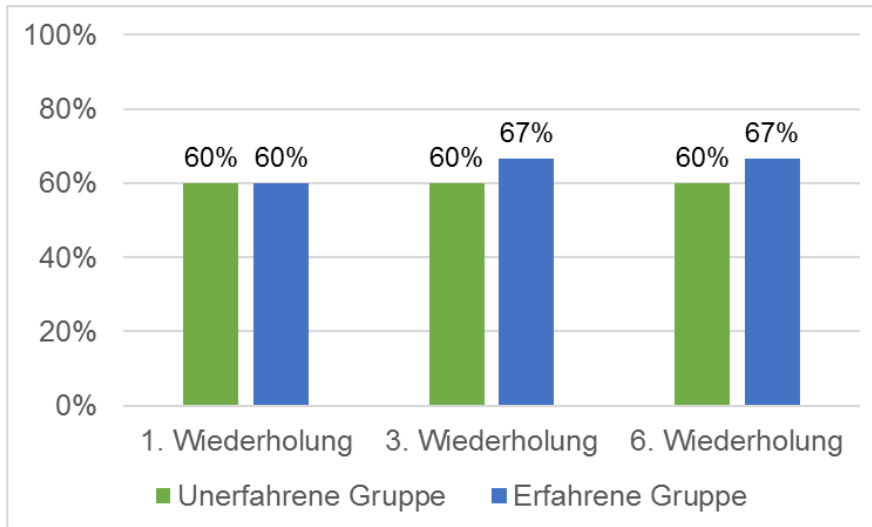


Diagramm 7-1: Anteil der Personen, die die Einstiegsbewegung mit dem linken Fuß beginnen

Diagramm 7-2 zeigt den Anteil der Personen, die die Ausstiegsbewegung mit dem linken Fuß beginnen, aufgeteilt nach der Gruppe der unerfahrenen und der erfahrenen Teilnehmer für die erste, dritte und sechste Wiederholung. Bei beiden Gruppen ist ein Anstieg der Nutzer des linken Startfußes von 60 % auf 73 % bei den Unerfahrenen und von 87 % auf 100 % bei den Erfahrenen zu verzeichnen. Somit scheint es sowohl bei den Unerfahrenen als auch bei den Erfahrenen einen Lerneffekt über sechs Wiederholungen zu geben, der dazu führt, dass alle Lkw-Fahrer das angestrebte Fußverhalten ausführen. Dies bestätigt die Bewegungsoptimierung innerhalb von sechs Wiederholungen nach Cherednichenko (2007). Allerdings zeigt das Diagramm 7-2 auch, dass ein Übungseffekt notwendig ist, um die angestrebte Bewegungsstrategie anzuwenden. Der Unterschied zwischen den Lkw-Fahrern und den Unerfahrenen ist auf diesem Lerneffekt zurückzuführen.

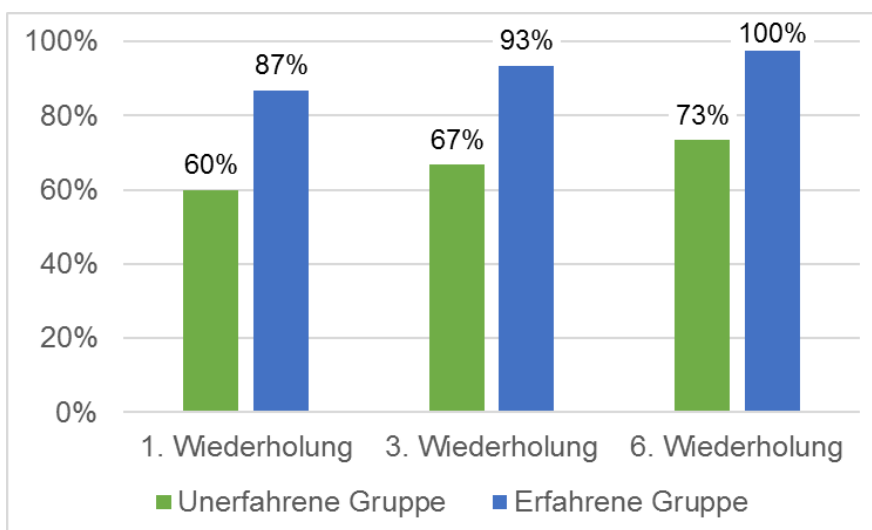


Diagramm 7-2: Anteil der Personen, die die Ausstiegsbewegung mit dem linken Fuß beginnen

Der Unterschied zwischen den Unerfahrenen und den Erfahrenen zeigt sich besonders deutlich in der Art und Weise wie die Probanden auf die oberste Stufe beim Ausstieg steigen. Bei den Unerfahrenen stellen 47 % der Teilnehmer ($n = 7$) den Fuß in einer sitzenden Haltung auf die oberste Stufe, bei den Erfahrenen sind es 93 %, wie in Diagramm 7-3 dargestellt ist. Die andere Hälfte der Unerfahrenen ($n = 8$) steigt in einer sitzenden Haltung aus dem Fahrzeug aus, ebenso einer der Berufskraftfahrer. In der Bewegungsart aus dem Fahrzeug heraus, zeigt sich das Vorwissen der Geübten, dass für eine intuitive Handlung notwendig ist (Naumann, et al., 2007): In einer sitzenden Haltung steigen vor allem die unerfahrenen Probanden aus, die angeben, mehr als 20 mal in einen Lkw ein- und ausgestiegen zu sein und damit ein gewisses Maß an Vorwissen gesammelt haben.

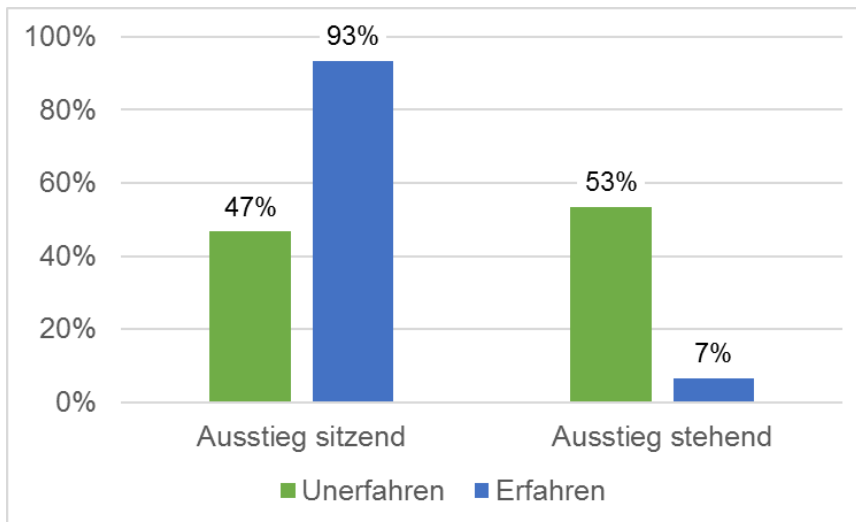


Diagramm 7-3: Aufteilung der Probanden nach der Ausstiegsart

Wird die Ausstiegsart der Probanden nicht nur nach den Gruppen, sondern auch nach dem Startfuß betrachtet, ergibt sich das Diagramm 7-4. Wie bei der Realfahrzeugstudie (vgl. Abschnitt 5.5.2) wird die sitzende Haltung nur in Verbindung mit dem linken Startfuß verwendet. In der stehenden Haltung ergibt sich eine 50 %-Verteilung zwischen dem linken und dem rechten Startfuß in der Gruppe der Unerfahrenen.

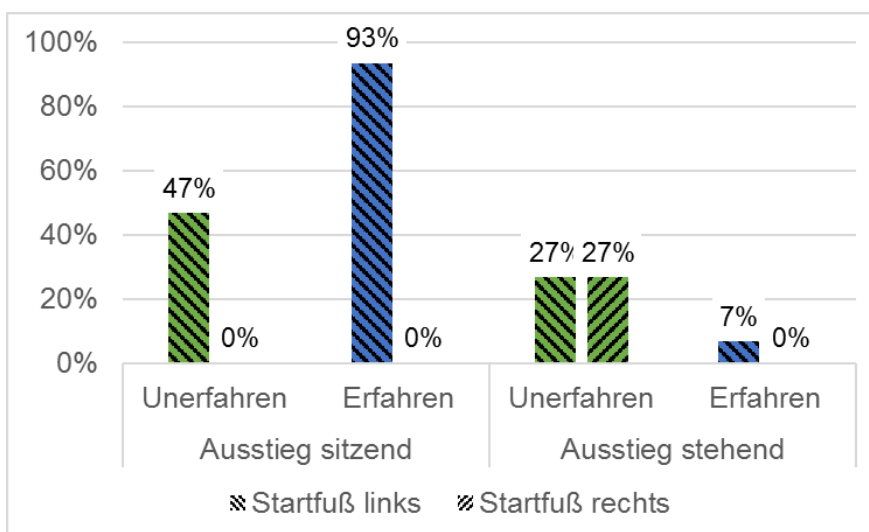


Diagramm 7-4: Aufteilung der Probanden nach Ausstiegsart und Startfuß

Bewegungsdauer

Im letzten Teil liegt der Fokus auf den Hypothesen in Bezug auf die Bewegungsdauer. Im Fokus steht die Frage nach einem signifikanten zeitlichen Unterschied der Zugangsgeometrie, der Nutzergruppen und der Wahl des Startfußes.

Die Bewegungsdauer beim Einsteigen ist für Lkw-Fahrer in der geführten Geometrie (Median = 5,406 s) signifikant kürzer als bei der Seriengeometrie (Median = 7,16 s), exakter Mann-Whitney-*U*-Test: $U = 46.000$, $p < 0.000$. Die Effektstärke liegt bei $r = 0.64$ und entspricht einem starken Effekt (Cohen, 1992). Beim Ausstieg ist kein signifikanter Unterschied in der Bewegungsdauer zwischen der geführten Geometrie (Median = 5,906 s) und der Seriengeometrie (Median = 6,391 s) für die Berufskraftfahrer zu finden, exakter Mann-Whitney-*U*-Test: $U = 165.000$, $p = 0.076$. Nach einem G*Power Test ändert sich dieser Zusammenhang auch nicht mit einer größeren Probandenanzahl.

Im Vergleich der Bewegungsdauer beim Einstieg an der geführten Geometrie zwischen den Nutzergruppen ergibt sich kein signifikanter Unterschied. Die Erfahrenen brauchen im Median 5,406 s im Vergleich zu den Unerfahrenen mit 5,439 s (Median), exakter Mann-Whitney-*U*-Test: $U = 104.500$, $p = 0.751$. Dasselbe gilt für die Ausstiegsdauer. Erfahrene steigen in 5,906 s (Median) bei der geführten Geometrie aus, Unerfahrene in 6,206 s (Median), exakter Mann-Whitney-*U*-Test: $U = 78.500$, $p = 0.164$. In Anbetracht des Startfußes zeigen sich sowohl für die Einstiegsdauer (Median_{StartfußRechts} = 5,973 s, Median_{StartfußLinks} = 5,372 s, exakter Mann-Whitney-*U*-Test: $U = 74.500$, $p = 0.102$), als auch für die Ausstiegsdauer (Median_{StartfußRechts} = 6,857 s, Median_{StartfußLinks} = 5,939 s, exakter Mann-Whitney-*U*-Test: $U = 35.500$, $p = 0.166$) keine signifikanten Unterschiede zwischen dem gewählten Startfuß. Bei den Berufskraftfahrern ergibt sich für die Einstiegsbewegung, beginnend mit dem linken Fuß (Median = 5,155 s), eine signifikante kürzer Bewegungsdauer als mit dem rechten Fuß (Median = 6,339 s), exakter Mann-Whitney-*U*-Test: $U = 8.000$, $p = 0.02$. Dies entspricht einer Effektstärke von $r = 0.538$ und damit einem starken Effekt (Cohen, 1992). Da beim Ausstieg mit der geführten Geometrie alle Berufskraftfahrer mit dem linken Fuß zuerst aussteigen, können keine Unterschiede zum rechten Startfuß gezogen werden. Bei den Unerfahrenen ist kein signifikanter Unterschied zwischen der Wahl des Startfußes für den Ein- (Median_{StartfußRechts} = 5,439 s, Median_{StartfußLinks} = 5,439 s, exakter Mann-Whitney-*U*-Test: $U = 25.000$, $p = 0.419$) oder Ausstieg (Median_{StartfußRechts} = 6,857 s, Median_{StartfußLinks} = 6,140 s, exakter Mann-Whitney-*U*-Test: $U = 16.500$, $p = 0.254$) mit der geführten Geometrie nachweisbar.

