



Fakultät für Maschinenwesen

Lehrstuhl für Ergonomie

# **Wahrnehmungsoptimierte Entwicklung eines Spiegeleratzsystems am Nutzfahrzeug**

**Albert Zaindl**

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 Markus Lienkamp

Prüfer der Dissertation: 1. Prof. Dr. phil. Klaus Bengler  
2. Prof. Dr.-Ing. Ralph Bruder (TU Darmstadt)

Die Dissertation wurde am 12.04.2017 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 27.11.2017 angenommen.

## Kurzfassung

Seit Juli 2016 sind Kamera-Monitor-Systeme (KMS) als Ersatz für konventionelle Spiegelsysteme in der EU zulassungsfähig. Aktuell sind sechs Sichtfelder am Nutzfahrzeug vorgeschrieben.

Spiegeleratzsysteme müssen, insoweit möglich, im Grunde mindestens gleichwertig zum aktuellen Spiegel sein. Neben den gesetzlichen Anforderungen soll das KMS vor allem für den Fahrer und die anderen Verkehrsteilnehmer einen Mehrnutzen darstellen. Aus diesem Grund wird die menschliche Wahrnehmung des Fahrers am aktuellen Spiegelsystem analysiert. Es ergibt sich sowohl in der theoretischen Betrachtung als auch in Probandenversuchen eine Widersprüchlichkeit zwischen ergonomischen Anforderungen und der geforderten Nutzung der Spiegel, die den Nahbereich des Lastkraftwagens (Lkw) abdecken. Die Aufgabe der Objekterkennung im Nahbereich entspricht kognitiv einer Aufgabe, die idealerweise durch die periphere Sicht des Menschen gelöst wird. Mit der peripheren Sicht ist es dem Menschen möglich, Objekte in einem großen Umfeld zufällig und zuverlässig zu entdecken. Der Fahrer muss für die Überwachung dieser indirekten Sichtbereiche im Nahbereich jedoch gezielt, also foveal, in den jeweiligen Spiegel blicken. Diese Widersprüchlichkeit wird in Fahrerbefragungen und Probandenstudien mit Blickerfassung im Realverkehr bestätigt. Der Fahrer nutzt die Spiegel größtenteils zielgerichtet für den Blick in die Ferne und nicht zur Überwachung des nahen Umfelds. Eine foveale Überwachung des Nahbereichs ist laut der Theorie der menschlichen Wahrnehmung widernatürlich und unwahrscheinlich. Sie findet im Realfall nur in einem sehr geringen Maße statt.

Auf Basis der Studienergebnisse wird iterativ ein KMS entwickelt, das dem Fahrer ermöglicht das nahe Umfeld peripher zu überwachen, während er seiner fovealen Aufgabe nachgeht. Die Darstellung der jeweils drei seitlichen Sichtbereiche in einem durchgängigen Bild (Ersatz von Haupt-, Weitwinkel- und Anfahrspiegel) lassen positive Effekte hinsichtlich Fahrerbeanspruchung und Verkehrssicherheit erwarten. Mit dem in dieser Arbeit beschriebenen KMS kann der Fahrer den Hauptspiegelbereich wie gewohnt nutzen und nebenbei das nahe Umfeld um das eigene Fahrzeug peripher im Blick behalten. Objekte werden somit leichter erkannt als mit einem konventionellen Spiegelsystem oder mit einem konventionellen Spiegeleratzsystem, das die jeweiligen Spiegel einzeln ersetzt. Schwerwiegende Unfälle wie beispielsweise ein Rechtsabbiegeunfall mit Radfahrern kann ein geeigneter Spiegeleratz somit bereits effektiv verhindern.

# Abstract

Camera-monitor systems (CMS) were approved by the EU as replacements for conventional mirror systems in July 2016. Currently, six fields of view are prescribed for indirect vision in commercial vehicles.

Mirror replacement systems must provide at least the same level of vision offered by conventional mirrors. In addition to the legal requirements, the CMS should also deliver added benefits, especially for the driver and other users of the road. To this end, the human perception of the information delivered by conventional mirror systems was first analysed. The results confirm the theory that there is an inconsistency between the ergonomic requirements and the required use of the mirrors covering the area close to trucks. To monitor blind spots, drivers must use their foveal vision to look into the mirror to discover obstacles in the direct near field, a task that would otherwise be done using peripheral vision. This inconsistency has been confirmed in driver surveys and studies on volunteers using eye tracking in real traffic. The driver mainly uses the mirrors to look into the distance and not for monitoring the nearby environment. Foveal monitoring of the near area is unnatural and, improbably according to the theory of human perception, happening only very rarely.

The studies have repeatedly developed a CMS which allows the driver to monitor the area directly around the periphery while pursues his foveal task. The presentation of the three lateral fields of view in a continuous image (replacing the main, wide-angle, and close-proximity mirrors) should have a positive effect on driver stress and traffic safety. The CMS described in this work allows drivers to use the main mirror area as usual while keeping the area close to the vehicle peripherally in view. This will allow obstacles to be more easily detected than with conventional mirror systems or conventional mirror replacement systems which replace the respective mirrors individually. A suitable mirror replacement system can thus help to prevent serious accidents such as right-turn accidents running into cyclists.

# Danksagung

Hiermit möchte ich mich bei allen Personen bedanken, die in irgendeiner Weise zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen haben.

In vielerlei Hinsicht bedanke ich mich bei meinem Doktorvater Prof. Klaus Bengler. Er hat mir ermöglicht an seinem Lehrstuhl zu einem besonders spannenden und auch zukunftssträchtigen Thema zu forschen. Auch aktiv in der ISO Arbeitsgruppe zum Thema Spiegellersatz mitarbeiten zu dürfen, sei exemplarisch erwähnt. Ebenso möchte ich mich bei Prof. Ralph Bruder für die Zweitkorrektur der Arbeit bedanken. Prof. Lienkamp danke ich für den Vorsitz der Prüfungskommission. Andreas Zimmermann und Karlheinz Dörner danke ich, dass sie mir ermöglicht haben, in der MAN Truck & Bus an dem Thema Spiegellersatz frei zu forschen.

Natürlich bedanke ich mich bei allen Kollegen des Lehrstuhls für Ergonomie für die schöne und lehrreiche Zeit. Hervorzuheben ist an dieser Stelle Wolfram Remlinger, der mich bereits als Diplomand betreut hat und mir auch in der Dissertation als Mentor in vielen Fragestellungen half. Weiter exemplarisch genannt seien Florian Kremser für die tolle Zeit als Bürokollege und Hermann Hajek für die Unterstützung in den letzten Zügen der Arbeit. Auch bei den Kollegen der MAN Truck & Bus will ich mich bedanken. Insbesondere bei Maria Fritz, Christian Brand und Michael Stecher.

Großen Anteil am Gelingen der Arbeit hatte sowohl die Werkstatt des LfE als auch die der MAN Truck & Bus. Ohne deren Fleiß und Fachwissen wären viele Ideen wahrscheinlich nicht realisiert worden. Hier bedanke ich mich ausdrücklich bei Sepp Schlosser und seiner Mannschaft, mit deren Hilfe wir einige Versuchsaufbauten und Prototypen realisieren konnten.

Größten Anteil am Gelingen meiner Arbeit haben alle Studenten, die ihre Arbeiten unter meiner Betreuung schrieben. Hervorzuheben ist hier Florian Ruch, der das Projekt drei Jahre lang in den verschiedensten Funktionen begleitet hat. Im selben Zuge bedanke ich mich bei allen, die in irgendeiner Weise an Probandenversuchen beteiligt waren. Sei es als Versuchsleiter oder als Proband.

Zu guter Letzt will ich mich bei meiner Familie und meinen Freunden bedanken, dass sie mich zum einen immer unterstützt haben, zum anderen aber auch Verständnis gezeigt haben, wenn ich mal wieder weniger Zeit hatte. Sebastian Papperger danke ich für den tollen Fototermin. Ganz besonders danke ich natürlich meinen Eltern, die mir in der Zeit den Rücken freigehalten haben und bei meiner Freundin Steffi, die großen Anteil daran hat, dass ich die Arbeit abschließen konnte.

Diesen und weiteren, nicht namentlich genannten Personen möchte ich recht herzlich danken.

„Vergelt's Gott“

# Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung und Ziel der Arbeit .....	1
1.1.	Warum Spiegeleratz? – Reduzierung der Betriebskosten.....	2
1.2.	Motivation – Optimierung auf den Fahrer .....	3
1.3.	Vorgehensweise.....	4
2.	Anforderungen an indirekte Sicht anhand aktueller Spiegelsysteme .....	5
2.1.	Begriffliche Definitionen .....	5
2.1.1.	Direkte und indirekte Sicht .....	5
2.1.2.	Der tote Winkel und der mentale tote Winkel .....	7
2.2.	Technologieunterschied Spiegel – KMS.....	8
2.2.1.	Physikalisches Grundprinzip .....	8
2.2.2.	Technologiebedingte Unterschiede .....	9
2.3.	Sichtfeldklassen am Nutzfahrzeug nach ECE R46.....	9
2.3.1.	Hauptaußenspiegel – Sichtfeldklasse II.....	10
2.3.2.	Weitwinkelspiegel – Sichtfeldklasse IV.....	10
2.3.3.	Anfahrspiegel – Sichtfeldklasse V.....	10
2.3.4.	Frontspiegel – Sichtfeldklasse VI .....	10
2.4.	Eigenschaften des Wölbungsradius – Der Vergrößerungsfaktor.....	11
2.4.1.	Klassifizierung der Spiegel .....	11
2.4.2.	Vergrößerungsfaktoren.....	12
2.5.	Positionierung der Komponenten am Fahrzeug.....	18
2.5.1.	Platzierung der Bilddarstellung .....	19
2.5.2.	Positionierung der Kameras .....	20
2.5.3.	Einstellbarkeit des KMS durch den Fahrer .....	21

2.6.	Latenzzeit.....	22
2.6.1.	Spiegelblick als Führungs- und Stabilisationsaufgabe .....	22
2.6.2.	Spiegelblick als Kontrollaufgabe.....	23
2.7.	Äußere Einflussfaktoren auf das KMS .....	25
2.7.1.	Helligkeitsanforderungen .....	25
2.7.2.	Schutz vor Verschmutzung .....	26
2.7.3.	Klimatische Anforderungen .....	26
2.7.4.	Verfügbarkeit und Fehlerverhalten.....	27
3.	Grundlagen der menschlichen Wahrnehmung.....	28
3.1.	Das menschliche Auge .....	28
3.1.1.	Eigenschaften des optischen Apparates.....	30
3.1.2.	Eigenschaften der Signalumwandlung und -weiterleitung.....	31
3.2.	Wahrnehmung .....	34
3.2.1.	Foveale und periphere Sicht .....	34
3.2.2.	Der optische Fluss .....	39
3.2.3.	Wahrnehmungsmodelle der Kognition .....	42
3.2.4.	Bottom-up- und Top-down-Prozesse.....	46
3.2.5.	Die Überlastung der Sicht .....	46
3.3.	Die menschliche Wahrnehmung der direkten und indirekten Sicht im Nutzfahrzeug .	48
3.3.1.	Die direkte Sicht im Nutzfahrzeug.....	49
3.3.2.	Periphere Wahrnehmung im Spiegelsystem .....	50
3.3.3.	Foveale Wahrnehmung im Spiegelsystem .....	51
3.3.4.	Optischer Fluss im Spiegelsystem .....	53
3.3.5.	Inneres Modell der indirekten Sicht am Nutzfahrzeug.....	54
4.	Die Nutzung aktueller Spiegelsysteme am Nutzfahrzeug .....	56

4.1.	Fahrerbefragung .....	56
4.1.1.	Probandenkollektiv .....	56
4.1.2.	Subjektive Nutzung der einzelnen Spiegel nach Situation .....	57
4.1.3.	Kritische Situationen .....	63
4.1.4.	Fazit der Fahrerbefragungen .....	64
4.2.	Probandenversuche zur Spiegelnutzung im Realverkehr .....	65
4.2.1.	Spiegelnutzung anhand von Blickdaten.....	65
4.2.2.	Körperbewegung in der Kabine zur Blickerweiterung .....	71
4.2.3.	Kopfdrehung und dynamische Kopflagen im Realversuch.....	78
4.3.	Zusammenfassung der Erkenntnisse aus den Erhebungen .....	82
5.	Ergonomische Gestaltung eines KMS .....	84
5.1.	Grundanforderungen an einen Spiegelersatz.....	84
5.1.1.	Anforderungen an die einzelnen Sichtfeldklassen .....	85
5.2.	Neugestaltung der Sichtfeldklassen.....	86
5.2.1.	Bereiche foveal motivierter Blickaktivitäten .....	87
5.2.2.	Bereiche peripherer Entdeckung .....	89
5.2.3.	Situationsabhängige Anforderungen der Darstellung .....	91
5.2.4.	Lücken im aktuellen Sichtfeld .....	92
5.3.	Aufbau der Bilddarstellung – Vorstellung des Prototyps .....	95
5.3.1.	Positionierung von Bilderfassung und -darstellung im Prototyp.....	95
5.3.2.	Kombination verschiedener Sichtfelder in einer Darstellung .....	97
5.3.3.	Definition der Situationen für automatisierte Ansichtswechsel .....	100
5.3.4.	Weitere Sichtbereiche.....	104
6.	Erwartete Nutzungsänderung durch KMS .....	106

6.1.	Veränderte Wahrnehmung bei KMS .....	107
6.1.1.	Optischer Fluss .....	107
6.1.2.	Verringerung der zu überwachenden Anzeigen .....	108
6.1.3.	Entdeckung anderer Verkehrsteilnehmer .....	108
6.2.	Veränderungen in der Interaktion mit Spiegeleratz.....	111
6.2.1.	Prämissen der theoretischen Betrachtung .....	111
6.2.2.	Veränderung der subjektiven Überwachung indirekter Sicht.....	112
6.2.3.	Veränderung der reellen Überwachung indirekter Sicht.....	113
6.3.	Studien zur KMS-Nutzung .....	114
6.3.1.	Iterative Versuchsdesigns zur Systemoptimierung während der Projektphase	114
6.3.2.	Künftige Probandenstudien.....	115
7.	Zusammenfassung und Ausblick .....	116
8.	Literaturverzeichnis.....	118
	Anhang A – Veröffentlichungen des Autors.....	126
	Anhang B – Vom Autor betreute studentische Arbeiten .....	128
	Anhang C – Abbildungsverzeichnis.....	130
	Anhang D – Ergebnisse statistischer Untersuchungen .....	135
	Anhang E – Fragebogen zur subjektiven Spiegelnutzung .....	141
	Anhang F – Rechtsabbiegesituationen im Fahrversuch .....	150

# 1. Einleitung und Ziel der Arbeit

Seit Beginn der Menschheit nutzt der Mensch das Spiegelbild. Waren erste Spiegel nur Wasseroberflächen, an denen sich der Mensch selbst betrachten konnte, so sind Spiegel im heutigen Kontext allgegenwärtig, sei es im alltäglichen Gebrauch oder in Redewendungen. Der Spiegel stellt in gewisser Weise die Wahrheit dar, die der Mensch selbst nicht sofort erkennt. Nicht umsonst wird „jemandem der Spiegel vorgehalten“. Die Fähigkeit sich selbst zu reflektieren, eine der wichtigsten Eigenschaften in der Entwicklung der Menschheit, stammt begrifflich ebenso vom Spiegel ab.

Besonders aus dem Straßenverkehr sind Spiegel aktuell noch nicht wegzudenken. Am Fahrzeug montiert oder an gefährlichen Ecken im Straßenverkehr angebracht erleichtern sie dem Fahrer das Manövrieren des Fahrzeuges und erhöhen somit die Sicherheit. Im und am Nutzfahrzeug sind Spiegel von außerordentlicher Bedeutung, bieten sie doch teilweise die einzige Möglichkeit, den rückwärtigen Raum und den Nahbereich um das Fahrzeug zu überwachen.

Es existiert die Bestrebung, Spiegel an Fahrzeugen durch Kamera-Monitor-Systeme (KMS) zu ersetzen. Der Volkswagen XL1, ein Ein-Liter-Auto, (siehe *Abbildung 1-1*) ist das erste Automobil, das im Rahmen einer Kleinserie von 200 gebauten Fahrzeugen mit KMS statt Außenspiegeln entwickelt und produziert wurde.



Abbildung 1-1: Volkswagen XL1 mit Spiegelerersatzsystem (Volkswagen AG, 2014)

Besonders am Nutzfahrzeug hat der Spiegelerersatz großes Potenzial. Sehr viele Nutzfahrzeug- und Systemhersteller arbeiten bereits an Spiegeleratzlösungen, die auch schon auf der IAA Nutzfahrzeuge in den Jahren 2014 und 2016 vorgestellt wurden. Die internationale Norm ISO 16505 legt den Grundstein für Kamera-Monitor-Systeme als Spiegeleratz. Seit Juli 2016 sind Spiegeleratzsysteme allgemein zulassungsfähig (ECE, 2016; ISO, 2015).

## 1.1. Warum Spiegelersatz? – Reduzierung der Betriebskosten

Im Gegensatz zu Personenkraftwagen (Pkw) sind Lastkraftwagen (Lkw) Arbeitsgeräte, deren wichtigstes Kaufkriterium die Rentabilität darstellt. Motivierender Faktor zum Kauf eines Nutzfahrzeugs stellen aus Sicht der Käufer die Betriebskosten dar. Die Gesamtbetriebskosten, auch Total Cost over Ownership, sind der entscheidende Motivator zum Erwerb eines Lkw. Nach einer Oliver-Wyman-Analyse ist der Kraftstoffverbrauch das wichtigste Kriterium für den Kunden (Kelp, 2008). Ebenso sind die Kilometerkosten des Fahrzeuges ein erheblicher Faktor, der auch vom Kraftstoffverbrauch abhängt. Bei beiden Parametern besteht aus Kundensicht Handlungsbedarf.

Der Ersatz großflächiger Spiegel durch kleine Kameras verringert zum einen die Luftaufstandsfläche, also die windverdrängende Oberfläche des Fahrzeuges, zum anderen kann der Luftwiderstandsbeiwert optimiert werden. Wegen dieser beiden Effekte können bis zu 2,9 % Kraftstoff gespart werden (Devesa, Indiga, 2011, S. 59). Bothe (2014) errechnete in seiner Dissertation, nach (Breuer, Kopp, 2013), eine Kostenersparnis von jährlich rund 1.300 Euro bei 2 % Kraftstoffeinsparung.

Die Kraftstoffeinsparung ist ebenso der größte Motivator der Nutzfahrzeugindustrie. Zunehmend steigende Anforderungen an den CO<sub>2</sub>-Ausstoß zwingen die Nutzfahrzeugindustrie Einsparungen zu erreichen. Spiegelersatz ist neben vielen Ansatzpunkten, wie beispielsweise neuer Motorgenerationen und verbrauchsoptimierter Aggregate, ein sehr großer Baustein.

## 1.2. Motivation – Optimierung auf den Fahrer

Neben dem Käufer und dem Hersteller existiert eine weitere Gruppe, die für diese wissenschaftliche Arbeit den eigentlichen Motivator darstellt: der Fahrer. Der (Berufskraft-)Fahrer verbringt die meiste Zeit an, beziehungsweise treffender ausgedrückt, in seinem Arbeitsplatz. Er muss sein Fahrzeug jederzeit unter Kontrolle halten, Liefertermine einhalten und gleichzeitig seine Fahrzeiten und gesetzlich geregelten Pausen beachten. Der Kraftfahrerberuf wird als stressig empfunden (Evers, Auerbach, 2005, S. 35; Michel, 2014, S. 43; ZF Friedrichshafen AG, 2014, S. 60).

Während der Lenkzeit muss der Fahrer ständig das Umfeld des Fahrzeuges kontrollieren, was bei den Maßen und der Unübersichtlichkeit eines Lkws schwierig ist. Werden konventionelle Spiegelsysteme durch Kamera-Monitor-Systeme ersetzt, soll dem Fahrer keine höhere Belastung auferlegt werden. Die vorrangige Motivation ist ein Anzeige-konzept zu entwerfen, das dem Fahrer einen Mehrnutzen bietet und zugleich die Verkehrssicherheit erhöht. Im Vordergrund steht somit die Usability, also die Nutzbarkeit eines künftigen Spiegeler-satzsystems. Ziel ist ein möglichst gebrauchstaugliches und nutzerfreundliches System, das dem Fahrer die Informationsaufnahme in den Sichtbereichen der zu ersetzenden Spiegel erleichtert. Die drei Leitkriterien zur Gebrauchstauglichkeit, die in der EN ISO 9241 für die Interaktion des Menschen mit Computern definiert sind, aber im Grunde in jeglicher Mensch-X-Interaktion Gültigkeit haben, sind Effektivität zur Lösung der Aufgabe, Effizienz der Handhabung und Zufriedenheit der Nutzer (EN ISO 9241-11).

### 1.3. Vorgehensweise

Konzipiert wird ein KMS für ein schweres Nutzfahrzeug (N3) des europäischen Nutzfahrzeugemarkts (2007/46/EG). Im Speziellen wird von einem Sattelzug ausgegangen, wobei generelle Rückschlüsse auf andere Bauarten von Lastkraftwagen, Bussen oder Pkw gezogen werden können. Grundlegend für den Einsatz von KMS ist die gesetzgebende Norm ECE R46, die „Regelung [...] der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa [...] für die Genehmigung von Einrichtungen für indirekte Sicht“. Die darin beschriebenen Sichtfeldklassen II, IV, V und VI sind für die indirekte Sicht im Nutzfahrzeug gesetzlich relevant.

Um die ergonomische Auslegung von KMS durchführen zu können, werden Daten der dynamischen Interaktion während realer Sichtsituationen erhoben. Diese Daten werden anwendungsorientiert analysiert. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind zur ergonomischen Gestaltung von KMS zum Ersatz konventioneller Spiegelsysteme [...] zu verwenden (Bothe, 2014, S. 12).

Bothe berücksichtigt die Interaktion des Fahrers mit dem Spiegel. Aus diesen Daten können Rückschlüsse auf die vom Fahrer real eingesehenen Bereiche während der Fahrt gezogen werden. Bothe geht von einem aktuell idealen System und einer idealen Interaktion zwischen dem Fahrer und seinen am Fahrzeug befindlichen Spiegeln aus. Die daraus entstehenden Spiegeleratzlösungen sind somit sehr ähnlich zu den aktuellen Spiegellösungen.

Der Ansatz von Bothe wird in dieser Arbeit um die Wahrnehmungs- und Leistungsfähigkeit des Menschen im aktuellen Spiegelsystem erweitert. Besonderes Augenmerk wird auf die menschliche optische Wahrnehmung gelegt. Die aktuelle Interaktion des Fahrers mit dem Spiegelsystem wird nicht als nachzuahmendes Ideal gesehen, sondern kritisch hinterfragt. In Probandenversuchen wird zudem die aktuelle Nutzung der Spiegel analysiert und mit der theoretischen Betrachtung verglichen.

Aus den theoretischen Überlegungen und den Erkenntnissen aus Realversuchen mit dem Spiegelsystem werden Anforderungen an die Nutzbarkeit eines KMS durch den Fahrer aufgestellt. Diese Anforderungen münden in ein KMS-Konzept, das an Prototypen aufgebaut und bereits vom Autor in diversen Medien veröffentlicht wurde. Diese Arbeit befasst sich grundlegend mit der optimalen Art der Darstellung der Sichtbereiche. Hierbei wird jeweils der Vergleich zum aktuellen Spiegelsystem am Nutzfahrzeug hergestellt. Der Ersatz des Spiegelsystems durch KMS wird auch eine Änderung des Fahrerverhaltens bewirken, die für das vorgestellte Konzept in der Theorie betrachtet wird.

## 2. Anforderungen an indirekte Sicht anhand aktueller Spiegelsysteme

Bei dem Ersatz eines bekannten Systems, hier im konkreten Fall ein optischer Spiegel, durch eine neue Technik, in diesem Fall das KMS, nimmt der Nutzer immer einen Vergleich beider Systeme vor. Die heute gültigen gesetzlichen Anforderungen an Spiegel sind über die letzten Jahrzehnte aufgrund von Sicherheitsüberlegungen und den darstellungstechnischen Grenzen von Spiegelsystemen entstanden. Die Erwartung an den Spiegelersatz ist, dass dieser in den grundlegenden Nutzungseigenschaften, unter Berücksichtigung der technologischen Unterschiede, dem Spiegelsystem in allen Situationen und Witterungsbedingungen mindestens ebenbürtig sein muss (Bengler et al. 2015). Es liegt deshalb nahe, die Anforderungen an KMS aus dem zu ersetzenden Spiegelsystem abzuleiten. Aus diesem Ansatz entstand die internationale Norm ISO 16505 und die Neufassung der europäischen Zulassungsvorschrift ECE R46, die die Zulassungsfähigkeit für Systeme der indirekten Sicht am Fahrzeug definiert (ECE, 2016; ISO, 2015).

Dieses Kapitel erörtert einige Anforderungen, die dem zu ersetzenden Spiegelsystem entstammen, und bildet eine Grundlage zum Verständnis der Arbeit. Dieses Kapitel beinhaltet nicht nur Informationen zum Stand der Technik, sondern bietet bereits eigene durchgeführte Studien zu manchen Teilbereichen des Themas. Auf spezielle Systemeigenschaften wie beispielsweise Wetterbedingungen geht diese Arbeit nicht ein. Weiterhin behandelt diese Arbeit nicht alle Aspekte und Anforderungen an Fahrzeug-Spiegelersatzsysteme. Für weitergehende Literatur sei auf die ISO 16505, die ECE R46 und das *Handbook of Camera Monitor Systems* verwiesen (ECE, 2016; ISO, 2015; Terzis, 2016).

### 2.1. Begriffliche Definitionen

Um eine Eindeutigkeit der verwendeten Fachbegriffe zu schaffen, ist es nötig, sie zu definieren.

#### 2.1.1. Direkte und indirekte Sicht

Die Sichtverhältnisse aus einem Lastkraftwagen lassen sich wie auch bei Pkw in direkte, indirekte und Instrumentensicht einteilen (Remlinger, 2013, S. 48). Dabei bezeichnet die direkte Sicht die unverdeckte Sicht aus dem Fahrzeug, meist durch die Scheiben. Die indirekte Sicht wird aktuell durch Spiegel am Fahrzeug ermöglicht, noch sehr selten durch Kamera-Monitor-Systeme. Sie macht dem

Fahrer Bereiche einsehbar, die er nicht direkt einsehen kann. Die Definition der direkten und indirekten Sicht enthält jedoch eine Lücke, die durch die Festlegung einer erweiterten direkten Sicht und einer Neudefinition der indirekten Sicht geschlossen wird. In Tabelle 1 ist die Begriffsbestimmung der Sichten beschrieben. In dieser neuen Definition ist die indirekte Sicht durch eine gespiegelte Anzeige des Bildes exakt definiert und von der erweiterten direkten Sicht abgegrenzt, die neu definiert wird. Die Instrumentensicht stellt eine synthetische Anzeige physikalischer Größen (dem Fahrzeugzustand) dar und wird in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

Tabelle 1: Definition der visuellen Informationsaufnahmen im Fahrzeug

<b>Sichtbereich</b>	<b>Definition</b>	<b>Beispiele</b>
<b>direkte Sicht</b>	natürliche Umgebungssicht	Sicht durch Scheiben freie Sicht
<b>erweiterte direkte Sicht</b>	ungespiegelte Umgebungssicht über Hilfsmittel	Sicht durch Linsen Sicht auf ungespiegeltes KMS
<b>indirekte Sicht</b>	gespiegelte Umgebungssicht über Hilfsmittel	Sicht über Spiegel Sicht auf gespiegeltes KMS
<b>Instrumentensicht</b>	Anzeige physikalischer Größen	synthetische analoge oder digitale Anzeige

Die direkte Sicht am Fahrzeug benennt den Abschnitt in dem der Fahrer seine Umwelt direkt aus dem Fahrzeug betrachten kann. Im Nutzfahrzeug hat der Fahrer bedingt durch die erhöhte Sitzposition eine gute Übersicht über das vordere Verkehrsgeschehen in der Ferne. Er kann somit Gefahrensituationen in der Ferne frühzeitig wahrnehmen und auch bei widrigen Witterungsbedingungen (Nebel oder Schnee) in der Regel mehr erkennen als ein Pkw-Fahrer (Niewöhner, Berg, 2004, S. 32).

Durch die erhöhte Sitzposition entstehen insbesondere für die direkte Rundumsicht im Nahbereich und die Fernsicht nach hinten Nachteile. Abbildung 2-1 zeigt die direkte Sicht des Fahrers auf Fahrbahnebene. Es ist zu erkennen, dass große Bereiche um das Fahrzeug mit direkter Sicht nicht einsehbar sind, wie das Nahfeld und der rückwärtige Raum. Diese Bereiche müssen mit Hilfsmitteln, derzeit mit Spiegeln, überblickt werden, die wiederum aufgrund ihrer Verdeckung die direkte Sicht beeinträchtigen.

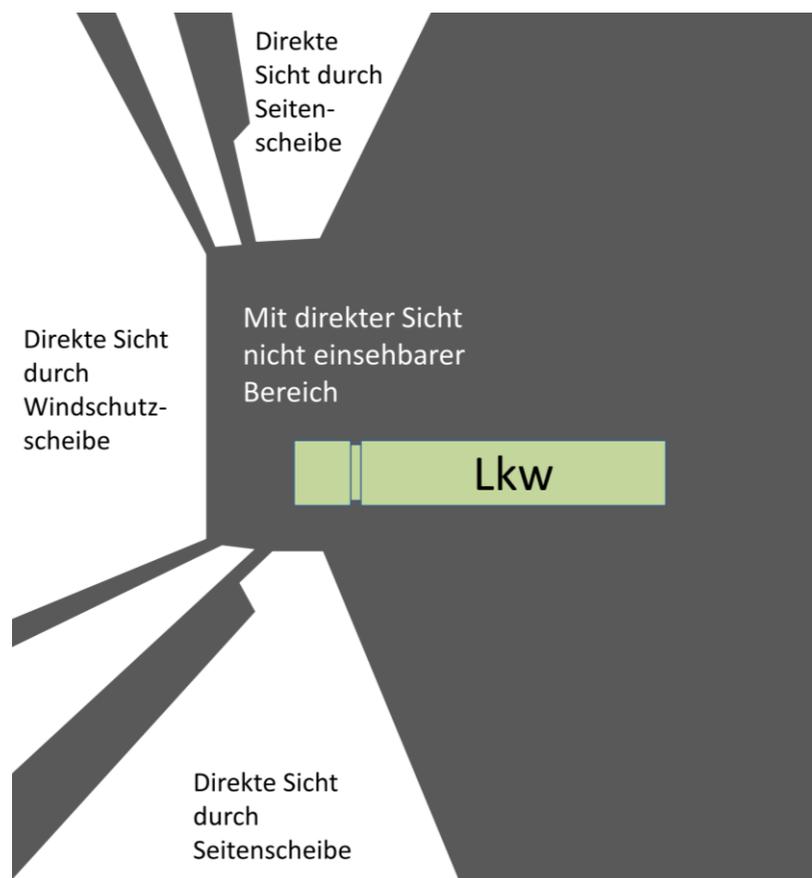


Abbildung 2-1: Direkte Sicht am Nutzfahrzeug nach ISO (2015)

Als Beispiel für eine erweiterte direkte Sicht gelten Linsen- sowie Bird's-Eye-View-Systeme und ungespiegelte KMS-Ansichten. Auch Night-Vision-Systeme gehören zur erweiterten direkten Sicht.

### 2.1.2. Der tote Winkel und der mentale tote Winkel

Der viel zitierte tote Winkel, beziehungsweise die toten Winkel, ist der Bereich am und um das Fahrzeug, der weder durch die direkte, die indirekte noch durch die erweiterte direkte Sicht einsehbar ist. Der Begriff ist zwiespältig: Bei vielen Unfällen, die der mangelnden Sicht im toten

Winkel zugeschrieben werden, hätte das Verkehrsgeschehen durchaus in einem der Spiegel entdeckt werden können (ADFC Berlin, 2016; Spiegel, 2004). Um in dieser Arbeit dem Zwiespalt zu entgehen, wird der tote Winkel als der Bereich definiert, den der Fahrer in keinem Fall einsehen kann, auch wenn er all seine Einrichtungen für direkte und indirekte Sicht einbezieht.

Neu definiert wird der mentale tote Winkel, er beschreibt die vom Fahrer nicht aufgenommene Information. Der mentale tote Winkel ist der Bereich, den der Fahrer tatsächlich während der Fahrt nicht einsieht, weil der Bereich sich entweder im toten Winkel befindet oder der Fahrer nicht in die entsprechende Richtung blickt. Objekte, die sich innerhalb dieser unüberwachten Bereiche befinden, können vom Fahrer nicht entdeckt werden. Der Bereich des mentalen toten Winkels ist um einiges größer als der tatsächliche physikalisch beschreibbare tote Winkel. Der mentale tote Winkel ist eine Momentaufnahme und spielt sich im Bereich der gefühlten Gegenwart ab, also in einem Zeitbereich von 2 bis 3 Sekunden (Bubb et al, S. 126; Oehler, 1985; Pöppel, 2000).

## **2.2. Technologieunterschied Spiegel – KMS**

Seit Menschengedenken existieren Spiegel, in denen sich die Menschen in erster Linie selbst betrachten können. Die ersten Spiegel waren vermutlich Wasseroberflächen, später polierte Metalloberflächen. So alt wie die Menschheit und die Spiegel dürften auch die Mythen um das Spiegelbild sein. Das Erkennen des eigenen Abbildes im Spiegel setzt hohe kognitive Fähigkeiten des Betrachtenden voraus, ebenso wie das Betrachten von Objekten über den Spiegel. Der Mensch ist heutzutage mit dem Spiegel und seiner Wirkweise von klein auf vertraut.

Kamera-Monitor-Systeme sind eine Neuerung. Auch hier lässt sich bereits eine Gewöhnung der Menschen an die Systeme erkennen. Beispielweise ersetzt das KMS im Alltag zuweilen einen Schminkspiegel (als App im Smartphone) oder der Türspion wird durch ein KMS ersetzt.

### **2.2.1. Physikalisches Grundprinzip**

Ein Spiegel ist physikalisch als eine reflektierende hinreichend glatte Oberfläche definiert. Das Licht, bzw. die Lichtwellen werden nach der bekannten Formel Einfallswinkel = Ausfallswinkel an der Oberfläche gerichtet reflektiert. Das bedeutet, dass der Mensch im Spiegel (in-)direkt auf das Objekt selbst und nicht auf die Spiegeloberfläche fokussiert. Der Mensch blickt somit über den Spiegel vermeintlich direkt auf das Objekt.

Das physikalische Prinzip eines KMS unterscheidet sich grundlegend von dem eines Spiegels. Stark vereinfacht besteht das KMS aus mindestens zwei Komponenten, nämlich der Kamera und dem

Monitor. Die Kamera wandelt ein optisches Signal in ein elektronisches Signal um, der Monitor hingegen wandelt das elektronische Signal wieder in eine optische Anzeige. In einem KMS blickt der Mensch somit nicht auf das Objekt selbst, sondern auf eine Abbildung des Objektes.

Es handelt sich bei Spiegel und KMS um grundlegend unterschiedliche Technologien, mit jeweiligen Vor- und Nachteilen. Beide müssen letzten Endes dasselbe erreichen: eine sichere und verständliche Darstellung der nicht direkt einsehbaren Objekte.

### **2.2.2. Technologiebedingte Unterschiede**

Aus den verschiedenen physikalischen Prinzipien ergeben sich technologiebedingte Unterschiede in den Randbedingungen der Systeme, die hier beispielhaft dargestellt werden.

Die Anordnung von Einrichtungen für indirekte Sicht erfolgt nach zwei Grundprinzipien: Die bildfassende Einheit muss den einzusehenden Bereich einsehen können und der Mensch braucht freien Blick auf die bildgebende Einheit. Da im Spiegel die bildfassende und -gebende Einheit auf der Spiegeloberfläche zusammenfallen, bedeutet dies eine hohe örtliche Gebundenheit. Das KMS besitzt hingegen mit zwei unabhängig voneinander platzierbaren Einheiten gegenüber einem Spiegel mehr räumliche Freiheitsgrade.

Ein weiterer grundlegender Unterschied liegt in der zeitlichen Auflösung der Systeme. Die einzelnen Verarbeitungsschritte des KMS (Bildaufnahme, Bildübertragung, Bildanzeige) benötigen eine gewisse Verarbeitungszeit, die Latenz genannt wird. Diese Latenz ist im Spiegelsystem nicht vorhanden. Kapitel 2.6 geht näher auf die Latenz des KMS und seinen Einfluss auf den Menschen ein.

## **2.3. Sichtfeldklassen am Nutzfahrzeug nach ECE R46**

Derzeit sind am Fahrzeug der Klasse N3 (Nutzfahrzeug mit mehr als 12 t zulässiger Gesamtmasse) laut europäischer Zulassungsvorschrift sechs Spiegel vorgeschrieben, auf die dieses Kapitel näher eingeht (ECE, 2016). Die Anzahl und die Positionen der Spiegel sind durch wiederholte Ergänzungen und Anpassungen dieser Vorschrift über viele Jahre entstanden. Zuletzt wurde die ECE R46 im Jahr 2016 geändert.

Die zu überwachenden Sichtbereiche des Systems für indirekte Sicht am Nutzfahrzeug sind in sechs Zonen eingeteilt, die Abbildung 2-2 darstellt. Jedes einzelne Sichtfeld wird aktuell mit jeweils einem Spiegel abgedeckt. Der Sinn und Nutzen der einzelnen Sichtbereiche wird im Folgenden kurz dargestellt.



Abbildung 2-2: Vorgeschriebene Sichtfeldklassen am Nutzfahrzeug (Zaindl, 2016)

### 2.3.1. Hauptaußenspiegel – Sichtfeldklasse II

Die ältesten bekannten Spiegel am Nutzfahrzeug sind die Hauptaußenspiegel der Sichtfeldklasse II. Früher als plane Spiegel ausgeführt, müssen die Spiegel der Sichtfeldklasse II aktuell einen Wölbungsradius von mindestens 1200 mm aufweisen. Infolge des großen Wölbungsradius entsteht eine geringe Wölbung, wodurch der Fahrer weit in die Ferne spähen und den rückwärtigen Verkehr beobachten kann.

### 2.3.2. Weitwinkelspiegel – Sichtfeldklasse IV

Der Weitwinkelspiegel (Sichtfeldklasse IV) wurde aus unterschiedlichen Überlegungen am Nutzfahrzeug eingeführt und anschließend, zuerst auf der Beifahrerseite, dann beidseitig, gesetzlich vorgeschrieben. Mit einem minimalen Wölbungsradius von 300 mm kann der Fahrer einen weitaus größeren Bereich einsehen. Dadurch wurde ein großer Bereich des zuvor toten Winkels einsehbar.

### 2.3.3. Anfahrspiegel – Sichtfeldklasse V

Der Anfahrspiegel (Sichtfeldklasse V) ist beifahrerseitig vorgeschrieben. Mit einem minimalen Wölbungsradius von 200 mm und der damit verbundenen starken Wölbung kann der Fahrer darin einen großen Bereich seitlich des Fahrzeugs einsehen. Dieser Spiegel wurde hauptsächlich aus Gründen der Sicherheit schwächerer Verkehrsteilnehmer, wie beispielsweise Radfahrer und Fußgänger, vom Gesetzgeber verpflichtend eingeführt. Der Lkw-Fahrer soll darin Verkehrsteilnehmer erkennen, die sich im direkten Umfeld des Nutzfahrzeuges befinden. Der Anfahrspiegel ist umgangssprachlich auch als Rampenspiegel bekannt.

### 2.3.4. Frontspiegel – Sichtfeldklasse VI

Durch den zuletzt eingeführten Frontspiegel (Sichtfeldklasse VI) wird die indirekte Sicht am Nutzfahrzeug komplettiert. Der Frontspiegel dient mit einem minimalen Wölbungsradius von 200 mm

dem Fahrer dazu, den Bereich vor dem Fahrzeug einzusehen, den er aufgrund der hohen Sitzposition nicht direkt einsehen kann. Durch einen Kontrollblick vor oder bei der Anfahrt kann der Fahrer somit Personen und Objekte direkt vor dem Fahrzeug erkennen.

## **2.4. Eigenschaften des Wölbungsradius – Der Vergrößerungsfaktor**

Zu den grundlegenden Eigenschaften eines Spiegels gehört sein Wölbungsradius. Durch das Reflexionsgesetz, Einfallswinkel gleich Ausfallswinkel, definieren sich die Eigenschaften der unterschiedlichen Spiegelarten.

### **2.4.1. Klassifizierung der Spiegel**

Plane Spiegel besitzen eine ebene Oberfläche, sie erlauben eine unverzerrt gespiegelte Wiedergabe der Realität und sind somit die maßstabgetreuesten Spiegel. Planspiegel finden häufig als Innen Spiegel im Pkw Verwendung. Das Auge fokussiert dabei über den Spiegel direkt auf das Objekt. Jedoch kann in einem Spiegel ohne Krümmung nur ein kleiner Teil der rückwärtigen Sicht eingesehen werden.

Spiegel, deren Oberflächenkrümmung einem Ausschnitt einer Kugel entsprechen, werden sphärisch konvexe Spiegel genannt. Sie ermöglichen ein größeres Sichtfeld, das jedoch verkleinert und verzerrt dargestellt wird und somit zulasten der Bildqualität geht. Konvexe Spiegel werden durch ihren Wölbungsradius definiert. Je geringer der Wölbungsradius ist, umso kleiner und verzerrter wird das Bild gesehen. Das Auge fokussiert beim Kugelspiegel stets auf einen Punkt zwischen Spiegeloberfläche und dem Brennpunkt, also dem gedachten Kugelmittelpunkt des Spiegels.

Als dritte Spiegelart, die im Pkw-Bereich bekannt ist, gelten asphärische Spiegel. Asphärische Spiegel sind eine Sonderform konvexer Spiegel. Sie besitzen keinen konstanten Radius wie bei einer Kugeloberfläche, sondern meist einen horizontalen und einen vertikalen Radius unterschiedlicher Größe. Im automobilen Bereich wird mit konvexen Spiegeln eine Erweiterung des Sichtfeldes erreicht, indem am Rand des Spiegels ein kleinerer Radius verwendet wird (siehe Abbildung 2-3). Durch die unterschiedlichen Krümmungsradien kann das Abbild auf asphärischen Spiegeln vom Auge jedoch nur bedingt scharf gestellt werden. Die in Kapitel 2.3 vorgeschriebenen Sichtbereiche müssen deshalb aktuell durch planare oder sphärisch-konvexe Spiegel, mit definierten minimalen Krümmungsradien zur Wahrung der nötigen Bildqualität, erreicht werden. Zusätzliche Sichtbereiche, also außerhalb der vorgeschriebenen Bereiche, dürfen mit asphärischen Spiegelbereichen hin-

zugefügt werden (ECE, 2016). Obgleich die Wissenschaft durchaus unterschiedlicher Meinung bezüglich dem Nutzen sphärischer und asphärischer Spiegel ist, kristallisiert sich zunehmend heraus, dass teilasphärische Spiegel die Straßensicherheit fördern (Bach et al., 2002, S. 83; Bhise, 2012, S. 121; Egger, 1990). Wie Abbildung 2-3 zeigt überkompensiert das erweiterte Sichtfeld des asphärischen Bereiches dessen geringere Detailtreue.



Abbildung 2-3: Vergleich von Pkw-Spiegel ohne und mit asphärischem Bereich

#### 2.4.2. Vergrößerungsfaktoren

Um Anforderungen anhand der aktuellen Spiegelsysteme an KMS zu definieren, ist es nötig, die optischen Eigenschaften der konvexen Krümmung mathematisch zu beschreiben.

##### 2.4.2.1. Physikalische Beschreibung des Vergrößerungsfaktors

Egger (1990) beschreibt die Größenänderung des gesehenen Abbildes über konvexe Spiegel durch einen Verkleinerungsmaßstab. Dieser Verkleinerungsmaßstab  $m$  wird im weiteren Verlauf nach ISO 16505 als Vergrößerungsmaßstab definiert. Werte über 1 stellen eine Vergrößerung dar; Werte unter 1 eine Verkleinerung.

Egger geht aufgrund der kugelförmigen Krümmung konvexer Spiegel davon aus, dass die Verkleinerung sowohl horizontal als auch vertikal übereinstimmt. Er differenziert bei seinen Betrachtungen den Abstand des rückwärtigen Objektes  $d$  (oder  $d_{object}$ ) und geht bei seiner Versuchsanordnung von einer Konstellation aus, die dem Mittelspiegel im Pkw entspricht, wie auch Abbildung 2-4 zeigt. Aus den gemessenen Größen des Messobjekts wird der Vergrößerungsfaktor experimentell für vier verschiedene Krümmungsradien  $r$  (oder  $r_{mirror}$ ) bestimmt. Dieser gilt somit ausschließlich für die von Egger gewählten Randbedingungen (Egger, 1990).

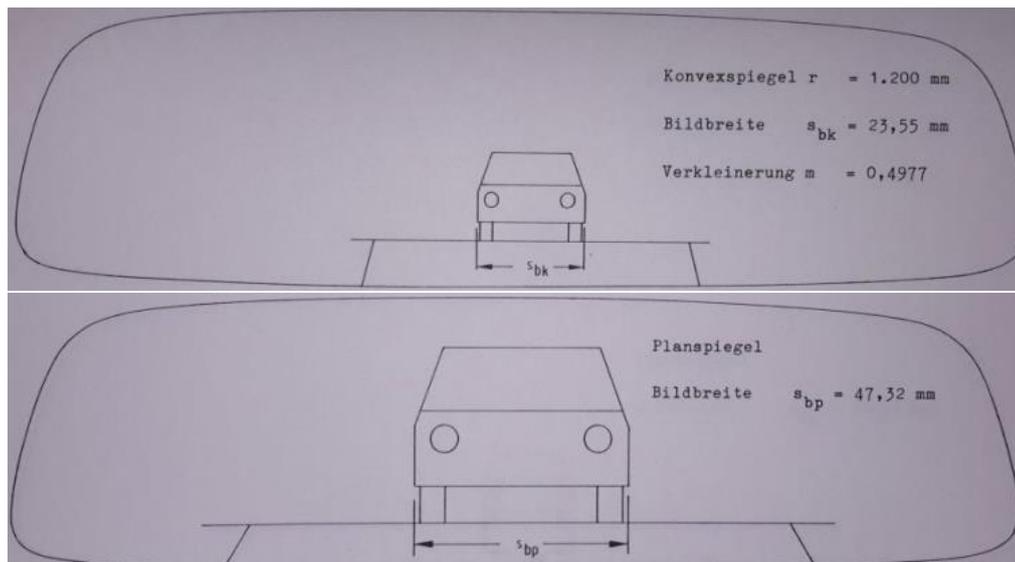


Abbildung 2-4: Vergleich der Bildbreiten von Plan- und Konvexspiegel ( $d = 20$  m) (Egger, 1990)

Platzer (1995) hat ein mathematisches Modell des Vergrößerungsfaktors für konvexe Spiegel im Zweidimensionalen vorgestellt. Die Berechnung nach Platzer berücksichtigt neben dem Krümmungsradius des Spiegels sowohl den Abstand des Auges zum Spiegel  $a$  (oder  $a_{mirror}$ ) als auch den Abstand des Objektes zum Spiegel. Nach Formel 2 sinkt der Vergrößerungsfaktor bei zunehmendem Abstand des Objektes zum Spiegel von  $M = 1$  (Objekt direkt am Spiegel) bis zu einem  $M_0$  für ein Objekt, das sich in der Unendlichkeit befindet (siehe Abbildung 2-5).  $M_0$  ist durch den Krümmungsradius des Spiegels und den Abstand des Betrachters zum Spiegel in Formel 1 definiert. Nähert sich ein Objekt dem Spiegel, wird dieses im Spiegel nicht nur durch die Näherung selbst, sondern auch durch den veränderten Vergrößerungsfaktor größer wahrgenommen. Bei einer Beobachtung über einen längeren Zeitraum, also im Bereich mehrerer Sekunden, nähert sich das Objekt dem eigenen Fahrzeug gefühlt schneller an, als es in Wirklichkeit geschieht.