7.2 Fazit der vierten methodischen Phase in der DRM

In der Nutzerevaluation der geführten Zugangsgeometrie wird analysiert, ob Nutzern eine Bewegungsstrategie für den Fahrzeugeinstieg und-ausstieg mitgeben werden kann. Es wird postuliert, dass die Nutzer, die den vorgegebenen Bewegungsablauf nutzen, signifikant schneller ein- beziehungsweise aussteigen als Personen, die diesen nicht anwenden.

Die Ergebnisse von drei Probandenstudien, einer Beobachtungsstudie und einer Nutzer- und einer Experten-Befragung fließen in der abschließenden Nutzerevaluation zusammen und bieten den Anwendern eine geführte Zugangsgeometrie. Aus der Szenario-Analyse ergibt sich neben den gelernten Berufskraftfahrern eine neue, mögliche Nutzergruppe im Lkw-Bereich: die Ungeübten, die beispielsweise als Nebenjobber, einen Lkw in geringen Arbeitsumfängen lenken. Somit werden beide Nutzergruppen in die Evaluation eingebunden.

Die Ergebnisse der Nutzerevaluation zeigen, dass die Führung der Zugangsgeometrie für die Ausgangsbewegung aufgegangen ist: Alle Fahrer führen den angedachten Bewegungsablauf aus. Bei der Einstiegsbewegung ist dieses Ergebnis nicht so eindeutig, dennoch nutzt die Mehrheit der Fahrer (66,67 %) den vorgegebenen Bewegungsablauf und 20 % der Fahrer nutzen den

forcierten Übergang vom Aufstieg in die Kabine. Dieser Übergang liegt im letzten Abschnitt der Einstiegsbewegung und ist das einzige Feedback und Erfolgskriterium, das die Fahrer zu ihrem Bewegungsablauf erhalten. Es ist davon auszugehen, dass sich der angedachte Bewegungsablauf bei diesen 20 % über weitere Wiederholungsvorgänge findet und festigt. Diese Vermutung stützt auch die Analyse der Bewegungsdauer, die eine signifikant kürzere Einstiegsdauer bei der geführten Geometrie im Vergleich zur Serien-Geometrie nachweist. Dies gilt allerdings nur für die gelernte Nutzergruppe der Lkw-Fahrer. Bei den Ungeübten ist dieser Effekt nicht nachweisbar. Doch auch die Ungeübten zeigen einen Lerneffekt hinsichtlich der angedachten Ausstiegsbewegung auf. Bei der Einstiegsbewegung zeigen die Ungeübten über sechs Wiederholungen keinen nachweisbaren Lerneffekt auf. Dies wird auf die späte Rückmeldung zum Bewegungsablauf zurückgeführt.

Abschließend folgt der letzte Schritt in der DRM: die Evaluation der Anwendung und des Erfolgs. Die Anwendungsevaluation beschäftigt sich mit der Frage, ob der Output aus der dritten Phase des DRM die gewünschten Einflussfaktoren in Phase IV anspricht. Die vorliegende Arbeit entwickelt in Phase III keine Methode oder Werkzeug zur Überprüfung der Einflussfaktoren: Es findet vielmehr ein *Proof of Concept* statt. Da allerdings die Ergebnisse aus Phase III zum Stufenauszug zu den Auftrittsflächen der einzelnen Trittstufen und zu der Bewegungsabfolge der Ein- und Ausstiegsbewegung zusammengeführt und direkt in einem Mock-Up Aufbau in Phase IV umgesetzt werden, wird die Anwendungsevaluation als erfüllt betrachtet.

Die Erfolgsevaluation beschäftigt sich dagegen mit der Adressierung des Erfolgskriteriums. Die Analyse von Bewegungsstrategien an Realfahrzeugen zeigt, dass geübte Lkw-Fahrer teilweise ihr Ein- und Ausstiegsverhalten innerhalb von sechs Bewegungswiederholungen ändern und keine einheitliche Bewegungsfolge aufweisen. Die eingeschränkte Positionierung der Auftrittsflächen und die ungünstig angebrachten Haltemöglichkeiten geben den Fahrern keine sinnvoll ausführbare Bewegungsabfolge für die Ein- und Ausstiegsbewegung vor. Der Serienzugang ist ein Resultat aus Zielkonflikten im Hinblick auf die Bauraumgestaltung. Die geführte Zugangsgeometrie setzt dagegen den Fahrer in den Fokus und gestaltet eine Zugangsgeometrie nach dem präferierten Bewegungsablauf der Nutzer. Damit wird eine einheitliche Bewegungsabfolge erreicht, die teilweise signifikant schneller auszuführen ist als die Seriengeometrie (vgl. Abschnitt 6.3). Diese Ergebnisse bestätigen den Erfolg der geführten Zugangsgeometrie und damit weisen damit auf eine positive Erfolgsevaluation hin.

8 Diskussion

Neben dem Vorgehensmodell und den angewendeten Methoden, werden die Erkenntnisse zu der Seriengeometrie und der geführten Geometrie beleuchtet und mit der Literatur verglichen.

8.1 Die Design Research Methodology

Die vorliegende Arbeit folgt dem Vorgehensmodell der *Design Research Methodology* nach Blessing und Chakrabarti (2002). Die DRM ist allgemein und offen gehalten, so dass es individuell auf den vorliegenden Anwendungsfall angepasst werden kann (Blessing & Chakrabarti, 2002). Damit ist eine Anforderung von Lindemann (2009) an Vorgehensmodelle erfüllt. Allerdings erschwert diese allgemeine Gestaltung die Definition, wann eine Phase abgeschlossen ist und die nächste Phase beginnt. Der Anwender erhält keine Hilfestellung aus dem Modell und muss selbstständig entscheiden, ab welchem Zeitpunkt eine Phase für beendet erklärt wird.

Ein wichtiges Element der DRM ist die interdisziplinäre Ausrichtung der Vorgehensweise (Blessing et al., 1998). Abgesehen von der Aufforderung zum interdisziplinären Ansatz findet sich in der DRM kein Hinweis, in welcher Phase und in welcher Art die Interdisziplinarität ausgeführt wird. Ebenso bleibt offen, in welcher Weise sinnvolle Disziplinen für die Projektkooperationen identifiziert werden.

Die Verknüpfung zwischen den einzelnen Phasen ist ein weiteres wichtiges Element der DRM und gilt sowohl vorwärts- als auch rückwärtsgerichtet. Indem auf Ergebnisse aus vorhergehenden Phasen in der nachfolgenden Phase aufgebaut wird, wird eine vorwärts gerichtete Verknüpfung zwischen den Entwicklungsphasen erreicht. Während eine rückwärtige Verknüpfung im Rahmen der Anwendungs- und Erfolgsevaluation ausgeführt wird. Diese Verknüpfung zwischen den Phasen werden auch grafisch im Aufbau der DRM (vgl. Abbildung 4-1) hervorgehoben. Die Zweiteilung zwischen der Anwendungsevaluation und der Erfolgsevaluation verdeutlicht dabei eine Verknüpfung aller Phasen zueinander. Während die Anwendungsevaluation sich vergewissert, dass die gewünschten Faktoren aus Phase III adressiert sind, überprüft die Erfolgsevaluation, ob das Ziel des Vorgehens in Phase II erreicht wird und die anfangs angestrebte Verbesserung eingetreten ist. Die Verknüpfung zwischen den Phasen fördert eine zielgerichtete Ausrichtung der Studien aufeinander und erleichtert die Einordnung und Bewertung der Ergebnisse am Ende der Durchführung.

Die strenge Fokussierung auf ein messbares Erfolgskriterium zu Beginn der DRM fördert ein zielgerichtetes Vorgehen und ausrichten der Studien. Allerdings zeigt sich in der vorliegenden Arbeit, dass bei umfangreichen Projekten mit mehreren Studien eine Anpassung bzw. Verfeinerung des Erfolgskriteriums nach der zweiten Phase der DRM sinnvoll erscheint. Im Rahmen dieser Arbeit hat sich die Anfangshypothese, dass Lkw-Fahrer eine Bewegungsstrategie für das Ein- und Aussteigen besitzen, nicht bewahrheitet. Dieses Erkenntnis wird in der zweiten Phase aufgedeckt und wirkt sich damit auf das weitere Vorgehen aus. Daher scheint eine Überprüfung des anfangs festgelegten Erfolgskriteriums nach der zweiten Phase des DRM für sinnvoll.

8.2 Methodendiskussion

In den Studien dieser Arbeit liegen verschiedene Limitationen vor: In jeder Studie – abgesehen von der Beobachtungsstudie – handelt es sich um eine artifizielle Situation. Trotz sorgfältiger

Vorbereitung der Versuche und Cover-Stories können Versuchsleitereffekte nicht ausgeschlossen werden. Bei den Mock-Up Studien kommt die Ungenauigkeit der rudimentären Abbildung der Zugangssituation hinzu. Elemente, wie die Türinnenverkleidung oder die Luftfederung des Fahrerhauses, sind in den Mock-Up Aufbauten nicht berücksichtigt. Ihr Einfluss auf die Zugangsbewegung wird nicht erfasst. Dennoch ist davon auszugehen, dass diese Einflüsse nicht zu vernachlässigen sind und sollte in weiterführenden Studien berücksichtigt werden.

Neben der Versuchsumgebung ist anzunehmen, dass sich auch die Alltagssituation und der Arbeitsablauf auf die Bewegungsausführung auswirken. Offene Fragen diesbezüglich lauten:

- steigt der Fahrer ein, um loszufahren oder
- um in den Innenraum durchzusteigen?
- hat der Fahrer während der Ein- oder Ausstiegsbewegung einen Gegenstand in der Hand? – Welchen?
- von welcher Richtung und mit welcher Geschwindigkeit nähert sich der Fahrer der Zugangsbewegung?
- wie wirkt sich der Vorgang des Türöffnens auf die Bewegungsausführung aus?

Die Ausgangsposition der Zugangsbewegung ist in den vorliegenden Studien stets die Fahrhaltung – beim Einstieg als Zielhaltung und beim Ausstieg als Ausgangshaltung. Andere Ausgangspositionen werden nicht betrachtet. Dabei zeigt die Fahrerbeobachtung (vgl. Abschnitt 5.2.3), dass die Fahrer im Zuge der Fahrtvorbereitung auch häufig ein- und aussteigen, um Formulare oder Arbeitsmittel zu holen oder Schalter zu betätigen (vgl. auch Michel, 2014).

Des Weiteren beeinflusst die Messausrüstung das Bewegungsverhalten der Fahrer. In den ersten beiden Probandenstudien (Abschnitt 5.5 und 6.2) wird die Bewegung der Fahrer mit Hilfe des inertialen Messsystems CAPTIV erfasst. Dieses Messsystem ermöglicht eine Bewegungsaufnahme an Realfahrzeugen, im Gegensatz zu den genaueren optischen Messsystemen, wie VICON (vgl. Abschnitt 3.1.1). Die Sensoren werden über Klettbinden und Handschuhe an den Probanden befestigt. Teilnehmer berichten, dass sich der Handschuh auf ihren Bewegungsablauf auswirkt, da sich der Reibungskoeffizient zum Greifen verändert (vgl. Najgeboren, 2017). Durch die gravierenden Auswirkungen auf den Bewegungsablauf, ist es nicht mehr möglich eine realitätsnahe Bewegung zu beobachten. Daher wird das inertielle Messsystem nicht mehr in den nachfolgenden Studien verwendet.

Ein weiterer Nachteil beim inertialen Bewegungserfassungssystem ist, dass das System nur relative Gelenkwinkel erfasst. Im Rahmen einer Studienarbeit (Orabi, 2018) wird ein Ansatz entwickelt in einer bekannten, geometrischen Umgebung die relativen Gelenkwinkel zu Absolutwinkel umzuwandeln. Erste Ergebnisse sind vielversprechend, da aber die Befestigung des inertialen Messsystems am Probanden zu Änderungen im Bewegungsablauf führen (siehe vorherigen Absatz), wird dieser Ansatz nicht weiterverfolgt. Für weiterführende Arbeiten ist eine quantitative Erfassung von Bewegungsstrategien zu empfehlen, da dies einfacher und robuster in der Auswertung ist. Zudem ist die qualitative Auswertemethode subjektiv geprägt.

Die Bewertung der Bewegung wird anhand des Diskomfort-Kriteriums *Bewegungsdauer* durchgeführt. Chateauroux et al (2012) und Sabbah (2010) leiten aus ihren Studie einen Zusammenhang zwischen der Bewegungsdauer und dem empfundenen Diskomfort ab. Sabbah (2010) weist einen statistisch signifikanten Zusammenhang zwischen der Bewegungsdauer und den subjektiven Diskomfort-Empfindungen nach, während Chateauroux et al. (2012) den Zusammenhang im Nutzfahrzeugbereich ausgehend von ihren Ergebnissen vermuten. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass der Begriff des Diskomforts, indiziert über die Bewegungsdauer und der Begriff des Komforts, der in Richtlinie EU2015/719 gefordert wird, keine Anto-

nyme sind. Zhang, Helander und Drury (1996) sehen diese beiden Begriffe vielmehr in verschiedenen Dimensionen und postulieren, dass Komfort und Diskomfort zur selben Zeit empfunden werden können. Dabei wird der Begriff des Diskomfort mit biomechanischen Faktoren und Schmerzen verbunden, wogegen Komfort mit dem Wohlfühlen und der ästhetischen Anmutungen verknüpft ist (Zhang et al., 1996). Das Gefühl von Diskomfort nimmt mit der Zeit und der Ermüdung zu (Zhang et al., 1996). Aufgrund dieser Unterscheidung nach Zhang et al. (1996), interpretiert der Autor, dass der gesetzliche Text auf eine Verbesserung der biomechanischen Faktoren anstelle der Ästhetik abzielt. Damit wäre der korrekte wissenschaftliche Begriff für die EU-Richtlinien 2015/719 der Reduzierung des Diskomforts. Daher stützt sich die vorliegende Arbeit mit der Bewegungsdauer auf ein Kriterium zur Berücksichtigung des Diskomforts. Der Faktor Zeit bietet sich auch in der Hinsicht an, als dass dieser als ein Messkriterium für Intuition gesehen werden kann (Mohs et al., 2006a).

8.3 Aktuelle Bewegungsstrategien im Nutzfahrzeugbereich

Eine elementare Erkenntnis dieser Arbeit ist, dass Berufskraftfahrer – entgegen der Annahme – keine Bewegungsstrategie für die Ein- und Ausstiegsbewegung bei Nutzfahrzeugen benutzen. Teilweise ändern die Lkw-Fahrer ihre Bewegungsabfolge innerhalb von sechs in kurzen Zeitabständen aufeinander folgenden Bewegungswiederholungen. Bei der Betrachtung der Bewegungsabfolgen jeder Extremität zeigt sich für fast jeden Teilnehmer ein individuelles Bewegungsmuster. Diese Beobachtungen führen zu dem Schluss, dass das Konzeptmodell der Zugangsgeometrie nicht mit dem Inneren Modell der Fahrer übereinstimmt. Diese Diskrepanz führt zu Fehlnutzungen und führt in der Folge zu einem erhöhten Unfallrisiko. Unter Fehlnutzung fallen beispielsweise das Auslassen einer Trittstufe, das Herunterspringen beim Aussteigen oder die Nutzung von ungeeigneten Halteoptionen, wie dem Lenkrad.

Die Erkenntnis, dass keine einheitlichen Bewegungsstrategien bei der Ein- und Ausstiegsbewegung bei Nutzfahrzeugen existieren, ist aus mehreren Punkten unerwartet: zum einen handelt es sich um hochgeübte Nutzer. Das Ein- und Aussteigen ist ein Hauptbestandteil im Arbeitsalltag eines Lkw-Fahrers und wird am Tag durchschnittlich bis zu 26 mal ausgeführt. Unter diesen Bedingungen war zu erwarten, dass sich Bewegungsstrategien bilden, die die Fahrer regelmäßig unbewusst abrufen und anwenden. Zum anderen existiert nur eine limitierte Anzahl von Trittstufen und Haltestangen, die in unmittelbarer Nähe positioniert sind. Aufgrund der limitierten Anzahl und Positionierung wurde von einer limitierten Anzahl an Bewegungsabfolgen ausgegangen, eine solche Variantenvielfalt in der Bewegungsausführung war unerwartet.

Interessant bleibt der Vergleich zum Pkw-Bereich, in dem verschiedene Bewegungsstrategien existieren. Bei genauerer Betrachtung beschreiben Ein- und Ausstiegsstrategien beim Pkw den Bewegungsablauf anhand des zeitlichen Ablaufs ausgewählter Körperteile. Es werden nicht alle Extremitäten gleichzeitig betrachtet, wie in diesem Fall im Nutzfahrzeugbereich. Allerdings sind beim Nutzfahrzeugzugang alle Extremitäten für den Ein- und Ausstieg eingeplant. Aufgrund dieser Überlegung werden bei der Datenauswertung in der vorliegenden Arbeit Bewegungskodes für jede Extremität erstellt. Diese stellen allerdings nur eine Momentaufnahme zu diskreten Zeitpunkten da. Die Bewegungskodes lassen nicht erkennen, ob sich ein Körperteil schon nahe eines neuen Greifpunkts befindet. Ein Beispiel ist der Moment des *Hochdrückens* zu Beginn der Einstiegsbewegung. Die Fahrer stehen mit dem ersten Fuß auf der untersten Stufe und drücken sich aus ihrer Beinkraft nach oben, um die Haltegriffe zu erreichen. In diesem Moment bekommen die Hände die Zuordnung *in der Luft*. Es wird nicht ersichtlich, dass die Hände schon nach den Haltegriffen greifen und teilweise schon kurz vor dem Greifen sind. Eine Abhilfe bietet die Darstellung paralleler Zeitabläufe aller Extremitäten. Dies erschwert allerdings die Auswertung über alle Probanden hinweg.

Trotz des teilweisen Informationsverlusts zum genauen Bewegungszeitpunkte der Hände, zeigen die Bewegungskodes einen guten Überblick über den zeitlichen Ablauf der Halte- und Trittoptionen der Extremitäten. Auch die Bewegungsphasen werden als sinnvoll erachtet. Die Definition der Bewegungsphasen anhand des führenden Fußes stellt sicher, dass diese sequentiell ablaufen. Allerdings ist zu überlegen die Transitphasen – vor dem Auf- oder Abstieg – detaillierter zu beschreiben. Die Annäherung an das Fahrzeug wirkt sich sicherlich auf den Bewegungsablauf aus. In diesen Studien wird die Annäherung vernachlässigt. Ebenso könnte die Phase nach dem Aufstieg und vor dem Abstieg detaillierter betrachtet werden. Zu diesen Zeitpunkten könnten Informationen zur Körperdrehung und Torsoneigung interessant sein.

In der Detailbetrachtung der Bewegungsmuster zeigt sich, dass bei Frontlenkerfahrzeugen ausschließlich das *Step-over-Step* Fußverhalten auftritt, ganz im Gegensatz zu Haubenfahrzeugen (Shorti, 2016). Nur auf der obersten Stufe beim Einsteigen nutzen wenige Fahrer einen Fußwechsel, bevor sie in die Kabine eintreten. Dieses *Step-over-Step* Fußverhalten führt bei der Ausstiegsbewegung zu einem nach innengewandten Ausstiegsverhalten. Damit werden die Beobachtungen von Chateauroux et al. (2012) in Bezug auf die Bewegungsausrichtung bestätigt.

Den Übergang aus dem Fahrerhaus heraus auf die oberste Trittstufe führen manche Lkw-Fahrer sitzend auf dem Fahrersitz aus. Die Wahrscheinlichkeit für ein solches Verhalten nimmt mit zunehmender Körpergröße zu und ist auf Trainingseffekte zurückzuführen. Unerfahrene Nutzer erheben sich zuerst aus dem Sitz und positionieren sich am Schweller, bevor sie anfangen auszustiegen. In diesem Punkt weist die Studie von Chateauroux et al. (2012) eine limitierte Aussagekraft auf, da ausschließlich die sitzende Variante beobachtet wird. Die unterschiedlichen Beobachtungen können auf die geringe Probandenanzahl und die Probandenauswahl zurückgeführt werden, da bei Chateauroux et al. (2012) nur zwei Berufskraftfahrer teilnehmen.

Die Wahl des Startfußes ist bei den aktuellen Fahrzeugmodellen geometrieabhängig. Durch die linksseitige Anordnung der Trittstufen tendieren die Fahrer (79 %) dazu, mit dem linken Fuß die Einstiegsbewegung zu beginnen. Sobald den Fahrern Trittstufen über die gesamte Türöffnungsbreite zur Verfügung stehen, relativiert sich die Wahl des Startfußes (52 % links).

Die Hypothese, dass im Nutzfahrzeugbereich keine Bewegungsstrategien existieren, basiert auf der Vielzahl an Bewegungsvarianten, die für alle Extremitäten auftauchen und für die Ganzkörperaufgabe des Ein- und Aussteigens keine Bewegungsstrategie für die Gesamtbewegung erkennen lassen. Bei der Unterteilung der Gesamtbewegung in Bewegungsabschnitt könnten sich Teilstrategien bilden. Beispielsweise könnte die Gesamtbewegung des Ein- und Aussteigens in eine Auf- bzw. Abstiegsphase und in eine Phase in der Kabine unterteilt werden. Für diese Bewegungsabschnitte könnten Teilstrategien, wie das *Step-over-Step* Fußverhalten identifiziert werden. Das Handverhalten müsste nach den Bewegungsabschnitten getrennt analysiert und geclustert werden. Dann könnten sich für die Bewegungsabschnitte Teilstrategien ergeben.

Die Analyse der aktuellen Zugangsgeometrie findet in einer Versuchssituation statt. Die Fahrerbeobachtung in Abschnitt 5.2 zeigt, dass die Versuchssituation idealisiert ist mit komplett geöffneter Tür dar und vernachlässigt tatsächlich auftretende Situation, wie den Zugang mit Gegenständen in der Hand oder das Aus- und Anziehen der Straßenschuhe auf den Trittstufen.

8.4 Geführte Bewegungsstrategie im Nutzfahrzeugbereich

Nachdem der aktuelle Zugang eine Diskrepanz zwischen dem Konzeptmodell der Geometrie und dem Inneren Modell der Fahrer aufweist, stellt sich die Frage, wie ein optimierter Bewegungsablauf aussieht und wie dieser den Fahrern vermittelt werden kann. Dazu wird in mehreren Studien ein optimierter Bewegungsablauf erarbeitet und in einem Mock-Up Aufbau umgesetzt. In einer abschließenden Evaluation wird überprüft, ob sich die Probanden durch die Gestaltung des Zugangs so führen lassen, wie angedacht. Die Führung der Ausstiegsbewegung

wird von den Probanden erkannt und angenommen. Über sechs Bewegungswiederholungen zeigt sich sowohl bei den erfahrenen als auch bei den unerfahrenen eine erkennbare Lernkurve. Die Lkw-Fahrer nehmen die Ausstiegsstrategie ohne Ausnahme an. Bei der Einstiegsbewegung ist das Ergebnis nicht so eindeutig. Zwei Drittel der Probanden nehmen die angedachte Bewegung an, die Lernkurve fällt deutlich flacher aus.