Formel 1: Der Vergrößerungsfaktor  $M_0$  für unendlich weit entfernte Objekte und bei zentralem Blick auf den Spiegel

$$M_0 = \frac{1}{1 + \frac{2a_{\text{mirror}}}{r_{\text{mirror}}}}$$

Formel 2: Der Vergrößerungsfaktor  $M$  bei zentralem Blick auf den Spiegel

$$M = \frac{1}{1 + \frac{2a_{\text{mirror}} \cdot d_{\text{object}}}{r_{\text{mirror}} \cdot (a_{\text{mirror}} + d_{\text{object}})}}$$

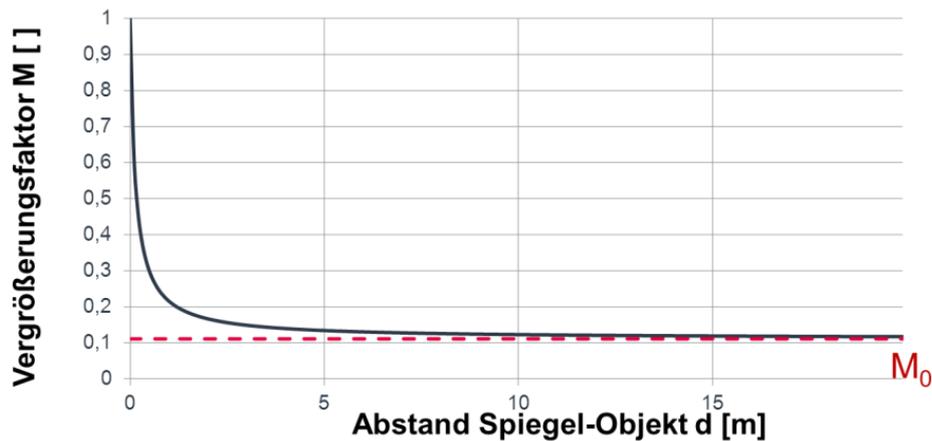


Abbildung 2-5: Vergrößerungsfaktor konvexer Spiegel über den Objektstand

Die Formeln nach Platzer sind mathematisch korrekt, gehen aber von einem zentralen Blick auf die Spiegeloberfläche aus. Dies bedeutet, dass der Betrachter sich selbst im Spiegel sähe, im Fahrzeug ist der Spiegel aber nicht direkt vor dem Fahrer positioniert. Es wird immer über einen Blickwinkel  $\beta$  vom Auge über den Spiegel auf das Objekt geblickt (siehe Abbildung 2-6).

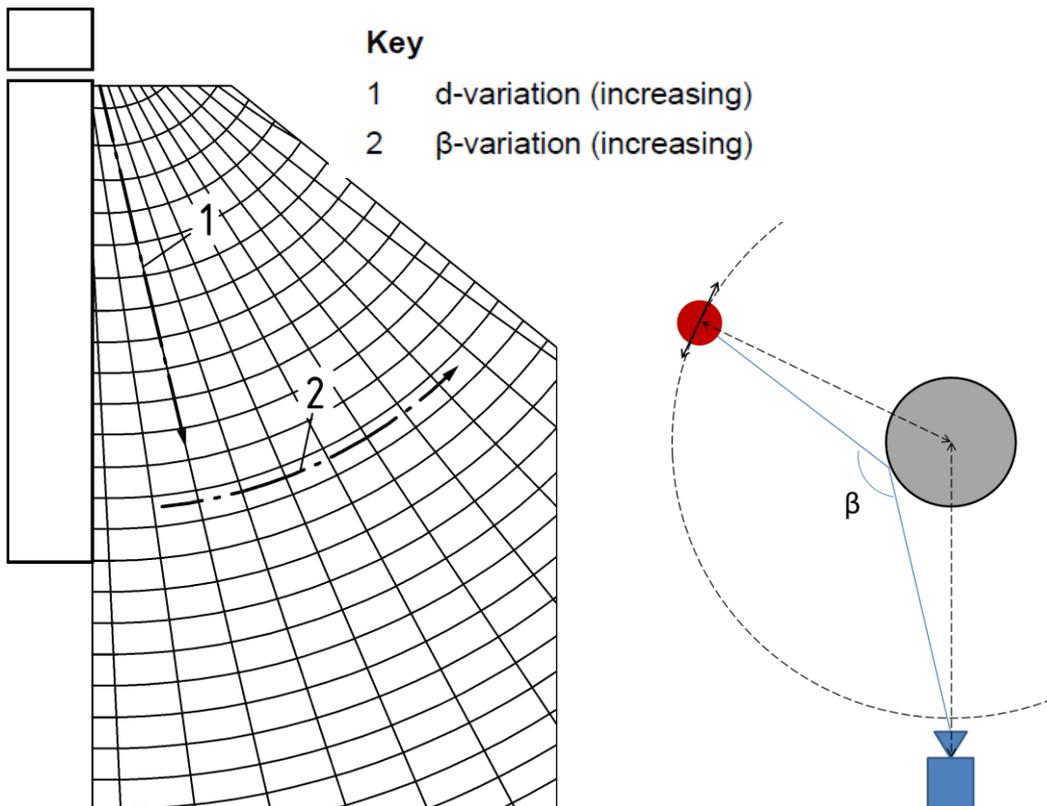


Abbildung 2-6: Links: Variablen zur Berechnung des Vergrößerungsfaktors (ISO, 2015). Rechts: Blickwinkel Auge(Kamera) – Spiegel – Objekt

Dieser Aspekt wurde von der Arbeitsgruppe zur ISO 16505 aufgegriffen. Das Ergebnis ist eine Berechnung des  $M$ -Faktors für variable Betrachtungswinkel  $\beta$ . In der vom Autor erstellten Formel 3 wird von einem Objekt ausgegangen, das sich in der Unendlichkeit befindet. Der Abstand des Betrachters zum Spiegel und der Wölbungsradius bilden dabei Konstanten.

Formel 3: Vergrößerungsfaktor für variable Auge-Spiegel-Objekt-Blickwinkel

$$M = \lim_{\beta_1 \rightarrow \beta_2} \frac{\arcsin\left(\frac{r}{a+r} \cdot \sin\frac{\beta_2}{2}\right) - \arcsin\left(\frac{r}{a+r} \cdot \sin\frac{\beta_1}{2}\right)}{\beta_2 - \beta_1 - \arcsin\left(\frac{r}{r+a} \cdot \sin\frac{\beta_2}{2}\right) + \arcsin\left(\frac{r}{a+r} \cdot \sin\frac{\beta_1}{2}\right)}$$

$$\beta_2 > \beta_1; a = a_{\text{mirror}}, r = r_{\text{mirror}}$$

Es zeigt sich im Zweidimensionalen Modell, dass der Vergrößerungsfaktor mit steigendem Winkel  $\beta$  kleiner wird.

Die ISO 16505 definiert unterschiedliche Vergrößerungsfaktoren für die jeweiligen Spiegelklassen der Fahrer- und Beifahrerseite und ist in Formel 4 beschrieben. Diese Vergrößerungsfaktoren berücksichtigen sowohl den Abstand vom Objekt zum Spiegel als auch den Betrachtungswinkel und stellen eine Näherung aus beiden vorab besprochenen Formeln dar (ISO, 2015, S. 118).

Formel 4: Annäherung des Vergrößerungsfaktors für unterschiedliche Abstände  $d$  und Blickwinkel  $\beta$

$$M(\beta, d_{object}) \approx \frac{M(\beta = 0, d_{object}) \cdot M(\beta, d_{object} = \infty)}{M_0}$$

Vorteil der Methode ist, dass eindeutige Vergrößerungsfaktoren bestimmt werden. Diese werden sowohl für die horizontale als auch vertikale Darstellung des Abbildes herangezogen. Grundannahme ist hierbei, wie auch von Egger (1990) beschrieben, dass wegen der kugelförmigen Krümmung der Vergrößerungsfaktor horizontal wie vertikal gleich bleibt. Diese Annahme muss bei genauer Betrachtung jedoch falsifiziert werden. Wenn die Vergrößerungsfaktoren horizontal und vertikal gleich blieben, würde keine Verzerrung durch den Spiegel geschehen. Dies ist jedoch ganz klar der Fall, wie in Abbildung 2-7 zu sehen ist. Das Bild zeigt einen Kugelspiegel, in dem ein Objekt (rote Kugel) in verschiedenen Blickwinkeln  $\beta$  zu erkennen ist. Sowohl der Abstand des Objektes zum Spiegel als auch der Abstand des Augpunktes (Kamera) zum Spiegel sind konstant. Der Versuchsaufbau entspricht der rechten Skizze in Abbildung 2-6.

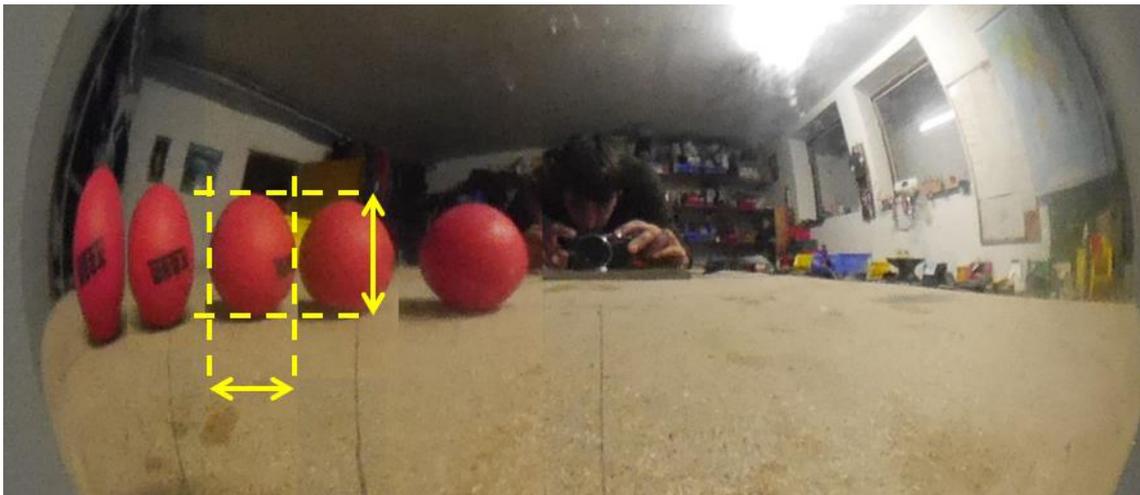


Abbildung 2-7: Verzerrung in konvexen Spiegeln

In dem Versuchsaufbau entspricht der horizontale Vergrößerungsfaktor dem der Berechnung nach ISO 16505. Der dazu senkrechte vertikale Vergrößerungsfaktor steigt jedoch mit zunehmenden  $\beta$  (die Kugel wird höher) und nimmt schließlich zum Rand bei  $\beta = 180^\circ$  den Faktor  $M = 1$  ein. Dies ist logisch durch die kugelförmige Fläche begründet. Würde der senkrechte Vergrößerungsfaktor zum Kugelrand hin ( $\beta \rightarrow 180^\circ$ ) nicht den Wert 1 einnehmen, würden Lücken im Spiegelbild auftreten. Wie in der Abbildung zu sehen ist, verändert sich die scheinbare Form der Kugel nach außen, also bei steigendem  $\beta$ , zu einem Oval.

Es ist zu überdenken, ob die geforderten Vergrößerungsfaktoren, beschrieben in ISO 16505 und ECE R46, für den Fahrer ausreichend sind um schnell annähernde Objekte von hinten frühzeitig zu erkennen. Ebenso ist zu überdenken ob die Vergrößerungsfaktoren und die dazugehörigen Sichtfeldklassen, die von aktuellen Spiegelsystemen ausgehen, überhaupt für die Definition der maximalen erlaubten Verkleinerung in einem Spiegelsatzsystem geeignet sind. Kapitel 5 geht näher auf diese Fragen ein.

#### **2.4.2.2. Abschätzen physikalischer Eigenschaften**

In planaren Spiegeln werden Größen genau so groß dargestellt, als würde der Fahrer direkt auf das Objekt sehen. In konvexen Spiegeln wird das Objekt verkleinert dargestellt, was den Eindruck erwecken kann, dass dieses weiter entfernt sei (Egger, 1990). Aus diesem Grund sind auf konvexen Spiegeln, besonders in den USA, oftmals Warnhinweise vermerkt. Interessant sind hierbei Studien aus den USA, die genau diese Einschätzungen von Position und Abständen erforschten. Jedoch zeigen diese Untersuchungen unterschiedliche Ergebnisse: Während die Studien nach Flannagan et al. (1997) die Vermutung bestärken, dass Objekte weiter entfernt gesehen werden, ergaben die Ergebnisse von Jennes et al. (2006) ein anderes Bild: Hier wurden die Objekte mit konvexen Spiegeln sogar näher am Fahrzeug vermutet.

Anzumerken ist, dass nicht nur die Größe oder Größenänderung des Objekts eine entscheidende Rolle bei der Einschätzung seiner Position und Geschwindigkeit hat, sondern noch weitere wichtige Aspekte. Im konvexen Spiegel wird nicht nur das Objekt verkleinert dargestellt, sondern auch die komplette Umgebung. Durch die Größenkonstanz (Goldstein, 2008, S. 203) der im Spiegel gesehenen Objekte kann sich der Mensch orientieren, um dadurch die Kenngrößen einzuschätzen. Durch die verkleinerte Darstellung im Spiegel hat der Fahrer einen größeren Sichtbereich, der die Einschätzung von Abstand und Geschwindigkeit zusätzlich erleichtern kann.

Als Bewegungsparallaxe wird die Eigenschaft beschrieben, dass bei einer Eigenbewegung oder gleichmäßigen Bewegung der Objekte, sich nahe Objekte schneller zu bewegen scheinen als weit

entfernte. Dieser Effekt ist maßgebend für die Abschätzung physikalischer Größen (Goldstein, 2008, S. 190). Im fahrzeugspezifischen Umfeld lassen sich zwei Arten dieses Effektes beschreiben. Zum einen tritt dieser aufgrund der Eigenbewegung des Fahrzeuges auf, wobei kein merklicher Unterschied zwischen KMS und Spiegel zu erwarten ist. Zum anderen tritt der Effekt im Spiegelsystem auch bei Kopfbewegungen des Fahrers innerhalb der Kabine auf. Diese Eigenschaft entfällt bei KMS systembedingt.

Wie sich die Abschätzung von Größen und Geschwindigkeiten allgemein im KMS verhält, hängt von vielen unterschiedlichen Variablen ab und kann aktuell nicht vereinfacht werden. Mitbestimmende Eigenschaften sind beispielsweise der Vergrößerungsfaktor, die Positionierung von Kamera und Display, die Art der Darstellung im Display, die Latenz und die Verzerrung.

## 2.5. Positionierung der Komponenten am Fahrzeug

Die Spiegel am Fahrzeug müssen so positioniert sein, dass der Fahrer über den Spiegel das gewünschte Sichtfeld einsehen kann. Die logische Folgerung ist, dass der Spiegel zwangsläufig immer einen Teil der direkten Sicht durch die Scheibe verdeckt (siehe Kapitel 2.1.1). Dem geschuldet ist wohl auch die Regelung nach § 35b StVZO, die besagt, dass Spiegel nicht bei der Berechnung der Sichtverdeckung zählen, obwohl diese Sichtverdeckung beim Nutzfahrzeug erheblich ist, wie Abbildung 2-8 veranschaulicht.

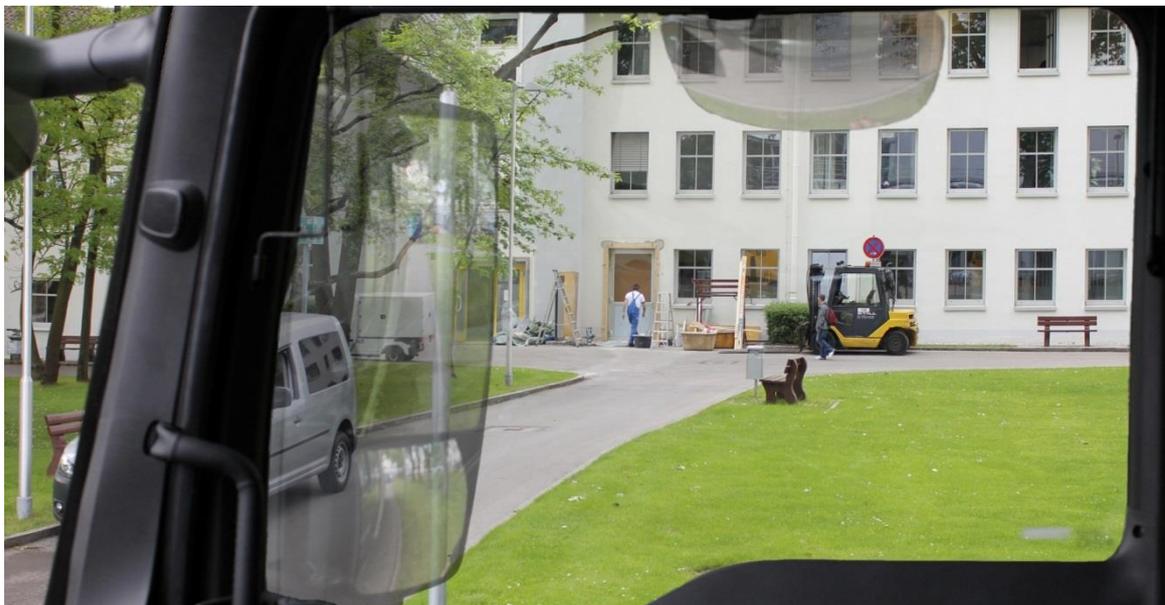


Abbildung 2-8: Verdeckung direkter Sicht durch Spiegel am Nutzfahrzeug auf der Beifahrerseite (Visualisierung durch Fotomontage)

Mit einem KMS kann die direkte Sicht aus dem Fahrzeug erheblich verbessert werden, da Kameras und Monitore unabhängig voneinander positioniert werden können. Grundlegende Anforderungen an die Positionierung der Komponenten werden im Folgenden definiert.

### 2.5.1. Platzierung der Bilddarstellung

Die Platzierung der Bilddarstellung, also des Monitors, ist in ECE R46 und ISO 16505 für die Klassen II und IV wie folgt geregelt: Das Bild der rechten Fahrzeugseite soll auf der rechten Seite der Fahrermittlebene dargestellt werden, das Bild der linken Fahrzeugseite auf der linken Seite der Fahrermittlebene (ECE, 2016; ISO, 2015). Somit ist eine kombinierte Darstellung der Sichtbereiche beider Seiten aus einer Art Vogelperspektive nur eingeschränkt möglich. Eine kombinierte Ansicht, wie sie zum Beispiel aus Rennsimulationsspielen bekannt sind, ist zwar denkbar, wird aber aktuell vom Gesetzgeber nicht verfolgt. Abbildung 2-9 zeigt eine entsprechende Darstellung aus einer Rennsimulation. Auch Studien von BMW haben eine solche Ansicht realisiert (autobild, 2016).



Abbildung 2-9: Kombinierte Darstellung der Sichtfeldklassen I und III in einem Bild aus einem Simulationsspiel (Foto: Dennis Moosburger) und im BMW i8 (Foto: autobild.de)

ECE R46 und ISO 16505 fordern zumindest für Sichtfeldklassen II und IV eine getrennte Darstellung der linken und rechten Seite. Displays müssen im Fahrzeug so positioniert werden, dass sie die direkte Sicht möglichst wenig verdecken (ISO, 2015). Ebenso sollte gewährleistet sein, dass sich Fahrer, die zwischen verschiedenen Fahrzeugen wechseln, nicht stark umgewöhnen müssen. So kann eine Anbringung des Displays in oder an der A-Säule als vorteilhaft gesehen werden (Fagerström, Garlund, 2012). Bei der Positionierung können sich Zielkonflikte ergeben, die gegeneinander abgewogen werden müssen. Neben den Restriktionen der Gesetzgebung müssen beispielsweise Aspekte der direkten Sicht, der Akkommodationsfähigkeit (siehe Kapitel 3.1.1.1) und der peripheren Sicht berücksichtigt werden. Neben den Gesichtspunkten der Ergonomie sind zudem noch eine Reihe der Disziplinen der Automobilkonstruktion beteiligt, die alle ihre Berücksichtigung finden müssen, um ein Produkt erfolgreich gestalten zu können (Bhise, 2012).

## **2.5.2. Positionierung der Kameras**

Auf die Platzierung der Kameras gehen ISO 16505 und ECE R46 nicht grundlegend ein. Es ist jede Position möglich, an der die Kamera das entsprechende Sichtfeld erfassen kann. Zusätzlich soll die Kamera im Stillstand vom Fahrer gereinigt werden können und konstruktiv, auch durch die Positionierung, vor schneller Verschmutzung geschützt sein (ECE, 2016; ISO 2015).

### **2.5.2.1. Abstand zur Fahrzeugaußenkante**

Die Kameras des Spiegelsatzsystems sollen außerhalb der breitesten Stelle des Fahrzeuges angebracht sein, um den kompletten geforderten Sichtbereich abdecken zu können. Die maximale Breite von Fahrzeugen auf Deutschlands Straßen beträgt 2,55 m bzw. 2,60 m für Kühlwagen (96/53/EG, 1996).

Somit muss die Kamera für eine Sattelzugmaschine mindestens 1,3 m (in y) von der Fahrzeugmittelebene entfernt platziert werden. Eine Positionierung weiter außen ermöglicht dem Fahrer einen noch besseren Überblick. Eine Platzierung zu weit außen erhöht die Beschädigungsgefahr der Kamera durch Kollision. Zudem darf die Kamera nicht weiter als 250 mm über die ohne Spiegel gemessene größte Breite des Fahrzeuges hinausragen (ECE, 2016). Somit ist die Position der Kamera in y-Richtung ein Kompromiss aus der Übersicht für den Fahrer und der Gefahr vor Kameraschäden.

Durch eine automatisierte situationsabhängige Verschiebung in y-Richtung bzw. durch ein Ein- und Ausfahren der Kamera kann dem Fahrer eine optimale Sicht ermöglicht werden. Ebenso können Schäden an der Kamera vermieden werden (Jerg, Zaindl, 2014).

### **2.5.2.2. Positionierung in x- und z-Richtung**

Zur Positionierung der Kamera in x- und z-Richtung sind bereits Studien vorhanden. In einer Masterarbeit an der Chalmers University of Technology werden verschiedene Positionen nach den Maßgaben der ISO 16505 und Vorgaben von Volvo Trucks untersucht (Fagerström, Garlund, 2012). Ebenso wird von Rissel (2013) die Kamerapositionierung bewertet.

Beide Studien kommen auf ein nahezu identisches Ergebnis. Eine Positionierung der Kameras so weit vorne und so weit oben wie möglich am Fahrerhaus wird präferiert. Abbildung 2-10 zeigt eine Simulation der Bilddarstellung und die unterschiedlichen Perspektiven bei unterschiedlichen Kamerahöhen über dem Boden. Die Kamerahöhe ist im linken Bild am höchsten und sinkt bis zum rechten Bild stetig ab.

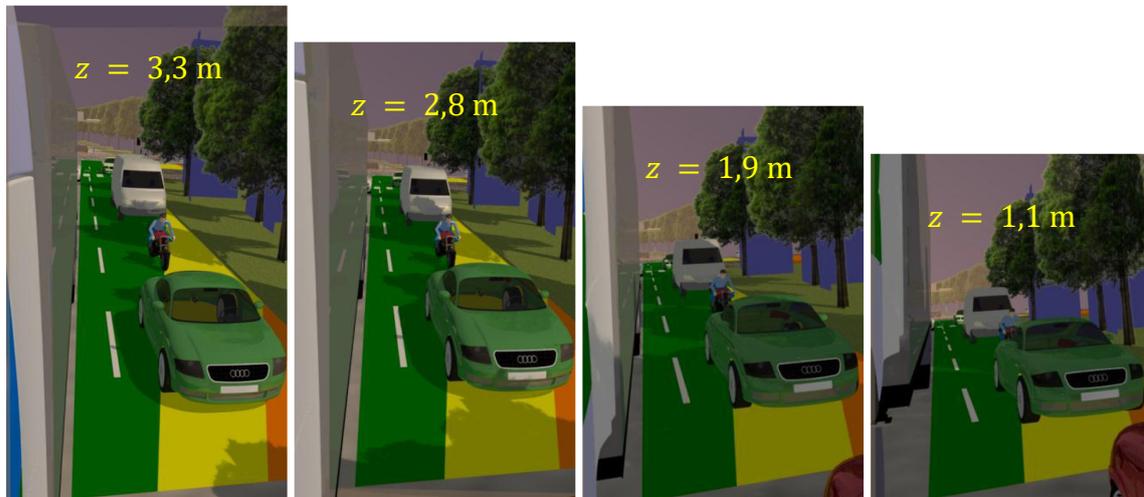


Abbildung 2-10: Perspektiven des Hauptsichtbereiches unterschiedlicher Kamerahöhen  $z$  nach Fagerström und Garlund (2012)

Die kleiner werdenden Bildhöhen resultieren aus den Anforderungen des Vergrößerungsfaktors. Da der Vergrößerungsfaktor über den Blickwinkel der Kamera auf eine Fläche am Boden bestimmt wird, ist die vorgeschriebene Monitorgröße von der Positionierung der Kamera in  $z$ -Richtung abhängig. Je niedriger die Kamera positioniert wird, umso kleiner kann das Display ausfallen, was zulasten der anzeigbaren Bildinformation geht. Besonders die bessere Übersicht über das Geschehen lässt sich in den simulierten Bildern für hohe Kamerapositionen feststellen. So ist der Motorradfahrer im ersten Bild noch gut zu erkennen, im vierten verschwindet er nahezu komplett hinter dem vorderen Fahrzeug. Es zeigt sich, dass in jedem Fall eine gewisse Kameramindesthöhe eingehalten werden sollte, die sich zumindest an der Höhe der aktuellen Spiegelsysteme orientieren wird.

### 2.5.3. Einstellbarkeit des KMS durch den Fahrer

Wegen verschiedener Augpunktpositionen verschiedener Fahrer ist es nötig, den konventionellen Spiegel entweder verstellbar zu gestalten oder in der Größe so zu dimensionieren, dass das Sichtfeld nach ECE R46 von jedem Augpunkt aus eingesehen werden kann (ECE, 2016).

Im Gegensatz dazu muss durch die unterschiedliche Wirkweise ein KMS nicht verstellbar ausgeführt werden. Der Augpunkt hat keinen Einfluss auf das vom Fahrer gesehene Bild, wenn der Blickwinkel auf das Display vernachlässigt wird. Eine Verstellung des Sichtbereiches durch den Fahrer kann aus Komfortgründen durchaus Sinn ergeben. Dabei muss genau geprüft werden, ob eine Komfortverstellung überhaupt notwendig ist. Gerade im Nutzfahrzeug werden die Spiegel vom Fahrer häufig falsch oder nicht eingestellt. Gerade der Weitwinkelspiegel ist regelmäßig zu

hoch eingestellt und verfehlt dadurch seinen Zweck, Objekte im Nahbereich zu entdecken. Die BG Verkehr (2016) hat aus diesem Grund eine Methode entwickelt, mit der die Fahrer ihre Spiegel mit einfachen Hilfsmitteln selbst richtig einstellen können. Mit einem KMS ist das Sichtfeld bereits ab Werkseinstellung für jeden Fahrer immer optimal eingestellt. Eine Einstellbarkeit eines KMS ist, wenn überhaupt, nur in einem geringen Maße sinnvoll.

## **2.6. Latenzzeit**

Da es sich beim Spiegelsystem um ein rein optisches System handelt, geschieht auch die Bildübertragung mit der Geschwindigkeit des Lichtes. Es findet somit keine Verzögerung des dargestellten Bildes statt. In KMS ist eine Verzögerung, die Latenzzeit oder einfach Latenz, von der Aufnahme des Bildes durch die Kamera bis zur Wiedergabe im Monitor unumgänglich. Die Latenz setzt sich aus den verschiedenen Einzelzeiten der Bildaufnahme, -verarbeitung und -darstellung zusammen. Die ECE R46 definiert 200 ms als maximal zulässige Latenzzeit eines KMS. Das entspricht bei 80 km/h einer örtlichen Verschiebung von ca. 4,4 m.

Technisch beschrieben ist der Blick in ein Kamera-Monitor-System somit ein Blick in die Vergangenheit. Es stellt sich die Frage, ab welcher Latenzzeit die Situation nicht mehr richtig eingeschätzt werden kann und ob der Fahrer die Latenz, auch in Kombination mit der unverzögerten direkten Sicht, bemerkt. Während der Fahrt mit einem Fahrzeug tritt der Fahrer technisch betrachtet als Regler auf. Er sammelt Informationen und steuert bzw. regelt anhand dieser Informationen sein Fahrzeug (Bubb, 2015a, S. 30). Die Latenz im KMS kann als ein zeitlicher Verzug der Führungsgröße im Regelkreis der Mensch-Maschine-Interaktion gesehen werden. Wichtige Grundfaktoren im Regelkreis sind dabei jeweils die Geschwindigkeiten und die Art der Aufgabe. Der Blick in den Spiegel kann dabei je nach Situation für eine Überwachungs-, Führungs- oder Stabilisationsaufgabe herangezogen werden (Bubb, 2015a, S. 29).

### **2.6.1. Spiegelblick als Führungs- und Stabilisationsaufgabe**

Der Blick in den Spiegel entspricht einer Kombination aus Führungs- und Stabilisationsaufgabe, wenn dieser für die Spurhaltung und die direkte Führung (der Regelung) des Fahrzeuges notwendig ist. Im Bereich des Nutzfahrzeuges lassen sich im Grunde zwei wesentliche Situationen definieren, bei denen der Blick in den Spiegel damit im Zusammenhang steht.

### **2.6.1.1. Rangieren**

Beim Rangieren verlässt sich der Fahrer größtenteils auf seine Spiegel. Der Blick in die einzelnen Spiegel ist dabei von einer langen Zeitdauer geprägt und stellt die Regelgröße für den Fahrer dar. Rangiervorgänge finden in der Regel bei niedriger Geschwindigkeit statt. Der Regelkreis wird als relativ träge beurteilt, der Einfluss der Latenz kann somit als gering und die Beherrschbarkeit als relativ hoch eingeschätzt werden.

### **2.6.1.2. Spurhalten**

Sowohl in engen Straßen und Passagen als auch generell ist es möglich, den Anfahrspiegel zur Spurkontrolle zu benutzen. Die große Breite des Fahrzeuges (bis zu 2,6 m bei Kühltransportern) erschwert die Spurhaltung im Vergleich zum Pkw. Manche Fahrer kontrollieren den Abstand zur Spurbegrenzung bzw. dem Straßenrand über den Anfahrspiegel. Der Fahrer regelt anhand des gesehenen Abstandes seine Querführung des Fahrzeuges, was nach Bubb als Stabilisierungsaufgabe (2015a, S.21) definiert ist. Dieser Fall kann als einer der kritischen in Bezug auf Latenz gesehen werden, da durch diese die Stabilisierungsgüte des Fahrzeuges bei hohen Geschwindigkeiten beeinflusst werden kann. Jedoch sind im Fall der Kontrolle des Abstandes zur Seitenlinie nur kleine Lenkbewegungen zu beobachten. Ebenso richtet der Fahrer seinen Blick nur sehr kurz in den Anfahrspiegel, um den Abstand zu kontrollieren. Bei der Lenkaktion ist der Blick meist schon wieder nach vorne gerichtet. Es wird daher davon ausgegangen, dass eine Latenz von unter 200 ms, wie sie in der ISO beschrieben ist, keinen merkbaren Einfluss auf die Regelgüte des Fahrers haben wird.

### **2.6.2. Spiegelblick als Kontrollaufgabe**

Der direkte Blick aus der Windschutzscheibe stellt die am häufigsten benutzte Informationsquelle im Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis dar. Der Blick in die Spiegel dient als weitere Informationsquelle und entspricht einer Informationsaufnahme zur Manöverplanung (Bubb, 2015b, S. 20). In diesem Fall ist die primäre Aufgabe beim Blick in den Spiegel, andere Verkehrsteilnehmer und Objekte zu entdecken, zu identifizieren und ihre voraussichtliche Position in der nahen Zukunft, der sogenannten Gegenwart der Zukunft, zu bestimmen (Bubb et al., 2015, S. 126; Pöppel, 2000; Wickens, Hollands, 2000). Aus diesen Daten setzt sich der Fahrer anschließend seinen Bewegungspfad zusammen, die sogenannte Trajektorie.

Um die Latenz für Spiegelersatzsysteme allgemein zu betrachten, werden zunächst die kritischen Situationen identifiziert, bei denen eine erhöhte Latenz negativen Einfluss haben kann. Einfach ausgedrückt liegt immer dann eine kritische Situation vor, wenn sich ein Objekt auf das eigene

Fahrzeug hinzubewegt. Das Objekt erscheint dabei im KMS weiter entfernt, als es tatsächlich der Fall ist. Bewegt sich ein Objekt beispielsweise mit einer Differenzgeschwindigkeit von 100 km/h auf das Ego-Fahrzeug zu (z. B. Auto (180 km/h) überholt Lkw (80 km/h) auf der Autobahn), erscheint das Auto pro Sekunde Latenz um 27,8 m weiter entfernt zum eigenen Fahrzeug, als es sich in der Realität bereits befindet. Bei den erlaubten 200 ms nach ISO 16505 sind dies immerhin noch 5,55 m, die das Auto weiter entfernt vermutet wird. Zu einer kritischen Situation kann es in diesem Fall kommen, wenn das Ego-Fahrzeug aufgrund des beobachteten Abstandes eine Aktion ausführt, die eine Kollision mit dem herannahenden Fahrzeug bewirken könnte. In einer Fahrsimulatorstudie am Lehrstuhl für Ergonomie wurden KMS-Latenzen von 195 ms und 336 ms (Zeiten aufgrund technischer Rahmenbedingungen an 200 ms und 300 ms angepasst) im Zuge einer Masterarbeit von Krapp (2013) untersucht. Neben den Ergebnissen zu dem gewählten Versuchsdesign, nämlich dass kein Einfluss der Latenz nachweisbar ist, ist vor allem folgende Erkenntnis von Belang: Auf Nachfragen direkt nach dem Versuch hatte keiner der 34 Probanden die Latenz der Spiegelsicht im Fahrsimulator bemerkt. Dies zeigt, dass der Fahrer das Bild als real und in Echtzeit interpretiert. Im Umkehrschluss heißt dies auch, dass der Fahrer in kritischen Situationen eventuell ein Fahrmanöver später durchführen wird oder eine andere Trajektorie plant.

Zur Beurteilung der Latenz spielen jedoch noch mehr Einflussfaktoren eine Rolle, die künftig untersucht werden müssen. Die Latenz, insofern sie in einem gewissen Rahmen bleibt, hat in bisherigen Erfahrungen keinen großen Einfluss auf das Verhalten und die Sicherheit. Ein KMS mit bekannter und konstanter Latenz und Objekterkennung kann die tatsächliche Position herannahender Objekte anhand ihrer voraussichtlichen Trajektorie berechnen und den Fahrer somit während der Fahrt unterstützen.

Es wird davon ausgegangen, dass die Ersterkennung von herannahenden Objekten im KMS aufgrund der Latenz (innerhalb des gesetzlichen Rahmens) nicht später stattfinden wird, da der Fahrer in der Regel nicht ständig in den Spiegel blickt. Beim Blick in den Spiegel ist das Objekt, das von der Ferne herannaht, somit meist schon in der Größe, in der es auch im KMS vom Fahrer entdeckt wird. Die Latenz im System wird, insofern diese im vorgeschriebenen Rahmen liegt, keinen merklichen Einfluss auf die Ersterkennung von Objekten in der Ferne haben.

Eine weitere kritische Situation ist das plötzliche Auftauchen eines Objektes im Nahbereich des Fahrzeuges, also in den Sichtfeldklassen IV, V und VI. In solchen Situationen wird dem Fahrer eine sofortige Handlung wie eine Notbremsung oder Ausweichmanöver abverlangt, um eine Kollision zu vermeiden. In diesem Fall kann sich die Latenz direkt zu der Reaktionszeit des Fahrers addieren. Es ist hier noch genau zu prüfen, welchen Einfluss die Latenz hat, und wie dieser Einfluss revidiert

werden kann. Eine Möglichkeit ist sicherlich, den Bereich seitlich am Fahrzeug zu vergrößern, um Objekte darin in einem größeren Abschnitt und somit früher erkennen zu können. Dies wird vor allem bei Systemen, die einen einzelnen Spiegel ersetzen, eine realistische Lösung sein. Durch eine verbesserte Darstellung im KMS (siehe Kapitel 5.3.2) ist es auch denkbar, dass der Fahrer Objekte früher erkennen kann, obwohl sie im Vergleich zum Spiegel latenzbehaftet sind.

## **2.7. Äußere Einflussfaktoren auf das KMS**

Wie ISO 16505 vorschreibt, sollen KMS mindestens dieselbe Bildgüte besitzen wie konventionelle Spiegel. In diesem Unterkapitel werden Eigenschaften beschrieben, die ein KMS künftig besitzen soll, um vom ergonomischen Standpunkt aus einem Spiegel gleichwertig zu sein. Im Fokus steht dabei immer das dargestellte Bild

### **2.7.1. Helligkeitsanforderungen**

Durch die unterschiedliche Technologie eines Spiegelsystems und eines KMS sind auch die kritischen Fälle beider Systeme unterschiedlicher Natur. Ein Spiegel ist im Prinzip immer ähnlich hell wie die Umgebung. Einfallendes Licht wird über den Spiegel und seine Reflexionsgrade direkt an das Auge des Fahrers gelenkt. Problematisch wird dies, wenn eine Lichtquelle über den Spiegel direkt auf den Fahrer trifft und ihn blendet. Als Beispiele können hier die tief stehende Sonne oder das Fernlicht im rückwärtigen Verkehr genannt werden. Durch die Blendung ist das Erkennen von Objekten im Spiegel erschwert bis unmöglich. Zudem wird der Fahrer durch das Licht auch bei anderer Blickrichtung geblendet. Dies wird beim KMS durch eine optimierte Platzierung und Ausrichtung der Displays vermieden. Licht, das direkt auf die Kamera fällt, führt im schlimmsten Fall zu einem überblendeten Bereich im angezeigten Bild. Der Fahrer kann in einem Teilabschnitt des Displays zwar auch nichts erkennen, wird aber zumindest nicht geblendet. Durch moderne Kameratechnologie ist sogar davon auszugehen, dass künftige KMS in Situationen mit Störlicht mehr erkennen lassen, als dies aktuell mit Spiegeln möglich ist (Leznik, Terzis, 2016). In Bezug auf Störlicht spielt auch die Positionierung der Kamera eine entscheidende Rolle. Je höher die Kamera am Fahrzeug verbaut ist, umso weniger Störlicht, beispielsweise von einem Fernlicht, gelangt in die Kamera (Rissel, 2013).

Auch bei Nachtsicht kann das KMS je nach verwendetem Sensor und Einstellung Vorteile gegenüber dem Spiegelsystem aufweisen. Ein hoher Dynamikumfang lässt die Kamera im Dunkeln mehr

erkennen, als es das menschliche Auge kann und gibt dieses dem Fahrer im Bildschirm verständlich wieder.

Da das Display des KMS im Fahrerhaus selbst eine Lichtquelle darstellt, muss die Beleuchtungsstärke der Umgebung angepasst werden. Ein zu helles Display blendet den Fahrer in der Nacht unnötig, ein zu dunkles Display macht es dem Fahrer am Tag unmöglich, das dargestellte Bild zu erkennen. Aus diesem Grund ist es unerlässlich, die Displayhelligkeit an die Umgebungshelligkeit anzupassen.

### **2.7.2. Schutz vor Verschmutzung**

Grundsätzlich gelten für Spiegel und Kameras dieselben Anforderungen. Der Fahrer muss im Falle einer zu großen Verschmutzung den Spiegel bzw. die Kamera reinigen. Vom ergonomischen Standpunkt ist die Reinigung des Spiegels verständlicher als die der Kamera. Beim Spiegel wird direkt auf die verschmutzte Stelle geblickt und durch Fokussierung auf die Spiegeloberfläche der Schmutz erkannt. Im KMS blickt der Fahrer auf das Display. Die Verschmutzung der Kamera ist nicht unmittelbar erkennbar, da diese sich im Normalfall wie ein Schleier über das komplette Bild legt, die Kamera fokussiert nicht auf die Verschmutzung, sondern auf einen Bereich im Unendlichen. Erst ab einem gewissen Verschmutzungsgrad wird der Fahrer dies bemerken (Schmidt et al., 2016). Hier kann dem Fahrer künftig Hilfestellung geboten werden, indem das KMS die Verschmutzung durch Bildbearbeitung selbst erkennt und dem Fahrer eine Empfehlung zur Reinigung ausspricht. Die Kameras müssen so am Fahrzeug platziert sein, dass der Fahrer sie ohne Mühe im Stillstand des Fahrzeuges analog zum Spiegel erreichen kann (ISO, 2015).

Alternativ ist eine Reinigungsfunktion direkt an der Kamera denkbar, wie sie heutzutage beispielsweise von Xenon-Scheinwerfern bekannt ist. Es ist abzuwarten, ob eine Reinigungsfunktion nötig ist oder ob durch eine geschickte Platzierung und aerodynamische Auslegung des Kameragehäuses eine schnelle Verschmutzung konstruktiv ausgeschlossen werden kann. Erfahrungen an Prototypen und Studien haben gezeigt, dass sich eine hohe Kameraposition positiv auswirkt (Fagerström, Garlund, 2012).

### **2.7.3. Klimatische Anforderungen**

Setzt sich Wasser in flüssiger oder fester Form an der Spiegeloberfläche oder auf der Kameralinse ab, wird die Sicht ebenfalls beeinträchtigt. Vereisung oder Taubildung auf einer Oberfläche tritt immer dann auf, wenn die Oberflächentemperatur geringer ist als der Taupunkt der Umgebungsluft. Vereinfacht gesagt ziehen kalte Oberflächen aus der wärmeren Umgebungsluft Feuchtigkeit

an. Feuchtigkeit setzt sich in flüssiger oder fester Form fest. Der Spiegel ist wegen seiner exponierten Lage einer der kühleren Punkte an einem Fahrzeug. Vollzieht das Fahrzeug einen klimatischen Wechsel, beispielsweise bei der Einfahrt in einen wärmeren Tunnel, beschlagen die Spiegel. Abhilfe gegen das Beschlagen der Spiegel bringt eine Spiegelheizung, die beispielsweise im aktuellen Fahrzeugmodell MAN TGX vom Fahrer manuell aktiviert werden kann. Beim KMS ist in der Entwicklung abzuschätzen, ob die Abwärme der Kamera ausreicht, ein Beschlagen und Vereisen zu verhindern oder ob das Objektiv eine zusätzliche Heizung benötigt, die automatisiert oder manuell aktivierbar sein kann.

Sicherheitskritisch kann die Fahrt bei niedrigen Displaytemperaturen sein. Die Bildaufbauzeit von LCD-Bildschirmen verlangsamt sich aufgrund einfrierender Flüssigkristalle bei geringen Temperaturen. Es kommt dadurch zu einer verschwommenen Darstellung bewegter Bilder und zu einer erhöhten Latenz. Diese Situation tritt im Grunde nur bei Fahrtantritt und sehr geringen Außentemperaturen auf. Der Effekt kann durch geeignete Technologie (Beispielsweise OLED statt LCD) oder einer Heizung des Displays mit kombiniertem Warnhinweis für den Fahrer bei Fahrtantritt behoben werden. Realisiert werden kann dies über eine Stopp-Meldung, wie sie auch bei geringen Druckluftstand ausgegeben wird (Seitz, 2013, S. 35). Da die Displays sich innerhalb der Kabine befinden, sind zu geringe Temperaturen im Display während des laufenden Betriebs nicht zu erwarten.

#### **2.7.4. Verfügbarkeit und Fehlverhalten**

Die Verfügbarkeit des Spiegelsystems und sein Fehlverhalten sind für den Fahrer direkt ersichtlich. Solange der Spiegel vorhanden ist, ist er verfügbar. Ist der Spiegel nicht mehr verfügbar, ist dies für den Fahrer eindeutig zu erkennen (Beispiel: abgefahrener Spiegel).

Im KMS verhält sich dieser Umstand im Grunde anders. Durch die Aufnahme des Bildes in der Kamera, der Bildbearbeitung im Steuergerät und der Darstellung auf dem Display ergeben sich mehrere Komponenten, die das System unbrauchbar machen können. Generell ist ein Spiegelersatzsystem ein sicherheitsrelevantes Fahrzeugbauteil. Ausfälle sollten über die Lebensdauer des Systems konstruktiv vermieden werden. Falls es doch zu einem Ausfall des Systems kommt, ist die Art des Ausfalls entscheidend: Wichtigste Regel in der Auslegung eines KMS muss sein, dass der Fahrer einen Ausfall des Systems leicht bemerken kann. Ein eingefrorenes Bild oder gar eine Darstellung mit zu hoher Latenz muss zwingend technisch ausgeschlossen oder durch eine Diagnose feststellbar sein. Die ISO 26262 gibt dem Entwickler ein geeignetes Werkzeug, die Aufwände in der Entwicklung zu definieren (Erber, 2014; Kaiser, 2016).

### **3. Grundlagen der menschlichen Wahrnehmung**

Der Fahrer nimmt über seine Sinneskanäle Informationen auf, die zum Steuern des Fahrzeuges notwendig sind. Die visuelle Informationsaufnahme ist im Straßenverkehr unangefochten die wichtigste zur Steuerung und Kontrolle der Eigenbewegung im räumlichen Umfeld (Gralla, 2007, S. 117; Rockwell, 1972). Es ist unbestritten, dass zur Erlangung einer Fahrerlaubnis die Untersuchung der Sehleistung gefordert ist (FeV, 2014). Dabei wird je nach gewünschter Fahrerlaubnis sowohl das Scharfsehen, das Farbsehen als auch das periphere Gesichtsfeld überprüft.

Das vorherige Kapitel erörtert die Anforderungen an einen Spiegelsatz anhand der aktuellen Spiegelsysteme in den Grundzügen. Um das KMS jedoch nicht nur so gut wie den Spiegel zu machen, sondern einen höheren Nutzen für den Fahrer zu generieren, ist es wichtig die Nutzung des aktuellen Spiegelsystems zu analysieren und zu verstehen. In diesem Kapitel wird daher die optische Wahrnehmung des Menschen in der Theorie genauer betrachtet. Hierbei werden sowohl die sensorische Leistungsfähigkeit (Kapitel 3.1) sowie die dazugehörigen Wahrnehmungsmodelle der Kognition (Kapitel 3.2.3) erörtert und am Spiegelsystem in Kapitel 3.3 analysiert. Letztendlich können aus diesen Erkenntnissen Hypothesen zur realen Spiegelnutzung, die in Kapitel 4 erörtert werden, sowie Anforderungen an Spiegelsatzsysteme (siehe Kapitel 5) aufgestellt werden.

#### **3.1. Das menschliche Auge**

Aufbau und Funktion des Auges sind in vielen Büchern und Veröffentlichungen beschrieben. Der hier beschriebene Abschnitt stellt die Funktion des Auges in Hinsicht auf den späteren Inhalt der Arbeit dar. Weitergehende Information ist unter folgenden Quellen zu finden, die ebenso maßgeblich zur Erstellung des Kapitels verwendet wurden: (Grehn, 2009; Heydecker, 1990, S. 3-17; Hunziker, 2006; Mather, 2009, S. 169-228; Remlinger, 2013, S. 21-27)

Um den Einfluss des Sehens beurteilen zu können, ist es wesentlich den Grundaufbau und die Funktionsweise des menschlichen Auges zu verstehen. Im Grunde ist das Auge ein Organ, das optische Signale in einem Wellenlängenbereich von 380 nm bis 780 nm in elektrische Signale umwandelt. Diese werden an das Gehirn weitergeleitet, das die Bildverarbeitung übernimmt. Das Auge selbst besteht aus einem optischen Apparat und der Signalweiterleitung. Hinsichtlich des optischen Apparates kann das Auge mit einer Kamera verglichen werden. Der Aufbau des Auges

ist in Abbildung 3-1 gezeigt. Das von der Umgebung abgestrahlte Licht wird im Auge auf die Netzhaut geleitet. Dabei erfolgt eine automatische Scharfstellung und Helligkeitsregelung. Die Netzhaut wandelt das Licht in einem fotochemischen Prozess in elektrische Signale um, die über Nervenfasern an das Gehirn geleitet werden.