Die Nutzerevaluation bestätigt die Erkenntnisse von Cherednichenko (2007), dass sich eine Optimierung des Bewegungsablaufs im Rahmen von bis zu sechs Wiederholungen einstellt. In dieser Arbeit zeigt sich dies durch die Annahme der vorgegebenen Bewegungsstrategie für die Ausstiegsbewegung für die Gruppe der erfahrenen Teilnehmer.

Als entscheidendes Element für die Annahme einer Bewegungsstrategie wird – neben der Gestaltung – der Übergang zwischen dem Aufstieg und dem Fahrerhaus angesehen. An diesem Übergang schaffen sich die Nutzer entweder den Raum für einen einfachen und schnellen Übergang auf oder von dem Fahrersitz, wenn sie mit dem linken Fuß auf der obersten Stufe stehen, oder sie verkleinern sich ihren Bewegungsraum oder benötigen mehr Schritte, wenn sie mit dem rechten Fuß auf der obersten Stufe beginnen. Beim Aussteigen erfolgt dieser Übergang unmittelbar und gibt den Fahrern eine zeitnahe Rückmeldung, während bei der Einstiegsbewegung der Übergang erst gegen Ende erfolgt. Dieser zeitliche Unterschied könnte sich auf die Lernschnelligkeit auswirken und die bessere Annahme der Ausstiegsstrategie erklären.

Die Bewegung des Ein- oder Aussteigens ist eine Tätigkeit, die einen mittelbaren Zweck verfolgt: Der Fahrer steigt ein, um loszufahren. Dadurch liegt der Aufmerksamkeitsfokus auf dem Ziel „losfahren“. Die fehlende Aufmerksamkeit könnte zu einem erhöhten Unfallrisiko beitragen. Aus dieser Überlegung heraus sollte die Zugangsgeometrie unbewusst ohne oder mit geringer selektiver Aufmerksamkeit nutzbar sein. Bei der geführten Zugangsgeometrie zeigt der Übungseffekt zwischen den Gruppen (Erfahren – Unerfahren), dass Vorwissen unbewusst angewendet wurde, um ein effektiveren und schnelleren Bewegungsablauf durchzuführen. Dies deckt sich mit der Definition von Intuition der Forschungsgruppe IUUI (Mohs et al., 2006a) und zeigt, dass das Konstrukt der Intuitivität und das Prinzip des Inneren Modells des Fahrers bei der Gestaltung der Zugangsgeometrie berücksichtigt werden sollten. Diese Aspekte unterstützen eine Gestaltung, die einen effektiven, schnellen und weniger fehleranfälligen Bewegungsablauf anleitet.

Allerdings bestätigt die Annahme der Bewegungsstrategie über sechs Wiederholungen durch die Lkw-Fahrer und teilweise durch die unerfahrenen Probanden die Aussage zu einem Inneren Modell für die Bewegungsausführung. Die Teilnehmer passen ihre Bewegung entsprechend der vorgegebenen Geometrie an und akzeptieren den Bewegungsablauf. Allerdings sollten die Ergebnisse mit einer größeren Stichprobe verifiziert werden. Es könnte sein, dass die jeweils 15 Personen pro Gruppe von sich eher zu der vorgegebenen Strategie zu tendieren.

Im Gegensatz zu der Seriengeometrie ist der Bewegungsablauf für den geführten Zugang anthropometrie-unabhängig. Allerdings gilt es in zukünftigen Studien nachzuweisen, dass die geführte Zugangsbewegung eine signifikante Reduzierung des Verletzungsrisikos während der Ein- und Ausstiegsbewegung beiträgt. Die Ergebnisse von Chateauroux et al. (2012) weisen auf eine symmetrische Verteilung der Handkräfte in Folge eines symmetrischen Zugangs hin. Dies ist auch für die geführte Geometrie zu erwarten.

Ein wichtiger Aspekt im Bereich menschlicher Bewegungen wurde im Rahmen dieser Arbeit vernachlässigt: die Biomechanik. Ein Bewegungsablauf kann auch entsprechend biomechanischer Faktoren optimiert werden, anstelle der Systeminteraktion anhand eines Inneren Modells. Dabei umfasst das Fachgebiet der Biomechanik auftretende Kräfte, Winkel, Winkelgeschwindigkeiten und Winkelbeschleunigungen in Gelenken, einzelnen Gelenkfreiheitsgraden und Muskeln des gesamten Körpers während der Bewegungsausführung. Beispielsweise kann über

die Messung externer Kräfte und der Bewegung mittels Inverser Dynamik auf die inneren Gelenk- und Muskelkräfte des Menschen geschlossen werden. Durch eine Änderung im Bewegungsablauf können die auftretenden, inneren Gelenk- und Muskelkräfte verändert und reduziert bzw. optimiert werden.

Das finale Konzept der geführten Zugangsgeometrie ähnelt der aktuellen Seriengeometrie bei Frontlenkerfahrzeugen: ein Zugang an der Kabinenseite vor dem Fahrersitz. In Zukunft könnte sich die Gestaltung des Lkw-Innenraums stark verändern – in Folge technischer Weiterentwicklungen wie automatisierte Fahren. Es ist denkbar, dass sich die Sitzposition des Fahrers verschiebt und der Innenraum auf die Ausführung von fahrfremde Tätigkeiten während der Fahrt angepasst wird. Diese tiefgreifenden Änderungen im Innenraum werden sich auch auf die Gestaltung und Ausführung der Zugangsgeometrie auswirken. Erste Ideen und Konzepte, wie der zukünftige Innenraum im Nutzfahrzeug aussehen könnte, liefern die Studienarbeiten von Laqua (2019) und Pitzl (2018). Im Rahmen der Neugestaltung des Innenraums muss auch der Zugang mitbetrachtet werden. Abschnitt 5.3 gibt einen ersten Einblick in neue Zugangskonzepte und ihre Bewertung durch heutige Berufskraftfahrer. In Erwartung einer veränderten Nutzerpopulation der Berufskraftfahrer (vgl. Abschnitt 6.1 und Lohre et al., 2014) müssen zukünftige Zugangskonzepte erneut evaluiert werden.

9 Fazit und Ausblick

Das Ein- und Aussteigen ist bei Nutzfahrzeugen gefährlicher als das Lenken der Fahrzeuge (DGUV, 2016). Die Gründe liegen unter anderem in der hektischen Arbeitssituation der Lkw-Fahrer, die sie zu einer Fehlnutzung der Stufen oder Haltegriffe verleitet (Fathallah & Cotnam, 2000) und in den Bewegungsstrategien der Fahrer, die das Risiko von Stürzen erhöht (Shorti, 2016). Durch eine Änderung der Längenvorschrift in EU-Richtlinien 2015/719 ergeben sich neue Gestaltungsmöglichkeiten für die Fahrerkabine mit den Forderungen nach einer verbesserten Aerodynamik, einer erhöhten Sicherheit und mehr Komfort für den Fahrer. Diese Gesetzesänderung gibt den Anstoß für die vorliegende Arbeit, in der untersucht wird, wie ein optimaler Bewegungsablauf in und aus einem Lkw aussieht und ob sich die Lkw-Fahrer von der Gestaltung der Zugangsgeometrie entsprechend dieses Bewegungsablaufs führen lassen.

Zusammenfassend zeigt sich, dass die Lkw-Fahrer einer grundlegenden Veränderung der Zugangsgeometrie positiv gegenüberstehen (vgl. Abschnitt 5.3.3 und Hebe et al., 2020). Zur Vergleichbarkeit mit der aktuellen Seriengeometrie wird ein Grobkonzept mit einem Zugang zwischen Lenkrad und Fahrersitz verwendet. Durch einen Einzug des Fahrerhausbodens um 300 mm und einer treppenartigen Anordnung der Trittstufen im Winkeln von 75° , steigt die Einsehbarkeit der nächsttieferen Stufe und erleichtert den Fahrern den Schritt auf die oberste Stufe beim Aussteigen. Vorgegebene Auftrittsbereiche geben den Fahrern eine starke Führung für ihren Bewegungsablauf mit. Damit wird eine effektivere und schnellere Ein- und Ausstiegsbewegung der Lkw-Fahrer erreicht.

Diese Arbeit fokussiert sich auf das Fußverhalten der Fahrer. Nachfolgende Arbeiten könnten prüfen, ob die Führung der Stufen durch die Anordnung eines Treppengeländers verstärkt wird. Um den Übergang vom Aufstieg in das Fahrerhaus hinein zu erleichtern, kann der Treppenaufgang eine Art Wendeltreppe beinhalten, die den Fahrer während dem Aufstieg leicht in Fahrzeuglängsrichtung führt. So könnte die bisherige 90° -Drehung zwischen Aufstieg und Fahrhaltung reduziert werden. Des Weiteren wird bei den Untersuchungen der Einfluss der Fahrertür ausgeklammert, die nachweislich die Ein- und Ausstiegsbewegung beeinflusst (Chateauroux et al., 2012). Auch hier können nachfolgende Untersuchungen ansetzen.

In der vorliegenden Arbeit wurde das Bewegungsverhalten auf Basis der Bewegungsdauer analysiert und verglichen. Alternativ scheint der Ansatz von Singh et al. (2014), die die Balance und den CoP als Indikatoren für die Auslegung von Zugangskonzepten vorschlagen, vielversprechend. Erste Versuche hierzu sind im Rahmen der Studienarbeit von Ludmann (2019) entstanden. Ludmann (2019) beschäftigt sich mit der Anwendung und Evaluation kinematischer Messkriterien zur Bewertung eines flüssigen Bewegungsablaufs. Dies empfiehlt sich in weiterführenden Studien detaillierter zu betrachten.

III Literaturverzeichnis

- Ait El Menceur, M. O., Pudlo, P., Debril, J.-F., Gorce, P., & Lepoutre, F.-X. (2009). An Automatic Method to Identify Human Alternative Movements: Application to the Ingress Movement. *Journal of Automation, Mobile Robotics and Intelligent Systems*, 3(3), S. 64-69.
- Ait El Menceur, M. O., Pudlo, P., Gorce, P., & Lepoutre, F.-X. (2009). An Automatic Procedure for Identifying Alternative Automobile Ingress Movements in Young and Elderly Populations with or without Protheses. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 39(6), S. 966-980. doi:10.1016/j.ergon.2009.08.010
- Ait El Menceur, M. O., Pudlo, P., Gorce, P., Thévenon, A., & Lepoutre, F.-X. (2008). Alternative Movement Identification in the Automobile Ingress and Egress for Young and Elderly Population with or without Prosteses. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 38(11), S. 1078-1087. doi:10.1016/j.ergon.2008.02.019
- Andreoni, G., Rabuffetti, M., & Pedotti, A. (1997). New approaches to car ergonomics evaluation oriented to virtual prototyping. *EURO-BME Course of Methods & Technologies for the Study of Human Activity & Behaviour*, (S. 19-20). Italien.
- Andreoni, G., Rabuffetti, M., & Pedotti, A. (2004). Kinematics of head-trunk movements while entering and exiting a car. *Ergonomics*, 47(3), S. 343-359.
- Appel, W., Brähler, H., Dahlhaus, U., Esch, T., Kopp, S., & Rhein, B. (2013). *Nutzfahrzeugtechnik - Grundlagen, Systeme, Komponenten* (7. Auflage Ausg.). Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Arlt, F. (1998). *Untersuchung zielgerichteter Bewegungen zur Simulation mit einem CAD-Menschmodell*. Deutschland: Technische Universität München.
- Authier, M., Gagnon, M., & Lortie, M. (1995). Handling Techniques: The Influence of Weight and Height for Experts and Novices. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 1(3), S. 262-275. doi:10.1080/10803548.1995.11076324
- Bach, N. (2010). *Mentale Modelle als Basis von Implementierungsstrategien*. Wiesbaden, Deutschland: Gabler Verlag Wiesbaden.
- Barnett, C. (2018). We rate the V8. *Commercial Motor*(Juli).
- Baylor, A. L. (1997). A three-component conception of intuition: immediacy, sensing relationships, and reason. *New Ideas in Psychology*, 15(2), S. 185-194.
- Baylor, A. L. (2001). A U-shaped model for the development of intuition by level of expertise. *New Ideas in Psychology*, 19(3), S. 237-244.
- Bengler, K. (24. 05 2019). Austausch menschliche Informationsverarbeitung. (J. Latka, Interviewer)
- BGV-D29. (01. Januar 1997). BG-Vorschrift. *Unfallverhütungsvorschrift Fahrzeuge*.
- Bibliographisches Institut GmbH. (2018). *Duden*. Abgerufen am 09. 05 2018 von <https://www.duden.de/rechtschreibung/Strategie>
- Bilger, B. (05. April 2004). *The Height Gap - Why Europeans are getting taller and taller and Americans aren't*. (T. NewYorker, Hrsg.) Abgerufen am 06. Mai 2016 von The New Yorker: <https://www.newyorker.com/magazine/2004/04/05/the-height-gap>