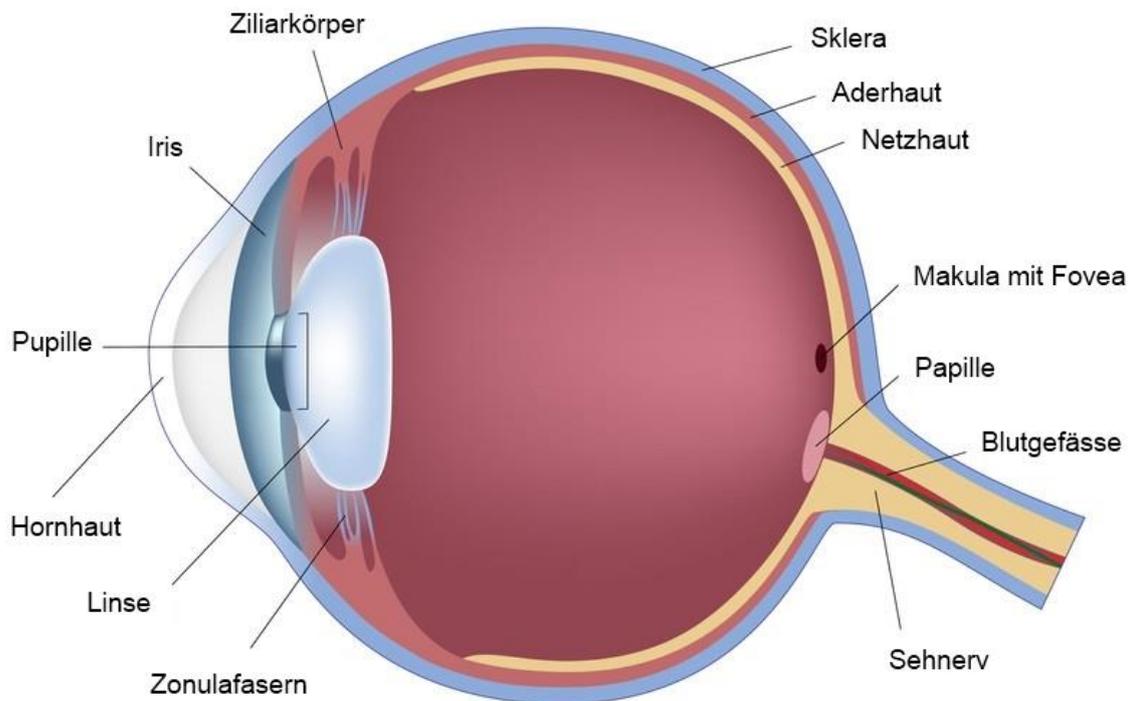


Abbildung 3-1: Schematischer Aufbau des Auges (Böhm, Lux, 2014)

Die beiden menschlichen Augen sind spiegelbildlich identisch aufgebaut. Beide Augen sind als Kugeln in einem Fettpolster innerhalb der knöchernen Augenhöhle gebettet, beweglich ausgeführt und können um verschiedene Achsen rotiert werden. Die Augen des Menschen sind frontal ausgerichtet, was evolutionär beispielsweise häufig bei Jagdtieren vorkommt (Glaeser, Paulus, 2014). Nicht nur für die Jagd, auch zum Klettern sind frontal ausgerichtete Augen wegen der genauen Entfernungsabschätzung vorteilhaft. Es ist zu vermuten, dass die Augausrichtung des Menschen aus dieser Anforderung entstammt. Die Augen sind dabei so gekoppelt, dass beide Augen dasselbe Objekt fixieren können. Durch die Betrachtung der Szenerie aus zwei leicht unterschiedlichen Blickwinkeln wird vor allem in der Nähe ein dreidimensionales Bild wahrgenommen. Für die dreidimensionale Wahrnehmung in der Ferne sind andere Effekte wie beispielweise Bewegungsparrallaxe und bildbezogene Tiefenreize verantwortlich (Goldstein, 2008, S. 185-213).

Der Erfassungsbereich des menschlichen Sehens wird als Gesichtsfeld bezeichnet und ist der Bereich, der durch die beiden unbewegten Augen wahrgenommen werden kann. Das Gesichtsfeld

erstreckt sich je nach Literatur horizontal zwischen  $155^\circ$  und  $200^\circ$  und vertikal zwischen  $120^\circ$  und  $150^\circ$  (Gralla, 2007, S. 5-30).

Das Sichtfeld, das durch zusätzliche Bewegungen der Augen und des Kopfes erreicht werden kann, wird als Blickfeld (Kopf unbewegt) oder Umblickfeld bezeichnet (Gralla, 2007, S. 10-14). Das Umblickfeld besitzt nur die Restriktionen, die aufgrund der aktuellen Position zwangsläufig entstehen, wie beispielsweise beim Fahrzeug das Sitzen auf dem Fahrersitz.

### **3.1.1. Eigenschaften des optischen Apparates**

Der optische Apparat sorgt dafür, dass einfallendes Licht auf die Netzhaut geleitet wird. Das Licht passiert zuerst die durchsichtige Hornhaut. Bevor die Lichtstrahlen die Linse passieren, werden sie durch die regelbare Ringblende des Auges, die Iris, geleitet. Die Blendenöffnung ist als Pupille bekannt. Die Pupille verengt bzw. erweitert sich in Abhängigkeit von der Leuchtdichte.

Um für verschiedene Entfernungen ein scharfes Bild zu erhalten, muss die Brennweite des Auges verändert werden. Im Normalzustand ist das Auge auf ein Sehen in die Ferne eingestellt. Bei Betrachtung näher gelegener Gegenstände wird die Brennweite des Auges durch Kontraktion der Linse verringert. Diese Regelung der Tiefenschärfe des menschlichen Sehens, auch Akkommodation genannt, wird mithilfe der Ziliarmuskeln realisiert. Durch den Zug der Fasern wird die Linse flacher (Glaeser, Paulus, 2014, S. 19). Durch Entspannung der Fasern findet die Linse automatisch in ihre kugelförmigere Form zurück. Hinter der Linse findet das Licht seinen Weg auf die Netzhaut durch den transparenten Glaskörper. Der optische Apparat ist technisch einem Objektiv mit Autofokus und automatischer Blende ähnlich.

#### **3.1.1.1. Akkommodationsfähigkeit und Presbyopie**

Die Akkommodationsfähigkeit, also die Fähigkeit des Auges jeweils auf die Entfernung eines Objekts zu fokussieren, lässt mit steigendem Alter nach. Grund hierfür ist eine Veränderung der Linse, die über ihre Lebensdauer an Elastizität verliert. Dieser Effekt wird Presbyopie oder umgangssprachlich Alterssichtigkeit oder Altersweitsichtigkeit genannt. Es handelt sich nicht um eine Krankheit, sondern technisch ausgedrückt um einen Effekt von Materialermüdung, den jeder Mensch durchlebt. Die Akkommodationsbandbreite sinkt von ca. 15 Dioptrien Brechkraft im Kindesalter auf bis unter einer Dioptrie in einem Alter über 60 Jahren. Der Kehrwert der Brechkraft stellt dabei die Entfernung dar, auf die ein Mensch das Objekt ohne Hilfsmittel, wie beispielsweise Lesebrille oder Lupen, scharf sehen kann. Abbildung 3-2 zeigt die Akkommodationsfähigkeit über

das Lebensalter, die an über 4200 Probanden mithilfe einer subjektiven Messmethode gemessen wurde, nämlich der Annäherung von Sehzeichen an den Probanden (Baumeister, Kohnen, 2008).

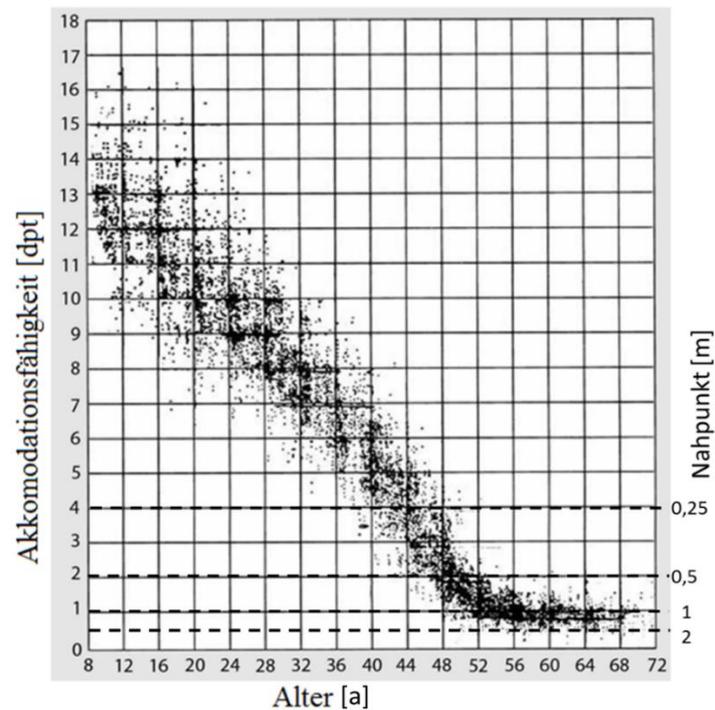


Abbildung 3-2: Akkommodationsfähigkeit über Lebensalter (Baumeister, Kohnen, 2008, S. 599)

Neben der Kontraktion der Linse bewirkt eine Verengung der Pupille ebenso einen positiven Effekt auf die Nahakkommodation. Wie aus der Fotografie bekannt, erhöht sich die Tiefenschärfe bei einer kleinen Blendenöffnung, das heißt Objekte vor und hinter der eigentlichen Fokusebene werden auch noch in einem größeren Abstand scharf abgebildet. Diesen Effekt macht sich der Mensch bei Fixierung naher Objekte zunutze (Haferkorn, 1981). Bei der subjektiven Messung von Sehschärfen in der Nähe ist somit auch die Objekt- und Umgebungshelligkeit ein entscheidender Faktor, da dieser die Pupillengröße maßgeblich beeinflusst. Können bei gut ausgeleuchteten Objekten noch Details erkannt werden, ist dies bei etwas weniger Leuchtstärke schon nicht mehr möglich. Zeitungsleser im Alter von ca. 50 Jahren werden diesen Effekt gut kennen.

### 3.1.2. Eigenschaften der Signalumwandlung und -weiterleitung

Nachdem das Licht den optischen Apparat durchlaufen hat, kommt es an der Schnittstelle zwischen optischem Apparat und Signalweiterleitung, der Netzhaut, an. In der Netzhaut wird das optische Signal in ein elektrisches gewandelt. Werden in einer digitalen Kamera die Lichtsignale auf Pixeln empfangen, geschieht dies beim Menschen durch Zapfen (photopisches Sehen) und Stäbchen (skotopisches Sehen), die sich auf der Netzhaut befinden. Die Netzhaut besteht aus ca.

sechs Millionen Zapfen und 120 Millionen Stäbchen (Freiding, 2010; Hunziker, 2006). Die Zapfen unterteilen sich in drei verschiedene Typen, die sich im Wesentlichen hinsichtlich der Sensibilität gegenüber verschiedenen Wellenlängenbereichen unterscheiden. Im Farbspektrum entspricht dies den Farbeindrücken Rot, Grün und Blau. Die Farbwahrnehmung des Menschen geschieht über die Zapfen.

Im Unterschied dazu detektieren die Stäbchen Helligkeiten im Lichtspektrum des menschlichen Sehens, geben also eine Art von schwarz-weiß empfundenem Bild wieder. Stäbchen sind im Gegensatz zu den Zapfen sehr lichtsensitiv, können also auch schon bei relativ geringer Leuchtstärke Signale empfangen. Dies ist der Grund, warum Menschen bei Dunkelheit nur schwarz-weiß wahrnehmen können (Mather, 2009, S. 237).

Im Gegensatz zu Kameras sind die Rezeptoren auf der Netzhaut nicht gleichmäßig angebracht. Der generelle Aufbau des Auges und die Sehzellendichte über den Blickwinkel sind schematisch in Abbildung 3-3 zu sehen. Aus der Verteilung geht hervor, dass in der Hauptsehrichtung, also dem fovealen System, wie es in links in der Abbildung 3-3 beschrieben ist, eine hohe Zapfenkonzentration vorherrscht, dies ermöglicht eine scharfe Darstellung der Umwelt in einem sehr kleinen Bereich. Die Stäbchen sind in der Fovea (fast) nicht vorhanden und machen größtenteils das periphere Sehen aus (Böhm, Lux, 2014; Grehn, 2009; Hunziker, 2006).

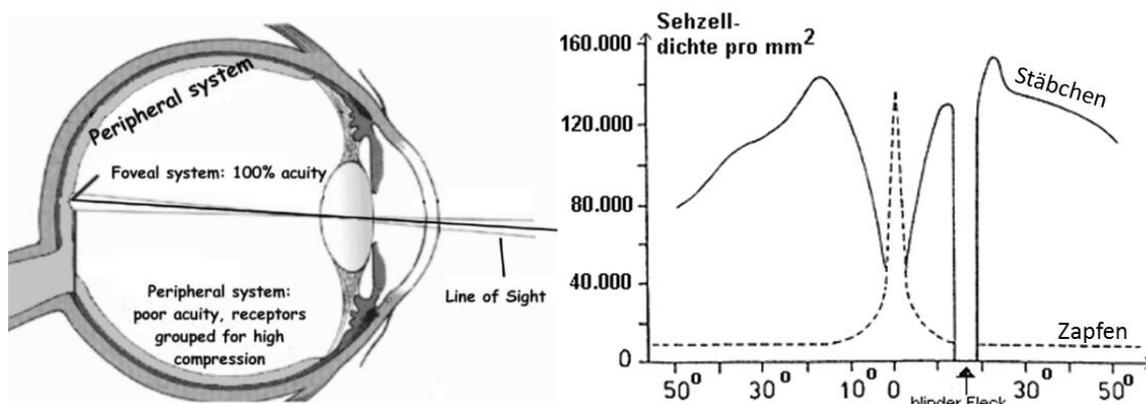


Abbildung 3-3: Links: Schematischer Aufbau des Auges (Hunziker, 2006). Rechts: Sehzellendichte des Auges über den Blickwinkel (Lingg, 2014)

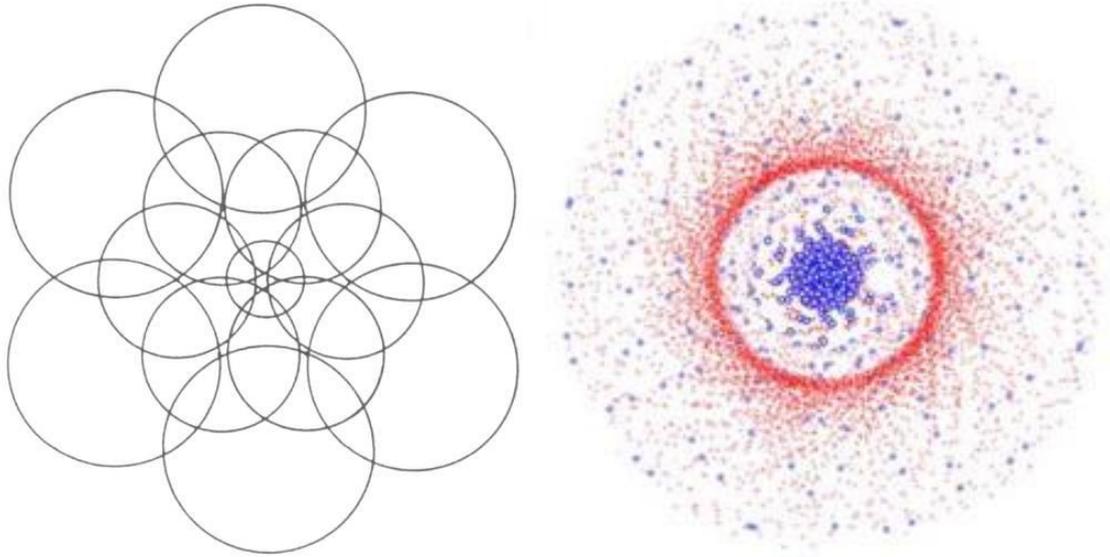


Abbildung 3-4: Links: Überlappende rezeptive Felder im Gesichtsfeld (schematisiert dargestellt) (Nemetz, Harrer, 1987 zit. nach Gralla, 2007). Rechts: Sehzellendichte des Auges (qualitativ, blau – Zapfen, rot – Stäbchen) über den Blickwinkel (Lingg, 2014)

Abbildung 3-4 zeigt schematisch die Verteilung und nervliche Verschaltung der Sehzellen. In der Fovea ist jeder Zapfen mit einer Nervenfasern verbunden. Außerhalb der Fovea sind mehrere Rezeptoren, hauptsächlich Stäbchen und wenige Zapfen, zusammen mit einer Nervenfasern verknüpft. Die Anzahl der Rezeptoren, die auf eine Nervenfasern konvergieren, nehmen zur Netzhautperipherie zu (Gralla, 2007). Dieser Zusammenschluss geschieht überlappend. Das heißt, das Signal eines Rezeptors kann auch auf zwei Sehnerven geleitet werden. Aus diesem Umstand entstehen rezeptive Felder, die sich schneiden und von der Fovea nach außen größer werden. Die Bündelung vieler Stäbchen und weniger Zapfen bewirkt wiederum eine noch höhere Lichtempfindlichkeit. So ist in der Peripherie die Lichtsensitivität um ca. den Faktor 500 höher als in der Fovea.

Die ca. 1,6 Mio. Nervenfasern bündeln sich in der Papille, der auch blinder Fleck genannt wird, und treten nach hinten aus dem Auge aus. In der Papille befinden sich keine Rezeptoren, sodass der Mensch in diesem Bereich blind ist, was er jedoch wegen des zweiten Auges und durch Bildverarbeitungsprozesse im Gehirn nicht bemerkt. Die Nervenbündel laufen direkt ins Gehirn, wo die Verarbeitung der empfangenen Daten geschieht.

## 3.2. Wahrnehmung

Dieser Abschnitt wurde in wesentlichen Teilen schon vorab in einem Buchabschnitt des *Handbook of Camera Monitor Systems* vom Autor veröffentlicht (Zaindl, 2016).

Aus den Eigenschaften der Physiologie und Anatomie des menschlichen Auges und der bildverarbeitenden Prozesse im Gehirn ergeben sich die Eigenschaften der menschlichen optischen Wahrnehmung. In diesem Kapitel wird dabei speziell auf die Eigenschaften eingegangen, die zur Gestaltung eines KMS von Bedeutung sind (Böhm, Lux, 2014; Lingg, 2014; Werner, 1935; Woyna, 2013; Yarbus, 1967).

### 3.2.1. Foveale und periphere Sicht

Die menschliche optische Wahrnehmung lässt sich in die foveale Sicht und das periphere Sehen untergliedern. Beide Arten des Sehens komplementieren sich zu einem leistungsstarken Gesamtkonstrukt, das die menschliche optische Wahrnehmung ausmacht. Um die gesamtheitliche Wahrnehmung des menschlichen Auges und die Kognition zu verstehen, ist es unumgänglich, beide Arten des Sehens und ihre kombinierte Wirkweise zu verstehen (Zaindl, 2016).

#### 3.2.1.1. Foveales Sehen

Die hohe Anzahl an Farbrezeptoren in der Sehgrube (ca. 140 000 Zapfen pro mm<sup>2</sup>) bewirkt einen Effekt, der am besten mit einem Teleobjektiv zu vergleichen ist. In einem sehr kleinen Winkelbereich der Foveola, dem innersten Bereich der Fovea (ca. 0,7°), ist eine enorm große Detailgenauigkeit (relativer Visus von ca. 0,8 bis 1,0) und Schärfe des (Tag-)Sehens feststellbar, wobei die Sehschärfe zum Rand der Fovea, auch Fovea centralis genannt (ca. 2,5°), schon auf unter 0,5 absinkt. Die Sehschärfe über den Blickwinkel ist in Abbildung 3-5 visualisiert. Das foveale Sehen beansprucht ungefähr die Hälfte der Nervenleitungen des Sehnervs, wobei jeder Zapfen an eine Nervenfasern gekoppelt ist (Hunziker, 2006).

Einschub: Über den relativen Visus ist die Auflösung der Sehschärfe des Menschen definiert. Dabei ist der relative Visus der Kehrwert des kleinsten auflösbaren Winkels (in Bogenminuten gemessen). Ein Visus von 1 (oder 100 %) bedeutet also, dass der Mensch in der Foveola einen Winkel von einer Bogenminute auflösen kann. Die anerkannte Messmethode arbeitet mit Landoltringen, das sind auf einer Seite geöffnete Ringe. Die Angabe des Visus in Prozent hat sich in der Umgangssprache etabliert, suggeriert jedoch, dass bei 100 % die

maximale Auflösungsfähigkeit erreicht sei. In Wahrheit kann aber durchaus mehr erreicht werden.

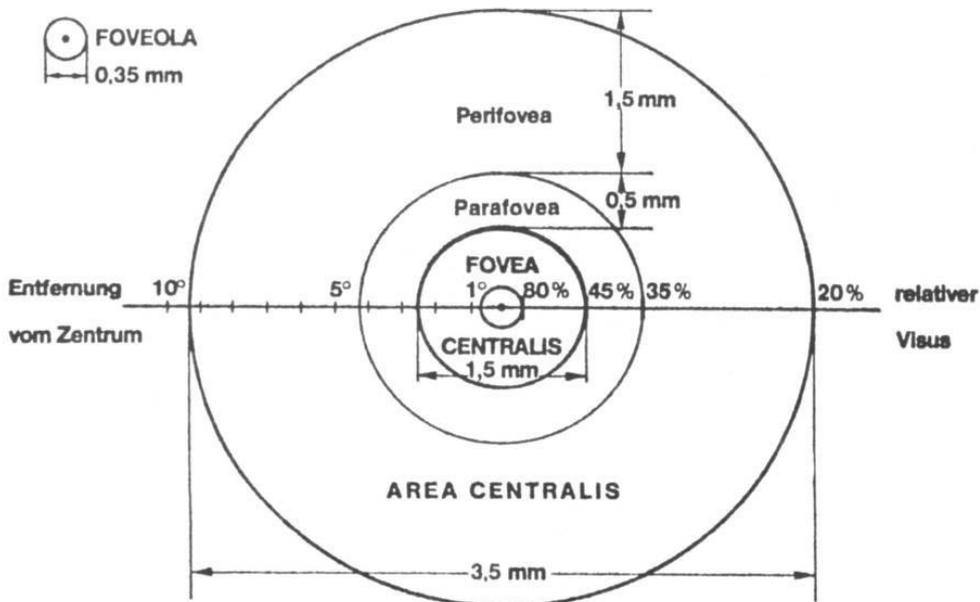


Abbildung 3-5: Ausdehnungsangaben für den zentralen Netzhautbereich (Gralla, 2007, mod. nach Goersch, 1983)

Das foveale Sehen umfasst somit den Bereich, der scharf und vor allem bewusst wahrgenommen wird. Nicht von ungefähr bestimmt der Mensch seine Sehleistung im Allgemeinen anhand der fovealen Sicht. Sehhilfen wie beispielsweise Brillen werden auf das foveale Sehen optimiert. Erst nachgelagert werden Tests zur Bestimmung der peripheren Sehstärke durchgeführt.

Die farbempfindlichen Zapfen, die in der Fovea centralis ausschließlich anzutreffen sind, benötigen im Vergleich zu den Stäbchen, die in der Peripherie vermehrt auftreten, eine höhere Lichtmenge und somit eine höhere Belichtungszeit, um ein Signal empfangen und weiterleiten zu können. Eine erhöhte Belichtungsdauer hat analog zu Bildsensoren die Eigenschaften, dass zum einen weniger Einzelbilder pro Zeitabschnitt aufgenommen werden können und dass zum anderen das Bild erst verzögert weitergeleitet werden kann.

Durch den Teleobjektiveffekt der Fovea identifiziert der Mensch Gegenstände auf weite Entfernungen. Der Sichtbereich der Fovea centralis entspricht mit ca. 2,5° Ausdehnung weit weniger als einem Promille des menschlichen Gesichtsfeldes. So kann der Mensch beispielsweise auf eine Entfernung von 2 m lediglich einen Bereich von etwa 9 cm Durchmesser scharf wahrnehmen, was in

etwa der Größe einer Zigarettenschachtel entspricht. Dabei ist das Auflösungsvermögen am Rand der Fovea bereits auf weniger als 50 % der zentralen Sehschärfe reduziert.

Das scharf Sehen und die Wahrnehmung der Fovea ist als ein eher langsames System zu verstehen. Um Objekte scharf sehen zu können, muss sich das komplette Auge zusätzlich bewegen und die Zentrallinie auf das Objekt richten. Schnelle und sprunghafte Blickbewegungen werden Sakkaden genannt. Es werden generell zwei Arten von Sakkaden unterschieden: Inspektionssakkaden (auch Scanning-Blicke genannt) zur Erkundung der Umwelt und Zielsakkaden (Processing-Blicke) zur gezielten Ausrichtung auf ein Objekt (Hagendorf et al., 2011, S. 93).

Im Anschluss an die Sakkade, also nachdem der Blick auf ein Objekt gerichtet ist, benötigt der Mensch zusätzlich mindestens 200 ms um den Bereich zu identifizieren (Werner, 1935; Woyna, 2013). Die Fixationsdauer, die Zeitdauer, wie lange ein Objekt im Fokus des Menschen bleibt, liegt im Straßenverkehr typischerweise in einem Bereich von 200 ms bis 800 ms (Schweigert, 2003; Yarbus, 1967). Im Gegensatz zu den Sakkaden werden relativ langsame und gleitende Folgebewegungen ausgeführt um langsame Objekte zu verfolgen (Rötting, 2001, S. 15). Diese Folgebewegungen treten nur nach einem Führungsreiz auf, das Objekt bleibt dabei fixiert (Kramer, 2008, S. 149).

Erst im Anschluss an eine Fixation kann der nächste Reiz fokussiert werden, was wiederum die Zeit der Sakkade und Fixation in Anspruch nimmt. Ein gleichzeitiges parallelisiertes Konzentrieren auf mehrere Objekte ist nicht möglich, sondern muss nacheinander, also sequenziell, geschehen.

Das foveale Sehen kommt in der Natur häufig bei Jagdtieren vor. Die Funktionsweise kann folgendermaßen beschrieben werden: Die Entdeckung des Opfers ist für den Jäger zeitlich unkritisch. Ein Adler (als Sinnbild für das foveale Sehen) kann lange Zeit durch die Luft segeln und nach einem potenziellen Opfer Ausschau halten, indem er den Boden Stück für Stück absucht. Für den Jäger ist wichtig das Opfer aus großer Entfernung zu erspähen, damit dieses den Jäger wiederum nicht frühzeitig entdeckt und flieht. Ein Adler kann beispielsweise selbst in 600 m Höhe noch eine Maus von einem gleichfarbigen und gleich großen Stein unterscheiden. Nach dem Erkennen wird das Opfer so lange foveal fixiert, bis der Jagdvorgang abgeschlossen ist. Das Umfeld ist für den Jäger nicht zwingend von Interesse. Wichtig ist das Ziel in weiter Ferne zu erspähen, zu fixieren und nicht aus dem Blick zu lassen. Es wird vielfach der Vergleich mit einem Tunnelblick oder mit dem Blick durch ein Fernglas herangezogen (Glaeser, Paulus, 2014, S. 85; Zaindl, 2016).

Da die Zentrallinie durch die Augausrichtung eine relativ einfach messbare Größe darstellt, ist die Blickerfassung und dadurch das Aufzeichnen und Analysieren des fovealen Sehens ein häufig verwendeter Untersuchungsgegenstand bezüglich der menschlichen Wahrnehmung und der daraus zu ziehenden Rückschlüsse.

### **3.2.1.2. Peripheres Sehen**

Um das foveale Sehen herum findet das Randsehen statt, fachsprachlich peripheres Sehen genannt. Es ist für die gesamtheitliche Wahrnehmung verantwortlich. Über 99,9 % des Gesichtsfeldes des Menschen werden peripher wahrgenommen. Die Dichte der Zapfen außerhalb der Sehgrube sinkt rasant, wohingegen die Stäbchen zum Rand der Fovea die höchste Dichte aufweisen. Für das periphere Sehen sind in etwa genau wie für das foveale Sehen ca. 50 % der Datenleitungen, also die Nervenbahnen, an das Sehzentrum im Gehirn vorgesehen. Die Information wird komprimiert an das Gehirn geleitet. Dies geschieht, wie Kapitel 3.1.2 beschreibt, durch eine Verschaltung mehrerer Sehzellen zu einer Nervenfaser. Durch den Zusammenschluss können die ohnehin schon lichtempfindlichen Zapfen, aus denen das periphere Sehen zum Großteil besteht, noch kürzer belichtet werden. Die Verschaltung erfolgt zudem so, dass vor allem Bewegungsreize wahrgenommen werden. Das Ergebnis ist eine sehr schnelle, aber auch verschwommene Wahrnehmung, insbesondere von Bewegungsrichtungen und Geschwindigkeiten. „Einen Sonderfall peripherer Beobachtungsaufgaben stellt dabei die Wahrnehmung zeitlich paralleler, aber räumlich voneinander getrennter Vorgänge dar“ (Gralla, 2007, S. 117).

In der Natur ist das periphere Sehen bei Fluchttieren besonders ausgeprägt. Als Beispiel für das periphere Sehen kann der Hase gezeigt werden. Als Fluchttier ist er darauf angewiesen eventuelle Jäger, die in den Gefahrenbereich kommen, schnell wahrzunehmen. Dabei ist die Sehschärfe beim Hasen nicht von größter Bedeutung. Er muss seinen Jäger, der meist größer ist und somit leichter wahrzunehmen, nur in relativ geringer Entfernung erkennen können. Durch das große Sichtfeld und die ganzheitliche Wahrnehmung hat der Hase auf der Flucht einen entscheidenden Vorteil. Er kann sich hervorragend im Raum orientieren und parallel neben dem Jäger weitere Objekte wahrnehmen, ohne den Blick auf diese richten zu müssen. Dadurch wird auch die Fluchttaktik des Hasen verständlich. Er schlägt Haken und macht schnelle Richtungswechsel. Der Hase entflieht aus dem fovealen Sichtfeld seines Jägers, der sich erst wieder neu orientieren muss.

### **3.2.1.3. Kombinierte Wirkweise peripherer und fovealer Sicht**

Aus den Beispielen wird deutlich, dass beide Arten des Sehens unterschiedlichen Zwecken dienen. Beim fovealen Sehen fokussiert sich die Wahrnehmung auf einen Punkt. Beim Menschen ist dieser

Punkt meist das, was aktiv wahrgenommen wird und auf das er sich konzentriert. Anders bei der peripheren Sicht: Die Wahrnehmung in der Peripherie geschieht im Normalfall unbewusst. Beide Arten des Sehens können als gleich wichtig angesehen werden. Ohne foveale Sicht kann kein Objekt identifiziert oder beispielsweise ein Buch gelesen werden. Ohne die periphere Sicht ist der Mensch faktisch blind. Das Gesichtsfeld ist so stark eingeschränkt, als würde er „durch ein Flintenrohr oder durch einen Tunnel blicken“ (Leydhecker, 1990, S. 133). Die Eigenschaften der fovealen und peripheren Sicht werden in folgender Tabelle zusammengetragen.

Tabelle 2: Unterschiede zwischen peripherem und fovealen Sehen des Menschen (Zaindl, 2016)

	<b>Peripheres Sehen</b>	<b>Foveales Sehen</b>
<b>Anteil Gesichtsfeld</b>	>99,9 %	<0,1 %
<b>Anteil Sehnerven</b>	≈50 %	≈50 %
<b>Art des Sehens</b>	Helligkeitssehen (schwarz-weiß)	Farbsehen
<b>Lichtempfindlichkeit</b>	hohe Lichtempfindlichkeit	niedrige Lichtempfindlichkeit
<b>Sehschärfe</b>	geringe bis sehr geringe Sehschärfe	hohe Sehschärfe
<b>kognitive Ebene</b>	Objekterkennung	Objektidentifikation
	gute Bewegungserkennung	gute Objektverfolgung (Fixierung)
	zufälliges Entdecken im großen Blickfeld	gezieltes Spähen im sehr kleinen Blickfeld
	parallele Wahrnehmung von Objekten	fixierte Wahrnehmung eines Objekts
	Orientierung im Raum	exakte Zielführung
<b>Evolutionärer Zweck</b>	Entdecken von Objekten	Fixierung auf Objekte

Der Mensch kombiniert durch das Zusammenspiel die Vorteile beider Arten des Sehens zur menschlichen Wahrnehmung. Mit Ausnahme des Spähens in der Ferne werden Objekte in der Regel peripher erkannt und im Anschluss foveal identifiziert. Dabei wird in der Peripherie bereits unbewusst eine Vorauswahl getroffen, welche Objekte foveal fixiert werden. Entscheidend für die

Vorauswahl ist die Größe des Reizes und die Erwartung bzw. Erfahrung des Menschen. Je größer der Bewegungs- oder Helligkeitsreiz ist, umso wahrscheinlicher ist die Vorauswahl.

### 3.2.2. Der optische Fluss

Wichtig für die Leistungsfähigkeit der Objekterkennung, die vornehmlich in der Peripherie geschieht, ist der auch in der Bildverarbeitung bekannte optische Fluss. Der optische Fluss beschreibt Bewegungen in einer Abfolge von Bildern. Bewegen sich Objekte unterschiedlich zum eigentlichen optischen Fluss, wird dies als Reiz wahrgenommen, dem meist reflektorisch eine Neuorientierung der Augen und des Körpers folgt (Gralla, 2007). Wichtig für die Leistungsfähigkeit der Objekterkennung ist ein durchgängiger optischer (Grund-)Fluss. Jede lokale Umdrehung oder Änderung des optischen Flusses, wie es beispielsweise beim Sehen über einen Spiegel geschieht, bedeutet einen kognitiven Mehraufwand.

Da das Prinzip des optischen Flusses auf dem Vergleich von nacheinander aufgenommenen Einzelbildern beruht, wird dieser bei jeder Sakkade unterbrochen und muss neu begonnen werden. Bei hoher visueller Belastung (viele relevante Blickreize) kann es passieren, dass durch die häufigen Blickwechsel die Leistungsfähigkeit der visuellen Wahrnehmung verringert wird.

Der bei einer Eigenbewegung entstehende optische Fluss besitzt einen Fernpunkt, an dem keine Relativgeschwindigkeit erkennbar ist. Bewegt sich der Mensch auf diesen Fernpunkt zu, kommt ihm der optische Fluss entgegen; bewegt sich der Mensch von diesem Punkt weg, entfernt sich der optische Fluss von der Person (siehe Abbildung 3-6). Die Position des Ruhepunkts definiert physikalisch gesehen die Bewegungsrichtung der Person.

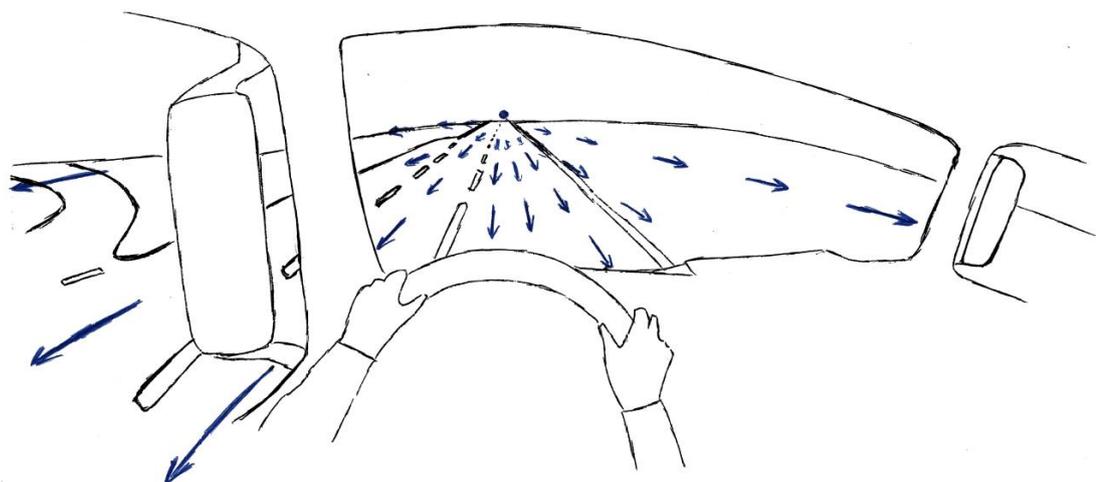


Abbildung 3-6: Optischer Fluss – Expansion aus der Perspektive eines Lkw-Fahrers bei der Fahrt auf einer Landstraße (Zaindl, 2016, mod. nach Gibson, 1950, S. 121)

### 3.2.2.1. Der Fernpunkt und die Zone der optischen Ruhe

Der Fernpunkt, auch Fluchtpunkt oder Punkt des Auseinanderfließens genannt, ist von herausragender Bedeutung für die Orientierung des Menschen. Die foveale Sicht wird naturgemäß häufig auf den Fernpunkt oder seine Nähe, als Ziel der Bewegungsrichtung gerichtet. Der optische Fluss verläuft gleichmäßig zu diesem Punkt hin oder von ihm weg (Bubb et al., 2015, S. 130). Bei Fahrten ohne besondere Zusatzaufgabe, beispielsweise bei einer Fahrt auf einer wenig befahrenen Landstraße, entfallen 90 % der Fixationen auf einen Bereich von  $4^\circ$  um den Fernpunkt (Rockwell, 1972; Vollrath, Krems, 2011, S. 29). Schweigert untermauert die Bedeutung des Fluchtpunktes in seiner Dissertation. In seinen Versuchen im Realverkehr entfallen durchschnittlich ca. 50 % der Fixationen auf den Fernpunkt oder auf das vorausfahrende Fahrzeug (Schweigert, 2003, S. 89).

Streng genommen existiert der Fernpunkt nur bei exakter Geradeausfahrt. Bei einer Kurvenbewegung dreht sich der Mensch um eine Achse, die als Einzige in der Wahrnehmung des Menschen unbewegt bleibt. Dieser Drehpunkt entspricht jedoch per definitionem nicht dem Fernpunkt, da dieser nicht der Bewegungsrichtung des Fahrers entspricht. Remlinger definiert und berechnet in seiner Arbeit eine Zone optischer Ruhe:

Innerhalb dieser Zone ist kein optischer Fluss für den Fahrer erkennbar, da sich das Umfeld direkt auf ihn zu bewegt. Deshalb ist der optische Fluss mit einer Geschwindigkeit von weniger als zwei Bogenminuten pro Sekunde ( $2'/\text{sec}$ ) für ihn nicht wahrnehmbar (Remlinger, 2013, S. 105).

Dies betrifft beispielsweise Bereiche des Hecks eines direkt voraus befindlichen stehenden Fahrzeuges. In Abbildung 3-7 ist die Zone optischer Ruhe bei konstanter Kurvenfahrt dargestellt.

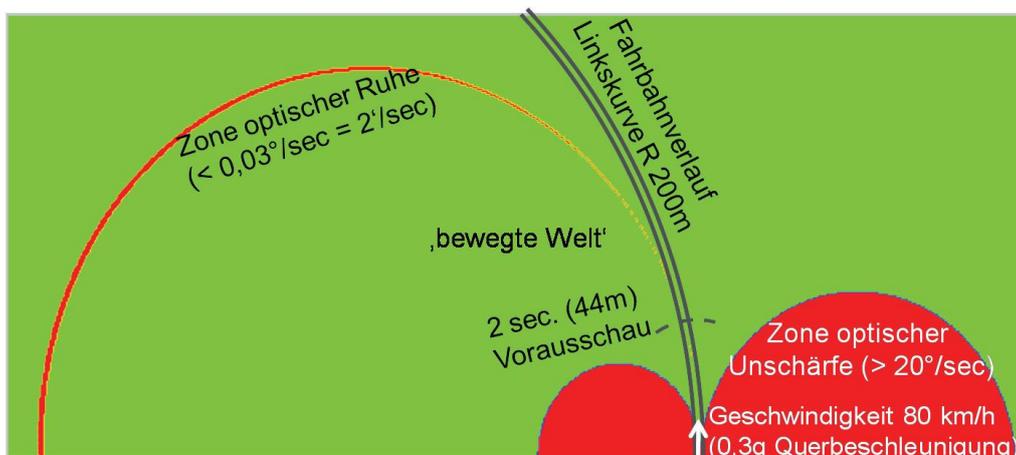


Abbildung 3-7: Zone optischer Ruhe (Remlinger, 2013, S. 105)

Ein Ansatz den Fernpunkt bzw. den Punkt der fovealen Fixierung bei der Fahrt zu definieren, ist den Fernpunkt als den maximalen Vorausblick innerhalb der erlebten Realität zu sehen. Nach Pöppel ist das Zeitfenster der Gegenwart im Bereich von zwei Sekunden nach vorne in die Gegenwart gerichtet (Pöppel, 2000). Der Fahrer fixiert also den Punkt, den er bei gleichbleibender Geschwindigkeit und Lenkwinkel in zwei Sekunden überstreichen wird. Remlinger (2013) hat dieses Verhalten insbesondere durch Fixation in stationären Kreisfahrten überprüfen und bestätigen können.

Einschub: Auffällig in Abbildung 3-7 ist die Zone optischer Unschärfe. In diesem Bereich kann der Mensch aufgrund der hohen Geschwindigkeit des optischen Flusses kein Bild der Umgebung mehr auflösen. Wird die Geschwindigkeit des optischen Flusses in der indirekten Sicht durch den  $M$ -Faktor  $< 1$  reduziert, kann vom Menschen in dem Bereich wieder ein Bild der Umgebung erfasst werden. Ein großer  $M$ -Faktor ist somit nicht in jedem Fall positiv, sondern kann die menschliche Wahrnehmung auch einschränken, siehe auch Kapitel 5.2.2.

In den Versuchen zur Spiegelnutzung im Realverkehr, die in Studienarbeiten (Franke, Fröhlich, 2013; Starflinger, 2012) im Rahmen der Dissertation entstanden, wird auch die direkte Sicht aus einem Lkw analysiert. Auch hier wird die Wichtigkeit des Fluchtpunktes bestätigt. Auf geraden Teilstrecken ist dem Fluchtpunkt im Durchschnitt bis zu 29 % der Zeit gewidmet (auf der Autobahn 29 %, Landstraße 26 %, Stadt 21 %) und in dem Zeitbereich, den das eigene Fahrzeug in 1 s bis ca. 4 s überstreicht, wird bis zu 17 % der Zeit auf die Landstraße geblickt (Autobahn 15 %, Stadt 11 %). Der Fahrer widmet somit zusammengefasst auf geraden Teilstrecken zwischen 32 % (in der Stadt) und ca. 44 % (Autobahn) der direkten Vorausschau der Straße. Einen allgemeinen Überblick über den Versuch und die Probanden gibt Kapitel 4.2.1.

Für die Blicke in die Spiegel ist eine derart detaillierte Analyse der Fahrerblicke aktuell noch nicht zufriedenstellend möglich. Es kann aktuell nur darauf eingegangen werden in welchen Spiegel der Fahrer blickt, jedoch nicht exakt in welchen Bereich innerhalb des Spiegels. Es wird angenommen, dass für den Fahrer auch in der rückwärtigen Sicht der Bereich von Fernpunkt und der Zone optischer Ruhe von hoher Bedeutung ist. Hierauf geht Kapitel 3.3.4 näher ein.

### 3.2.3. Wahrnehmungsmodelle der Kognition

Die Aufgaben des Fahrers lassen sich nach Bernotat (1970) und Bubb (2015a, S. 28) aus dem Fahrer-Fahrzeug-Umgebung-Regelkreis ableiten. Der Regelkreis abstrahiert die Fahraufgabe in eine Man-in-the-Loop-Funktion. Dabei sind drei Regelebenen maßgebend:

- Navigation
- (Bahn-)Führung
- Stabilisierung

Diese Regelebenen lassen sich anhand der Regelfrequenz und der Zeitdauer differenzieren und bauen aufeinander auf. Die Gliederung wird auch von Geiser (1985) und von Michon (1985) beschrieben (siehe auch Abbildung 3-8). Die Stabilisierung, auch Control genannt, stellt die grundlegendste Regelebene dar und lässt sich im zeitlichen Bereich von Sekundenbruchteilen ansiedeln. Der Stabilisierungsprozess läuft bei einem geübten Fahrer überwiegend automatisiert ab. Die Führung (Maneuvering) kann hingegen als halb automatisierter Prozess angesehen werden. Hier muss der Fahrer beispielsweise den Straßenverlauf einschätzen und seine Fahrweise auf ihn abstimmen, beispielsweise Fahrgeschwindigkeit und Lenkradwinkel. Die letzte Ebene des Regelkreises ist die Navigation (Strategic). Diese ist in einem größeren zeitlichen Bereich einzustufen und siedelt sich innerhalb von Minuten und Stunden an.

Es existieren verschiedene Modelle zur Beschreibung der Wahrnehmung des Menschen mit regelungstechnischen Methoden (Bubb, 2015c, S. 222). Diese lassen sich in sequenzielle, ressourcenbasierte und hybride Modelle einteilen.

Laut der Theorie der sequenziellen Wahrnehmung werden die verschiedenen Verarbeitungsstufen nacheinander durchlaufen. Dabei erfordert jeder Arbeitsschritt Zeit. Die Leistungsvariabilität kann somit auf die Art und die Anzahl der Verarbeitungsstufen zurückgeführt werden (Luczak, 1975, S. 153; Rasmussen, 1983, S. 258; Sternberg, 1969).

Einen anderen Ansatz zur Beschreibung der menschlichen Informationsverarbeitung bilden ressourcenbasierte Modelle. Sie gehen davon aus, dass Informationsbearbeitung Kapazität benötigt. Diese Kapazitäten sind beschränkt und variieren mit dem Erregtheitszustand (Kahnemann, 1973; Wickens, Hollands, 2000).

Logische Konsequenz aus sequenziellen und ressourcenbasierten Modellen sind hybride Modelle, die die Informationsverarbeitung des Menschen beschreiben. Die menschliche Leistung der Informationsverarbeitung ist sowohl durch deren zeitliche Komponente beim Durchlaufen der einzelnen Schritte als auch durch die vom Menschen bereitgestellten Ressourcen definiert.

Neben den verschiedenen Ansätzen der Informationsverarbeitung ist allen Ansätzen eine Grundannahme gleich: Informationen müssen zuerst aufgenommen werden. Die Aufnahme des Reizes wird je nach Literatur als Stimulus, Perception oder Sense bezeichnet, wobei die beiden letzteren Begriffe auch widersprüchlich gedeutet werden können. Der nächste Schritt ist die interne Verarbeitung der Daten, was der Kognition, auch Plan genannt, entspricht. Letzter Schritt in der Aktionskette ist die Reaktion, auch Response oder Action genannt (Abendroth, Bruder, 2015; Glander, 2016). Gerade im automobilen Bereich hat sich im Sprachgebrauch für den Ablauf einer Handlung das Sense-Plan-Act-Prinzip (wahrnehmen, planen und handeln) etabliert.

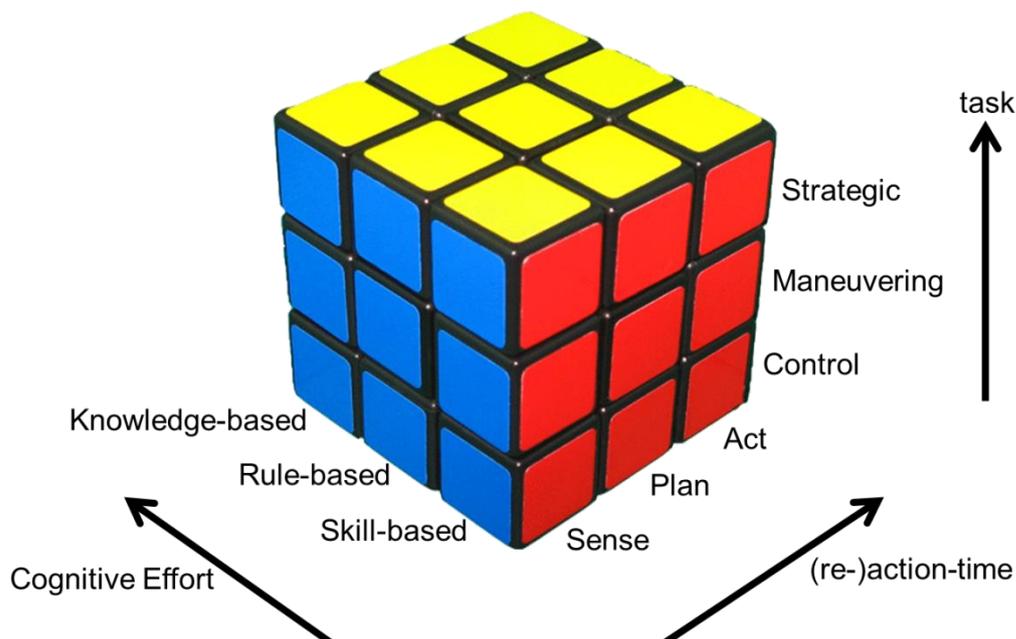


Abbildung 3-8: Modell des menschlichen Fahrverhaltens nach Glander (2016)

Das Sense-Plan-Act-Prinzip ist nicht nur im menschlichen Verhalten hinterlegt, sondern findet beispielsweise auch in allen Fahrerassistenzsystemen Anwendung. Abbildung 3-8 zeigt das Prinzip der menschlichen Datenverarbeitung nach Glander (2016). Es zeigt, dass der Regelkreis grundsätzlich von der Erfahrung des Fahrers und der Aufgabe abhängt. Je geringer die Fertigkeit des Fahrers und je höher die Regelebene, umso größer wird die Zeitspanne zum Durchlaufen von Regelketten. Dahingegen läuft eine fertigkeitbasierende Stabilisierungsaufgabe mit hoher Geschwindigkeit ab. Evident ist auch, dass die verschiedenen Stufen aufeinander aufbauen. Ohne Wahrnehmung kann keine Kognition stattfinden und ohne die Verarbeitung der vorhandenen Daten kann keine Reaktion geschehen.