- Blackler, A., & Hurtienne, J. (2007). Towards a unified view of intuitive interaction: definitions, models and tools across the world. *MMI-interaktiv*, 13, S. 36-54.
- Blessing, L. T., & Chakrabarti, A. (2002). DRM: A Design Research Methodology. *Proceedings of Les Sciences de la Conception*. Lyon, Frankreich.
- Blessing, L. T., Chakrabarti, A., & Wallace, K. M. (1998). An Overview of Descriptive Studies in Relation to a General Design Research Methodology. In E. F. al., *Designers* (S. 42-56). London, UK: Springer-Verlag.
- Bockholt, U., Bochtler, T., Enderlein, V., Olbrich, M., Otto, M., Prieur, M., . . . Wirsching, H.-J. (2017). Motion Capturing. In W. Schreiber, K. Zürl, & P. Zimmermann (Hrsg.), *Web-basierte Anwendungen Virtueller Techniken - Das ARVIDA-Projekt - Dienste-basierte Software-Architektur und Anwendungsszenarien für die Industrie*. Berlin, Deutschland: Srpinger-Verlag. doi:10.1007/978-3-662-52956-0
- Bogner, A., Littig, B., & Menz, W. (2014). *Interviews mit Experten*. (R. Bohnsack, U. Flick, C. Lüders, & J. Reichertz, Hrsg.) Wiesbaden: Springer-Verlag.
- Borgdorf. (2015). *Das Begleitbuch zur Führerscheinausbildung* (3. Ausg.). München, Deutschland: Verlag Heinrich Vogel.
- Borgdorf, J. (2015). *Begleitbuch "Fahren lernen" - Zusatzwissen für die Klassen C, C1 und CE, C1E* (3. Auflage Ausg.). München: Verlag Heinrich Vogel.
- Bortz, J., & Döring, N. (2006). *Forschungsmethoden und Evaluation* (4. Ausg.). Heidelberg: Springer Medizin Verlag.
- Bothe, A. G. (2015). *Analyse dynamischer Sichtsituationen zur ergonomischen Auslegung von Kamera-Monitor-Systemen (KMS) in schweren Nutzfahrzeugen*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt.
- Brandenburg, S., & Sachse, K. (2012). Intuition comes with experience. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society of Europe Conference*, (S. 213-223).
- Brenner, M. G. (2013). *Alterspezifische Ergonomie im Fahrzeug*. Deutschland: Technische Universität München.
- Bubb, H., Bengler, K., Grünen, R. E., & Vollrath, M. (2015). *Automobilergonomie*. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Bundesministerium für Gesundheit. (20. 04 2018). *Ist mein Gewicht "normal"?* Abgerufen am 22. 07 2018 von <https://www.bundesgesundheitsministerium.de/themen/praevention/gesundheitsgefahren/essstoerungen/selbsttest.html>
- Cañas, J. J. (2009). The Future of Interaction Research: Interaction Is the Result of Top-Down and Bottom-Up Processes. *Future Interaction Design II* (S. 55-68). London: Springer.
- Causse, J., Chateauroux, E., Monnier, G., Wang, X., & Denninger, L. (2009). Dynamic analysis of car ingress/egress movement: an experimental protocol and preliminary results. *Digital Human Modeling for Design and Engineering Conference and Exhibition*. Warrendale, USA.
- Causse, J., Wang, X., & Denninger, L. (2011). Effects of Roof Height on car Ingress/Egress Movement. *Proceedings of the First International Symposium on Digital Human Modeling*.
- Chatearoux, E., Wang, X., & Tasbot, J. (2007). A Database of Ingress/Egress Motions of elderly People. *Digital Human Modeling Conference*. Seattle, USA.

- Chateauroux, E., Wang, X., & Roybin, C. (2012). Analysis of truck cabin egress motion. *International Journal Human Factors Modelling and Simulation*, 3(2), S. 169-186.
- Cherednichenko, A. (2007). *Funktionales Modell der Einstiegsbewegung in einen PKW*. München, Deutschland: Technische Universität München.
- Cherednichenko, A., Assmann, E., & Bubb, H. (2006). Computational Approach for Entry Simulation. *Digital Human Modeling for Design and Engineering Conference*. Lyon, Frankreich: SAE Technical Paper 2006-01-2358.
- Choi, N.-C., & Lee, S. H. (2015). Discomfort Evaluation of Truck Ingress/Egress Motions Based on Biomechanical Analysis. *Sensors*, 15, S. 13568-13590.
- Christensen-Szalanski, J. J., & Willhan, C. F. (1991). The hindsight bias: A meta-analysis. *Organisational Behavior and Human Decision Processes*, 48(1), S. 147-168.
- Cohen, J. (1992). Statistical Power Analysis. *Current Direction in Psychological Science*, 1(3), S. 98-101.
- DAF. (2017). *Fahrerhäuser Baureihe XF*. Datenblatt. Abgerufen am 30. 10 2018
- Daimler AG. (2014). *Der Actros. Fernverkehr. 18-26 Tonnen. Schwerlasttransport. Bis 250 Tonnen*. Datenblatt, Stuttgart. Abgerufen am 30. 10 2018
- Damsgaard, M., Rasmussen, J., Christensen, S. T., Surma, E., & de Zee, M. (2006). Analysis of musculoskeletal systems in the AnyBody Modeling System. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 14(8), S. 1100-1111.
- DGUV. (22. 09 2016). Unfallzahlen zum Ein- und Ausstieg bei Nutzfahrzeugen. München, Deutschland.
- Diefenbach, S., & Ullrich, D. (2015). An Experience Perspective on Intuitive Interaction: Central Components and the Special Effect of Domain Transfer Distance. *Interacting with Computers*, 27(3), S. 210-234.
- Drury, C. G., Law, C.-H., & Pawenski, C. S. (1982). A Survey of Industrial Box Handling. *Human Factors*, 24(5), S. 553-565.
- Dufour, F., & Wang, X. (2005). Discomfort Assessment of Car Ingress/Egress Motions using the Concept of Neutral Movement. *Digital Human Modeling for Design and Engineering Symposium*. Iowa City, USA: SAE Technical Paper 2005-01-2706.
- Ellinghaus, D., & Steinbrecher, J. (2002). *Lkw im Straßenverkehr - Eine Untersuchung über die Beziehungen zwischen Lkw- und Pkw-Fahrern*. UNIROYAL - Verkehrsuntersuchung Nr. 27, Köln Hannover.
- Evers, C. (2009). *Auswirkungen von Belastungen und Stress auf das Verkehrsverhalten von Lkw-Fahrern*. Bergisch Gladbach: Bundesanstalt für Straßenwesen.
- Fathallah, F. A., & Cotnam, J. P. (2000). Maximum forces sustained during various methods of exiting commercial tractors, trailers and trucks. *Applied Ergonomics*, 31(1), S. 25-33.
- Feldmeier, D. (14. Mai 2018). Fernverkehrskabinen der sieben europäischen Nutzfahrzeughersteller. (J. Hebe, Interviewer)
- Field, A. (2013). *Discovering Statistics using IBM SPSS Statistics* (4. Ausg.). Thousand Oaks, USA: SAGE Publications.
- Fröhmel, C. (2010). *Validierung des RAMSIS-Krafthaltungsmodells*. Dissertation, Technische Universität München.

- Geschka, H., & Hammer, R. (1990). Die Szenario-Technik in der strategischen Unternehmensplanung. In D. Hahn, & B. Taylor (Hrsg.), *Strategische Unternehmensplanung - Strategische Unternehmensführung - Stand und Entwicklungstendenzen*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. doi:10.1007/978-3-662-41484-2
- Giguère, D., & Marchand, D. (2005). Perceived safety and biomechanical stress to the lower limbs when stepping down from fire fighting vehicles. *Applied Ergonomics*, 36(1), S. 107-119.
- Graumann, C. F. (1966). Grundzüge der Verhaltensbeobachtung. In E. Meyer (Hrsg.), *Fernsehen in der Lehrerbildung* (S. 86-107). München: Manz.
- Guan, J., Hsiao, H., Bradtmiller, B., Kau, T.-Y., Reed, M. R., Jahns, S. K., . . . Piamonte, D. P. (2012). U.S. Truck Driver Anthropometric Study and Multivariate Anthropometric Models for Cab Designs. *Human Factors*, 54(5), S. 849-871.
- Häder, M. (2015). *Empirische Sozialforschung* (3. Ausg.). Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Hägler, M. (01. Juni 2017). *Autonome Lkws sind zu schnell für den Menschen*. Abgerufen am 11.12.2017 von Süddeutsche.de: <http://www.sueddeutsche.de/auto/verkehr-autonome-lkws-sind-zu-schnell-fuer-den-menschen-1.3530699>
- Hahn, D., & Taylor, B. (Hrsg.). (1990). *Strategische Unternehmensplanung - Strategische Unternehmensführung*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. doi:10.1007/978-3-662-41484-2
- Hanson, L., Yong, L., & Falkmer, T. (2007). Human Age and Vehicle Speeds Affect on Vehicle Ingress Motion Pattern. In V. Duffy, *Digital Human Modeling* (S. 843-846). Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Hase, K., & Stein, R. B. (1999). Turning Strategies during Human Walking. *Journal of Neurophysiology*, 81(6), S. 2914-2922.
- Hebe, J., & Bengler, K. (2019). How do people move to get into and out of a European CoE Truck? *Proceedings of the 20th Congress of the International Ergonomics Assisiation (IEA, 2018). VI: Transport Ergonomics and Human Factors, Aerospace Human Factors and Ergonomics*, S. 142-151. Florenz, Italien: Springer.
- Hebe, J., Hüger, A., & Bengler, K. (2019). Survey of Long Haul Truck Drivers: What would your ideal Ingress Concept look like? *International Conference on Human Systems Integration*, (S. Paper akzeptiert). Biarritz, Frankreich.
- Hermann, C. (2004). *Arbeitsbedingungen im Straßengütertransport*. Verkehr und Infrastruktur. Wien: Kammer für Arbeiter und Angestellte.
- Hilgers, M. (2016). *Fahrerhaus*. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Hilgers, M. (2016). *Gesamtfahrzeug*. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Hjelm, L., & Bergqvist, B. (2009). European Truck Aerodynamics - A Comparison Between Conventional and CoE Truck Aerodynamics and a Look into Future Trends and Possibilites. In F. Browand, R. McCallen, & J. Ross (Hrsg.), *The Aerodynamics of Heavy Vehicles II: Trucks, Buses, and Trains. Lecture Notes in Applies and Computational Mechanics, vol. 41* (S. 469-477). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Human Solutions GmbH. (XX. XX 2010). *SizeGERMANY - Abschlussbericht zur repräsentativen, neuen Deutschen Reihemessung*. Kaiserslautern Bönningheim: Hohenstein Institute.

- HUMAN SOLUTIONS GmbH. (2014). RAMSIS in CATIA V5. *Handbuch Version 3.8*. Deutschland.
- IEA. (2019). *Definition and Domains of Ergonomics*. Abgerufen am 15. 07 2019 von International Ergonomics Association: <https://www.iea.cc/whats/>
- Kaiser, R. (2011). Anthropometrie - Neue Erkenntnisse und Anwendungsbeispiele. *RAMSIS User Konferenz*. Kaiserslautern.
- Kapandji, I. A. (1994). Physiologie articulaire, tronc et rachis. *Maloine*.
- Karg, C. (201). *Konstruktion eines pedallosen Fahrkonzepts*. Semesterarbeit, Technische Universität München.
- Kawachi, K., Aoki, K., Mochimaru, M., & Kouchi, M. (2005). Visualization and Classification of Strategy for Entering Car. *Digital Human Modeling for Design and Engineering Symposium*. Iowa City, USA.
- Kawachi, K., Aoki, K., Mochimaru, M., & Kouchi, M. (2007). Motion Distribution Map of Ingress to Driver's Seats. *Digital Human Modeling Conference*. Seattle, USA.
- Kee, D., & Karwowski, W. (2003). Ranking systems for evaluation of joint and joint motion stressfulness based on perceived discomforts. *Applied Ergonomics*, 34(2), S. 167-176.
- Kern, M. (August 2018). Vergleichstest: Sattelzugmaschinen für den Volumentransport - in die Tiefe gegangen. *Fernfahrer*.
- Kisch, J. (2017). *Inertiale Bewegungserfassung mit CAPTIV Motion und Identifizierung möglicher Störfaktoren bei verschiedenen Anwendungsfällen mit einem Lastkraftwagen*. Masterarbeit, Technische Universität München.
- Kitagawa, M., & Windsor, B. (2008). *MoCap: Workflow and Techniques for Motion Capture*. Burlington: Focal Press.
- König, C. (2012). *Analyse und Anwendung eines menschenzentrierten Gestaltungsprozesses zur Entwicklung von Human-Machine-Interfaces im Arbeitskontext am Beispiel Flugsicherheit*. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt.
- Konrad, P. (2001). *EMG-Fibel - eine praxisorientierte Einführung in die kinesiologische Elektromyographie*. Abgerufen am 21. 02 2018 von velamed: <http://www.velamed.com/downloads>
- Kugler, P., Schlarb, H., Blinn, J., Picard, A., & Eskofier, B. (2012). A Wireless Trigger for Synchronization of Wearable Sensors to External Systems during Recording of Human Gait. *34th Annual International Conference of the IEEE EMBS*, (S. 4537-4540). San Diego, California USA. doi:10.1109/EMBC.2012.6346976
- Laatz, W. (1993). *Empirische Methoden - Ein Lehrbuch für Sozialwissenschaftler*. Thun und Frankfurt am Main: Harri Deutsch.
- Latif, N., & Christianson, L. L. (1988). Cab Accessibility: How Important Is It? *Transactions of the ASAE*, 31(1), S. 5-8. doi:0001-2351/88/3101-5
- Lehmbach, J. (2006). *Vorgehensmodelle im Spannungsfeld traditioneller, agiler und Open-Source-Softwareentwicklung*. Marburg, Deutschland: Philipps-Universität zu Marburg.
- Lestrelin, D., & Trasbot, J. (2005). The REAL MAN Project: Objectives, Results and Possible Follow-up. *Digital Human Modeling for Design and Engineering Symposium*. Iowa City, USA: SAE Technical Paper 2005-01-2682.

- Lin, L.-J., & Cohen, H. H. (1997). Accidents in the trucking industry. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 20(4), S. 287-300.
- Lindemann, U. (2009). *Methodische Entwicklung technischer Produkte - Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden* (3. Ausg.). Dordrecht Heidelberg London New York: Springer-Verlag.
- Littig, B. (2008). Interviews mit Eliten - Interviews mit ExpertInnen: Gibt es Unterschiede? *Forum: Qualitative Sozialforschung / Forum: Qualitative Social Research*, 9(3), S. 1-17. doi:ISSN 1438-5627
- Lohre, D., Bernecker, T., Stock, W., & Düsseldorf, K. (2014). *ZF-Zukunftsstudie Fernfahrer 2.0 - Der Mensch im Transport- und Logistikmarkt*.
- Lu, J.-M., Tada, M., Endo, Y., & Mochimaru, M. (2016). Ingress and egress motion strategies of elderly and young passengers for the rear seat of minivans with sliding doors. *Applied Ergonomics*, 53, S. 228-240.
- Maurer, M., Gerdes, J. C., Lenz, B., & Winner, H. (Hrsg.). (2016). *Autonomous Driving - Technical, Legal and Social Aspects*. Berlin Heidelberg: Springer.
- Mey, G., & Mruck, K. (2010). Interviews. In G. Mey, & K. Mruck, *Handbuch Qualitative Forschung in der Psychologie* (S. 423-435). Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- Michaelis, M. (2015). Berufskraftfahrer-Gesundheit -- Ist Prävention möglich? In B. Badura, A. Ducki, H. Schröder, J. Klose, & M. Meyer, *Fehlzeiten-Report 2015* (S. 601). Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Michel, B. (2014). *Ergonomische Analyse der Fahrerumgebung im Fernverkehrs-Lkw*. Dissertation, Technische Universität München, München.
- Mietzner, D. (2009). *Strategische Vorausschau und Szenarioanalysen - Methodenevaluation und neue Ansätze*. (G. Reger, & D. Wagner, Hrsg.) Wiesbaden: Gabler.
- Mohs, C., Hurtienne, J., Israel, J. H., Naumann, A., Kindsmüller, M. C., Meyer, H., & Pohlmann, A. (2006b). IUUI - Intuitive Use of User Interfaces. In T. Bosenick, M. Hassenzahl, M. Müller-Prove, & M. Peissner, *Usability Professionals* (S. 130-133).
- Mohs, C., Hurtienne, J., Kindsmüller, M. C., Israel, J. H., Meyer, H. A., & IUUI Research Group. (2006a). IUUI - Intuitive Use of User Interfaces: Auf dem Weg zu einer wissenschaftlichen Basis für das Schlagwort "Intuitivität". *MMI-Interaktiv*, 11, S. 75-84.
- MTB. (2015). *MAN TGX im Fernverkehr*. Abgerufen am 30. 10 2018 von MAN Truck & Bus AG: <http://man.etpl.ch/truck/global/de/fernverkehr/tgx/fahrerhaus/fahrerhaus-xxl/Fahrerhaus-XXL.html>
- Mühlstedt, J., Kaußler, H., & Spanner-Ulmer, B. (2008). Programme in Menschengestalt: Digitale Menschmodelle für CAx- und PLM-Systeme. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, S. 79-86.
- Nagel, K. (2001). Gruppenspezifische Anthropometrie in der ergonomischen Gestaltung. In H. Greil, & C. Scheffler, *Mensch - Technik - Umwelt* (S. 54-61). Potsdam: Zentrum für Umweltwissenschaften der Universität Potsdam.
- Naumann, A., Hurtienne, J., Israel, J. H., Mohs, C., Kindsmüller, M. C., Meyer, H. A., . . . IUUI Research Group. (2007). Intuitive Use of User Interfaces: Defining a Vague Concept. *International Conference on Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics* (S. 128-136). Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.

- Nielsen, J. (1994). Enhancing the Explanatory Power of Usability Heuristics. *Proceedings of the SIGCHI conference on Human Factors in Computing Systems* (S. 152-158). Boston, Massachusetts: ACM.
- Norman, D. (2013). *The Design of Everyday Things* (Revised and expanded edition Ausg.). New York, USA: Basic Books.
- Norman, D. (2014). Some Observations on Mental Models. In D. Gentner, & A. L. Stevens, *Mental Models* (S. 7-14). New York: Psychology Press.
- Norman, D. A. (2002). *The design of everyday things*. New York: Basic Books.
- Olson, R., Verley, J., Santos, L., & Salas, C. (2004). What We Teach Students About the Hawthorne Studies: A Review of Content Within a Sample of Introductory I-O and OB Textbooks. *The Industrial-Organizational Psychologist*, 41(3), S. 23-39.
- Park, W., Martin, B. J., Choe, S., Chaffin, D. B., & Reed, M. P. (2005). Representing and identifying alternative movement techniques for goal-directed manual tasks. *Journal of Biomechanics*, 38(3), S. 519-527. doi:10.1016/j.jbiomech.2004.04.014
- Patenaude, S., Marchand, D., Samperi, S., & Bélanger, M. (2001). The effect of the descent technique and truck cabin layout on the landing impact forces. *Applied Ergonomics*, 32(6), S. 573-582. doi:0003-6870/01
- Patterson, P., Congleton, J., Koppa, R., & Huchingson, R. D. (1987). The effects of load knowledge on stresses at the lower back during lifting. *Ergonomics*, 30(3), S. 539-549.
- Prochel, A. (2009). *Erstellung eines komplexen Muskel-Skelett-Modells zur Berechnung der Druckbelastung in Gelenken bei vorwärtsdynamisch simulierten Bewegungsformen*. Deutschland: Eberhard-Karls-Universität Tübing.
- Pudlo, P., Lempereur, M., Lepoutre, F.-X., & Gorce, P. (2006). *Prediction of the Car Entering Motion*. SAE Technical Paper.
- Rasmussen, J., Damsgaard, M., & Voigt, M. (2001). Muscle recruitment by the min/max criterion - a comparative numerical study. *Journal of Biomechanics*, 34(3), S. 409-415.
- Reed, M. P., & Huang, S. (2008). Modeling Vehicle Ingress and Egress Using the Human Motion Simulation Framework. *SAE International conference and exposition of Digital Human Modelling for Design and Engineering*. Pittsburgh, USA.
- Reed, M. P., Ebert, S. M., & Hoffman, S. G. (2010a). Modeling Foot Trajectories for Heavy Truck Ingress Simulation. In V. Duffy, *Advances in Applied Digital Human Modeling* (S. 19-27). doi:ISBN-13:978-1-4398-3512-8
- Reed, M. P., Ebert-Hamilton, S. M., & Hoffman, S. G. (2010b). Hand Positions and Forces During Truck Ingress. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society*, 54, S. 1097-1100. doi:10.1518/107118110X12829369833600
- Reed, M. P., Hoffman, S. G., & Ebert-Hamilton, S. M. (2011). The Influence of Heavy Truck Egress Tactics on Ground Reaction Force. *Research and Practice for Fall Injury Control in the Workplace: Proceedings of International Conference on Fall Prevention and Protection, 1003*, S. 193-195.
- Renault Trucks. (2016). *Fernverkehr Baureihe T*. Datenblatt. Abgerufen am 31. 10 2018
- Richard, H. A., & Kullmer, G. (2013). *Biomechanik - Grundlagen und Anwendungen auf den menschlichen Bewegungsapparat*. Wiesbaden: Springer Vieweg.