Der Mensch hat wie auch alle Tiere im Laufe der Evolution Eigenschaften entwickelt, die die Kognition leistungsstark auf exakt ihre Anforderungen optimiert hat. Neben der speziellen Entwicklung der Sensorik wurde auch die Informationsverarbeitung auf die Bedürfnisse optimiert (Glaeser, Paulus, 2014). Eine Wahrnehmung bedeutet aber nicht zwangsweise eine komplette kognitive Verarbeitung wie Goldstein (2008, S. 135–139) beschreibt. Es werden nur die Informationen weiterverarbeitet, die auch wichtig scheinen. Unwichtig erscheinende Aspekte werden durch verschiedenste Filterfunktionen ausgeblendet. So ist es zum Beispiel möglich, dass ein Mensch ein Objekt direkt anblickt, es aber nicht bemerkt. Wichtiger Faktor ist die Erwartungshaltung des Menschen. Bewegungen sind in der optischen Wahrnehmung ein starkes Signal.

### 3.2.3.1. Die virtuelle Realität der menschlichen Wahrnehmung

Bubb beschreibt, wie innere Modelle des Menschen das Blickverhalten und das Verhalten des Fahrers bestimmen (Bubb et al., 2015, S. 144). Das Drei-Speicher-Modell nach Düntgen (1998) (siehe Abbildung 3-9) benennt diese inneren Modelle der menschlichen Wahrnehmung.

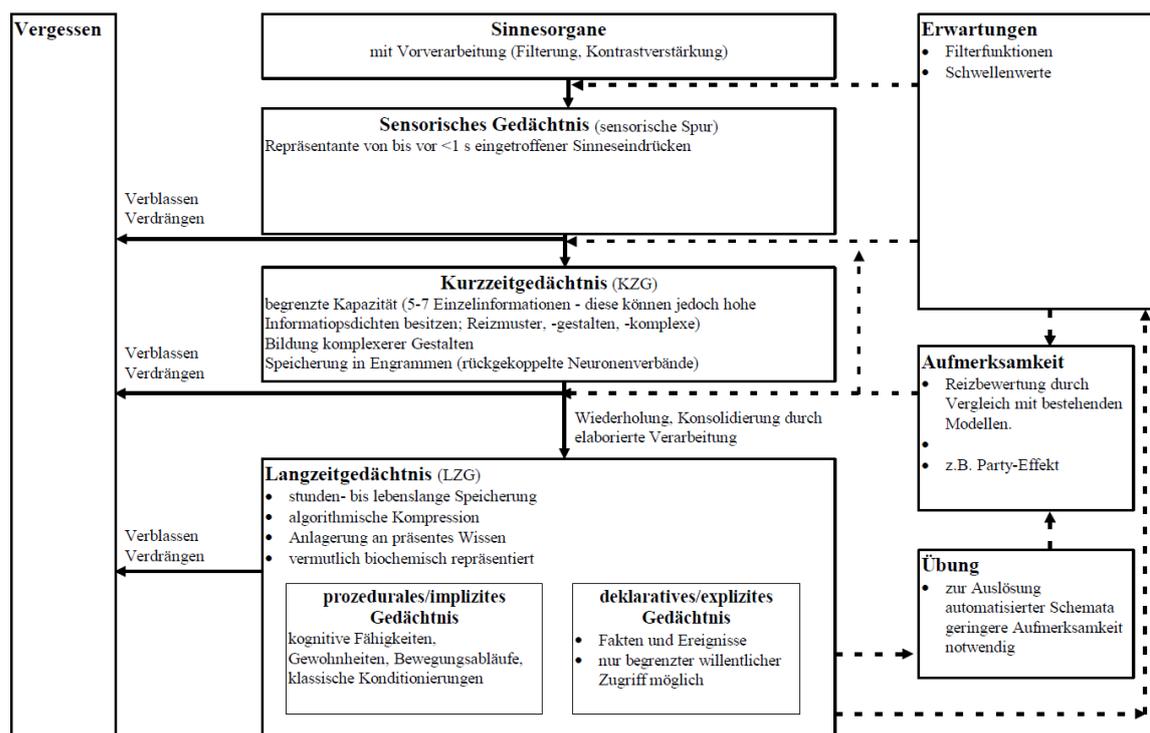


Abbildung 3-9: Wahrnehmungs- und Kognitionsprozesse (Düntgen 1998)

Das Modell von Düntgen (1998) und die Ausführungen von Bubb et al. (2015, S. 144) zeigen folgendes auf: Der Mensch erstellt sich aus seinen sensorisch aufgenommenen Signalen eine virtuelle Welt der Gegenwart. Diese virtuelle Welt stellt für uns Menschen das dar, was wir als Realität

wahrnehmen. Diese Wahrnehmung wird von der Aufmerksamkeit, Übung und Erwartung des Menschen gesteuert und ist über die Lebensdauer erlernt. Reize und Wahrnehmungen über die Sinnesorgane werden im sensorischen Gedächtnis ununterbrochen bewertet und gefiltert. Nur ein Bruchteil der Informationen gelangt in das Kurzzeitgedächtnis. Es findet schon in einem sehr frühen Zeitraum der Wahrnehmung eine Auswahl relevanter Informationen statt. Generell stellt das Vergessen bzw. das höchst effiziente Filtern von Informationen einen wesentlichen Bestandteil menschlicher Wahrnehmung dar. Im sensorischen Gedächtnis wird das Umgebungsmodell gebildet in dem sich der Mensch bewegt. Einzelheiten werden dabei direkt wieder vergessen und es findet ein ständiger Abgleich der Erwartung mit den Eingangsinformationen statt. Informationen, die für den Fahrer besonders bedeutsam sind, gelangen in das Kurzzeitgedächtnis. Darunter fallen zum Beispiel andere Verkehrsteilnehmer oder Straßenschilder.

Das leere Bild der Straße wird so mit Gegenständen der Umgebung gefüllt. [...] Auf diese Art werden natürlich auch bewegte Objekte (andere Fahrzeuge, Fußgänger, Radfahrer, ...) [...] erfasst und in die [...] Szenerie eingesetzt. Die Information dieser Gegenstände stimuliert auch innere Modelle über deren Verhalten. (Bubb et al., 2015, S. 144)

Erst durch dieses innere Modell ist es dem Fahrer möglich die Zukunft zu antizipieren. Der Mensch, der sich in der Gegenwart wähnt, erstellt quasi ein 4-D-Modell der Realität. Die vierte Dimension ist die Zeit, die wir als Gegenwart empfinden und in welcher der Mensch agiert. In der unmittelbaren Gegenwart antizipiert der Mensch ca. 2–3 Sekunden der Zukunft (Pöppel, 2000). Der Mensch blickt, bzw. antizipiert in die Zukunft und erstellt sich daraus ein Modell zur Handlung in der Gegenwart, in der er sich bewegt. Der Mensch verlässt sich dabei auf seine durch Erfahrung gewonnenen inneren Modelle im Langzeitgedächtnis.

Der Mensch bildet immer ein Modell seiner Umgebung. Objekte, die der Mensch nicht entdeckt, existieren in seiner Wahrnehmung nicht. Das innere Modell der Szene wird ohne dieses Objekt gebildet und die Handlungsplanung findet folglich ohne das Objekt statt. Ein sogenannter Falsch-Negativ-Fehler (Swets, 1964), das ist das Nichtentdecken vorhandener Objekte, kann jedoch besonders im Straßenverkehr zu fatalen Schäden führen.

Beispielsweise können in diesem Zusammenhang Pkw-Unfälle an komplett übersichtlichen Kreuzungen genannt werden. Befindet sich beim Kontrollblick auf die Querstraße das querende Fahrzeug direkt im Sichtschatten der A-Säule und wird deshalb nicht wahrgenommen, wird die Straße als frei interpretiert. In einer Fahrsimulatorstudie am Lehrstuhl für Ergonomie wurden genau

diese, in der Realität selten vorkommenden Situationen nachgestellt. Von den 46 Probanden überfuhren 26 die Kreuzung ungebremst und hätten in der Realität folgenschwere Unfälle verursacht (Zaindl, 2009).

Auch in der Unfallstatistik ist der sogenannte Informationsfehler, also dass verkehrsrelevante Information nicht oder zu spät wahrgenommen wird, die mit Abstand häufigste Unfallursache (Bubb et al., 2015, S. 157; Gründl, 2005, S. 125). Bei Unfällen mit Informationsfehlern als Ursache erfolgt bereits die Informationsaufnahme nicht oder fehlerhaft. Die Information wird entweder sensorisch nicht aufgenommen oder verblasst im sensorischen Gedächtnis und gelangt nicht ins Kurzzeitgedächtnis.

#### **3.2.4. Bottom-up- und Top-down-Prozesse**

Bottom-up- oder Top-down-Prozesse sind in verschiedenen Wissenschaften etabliert. Im Zusammenhang mit der menschlichen Wahrnehmung sind beide Prozesse ein wichtiges Werkzeug zur Veranschaulichung menschlicher Aufmerksamkeit. Die Aufmerksamkeitszuwendung des Menschen erfolgt nach zwei Prinzipien und wird von Vollrath und Krems (2011, S29-33) folgendermaßen beschrieben.

Bei Bottom-up-Prozessen geschieht die Aufmerksamkeitszuwendung automatisiert. Ohne eine willentliche Anstrengung des Menschen wird die Aufmerksamkeit und damit das foveale Sehen auf ein Signal gesteuert. Der Reiz zur Zuwendung der fovealen Aufmerksamkeit kann über alle menschlichen Sinneskanäle erfolgen. Beispiele hierfür sind große Reize im peripheren Sichtfeld, aber auch Töne oder andere sensorische Reize. Dabei ist neben dem Signalinhalt vor allem die Signalstärke entscheidend. Je höher sie ist, umso wahrscheinlicher ist die Zuwendung der Aufmerksamkeit.

Bei Top-down-Prozessen wird die Aufmerksamkeit des Menschen willentlich gesteuert. Aufgrund von Erwartungen und Erfahrungen des Menschen wird die foveale Aufmerksamkeit auf ein Objekt gerichtet. Klassisches Beispiel hierfür ist die Kontrolle von Statusanzeigen.

#### **3.2.5. Die Überlastung der Sicht**

Nach Cohen und Hirsig (1990) „spielt das periphere Sehen mit zunehmender visueller Beanspruchung eine immer unwichtigere Rolle“ (Woyna, 2013, S. 10). Es besteht ein Zusammenhang zwischen Blickaktivität und Verkehrskomplexität (Schweigert, 1998). Hudelmaier (2003) schließt daraus, dass in komplexen Verkehrssituationen nur noch das foveale Sehen eine Rolle spielt. Dem widersprechen jedoch andere Studien, die dem peripheren Sehen sogar eine höhere Bedeutung als

dem fovealen Sehen zuordnen (Schweigert, 2003, S. 36; Wood, Higgins, 1999). Corbin et al. (1958, zit. aus Sanders, 1963, S. 36-39) und Wittling (1976, S. 71) zeigen, dass Detektionsaufgaben durch die periphere Sicht leistungsstärker durchgeführt werden als durch die Verwendung von Augenbewegungen. Schulz (2012, S. 106) zeigt gerade für einfache Situationen die Wichtigkeit der peripheren Sicht beim Führen eines Fahrzeuges auf. Die Bedeutung wird insbesondere in der Erstellung des inneren Modells und der Objekterkennung gesehen.

Nach Cohen (1998) verringert sich die periphere Informationsaufnahme mit zunehmender Informationsdichte, es können somit im Umfeld weniger Objekte erkannt werden. Die periphere Kapazität wird in diesen Situationen zur Auswahl des nächsten Fixationspunktes aufgebraucht. Dieser Zustand, der auch als Tunnelsehen bezeichnet wird, ist nach Cohen die „periphere Äußerung von zentraler Überbeanspruchung“ (Cohen, 1994, zit. aus Woyna, 2013, S. 57).

Der Ansatz von Cohen beschreibt das Phänomen, dass bei einer hohen optischen Informationsdichte die Leistung der peripheren Sicht nachlässt. Die Frage die sich stellt ist, warum die Leistungsfähigkeit des peripheren Sehens gerade in den Situationen nachlässt in denen dessen Eigenschaften am wichtigsten sind. Die Antwort liegt in der Funktionsweise der Sensorik des Menschen:

Die Erkennung von Objekten in der Peripherie erfolgt nach Kapitel 3.2.2 größtenteils durch eine lokale Änderung des optischen Flusses. Die Berechnung des optischen Flusses ist die Gewinnung sichtbarer Bewegungsinformationen (Brune, 2007, S. 6). Ein optischer Fluss stellt sich ein, wenn mehrere Bilder über der Zeit aus gleicher oder ähnlicher Perspektive verglichen werden können, also in den Zeiten der fovealen Fixation. Dies bedeutet aber auch, dass in den Zeiten der Sakkaden, also der schnellen Blickwechsel, weder eine foveale noch eine periphere Sehleistung, bzw. deren kognitive Verarbeitung, stattfinden kann (Dodge, 1900; Ross et al., 2001). Die Zeiten der Blickwechsel können somit als eine Art Blindzeit angesehen werden. Da die foveale Sicht schon physiologisch nicht parallelisierbar ist, führt eine Erhöhung der foveal zu überwachenden Objekte zu einer schnellen Blickfolge bei verkürzten Fixationszeiten. Dadurch wird zum einen die Qualität der fovealen Wahrnehmung schlechter im erreichten Detailgrad und zum anderen auch die Qualität der peripheren Wahrnehmung durch eine verminderte Wahrnehmung des optischen Flusses negativ beeinflusst. Bei der Erhöhung der Komplexität der Situation kommt es somit, verursacht durch die häufigen Blickwechsel, zwangsläufig zu einer Überbeanspruchung des menschlichen Sehens.

Der Flaschenhals der visuellen Wahrnehmung ist somit die Anzahl der zu fixierenden Objekte über der Zeit. Gerade bei anspruchsvollen visuellen Aufgaben ist eine Reduzierung der Anzahl der fovealen Fixationen mit einem Gewinn an visueller Wahrnehmungsleistung verbunden (Gralla,

2007, S. 45). Je weniger Bereiche überwacht werden müssen, umso besser ist die jeweilige Erkennungsgüte. Im Straßenverkehr lassen sich die einzusehenden Bereiche jedoch schwerlich verringern. Was dem Menschen in solchen Situationen hilft ist seine Erfahrung. So wurden in verschiedenen Versuchen signifikante Unterschiede im Blickverhalten zwischen erfahrenen und unerfahrenen Autofahrern festgestellt (Bubb et al., 2015, S. 128; Underwood et al., 2003; Schweigert, 2003, S. 86). Erfahrene Pkw-Fahrer haben eine Vorahnung was geschehen kann und konzentrieren (→ foveales Sehen) sich insbesondere auf diese Bereiche (Hunziker, 2006). Dies geschieht mit sogenannten Processing-Blicken, also dem gezielten Blick in bestimmte Bereiche, der bei erfahrenen Fahrern signifikant häufiger auftritt und zu denen auch der Blick in den Spiegel gezählt wird. Ebenso ist zu erkennen, dass unerfahrene Fahrer mehr direkte Aufmerksamkeit der primären Fahraufgabe widmen müssen, was sich in einer erhöhten Anzahl von Scanning-Blicken äußert, die der „Generierung des innerlich gebildeten Sollkurses im Rahmen der Führungsaufgabe“ dienen (Bubb et al., 2015, S. 128). Je erfahrener der Fahrer, umso mehr wird, unterstützt durch die periphere Sicht, die Erstellung des Sollkurses automatisiert. Der foveale Blick muss nicht mehr auf das Objekt gerichtet werden.

### **3.3. Die menschliche Wahrnehmung der direkten und indirekten Sicht im Nutzfahrzeug**

Die Erkenntnisse der menschlichen optischen Wahrnehmung dienen in diesem Abschnitt der Beschreibung der direkten und indirekten Sicht aus dem Nutzfahrzeug.

„Der tote Winkel ist tot“ – titelte Spiegel-Online bereits im Jahr 2004 zur Einführung des Anfahrspiegels. Der Artikel trifft in seinem letzten Satz die Kernaussage: „Optisch ist das Sicherheitsproblem damit so gut wie gelöst. *Der konzentrierte Blick vor jedem Richtungswechsel in alle [...] Spiegel jedoch bleibt nach wie vor die Aufgabe des Lkw-Fahrers.*“ (Spiegel, 2004, Hervorhebung von A. Z.)

Dieses Kapitel knüpft an genau diese Aussage des Artikels an. Es gleicht die Kognition des Fahrers mit der Aufgabe ab, die ihm gestellt ist. Dabei wird wiederum auf die grundlegenden Eigenschaften aus Kapitel 3.2 eingegangen. Zuerst findet ein kleiner Exkurs in die direkte Sicht am Nutzfahrzeug statt, bevor die indirekte Sicht genauer anhand der Theorie und mancher Studien aus der Literatur unter die Lupe genommen wird.

### 3.3.1. Die direkte Sicht im Nutzfahrzeug

In Abbildung 3-10 ist die periphere Sicht aus einem Lkw angedeutet und entspricht in etwa dem Bild, das in 1/50 Sekunde wahrgenommen wird (Hunziker, 2006). Eine foveale Erkennung ist in diesem geringen Zeitbereich nicht möglich. Für die Simulation sind die Sichtscharfen der peripheren Sicht nach (Gralla, 2007, S. 9) mithilfe der Weichzeichnen-Funktion des Grafikprogrammes GIMP erzeugt und die jeweilige Sicht mit einem Sehschärfengenerator (Belyus, 2015) abgeglichen.



Abbildung 3-10: Periphere Sicht aus einem Lkw

Da simulierte Sehschärfen immer im Zusammenhang mit dem Betrachtungsabstand gesehen werden müssen und da die Sehbeeinträchtigungen des Lesers zusätzlich auf die Gesamtsehschärfe addiert wird, sind die Bilder rein qualitativ zu bewerten. An den Bildern kann der Leser anhand seiner fovealen Sicht abschätzen, was er in etwa peripher wahrnimmt. Bei der Berechnung auf die unterschiedlichen Sehschärfen wird die Abhängigkeit zum Peripheriewinkel beachtet. Ebenso ist die geringere Farbauflösung zum Rand qualitativ berücksichtigt.

In Abbildung 3-11 werden beispielhaft die ersten fünf Fixationen zur Ergänzung der peripheren Sicht dargestellt, was einer Zeitspanne von ca. 1,5 s bis 5 s Fahrzeit entspricht. Bei 80 km/h legt das Fahrzeug währenddessen ca. 30 m bis 110 m zurück. Die markierten Bildkreise entsprechend in etwa der Sicht der Fovea centralis mit einem Radius von  $2,5^\circ$  (Gralla, 2007).



Abbildung 3-11: Foveale Ergänzung der peripheren Sicht durch fünf Fixationen

Die Bilder veranschaulichen, dass der Mensch das Wenigste seiner Umgebung foveal scharf erkennen kann. Eine Orientierung mit der fovealen Sicht allein ist praktisch nicht möglich. Mit der gesamtheitlichen Wahrnehmung der Peripherie und wenigen Fixationspunkten erstellt sich der Mensch, wie Kapitel 3.2 erläutert, ein mentales Modell seiner Umgebung. Zu diesem Modell der Umgebung gehört nicht nur der direkte Sichtbereich, sondern auch die indirekte Sicht.

### 3.3.2. Periphere Wahrnehmung im Spiegelsystem

Infolge der Spiegelpositionierung können beim geraden Blick auf die Straße nur wenige Spiegel in der Peripherie wahrgenommen werden. Einzig im fahrerseitigen Haupt- und Weitwinkelspiegel können stark variierende optische Flüsse beim Blick nach vorne erkannt werden. In Abbildung 3-11 ist zu erahnen, wie der Fahrer die Spiegel wahrnimmt, während er gerade nach vorne blickt. Eine periphere Erkennung von Objekten zwischen Hauptsehrichtung und den verschiedenen Spiegeln ist jedoch wegen unterschiedlicher optischer Flüsse (siehe Kapitel 3.3.4) erschwert.

Die Sicht in den Spiegel wird generell als eine foveale Aufgabe beurteilt (Schweigert, 2003, S. 48; Seifert et al., 2001, S. 209). Jedoch wird dabei von den Spiegeln der Klassen I und III am Pkw ausgegangen. Diese Spiegel dienen, wie auch Klasse II am Nutzfahrzeug, zu einem großen Teil dem evolutionären Zweck der fovealen Sicht. Nämlich der gezielten Ortung und Wahrnehmung, also demerspählen weit entfernter Objekte, welche sich optisch nah am Fernpunkt befinden. Die Sichtfeldklassen IV und V sind jedoch eingeführt worden, um auch Objekte in den fahrzeugnahen Bereichen zu erkennen. Auch hier braucht es im Spiegelsystem im Normalfall eine foveale Ausrichtung auf den jeweiligen Spiegel, obwohl der Aufgabentyp eher der einer peripheren entspricht, nämlich der zufälligen Entdeckung von Objekten. Abbildung 3-12 simuliert die foveale Sicht auf den Hauptspiegel der Beifahrersitze.



Abbildung 3-12: Foveale Ausrichtung auf den beifahrerseitigen Hauptspiegel

Durch die getrennten Bilder in Haupt-, Weitwinkel- und Rampenspiegel ist eine periphere Erkennung außerhalb des Hauptspiegels erschwert. Die Nähe von Hauptspiegel und Weitwinkelspiegel, sowie dessen ähnlicher optischer Fluss lässt den geübten Fahrer den Radfahrer im Weitwinkelspiegel in Abbildung 3-12 eventuell erahnen. Ein Objekt im Rampenspiegel ist beim Blick in Haupt- oder Weitwinkelspiegel peripher praktisch nicht erkennbar.

Abschließend ist feststellbar, dass die periphere Sicht beim Entdecken von Objekten im aktuellen Spiegelsystem eine eher untergeordnete Rolle spielt. Es erschließt sich, dass die Wahrnehmung in allen aktuellen Spiegelsystemen am Nutzfahrzeug foveal geschehen muss, das zeigen auch Rassl (2004) und Hudelmaier (2003). Eine periphere Entdeckung von Objekten im Weitwinkel- oder gar im Anfahrspiegel ist unwahrscheinlich, während der Blick in den Hauptspiegel gerichtet ist.

### **3.3.3. Foveale Wahrnehmung im Spiegelsystem**

Der Fahrer muss, um Objekte im Spiegel zu erkennen, seine zentrale Blicklinie bewusst auf den jeweiligen Spiegel richten. Wie das vorherige Kapitel beschreibt, ist der gezielte Blick in den einzelnen Spiegel meist sogar nötig, um das Objekt überhaupt zu entdecken. In den Nahbereichsspiegeln der Klassen IV, V und VI muss der Fahrer eine idealerweise peripher lösbare Aufgabe, nämlich das zuverlässige, zufällige Entdecken von Objekten in der Nähe, aktuell mit der fovealen Sicht lösen,

also dem bewussten und zeitaufwendigen Blick in den jeweiligen Spiegel (Zaindl, 2016). Dies ist in Abbildung 3-13 visualisiert.



Abbildung 3-13: Fovealer Blick in den Spiegel – erst beim direkten Blick in den Weitwinkelspiegel ist der Radfahrer erkennbar. Beim ersten Blick in den Hauptspiegel bleibt er unentdeckt (siehe Abbildung 3-12)

Da immer nur eine Blickrichtung eingeschlagen werden kann, die foveale Sicht also nicht parallelisierbar ist, benötigt die Kontrolle der einzelnen Spiegel nacheinander eine gewisse Zeit.

Wird bei dem Blick in die Spiegel beispielsweise von einer minimalen Blickdauer von 200 ms (Werner, 1935) je Fixation ausgegangen und die Augen- und Kopfbewegung des Fahrers berücksichtigt, kann die minimale Zeit berechnet werden, die der Fahrer mindestens zum Kontrollieren der Spiegel benötigt. So braucht beispielsweise der Fahrer, ausgehend von einem geraden Blick auf die Straße, mindestens 2 s um seine drei Spiegel auf der Beifahrerseite zu kontrollieren (Rassl, 2004; Zaindl et al., 2014b; 2015, S. 31). Er müsste also den kompletten Bereich der gefühlten Gegenwart nach Pöppel (2000) für den Blick in die Spiegel aufwenden, ohne in der Zwischenzeit den Blick direkt auf das Verkehrsgeschehen oder die Spiegel der Fahrerseite zu richten. Gerade in komplexen Verkehrssituationen ist der Fahrer gezwungen, sich auf die Sichtfelder zu beschränken, die er für seine Fahraufgabe benötigt.

Nach McKnight und Adams (1970, zit. aus Schweigert, 2003, S. 48) nutzen erfahrenere Fahrer häufiger den Blick in den Spiegel, um den rückwärtigen Verkehr zu beobachten. Dies stimmt mit den

Erkenntnissen überein, dass erfahrene Fahrer mehr Processing-Blicke, zu denen der Blick in den Spiegel zweifelsfrei gehört, nutzen als unerfahrene (Bubb et al., S. 128). Schweigert (2003, S. 87) zeigt in seinen Realversuchen im Pkw, dass die durchschnittliche Fixierung im Spiegel bei 0,5 s mit einer hohen Standardabweichung liegt.

#### 3.3.4. Optischer Fluss im Spiegelsystem

Wie Kapitel 3.2.2 beschreibt, hat der optische Fluss maßgeblichen Einfluss auf die Entdeckung von Objekten. Grundvoraussetzung für eine gute Erkennbarkeit ist ein durchgängiger optischer Fluss in Kombination mit einem existierenden Fernpunkt, den die foveale Sicht fixiert. Die Erkenntnisse aus Kapitel 3.2.2 werden im Folgenden auf das Spiegelsystem angewandt.

Da jeder Spiegel ein einzelnes System darstellt, entsteht jeweils ein eigener optischer Fluss. Dieser optische Fluss ist in Abbildung 3-14 für die drei Spiegel der Beifahrerseite illustriert. Anstatt eines globalen optischen Flusses muss der Fahrer im Nutzfahrzeug somit aktuell mehrere optische Flüsse gleichzeitig überblicken, womit schon eine verminderte Wahrnehmungsleistung des Fahrers begründet ist. Im Weiteren wird auf die einzelnen Spiegel eingegangen.



Abbildung 3-14: Optischer Fluss im Spiegelsystem

Im Hauptspiegel ist der für die Orientierung wichtige Fernpunkt gut wahrzunehmen. Durch den weiten Blick nach hinten ist der optische Fluss sehr ruhig und ausgeglichen. Der Fahrer kann jedoch nur einen relativ kleinen Winkelbereich überschauen.

Im Weitwinkelspiegel ist der Fernpunkt nicht zwangsläufig erkennbar, der Spiegel ist so einstellbar, dass der Fernpunkt auf Kosten der Sicht nach unten gesehen werden kann. Der Fernpunkt ist jedoch in jedem Fall vom Fahrer zu erahnen, falls er nicht direkt einsehbar ist. Bedingt durch den Wölbungswinkel des Spiegels und seinen großen Sichtbereich ist eine große Varianz in der Geschwindigkeit des optischen Flusses zu erkennen. Dies ist auf die Eigenschaften des konvexen Spiegels zurückzuführen, die Kapitel 2.4 beschreibt.

Anhand der Positionierung des Rampenspiegels und seines einsehbaren Bereichs ist der optische Fluss des Rampenspiegels um ca.  $90^\circ$  bis  $180^\circ$  zum optischen Fluss von Haupt- und Weitwinkelspiegel gedreht. Im Anfahrspiegel ist der Fernpunkt weder zu erkennen noch zu erahnen. Durch die Nähe des Spiegels zum gesehenen Objekt (Boden in ca. 3 m Nähe) wirkt das gesehene Bild unruhig. Bei aktuell ca. 4 m Sichtbereichslänge, die der Anfahrspiegel abdeckt, erneuert sich das gesehene Bild schon bei 15 km/h mit einer Frequenz von mehr als einem Hertz. Blickfolgebewegungen sind im Anfahrspiegel somit sehr begrenzt möglich, da das Objekt nur für einen kurzen Augenblick im Spiegel zu erkennen ist.

### **3.3.5. Inneres Modell der indirekten Sicht am Nutzfahrzeug**

Der Blick in den Spiegel ist im Normalfall den Regelebenen der Navigation und Bahnführung zuzuordnen. Nur in Ausnahmefällen wird ein Spiegelsystem zur Stabilisierung genutzt. Beispiele finden sich in Kapitel 2.6.1.

Da der Blick in den Spiegel, wie Kapitel 3.3.3 zeigt, foveal geschehen muss, lässt sich auch die Wahrnehmung in den Spiegeln erklären. Es handelt sich beim Blick in den Spiegel um Processing Blicke in den jeweiligen Spiegel, meist ohne zuvor einen peripheren Reiz wahrgenommen zu haben: Der Fahrer entscheidet, wann er in welchen Spiegel blickt. Dabei ist vor allem die Erwartung und Aufmerksamkeit des Fahrers von zentraler Bedeutung. Es handelt sich somit um einen klassischen Top-down-Prozess, der aufmerksamkeitsgesteuert ist. Der Fahrer richtet seinen Blick in der fovealen Suche nur in Richtungen, die in seinem Modell der Informationsaufnahme wichtig sind. Er priorisiert die Bereiche bereits vor dem jeweiligen Blick. Diese Priorisierung hängt sowohl von der Situation als auch von den jeweiligen Spiegeln ab. Eine Kontrolle der direkten Sicht und zusätzlich aller sechs Spiegel zu jeder Zeit ist dem Menschen sensorisch unmöglich, da immer nur eine Blickrichtung eingeschlagen werden kann. Im Bereich der Gegenwart der Gegenwart (siehe 3.2.3.1) kann somit nie der komplette Bereich um das Fahrzeug überblickt werden. Das innere Modell des Fahrers ist zwangsläufig nicht mit allen Umgebungsinformationen versorgt.

Somit zeigt sich: Obwohl alle Bereiche einzeln betrachtet einsehbar sind, bleibt im Lkw oder in jedem anderen Fortbewegungsmittel ein mentaler toter Winkel unumgänglich (siehe Kapitel 2.1.2). In den meisten Fällen stellt dies kein großes Problem dar – nicht alle Bereiche müssen zu jeder Zeit überwacht sein. Je komplexer jedoch die Situation ist, umso mehr muss der Fahrer von seiner Umgebung wahrnehmen und umso schwerer wird es das innere Modell der Umgebung komplett zu halten.

Der Fahrer wird somit Taktiken entwickeln, um die Information zu erhalten, die ihm den Eindruck vermitteln, die Situation möglichst komplett zu überschauen. Die verschiedenen Sichtfelder und optische Flüsse in den jeweiligen Spiegeln erzeugen einen mentalen Mehraufwand, da das Bild der Umgebung bei jedem Blickwechsel, insbesondere zwischen den Spiegeln, neu gebildet und zugeordnet werden muss.

Es stellt sich die Frage, was und welche Bereiche der Fahrer in den jeweiligen Situationen erkennen will und ob diese alle situationsrelevanten Bereiche abdecken. Die Entscheidung in welchen Spiegel geblickt wird, wird naturgemäß zielorientiert, also foveal motiviert, sein. Es ist zu erwarten, dass der Fahrer die Hauptspiegel deutlich häufiger verwenden wird als beispielsweise Weitwinkel-, Anfahr- oder Frontspiegel. Die Arbeit von Bothe (2014) analysiert beispielhaft das typische Verhalten des Fahrers bei einer Kreisverkehrsdurchfahrt. Der Fahrer ist meist bemüht, die hintere Achse seines Aufliegers im Spiegel zu erkennen (siehe Abbildung 3-15). In Kurven erkennt er so, ob er enge Passagen und Straßen passieren kann, was in diesem Moment das vorrangige Ziel des Fahrers ist. Wird das Ende bzw. die Achse des Aufliegers nicht mehr im Hauptspiegel erkannt, wird das Sichtfeld durch eine Kopfbewegung des Fahrers (siehe auch Kapitel 4.2.2) erweitert oder der Fahrer wechselt den Blick in den Weitwinkelspiegel (Bothe, 2014). Die Überwachung des Umfeldes (Sichtfeldklassen IV bis VI) ist für den Fahrer eine zusätzliche Aufgabe, die viel Training verlangt. Sie ist jedoch meist nicht das Ziel und stellt evolutionär einen nicht eingeplanten Fall dar.

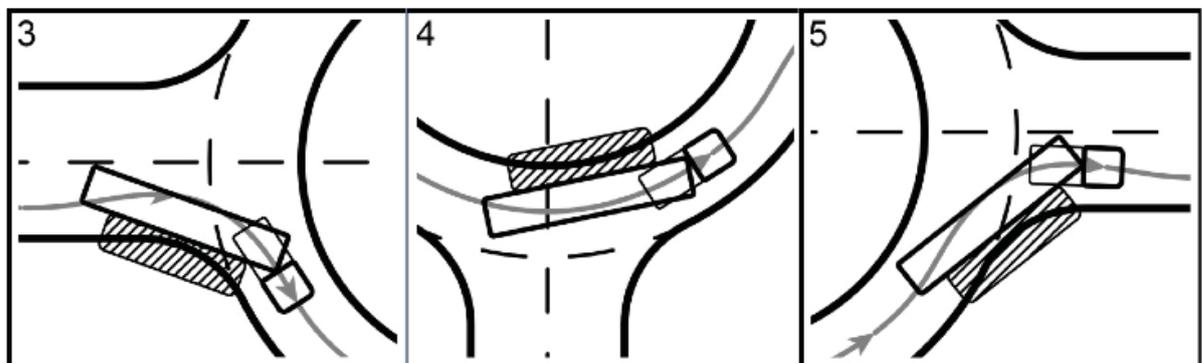


Abbildung 3-15: Blickziele des Fahrers bei einer Kreisverkehrsdurchfahrt (Bothe, 2014)

## 4. Die Nutzung aktueller Spiegelsysteme am Nutzfahrzeug

Um ein vorhandenes System durch eine andere Technologie zu ersetzen, ist es nötig die Interaktion zwischen dem Menschen und dem aktuellen System zu verstehen (Bothe, 2014). Dabei ist es ebenso wichtig das vorhandene System nicht als Idealsystem zu verstehen, sondern auch aus der Mensch-Maschine-Interaktion die Vor- und Nachteile des aktuellen Systems zu erörtern. Im Laufe der Projektarbeit wurden einige Studien durchgeführt, die die Spiegelnutzung untersuchten. Die Studien dienen in erster Linie der Konzeptionierung eines Spiegelerersatzsystems.

### 4.1. Fahrerbefragung

In einer Fahrerbefragung per Fragebogen wurden Lkw-Fahrer zu ihrer Nutzung der einzelnen Spiegel allgemein und in verschiedenen speziellen Situationen befragt (Palacios, 2012). Da bei der Nutzung der Spiegel von einer gewissen Automation durch den Fahrer ausgegangen wird, kann die Befragung nur einen Anhaltspunkt zur wahren Nutzung der Spiegel aufzeigen. Sie ist dennoch ein gutes Indiz für den Stellenwert, den verschiedene Spiegel für den Fahrer einnehmen. Neben Standardfragen zur Person wurden zudem im Fragebogen noch allgemeine Fragen zur Nutzung der Spiegel gestellt. In einem separaten Abschnitt konnten die Fahrer auch kritische Situationen beschreiben, die sie aufgrund unzureichender Sicht erlebten. Der Zweck der Studie ist, Informationen über das Nutzungsverhalten und den Stellenwert der einzelnen Spiegel aus Sicht der Fahrer zu erhalten und entsprechend Anforderungen an Spiegelerersatzsysteme zu formulieren. Für alle statistischen Untersuchungen ist das Signifikanzniveau  $\alpha$  auf 5 % festgelegt.

#### 4.1.1. Probandenkollektiv

Das Probandenkollektiv besteht aus zwei Probandengruppen, nämlich zum einen aus einer reinen Befragung (über einen Internetfragebogen und einer direkten Befragung an Raststellen) und zum anderen aus einer kombinierten Realfahrt mit anschließender Befragung. Dabei werden nur die Fragebögen berücksichtigt, die vollständig ausgefüllt wurden. Die beiden Gruppen sollen nicht miteinander verglichen werden, sondern bilden zusammen ein Kollektiv von 57 Befragten, wovon 29 Berufskraftfahrer sind. Nur 2 der 57 befragten Personen sind weiblich, was die Geschlechterverteilung in dem Berufsfeld mit nur 1,7 % Frauenanteil (im Jahr 2014) in etwa widerspiegelt (Bothe et al., 2013a; Statistika, 2016). Die Befragten sind zum Zeitpunkt der Befragung durchschnittlich 41

Jahre alt (Standardabweichung (SD) 11,5 a; min. 23 a; max. 68 a) und somit sechs Jahre jünger als der bundesweite Durchschnitt der Berufskraftfahrer (ZF, 2014).

#### **4.1.2. Subjektive Nutzung der einzelnen Spiegel nach Situation**

Eine Aufgabe im Fragebogen ist die eigene Spiegelnutzung in typischen Situationen abzuschätzen. Dabei lautet die Fragestellung: „Wie häufig nutzen Sie Ihre Spiegel in Abhängigkeit zur Fahrsituation?“ Die Situationen sind dem Straßentyp nach in Autobahn, einspuriger Landstraße und geschlossener Ortschaft (Stadt) unterteilt. In diesen Gruppen sind verschiedene typische Situationen definiert. Der Befragte kann zu jeder Situation die Nutzung jedes einzelnen Spiegels auf einer Skala von [1] – [5] beantworten. Die Nummern geben die Nutzung des jeweiligen Spiegels wieder, die Bewertungsmatrix ist zu jeder Zeit im Fragebogen sichtbar ([1] – nie; [2] – selten; [3] – manchmal; [4] – oft; [5] – immer), was im weiteren Verlauf als intervallskaliert angesehen wird. Im Folgenden werden zwei Situationen auf den verschiedenen Straßentypen vorgestellt: Die Geradeausfahrt als einfaches Manöver und das Rechtsabbiegen als eher komplexe Situation.

##### **4.1.2.1. Geradeausfahrten**

Die Situation mit der geringsten Belastung für den Fahrer stellt die Geradeausfahrt oder das Folgen des Straßenverlaufes dar. Abbildung 4-1 zeigt die subjektive Nutzung der Spiegel in solchen Situationen für die Autobahn, die Landstraße und die Stadt auf. Es wurde für die Situation der Geradeausfahrt eine zweifaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) der Spiegelnutzung durchgeführt ( $3 \times 7$ ; Straßentyp  $\times$  Spiegel).

Hinweis: Es ist keine Varianzhomogenität über die subjektive Nutzung der Spiegel gegeben. Dies ist anhand des durchgeführten Tests nach Levene sowie in der Abbildung beim Betrachten der Standardabweichungen ersichtlich. Erklärbar ist dies anhand von Grenzeffekten, die sowohl nach oben als auch nach unten auftreten. Diese Grenzeffekte sind methodisch nicht abänderbar, sondern zeigen, dass sich die Fahrer in der Nutzung mancher Spiegel eher einig sind als in der Nutzung anderer Spiegel. Aufgrund dessen ist in keiner der durchgeführten Varianzanalysen eine Varianzhomogenität gewährleistet. Dies wird in den einzelnen Analysen nicht erwähnt, ist aber in den AuswertepLOTS im Anhang zu jeder Analyse ersichtlich.

Es sind Unterschiede in der subjektiven Nutzung der einzelnen Spiegel feststellbar ( $F(6, 1044) = 166.4, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.489$ ). Ebenso ist die subjektive Spiegelnutzung vom Straßen-

typ abhängig ( $F(2, 1044) = 12.0, p < 0,001, \eta_p^2 = 0.023$ ). Ein Interaktionseffekt zwischen Straßentyp und der subjektiven Nutzung der einzelnen Spiegel kann nicht nachgewiesen werden ( $F(12, 1044) = 0.6; p = 0,88$ ).

### Subjektive Nutzung der Spiegel bei Geradeausfahrt/Folgen des Straßenverlaufes

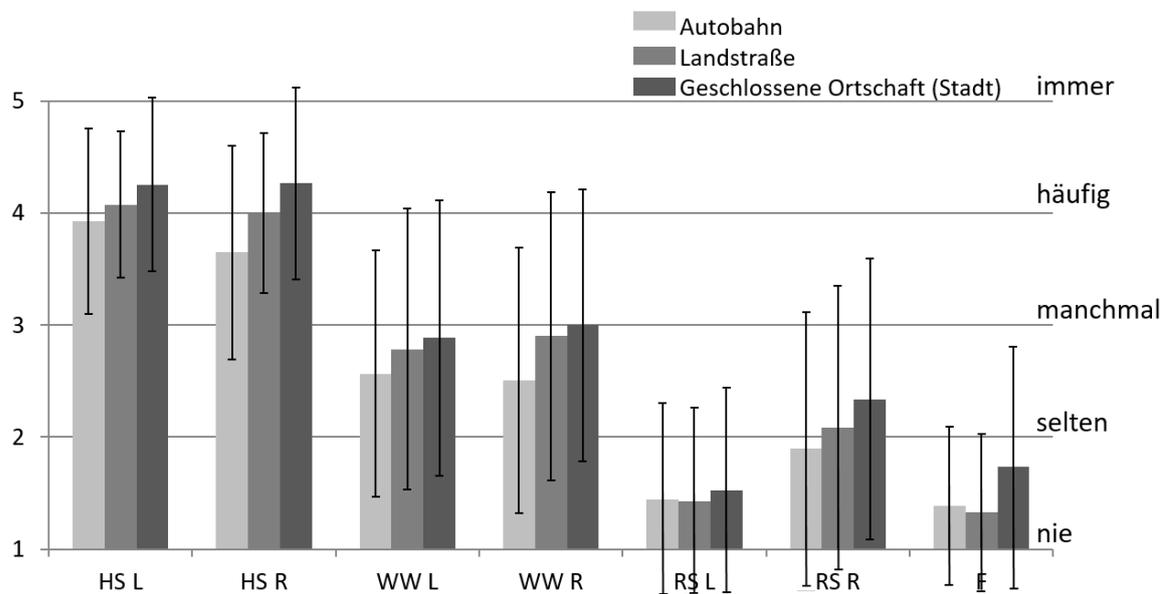


Abbildung 4-1: Subjektive Nutzung der einzelnen Spiegel bei Geradeausfahrt/Folgen des Straßenverlaufes in verschiedenen Straßenumgebungen ( $n = 57$ ; Fehlerbalken entsprechen  $\pm 1$  SD; HS: Haupt-, WW: Weitwinkel-, RS: Rampen-, F: Frontspiegel, L: Links, R: Rechts)

Auffällig ist, dass die subjektive Spiegelnutzung mit erhöhter Komplexität des Verkehrs, von der Autobahn zur Stadt, mit einer eher kleinen Effektstärke signifikant zunimmt. Ein Unterschied in der Nutzung der einzelnen Spiegel ist auch in Post-hoc-Tests nach Tukey klar erkennbar, nur zwischen den beiden Hauptspiegeln untereinander, den beiden Weitwinkelspiegeln untereinander und zwischen dem linken Rampenspiegel und dem Frontspiegel stellt sich in dieser Situation keine Signifikanz ein. Die Ergebnisse des Post-hoc-Tests sind im Anhang zu finden.

Die Geradeausfahrt kann in gewisser Weise als Basis in Bezug auf die Spiegelnutzung gesehen werden. Es ist die häufigste Fahrsituation, in der sich der Fahrer befindet und sozusagen der Normalzustand während der Fahrt. Es ist erkennbar, dass die menschliche Selbsteinschätzung der Wahrnehmung in Kombination mit den Spiegeln mit der theoretischen Herleitung in Kapitel 3.3 übereinstimmt. Der Fahrer wähnt die beiden Hauptspiegel häufig zu nutzen. Die beiden Weitwinkelspiegel werden im Durchschnitt eine Bewertungsstufe niedriger (manchmal) benutzt. Der Rampenspiegel der Beifahrerseite wird im Schnitt in der Skala noch seltener benutzt. Der Frontspiegel

und der nicht vorgeschriebene linke Rampenspiegel werden hingegen nach den Aussagen der Befragten so gut wie nie benutzt. Die Geradeausfahrt stellt dabei keine besonders anspruchsvolle Aufgabe dar. Der Fahrer führt keine gezielte Aktion durch. Die subjektive Nutzung der Spiegel in dieser Situation dient der Erstellung eines inneren Modells für eventuell geplante Aktionen oder Reaktionen auf Gegebenheiten.

#### **4.1.2.2. Rechtsabbiegen**

Als Beispiel einer Situation mit einem erhöhten kognitiven Aufwand und einer gezielten Aktion des Fahrers soll das Rechtsabbiegen bzw. die Autobahnabfahrt als Pendant für die Autobahn betrachtet werden. Das Ergebnis der Befragung zum Rechtsabbiegen zeigt Abbildung 4-2. Es wird wiederum eine zweifaktorielle Varianzanalyse durchgeführt, die die Unterschiede zwischen den einzelnen Spiegeln ( $F(6, 1023) = 151.6, p < 0,001, \eta_p^2 = 0.471$ ) und des Straßentyps ( $F(2, 1023) = 10.0, p < 0,001, \eta_p^2 = 0.019$ ) nachweist. Ein Interaktionseffekt zwischen Straßentyp und den einzelnen Spiegeln kann erwartungsgemäß nicht beobachtet werden. Im Anhang sind die zugehörigen Analysen und Post-hoc-Tests zu finden.

Ebenso untersucht eine weitere dreifaktorielle Varianzanalyse ( $2 \times 3 \times 7$ ) den Zusammenhang zwischen Fahrsituation (Geradeausfahren, Rechtsabbiegen), Straßentyp und den einzelnen Spiegeln. Die Ergebnisse des Einflusses der einzelnen Spiegel und des Straßentyps sind im Grunde den vorhergehenden ANOVAs in den einzelnen Situationen ähnlich. Die Spiegelnutzung hängt erwartungsgemäß von der Situation ab ( $F(1, 2067) = 68.7, p < 0,001, \eta_p^2 = 0.032$ ). Ebenso kann ein Interaktionseffekt zwischen Situation und Spiegel ( $F(6, 2067) = 13.0, p < 0,001, \eta_p^2 = 0.036$ ) nachgewiesen werden. Diese und weitere Analysen sowie Post-hoc-Tests sind im Anhang zu finden.

## Subjektive Nutzung der Spiegel beim Rechtsabbiegen

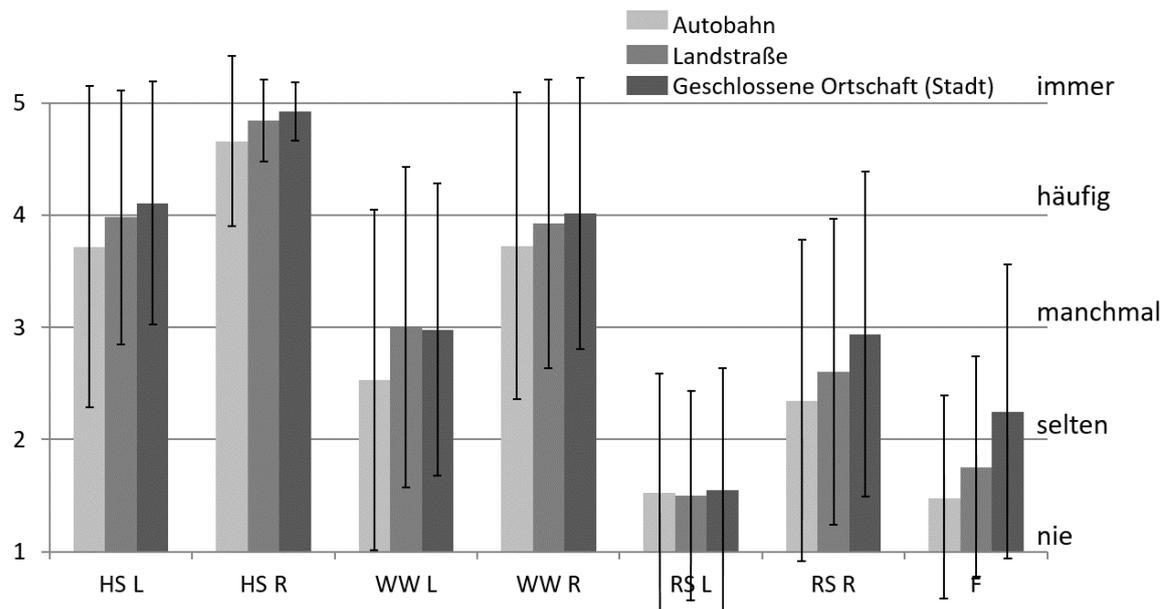


Abbildung 4-2: Subjektive Nutzung der einzelnen Spiegel beim Rechtsabbiegen bzw. Autobahnabfahrt auf der Autobahn in verschiedenen Straßenumgebungen ( $n = 57$ ; Fehlerbalken entsprechen  $\pm 1$  SD; HS: Haupt-, WW: Weitwinkel-, RS: Rampen-, F: Frontspiegel, L: Links, R: Rechts)

Die Nutzung der Spiegel beim Rechtsabbiegen zeigt ein Bild, das in etwa den Erwartungen aus Kapitel 3.3 entspricht. Der Fahrer hat im Gegensatz zur Geradeausfahrt, in der er nur die Umgebung überwachen muss, nun eine Aufgabe, die eine gezielte Aktion verlangt. Es zeigt sich somit eine allgemeine Erhöhung der subjektiven Spiegelnutzung. Im Vergleich zur Geradeausfahrt in Abbildung 4-1 ist erwartungsgemäß zu erkennen, dass die Spiegel der rechten Seite, also der Bewegungsrichtung zugewandt, eine erhöhte Aufmerksamkeit erfahren. Diese Verschiebung der Aufmerksamkeit ist auch in allen anderen Situationen, die nicht gesondert analysiert werden, eindeutig zu erkennen.

Interessant ist der Vergleich der einzelnen Spiegel einer Fahrzeugseite für die jeweiligen Situationen. In Abbildung 4-3 ist die subjektive Nutzung der Spiegel der rechten Seite für das Rechtsabbiegen nochmal gesondert aufgetragen. Es fällt eine stufenartige Verminderung der Spiegelnutzung vom Haupt- über den Weitwinkel- zum Rampenspiegel auf. Die Unterschiede werden in Post-hoc-Tests nach Tukey als signifikant eingestuft.

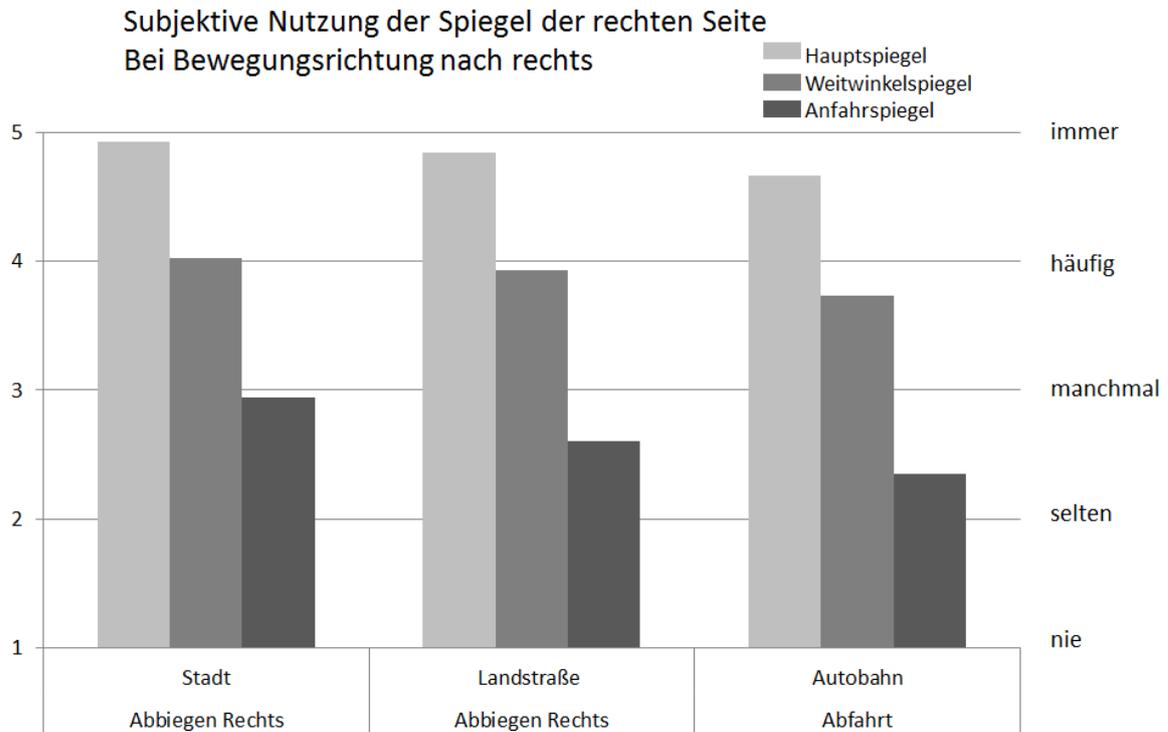


Abbildung 4-3: Subjektive Nutzung der beifahrerseitigen Spiegel in Situationen mit Bewegungsrichtung nach rechts

Es ist somit für die Situation des Rechtsabbiegens erwiesen, dass der Fahrer den Hauptspiegel in jeder Situation wichtiger einstuft als die anderen Spiegel derselben Seite und den Weitwinkelspiegel wiederum wichtiger als den Rampenspiegel. Diese Erkenntnis ist auch bei allen anderen Situationen anhand der Werte ersichtlich und gilt in allen Fahrsituationen sowohl für die Fahrer- als auch für die Beifahrerseite.

Es ergibt sich somit in der Befragung ein Bild der subjektiven Spiegelnutzung der Fahrer, das der Beschreibung aus Kapitel 3.3.5 folgt: Je höher der rein periphere Anteil der Aufgabe ist, umso weniger blickt der Fahrer bewusst in diese Bereiche.

#### 4.1.2.3. Subjektive Nutzung der Spiegel in allgemeinen Situationen

Des Weiteren wird die subjektive Spiegelnutzung aller erfragten Situationen außer den Rangiersituationen betrachtet und mit der Geradeausfahrt verglichen. Es fällt auf, dass je nach Situation eine Veränderung der Spiegelnutzung stattfindet. Zur Aktionsrichtung hin findet eine Erhöhung der Spiegelnutzung statt, zur anderen Seite teilweise eine Verminderung. Die minimale und maximale subjektive Nutzung im Vergleich zur Geradeausfahrt ist in Abbildung 4-4 zu sehen. Es ist eindeutig, dass die beiden Hauptspiegel die häufigste Nutzung erfahren, gefolgt von den beiden Weitwinkelspiegeln. Sowohl der rechte Rampenspiegel als auch der Frontspiegel werden in den meisten Situationen selten benutzt und rücken nur situativ vermehrt in die Aufmerksamkeit der Fahrer. Es fällt auf, dass selbst die situativ erhöhte Nutzung von Rampenspiegel und Frontspiegel nicht über ein „manchmal“ hinausgehen. Der fahrerseitige, linke Rampenspiegel findet in allen Situationen nur selten Anwendung.

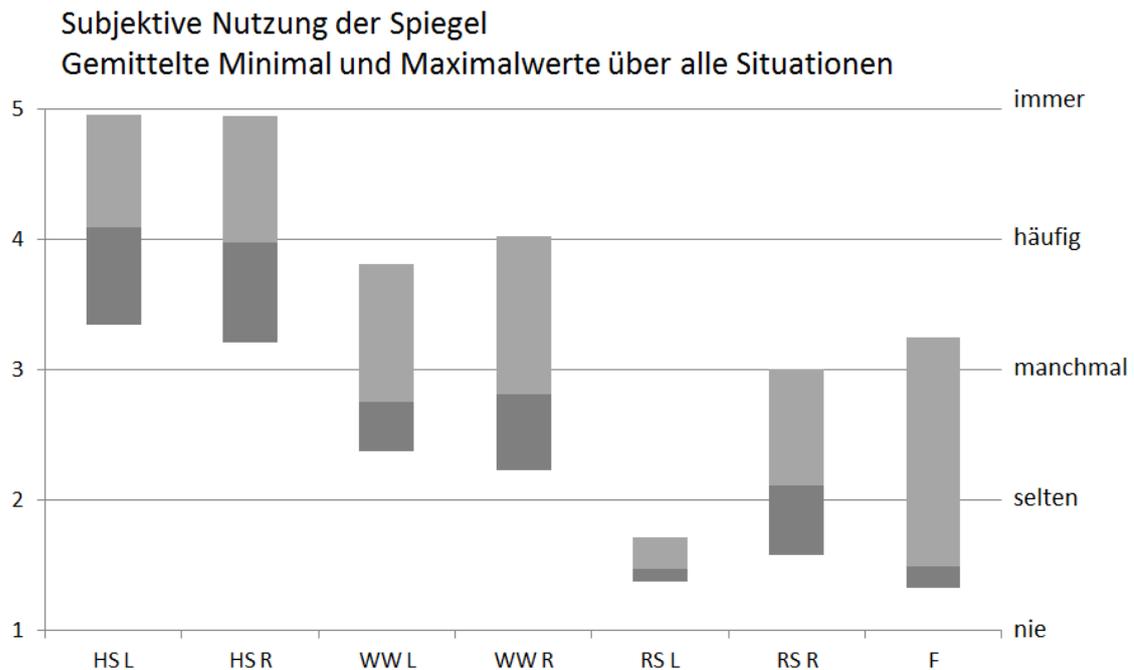


Abbildung 4-4: Gemittelte Minimal- und Maximalwerte der Spiegelnutzung im Vergleich zur Geradeausfahrt (HS: Haupt-, WW: Weitwinkel-, RS: Rampen-, F: Frontspiegel, L: Links, R: Rechts)

Die Befragungen zu den Situationen ergaben, dass sich die Nutzung der einzelnen Spiegel im Vergleich zur Geradeausfahrt situativ um in etwa eine bis eineinhalb Kategorien nach oben verschieben kann. Nutzen die Fahrer beispielsweise während der normalen Fahrt den Rampenspiegel im Schnitt selten, wird der Spiegel in keiner Situation häufiger als im Schnitt „manchmal“ benutzt. Die Verschiebung nach unten fällt im Vergleich zur Geradeausfahrt geringer aus als diejenige nach

oben. Werden die Werte der Nutzung aller Spiegel in einer Situation addiert, erhöht sich die Spiegelnutzung von der Geradeausfahrt zu den komplexeren Situationen.

Die Minimalnutzung der Hauptspiegel ist höher als die Maximalnutzung des Rampenspiegels. Die Nutzung der Hauptspiegel während der Geradeausfahrt ist in etwa gleich zur Maximalnutzung der Weitwinkelspiegel.

#### **4.1.3. Kritische Situationen**

Im Fragebogen werden neben der einzelnen Nutzung der Spiegel auch allgemeine Fragen zur Spiegelnutzung gestellt. Es wird dabei nach erlebten kritischen Situationen gefragt, die aufgrund mangelnder Sicht entstanden. Diese Fragen können von den Fahrern nur subjektiv beantwortet und auch bewertet werden. Der Fahrer kann eine kritische Situation nur reflektieren, wenn er sie bemerkt. Die Bewertung der Situation aus Fahrersicht ist sehr subjektiv. Dennoch lassen die Antworten wichtige Erkenntnisse zu, wie der Fahrer mit den Spiegeln interagieren möchte.

Die Fragebögen erfragen kritische Situationen, um ihren Ursachen auf den Grund zu gehen. Insgesamt wurden 57 kritische Situationen gezählt, wobei auch die unvollständig ausgefüllten Fragebögen berücksichtigt sind ( $n = 91$ ). Dabei entstanden 25 kritische Situationen aufgrund der direkten Sichtverdeckung, die aus der A-Säule und dem anschließenden Spiegel aufgespannt wird. Im Bereich der indirekten Sicht wurden von den Befragten insgesamt 22 kritische Situationen dokumentiert, wobei sich der andere Verkehrsteilnehmer laut Aussagen der Lkw-Fahrer in 12 Situationen im toten Winkel befand. Bei 6 Situationen wurde zwar in den relevanten Spiegel geblickt, das Objekt jedoch nicht erkannt und in 4 Situationen hatte der Fahrer nicht in den für die Situation relevanten Spiegel geblickt. In 10 Situationen war die Sicht nicht ausschlaggebend für die kritische Situation.

Aus den Antworten werden die Ansatzpunkte für einen Spiegelersatz ersichtlich. Die direkte Sicht wird durch den Entfall der Spiegel und eine geschickte Anordnung der Monitore verbessert. Bei der indirekten Sicht muss, wie die Kapitel 3.3.2 und 3.3.3 beschreiben, darauf geachtet werden die Anzeige wahrnehmungsoptimiert darzustellen. Kapitel 3.3 lässt die Schlussfolgerung zu, dass in vielen Situationen, in denen sich das Objekt in der Wahrnehmung der Befragten im toten Winkel befindet, meist vom Fahrer in den Spiegeln gesehen werden könnte, sich also im mentalen toten Winkel befindet. Der Fahrer kann schlicht nicht wissen, ob sich das Objekt wirklich im toten Winkel befindet oder er nicht im richtigen Moment in den richtigen Spiegel blickt. In den Antworten und Erklärungen zu den Situationen fallen relativ typische Aussagen, die ebenso die Erkenntnisse aus

der theoretischen Herleitung in Kapitel 3.3 unterstreichen und hier als Stilblüten die Wahrnehmung des Nutzfahrzeugfahrers darstellen, die teilweise vom Versuchsleiter während Befragung notiert und teilweise direkt von Lkw-Fahrern in der Internetbefragung eingetragen wurden:

„An der Kreuzung Radfahrer übersehen – nicht damit gerechnet“

„Radfahrer kam verdeckt von Hecke und kam erst kurz vor Lkw zum Stehen“

„Einscheren nach dem Überholen. Auto übersehen“

„lange links geblickt – rübergebogen – Auto im toten Winkel“

„An Kreuzungen losfahren/abbiegen, plötzlich taucht ein Fahrrad-Kurier auf.“

„Beim Einbiegen in ein Werksgrundstück, beim Queren des Bürger-/Fahrradweg einen Fahrradfahrer übersehen.“ (zwei Situationen ähnlich)

„Ein Fußgänger lief bei Rot vor mein Fahrzeug und ich habe ihn nicht gesehen.“

„Fahrradfahrer fährt bei Rot, ich hatte grün. Er fährt im Schatten meines Spiegels. Plötzlich taucht er auf, ich mach eine Vollbremsung“

„Ein Pkw befand sich rechts im toten Winkel“

Im Fall einer kritischen Situation taucht der gegnerische Verkehrsteilnehmer für den Fahrer extrem spät auf. Dies ist auch aus den vielen Gesprächen mit Berufskraftfahrern während der kompletten Projektarbeit von 2011 bis 2014 festzuhalten. Selbst wenn der Fahrer das Objekt hätte früher erkennen können, erscheint es für ihn plötzlich und gewissermaßen aus dem Nichts.

Anders ist wohl die Wahrnehmung aus Sicht des gegnerischen Verkehrsteilnehmers zu beurteilen, der den Lkw aufgrund seiner Größe in der Regel frühzeitig wahrnimmt. Den Verkehrsteilnehmern ist oftmals nicht bewusst, dass sie vom Lkw-Fahrer eventuell nicht wahrgenommen werden, was wiederum zu diesen gefährlichen Situationen führt.

#### **4.1.4. Fazit der Fahrerbefragungen**

Aus der Fahrerbefragung lassen sich einige Schlüsse ziehen, die für die Entwicklung eines Ersatzsystems bedeutsam sind:

Die Fahrer nutzen vorrangig die Hauptspiegel. Wird die subjektive Spiegelnutzung von Fahrer- und Beifahrerseite getrennt betrachtet, ist der Unterschied im Vergleich zu den anderen Spiegeln als signifikant zu bezeichnen.

Ebenso ist zu erkennen, dass bei einem Richtungswechsel die Spiegel der Kurveninnenseite/Bewegungsrichtung vermehrt Beachtung finden. Die durchschnittliche Nutzung der einzelnen Spiegel auf der Kurveninnenseite erhöht sich je nach Situation und Spiegel um maximal eineinhalb Bewertungsstufen. So steigt die Nutzung der Hauptspiegel in manchen Situationen auf die höchste Stufe, während das Maximum der durchschnittlichen Nutzung des Anfahrspiegels auf etwas mehr als „manchmal“ steigt. Es ist also ersichtlich, dass die Spiegel zur direkten Umfeldüberwachung, das meint die beiden Anfahr- und den Frontspiegel, nicht im Fokus des Fahrers stehen, wohingegen die Hauptspiegel laut Fahrer in jeder Situation genutzt werden. Die Weitwinkelspiegel bilden in der Nutzung eine Art Zwischenstufe, was auch den Erkenntnissen des Theorieteils in Kapitel 3.3 entspricht.

Es wurden Daten und Erfahrungen der Fahrer zu kritischen Situationen erfragt, die auch Aufschluss über die Wahrnehmung der Fahrer geben. Hier ist festzustellen, dass die aktuellen Spiegel selbst einen großen Bereich der direkten Sicht nach vorne verdecken. Bei der indirekten Sicht entdeckt der Fahrer die Objekte teilweise erst spät oder gar nicht, wobei die Ursache dafür nicht immer eindeutig geklärt werden kann, aber meist befinden sich die Objekte im mentalen toten Winkel (siehe Kapitel 2.1.2).

## **4.2. Probandenversuche zur Spiegelnutzung im Realverkehr**

Um die Spiegelnutzung neben der subjektiven Bewertung aus der Sicht der Fahrer zudem objektivieren zu können, wurden verschiedene Probandenstudien an einer Sattelzugmaschine des Typs MAN TGX auf der abgesperrten Teststrecke der MAN Truck & Bus und im Realverkehr durchgeführt. Dabei wurde je nach Versuchsziel und -design der verschiedenen Untersuchungen unterschiedliche Messtechnik verwendet. In dieser Arbeit werden drei Studien vorgestellt.

### **4.2.1. Spiegelnutzung anhand von Blickdaten**

In einem Realversuch im Straßenverkehr wurde die Nutzung der einzelnen Spiegel durch das kopffeste Blickerfassungssystem Dikablis, bekannt aus zahlreichen Dissertationen des Lehrstuhls, erfasst. Die Versuchsfahrt bildete eine Mischung aus Autobahn, Landstraße und geschlossene Ortschaft und dauerte ca. 45 min.

Insgesamt nahmen 25 Probanden an dem Versuch teil, wovon 12 Probanden mit einem Sattelzugspann und die übrigen 13 Probanden die Versuchsstrecke nur mit der Zugmaschine absolvierten. Der Versuchsaufbau kann in der Arbeit von Starflinger (2012) und die Ergebnisse im Detail in der

Arbeit von Franke und Fröhlich (2013) nachgelesen werden. Von den insgesamt 25 Probanden können aufgrund technischer Randbedingungen, wie beispielsweise die Pupillenerkennung oder die Systemverfügbarkeit, letztendlich 17 ausgewertet werden (Durchschnittsalter 41,1 a; SD 9,8 a; 8 Probanden fuhren mit Auflieger, 9 Probanden nur mit Zugmaschine).

Ausgewertet werden wie in der Befragung die Situationen bei Geradeausfahrt ohne weitere Fahraufgabe und das Rechtsabbiegen. Dabei werden sowohl die Anzahl der Spiegelblicke, die jeweilige Blickdauer in den Spiegel als auch die Kombination beider Werte, die kumulierte Blickdauer, analysiert.

#### 4.2.1.1. Datenerhebung und -aufbereitung

Die Daten der Versuchsfahrten sind mit dem Blickfassungssystem Dikablis aufgenommen. Das kopffeste System, das einer Brille ähnelt, filmt zum einen die Szenerie und zum anderen ein Auge des Probanden. Beide Aufnahmen werden überlagert und zueinander kalibriert, sodass nachverfolgt werden kann, wohin der Fahrer zum jeweiligen Zeitpunkt blickt, es wird also die foveale Sicht gemessen. Mit der Platzierung von Markern, das sind QR-Code-ähnliche Felder, im Fahrzeug, die die Software von DLAB erkennt, können bei der automatisierten Auswertung sogenannte Areas of Interest aufgestellt werden. In den Fahrversuchen bildeten die einzelnen Spiegel jeweils eine Area of Interest.



Abbildung 4-5: Fahrversuch mit Blickfassung (verwendetes System: Dikablis)

Nach der Aufnahme werden die Daten vom Versuchsleiter überprüft und, wenn nötig, korrigiert. Dazu zählt zum Beispiel das manuelle Bestimmen des Pupillenmittelpunktes, den das System nicht immer zweifelsfrei bestimmen kann. Ebenso werden die einzelnen untersuchten Situationen visuell am Bildschirm überprüft, um Fehldetektionen auszuschließen.

Da die Versuche im Realverkehr bei unterschiedlichen Licht- und Wetterverhältnissen stattfanden ist der Nachbearbeitungsaufwand relativ hoch. Deshalb werden nur ausgewählte Situationen nachbearbeitet und analysiert: Die Geradeausfahrt als Grundnutzung und das Rechtsabbiegen an einer Ampel. Durch die detaillierte Auswertung von wenigen Situationen bei einwandfreien Blickdaten konnten Franke und Fröhlich (2013) alle relevanten Daten manuell überprüfen.

#### 4.2.1.2. Spiegelnutzung in der Geradeausfahrt

Für die drei Straßentypen Autobahn, Landstraße und Stadt wird wie in der Befragung je eine Situation herausgegriffen, die eine geringe mentale Belastung des Fahrers voraussetzt: dem Folgen des Straßenverlaufes. Dazu werden die Videos aus den Probandenversuchen gesichtet und in bestimmten Streckenabschnitten die Zeitabschnitte herausgegriffen, in denen keine spezielle Handlung des Fahrers zu erkennen ist. Die analysierte Zeitdauer der Geradeausfahrt liegt in der Stadt bei durchschnittlich 500 s (SD 56 s), auf der Landstraße bei 753 s (SD 60 s) und auf der Autobahn bei 214 s (SD 25 s) pro Fahrer. Es werden in insgesamt etwas weniger als 7 h Fahrt über die 17 Probanden insgesamt 2669 Blicke in einzelne Spiegel gezählt. Im Durchschnitt blicken die Probanden alle 11,6 s (SD 6,1 s) in einen Spiegel, dabei lässt sich über das Probandenkollektiv eine erhöhte Spiegelnutzung (bei reduzierten Einzelblickzeiten) in der Stadt (alle 11,4 s (SD 6,7 s) für durchschnittlich 467 ms (SD 106 ms)) gegenüber Landstraße (12,1 s (SD 7,4 s); 492 ms (SD 102 ms)) und Autobahn (17,8 s (SD 20 s), 550 ms (SD 204 ms)) erkennen. Die prozentuale Spiegelnutzungsdauer liegt bei der Geradeausfahrt knapp über 5 % (Stadt: 5,2 % (SD 2,6 %); Landstraße 5,3 % (SD 2,7 %); Autobahn 5,0 % (SD 2,8 %)). Die Spiegelnutzung fällt in Abhängigkeit vom Fahrer sehr unterschiedlich aus, das ist auch an den großen Standardabweichungen zu sehen.

Abbildung 4-6 zeigt die prozentuale Nutzungsdauer der einzelnen Spiegel für das Geradeausfahren. Es wird eine zweifaktorielle Varianzanalyse der prozentualen Nutzung der Spiegel nach Straßentyp ( $F(2, 336) = 0.04$ ,  $p = 0,955$ ,  $\eta_p^2 = 0.0$ ) und den einzelnen Spiegeln ( $F(6, 336) = 115,4$ ,  $p < 0.001$ ,  $\eta_p^2 = 0.673$ ) sowie die dazugehörigen Post-hoc-Tests nach Tukey für die einzelnen Spiegel durchgeführt. Die beiden Hauptspiegel unterscheiden sich dabei signifikant voneinander und jeweils von allen anderen Spiegeln. Wird die Nutzung der einzelnen Spiegel betrachtet, sticht die Dominanz des linken Hauptaußenspiegels ins Auge, der mit Abstand am häufigsten benutzt

wird. Es zeigt sich vor allem, dass im Grunde nur die beiden Hauptaußenspiegel regelmäßig verwendet werden, die weiteren Spiegel finden kaum Beachtung.

### Prozentuale Nutzung (kumulierte Blickdauer) der Spiegel bei Geradeausfahrt/Folgen des Straßenverlaufes

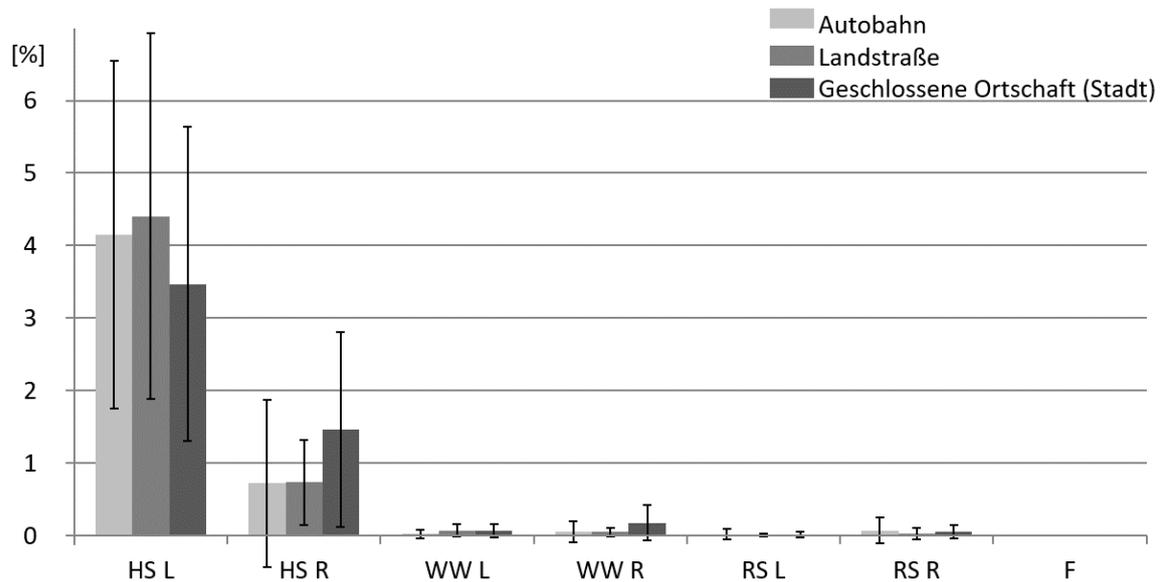


Abbildung 4-6: Prozentuale Nutzungsdauer der Spiegel bei Geradeausfahrt (Fehlerbalken entsprechen  $\pm 1$  SD; HS: Haupt-, WW: Weitwinkel-, RS: Rampen-, F: Frontspiegel, L: Links, R: Rechts)

Die Verteilung der kumulierten Blickdauer zeigt das typische und plausible Verhalten des Fahrers. In der Geradeausfahrt ohne weitere Fahraufgabe interessiert den Fahrer hauptsächlich, was links hinter ihm geschieht. Da bei Rechtsverkehr, wie in Deutschland vorgeschrieben, in der Regel links überholt wird und der Lkw die rechte Spur nutzt, ist klar, dass der linke Hauptspiegel die höchste Nutzung erfährt, nur ab und zu wird der rechte Hauptspiegel kontrolliert. Die örtliche Nähe des Fahrers zum linken Hauptspiegel beeinflusst die Nutzungshäufigkeit ebenso positiv. Ein Blick in einen der anderen Spiegel ist wie gezeigt selten. Da der Fahrer in der Geradeausfahrt keine besondere Aktion plant und seine künftige Position anhand der direkten Sicht bestimmt, ist das Verhalten des Fahrers einfach erklärbar. Der Fahrer wird je nach Situation sein Verhalten ändern, wie das nächste Kapitel beispielsweise für das Rechtsabbiegen zeigt und hinsichtlich der subjektiven Spiegelnutzung erläutert wurde.

#### 4.2.1.3. Spiegelnutzung beim Rechtsabbiegen an der Ampel

Als Beispiel für eine Situation mit erhöhter Aufmerksamkeit des Fahrers kann wie bei der subjektiven Selbstbewertung das Rechtsabbiegen betrachtet werden. In diesem Abschnitt werden die Situationen beim Rechtsabbiegen an einer Ampel während der Versuchsfahrt gemeinsam betrachtet. Es werden somit pro Fahrer jeweils sechs Situationen zusammen betrachtet. Das Abbiegen ist in die drei Teilabschnitte Anfahren, Abbiegen und Einordnen gegliedert, die in der Auswertung zusammengenommen sind. Das Anfahren startet meist mit dem Umschalten der Ampel von Rot auf Grün. Somit lässt sich ein geeignetes und eindeutiges Startsignal definieren. Falls der Fahrer die Ampel ohne Rotphase passierte, definiert der Versuchsleiter den Startpunkt anhand des Videos. Als Endpunkt der Situation ist das komplette Einordnen in die Fahrspur definiert, sie endet nach dem letzten Blick des Fahrers zur rechten Seite der Windschutzscheibe. Die Situationen finden alle in der geschlossenen Ortschaft statt, wobei die Hälfte in einem belebten Gewerbegebiet in Eching im Landkreis Freising absolviert wurde. In drei der sechs Situationen befand sich parallel zur Fahrbahn ein Radweg. Die einzelnen Situationen sind im Anhang einzusehen.

Die je Proband analysierte Zeitdauer liegt im Durchschnitt bei 117 s (SD 18,1 s) bzw. bei 19,5 s pro Situation. In den insgesamt analysierten 33,3 min werden über alle ausgewerteten Probanden 546 Blicke in die Spiegel gezählt. Im Durchschnitt blicken die Probanden alle 3,7 s in einen der Spiegel, wobei die durchschnittliche Blickdauer in die einzelnen Spiegel 460 ms beträgt. Die prozentuale Spiegelnutzdauer liegt bei 12,5 % (SD 6,6 %) und ist somit weit mehr als doppelt so hoch wie die der Geradeausfahrt. Abbildung 4-7 zeigt den direkten Vergleich zwischen der Geradeausfahrt in der Stadt und dem Rechtsabbiegen an einer Ampel. In einer zweifaktoriellen ANOVA können sowohl der Unterschied zwischen den beiden Situationen ( $F(1, 224) = 17.2, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.071$ ), zwischen den Spiegeln ( $F(6, 224) = 30.5, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.450$ ) als auch Interaktionseffekte ( $F(6, 224) = 6.5, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.148$ ) nachgewiesen werden. Die allgemeine Erhöhung der prozentualen Spiegelnutzung ist klar erkennbar, insbesondere eine erhöhte Nutzung des rechten Haupt- und Weitwinkelspiegels. Für jeden der einzelnen Spiegel wurde zwischen den beiden Situationen jeweils ein gepaarter, gerichteter T-Test an den im Abbildung 4-7 auffälligen Spiegel durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4-7 zu sehen.

## Vergleich der prozentualen Spiegelnutzung bei Geradeausfahrt und dem Rechtsabbiegen an einer Ampel

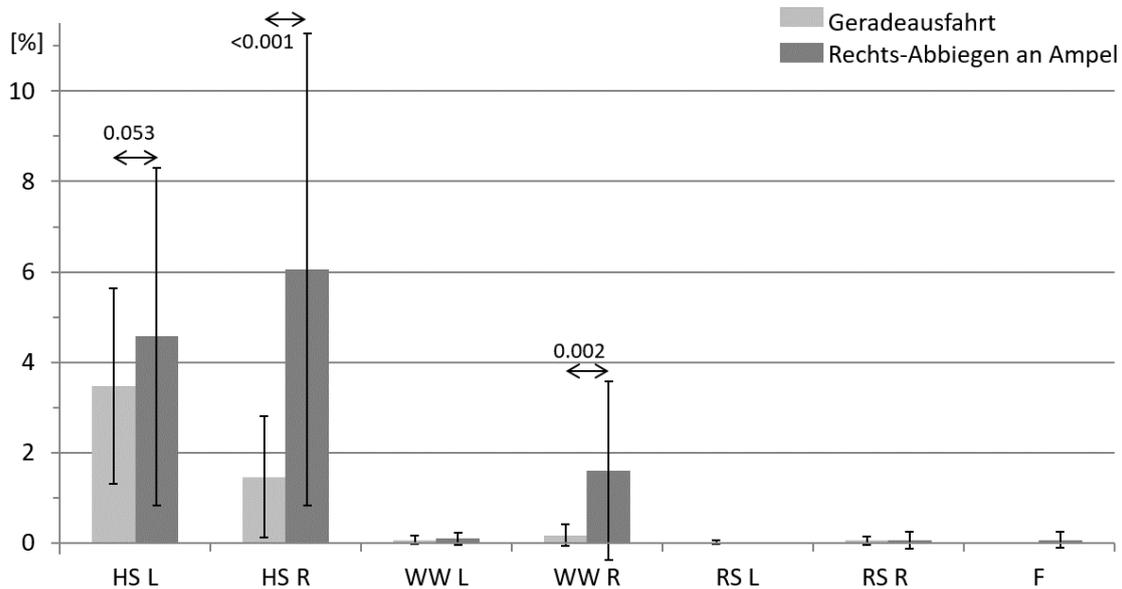


Abbildung 4-7: Vergleich der prozentualen Spiegelnutzung bei Geradeausfahrt und beim Rechtsabbiegen (Fehlerbalken entsprechen  $\pm 1$  SD; HS: Haupt-, WW: Weitwinkel-, RS: Rampen-, F: Frontspiegel, L: Links, R: Rechts)

In der Verteilung ist sehr deutlich zu erkennen, was teilweise schon in der von Fahrern selbst berichteten subjektiven Nutzung der Spiegel (siehe Kapitel 4.1.2.2) dargestellt wurde. Der Fahrer nutzt beim Rechtsabbiegen zum größten Teil den rechten Hauptaußenspiegel. Ebenso eine hohe Nutzung erfährt der linke Hauptaußenspiegel. Der Weitwinkelspiegel auf der Beifahrerseite erfährt beim Rechtsabbiegen eine höhere Nutzung als auf der Geradeausfahrt, jedoch eine deutlich geringere Nutzung als die beiden Hauptspiegel. Die restlichen Spiegel werden kaum bzw. von den meisten Fahrern in dieser Situation nicht genutzt (Median = 0). Von sieben möglichen und sechs vorgeschriebenen Spiegeln nutzt der Fahrer in dieser Situation bloß drei. Es entsteht ein großer mentaler toter Winkel, den der Fahrer in der Situation nicht einsieht, obwohl das Sichtfeld für die Situation durchaus nötig sein kann.

### 4.2.1.4. Diskussion

Die Art der Nutzung ist aus Sicht des Fahrers durchaus nachvollziehbar und bestätigt die Aussagen der Fahrer zur subjektiven Spiegelnutzung. Der Fahrer nutzt im Wesentlichen nur die beiden Hauptspiegel und zusätzlich situativ beispielsweise im Abbiegefall die Weitwinkelspiegel. Er verwendet also die Spiegel, die seiner direkten Motivation dienen. Die anderen Spiegel werden im

Grunde genommen nicht in der Häufigkeit und Güte benutzt, wie von den anderen Verkehrsteilnehmern erwartet wird.

Wird die subjektive mit der gemessenen Spiegelnutzung verglichen, fällt auf, was in künftigen Studien überprüft werden sollte: Bis zu einer subjektiven Nutzung von „manchmal“ nutzt der Fahrer die Spiegel in der Realität nur sehr marginal. Der Fahrer überschätzt die Nutzung der Spiegel in diesem Bereich und wähnt sich somit sicher, obwohl er den Bereich teilweise komplett unüberwacht lässt. Nur wenn die Fahrer im Durchschnitt die Spiegelnutzung als „häufig“ oder „immer“ einschätzen unterliegen diese Spiegel überhaupt einer regelmäßigen Nutzung. Sollte sich diese These bestätigen, wird anhand der Abbildung 4-4 deutlich, dass in den befragten Situationen neben den in der Nutzung hervorstechenden Hauptspiegeln nur noch die Weitwinkelspiegel von der breiten Masse der Fahrer wirklich genutzt werden. Eine detaillierte Untersuchung zwischen der Eigenwahrnehmung der Fahrer und der tatsächlichen Nutzung der Spiegel am Nutzfahrzeug kann diese These künftig prüfen.

Beim Rechtsabbiegen hat der Fahrer ein mentales Modell seiner Umgebung gebildet, in dem er die Einsicht der Nahbereiche über die Spiegel nicht verwendet. Der Fahrer geht davon aus, dass sich sein Umfeld nicht verändert, insofern er nicht bereits vorher ein Objekt entdeckt hat, das in den Bereich eintritt. Die Einschätzung des Fahrers wird wohl in den allermeisten Fällen richtig sein. Jedoch entstehen in den wenigen Fällen, in denen das kognitive Modell nicht zutrifft, mitunter gefährliche Situationen.

#### **4.2.2. Körperbewegung in der Kabine zur Blickerweiterung**

Wurde in den vorherigen Kapiteln erläutert, wann und wie oft der Fahrer in welchen Spiegel blickt, wird nun auf die Interaktion des Fahrers mit den Hauptspiegeln eingegangen. Insbesondere ist von Interesse, ob und inwieweit der Fahrer gezielt seinen Kopf und Körper bewegt, um das Sichtfeld im Spiegel dynamisch zu erweitern.

Bei der (gesetzlichen) Beschreibung von Spiegelsystemen und deren Sichtfeldern wird meistens von fixen Augpunkten ausgegangen. Kopfbewegungen bewirken, dass zum einen das Sichtfeld im Spiegel erweitert und zum anderen die Tiefenwahrnehmung durch Parallaxe verbessert wird (Goldstein, 2008, S. 189). Aus der Fahrerbefragung, den Fahrversuchen und Publikationen anderer Autoren lässt sich schließen, dass der Fahrer seinen Kopf gezielt bewegt, um das Sichtfeld im Spiegel zu verändern (Bothe, et al., 2012; Fagerström, Garlund, 2012).

Kopfbewegungen zur Erweiterung der indirekten Sicht thematisiert auch die ISO 16505. Bothe (2014) und Bothe et al. (2012; 2013a) untersuchten die Kopfbewegungen ausgiebig anhand

groß angelegter Probandenversuche. Das Ergebnis sind dynamische Augpunktlagen, die mit verschiedenen Parametern kombiniert werden können. Aus dieser Arbeit erschließt sich, dass eine Abhängigkeit des Knickwinkels zwischen Zugmaschine und Auflieger und der dynamischen Augpunktlage besteht. Eine Schlussfolgerung, die sowohl aus der Arbeit von Bothe als auch den eigenen Erhebungen gezogen werden kann, ist dass der Fahrer bestrebt ist, seinen Auflieger bzw. seine hinterste Achse so lange wie möglich über den Hauptspiegel im Blick zu behalten.



Abbildung 4-8: Durch eine Kopfbewegung kann der Fahrer im Hauptspiegel das Trailerende erkennen. Links: Das Trailerende und der rückwärtige Verkehr ist im Hauptspiegel nicht zu erkennen. Rechts: Verbesserung der Sichtsituation durch eine Kopfbewegung (der Effekt wurde während der Fahrt mithilfe der Spiegelverstellung simuliert. Kameraposition blieb fix)

Abbildung 4-8 zeigt den rechten Haupt- und Weitwinkelspiegel während einer Rechtsabbiegesituation. Der Auflieger verdeckt den kompletten Sichtbereich des Hauptspiegels. Der Fahrer kann durch eine Bewegung des Kopfes den eingesehenen Bildbereich nach außen verschieben. Alternativ kann der Fahrer den Blick auf den Weitwinkelspiegel lenken, der die komplette Situation verkleinert und verzerrter als der Hauptspiegel wiedergibt. In den Fahrversuchen und in den Gesprächen mit Berufskraftfahrern konnten beide Verhaltensweisen beobachtet werden. Aus den Beobachtungen entstand die Idee diesen Effekt genauer zu untersuchen.

#### 4.2.2.1. Simulation der Sichtenerweiterung mit RAMSIS in CATIA

In einem ersten Schritt wurde die Sichtenerweiterung mithilfe von Kopf- und Körperbewegungen mit RAMSIS in CATIA simuliert. Die Methode und die jeweiligen Ergebnisse stellen Zaindl et al.

(2013) dar. Im ersten Schritt wird eine Situation geschaffen, in der der Fahrer bzw. das Menschmodell (Manikin) in RAMSIS das Trailerende nicht mehr über den Hauptspiegel erkennen kann. Das erste Bild in Abbildung 4-9 zeigt beispielhaft eine solche Konstellation. Die Konstruktion eines Sichtkeiles vom Endpunkt des Aufliegers über den Spiegel ins Fahrerhaus zeigt anschaulich den Bereich, in dem der Fahrer das gewünschte Objekt erkennen kann. Durch das Setzen geeigneter Restriktionen in RAMSIS kann die Interaktion des Fahrers mit dem Spiegel simuliert werden. In diesem Fall bleibt das in Fahrhaltung sitzende Manikin von der Hüfte abwärts in derselben Position. Ebenso sind die Hände am Lenkrad fixiert. Um den Auflieger im Spiegel sehen zu können, müssen noch beide Augpunkte in den zuvor definierten Bereich und der Blick auf den Spiegel gerichtet werden. Die von RAMSIS errechnete Körperhaltung ist die für den Menschen wahrscheinlichste Position, die das Manikin in der Situation einnehmen muss, um im Hauptspiegel das Trailerende noch sehen zu können (siehe Bild rechts in Abbildung 4-9). Die Simulation ergibt eine Sichtenerweiterung im Spiegel, die hauptsächlich durch eine Beugung nach vorne erreicht wird. In der Simulation endet die Vorwärtsbewegung des Fahrers mit der Kollision am Lenkrad, was in der unteren Bildreihe von Abbildung 4-10 zu erkennen ist. Inwieweit der Fahrer diesen möglichen Bereich der Sichtenerweiterung wirklich nutzt und ab wann er auf andere Spiegel oder Informationen zurückgreift, wurde in einem Probandenversuch erörtert.

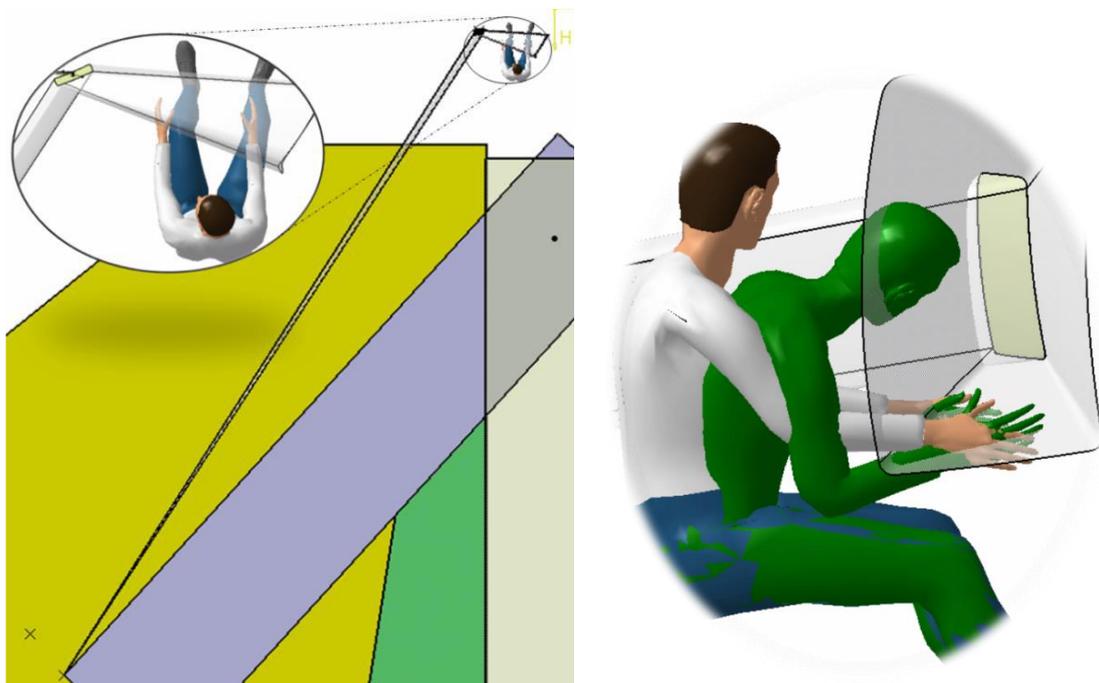


Abbildung 4-9: Konstruktion einer Sichtenerweiterung im Spiegel. Links: Das Ende des Trailers ist für den Fahrer nicht einsehbar. Rechts: durch eine Beugung nach vorne (grün) kann er dieses dennoch einsehen (Zaindl et al., 2013)

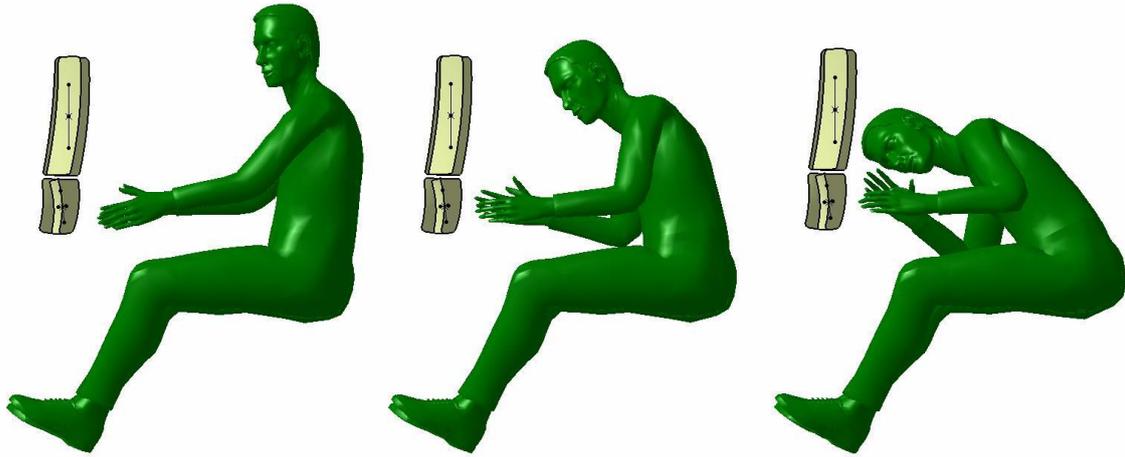


Abbildung 4-10: Simulation einer zunehmenden Sichtverweiterung im Spiegel durch eine Beugung nach vorne (Zaindl et al., 2013)

#### 4.2.2.2. Probandenstudie zur Sichtverweiterung

Es wurde eine Studie mit 17 männlichen Probanden ( $\bar{x}$  36,5 a; SD 8,6 a; 29 % Berufskraftfahrer) durchgeführt. Der Versuchsaufbau und die Messtechnik wird von Erber (2013) beschrieben, die Studie selbst von Graf (2014). Beide Semesterarbeiten entstanden im Rahmen der Dissertation. Die Ergebnisse werden zusammengefasst dargestellt. Für die Studie durchfahren die Probanden zwei verschiedene Situationen, wobei beide Situationen jeweils sowohl von links als auch von rechts durchfahren werden. Die Situationen sind in Abbildung 4-11 veranschaulicht und stellen ein Rückwärtsrangieren um eine 90°-Kurve dar. Wurden in der Dissertation von Bothe (2014) schon die dynamischen Augpunktlagen während der Fahrt ohne Rangieren aufgezeigt, sollte in diesen Versuchen die Extremsituation dargestellt werden. Es wird somit die größtmögliche reell vom Fahrer genutzte Sichtverweiterung im Nutzfahrzeug dargestellt. Die erste der beiden Situationen stellt den Extremfall, die zweite eher den Realfall dar, beispielsweise die Anfahrt an Laderampen.

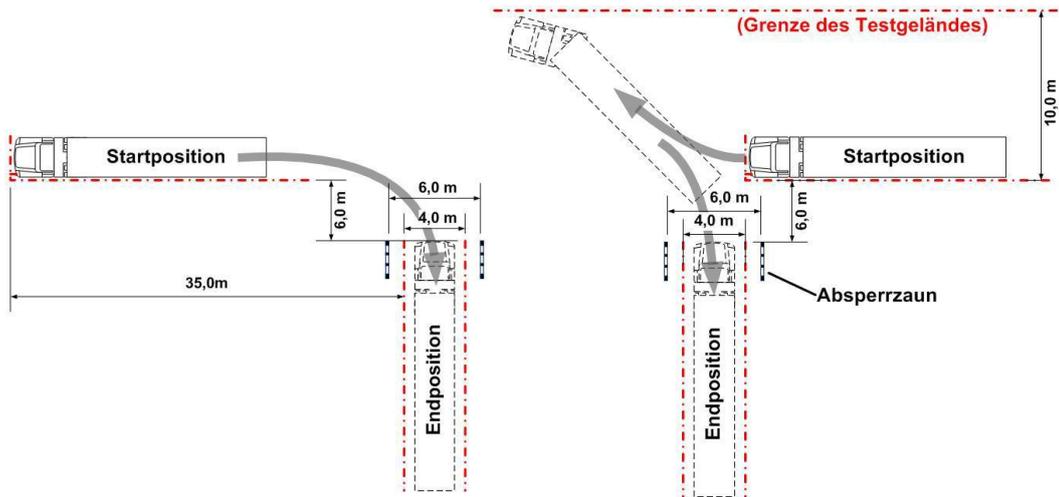


Abbildung 4-11: Versuchsaufbau zum Rückwärtsrangieren in eine 90°-Lücke (Graf, 2014)

Während der Versuchsfahrt wurde die Körperbewegung von einem im Dachhimmel montierten, aus sechs Kameras bestehenden VICON-Motion-Tracking-System aufgenommen. Die Blickerfassung wurde mit dem kopffesten Dikablis-System realisiert. Zusätzlich wurden Videoaufnahmen des Außenszenarios durch fest montierte Kameras am Fahrerhaus und eine Innenraumaufnahme des Fahrers gemacht. Abbildung 4-12 zeigt einen Einblick in den Versuch. Sowohl der Blick des Fahrers in den rechten Hauptspiegel als auch die deutliche Beugung des Fahrers nach vorne sind zu erkennen. Am Probanden sind Marker angebracht, die von den im Dachhimmel montierten VICON-Kameras erfasst wurden und ein dreidimensionales Bewegungsmodell des Fahrers ermöglichen.