- Rigel, S. (2005). *Entwicklung und Validierung einer Methode zur quantitativen Untersuchung der Ein- und Ausstiegsbewegung in einen Pkw*. Dissertation, Technische Universität München.
- Rohrmüller, H. (13. 06 2018). Einflussfaktoren und ihre Auswirkungen auf die Gestaltung der Zugangsgeometrie. (J. Hebe, Interviewer)
- Sabbah, A. O. (2010). *Entwicklung eines dynamischen Diskomfortmodells am Beispiel des Ein- und Ausstiegs*. Dissertation, Technische Universität München.
- Sabbah, O., Bubb, H., & Bengler, K. (2010). Übersicht zur Modellierung menschlicher Bewegungen am Beispiel des Ein- und Ausstiegs bei Automobilen. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, 64.
- Sabisch, H., & Tintelnot, C. (1997). *Integriertes Benchmarking für PProdukte und Produktentwicklungsprozesse*. (H. Birkhofer, H. Geschka, & F. Kramer, Hrsg.) Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Saginus, K., Marklin, R., Seeley, P., & Stone, A. (2014). Ingress and Egress to Utility Trucks - Design of Steps and Stairs. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society*, 58, S. 1638-1642.
- Sawade, F. (25. Januar 2017). Experten-Workshop zur Störgeometrien bei Ein- und Aussteigen bei Nutzfahrzeugen. (J. Hebe, Interviewer)
- Schlick, C., Luczak, H., & Bruder, R. (2010). *Arbeitswissenschaft*. Heidelberg Dordrecht London New York: Springer-Verlag.
- Schmid-Marchfelder, A. (30. 07 2018). Einflussfaktoren und ihre Auswirkungen auf die Gestaltung der Zugangsgeometrie. (J. Hebe, Interviewer)
- Schneider, W. (2010). *Früherkennung und Intuition*. Berlin, Deutschland: Technische Universität Berlin.
- Schönherr, R. (2013). *Simulationsbasierte Absicherung der Ergonomie mit Hilfe digital beschriebener menschlicher Bewegungen*. Dissertation, Technische Universität Chemnitz.
- Schünke, M., Schulte, E., & Schumacher, U. (2011). *Prometheus - LernAtlas der Anatomie* (3. Ausg.). Stuttgart New York: Georg Thieme Verlag.
- Seidl, A., Trieb, R., & Wirsching, H.-J. (2009). SizeGERMANY - the new German Anthropometric Survey Conceptual Design, Implementation and Results. *Proceedings of 17th World Congress on Ergonomics*.
- Shorti, R. M. (2016). *Step negotiation biomechanics during truck cab egress and the effects of anthropometrics and cab design on driver fall biomechanics etiology*. Dissertation, University of Utah.
- Singh, S., Singh, J., & Kalra, P. (2014). Ergonomic evaluation of Ingress/Egress of vehicle using balance assessment approach. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 5(6), S. 17-20.
- Spielholz, P., Cullen, J., Smith, C., Howard, N., Silverstein, B., & Bonauto, D. (2008). Assessment of perceived injury risks and priorities among truck drivers and trucking companies in Washington State. *Journal of Safety Research*, 39(6), S. 569-576.
- Stenlund, B., Lindbeck, L., & Karlsson, D. (2002). Significance of house painters' work techniques on shoulder muscle strain during overhead work. *Ergonomics*, 45(6), S. 455-468. doi:10.1080 /0014013021013695 4

- Tretter, S., Ullrich, D., & Diefenbach, S. (2015). Die Intuitivitäts-Illusion: Intuitives Nutzererleben durch Attributionsfehler. In S. Diefenbach, N. Henze, & M. Pielot (Hrsg.), *Mensch und Computer* (S. 283-386). Stuttgart: Oldenbourg Wissenschaftsverlag.
- van der Meulen, P., & Seidl, A. (2007). Ramsis - The Leading Cad Tool for Ergonomic Analysis of Vehicles. In V.G. Duffy (Hrsg.), *Digital Human Modeling* (S. 1008-1017). Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Volvo Group trucks Central Europa GmbH. (2016). *Geschichte*. Abgerufen am 11.12.2017 von Volvo Trucks Deutschland: <http://www.volvotrucks.de/de-de/about/geschichte.html>
- Volvo Trucks. (2018). *Fahrerhausspezifikationen für den Volvo FH*. Abgerufen am 07. 11 2018 von Volvo Trucks Deutschland: <https://www.volvotrucks.de/de-de/trucks/volvo-fh/specifications/cab.html>
- von Beetzen, H. (2015). *Ergonomic Evaluation using Motion Capture Technology: Testing Truck Ingress using Microsoft Kinect*. Masterarbeit, Luleå University of Technology.
- von Reibnitz, U. (1992). *Szenario-Technik: Instrumente für die unternehmerische und persönliche Erfolgsplanung* (2. Ausg.). Wiesbaden: Springer.
- Wagner, D. W., Reed, M. P., & Chaffin, D. B. (2005). Predicting Foot Positions for Manual Materials Handling Tasks. *Digital Human Modeling for Design and Engineering Symposium*. Lyon, Frankreich.
- Wakula, J., Berg, K., Schaub, K., & Bruder R. (2009). *Der montagespezifische Kraftatlas BGIA-Report, Bd. 3/2009*. Stankt Augustin, Hannover: BGIA; Technische Informationsbibliothek und Universitätsbibliothek.
- Wirsching, H.-J., Stechow, R., & Enderlein, V. (2016). Optimierung dynamischer Bedienvorgänge im Lkw durch Menschmodelle. *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, 118(3), 38-43.
- Yu, B., Holly-Crichlow, N., Brichta, P., Reeves, G. R., Zablotny, C. M., & Nawoczenski, D. A. (2000). The effects of the lower extremity joint motions on the total body motion in sit-to-stand movement. *Clinical Biomechanics*, 15(6), S. 449-455.
- Zeuch, A. (2008). Intuition, Improvisation und Datensurfen. In A. Ferstl, M. Scholz, & C. Thiesen, *Menschen stärken für globale Verantwortung* (S. 55-63). Zielverlag.
- Zhang, L., Helander, M. G., & Drury, C. G. (1996). Identifying Factors of Comfort and Discomfort in Sitting. *Human Factors*, 38(3), S. 377-389.
- Zhang, X., Nussbaum, M. A., & Chaffin, D. B. (2000). Back lift versus leg lift: an index and visualization of dynamic liftung strategies. *Journal of Biomechanics*, 33(6), S. 777-782.
- Zwahlen, H. T., Kim, D. S., & Gerth, R. J. (1995). An evaluation of mounting step dimensions and handhold/handrail dimensions on semi-trucks, agricultural and industrial vehicles. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society*, 39, S. 1028-1032.

IV Verzeichnis aller betreuter Studienarbeiten

- Bergknapp, J. (2019). Konzeptionierung eines Prüfstands zur Bewertung von Innenraumkonzepten beim hochautomatisierten Fahren. (Bachelorarbeit). Private Fachhochschule Nordhessen.
- Gröbner, F. (2017). Identifizierung und Bewertung von Einstiegsstrategien bei zweistufigen Nutzfahrzeugen. (Bachelorarbeit). Technische Universität München
- Hänisch, R. (2019). Entwicklung eines optimalen Ein- und Ausstiegs in das Fahrerhaus eines Lkw im Hinblick auf die Gebrauchstauglichkeit und Akzeptanz durch die Nutzer. (Masterarbeit). Technische Universität München.
- Hüger, A. (2017). Evaluation des Lkw-Einstiegs und Bewertung neuer Einstiegskonzepte anhand einer Nutzerbefragung. (Semesterarbeit). Technische Universität München.
- Kisch, J. (2017). Inertiale Bewegungserfassung mit CAPTIV Motion und Identifizierung möglicher Störfaktoren bei verschiedenen Anwendungsfällen mit einem Lastkraftwagen. (Masterarbeit). Technische Universität München.
- Laqua, A. (2019). Entwicklung eines modularen Lkw-Mock-Ups für hochautomatisiertes Fahren zur Untersuchung neuartiger Innenraumkonzepte. (Masterarbeit). Technische Universität München.
- Lechner, M. (2018). Analyse der Gelenkwinkel bei der Einstiegsbewegung beim Lkw-Einstiegsmodul LEAVA im Hinblick auf ergonomische Richtlinien. (Bachelorarbeit). Technische Universität München
- Ludmann, S. (2019). Bewertung eines Bewegungsablaufs auf Basis kinematischer Größen am Beispiel Lkw Einstieg. (Semesterarbeit). Technische Universität München.
- Maududi, A. (2017). Konzeptionierung, Auslegung und Konstruktion eines variablen Einstiegsmodells für LKWs zur ergonomischen Optimierung des Einstiegs. (Semesterarbeit). Technische Universität München.
- Munid, M. (2018). *Konzeptionierung eines Augpunkt-fix-Auslegungskonzeptes für den Lkw.* (Masterarbeit). Technische Universität München.
- Najgeboren, T. (2017). *Identifizierung von Ein- und Ausstiegsstrategien bei Nutzfahrzeugen.* (Masterarbeit). Technische Universität München.
- Neuhaus, P. (2017). Bewertung der Einstiegsbewegung von Nutzfahrzeugen anhand einer Gelenkwinkelanalyse. (Bachelorarbeit). Technische Universität München.
- Orabi, S. (2018). Simulation einer Lkw-Einstiegsbewegung anhand von relativen Gelenkwinkel aufgenommen mit dem Motion Tracking System CAPTIV ohne Absolutbezug. (Semesterarbeit). Technische Universität München.
- Pitzl, T. (2018). *Entwicklung und Bewertung von Lkw-Innenraumkonzepten im VR.* (Masterarbeit). Technische Universität München.
- Schweiger, C. (2017). Bewertung des Gelenkausnutzungsgrades bei der Ein- und Ausstiegsbewegung bei Nutzfahrzeugen. (Semesterarbeit). Technische Universität München

IV Verzeichnis aller betreuter Studienarbeiten

Schweiger, C. (2018). Vergleich und Analyse von Lkw-Einstiegsgeometrien anhand der Fahrerbewegung. (Masterarbeit). Technische Universität München.

Zipse, E. (2018). Entwicklung neuer Fahrerhauskonzepte aufbauend auf dem optimalen Einstieg. (Semesterarbeit). Technische Universität München.

V Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Stichprobenstatistik von meldepflichtigen Arbeitsunfällen der Berufsgruppe Kraftfahrer in den Berichtsjahren 2010-2014 (Werte gerundet) (DGUV, 2016)	12
Abbildung 2-1: Längenbeschränkung im Nutzfahrzeugbereich für die USA und Europa mit den daraus abgeleiteten Fahrerhauskabinen (Haubenfahrzeug links und Frontlenkerfahrzeug rechts) nach Hjelm & Bergqvist, 2009, S. 470	21
Abbildung 2-2: Skizze der Zugangsgeometrie bei Nutzfahrzeugen in der Seitenansicht (eigene Darstellung)	22
Abbildung 2-3: Maßkette der Einstiegsgeometrie in Fahrzeughochrichtung in blau nach Rohrmüller (2018)	23
Abbildung 2-4: Maßkette der Einstiegsgeometrie in Fahrzeuglängsrichtung in blau (eigene Darstellung)	24
Abbildung 2-5: Maßkette der Einstiegsgeometrie in Fahrzeugquerrichtung in blau (eigene Darstellung)	25
Abbildung 4-1: Aufbau der Design Research Methodology nach Blessing und Chakrabarti (2002, S. 3)	43
Abbildung 4-2: Einteilung dieser Arbeit zur Erreichung einer optimalen Zugangsgeometrie für den Lkw-Ein- und Ausstieg	44
Abbildung 5-1: Zugangskonzepte für die Nutzerbefragung nach Hüger (2017)	50
Abbildung 5-2: Ergebnisse aus dem ersten Teil der Nutzerbefragung – Teil 1 nach Hüger (2017)	51
Abbildung 5-3: Ergebnisse aus dem ersten Teil der Nutzerbefragung – Teil 2 nach Hüger (2017)	52
Abbildung 5-4: Verteilung der Ränge der Zugangskonzepte (*signifikant $p \leq 0.05$, **sehr signifikant $p \leq 0.01$, *** hoch signifikant $p < 0.00$)	53
Abbildung 5-5: flach integrierte Blinkerwarze im Kotflügel (li) und hervorstehende Blinkerwarze (re) in Gelb eingekreist	57
Abbildung 5-6: Stufen mit großen Zwischenräumen und gezackten Kanten (links), Stufen mit glatt ausgestülpten Lochöffnungen auf der Schnee und Matsch liegen bleibt (rechts)	59
Abbildung 5-7: unterste Trittstufe bei Baustellenfahrzeugen (Sawade, 2017)	59
Abbildung 5-8: Stufenausrichtung in der Draufsicht ist zur Tür gewandt und damit vom Fahrer abgewandt	60
Abbildung 5-9: zusätzlicher Einstiegsgriff beim Baustellenfahrzeug	60
Abbildung 5-10: Ein zur Mitte der Türöffnung hin gebogener Haltegriff an der A-Säule (hier der Beifahrerseite des Tatra Phoenix) erleichtert das Einsteigen bei halbgeöffneter Tür	61