Abbildung 4-12: Blick in Versuch – der Fahrer rangiert um 90° in eine Parklücke, die sich auf der Beifahrerseite befindet. Er blickt in den Hauptspiegel und beugt sich dabei weit nach vorne (Graf, 2014)

Die Versuche zeigen eine große Übereinstimmung zwischen der simulierten Bewegung und der realen Bewegung im Fahrzeug. Der Fahrer nutzt eine Bewegung nach vorne um sein Sichtfeld zu erweitern. Inwieweit der Fahrer dabei die Bewegung nutzt, ist in den Versuchen stark fahrerabhängig (Zaindl et al., 2014a).

Die Beugung nach vorne ist eindeutig zu erkennen. Dies stützt die Aussagen von Bothe (2014, S. 90), der die statischen Augpunktlagen mit den dynamischen vergleicht und vornehmlich eine Bewegung in x-Richtung (nach vorne) aufzeigt. Ebenso ist zu erkennen, dass die Fahrer einen großen Bewegungsraum aufspannen. In den Versuchen kann beobachtet werden, dass die gezielte Sichtenerweiterung fast ausschließlich im Hauptspiegel zum Tragen kommt (Zaindl et al., 2014a).

Zur Bestimmung der Maximalpositionen der Fahrer konnten beim Rangieren in die beifahrerseitige Lücke 27, in die fahrerseitige insgesamt 30 Fahrten ausgewertet werden. Dabei wurde der Oberkörper bzw. der Wirbelsäulenpunkt CV7 am siebten Halswirbel (van Sint Jan, 2007) im Schnitt um 21,6 cm (beim Blick auf den linken Hauptspiegel, SD 8,6 cm) bzw. 31,1 cm (rechter Hauptspiegel, SD 12,1 cm) nach vorne gebeugt, das Mittenauge (der berechnete Mittelpunkt zwischen den Augen) um 29 cm (Fahrerseite, SD 9,5 cm) bzw. 36 cm (Beifahrerseite, SD 14,5 cm). Beifahrerseitig bedeutete dies oftmals eine Beugung nach vorne bis knapp vor das Lenkrad.

Aus der Verschiebung der Augpunkte lässt sich die Sichtfelderweiterung im Hauptspiegel berechnen. In den zuvor beschriebenen Maximalpositionen erweitern die Probanden ihr Sichtfeld im Durchschnitt fahrerseitig um  $11,5^\circ$  (SD  $4,9^\circ$ ) und beifahrerseitig um  $7,5^\circ$  (SD  $3,7^\circ$ ). Obwohl sich der Fahrer beim Blick in den beifahrerseitigen Spiegel weiter nach vorne beugt, ist die Sichtwinkel-erweiterung geringer als die der Fahrerseite. Dies lässt sich einfach durch die unterschiedlichen Abstände der beiden Spiegel zum Fahrer erklären. Ein interessantes Phänomen, das bei den Versuchen beachtet werden muss, ist dass die direkte Sicht fahrerseitig eine große Hilfe darstellt. Der Fahrer blickt somit direkt aus der Scheibe auf die Situation. Dies ist auf der Beifahrerseite wegen der großen Entfernung zur Seitenscheibe praktisch ausgeschlossen.

#### **4.2.2.3. Fazit aus den Rangierfahrten**

Die Fahrten zeigen deutlich, dass der Fahrer durch Kopfbewegungen sein Sichtfeld in den Hauptspiegeln erweitert. Viele Fahrer wechseln den Blick dabei zunächst nicht vom Hauptspiegel in den Weitwinkelspiegel, sondern nutzen den Hauptspiegel, solange dies für ihre Zwecke möglich ist. Erst anschließend wird in den Weitwinkelspiegel geblickt. Nach den Erfahrungen des Versuchsleiters nutzen hingegen die wenigen Probanden mit geringer Kopfbewegung bereits frühzeitig den Weitwinkelspiegel.

Ein Großteil der Fahrer ist bestrebt die foveale Motivation, nämlich das Erkennen von Hinterachse und Trailerende zum Zielen in die Lücke, solange wie möglich mit dem vermeintlich besten Hilfsmittel, dem wenig verzeichnenden Hauptspiegel, zu realisieren.



Abbildung 4-13: Visualisierung des vom Fahrer eingesehenen Bereiches – der Fahrer nimmt über den Hauptspiegel nur einen kleinen Teil seiner Umgebung wahr (qualitative Darstellung)

Durch die Fixierung auf den Hauptspiegel ist es dem Fahrer jedoch nicht möglich, einen Gesamtüberblick über die Szenerie zu gewinnen. Er nimmt nur einen kleinen Abschnitt wahr. In Abbildung 4-13 wird dies am Beispiel eines Probanden visualisiert. Die Erfüllung der Fahraufgabe ist entweder durch den geringen Überblick im Hauptspiegel oder durch die große Verzerrung im Weitwinkelspiegel erschwert. Dies zeigt sich auch darin, dass die Fahrer, wenn möglich, direkt aus der Seitenscheibe auf das Geschehen blickten. Nach Aussagen mancher Probanden versuchen sie im täglichen Betrieb, Rangierfahrten nach rechts mit vermehrten Blick auf die beifahrerseitigen Spiegel möglichst zu meiden. Zudem ist die komplette Rückseite des Trailers und Lkws nicht einsehbar. Ein Sicherungsposten ist in dieser Situation selbst mit Rückfahrkamera unerlässlich, auch wenn dieser eher selten in Anspruch genommen wird, wie Befragungen zeigen (Palacios, 2012, S. 67).

#### 4.2.3. Kopfdrehung und dynamische Kopflagen im Realversuch

Eine von Bothes Arbeit (2014) inspirierte Untersuchung betraf die Auswertung der Kopfbewegung und -drehung während eines Realversuches.

Der Versuch war Teil eines ersten Vergleiches zwischen dem damaligen Stand des KMS-Prototyps und dem Spiegelsystem. Mithilfe einer Baseballmütze mit darauf platzierten Infrarot-LEDs, einer umfunktionierten Webcam (entfernen des IR-Filters und abdunkeln des Bereiches mit IR-durchlässigen Filtern)

sigem Filmmaterial) und einem von Badbanchi (2014) in einer Studienarbeit entwickelten Programm wurde die Kopfbewegung in der x-y-Ebene während einer kombinierten Fahrt über Autobahn, Landstraße und Stadt aufgenommen. Eine Rangierfahrt rückwärts vervollständigte die Versuchsfahrt. In Abbildung 4-14 ist der Versuchsaufbau zur Messung der Kopfposition und der von der Kamera erfasste Bereich zu sehen.

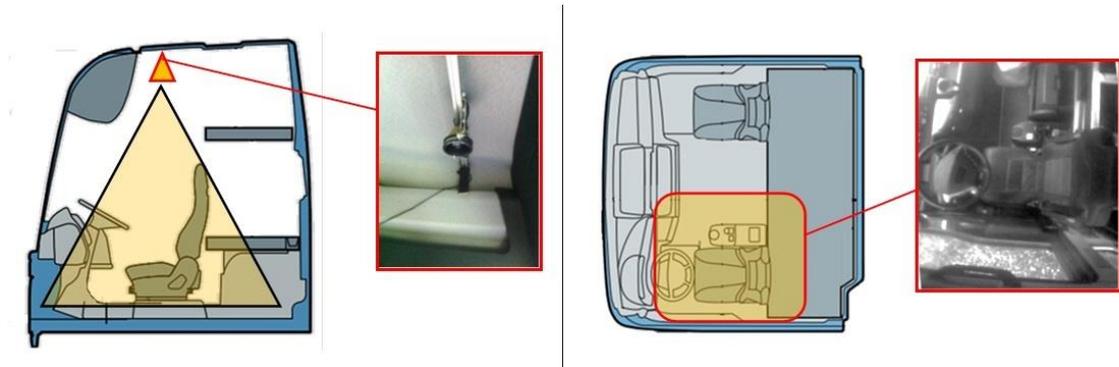


Abbildung 4-14: Kamerapositionen im Versuchsaufbau zur Messung der Kopfposition in der Kabine (Badbanchi, 2014)

An der Studie von Badbanchi (2014) nahmen 19 Probanden teil ( $\bar{x}$  36,1 a, SD 10,1 a). Die Messmethode wurde im Labor in Vergleichsmessungen verifiziert. Die Kopfbewegung wird anhand des hintersten Markers aufgrund der Nähe zur Wirbelsäulenachse zum Herausfiltern der Kopfdrehung und Anzeige der lateralen Bewegung visualisiert. Für die Kopfdrehung wird der Winkel aus allen drei Markern berechnet. Als Nullpunkt ist die Kopfposition während der Geradeausfahrt mit Blick nach vorne, kontrolliert über Eye-Tracking-Daten, bei jedem Probanden einzeln definiert. Der Nullpunkt entspricht somit bei jedem Probanden einer gewissen dynamischen Ruhestellung in der Nähe des Kopfdrehpunktes. Der Abstand von Kopf zur Kamera wurde über den Abstand der LED zueinander berechnet. Die Kopfneigung wurde über den Abstand der beiden vorderen Marker rechnerisch herausgefiltert.

#### 4.2.3.1. Laterale Kopfbewegung

Ohne eine explizite Prüfung aller von Bothe untersuchten Abhängigkeiten (2014, S. 126) ergeben die Beobachtungen bereits ein Bild, das seine Ergebnisse stärkt. Je komplexer die Situation und je mehr Informationen der Fahrer aus den Sichtgegebenheiten holen muss, umso stärker findet eine Bewegung des Kopfes statt. Die Sichterweiterung der direkten und indirekten Sicht findet dabei vornehmlich über Kopfbewegungen nach vorne und zur Seite statt.

Die dynamischen Positionen des Kopfes spannen, wie die Ergebnisse von Badbanchi (2014) zeigen, einen sehr großen Bereich auf. Dies ist auch durch die aufrechte Sitzhaltung im Nutzfahrzeug erklärbar, die eine große Bewegungsfreiheit mit geringer körperlicher Belastung im Vergleich zur Sitzhaltung im Pkw gewährleistet. Abbildung 4-15 zeigt die Kopflagen aller Probanden über den kompletten Versuch. Der Bewegungsraum, der von den Fahrern aufgespannt ist, beträgt vom 5. zum 95. Perzentil in Längsrichtung 11 cm und 12,7 cm zur Seite, die Standardabweichung der Position beträgt in x-Richtung 4,2 cm, in y-Richtung 3,9 cm. Dies bedeutet, dass der Fahrer in der meisten Zeit der Fahrt seine Kopfposition nicht stark verändert. Lediglich in Sondersituationen, z. B. bei situativ unzureichender Sicht, wird die Bewegung größer und kann sehr große Werte annehmen. Berücksichtigt werden muss hierbei die gemittelte Startposition für jeden Fahrer. Der absolute Bewegungsraum aller Fahrer ist vermutlich nochmal größer.

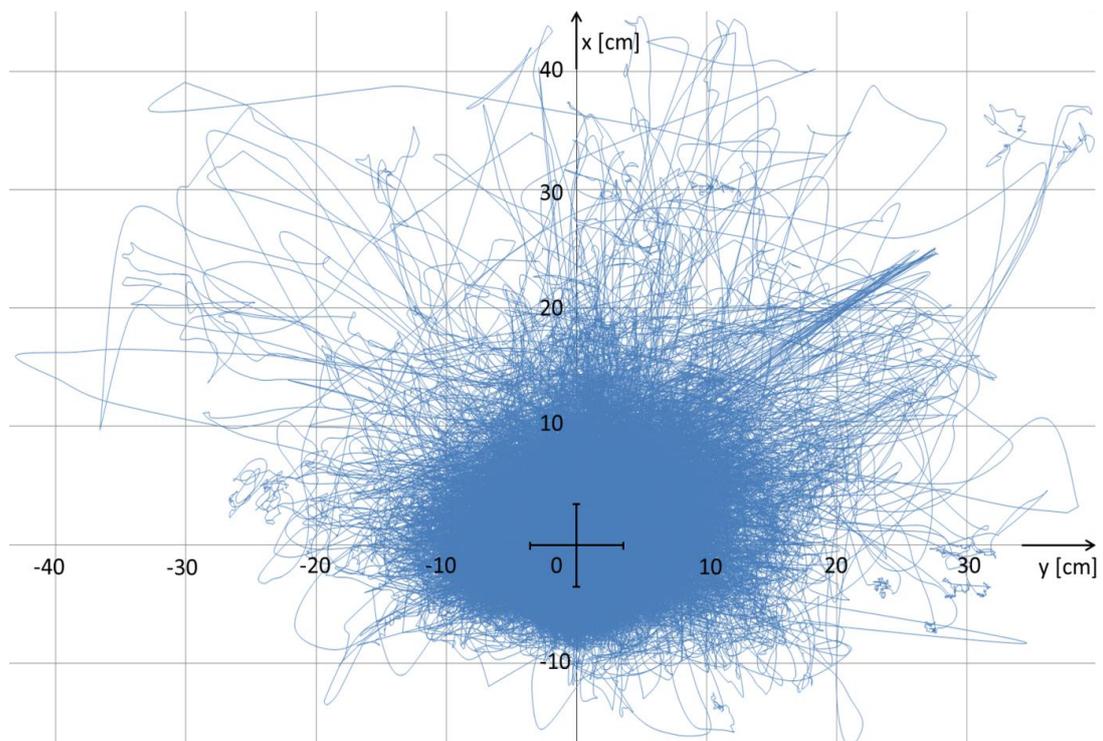


Abbildung 4-15: Auswertung der Kopfpositionen aller Probanden im Realversuch (nach Badbanchi, 2014;  $n = 19$ , 460 733 ausgewertete Kopfpositionen, 256 min Gesamtfahrtdauer, Ursprung entspricht dem Nullpunkt jedes einzelnen Probanden, Fehlerbalken entsprechen  $\pm 1$  SD)

Eine gewisse Körperbewegung und Aktivität des Fahrers sind aus Sicht der Körperhaltung durchaus erstrebenswert. Immerhin verbringt der Berufskraftfahrer die meiste Zeit in starr definierter Haltung hinter dem Lenkrad. Erkrankungen der Wirbelsäule treten häufiger auf als bei anderen Berufsgruppen (Michaelis, 2008, S. 13). Aus Sicht der Verkehrssicherheit sind extreme Bewegungen eher negativ zu bewerten, da der Fahrer hierbei sowohl an motorischer Handlungsfähigkeit als

auch an Wahrnehmungsfähigkeit verliert (Lorenz, 2011, S. 15). Als Beispiele seien hier das Lenken, die Betätigung der Pedale, der direkte Blick aus dem Fahrzeug oder auf die Instrumententafel genannt.

#### 4.2.3.2. Kopfdrehung

Neben der Position des Kopfes ist seine Orientierung von Interesse. Abbildung 4-16 zeigt die prozentuale Verteilung der Kopffrotation über alle Messwerte aller Probanden der Versuchsfahrt (Badbanchi, 2014). In der Kopffrotation sind einige Details zu erkennen. Der zentrale Blick, also die Spitze der Verteilung liegt nicht beim geraden Blick nach vorne, sondern leicht um ca. 2° zur Beifahrerseite gedreht. Eine Messungenauigkeit kann in diesem Bereich trotz größter Sorgfalt nicht gänzlich ausgeschlossen werden. Der Wert entspricht aber in etwa der Vorausschau des Fahrers in die Mitte der eigenen Spur oder auf das vorausfahrende Fahrzeug. Da der Fahrer nicht mittig im Fahrzeug und damit auch zur Fahrspur sitzt, ist dies durchaus logisch. Dieser Effekt kann künftig detaillierter untersucht werden, ist aber in dieser Arbeit nicht weiter von Interesse.

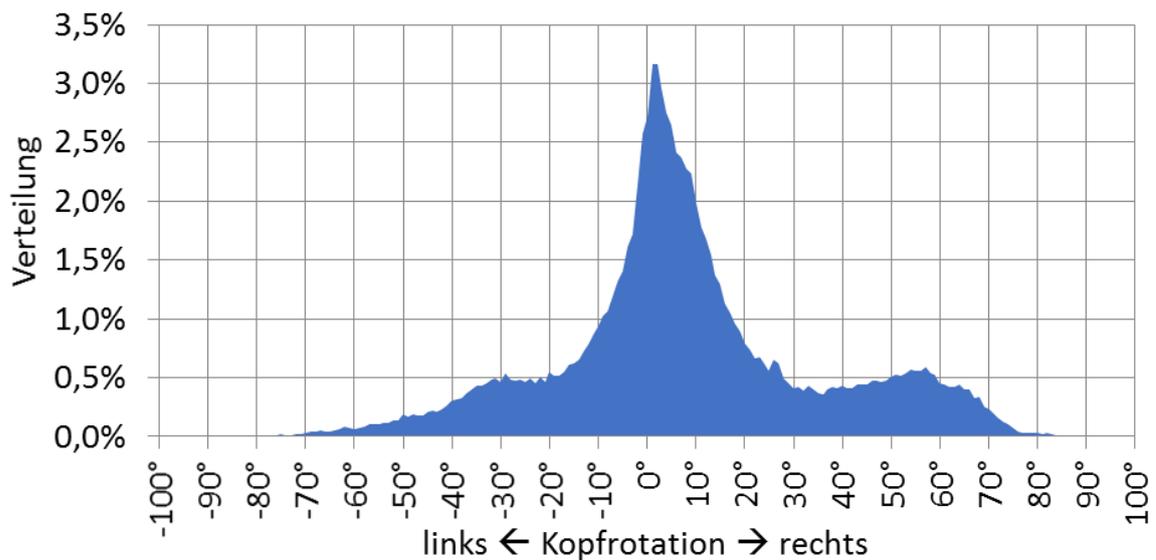


Abbildung 4-16: Kopffrotation aller Probanden über die Versuchsfahrt (nach Badbanchi, 2014; prozentual, Auflösung 1°)

Neben dem Peak zur Fahrstreifenmitte fallen in der Verteilung zwei weitere Erhebungen bei ca. -30° und +55° auf, die eine örtliche Nähe zu den Hauptaußen- und Weitwinkelspiegeln besitzen. In der Verteilung werden im Grunde die räumlichen Gegebenheiten ersichtlich, die der Fahrer im Fahrzeug vorfindet. Bei der Positionierung der Displays von Spiegelerersatzsystemen sollte darauf Rücksicht genommen werden. Dabei muss eine Veränderung der Verteilung nicht negativ sein.

Wenn zum Beispiel das Tal zum beifahrerseitigen Display geschlossen wird, kann das durchaus positive Effekte bewirken.

### 4.3. Zusammenfassung der Erkenntnisse aus den Erhebungen

Aus den Versuchen und den Erkenntnissen der Spiegelnutzung lassen sich insbesondere im Hinblick auf die Entwicklung eines Spiegelerersatzsystems folgende Erkenntnisse ziehen.

**Die Spiegelnutzung hängt von den einzelnen Spiegeln und der Situation ab:** Obwohl die Nutzung der einzelnen Spiegel sehr fahrerindividuell ist, ist in der Spiegelnutzung eindeutig zu erkennen, dass diese sowohl von den Spiegeln selbst als auch von der Situation anhängen. Ein Interaktionseffekt zwischen den beiden Variablen kann nachgewiesen werden (siehe 4.1.2, 4.2.1). Diese Erkenntnis bildet eine Art Grundvoraussetzung der weiteren Erkenntnisse.

**Die Spiegelnutzung steigt in komplexen Situationen an:** Diese Aussage wurde im Beispiel zwischen der Geradeausfahrt und der Rechtsabbiegesituation zum einen in der Befragung (siehe 4.1.2.2) als auch anhand der prozentualen kumulierten Spiegelnutzdauer untersucht (siehe 4.2.1.3). Es ist davon auszugehen, dass die Spiegelnutzung auch in anderen komplexen Situationen steigt. Die Erhöhung der Spiegelnutzung geschieht in erster Linie bei Hauptaußen- und Weitwinkelspiegeln. Eine erhöhte Nutzung von Anfahr- und Frontspiegel zeigt sich situativ in der Befragung, kann im Realversuch jedoch weder beobachtet noch nachgewiesen werden.

**Die Spiegel der Klassen II und IV der der Lenkbewegung zugewandten Seite erfahren eine Erhöhung der Nutzung:** Wird eine Lenkbewegung eingeschlagen oder geplant, ist die Nutzung der Spiegel der jeweiligen Seite der Lenkbewegung im Vergleich zur Geradeausfahrt erhöht. Dies kann sowohl für den Hauptaußen- als auch für den Weitwinkelspiegel der Beifahrerseite beim Rechtsabbiegen nachgewiesen werden (siehe 4.2.1) und zieht sich auch in der Befragung durch alle Situationen (4.1.2).

**Der Fahrer nutzt überwiegend die Hauptaußenspiegel:** Diese Erkenntnis lässt sich sowohl aus den Befragungen (Kapitel 4.1.2) als auch aus den Blickerfassungsversuchen (4.2.1) gewinnen. Für die Situationen der Geradeausfahrt und des Rechtsabbiegens wurde der Unterschied zwischen dem Hauptspiegel und den anderen Spiegeln einer Seite überprüft, für alle anderen Situationen wird der Effekt beobachtet, aber nicht gesondert nachgeprüft. Um die Hauptaußenspiegel möglichst lange verwenden zu können, nutzt der Fahrer, wie Kapitel 4.2.2 beschreibt, die Kopfbewegung zur Sichterweiterung.

**Der Fahrer nutzt die Weitwinkelspiegel situativ:** Diese Erkenntnis soll den Unterschied zum Hauptspiegel aufzeigen. Während die Hauptspiegel in einer hohen Häufigkeit und vornehmlich zur allgemeinen Situationsbeobachtung benutzt werden, wird der Weitwinkelspiegel vom Fahrer meist nur situativ genutzt. Als Beispiel gilt wieder das Rechtsabbiegen: Hier wird der rechte Weitwinkel vermehrt verwendet, während dieser in der Geradeausfahrt im Grunde nicht benutzt wird (siehe 4.2.1.3).

**Anfahr- und Frontspiegel werden selten benutzt:** Die Spiegel zur Überwachung des Nahbereiches um den Truck wurden in den Testfahrten sehr selten und nur von wenigen Probanden überwacht. Es konnten in diesen Spiegeln auch situativ keine signifikanten Unterschiede in der Spiegelnutzung beobachtet oder festgestellt werden.

Zusammengefasst kann behauptet werden, dass das Lkw-Spiegelsystem durchaus Schwächen zeigt. Dies lies Kapitel 3.3 bereits erwarten und wird durch die Eigenwahrnehmung der Fahrer aus der Befragung und der tatsächlichen Spiegelnutzung bestärkt. Besonders die Spiegel, die für den Nahbereich eingeführt wurden, um die Sicherheit zu erhöhen, werden vom Fahrer selten benutzt. Wenngleich in den meisten Fällen eine Überprüfung überflüssig ist, kann ein fehlender Kontrollblick fatale Folgen haben. Bekanntestes Beispiel ist der Rechtsabbiegeunfall, bei dem die Auswirkungen oftmals schwerwiegend sind. Auch wenn Rechtsabbiegeunfälle verhältnismäßig selten auftreten, sind sie in den Medien regelmäßig präsent. Der Unfallhergang wurde anhand von Studien schon des Öfteren untersucht und ist im Grunde meist sehr ähnlich: Der Lkw-Fahrer will rechts abbiegen und übersieht dabei einen Radfahrer, der parallel zum eigenen Fahrzeug geradeaus weiterfahren will (GDV, 1998; Niewöhner, Berg, 2004). Es kommt zur Kollision, die für den Radfahrer oftmals tödlich endet. Die Unfallanalysen untersuchen zumeist den Hergang anhand des Aufprallpunktes des Radfahrers und der Fahrspur des Lkws. Diese Studien, die oft von der öffentlichen Hand gefördert sind, kommen zumeist zu verschiedenen Forderungen:

- Mögliche Situationen werden durch Baumaßnahmen allgemein verhindert.
- Die Beteiligten des Straßenverkehrs werden für das Thema sensibilisiert.
- Ein System erkennt gefährliche Situationen und warnt den Fahrer.
- Zusätzliche Sichtsysteme erweitern das Sichtfeld des Fahrers.

Alle diese Forderungen gehen von dem aktuellen Spiegelsystem aus, das als gesetzt gilt. Nach den Ergebnissen der Fahrerbefragung und der Messung zur Spiegelnutzung muss infrage gestellt werden, ob die Spiegel den ihnen zugewiesenen Zweck überhaupt erfüllen. Anstatt die Nutzung der Spiegel zu untersuchen oder eventuell vorhandene Untersuchungen zu veröffentlichen wurden mehr Spiegel am Fahrzeug vorgeschrieben, um den toten Winkel so klein wie möglich zu machen. Der mentale tote Winkel ändert sich indes kaum.

## 5. Ergonomische Gestaltung eines KMS

Das Spiegelersatzsystem, das im Rahmen dieser Arbeit entstanden ist, versucht nicht das Spiegel-system zu imitieren. Es wurde mit dem Anspruch entwickelt, die Probleme des aktuellen Spiegel-systems innerhalb der gegebenen Rahmenbedingungen mit allen Möglichkeiten zu eliminieren und hinsichtlich der menschlichen Wahrnehmung ergonomisch zu optimieren.

Aus den Erkenntnissen der vorherigen Kapitel lassen sich Anforderungen an KMS ableiten. Aus den Feststellungen fovealer und peripherer Sicht sowie den Wahrnehmungsmodellen wird die ergonomische Grundregel der Gestaltung von Produkten besonders ersichtlich. Die Vor- und Nachteile der menschlichen Wahrnehmung müssen berücksichtigt werden, um ein überzeugendes ergonomisches Produkt zu schaffen. Im ersten Abschnitt dieses Kapitels werden allgemeine Anforderungen an Spiegelersatz anhand der aktuellen Sichtfeldklassen gestellt. In Kapitel 5.2 wird ein erster Versuch unternommen, die Sichtfeldklassen neu und Einzeltechnologie-übergreifend zu definieren. Im letzten Abschnitt wird das Spiegelersatzsystem vorgestellt, das im Rahmen der Projektarbeit entstand.

### 5.1. Grundanforderungen an einen Spiegelersatz

Bei der KMS-Auslegung spielen zwei Aspekte eine wesentliche Rolle: Die Unterstützung der bewussten und unbewussten menschlichen Wahrnehmung.

Die grundlegendste Anforderung ist im ersten Schritt eindeutig: Der Fahrer muss die Bereiche, die er einsehen will, scharf einsehen können und darin die für die Situation notwendigen Details erkennen können. Entscheidende Eigenschaften wie Auflösung, Bildgröße und Farbdarstellung dienen ausschließlich dazu, dass der Mensch das System als scharf und unverfälscht wahrnimmt. Da diese Punkte bereits ausführlich in der ISO 16505 sowie in der Neufassung der UN ECE R46 adressiert sind, wird im Weiteren nicht gesondert auf diese Eigenschaften eingegangen (ECE, 2016; ISO, 2015). Sie bilden jedoch das Grundgerüst für jedes KMS und sind auch Voraussetzung für alle zusätzlichen Anforderungen (Esser, 2016, S. 79-82; Faber, Heinemann, 2016; Oba, 2016; Schmidt et al., 2016).

Die zweite Anforderung an das System ist eine Schlussfolgerung aus den Überlegungen in den vorherigen Kapiteln. Die dargestellten Sichtfelder sollen im Display so dargestellt sein, dass der Fahrer Objekte entdecken kann, ohne gezielt nach ihnen suchen zu müssen. Das periphere Sehen

bzw. die Bottom-up-Wahrnehmung soll im neuen System berücksichtigt und ermöglicht werden. Dies bedeutet, dass die Anzahl der zu überwachenden Einzelsysteme, bei einer Erhöhung der Informationsdichte, reduziert werden muss. Objekte in der Peripherie müssen dem Fahrer schon während der Manöver- oder Trajektorienplanung augenblicklich auffallen.

### **5.1.1. Anforderungen an die einzelnen Sichtfeldklassen**

Aus den beiden Punkten lassen sich Anforderungen an Spiegeleratzsysteme detaillieren. Dabei wird auf die einzelnen Sichtfeldklassen eingegangen, wie sie beim aktuellen Spiegelsystem vorliegen. Die Anforderungen werden anhand der Erkenntnisse aus Kapitel 4 gestellt.

#### **5.1.1.1. Sichtfeldklasse II**

Der Hauptspiegel dient zum größten Teil einer fovealen oder Top-down-Aufgabe. Der Fahrer lenkt seinen Blick bewusst in den Hauptspiegel, um seine Fahrzeugkanten oder den rückwärtigen Verkehr zu beobachten. Daraus erschließt sich auch, dass die Darstellung im Bereich der Sichtfeldklasse II im Spiegeleratz die höchsten qualitativen Anforderungen hat. Weiter ist festzustellen, dass im aktuellen Spiegelsystem der Hauptspiegel die geringste Verzeichnung und die höchste Detailgüte hat. Es ergibt sich also folgende Forderung:

- **Die Darstellung in die Ferne (der Hauptspiegelbereich) soll entsprechend dem aktuellen Spiegelsystem gestaltet sein.**
- **Es gelten die höchsten Anforderungen an Bildgröße (M-Faktor), Auflösung und Verzerrungsfreiheit.**

#### **5.1.1.2. Sichtfeldklasse IV**

Der Weitwinkelspiegel dient in der Kognition zweierlei Aufgaben. Er dient zum einen zur Erweiterung des Sichtfeldes des Hauptspiegels. Bei hohen Winkeln zwischen Auflieger und Zugmaschine wechselt der Blick und die foveale Motivation des Fahrers vom Haupt- in den Weitwinkelspiegel. Zum anderen dient der Spiegel zur Objekterkennung in einem sehr großen Sichtfeld, also einer Aufgabe, die durch das periphere Sehen gelöst werden soll. Daraus lassen sich zwei Forderungen aufstellen.

- **Die Darstellung des Weitwinkelbereichs soll in Situationen fovealer Motivation mit möglichst hoher Detailtreue und wenig Verzeichnung eingesehen werden können.**
- **Die Darstellung des Weitwinkelbereichs soll so gestaltet sein, dass der Fahrer Objekte beim bloßen peripheren Sehen zuverlässig und zufällig entdecken kann.**

### 5.1.1.3. Sichtfeldklasse V

Auch der Anfahrbereich besitzt dieselben Motivatoren wie der Weitwinkelbereich. Dabei ist das Verhältnis jedoch sehr zur peripheren Entdeckung hin verschoben. Die foveale Motivation besteht nur in wenigen Rangierfunktionen (beispielsweise das nahe Anfahren an eine seitliche Rampe). Hauptaufgabe des Anfahrspiegels ist die zufällige Entdeckung von Objekten, was evolutionär einer Aufgabe des peripheren Sehens entspricht.

- **Die Darstellung des Sichtbereichs V soll so gestaltet sein, dass der Fahrer Objekte beim bloßen peripheren Sehen zuverlässig und zufällig entdecken kann.**

### 5.1.1.4. Sichtfeldklasse VI

Der Frontspiegelbereich bildet eine kleine Ausnahme: Der Bereich der Sichtfeldklasse VI ist nicht dauerhaft anzuzeigen, sondern muss nach der ECE R46 nur in einem Geschwindigkeitsbereich von 0 bis 10 km/h angezeigt werden. In den Grundzügen entsprechen die kognitiven Anforderungen denen des Anfahrbereiches, mit der Beschränkung, dass der Frontbereich nur bei sehr geringen Geschwindigkeiten von Interesse ist.

- **Die Anzeige des Sichtbereiches VI soll so gestaltet sein, dass der Fahrer Objekte beim bloßen peripheren Sehen zuverlässig und zufällig entdecken kann.**

Beim Frontspiegel ist eine Ersetzung des Spiegels auch durch etwas Anderes als ein KMS möglich (ECE, 2016), wie auch in Kapitel 5.3.4 beschrieben ist.

## 5.2. Neugestaltung der Sichtfeldklassen

Wie Kapitel 2.2 erläutert, entstanden die Sichtfeldklassen der ECE R46 im Laufe der Zeit und aufgrund der mangelnden direkten Sicht aus dem Fahrzeug sowie den physikalischen Einschränkungen von Spiegelsystemen. In Bezug auf KMS ist es möglich, die einzusehenden Sichtfeldklassen auf die menschliche Wahrnehmung hin zu optimieren.

In der Arbeitsgruppe zur ISO 16505 und der Arbeitsgruppe zur Neugestaltung der ECE R46 wurde die Möglichkeit der Neugestaltung von Sichtfeldklassen nicht wahrgenommen, da dies einen außerordentlichen Studienaufwand und somit einen zeitlichen Verzug erforderte. Auch hier zählt das Argument, dass das KMS im Vergleich zum Spiegel mindestens ebenbürtig sein muss und somit auch mindestens dieselben Anforderungen zu erfüllen hat, die sich aus den bestehenden Sichtfeldklassen ergeben.

In dieser Arbeit wird ein erster Versuch gestartet, die Sichtfeldklassen am Nutzfahrzeug an die vom Fahrer benötigten Sichtinformationen zu koppeln, von den physikalischen Restriktionen der Spiegel zu entkoppeln und an die Wahrnehmungsleistung des Menschen anzupassen. Dazu werden die Sichtfelder nach fovealer Motivation und peripherer Entdeckung eingeteilt.

### 5.2.1. Bereiche foveal motivierter Blickaktivitäten

Als foveal motivierte Blickaktivitäten zählen sowohl die Scanning-Blicke, mit denen der Mensch in einem kleinen Sichtbereich die Umgebung gezielt nach Objekten absucht, als auch das Verfolgen eines Objektes mit fovealer Sicht.

Der weite Blick in die Ferne ist somit beispielsweise rein foveal motiviert. Der Fahrer will einen kleinen Bereich mit hohem Detailgrad überwachen. Dieser Bereich kann in der indirekten Sicht beispielsweise der rückwärtige Verkehr auf der Autobahn, aber auch die Hinterachse beim Rangieren sein. Der anvisierte Punkt ist somit nicht fix, sondern je nach Situation und Fahrer motivation variabel. Es stellt sich die Frage, welche Objekte in welcher Entfernung der Fahrer mithilfe der indirekten Sicht, je nach Situation sieht, sehen will und sehen muss.

Wird das foveale Sehen und seine Sichtweise qualitativ auf die indirekte Sicht am Lkw übertragen, ergibt sich ein eingesehener Bereich, der in den Grundzügen dem des Hauptspiegels sehr nahekommt. Der Fahrer blickt, wie Abbildung 5-1 illustriert, weit nach hinten, um beispielsweise herannahende Fahrzeuge frühzeitig zu erkennen.

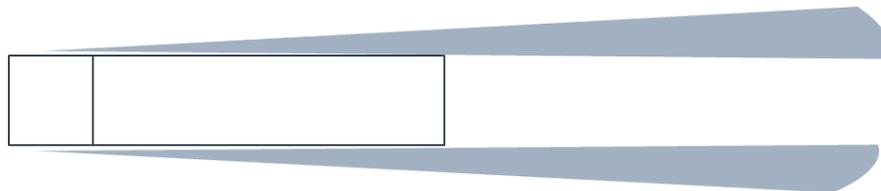


Abbildung 5-1: Bereiche fovealer Motivation bei höheren Geschwindigkeiten

Die am weitesten entfernten Objekte muss der Fahrer bei einer Geradeausfahrt auf mehrspurigen geschwindigkeitsbeschränkungs-freien Straßen, also vornehmlich auf Autobahnen, entdecken. Hier sind die größten Differenzgeschwindigkeiten zwischen Ego-Fahrzeug und den anderen Verkehrsteilnehmern zu erwarten, was die höchsten Anforderungen an Auflösung und Vergrößerungsfaktor bedeutet. Wird von einer Vorausschau von 2 Sekunden und einem Geschwindigkeitsunterschied von 170 km/h ausgegangen (Motorrad mit 250 km/h überholt Lkw mit 80 km/h), muss der Lkw-Fahrer das Motorrad in einer Entfernung von 94 Metern zur Hinterkante des Eigenfahrzeuges

sicher erkennen können. Wird von einem Standard-Sattelzugspann (110 m von Kamera zu Motorrad) und einer Schulterbreite von 40 cm des Motorradfahrers ausgegangen, hat er eine Breite von 12,5 Bogenminuten, die der Lkw-Fahrer erkennen muss. Bei einem Visus von 0,8, also der geforderten Sehstärke zum Führen eines Nutzfahrzeuges (FeV, 2014), und direkter Sicht entspricht das Motorrad einer Breite von 10 Zapfen auf der Fovea centralis. Mit dem geforderten Vergrößerungsfaktor von 0,31 (Sichtbereich II der Fahrerseite) kann der Mensch das Motorrad somit mit drei „menschlichen Pixeln“, also einer Breite von drei Zapfen auf der Fovea, erkennen. Dies entspricht in etwa dem Erkennen einer Fliege in zwei Meter Entfernung. Ein größerer *M*-Faktor in einem kleinen Bereich (sehr viel kleiner als Sichtfeldklasse II) wäre auf Autobahnen durchaus vorteilhaft. Weitaus geringer fallen die Anforderungen an Auflösung und Vergrößerungsfaktor auf Straßen mit Geschwindigkeitsbeschränkung aus. Wird beim Motorradfahrer von einer Geschwindigkeit von 100 km/h und beim Nutzfahrzeug von 60 km/h ausgegangen, muss das Motorrad nur noch 22 m hinter dem Fahrzeug oder knapp 40 m hinter dem Spiegel entdeckt werden.

Die Bereiche fovealer Motivation sind somit stark von der Fahraufgabe abhängig. Im Speziellen spielen der Straßentyp und -verlauf, die Eigengeschwindigkeit, der Lenkwinkel, die Geschwindigkeit der anderen Verkehrsteilnehmer und der Knickwinkel zwischen Fahrzeug und Auflieger eine entscheidende Rolle. Wechselt die foveale Motivation von der Manöverplanung auf die Trajektorienplanung, ist der weite Blick nach hinten nicht mehr von größter Bedeutung. Der Fahrer muss hierbei hauptsächlich bis zum Fahrzeugende und noch etwas drüber hinaus blicken.

In Kurvenfahrten und vor allem in Fahrten mit Auflieger wandert das foveale Ziel mit dem Fernpunkt bzw. dem Auflieger. Es wird der kurveninnere Bereich besonders beachtet, wie Bothe et al. (2013b) schon beobachteten. Abbildung 5-2 zeigt die Verschiebung des foveal motivierten Bereiches bei einer Kurvenfahrt.

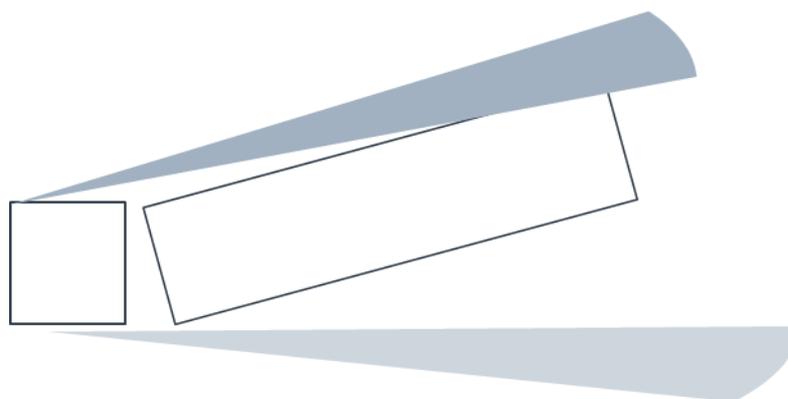


Abbildung 5-2: Bereich fovealer Motivation bei einer Kurvenfahrt – die kurveninnere Seite wird vermehrt betrachtet

Die foveal motivierte Blickaktivität wandert mit dem Kurvenradius und dem Winkel zwischen Auflieger und Lkw. Abbildung 5-3 zeigt qualitativ die möglichen Bereiche fovealer Motivation auf einer Fahrzeugseite. Es ist zu erkennen, dass jeweils nur ein kleiner Bereich im Fokus des Fahrers sein kann. Dieser Bereich kann über den Knickwinkel des Aufliegers zum Lkw, den Kurvenradius oder dem berechneten Bereich optischer Ruhe definiert sein. Je höher dabei der Winkel zur Fahrzeugmittelebene, umso geringer ist die Entfernung, in die der Fahrer blicken muss. Das bedeutet auch, dass bei steigendem Winkel die Anforderungen an den Vergrößerungsfaktor sinken.

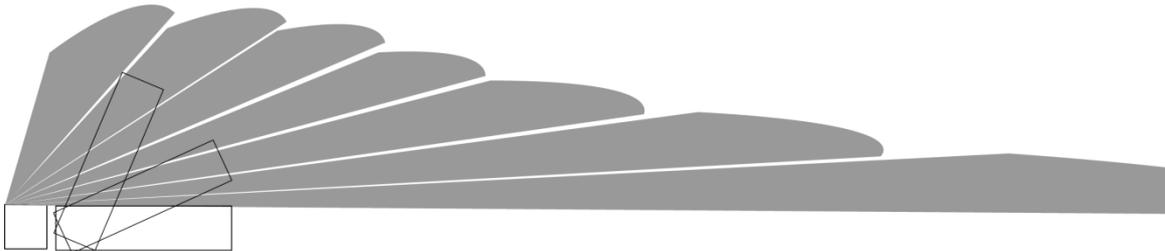


Abbildung 5-3: Mögliche Bereiche fovealer Motivation mit indirekter Sicht

Es zeigt sich, dass immer nur ein kleiner Bereich foveal eingesehen werden muss. Die möglichen Bereiche fovealer Motivation über alle Situationen zusammen decken jedoch einen großen Bereich ab. Im Grunde ist dieser Bereich zusammengefasst derjenige, der nicht durch die direkte Sicht aus dem Fahrzeug abgedeckt werden kann.

Einschub: KMS mit einer Panning-Funktion, also einem Schwenken der Kamera oder einer Verschiebung des angezeigten Bildbereiches anhand der Aufliegerkante, verfolgen das Ziel, dem Fahrer immer den foveal gewünschten Bereich anzuzeigen. Diese Art der Bild-darstellung kann kritisiert werden, da der Fahrer noch weniger gezwungen ist, seinen Blick in den Weitwinkelspiegel zu wechseln. Eine Erhöhung von schwerwiegenden Unfällen kann vermutet werden (Zaindl, 2016, S. 325).

### 5.2.2. Bereiche peripherer Entdeckung

Wird das periphere Sehen herangezogen und sein Sichtfeld qualitativ auf den Lkw angewandt, werden die Anforderungen an die periphere Einsehbarkeit klar: Der Fahrer muss theoretisch das komplette nahe Umfeld des Nutzfahrzeuges ständig unter Kontrolle haben. Dabei ist wichtig, dass der kontrollierte Bereich, wie in Kapitel 3.2.1.2 beschrieben, unbewusst, also ohne aktives Suchen nach Objekten, überwacht werden muss.

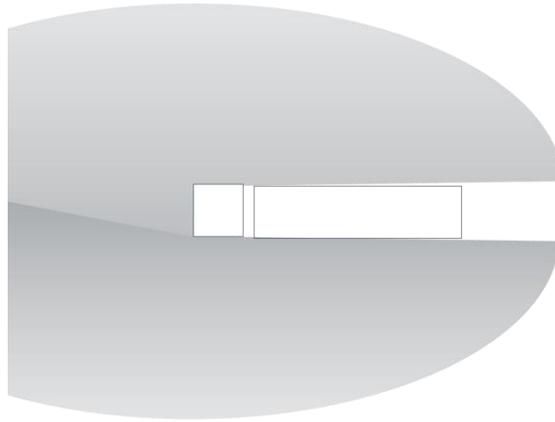


Abbildung 5-4: Bereiche peripherer Einsehbarkeit (bei Geradeausfahrt)

Das Umfeld der peripheren Überwachung ändert sich anders als das foveale Sichtfeld nur wenig mit der Situation und bleibt im Grunde genommen gleich.

Ein Aspekt in der Auslegung peripherer Sichtfelder für den Fahrer ist, dass diese bei der Darstellung nicht in die Zone optischer Unschärfe fallen. Übersteigt der optische Fluss seitlich des Fahrzeuges zwanzig Grad pro Sekunde, kann das Auge des Fahrers kein Bild der Umgebung mehr auflösen, was an der begrenzten Dynamik des menschlichen Sehens liegt (Remlinger, 2013, S. 105). Direkt neben dem Fahrzeug entspricht eine Strecke von ca. einem Meter zwanzig Grad (Annahme: die Kamera befindet sich in 3 m Höhe). Um einen Tunnelblickeffekt im KMS zu vermeiden, muss also der Vergrößerungsfaktor so klein gewählt werden, dass darin keine Zone optischer Unschärfe entstehen kann. In Tabelle 3 sind die daraus resultierenden maximalen Vergrößerungsfaktoren über der Eigengeschwindigkeit dargestellt.

Tabelle 3: Maximale Vergrößerungsfaktoren in Abhängigkeit zur Eigengeschwindigkeit, um optische Unschärfe im KMS zu verhindern

Geschwindigkeit [km/h]	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$M_{max}$ direkt unter Kamera []	0,360	0,180	0,120	0,090	0,072	0,060	0,051	0,045	0,040
$M_{max}$ beginn Sichtfeld II []	1,440	0,720	0,480	0,360	0,288	0,240	0,206	0,180	0,160

Es wird deutlich, dass bei höheren Geschwindigkeiten eher geringe Vergrößerungsfaktoren im Nahbereich gewählt werden sollten, um auch den Bereich direkt neben dem Fahrzeug für den Fahrer optimal darzustellen. Sogar zu Beginn der Sichtfeldklasse II werden noch maximale Vergrößerungsfaktoren berechnet, die geringer als die minimalen Vergrößerungsfaktoren sind, wie sie in

den starren Vorschriften der ECE R46 gefordert sind. Es wird somit bei Einhaltung der gesetzlich vorgeschriebenen Vergrößerungsfaktoren zwangsläufig zu Zonen optischer Unschärfe kommen.

### **5.2.3. Situationsabhängige Anforderungen der Darstellung**

Die Anforderungen an die indirekte Sicht ändern sich mit den jeweiligen Situationen. Da die Sicht im Spiegel physikalisch an das Reflexionsgesetz gebunden ist, können manche Sichtfelder nur als eine Art Kompromiss aus den verschiedenen Anforderungen dargestellt werden.

Wird die indirekte Sicht über der Geschwindigkeit beobachtet, ergeben sich Thesen über die ideale Art der Darstellung. Eine These von Bubb besagt, dass das innere Modell des Fahrers bei hoher Geschwindigkeit eher weit in die Ferne blicken will, bei niedriger Geschwindigkeit hingegen eher den Überblick von oben, in einer Art Vogelperspektive, sucht (persönliches Gespräch, 2014). Dieses Modell kombiniert einige Erkenntnisse, die ebenfalls in dieser Arbeit erarbeitet werden. Abbildung 5-5 zeigt qualitativ die verschiedenen foveal motivierten Sichtbereiche unterschiedlicher Situationen. Je höher die Geschwindigkeit, umso kleiner wird der Bereich fovealer Motivation bei immer größer werdenden Anforderungen an den *M*-Faktor in der Ferne (siehe 5.2.1) und sinkenden *M*-Faktoren in direkter Fahrzeugnähe (siehe 5.2.2). Je kleiner die Eigengeschwindigkeit, umso größer wird der Bereich, der von Fahrern foveal überwacht werden will, wobei die Anforderungen an den fovealen Vergrößerungsfaktor nicht mehr besonders hoch sind (bei Zurückschau um 20 m bis zu einem Faktor 5 geringer als auf der Autobahn).

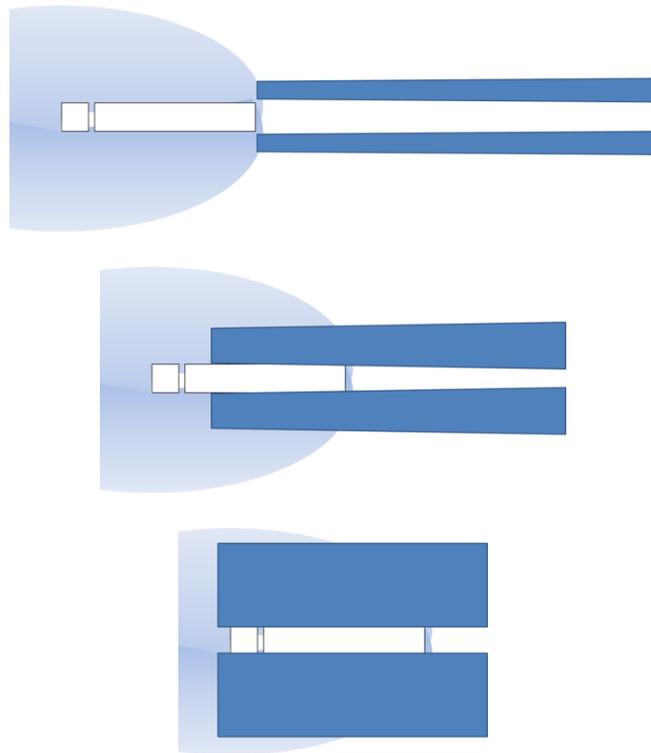


Abbildung 5-5: Bereiche fovealer Motivation in unterschiedlichen Situationen (qualitativ). Oben: Autobahn. Mitte: Landstraße. Unten: Stadt

In der Abbildung wird der Wechsel von einer gewünschten Fernsicht auf der Autobahn hin zu einer Vogelperspektive über dem Lkw bei langsamer Stadtfahrt sichtbar. Wichtig ist dabei, dass der Bereich peripherer Entdeckung, also der Gesamtsichtbereich, im Grunde gleich bleibt.

#### 5.2.4. Lücken im aktuellen Sichtfeld

Die Sichtfeldklassen der ECE R46 am Nutzfahrzeug besitzen infolge der Restriktionen der Spiegelanordnung am Fahrzeug Lücken, die der Fahrer nicht einsehen kann. Eindeutiges Beispiel ist der Bereich direkt hinter dem Fahrzeug. Mithilfe von Rückfahrkameras, die auf dem Auflieger montiert sind, kann dieser Bereich bereits heute erschlossen werden. Durch eine Anzeige des Bereiches auf einem Display, das ähnlich eines Pkw-Innenspiegels angebracht ist, kann der Fahrer den Bereich überwachen (Gebhart, 2014). Diese Art von Kameras ist aktuell selten an Fahrzeugen zu finden und wenn, dann meist als Rückfahrkamera konzipiert.

Große Lücken im Sichtfeld des Fahrers entstehen zusätzlich, wenn sich der Auflieger in die Sichtfelder schiebt. Abbildung 5-6 zeigt die Verdeckung der Sichtfeldklassen durch den Auflieger beim Rechtsabbiegen. Der kurvenäußere Bereich ist für den Fahrer in dieser Situation nicht mehr einsehbar, der kurveninnere Bereich nur noch bis zum Auflieger. Die Hauptspiegel können, wie Kapitel 4.2.2 beschreibt, nur noch mit großen Kopfbewegungen einigermaßen sinnvoll genutzt werden.

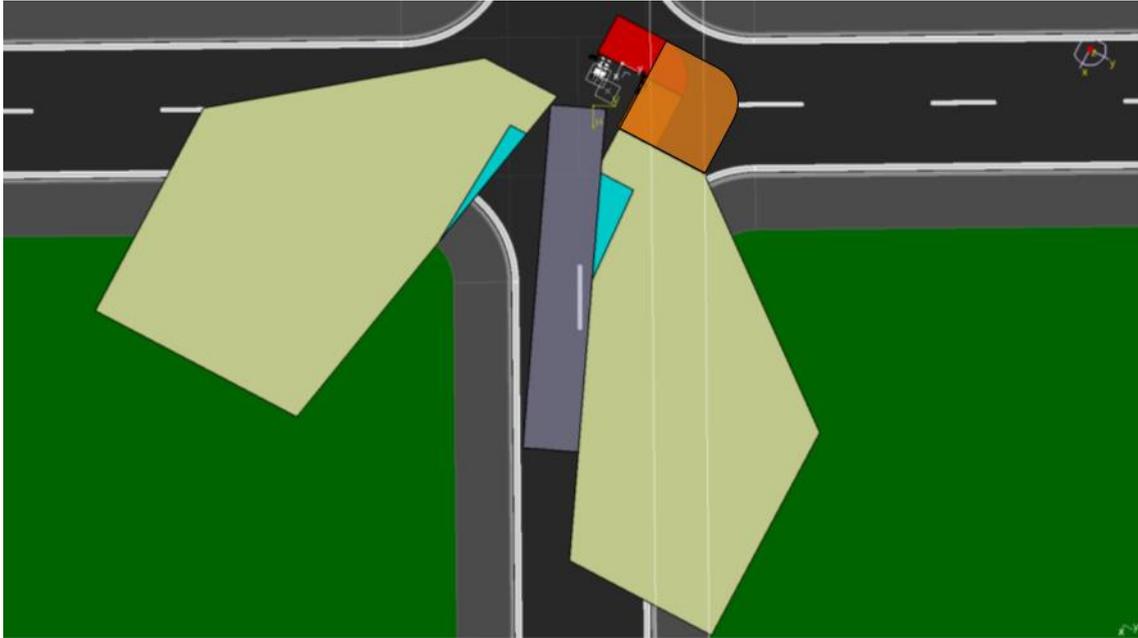


Abbildung 5-6: Sichtfeldklassen beim Rechtsabbiegen. Es entsteht ein großer Bereich, der nicht einsehbar ist (Palacios, 2012)

Diese Sichteinschränkung, die das Spiegelsystem nicht umgehen kann, birgt ein relativ großes Risiko bezüglich Anfahrunfällen, da der Fahrer die Überwachung der Kanten nicht an jeder Stelle durchführen kann. Er manövriert das Fahrzeug aufgrund seiner Abschätzung und der Erfahrung um Engstellen. Das kurvenäußere Ende des Aufliegers und sein Ausschwenken in Kurven ist nicht zu erkennen und muss abgeschätzt werden. Bei Rückwärtsfahrt kann der Fahrer den von ihm überfahrenen Bereich nicht einsehen, was einen Sicherheitsposten unumgänglich macht, der trotz Vorschrift selten in Anspruch genommen wird, wie eine Fahrerbefragung zeigt (Palacios, 2012). Eine Lösungsmöglichkeit zur Darstellung des verdeckten Bereiches ist eine Ansicht des Gespanns aus der Vogelperspektive. Dazu müssen jedoch Kameras am Auflieger verbaut sein und das Bild zur Darstellung in Abhängigkeit vom Knickwinkel berechnet werden (Gebhart, 2014).

Eine Lösung, die fast unabhängig von Kameras am Anhänger ist, wurde in einer Patentanmeldung beschrieben (Zaindl, 2014): Kameras sind in den Rückleuchten der Sattelzugmaschine integriert. Sobald das Gespann aus Sattelzugmaschine und Auflieger einen gewissen Winkel einnimmt, wird das Bild, das die Kamera mit nunmehr freiem Blickfeld hat, auf den Trailer projiziert, sodass dieser durchsichtig erscheint. Der Fahrer kann praktisch durch den Trailer hindurchblicken. Der Bereich, der nicht eingesehen werden kann, reduziert sich auf ein Minimum.

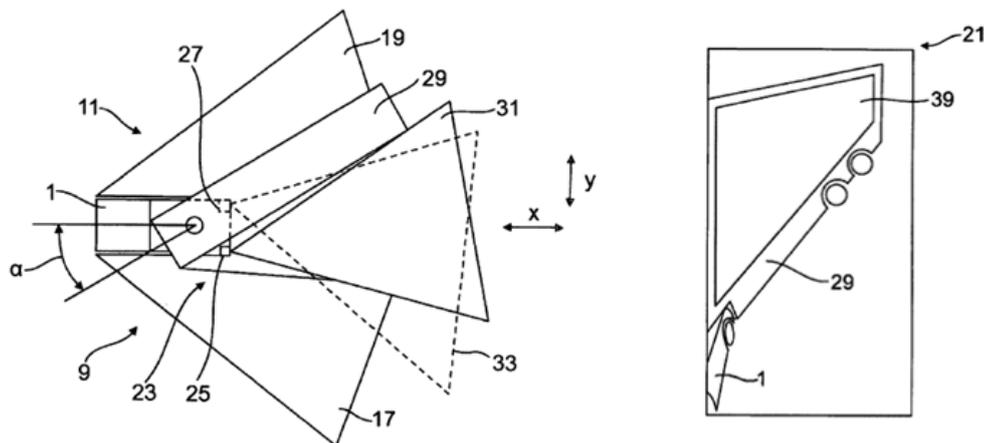


Abbildung 5-7: Anzeige verdeckter Sichtfelder im Auflieger des Nutzfahrzeuges (Zaindl, 2014)

Es ist künftig anzustreben alle Lücken in den Sichtfeldern des Fahrers zu schließen. Dabei muss jedoch auf die kognitiven Fähigkeiten des Menschen eingegangen werden. Es ist zu überlegen wo für zusätzliche Anzeigen im Fahrzeug angebracht werden müssen und wann das Sichtfeld in eine bestehende Ansicht integriert werden kann oder wo vielleicht andere Sensorik den Fahrer unterstützen kann. Eine Überfrachtung mit Anzeigen, wie sie beispielsweise von Danielson und Höcke vorgeschlagen wird (2013, S. 78), ist zu vermeiden.

## **5.3. Aufbau der Bilddarstellung – Vorstellung des Prototyps**

Aus den Grundanforderungen geht hervor, dass Spiegelersatz den Fahrer unterstützen kann, wenn das System auf seine Wahrnehmung ausgelegt ist. Die peripher motivierten Sichtbereiche müssen nebenbei überwacht werden können, während der Fahrer sich foveal konzentriert. Im Folgenden wird das Konzept vorgestellt, das innerhalb der Projektarbeit entstand und schon in diversen Veröffentlichungen präsentiert ist. Eine Übersicht der Veröffentlichungen und der bereits veröffentlichten Patentanmeldungen ist im Anhang zu finden.

Es ist zu beachten, dass das Konzept an gewisse Rahmenbedingungen gebunden ist. Eine Anbringung der Kameras ist im Projekt nur an der Kabine des Fahrzeuges möglich. Eine Platzierung am Chassis oder eine Platzierung von Kameras auf dem Trailer wurde aufgrund fehlender Serientauglichkeit bewusst ausgeklammert. Ebenso wird von den Sichtfeldern und den Vorgaben der ECE R46 ausgegangen, da diese über die Zulassungsfähigkeit des Systems entscheiden.

### **5.3.1. Positionierung von Bilderfassung und -darstellung im Prototyp**

Bei der Positionierung von bilderfassenden und -gebenden Einheiten sind die Aspekte aus Kapitel 2.5 berücksichtigt. Die Kameras sind so weit vorne, oben und außen wie möglich am Fahrzeug angebracht. Eine variable Positionierung der Kameras abhängig von der Fahrsituation (Jerg, Zaindl, 2014) ist jedoch nicht berücksichtigt. Die zusätzlichen Displays, die in der Fahrerkabine angebracht werden, sind jeweils an der A-Säule platziert. Hierbei muss ein Kompromiss zwischen der maximal zu erreichenden Displayentfernung (siehe 3.1.1.1), der direkten Sicht des Fahrers und den Randbedingungen, die im Nutzfahrzeug auftreten, eingegangen werden. Eine mittigere Positionierung des Fahrers ist beim Einsatz von Kamera-Monitor-Systemen sicherlich von Vorteil. Der in der Arbeit entwickelte und auf der IAA Nutzfahrzeuge 2016 vorgestellte Prototyp ist in Abbildung 5-8 zu sehen.



Abbildung 5-8: Prototyp des Spiegelsatzsystems von außen und innen

In der Außenansicht ist zu erkennen, dass der Kameraarm im Prototyp nach vorne gezogen ist. Somit können beide Kameraarme, wenn nötig mit einer kleinen Kopfbewegung, vom Fahrer gesehen werden. Dies erleichtert dem Fahrer das Rangieren in Engstellen. Die Innenansicht zeigt die Positionierung der Displays im Fahrzeug. Durch die Positionierung an den A-Säulen wird möglichst wenig direkte Sicht verdeckt. Durch eine Änderung im Displaydesign, beispielsweise in der Minimierung des seitlichen Randes, kann die direkte Sicht weiter optimiert werden.

### 5.3.2. Kombination verschiedener Sichtfelder in einer Darstellung

Aus den bisherigen Erkenntnissen der Arbeit ist ersichtlich, dass ein einzelner Ersatz jedes einzelnen am Fahrzeug vorhandenen Spiegels aus Sicht der menschlichen Wahrnehmung nicht zielführend sein kann. Aus diesem Grund werden Sichtfelder der ECE R46 kombiniert und zusammengefasst. Das Konzept vereint alle Sichtfelder jeweils einer Fahrzeugseite zu einer Ansicht. Dabei werden die Informationen, die sich aktuell auf Haupt-, Weitwinkel- und Anfahrspiegel verteilen, in einer einzigen zusammenhängenden Anzeige dargestellt. Der somit entstehende Sichtbereich ist schematisch in Abbildung 5-9 zu sehen. Für die Fahrerseite wird der Bereich analog zur Beifahrerseite gewählt. Das bedeutet, dass auch der Sichtbereich V, obwohl fahrerseitig nicht vorgeschrieben, realisiert wird.

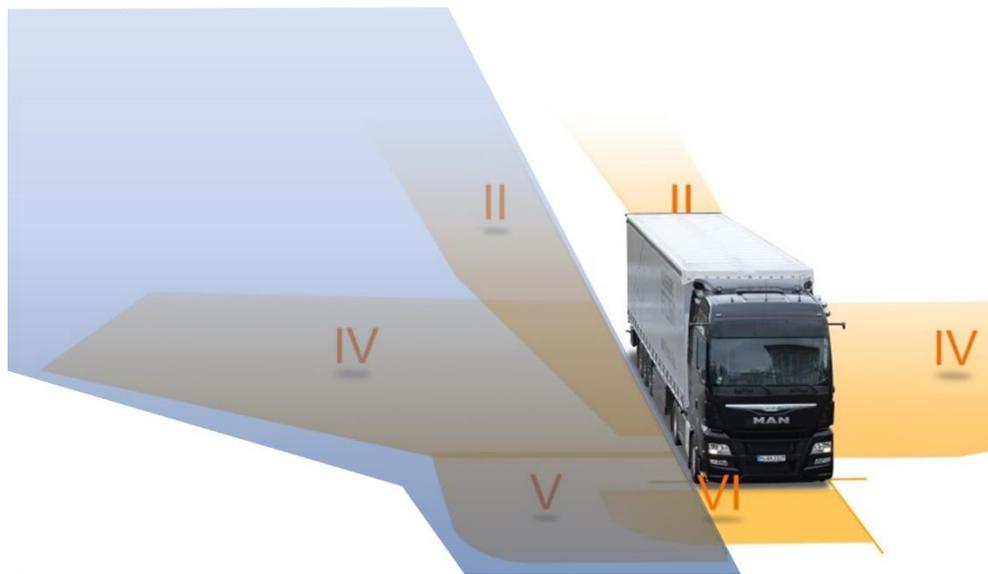


Abbildung 5-9: Sichtfeld des beifahrerseitigen Spiegelersatzsystems (qualitativ) im Vergleich zu den Sichtfeldklassen nach ECE R46. Das fahrerseitige Sichtfeld entspricht dem gespiegelten beifahrerseitigen (Zaindl, 2016)

Durch die Anzeige des kompletten Bereiches in einer durchgängigen Anzeige wird dem Fahrer die Möglichkeit gegeben, die Bereiche, die außerhalb der fovealen Motivation liegen, peripher einzusehen. Wie die Art der Spiegelersatzdarstellung realisiert wird, um zum einen die gesetzlichen Vorgaben und zum anderen die Anforderungen an die menschliche Wahrnehmung zu erfüllen, erläutern die nächsten Unterkapitel. Die Art der Darstellung in der Standard- als auch der Rangiersicht wurde bereits in Veröffentlichungen vorgestellt (Kremser et al., 2014; Zaindl et al., 2014b; 2015; Zaindl, 2016).

### 5.3.2.1. Art der Darstellung in der Standardansicht

Im normalen Fahrbetrieb muss der Fahrer weit nach hinten blicken können, um herannahende Fahrzeuge zu erkennen. Das Bild muss entsprechend groß und hochauflösend sein (ECE, 2016). Zudem muss der Fahrer die komplette Seite seines Fahrzeuges überwachen können. Würde der komplette seitliche Bereich in der Auflösung und Qualität dargestellt, die entsprechend Sichtfeldklasse II erforderlich ist, nähme die Displaygröße eine Dimension an, die im Fahrzeug weder realisierbar noch sinnvoll ist. Um den Konflikt zwischen Bildgröße im Hauptspiegelsichtfeld und dem zusätzlich dargestellten Bereich der anderen Klassen zu lösen, wird eine Ansicht gewählt, die ähnlich dem eines asphärischen Pkw-Spiegels aufgebaut ist. Die Art der Bilddarstellung ist auch in (Kremser et al., 2014; Zaindl et al., 2014b; 2015; Zaindl, 2016) beschrieben. Beim KMS existieren zwei gestauchte Bereiche, die seitlich und unterhalb der Sichtfeldklasse II angeordnet sind. Das Bild des Hauptspiegelbereichs und etwas mehr wird möglichst unverzerrt auf dem Monitor mit den geforderten Mindestvergrößerungsfaktoren dargestellt. An diesen Bereich schließt sich außen ein gestauchter Bereich an, der in etwa den seitlich fehlenden Weitwinkelbereich darstellt. Unter diesen beiden Bereichen wird der noch übrig bleibende Teil der Sichtfelder IV und V ebenso gestaucht angezeigt. Der Übergang zwischen den einzelnen Bereichen wird mit einer Linie markiert, welche im Bild als Kreuz auf dem Display zu sehen ist. Diese Linien werden vom Fahrer benötigt damit die Verzerrungssprünge nicht verwirrend wirken.



Abbildung 5-10: Hauptaußen-, Weitwinkel- und Anfahrspiegel werden in kombinierter Ansicht dargestellt (Zaindl et al., 2015)

### 5.3.2.2. Art der Darstellung in der Rangieransicht

Der Bereich fovealer Motivation ist meistens im Bereich der Sichtfeldklasse II, kann sich jedoch auch, wie in Kapitel 5.2.1 beschrieben, nach außen oder vorne verschieben. Bei Fahrten mit einem Auflieger wandert der foveal motivierte einsehbare Bereich beispielsweise, wie Kapitel 5.2.1 zeigt, in etwa mit der Hinterachse des Aufliegers. Ebenso hat die Eigengeschwindigkeit einen Einfluss auf den Bereich der fovealen Motivation. Es wird die These berücksichtigt, dass der Fahrer bei niedrigen Geschwindigkeiten eher eine Gesamtübersicht als den weiten Blick in die Ferne benötigt, wie Kapitel 5.2.3 beschreibt.

Aus all diesen Überlegungen wurde die Rangieransicht entwickelt, welche bereits in Veröffentlichungen beschrieben wurde (Zaindl et al., 2015; Zaindl, 2016). Die Rangieransicht zeigt den kompletten Erfassungsbereich, der auch in der Standardansicht eingesehen wird, ohne künstliche Verzerrungen und ist die einfachste mögliche Ansicht. Anstatt der vier Bereiche mit unterschiedlichen Vergrößerungsfaktoren wird dem Fahrer ein Bild ohne Übergänge gezeigt. Einen Vergleich zwischen Standard- und Rangieransicht zeigt Abbildung 5-11. Der Vergrößerungsfaktor für den Sichtbereich der Klasse II wird in dieser Ansicht zwar nicht mehr erreicht, was aber wegen der Verdeckung durch den Auflieger irrelevant ist. Mithilfe der unverzerrten Ansicht kann der Fahrer einfach um die Kurve rangieren.



Abbildung 5-11: Standard- und Rangieransicht im direkten Vergleich

Der Knickwinkel des Aufliegers und die Gesamtsituation werden in der Rangieransicht optimal angezeigt. Der Radfahrer wird auf Anhub erkannt und in seiner Position im Bezug zum Lkw sofort richtig eingeschätzt. Die Rangieransicht ist somit nicht nur beim Rangieren von Vorteil, sondern kann den Fahrer, auf seinen Wunsch, auch beispielsweise in der Stadtfahrt unterstützen (Zaindl, 2016, S. 325-326). Die Rangieransicht kann vom Fahrer situativ direkt gewählt und/oder automatisiert situationsabhängig dargestellt werden.

### 5.3.3. Definition der Situationen für automatisierte Ansichtswechsel

Wird der Ansichtswechsel zwischen Standard- und Rangieransicht automatisiert, müssen dafür Kriterien definiert werden. Ebenso muss geklärt sein, in welchen Situationen der Fahrer frei aus beiden Varianten wählen kann und wann eine Ansicht zwingend ist. Dabei sollen die Systemparameter auch zugunsten des menschlichen mentalen Modells so einfach wie möglich gehalten werden (Bothe, 2014, S. 109). Im Folgenden werden zwei Kriterien definiert:

- Knickwinkel zwischen Fahrzeug und Auflieger (siehe auch (Bothe, 2014, S. 109))
- Eigengeschwindigkeit des Fahrzeuges

### 5.3.3.1. Knickwinkelabhängig automatisierter Ansichtswchsel

Der Knickwinkel zwischen Fahrzeug und Auflieger bildet einen für den Fahrer sehr verständlichen Umschaltunkt zwischen Standard- und Rangieransicht. Verdeckt der Auflieger den Hauptspiegelbereich zu einem gewissen Prozentsatz, wird automatisch in die Rangieransicht gewechselt. Wird die Verdeckung aufgehoben, wechselt die Ansicht wieder in die Standardansicht zurück. Abbildung 5-12 zeigt diese Umschaltung beim Durchfahren einer 90°-Kurve. Wichtig ist dabei, dass der Wechselpunkt mit einer gewissen Hysterese realisiert wird, um nicht zu häufig zwischen den Ansichten zu wechseln.

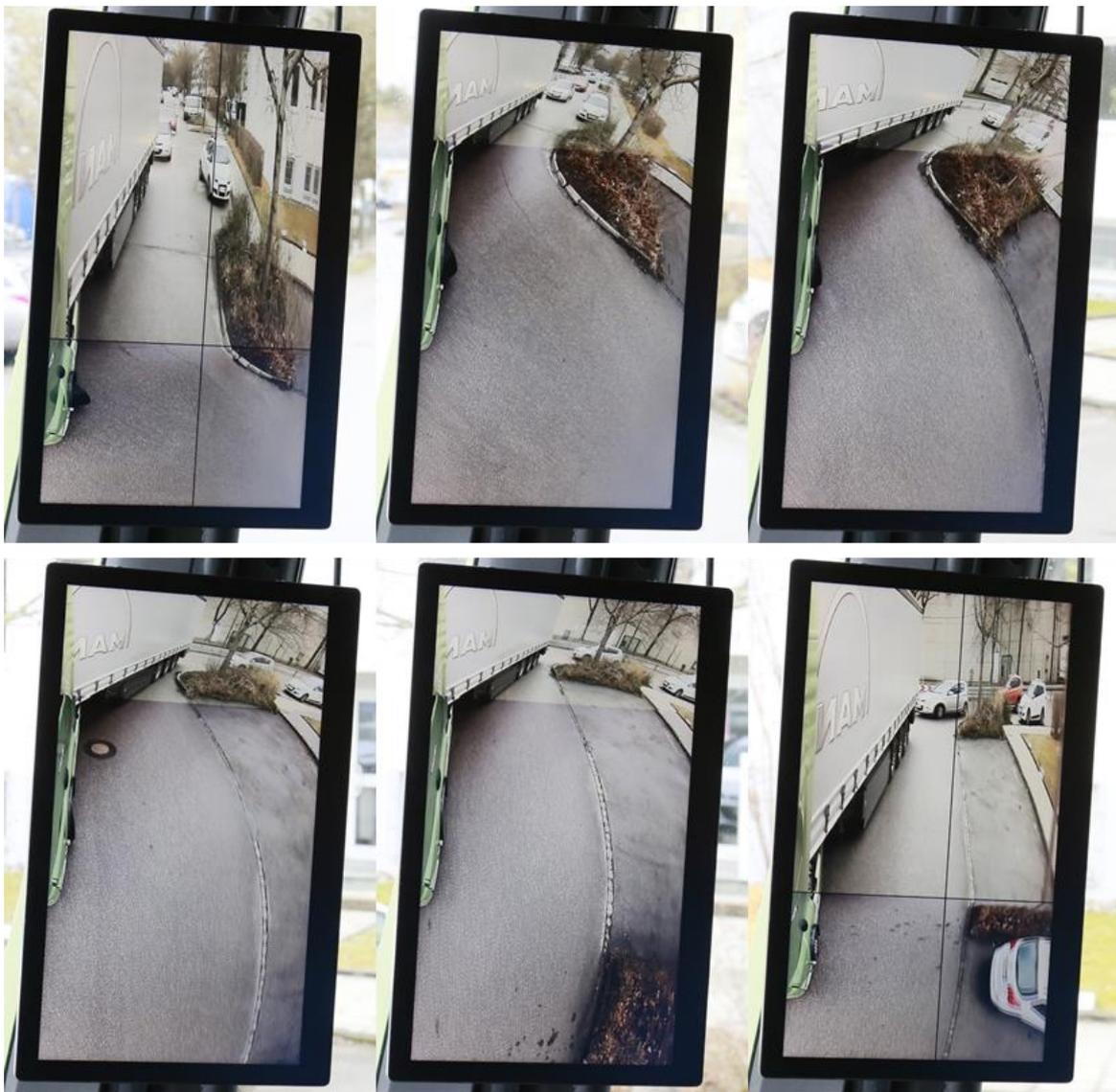


Abbildung 5-12: Die Rangieransicht mit knickwinkelabhängiger Aktivierung in einer 90°-Kurve

Diese Art der Umschaltung ist bereits im Prototyp realisiert, ihre Wirkung auf den Fahrer ist jedoch noch nicht detailliert untersucht. Die Rückmeldungen von Werkstattmitarbeitern und Versuchingenieuren, die das System seit der Umsetzung fahren und fahren, sind jedoch allesamt ausgesprochen positiv, sodass eine Umsetzung sehr wünschenswert ist. Die Funktion der automatischen Umschaltung soll vom Fahrer frei wählbar sein. Spätere Auswertungen im Serienbetrieb, beispielsweise der Nutzungsgrad der Funktion, werden die positive Akzeptanz der Fahrer nachweisen.

#### **5.3.3.2. Geschwindigkeitsabhängig automatisierter Ansichtswechsel**

Eine weitere Möglichkeit, automatisiert die Ansicht zu wechseln, bietet die Geschwindigkeit. Die Idee entstammt der Aussage aus Kapitel 5.2.3, laut der der Fahrer bei geringer Eigengeschwindigkeit eher den kompletten Überblick als den weiten Blick nach hinten wünscht. Bei der Umsetzung dieses Wunsches muss bestimmt werden, bei welchen Geschwindigkeiten der Fahrer welche Ansicht als potenziell vorteilhaft sieht. Es kann vermutet werden, dass gerade bei Fahrten innerhalb geschlossener Ortschaften die Rangieransicht von Vorteil sein kann. Bei Fahrten auf Landstraßen und Autobahnen ist jedoch die Standardansicht vorzuziehen. Die Geschwindigkeitsgrenze kann bei etwa 50 km/h angesetzt werden. Ein Wechsel von Rangier- auf Standardansicht, also bei steigender Geschwindigkeit, sollte dabei erst oberhalb der innerorts erlaubten 50 km/h geschehen, da die Ansicht ansonsten im Stadtverkehr zu häufig wechseln würde. Der Wechsel von Standard- auf Rangieransicht sollte bei abnehmender Geschwindigkeit hingegen auch relativ spät, also bei einer relativ geringen Geschwindigkeit, geschehen. Das vermeidet, dass der Ansichtswechsel bereits bei einer üblichen Ortsdurchfahrt (beispielsweise auf einer Bundesstraße) oder bei einem Absinken der Geschwindigkeit auf der Landstraße oder Autobahn (beispielsweise lange Steigung) unnötig vollzogen wird. Zur Definition des Umschaltpunktes können die Messwerte von Bothe herangezogen werden (siehe Abbildung 5-13), die den Knickwinkel des Aufliegers über der Geschwindigkeit anzeigen.

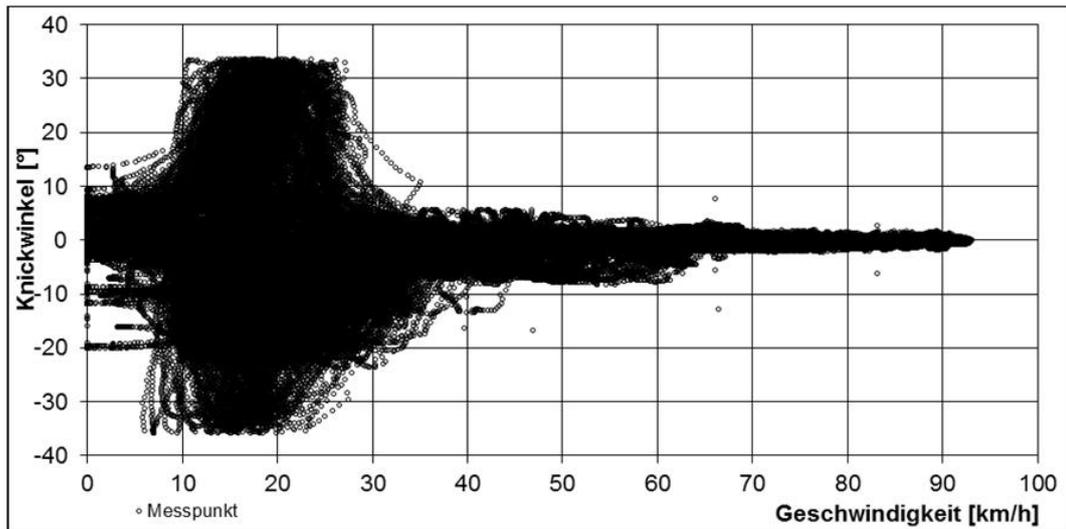


Abbildung 5-13: Knickwinkel über Fahrgeschwindigkeit (Bothe, 2014)

Es wird ersichtlich, dass von der höheren Geschwindigkeit kommend, ab ca. 40–35 km/h der mögliche Knickwinkel des Gespanns zu steigen beginnt. In diesem Bereich wird der Fahrer die Rangieransicht vermehrt benötigen, wonach die Umschaltung von Standard- auf Rangieransicht in diesem Bereich optimal ist. Zusätzlich können Daten zur aktuellen Position dienlich sein. Weiß das System, dass es sich beispielsweise auf einer Autobahn befindet, kann es eine Umschaltung in den Rangiermodus verhindern.

### 5.3.3.3. Freie Wahlmöglichkeit durch den Fahrer

Es ist denkbar und naheliegend, dem Fahrer die Ansichtswahl zu überlassen. So kann er die Ansicht je nach Wunsch und Situation selbst frei wählen. Da der Ansichtswechsel durch den Fahrer spontan geschehen muss, ist dafür ein Taster vermutlich die beste Wahl. In der Funktionalität müssen jedoch ein paar Einschränkungen getroffen werden. So benötigt der Fahrer auf mehrspurigen Straßen ohne Geschwindigkeitsbeschränkung zwingend eine Ansicht, in der er weit nach hinten sehen kann, also die Standardansicht. Es ist somit sinnvoll, die Umschaltung von Rangier- auf Standardansicht auch bei einer freien Wahl durch den Fahrer automatisiert zu gestalten. Ein Umschalten von Standard- auf Rangieransicht muss bei höheren Geschwindigkeiten nach kurzer Zeitdauer vom System zurückgesetzt werden. Dazu muss eine Zeitdauer definiert werden, die sich im Sekundenbereich befindet, wahrscheinlich innerhalb der Gegenwart der Gegenwart nach Pöppel (2000).

#### 5.3.4. Weitere Sichtbereiche

Durch die Kombination der Sichtfeldklassen II, IV und V auf Fahrer- und Beifahrerseite in jeweils einem dargestellten Bild, bleibt von den gesetzlich vorgeschriebenen Sichtfeldern nur noch ein kleiner Teil des Frontsichtbereiches übrig, der noch nicht abgedeckt ist. Da der Frontbereich nur in einem Geschwindigkeitsfenster bis 10 km/h gezeigt werden muss, ist eine Anzeige im Display des Infotainmentsystems umsetzbar (siehe Abbildung 5-14).



Abbildung 5-14: Anzeige des Frontbereiches im Display des Infotainmentsystems. Bei dieser Art der Darstellung wird der komplette Anfahrbereich aus Front- und Anfahrspiegel angezeigt

Die Anzeige von Sichtbereich VI im Infotainmentsystem des Fahrzeuges hat Vorteile gegenüber dem aktuellen Frontspiegel. Eine Verdeckung der Ansicht, wie es heute im Frontspiegel beispielsweise bei Regen, Schnee oder tief stehender Sonne der Fall ist, kann ausgeschlossen werden. Durch die situativ aufgeschaltete Frontansicht im ansonsten sekundären Display wird ein Reiz erzeugt, der den Fahrer häufiger auf das Display blicken lassen wird, als dies beim aktuellen Spiegel der Fall ist. Durch den größeren Sichtbereich bei gleichzeitig geringerer Verzeichnung und die örtlich nähere Anbringung des Displays zur Blickachse des Fahrers können dieselben Vorteile erwartet werden wie durch die im Anzeigebereich ungespiegelte Ansicht von oben (Schmidl, 2016). In Abbildung 5-15 wird der Frontspiegeleratz mit dem originalen Frontspiegel verglichen. Das gewählte Darstellungsverhältnis zwischen Display und Frontspiegel entspricht dabei dem Verhältnis, wie es der Fahrer im Fahrzeug wahrnimmt.



Abbildung 5-15: Vergleich Frontspiegeleratz mit aktuellem Frontspiegel

Es muss erörtert werden, ob die Überwachung des Frontspiegelbereiches überhaupt durch einen Spiegel oder ein KMS gelöst werden soll. Beim Anfahren fixiert der Fahrer das Sichtfeld weit vor dem Fahrzeug. Der Fahrer ist dabei, wie die Probandenstudien in Kapitel 4 zeigen, nicht auf den unmittelbaren Bereich direkt vor dem Truck fokussiert, den der Frontspiegel einsehbar macht. In diesem Bereich ist eine Sensorik, die Objekte erkennt und sie dem Fahrer signalisiert, sinnvoller als ein rein anzeigendes System. Die ECE R46 schreibt weder Spiegel noch KMS vor. Es muss lediglich gewährleistet sein, dass ein Prüfkörper, der die Größe eines Zylinders mit 30 cm Durchmesser und 80 cm Höhe aufweist, erkannt wird und der Fahrer ihn wahrnehmen kann (ECE, 2016). So ist für künftige Varianten durchaus denkbar, dass im Bereich von Klasse VI optisch und/oder akustisch vor Objekten im Gefahrenbereich gewarnt wird, ähnlich wie dies aktuell bei Pkws per Parksensoren geschieht. Dem Fahrer würde dadurch entscheidend geholfen, da er im Bedarfsfall auf ein Objekt im Gefahrenbereich hingewiesen wird, das er ansonsten übersähe.

## 6. Erwartete Nutzungsänderung durch KMS

Beim Spiegelersatz, insbesondere bei dem in Kapitel 5.3 vorgestellten Konzept, wird die Interaktion des Fahrers mit den Medien der indirekten Sicht verändert. Daraus lässt sich schließen, dass auch eine Verhaltensänderung des Fahrers eintritt. Um diese Verhaltensänderung des Fahrers zu untersuchen, sind vergleichende Probandenstudien mit KMS und Spiegelsystem nötig. Allgemeingültige Studien sind zum jetzigen Zeitpunkt im Grunde jedoch fragwürdig und mit dem aktuellen Stand der Technik auch hinsichtlich vieler Fragestellungen noch unseriös. Es kann jeweils nur der aktuelle Versuchsaufbau verglichen werden. Als ein Beispiel sei eine Studie der University of Michigan genannt. In dieser Studie wurde ein Setup zweier KMS (mit unterschiedlichen *M*-Faktoren) mit einem Spiegelsystem verglichen (Flannagan, Mefford, 2005). Das Ergebnis zeigt Unterschiede im Ausscherverhalten der Probanden zwischen den Systemen, die die Autoren mit den verschiedenen Vergrößerungsfaktoren der Systeme erklären. Die weiteren maßgeblich beeinflussenden Variablen sind jedoch komplett unbekannt. Es fehlen in der Studie zum Beispiel Angaben zur Latenz und Bildgüte des verwendeten KMS. Zudem sind die verschiedenen Systeme an unterschiedlichen Stellen positioniert, was eine Vergleichbarkeit beeinträchtigt.

Die Bildqualität des im Projekt mit MAN Truck & Bus entwickelten Prototyps ist zum aktuellen Zeitpunkt noch nicht ausreichend, um eine allgemeingültige vergleichende Studie zwischen dem Spiegelsystem und dem KMS zu ermöglichen. Das KMS wird aufgrund bildqualitativer Eigenschaften, die nach Kapitel 2 für das System grundlegend sind, in der subjektiven Bewertung der Fahrer schlechter abschneiden als das gewohnte Spiegelsystem. Ebenso müssten die Probanden erst eine Eingewöhnungsphase mit dem KMS absolvieren. Jede Studie kann somit zum aktuellen Zeitpunkt lediglich negative Aspekte des KMS aufzeigen, die in der künftigen Weiterentwicklung behoben werden können. Ein Vergleich zwischen KMS und Spiegelsystem ergibt erst ab Serienreife des KMS Sinn.

Aus diesen Gründen wird zunächst anhand der aktuellen Spiegelnutzung theoretisch erörtert, inwiefern sich das Verhalten der Fahrer durch die KMS-Nutzung ändert. Es wird ein kurzer Einblick in die Studien gewährt, die im Laufe der Projektarbeit zur systematischen Weiterentwicklung des KMS entstanden.

## 6.1. Veränderte Wahrnehmung bei KMS

Die Wahrnehmungsleistung des Fahrers wird sich mit einem KMS im Vergleich zum Spiegelsystem verändern.

### 6.1.1. Optischer Fluss

Der optische Fluss des KMS ändert sich im Vergleich zum Spiegelsystem grundlegend. Der Fahrer hat ein durchgängiges Bild für die kompletten Sichtbereiche der vormals drei Spiegel. Er muss somit nur noch eine Anzeige und einen optischen Fluss überwachen. Dieser ist in Abbildung 6-1 visualisiert. Durch die Anzeige in der Standardansicht ist gewährleistet, dass der Fahrer auch bei höherer Geschwindigkeit alle Bereiche mit nur geringen optischen Unschärfen einsehen kann.



Abbildung 6-1: Optischer Fluss im KMS (zum Vergleich mit dem Spiegelsystem siehe Abbildung 3-14)

Dies bedeutet eine Verbesserung im Vergleich zum Spiegelsystem (siehe Kapitel 5.2.2). Dem Fahrer wird ein verständlicheres Bild der Umgebung geboten, als dies im Spiegelsystem der Fall ist.

### 6.1.2. Verringerung der zu überwachenden Anzeigen

Die Einrichtungen für indirekte Sicht dienen dem Fahrer zur Entdeckung und Beachtung von Objekten. Mit dem KMS wird dem Fahrer die Entdeckung von Objekten grundlegend erleichtert. Statt fünf vorgeschriebener Spiegel zur seitlichen Überwachung muss er nur zwei KMS überwachen. In Abbildung 6-2 ist dies für die Beifahrerseite veranschaulicht.

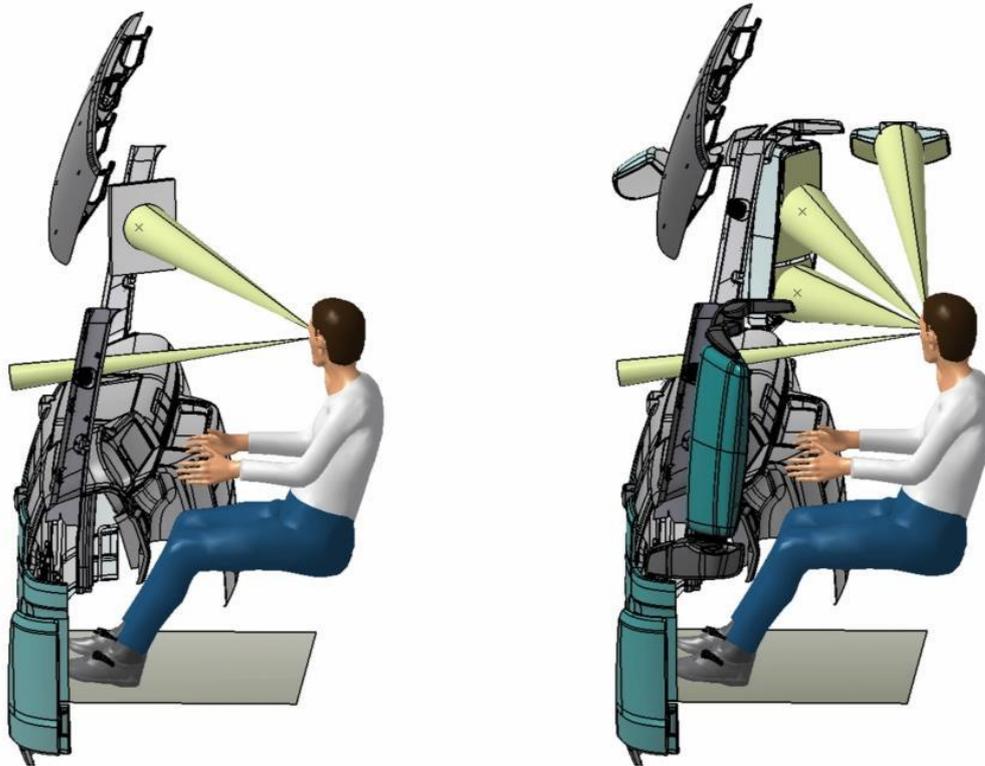


Abbildung 6-2: Simulation der seitlichen Überwachung durch den Fahrer mit RAMSIS in CATIA. Links: KMS. Rechts: Spiegelsystem (Zaindl et al., 2015)

Der Fahrer muss nicht mehr überlegen, in welchen der einzelnen Spiegel er seinen Blick richtet, wenn er beispielsweise die rechte Seite überwachen will. Er kann mit einem Blick die komplette Seite überwachen. Dies führt auch zu einer Verringerung der Blickwechselzeiten. Ein Blickwechsel innerhalb des KMS von einem Bereich in einen anderen benötigt aufgrund der örtlichen Nähe weniger Zeit. Des Weiteren werden diese Blickwechsel im Vergleich zum Spiegelsystem gezielt anhand von Reizen im optischen Fluss stattfinden. Beispielsweise ist so ein standardmäßiger Blickwechsel vom Haupt- zum Weitwinkelspiegel nicht mehr nötig.

### 6.1.3. Entdeckung anderer Verkehrsteilnehmer

Die Optimierung des optischen Flusses und die Reduktion der zu überwachenden Anzeigen werden sich positiv auf die Entdeckung von Objekten im Nahbereich auswirken. Dies ist in Abbildung

6-3 visualisiert. Der Radfahrer wird beim ersten Blick auf das KMS als optischer Reiz wahrgenommen. Der zweite Blick wird durch den Reiz direkt auf den Radfahrer gelenkt und der Radfahrer identifiziert.

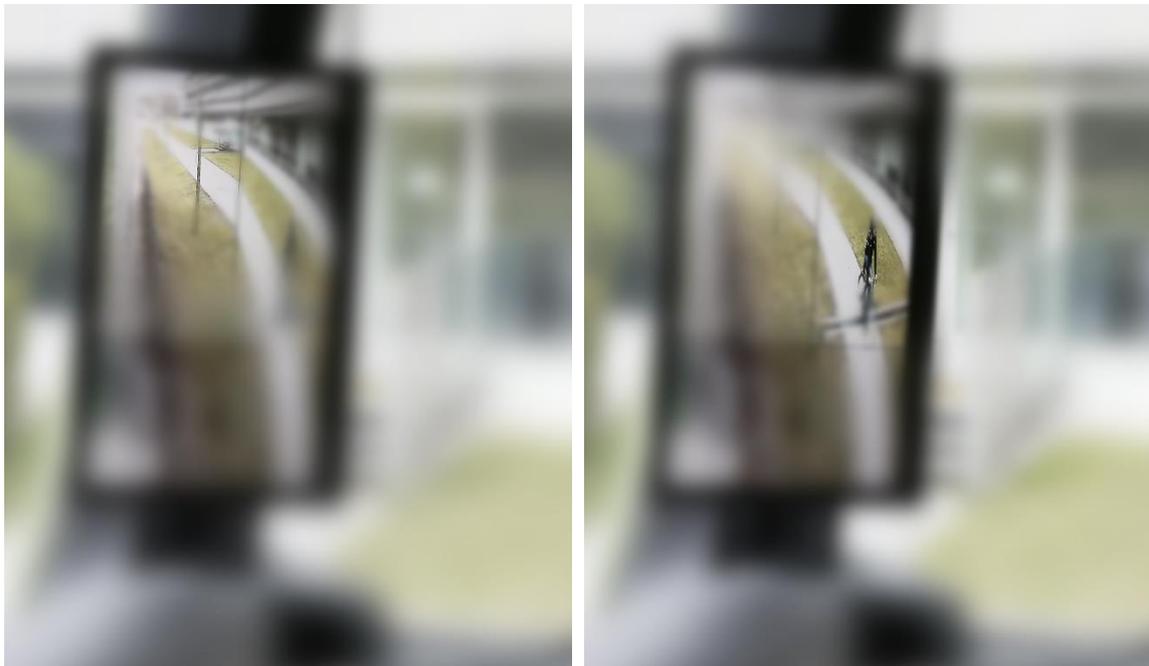


Abbildung 6-3: Foveale Ausrichtung auf das beifahrerseitige KMS. Links: Im ersten Blick kann der Radfahrer durch die periphere Sicht bereits entdeckt werden. Rechts: durch den zweiten Blick wird der Radfahrer identifiziert

Als Beispiele sollen hier zum einen der Radfahrer beim Rechtsabbiegen und zum anderen ein Pkw auf der Autobahn dienen, der sich seitlich des eigenen Fahrzeugs befindet. Beide Situationen sind allgemein dafür bekannt, dass Unfälle geschehen, da Objekte im Spiegelsystem vom Fahrer übersehen werden. Es wird davon ausgegangen, dass diese Objekte im KMS sehr viel häufiger entdeckt werden. Für die Plausibilisierung der Aussagen sollen in diesem Abschnitt Bilder dienen, die dieselbe Situation zum einen in einem Fahrzeug mit Spiegelsystem und zum anderen mit dem aktuell vorhandenen KMS-Prototyp zeigen. Es zeigt sich allein durch die Visualisierung, dass Objekte im Nahbereich mithilfe des KMS wesentlich effizienter und effektiver entdeckt werden.

Abbildung 6-4 zeigt eine Situation, in der sich ein Kfz seitlich-vorne zum eigenen Fahrzeug befindet. Im Spiegelsystem ist das Kfz im Weitwinkelspiegel und im Anfahrspiegel zu erkennen, jedoch nicht im Hauptspiegel. Im KMS ist das Fahrzeug im unteren Bildbereich bereits im ersten Blick zu entdecken.



Abbildung 6-4: Direkter Vergleich zwischen Spiegelsystem und KMS: Es befindet sich ein Pkw im Anfahrspiegelbereich

Eine Rechtsabbiegesituation zeigt Abbildung 6-5. Im Hauptspiegel kann der Fahrer lediglich den eigenen Auflieger sehen. Der Weitwinkelspiegel zeigt ein verzerrtes Abbild der Umgebung an. Im Anfahrspiegel und im Rampenspiegel ist der Radfahrer zu erkennen, der sich an der vorderen rechten Ecke des Lkw befindet. Im KMS ist die Situation in der Rangieransicht für den Fahrer leichter zu überblicken.



Abbildung 6-5: direkter Vergleich zwischen Spiegelsystem und KMS in der Rangiersicht: Beim Rechtsabbiegen befindet sich ein Radfahrer direkt an der vorderen rechten Ecke des Lkw

Für die Entdeckung von Objekten im Fernbereich, also beispielweise eines Motorrads, das mit hoher Geschwindigkeit von hinten naht, spielen der Vergrößerungsfaktor nach Kapitel 2.4.2 und die

Bildgüte (Auflösung, Helligkeit, Farbwiedergabe ...) eine entscheidende Rolle. Hier bietet das Spiegelsystem durchaus noch Vorteile gegenüber dem aktuellen KMS-Prototyp. Sowohl eine Optimierung der einzelnen Komponenten als auch eine optimierte Darstellung in verschiedenen Situationen (siehe Kapitel 5.2.3) ist anzustreben.

## **6.2. Veränderungen in der Interaktion mit Spiegelsatz**

Sowohl in der Befragung als auch in den Probandenstudien zur Spiegelnutzung (siehe Kapitel 4.1 und 4.2) stellte sich heraus, dass der Fahrer die Hauptspiegel mit Abstand am häufigsten verwendet. Alle anderen Spiegel der jeweiligen Seite werden mit großem Effekt signifikant seltener überwacht (sowohl in der Eigenwahrnehmung der Fahrer als auch in Versuchsfahrten gemessen). Werden alle drei Spiegel einer Seite mit einem durchgängigen Bild ersetzt, ändert sich zwangsläufig sowohl die subjektive als auch die objektive Überwachung der jeweiligen Bereiche. Dies wird im weiteren Verlauf erläutert.

### **6.2.1. Prämissen der theoretischen Betrachtung**

Die Motivation des Fahrers eines Lkws mit Spiegelsatz wird in erster Linie dieselbe sein wie bei demselben Fahrzeugtyp mit einem Spiegelsystem, also zielorientiert foveal, wie es Kapitel 3.3 beschreibt. Der Fahrer wird weiterhin seine Aufmerksamkeit darauf richten, sein Fahrzeug auf der Straße zu halten und andere Fahrzeuge bereits von Weitem auszumachen. Der Fahrer wird auch weiterhin nicht gezielt im Nahbereich nach Objekten Ausschau halten, insofern er diese nicht schon zuvor bemerkt hat. Ebenso bleiben alle anderen Aufgaben des Fahrers identisch, wie beispielsweise die Überwachung der direkten Sicht und der Instrumente.