Abbildung 5-11: Bewegungsphasen für den dreistufigen Einstieg nach Hebe und Bengler (2019).....	65
Abbildung 5-12: Bewegungsphasen für den dreistufigen Ausstieg nach Hebe und Bengler (2019).....	66
Abbildung 5-13: Kodierung der Schlüsselpunkte zur Geometrie	66
Abbildung 5-14: Bewegungskodes beim dreistufigen Einstieg anhand der Bewegungskodes für die linke Hand (links oben), die rechte Hand (rechts oben), den linken Fuß (links unten) und den rechten Fuß (rechts unten).....	67
Abbildung 5-15: Bewegungskodes beim dreistufigen Ausstieg anhand der Bewegungskodes für die linke Hand (links oben), die rechte Hand (rechts oben), den linken Fuß (links unten) und den rechten Fuß (rechts unten).....	69
Abbildung 5-16: Bewegungskodes beim zweistufigen Einstieg anhand der Bewegungskodes für die linke Hand (links oben), die rechte Hand (rechts oben), den linken Fuß (links unten) und den rechten Fuß (rechts unten).....	70
Abbildung 5-17: Bewegungskodes beim zweistufigen Ausstieg anhand der Bewegungskodes für die linke Hand (links oben), die rechte Hand (rechts oben), den linken Fuß (links unten) und den rechten Fuß (rechts unten).....	71
Abbildung 5-18: Dendrogramm für den Lkw-Einstieg.....	73
Abbildung 5-19: Dendrogramm für den Lkw-Ausstieg.....	75
Abbildung 5-20: Bewegungsdauer für den zwei- und dreistufigen Ein- und Ausstieg	81
Abbildung 6-1: Szenario-Trichter: entlang der Zeitachse wächst die Variantenvielfalt zukünftiger Entwicklungen (Geschka & Hammer, 1990, S. 315).....	88
Abbildung 6-2: Einstiegsmodul LEAVA	93
Abbildung 6-3: Maße [mm] der Realfahrzeuggeometrie am Einstiegsmodul LEAVA nach Schweiger (2018, S. 50).....	94
Abbildung 6-4: Maße [mm] am Einstiegsmodul LEAVA aufbauend auf der Realfahrzeuggeometrie mit unbegrenzter Stufenbreite nach Schweiger (2018, S. 50)	95
Abbildung 6-5: Maße [mm] am Einstiegsmodul LEAVA für den Dominanzpaarvergleich nach Schweiger (2018, S. 51)	96
Abbildung 6-6: Maßkonzept der Zugangsgeometrie im Vergleich zwischen Seriengeometrie und favorisierter Konfiguration.....	97
Abbildung 6-7: Die linke Begrenzung der Auftrittflächen beim Stufenauszug von 75°, aufgeteilt nach dem linken und rechten Fuß und der Ein- und Ausstiegsbewegung	98
Abbildung 6-8: Zugangsgeometrie der zwei präskriptiven Studie.....	100
Abbildung 6-9: Übergang vom Aufstieg in die Kabine, wenn der Fahrer mit dem linken (in Blau links) / rechten (in Grün rechts) auf der untersten Stufe beginnt	105
Abbildung 7-1: angestrebtes Einstiegsverhalten in einen dreistufigen Lkw hinein.....	114
Abbildung 7-2: angestrebtes Ausstiegsverhalten aus einen dreistufigen Lkw heraus	115
Abbildung 7-3: Darstellung der geführte Zugangsgeometrie.....	116

Abbildung 7-4: beobachtete Fußstrategien beim Einstieg der unerfahrenen Teilnehmer.....	119
Abbildung 7-5: beobachtete Fußstrategien beim Einstieg der erfahrenen Teilnehmer.....	119
Abbildung 7-6: beobachtete Fußstrategien beim Ausstieg der unerfahrenen Teilnehmer.....	120
Abbildung 7-7: beobachtete Fußstrategien mit Bewegungsart zur obersten Stufe beim Ausstieg der unerfahrenen Teilnehmer	120
Abbildung 7-8: beobachtete Fußstrategie beim Ausstieg der erfahrenen Teilnehmer.....	121
Abbildung 7-9: beobachtete Fußstrategien und Bewegungsart beim Ausstieg der erfahrenen Teilnehmer.....	121

VI Diagrammverzeichnis

Diagramm 7-1: Anteil der Personen, die die Einstiegsbewegung mit dem linken Fuß beginnen	122
Diagramm 7-2: Anteil der Personen, die die Ausstiegsbewegung mit dem linken Fuß beginnen	122
Diagramm 7-3: Aufteilung der Probanden nach der Ausstiegsart	123
Diagramm 7-4: Aufteilung der Probanden nach Ausstiegsart und Startfuß.....	123

VII Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Vergleich der Zugangsgeometrie über die sieben europäischen Nutzfahrzeughersteller	19
Tabelle 3-1: Übersicht über Vor- und Nachteile von Bewegungserfassungssystemen (Kisch, 2017)	30
Tabelle 3-2: Fußverhalten beim Ausstieg aus einem Habenfahrzeug (Shorti, 2016, S. 38).....	34
Tabelle 5-1: Ergebnisse der post-hoc Tests für alle bewerteten Aspekte	54
Tabelle 5-2: statistische Kennwerte für die logistische Regression – 2-stufiger und 3-stufiger Einstieg – erster Fuß auf der untersten Stufe	77
Tabelle 5-3: statistische Kennwerte für die logistische Regression – 2-stufiger und 3-stufiger Einstieg – erster Fuß im Fahrerhaus.....	78
Tabelle 5-4: statistische Kennwerte für die logistische Regression – 2-stufiger und 3-stufiger Ausstieg – erster Fuß auf der obersten Stufe	79
Tabelle 5-5: statistische Kennwerte für die logistische Regression – 2-stufiger und 3-stufiger Ausstieg – erster Fuß auf der untersten Stufe	80
Tabelle 5-6: Deskriptive Statistik zur Bewegungsdauer unterteilt in Bewegungsphasen	81
Tabelle 5-7: Deskriptive Statistik für den Ein-und Ausstieg am dreistufigen (oberen) und am zweistufigen Lkw (unten).....	84
Tabelle 6-1: Übersicht über den Startfuß beim Einstieg über die verschiedenen Studien und Konfigurationen hinweg.....	99
Tabelle 6-2: Übersicht über den Startfuß der dritten Studie am moVE	102
Tabelle 6-3: deskriptive Statistik zu der Anzahl der genutzten Schritte	103
Tabelle 6-4: Häufigkeitsverteilung über die Anzahl der gebrauchten Schritte aufgeteilt nach Zugangskonzepte und Startfuß	104
Tabelle 6-5: prozentualer Anteil der Fädler und Schlüpfen beim Einstiegsverhalten über die verschiedenen Studien hinweg	106

VIII Anhang

Anhang I: Halbstandardisiertes Protokoll der Beobachtungsstudie.....	CLIII
Anhang II: Probandeneinweisung bezüglich des Ansitzgefühls.....	CLV
Anhang III: Dendrogramm der Einstiegsstrategien der Studien I & II.....	CLVII
Anhang IV: Dendrogramm der Ausstiegsstrategien der Studien I & II.....	CLIX

Anhang I: Halbstandardisiertes Protokoll der Beobachtungsstudie

Fahrzeug	1 Stufe	2 Stufen	3 Stufen	4 Stufen
Anzahl Einstiegsstufen				
Marke				

Fahrzeuggeometrie

Einstieg		
1. Stufe LINKER Fuß		
bei 1 Einstiegsstufe	bei 2 Einstiegsstufen	bei 3 Einstiegsstufen
1. Stufe RECHTER Fuß		
bei 1 Einstiegsstufe	bei 2 Einstiegsstufen	bei 3 Einstiegsstufen
TürGRIFF innen als Haltegriff	TürRAHMEN als Haltegriff	Lenkradverstellung
Haltegriff links	Haltegriff rechts	Lenkrad als Haltegriff

Anhang II: Probandeneinweisung bezüglich des Ansitzgefühls

Studie zur Bewertung des Ansitzgefühls in Nutzfahrzeugen

Was bedeutet Ansitzgefühl?

Das Ansitzgefühl ist ein Bestandteil des Sitzkomforts. Man versteht darunter den Eindruck, der beim ersten Kontakt mit dem Sitz entsteht. Alles dreht sich um die Frage, was der Fahrer/die Fahrerin (oder der Beifahrer/die Beifahrerin) beim Hinsetzen empfindet. Dieser erste Eindruck entsteht in etwa einer Minute nach dem Platz nehmen.

Was gehört alles zum Ansitzgefühl?

Das Ansitzgefühl ist eine Summe von verschiedenen Wahrnehmungen. Die wichtigsten davon sind Druckverteilung auf der Sitzfläche, der Haltungskomfort, die Haptik und auch die Akustik.

Die **Druckverteilung** bestimmt die unterschiedlichen Härtegrade, die in verschiedenen Bereichen der Sitzfläche Verwendung finden. In manchen Zonen ist ein härteres Polster hilfreich, um mehr Halt zu geben, an anderen fördert eine weichere Auslegung die Bequemlichkeit. Drückt der Sitz irgendwo oder würden Sie sich an einer bestimmten Stelle sogar etwas mehr Stabilität wünschen?

Der **Haltungskomfort** gibt, wie der Name schon sagt, Auskunft darüber, wie komfortabel die Körperhaltung beim Sitzen ist. Sind die Winkel von Sitzfläche und Lehne für Sie bequem?

Die **Haptik** betrifft die Oberfläche eines Gegenstands, beim Sitz also den Bezug. Wertige Materialien sehen oftmals nicht nur besser aus, sondern fühlen sich auch besser an. Wie fühlt sich die Oberfläche an?

Auch wenn die **Akustik** im Bezug auf einen LKW-Sitz zuerst einmal etwas unsinnig erscheinen mag, so spielt sie dennoch eine nicht zu vernachlässigende Rolle. Zum Beispiel vermittelt ein Quietschen oder Knarzen beim Hinsetzen in der Regel kein vertrauenserweckendes Gefühl. Welche Geräusche nehmen Sie wahr?

Wofür die Studie?

Der erste Eindruck zählt. Dies gilt, wie für so vieles, auch für den Fahrzeugsitz. Ein LKW-Fahrer verbringt sehr viel Zeit in seiner Fahrerkabine. Der Sitz stellt dabei die größte Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine da und beeinflusst somit auch in großem Maße das Wohlbefinden. Ziel einer Sitzkonstruktion ist es, dass sich der Fahrer voll und ganz auf seine Aufgaben konzentrieren kann und nicht durch Rückenschmerzen, Verspannungen oder Ähnlichem belastet wird. Er soll sich von Anfang an wohlfühlen.

Anhang III: Dendrogramm der Einstiegsstrategien der Studien I & II

Erster Fuß Erste Stufe	Unter- stützung Hände	Kletter- phase	Haupt- Greifpunkte linke Hand	Einnahme der Fahrhaltung	Realfahrzeug Studie I [%]	Konf. 1 Realfahrzeug [%]	Konfig. 1 max. Breite [%]	Konf. 3 Auszug 75° [%]	Konfig. 4 Auszug 60° [%]		
Erster Fuß auf unterster Stufe	Linker Fuß	Hoch- ziehen	Linker Haltegriff	Gesäß und zweiter Fuß zur gleichen Zeit	3	22	17	0	0		
				Gesäß zuerst	9	4	0	0	0		
			Step-over- Step	Wechselnd	Zweiter Fuß zuerst	6	13	13	4	0	4
					Zweiter Fuß zuerst	0	0	4	0	0	
		Hoch- drücken	Linker Haltegriff	Step-over- Step	Gesäß und zweiter Fuß zur gleichen Zeit	21	13	21	44	40	
					Gesäß zuerst	24	9	0	0	12	
			wechselnd	Step-over- Step	Zweiter Fuß zuerst	15	13	0	4	0	0
					Gesäß und zweiter Fuß zur gleichen Zeit	0	4	0	0	0	
	Rechter Fuß	Hoch- ziehen	Linker Haltegriff	Linker Haltegriff	Gesäß und zweiter Fuß zur gleichen Zeit	0	0	8	0	0	
					Gesäß zu erst	3	0	0	0	0	
			Step-over- Step	Wechselnd	Zweiter Fuß zuerst	0	13	13	4	0	0
					Gesäß zuerst	0	9	13	16	16	
		Hoch- drücken	Linker Haltegriff	Step-over- Step	Zweiter Fuß zuerst	18	0	13	24	24	
					Zweiter Fuß zuerst	0	0	0	0	4	
			Lenkrad	Step-over- Step	Zweiter Fuß zuerst	0	0	0	0	0	
					Zweiter Fuß zuerst	0	0	0	4	0	