Da die motivierte Handlung im Grunde identisch bleibt, wird vermutet, dass der Fahrer mit einer ähnlichen Häufigkeit und kumulierten Zeitdauer auf die Displays blicken wird, wie es aktuell mit den jeweils korrespondierenden Spiegeln der Fall ist. Der Fahrer wird weiterhin regelmäßig den Blick in den Spiegel bzw. das KMS richten, um den rückwärtigen Verkehr zu beobachten. Es ist also davon auszugehen, dass der Fahrer mindestens so oft auf das KMS blickt wie auf den am häufigsten frequentierten Spiegel der jeweiligen Seite. Für Situationen mit hoher Komplexität wird zudem angenommen, dass dem Fahrer auch mit dem KMS nicht mehr Zeit zur Verfügung steht, als es mit dem aktuellen Spiegelsystem der Fall ist (Bubb et al., S. 130). Das KMS wird in diesen Situationen also maximal so häufig benutzt werden, wie dies mit den verschiedenen zusammengefassten Sichtbereichen im Spiegel zusammen geschieht.

## 6.2.2. Veränderung der subjektiven Überwachung indirekter Sicht

Eine wesentliche Änderung ist, dass der Fahrer nicht mehr drei unterschiedliche Spiegel überwacht, sondern ein einziges Bild der jeweiligen Seite. Wie in Kapitel 4.1.2 beschrieben, wird der Hauptspiegel einer Seite stets häufiger benutzt als der Weitwinkel- und Anfahrspiegel.

Wird davon ausgegangen, dass der Fahrer sein KMS der jeweiligen Seite mindestens so häufig nutzt wie den ersetzten Hauptspiegel, steigt die allgemeine subjektive Nutzung der restlichen Sichtbereiche in jeder Situation erheblich. Abbildung 6-6 visualisiert dies für das Beispiel des Rechtsabbiegens in der Stadt. Der Fahrer, motiviert das Fahrzeug um die Ecke zu manövrieren, wird gefühlt mindestens so häufig in das rechte KMS blicken, wie er es mit den rechten Hauptaußen spiegeln täte. Die subjektive Überwachung des KMS steigt somit für alle Bereiche auf „immer“. Für den früheren Bereich des Weitwinkel- und Anfahrspiegels ist somit eine erhebliche Steigerung in der subjektiven Nutzung zu erwarten. Auch wenn der Fahrer diese Bereiche nicht direkt anvisiert, hat er sie dennoch im Blick.

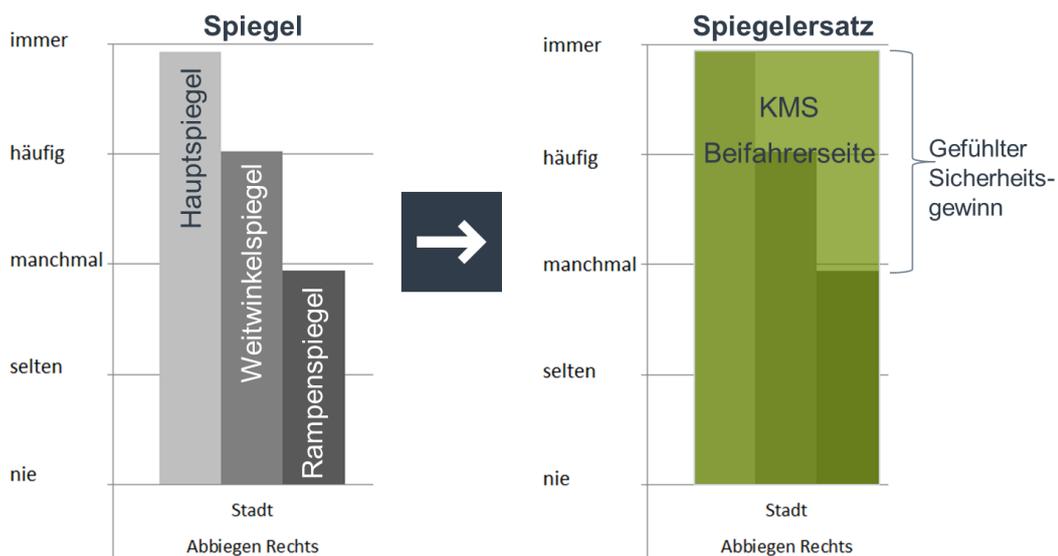


Abbildung 6-6: Theoretische Veränderung der subjektiven Überwachung der Sichtbereiche vom Spiegelsystem zum KMS beim Rechtsabbiegen in der Stadt

Der Fahrer hat somit subjektiv immer die komplette rechte Seite des Fahrzeuges unter Kontrolle. Dies führt zu einem gefühlten Sicherheitsgewinn des Fahrers. Ein Übersehen von Objekten wird der Fahrer als unwahrscheinlicher einschätzen als im aktuellen Spiegelsystem. Inwieweit diese Wahrnehmungsänderung eine Änderung im allgemeinen Fahrverhalten bedingt, kann aktuell nicht abgeschätzt werden. Eine erhöhte Risikobereitschaft der Fahrer aufgrund der erhöhten subjektiven Sicherheit wird jedoch nicht erwartet. Eher wird davon ausgegangen, dass der Fahrer

durch erhöhte subjektive Sicherheit auch sein Bewusstsein gegenüber der Situation schärft. Er erkennt kritische Situationen eher als im Spiegelsystem und passt seine Fahrweise dementsprechend an.

### **6.2.3. Veränderung der reellen Überwachung indirekter Sicht**

Die Nutzung des aktuellen Spiegelsystems, das Kapitel 4.2.1 beschreibt, lässt sich vereinfacht zusammenfassen: Der Fahrer nutzt im Wesentlichen die Hauptspiegel, um den rückwärtigen Verkehr zu beobachten. Im Bedarfsfall werden zusätzlich die Weitwinkelspiegel verwendet, um beispielsweise um eine enge Kurve zu fahren und den Anhänger im Blick zu behalten. Die Nutzung von Front- und Anfahrspiegel ist marginal.

Die Einführung eines KMS wird diese Art der Nutzung nicht im Grundsatz verändern. Der Fahrer wird weiterhin in die für ihn interessanten Bereiche blicken. Der Unterschied zum Spiegelsystem liegt vielmehr in der Informationsaufnahme, die der Fahrer per KMS erzielen kann: Durch die kombinierten KMS-Sichtfelder hat der Fahrer auch die Bereiche im peripheren Blick, die er im Spiegelsystem so nur mit weiteren und zeitaufwendigen Processing-Blicken einsehen kann. Es entstehen so Blickreize, auf die der Fahrer reagieren kann. Er kann Objekte im Nahbereich ausmachen, die er im Spiegelsystem nur durch ein gezieltes, sequenzielles Abscannen aller Spiegel theoretisch entdecken kann. Zudem werden unnötige Scanning-Blicke (Schweigert, 2003) in diese Bereiche vermieden, wie sie im Spiegelsystem vorkommen. Die Nutzung des KMS zeichnet sich somit durch eine höhere Effizienz für den Fahrer aus. Zu klären, wie häufig er das KMS im Vergleich zum konventionellen Spiegelsystem nutzt, bleibt künftigen Studien überlassen.

Statt die meiste Zeit nur einen sehr kleinen Bereich zu überwachen, wie es im Hauptspiegel der Fall ist, hat der Fahrer die komplette Seite im Blick. Die komplette Szene einer Seite ist im Display mit einem durchgängigen optischen Fluss überschaubar. Es stellt sich die Frage, inwiefern der Fahrer seine Randbereiche im KMS um den Hauptspiegelbereich herum foveal betrachtet. Die Ausführungen dieser Arbeit lassen vermuten, dass der Fahrer diese Bereiche in jedem Fall anders nutzen wird, als dies aktuell beim Weitwinkel- und Anfahrspiegel der Fall ist. Es wird erwartet, dass Scanning-Blicke, die Kapitel 3.2.1.1 beschreibt, häufiger werden. Im Gegenzug können Processing-Blicke in die Nahbereiche der Klassen IV und V durchaus seltener werden. Die Zahl der unnützen fovealen Fixationen, also der Blicke in einen Bereich ohne wesentlichen Inhalt, wird abnehmen. Der Blick des Fahrers wird durch eine Reizänderung im optischen Fluss auf Objekte in den Nahbereichen gelenkt.

Neben dem subjektiven Sicherheitsgewinn, den Kapitel 6.2.2 beschreibt, kann dem KMS somit ein objektiver Sicherheitsgewinn bescheinigt werden. Der Fahrer wird mehr Objekte in der Nähe seines Fahrzeuges entdecken und beachten können. Plötzlich auftretende Gefahrensituationen, in denen der Fahrer Objekte im Nahbereich um den Lkw nicht wahrnehmen konnte, werden durch den Einsatz des KMS merklich reduziert. Eine erhöhte Entdeckungsrate und ein verbesserter Überblick sind wesentliche Faktoren zum sicheren Bewegen eines Lkws und haben im Umkehrschluss eine Erhöhung der Sicherheit zur Folge.

### **6.3. Studien zur KMS-Nutzung**

Die in Kapitel 6.1 aufgestellten Thesen sollen in künftigen Studien überprüft werden. Die sicherheits- und komfortrelevanten Aspekte des KMS gegenüber dem Spiegelsystem werden dabei im Fokus der Untersuchungen liegen. Sobald das System einen gewissen Reifegrad erreicht wie z. B. einen zulassungsfähigen Zustand, können entsprechend aussagkräftige vergleichende Studien stattfinden. Im Rahmen der Projektarbeit wurde der Fokus darauf gelegt, das System möglichst schnell und iterativ zu verbessern.

#### **6.3.1. Iterative Versuchsdesigns zur Systemoptimierung während der Projektphase**

Die Vergleiche, die im Laufe der Studie mit den verschiedenen Systemen und ihren Ausbaustufen durchgeführt wurden, sind so konzipiert, dass negative Aspekte auffallen, um sie beheben zu können. Es werden somit viele kleine Studien durchgeführt, um möglichst viele Aspekte des KMS möglichst effizient zu optimieren (Nielsen, Landauer, 1993). Mit diesem Verfahren, wird das System anhand jeweils relativ kleiner Probandenzahlen iterativ verbessert.

Ein Beispiel für die iterative Verbesserung des Systems liefern die Arbeiten von Guggemos (2014) und Seiferth (2014), in denen das konventionelle Spiegelsystem sowohl mit der Standardansicht (siehe 5.3.2.1), mit der Rangieransicht (siehe 5.3.2.2) als auch einer Panning-Funktion in einem sehr frühen Konzeptstadium des KMS in verschiedenen Fahrsituationen verglichen wurde. Die Rangieransicht stellte sich in dem Versuch als eine vom Fahrer sehr einfach zu verstehende Ansicht heraus. Auch Vorteile gegenüber einer Panning-Funktion werden in den Studien gezeigt. Es zeigte sich, wie in Kapitel 5.2.3 beschrieben, dass eine optimierte Art der Ansicht situativ unterschiedlich ist.

Erste Vergleichsstudien des KMS (in der Standardansicht) mit dem Spiegelsystem im Realverkehr wurden von Badbanchi (2014) und Kühlwetter (2014) durchgeführt. Die Studien zeigen das große

Interesse der Probanden am System: Das fahrerseitige KMS wurde doppelt so häufig fixiert wie das fahrerseitige Spiegelsystem. Eine automatische situative Umschaltung der Standardansicht auf die Rangieransicht war in dem Versuch noch nicht realisiert. Die Studie zeigt, dass nur bei Erfüllung der grundlegenden qualitativen Eigenschaften, die Kapitel 2 beschreibt, eine hohe Akzeptanz erreicht werden kann. Die Einschätzung der Fahrer zeigt das Zukunftspotenzial von KMS. In einer Befragung nach einer Probefahrt zum direkten Vergleich von KMS und Spiegelsystem zeigt sich, dass der KMS-Prototyp dem Spiegelsystem durchaus ebenbürtig bzw. überlegen ist. Schwachstellen in der Bewertung des KMS sind vor allem in der Bildqualität und der im Versuch fehlenden automatischen Umschaltung zwischen den verschiedenen Ansichten zu finden (Kühlwetter, 2014, S. 43-47).

### **6.3.2. Künftige Probandenstudien**

Für künftige Probandenstudien muss das KMS weiter verbessert werden. Ebenso ist auch der Vergleich mit dem konventionellen Spiegelsystem von Interesse. Um eine Vergleichbarkeit der Systeme herzustellen, muss der Fahrer ausreichend lange an das Spiegelersatzsystem gewöhnt sein (Winner, Barthenheier, 2003). Die mentale Beanspruchung des Fahrers hängt von der Nutzungsdauer ab, was der Neuerstellung eines mentalen Modells für das neue System geschuldet ist (Nirschl, Kopf, 1997). Wie lange die Gewöhnung an das KMS dauern wird, um repräsentative Ergebnisse für den Alltagsgebrauch zu erhalten, kann aktuell nur grob geschätzt werden. Beim damals noch relativ neu eingeführten ACC dauerte die Lernphase bei Vielfahrern zwei Wochen (Weinberger et al., 2001). So lange wird die Eingewöhnung beim Spiegelersatzsystem wohl nicht dauern, da die Grundfunktionalität ja bereits aus dem Spiegel bekannt ist und die Nutzungsfrequenz um einiges höher liegt. Nach Aussagen von Probanden und Mitarbeitern der MAN Truck & Bus, die das System häufiger nutzten, liegt die Eingewöhnung an das System im Bereich von Minuten bis wenigen Stunden.

Es wird davon ausgegangen, dass das KMS dem Spiegelsystem zukünftig überlegen sein wird. Bei einer größeren Verbreitung der Spiegelersatzsysteme auf dem Markt kann ihre direkte Auswirkung auf die Sicherheit im Straßenverkehr untersucht werden. Hierzu ist es denkbar, beispielsweise Unfallstatistiken auszuwerten.

## 7. Zusammenfassung und Ausblick

Das Ergebnis der Arbeit definiert ein Spiegellersatzsystem für Nutzfahrzeuge, das auf die menschliche Wahrnehmungsleistung optimiert ist. Durch die Darstellung der seitlichen Sichtbereiche in einem durchgängigen Bild werden Haupt-, Weitwinkel- und Anfahrspiegel ersetzt. Der Fahrer wird merklich entlastet und Unfälle werden vermieden, was künftige Studien belegen werden. Zur Entwicklung des Systems mussten einige Aspekte genauer betrachtet werden.

Spiegellersatzsysteme müssen, insoweit möglich, dem aktuellen Spiegelsystem mindestens ebenbürtig sein. Neben der begrifflichen Definition werden im Grundsatz die Anforderungen beschrieben, die auch in der Richtlinie für indirekte Sicht nach ECE R46 adressiert sind. Manche Anforderungen und physikalische Eigenschaften werden dabei noch detailliert.

Neben den Anforderungen, die sich aus den aktuellen Spiegelsystemen ergeben, ist bei einem KMS vor allem die visuelle Kognition des Menschen zu beachten. Aus diesem Grund wird die menschliche Wahrnehmung, insbesondere die der fovealen und peripheren Sicht analysiert. Mit dem aktuellen Spiegelsystem muss der Fahrer gerade im nahen Umfeld um das Nutzfahrzeug eine periphere Aufgabe, also das zuverlässige und zufällige Entdecken von Objekten ohne bewusstes Suchen, per fovealer Sicht lösen, also mit gezieltem Blick in den jeweiligen Spiegel und dem genauen Abscannen der Umgebung. Diese Diskrepanz zwischen der Art der Aufgabe und der Lösungsmöglichkeit spiegelt sich auch in Fahrerbefragungen und den Probandenversuchen im Realverkehr wider. Zusammengefasst lässt sich feststellen, dass der Fahrer seine Spiegel größtenteils foveal motiviert nutzt. Eine Überwachung des nahen Umfeldes findet nur in sehr geringem Maße statt. Die Studien zu den aktuellen Spiegelsystemen bestätigen das Bild, das in der theoretischen Herleitung geformt wird.

In kleinen Probandenstudien mit ersten Prototypen wurde iterativ ein KMS entwickelt, das dem Fahrer ermöglicht, das nahe Umfeld peripher zu überwachen, während er seiner fovealen Aufgabe nachgeht. Durch die Art der Darstellung, die Kapitel 5.3 ausführlich beschreibt, kann der Fahrer den Hauptspiegelbereich wie gewohnt nutzen und nebenbei das weite Umfeld peripher im Blick behalten.

Objekte werden somit leichter erkannt als im konventionellen Spiegelsystem. Schwerwiegende Unfälle wie beispielsweise ein Rechtsabbiegeunfall mit Radfahrern können somit allein durch den geeigneten Spiegellersatz verhindert werden. Die Radfahrer oder andere Verkehrsteilnehmer werden

entdeckt, bevor eine Gefahrensituation entsteht. Das KMS ist im Vergleich zum aktuellen Spiegelsystem somit in gewisser Hinsicht auch als eine Art Abbiegehilfe für den Fahrer zu sehen.

Es ist abzuwarten, ob und inwieweit KMS künftig die aktuellen Spiegel aus dem Markt verdrängen. In Studien müssen die einzelnen Einflussfaktoren der Spiegelsatzsysteme systematisch erforscht werden, um das System weiter zu verbessern. Die Ergebnisse der Studien sind dabei kritisch zu hinterfragen. Vor allem die vielen systembeeinflussenden Faktoren sind zu beachten und offenzulegen. Besonders Interaktionseffekte zwischen den einzelnen Variablen werden aus wissenschaftlicher Sicht herausfordernde Fragestellungen ergeben.

Für den Fahrer wäre neben dem Sichtfeld auch ein Hörfeld ein gutes Hilfsmittel. Oftmals wird die Aufmerksamkeit vom Hören gelenkt (beispielsweise durch einen Warnton). Eine Möglichkeit, die im Rahmen einer Studienarbeit realisiert wird, ist die Geräuschkulisse außerhalb des Nutzfahrzeuges, die durch Eigengeräusche des Fahrzeuges nicht wahrnehmbar ist, in den Lkw zu übertragen (Gebhart, 2014). So kann der Fahrer auf akustische Reize außerhalb des Lkw reagieren, die er aktuell aufgrund der Entfernungen und des Eigengeräusches des Fahrzeuges normalerweise nicht hören kann. Ein prototypischer Aufbau mit zwei Mikrofonen am Trailerende, die mit dem Rückwärtsgang aktiviert wurden, ist im Probandenversuch als sehr hilfreich und sicherheitsfördernd bewertet.

Durch die elektronische Verarbeitung von Videosignalen in den KMS wird es künftig möglich sein, dem Fahrer zusätzliche Informationen anzuzeigen und diese Informationen auch den fahrzeugeigenen Assistenzsystemen zur Verfügung zu stellen. Ebenso ist denkbar, dass das KMS neben der reinen Anzeige des Bildes, wie ein Mensch ein Umgebungsmodell erstellt. Das KMS oder das bildverarbeitende System wird dabei einen wesentlichen Beitrag zur fortschreitenden Automation der Fahrzeuge liefern können. Augmentierte Realität im angezeigten Bild ermöglicht zudem eine Plausibilisierung von Warnungen und Aktionen des Fahrzeuges, die für das Verständnis und die Akzeptanz des Fahrers gegenüber den Systemen von entscheidender Bedeutung sein kann (Bundschuh, 2014).

## 8. Literaturverzeichnis

- 96/53/EG. (1996). Richtlinie zur Festlegung der höchstzulässigen Abmessungen für bestimmte Straßenfahrzeuge im innerstaatlichen und grenzüberschreitenden Verkehr in der Gemeinschaft sowie Festlegung der höchstzulässigen Gewichte im grenzüberschreitenden Verkehr.
- Abendroth, B., Bruder, R. (2015). Die Leistungsfähigkeit des Menschen für die Fahrzeugführung. In H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz, C. Singer, *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* (S. 3-14). Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- ADFC Berlin. (2016). *ADFC: Es gibt keinen "Toten Winkel" an schweren LKW*. Abgerufen am 20.08.2016 von [www.adfc-berlin.de](http://www.adfc-berlin.de)
- autobild. (2016). *www.autobild.de: BMW i8 Mirrorless (CES 2016)*. Abgerufen am 22.08.2016 von: [www.autobild.de/bilder/bmw-i8-mirrorless-ces-2016-8508845.html](http://www.autobild.de/bilder/bmw-i8-mirrorless-ces-2016-8508845.html)
- Bach, P., Rüter, G., Carstengerdes, N., Wender, K., Otte, D. (2002). *Untersuchung von Verkehrssicherheitsaspekten durch die Verwendung asphärischer Außenspiegel*. Bundesanstalt für Straßenwesen. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW.
- Badbanchi, S. (2014). *Probandenstudie zur Bewertung eines Spiegeleratzsystems im LKW mittels Head- und Eyetracking* (Diplomarbeit). Technische Universität München.
- Baumeister, M., Kohnen, T. (2008). Akkommodation und Presbyopie. *Der Ophthalmologe*, S. 597-608.
- Belyus, H. (2015). *sehschaerfen-simulator*. Abgerufen am 01.01.2015 von [www.optiker.at/sehschaerfen-simulator](http://www.optiker.at/sehschaerfen-simulator)
- Bengler, K., Götze, M., Pfannmüller, L., Zaindl, A. (2015). To See or not to See – Innovative Display Technologies as Enablers for Ergonomic Cockpit Concepts. *electronic displays Conference*. Nürnberg.
- Bernotat, R. (1970). Anthropotechnik in der Fahrzeugführung. *Ergonomics*, S. 353-377.
- BG Verkehr. (2016). *Einstellung für die Sicherheit*. Abgerufen am 02.02.2016 von [www.bg-verkehr.de/presse/pressemitteilungen/einstellung-fuer-diesicherheit](http://www.bg-verkehr.de/presse/pressemitteilungen/einstellung-fuer-diesicherheit)
- Bhise, V. (2012). *Ergonomics in the Automotive Design Process*. Boca Raton: CRC Press.
- Böhm, A., Lux, A. (2014). *Augenzentrum Dresden*. Abgerufen am 01.08.2014 von [www.augenzentrum-dresden.de/patienteninfo/Aufbau-des-Auges.php](http://www.augenzentrum-dresden.de/patienteninfo/Aufbau-des-Auges.php)
- Bothe, A. (2014). *Analyse dynamischer Sichtsituationen zur ergonomischen Auslegung von Kamera-Monitor-Systemen (KMS) in schweren Nutzfahrzeugen* (Dissertation). Technische Universität Darmstadt.
- Bothe, A., Wohlfahrt, E., Bruder, R. (2012). Dimensioning of Actual Fields of Indirect Vision of Commercial Vehicles by Analyzing Dynamic Vision Situations. *21st Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology*. Aachen.

- Bothe, A., Wohlfarth, E., Kirschbaum, M., Bruder, R. (2013a). Selection of relevant test parameters and their influence on first results of the analysis of dynamic vision situations in commercial vehicles. 59. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (GfA). Krefeld.
- Bothe, A., Wohlfarth, E., Kirschbaum, M., Bruder, R. (2013b). Variation of actual fields of indirect vision in commercial vehicles during dynamic vision situations. 13th Stuttgart International Symposium of Automotive and Engine. Stuttgart.
- Breuer, S., Kopp, S. (2013). Fahrmechanik. In E. Hoepke, S. Breuer, *Nutzfahrzeugtechnik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Brune, C. (2007). *Berechnung des Optischen Flusses und Kantenerkennung mit Optimierungsmethoden* (Diplomarbeit). Abgerufen von <http://wwwmath.uni-muenster.de/num/publications/2007/Bru07>
- Bubb, H. (2015a). Das Regelkreisparadigma der Ergonomie. In H. Bubb, K. Bengler, R. E. Grünen, M. Vollrath, *Automobilergonomie* (S. 27-66). Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Bubb, H. (2015b). Einführung. In H. Bubb, K. Bengler, R. E. Grünen, M. Vollrath, *Automobilergonomie* (S. 1-26). Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Bubb, H. (2015c). Menschmodelle. In H. Bubb, K. Bengler, R. E. Grünen, M. Vollrath, *Automobilergonomie* (S. 221-258). Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Bubb, H., Vollrath, M., Reinprecht, K., Mayer, E. K. (2015). Der Mensch als Fahrer. In H. Bubb, K. Bengler, R. E. Grünen, M. Vollrath, *Automobilergonomie* (S. 67-162). Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Bundschuh, L. (2014). *Erweiterter Spiegelersatz: Konzeptentwicklung für den Einsatz von Augmented Reality* (Masterarbeit). Technische Universität München.
- Cohen, A. S. (1994). Visuelle Informationsaufnahme des motorisierten Verkehrsteilnehmers. *Interdisziplinäre Unfallforschung: Informationsaufnahme des Verkehrsteilnehmers*, S. 17-34.
- Cohen, A. S. (1998). *Visuelle Orientierung im Strassenverkehr*. Bern: Bfu, Schweizerische Beratungsstelle für Unfallverhütung.
- Cohen, A. S., Hirsig, R. (1990). Zur Bedeutung des fovealen Sehens für die Informationsaufnahme bei hoher Beanspruchung. In H. Derkum, *Sicht und Sicherheit im Straßenverkehr* (S. 47-58). Köln: TÜV Rheinland GmbH.
- Corbin, H., Carter, J., Reese, E., Volkmann, J. (1958). *Experiments on visual search 1956-1957*. Mount Holyoke: Psychological Research Unit.
- Danielson, H., Höcke, E. (2013). *Future Layout of Visual Information in Trucks* (Bachelorarbeit). Chalmers University of Technology, Göteborg.
- Devesa, A., Indiga, T. (2011). Verbrauchsreduktion an Nutzfahrzeugkombinationen durch aerodynamische Maßnahmen. In *FAT-Schriftenreihe Nr. 237*. Berlin: Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V.
- Dodge, R. (1900). Visual perception during eye movement. *Psychological Review* 7, S. 454-465.
- Düntgen, C. (1998). Was ist Zeit? Wie religiös können Computer sein? - *Interdisziplinäres Seminar*. Dortmund: Universität Dortmund.

- ECE. (2016). Regelung Nr. 46 der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UN/ECE) – Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung von Einrichtungen für indirekte Sicht und von Kraftfahrzeugen hinsichtlich der Anbringung solcher Einrichtungen.
- Egger, T. (1990). *Berechnungen und experimentelle Untersuchungen zur indirekten Sicht aus Kraftfahrzeugen* (Dissertation). Technische Universität München, München.
- EN ISO 9241-11. (kein Datum). Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit - Leitsätze. Ergonomie der Mensch-System-Interaktion.
- Erber, T. (2013). *Versuchsaufbau zur Analyse von Blick- und Bewegungsstrategien im LKW* (Semesterarbeit). Technische Universität München.
- Erber, T. (2014). *Weiterentwicklung und Sicherheitsanalysen des Spiegeleratz am Nutzfahrzeug* (Diplomarbeit). Technische Universität München.
- Esser, M. (2016). Standardization and Vehicle Regulation Aspects of Camera Monitor Systems. In Terzis, A. (ed) *Handbook of Camera Monitor Systems - The Automotive Mirror-Replacement Technology based on ISO 16505* (S. 51-100). Berlin: Springer.
- Evers, C., Auerbach, K. (2005). *Verhaltensbezogene Ursachen schwerer Lkw-Unfälle*. Bundesanstalt für Straßenwesen, Mensch und Sicherheit Heft M174. Bergisch Gladbach: Wirtschaftsverlag NW.
- Faber, C., Heinemann, P. (2016). Optical Effects in Camera Monitor Systems. In Terzis, A. (ed) *Handbook of Camera Monitor Systems - The Automotive Mirror-Replacement Technology based on ISO 16505* (S. 203-234). Berlin: Springer.
- Fagerström, K. F., Garlund, A. (2012). *Mirror replacement in trucks* (Masterarbeit). Chalmers University of Technology, Göteborg.
- FeV (2014). Fahrerlaubnis-Verordnung (FeV) zur Zulassung von Personen zum Straßenverkehr - Anlage 6. Abgerufen am 12.11.2014 von [http://www.verkehrsportal.de/fev/anl\\_06.php](http://www.verkehrsportal.de/fev/anl_06.php)
- Flannagan, M. J., Mefford, M. L. (2005). *Distance perception with a camera-based rear vision system in actual driving*. Ann Arbor: UMTRI.
- Flannagan, M. J., Sivak, M., Schumann, J., Kojima, S., Traube, E. C. (1997). *Distance perception in driver-side and passenger-side convex rearview mirrors: Objects in mirror are more complicated than they appear*. Ann Arbor: UMTRI.
- Franke, T., Fröhlich, F. (2013). *Analyse von Blickstrategien im LKW* (Semesterarbeit). Technische Universität München.
- Freiding, A. (2010). *Untersuchungen zur spektralen Empfindlichkeit des menschlichen Auges im mesopischen Bereich*. München: Herbert Utz Verlag.
- GDV. (1998). *Leitfaden zur Bestimmung des Unfalltyps*. Köln: Institut für Straßenverkehr Verband der Schadenversicherer.
- Gebhart, M. (2014). *Einsatz von Kamera-Monitor-Systemen im Sattelkraftfahrzeug zur Vermeidung von Beeinträchtigungen der rückwärtigen Sicht durch den Auflieger* (Diplomarbeit). Technische Universität München.

- Geiser, G. (1985). Mensch-Maschine-Kommunikation im Kraftfahrzeug. *Automobiltechnische Zeitschrift* 87, S. 77-84.
- Gibson, J. (1950). *the Perception of the Visual World*. Cambridge, Massachusetts: the Riverside Press.
- Glaeser, G., Paulus, H. F. (2014). *Die Evolution des Auges - Ein Fotoshooting*. Heidelberg: Springer Spektrum.
- Glander, K.-H. (2016). How much automation do we really need? 2. *ATZ Fahrerassistenzsysteme Konferenz 2016*. Frankfurt: ATZ.
- Goersch, H. (1983). Das Binokularsehen. *Der Augenspiegel*, S. 10-19.
- Goldstein, B. E. (2008). *Wahrnehmungspsychologie - Der Grundkurs*. Heidelberg: Springer.
- Graf, D. (2014). *Untersuchung zu Blick- und Bewegungsstrategien beim Rangieren mit einem LKW* (Semesterarbeit). Technische Universität München.
- Gralla, V. (2007). *Peripheres Sehen im Sport – Möglichkeiten und Grenzen dargestellt am Beispiel der synchronoptischen Wahrnehmung* (Dissertation). Ruhr-Universität Bochum.
- Grehn, F. (2009). *Augenheilkunde*. Berlin Heidelberg: Springer.
- Gründl, M. (2005). *Fehler und Fehlverhalten als Ursache von Verkehrsunfällen und Konsequenzen für das Unfallvermeidungspotential und die Gestaltung von Fahrerassistenzsystemen* (Dissertation). Universität Regensburg, Regensburg.
- Guggemos, M. (2014). *Vergleich verschiedener Konzepte für die indirekte Sicht im LKW* (Diplomarbeit). Technische Universität München.
- Haferkorn, H. (1981). *Optik Physikalisch-technische Grundlagen und Anwendungen*. Frankfurt Main: Harri Deutsch.
- Hagendorf, H., Krummenacher, J., Müller, H.-J., Schubert, T. (2011). *Wahrnehmung und Aufmerksamkeit*. Heidelberg: Springer-Verlag.
- Heydecker, W. (1990). *Augenheilkunde*. Berlin: Springer.
- Hudelmaier, J. (2003). *Sichtanalyse im Pkw - unter Berücksichtigung von Bewegung und individuellen Körpercharakteristika* (Dissertation). Technische Universität München, München.
- Hunziker, H.-W. (2006). *Im Auge des Lesers: foveale und periphere Wahrnehmung – vom Buchstabieren zur Lesefreude*. Zürich: Transmedia Stäubli Verlag.
- ISO. (2015). ISO 16505:2015 - Road vehicles — Ergonomic and performance aspects of Camera-Monitor Systems — Requirements and test procedures. (ISO, Hrsg.)
- Jennes, J. W., Llaneras, E., Huey, R. W., Rau, P. S. (2006). *Truck Drivers' Ability to Locate Targets Briefly Seen in Mirrors*. Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting (S. 2457-2462). SAGE.
- Jerg, S., Zaindl, A. (2014). *Fahrzeug, insbesondere Nutzfahrzeug, mit einem Kamera-Monitor-System als Spiegelerersatzsystem sowie Verfahren zur Betätigung eines derartigen Kamera-Monitor-Systems*. Deutsches Patentamt. DE102014006961A1. Anmeldedatum: 13.05.2014.

- Kahnemann, D. (1973). *Attention and Effort*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall.
- Kaiser, B. (2016). Functional Safety of Camera Monitor Systems. In Terzis, A. (ed) *Handbook of Camera Monitor Systems - The Automotive Mirror-Replacement Technology based on ISO 16505* (S. 511-534). Berlin: Springer.
- Kelp, R. (2008). LKW-Kunden achten vor allem auf die Betriebskosten. *Truck Costumer*, S. 4-6.
- Kramer, U. (2008). *Kraftfahrzeugführung - Modelle, Simulation, Regelung*. München: Carl Hanser Verlag.
- Krapp, S. (2013). *Kamera-Monitor-Systeme in Kraftfahrzeugen - Einfluss von Latenz auf das Fahrverhalten unter Verwendung digitaler Spiegel und Frontansichten* (Masterarbeit). Technische Universität München.
- Kremser, F., Rissel, A., Zaindl, A. (2014). *Verfahren zur Bilddarstellung eines indirekten Sichtfeldes im Fahrzeugumfeld eines Fahrzeugs, insbesondere eines Nutzfahrzeugs, mit einem Kamera-Monitor-System*. Deutsches Patentamt. DE102014006153A1. Anmeldedatum: 25.04.2014.
- Kühlwetter, S. (2014). *Planung und Durchführung einer Probandenstudie zur Evaluierung von Spiegelerersatzsystemen am Nutzfahrzeug* (Semesterarbeit). Technische Universität München.
- Leydhecker, W. (1990). *Augenheilkunde*. Berlin: Springer.
- Leznik, M., Terzis, A. (2016). Optimization of Demanding Scenarios in CMS and Image Quality Criteria. In Terzis, A. (ed) *Handbook of Camera Monitor Systems - The Automotive Mirror-Replacement Technology based on ISO 16505* (S. 453-484). Berlin: Springer.
- Lingg, W. (2014). *Der Sehsinn*. Abgerufen am 07.08.2014 von <http://www.scheffel.org/bw.schule.de/faecher/science/biologie/sinninhalt5.htm>
- Lorenz, S. (2011). *Assistenzsystem zur Optimierung des Sitzkomforts im Fahrzeug* (Dissertation). Technische Universität München.
- Luczak, H. (1975). *Untersuchungen informatorischer Belastung und Beanspruchung des Menschen* (Dissertation). In *Fortschrittsberichte der VDI-Zeitschriften, Reihe 10, Nr.2*. Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Mather, G. (2009). *Foundations of Sensation and Perception*. East Sussex: Psychology Press Ltd.
- McKnight, A., Adams, B. (1970). *Driver Education Task Analysis Volume I: Task Descriptions*. Washington D.C: Department of Transportation, National Highway Safety Bureau.
- Michaelis, M. (2008). *Gesundheitsschutz und Gesundheitsförderung von Berufskraftfahrern*. Dortmund/Berlin/Dresden: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.
- Michel, B. (2014). *Ergonomische Analyse der Fahrerumgebung im Fernverkehrs-Lkw* (Dissertation). München: Verlag Dr. Hut.
- Michon, J. A. (1985). A Critical View of Driver Behaviour Models: What do we know, what should we do? In L. Evans, S. R. C., *Human behavior and traffic safety* (S. 485-520). New York: Plenum Press.
- Nemetz, U., Harrer, S. (1987). Die Beeinflussung der visuellen Wahrnehmung durch Seh-Training. *Klinisches Monatsblatt der Augenheilkunde* 190, S. 83-91.

- Nielsen, J., Landauer, T. (1993). A mathematical model of the finding of usability problems. *ACM CHI 93 Human Factors in Computing Systems Conference* (S. 206-213). Amsterdam: ACM Press.
- Niewöhner, W., Berg, F. A. (2004). *Gefährdung von Fußgängern und Radfahrern an Kreuzungen durch rechts abbiegende LKW* - (Bde. Fahrzeugtechnik, Heft F 54). (B. d. Straßenwesen, Hrsg.) Bergisch Gladbach: Wirtschaftsverlag NW.
- Nirschl, G., Kopf, M. (1997). *Untersuchung des Zusammenwirkens zwischen dem Fahrer und einem ACC-System in Grenzsituationen*. Berlin: VDI Bericht 1317.
- Oba, E. (2016). Resolution and Sharpness Requirements for CMS. In Terzis, A. (ed.) *Handbook of Camera Monitor Systems - The Automotive Mirror-Replacement Technology based on ISO 16505* (S. 101-132). Berlin: Springer.
- Oehler, R. (1985). *Hirn im Drei-Sekunden-Takt*. Abgerufen am 25.09.2016 von <http://www.zeit.de/1985/33/hirn-im-drei-sekunden-takt>
- Palacios, A. E. (2012). *Correlations between truckers' field of view and critical situations* (Diplomarbeit). Technische Universität München.
- Platzer, G. (1995). *The Geometry of Automotive Rearview Mirrors - Why Blind Zones Exist and Strategies to Overcome them*. SAE Technical Paper.
- Pöppel. (2000). *Grenzen des Bewusstseins - wie kommen wir zur Zeit und wie entsteht Wirklichkeit?* Frankfurt a. M.: Insel Taschenbuch.
- Rasmussen, J. (1983). Skills, Rules and Knowledges: Signals, Sign and Symbols and Other Distinctions in Human Performance. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*. New York: IEEE.
- Rassl, R. (2004). *Visuelle Informationsaufnahme des motorisierten Verkehrsteilnehmers - Visuelle Informationsaufnahme des motorisierten Verkehrsteilnehmers* (Dissertation). Technische Universität München.
- Remlinger, W. M. (2013). *Analyse von Sichteinschränkungen im Fahrzeug* (Dissertation). Technische Universität München.
- Rissel, A. (2013). *Konzeptuntersuchung und -aufbau eines Kamera Monitor Systems für den Ersatz der Seitenspiegel bei einem Lastkraftwagen* (Masterarbeit). Technische Universität München.
- Rockwell, T. H. (1972). Skills, judgement and information acquisition in driving. In *Human factors in highway traffic safety research* (S. 133-164). New York: Forbes.
- Ross, J., Morrone, M. C., Goldberg, M. E., Burr, D. C. (2001). Changes in visual perception at the time of saccades. *Trends in neurosciences*, 24(2), S. 113-121.
- Rötting, M. (2001). *Parametersystematik der Augen- und Blickbewegungen für arbeitswissenschaftliche Untersuchungen*. Aachen: Shaker Verlag.
- Sanders, A. (1963). *The Selective Process in the Functional Visual Field*. Soesterberg: Institute for Perception RVO-TNO.
- Schmidl, J. (2016). *Konzeptionierung eines Kamera-Monitor-Systems als Frontspiegeleratz am Nutzfahrzeug* (Bachelorarbeit). Hochschule München.

- Schmidt, E. A., Hoffmann, H., Krautscheid, R., Bierbach, M., Frey, A., Gail, J., Lotz-Keens, C. (2016). Camera-Monitor Systems as a Replacement for Exterior Mirrors in Cars and Trucks. In Terzis, A. (ed.) *Handbook of Camera Monitor Systems - The Automotive Mirror-Replacement Technology based on ISO 16505* (S. 369-435). Berlin: Springer.
- Schulz, R. (2012). *Blickverhalten und Orientierung von Kraftfahrern auf Landstraßen* (Dissertation). Technischen Universität Dresden.
- Schweigert, M. (1998). *Generierung eines Maßes zur Bestimmung der visuellen Aufmerksamkeit von Kraftfahrzeugführern* (Diplomarbeit). Technische Universität München.
- Schweigert, M. (2003). *Fahrerblickverhalten und Nebenaufgaben* (Dissertation). Technische Universität München.
- Seifert, K., Rötting, M., Jung, R. (2001). Registrierung von Blickbewegungen im Kraftfahrzeug. In T. Jürgensohn, K.-P. (. Timpe, *Kraftfahrzeugführung* (S. 207-228). Berlin: Springer.
- Seiferth, S. (2014). *Erweiterung des Spiegelsatzsystems am LKW durch eine Kameranachführung anhand der Trailerposition* (Semesterarbeit). Technische Universität München.
- Seitz, M. (2013). *Informationsmanagement im Nutzfahrzeug* (Dissertation). Technische Universität München.
- van Sint Jan, S. (2007). *Skeletal Landmark Definitions*. Elsevier Health Sciences
- Spiegel. (2004). *Neue Lkw-Spiegel: Der tote Winkel ist tot*. Abgerufen am 09. 09 2015 von <http://www.spiegel.de/auto/werkstatt/neue-lkw-spiegel-der-tote-winkel-ist-tot-a-323955.html>
- Starflinger, N. (2012). *Untersuchung der Spiegelnutzung im LKW* (Diplomarbeit). Technische Universität München.
- Statistika. (2016). *Höhe des Frauenanteils bei den Kraftfahrzeugführern in Deutschland*. Abgerufen am 28.05.2016 von <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/202938/umfrage/hoehe-des-frauenanteils-bei-den-kraftfahrzeugfuehrern-in-deutschland>
- Sternberg, S. (1969). Memory-Scanning: Mental Process revealed be Reaction-Time Experiments. *American Scientist* 57, S. 421-457.
- Swets, J. (1964). *Signal detection and recognition by human observers*. New York: Wiley.
- Terzis, A. (2016). *Handbook of Camera Monitor Systems - The Automotive Mirror-Replacement Technology based on ISO 16505*. Switzerland: Springer International Publishing.
- Underwood, G., Chapman, P., Brocklehurst, N., Underwood, J., Crundall, D. (2003). Visual Attention While Driving: Sequences of Eye Fixations Made by Experienced and Novice Drivers. *Ergonomics* 46 (6), S. 629-646.
- Volkswagen AG. (2014). *XL1 | das 1-Liter-Auto von Volkswagen*. Abgerufen am 22.08.2014 on [www.volkswagen-xl1.com](http://www.volkswagen-xl1.com).
- Vollrath, M., Krems, J. (2011). *Verkehrspsychologie*. Stuttgart: Kohlhammer GmbH.
- Weinberger, M., Winner, H., Bubb, H. (2001). Adaptive cruise control field operational test - the learning phase. *JSAE review*, 22 (4), (S. 487-494).

- Werner, H. (1935). Studies on Contour: I. Qualitative Analyses. *The American Journal of Psychology* (Vol. 47), S. 40-64.
- Wickens, C. D., Hollands, J. G. (2000). *Engineering Psychology and Human Performance*. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice-Hall.
- Winner, H., Barthenheier, T., Fecher N., Luh S. (2003). *Fahrversuche mit Probanden zur Funktionsbewertung von aktuellen zukünftigen Fahrerassistenzsystemen*. Abgerufen am 23.07.2016 von [www.fzd.tu-darmstadt.de/media/fachgebiet\\_fzd/publikationen\\_3/2003/2003\\_winnerbarthenheierfecherluh\\_menschundfahrzeug.pdf](http://www.fzd.tu-darmstadt.de/media/fachgebiet_fzd/publikationen_3/2003/2003_winnerbarthenheierfecherluh_menschundfahrzeug.pdf)
- Wittling, W. (1976). *Einführung in die Psychologie der Wahrnehmung*. Hamburg: Hofmann und Campe.
- Wood, J., Higgins, K. (1999). How Well Does High Contrast Visual Acuity Predict Driving Performance? In Gale, A. *Vision in Vehicles* (S. 33-42). Amsterdam: North Holland.
- Woyna, L. (2013). *Fahrerzentrierter Kriterienkatalog zur Außensichtbeurteilung im PKW* (Dissertation). Technische Universität Darmstadt, Darmstadt.
- Yarbus, A. L. (1967). *Eye Movement and Vision*. New York: Plenum Press.
- Zaindl, A. (2009). *Simulation von Kreuzungskonflikten durch Sichtverdeckungen der A-Säule* (Diplomarbeit). Technische Universität München.
- Zaindl, A. (2015). Spiegelersatz am Nutzfahrzeug. (TUM Lehrstuhl für Ergonomie, Hrsg.) *Ergonomie Aktuell*, S. 30-33.
- Zaindl, A. (2016). Camera Monitor Systems Optimized on Human Cognition - Fundamentals of Optical Perception and Requirements for Mirror Replacements in Commercial Vehicles. In Terzis, A. (ed) *Handbook of Camera Monitor Systems - The Automotive Mirror-Replacement Technology based on ISO 16505* (S. 313-328). Berlin: Springer.
- Zaindl, A., Bengler, K., Zimmermann, A. (2013). Method to analyze the body movement for the mirror view and test method to verify the simulated results. *2nd Digital Human Modeling Symposium*. Ann Arbor.
- Zaindl, A., Graf, D., Zimmermann, A., & Bengler, K. (2014a). Analyse der Kopfbewegung bei der Spiegelnutzung im Nutzfahrzeug. In Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e. V. (Ed.): *Jahresdokumentation 2014, 60. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft. Gestaltung der Arbeitswelt der Zukunft* (pp. 387–389). Dortmund: GfA-Press.
- Zaindl, A., Zimmermann, A., Bengler, K. (2014b). Untersuchung der Spiegelnutzung im Nutzfahrzeug. *6. Grazer Nutzfahrzeuge Workshop*. Graz: Institut für Kraftfahrzeugtechnik, Technische Universität Graz.
- Zaindl, A., Zimmermann, A., Dörner, K. (2015). Kamera-Monitor-System als Spiegelersatz beim Nutzfahrzeug. *Automobiltechnische Zeitschrift*, S. 28-33.
- ZF Friedrichshafen AG. (2014). *ZF-Zukunftsstudie Fernfahrer 2.0 - Der Mensch im Transport- und Logistikmarkt*. Friedrichshafen: ZF Friedrichshafen AG.

## Anhang A – Veröffentlichungen des Autors

- Bengler, K., Götze, M., Pfannmüller, L., Zaindl, A. (2015). To See or not to See- Innovative Display Technologies as Enablers for Ergonomic Cockpit Concepts. *Proceedings of the electronic displays Conference*, Nürnberg.
- Zaindl, A., Bengler, K., Zimmermann, A. (2013). Method to analyze the body movement for the mirror view and test method to verify the simulated results. *Proceedings of the 2nd International Digital Human Modeling Symposium DHM 2013*, Ann Arbor.
- Zaindl, A., Graf, D., Zimmermann, A., Bengler, K. (2014). Analyse der Kopfbewegung bei der Spiegelnutzung im Nutzfahrzeug. In Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e. V. (Ed.): *Jahresdokumentation 2014*, 60. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft. *Gestaltung der Arbeitswelt der Zukunft* (pp. 387–389). Dortmund: GfA-Press.
- Zaindl, A., Karber, S., Bengler, K. (2014). The User Behavior Concerning Pedals in the Vehicle and their Impact on Posture Calculations in Digital Human Models. In *Proceedings of the 3rd International Digital Human Modelling Symposium DHM 2014*. Tokyo.
- Zaindl, A., Zimmermann, A., Bengler, K. (2014). Untersuchung der Spiegelnutzung im Nutzfahrzeug. 6. *Grazer Nutzfahrzeuge Workshop*. Graz: Institut für Kraftfahrzeugtechnik, Technische Universität Graz.
- Zaindl, A., Zimmermann, A., Dörner, K., Kohrs, C. (2015). Camera-Monitor System as Mirror Replacement in Commercial Vehicles. *ATZ worldwide*, 05/2015, S. 12-17.
- Zaindl, A., Zimmermann, A., Dörner, K., Kohrs, C. (2015). Kamera-Monitor-System als Spiegelersatz beim Nutzfahrzeug. *ATZ-Automobiltechnische Zeitschrift*, Volume 117(5), S. 28-33.
- Zaindl, A., Zimmermann, A. (2013). Mirror replacement in trucks. International Quality & Productivity Center (IQPC) 2013. *4th International Conference Automotive Cockpit HMI-Focus Day Truck HMI*, Bonn.
- Zaindl, A. (2016). Camera Monitor Systems Optimized on Human Cognition - Fundamentals of Optical Perception and Requirements for Mirror Replacements in Commercial Vehicles. In Terzis, A. (ed) *Handbook of Camera Monitor Systems - The Automotive Mirror-Replacement Technology based on ISO 16505* (S. 313-328). Berlin: Springer.
- Zaindl, A. (2009). *Simulation von Kreuzungskonflikten durch Sichtverdeckungen der A-Säule* (Diplomarbeit). Technische Universität München.
- Zaindl, A. (2016). Optimized on human cognition – requirements and possibilities of digital exterior mirrors on commercial vehicles. 2. *ATZ-Tagung Fahrerassistenz*, Frankfurt am Main.
- Zaindl, A. (2015). Replacement of Mirrors in Trucks. (TUM) *Mechanical Engineering Annual Report 2015*, S81
- Zaindl, A. (2015). Spiegelersatz am Nutzfahrzeug. (TUM Lehrstuhl für Ergonomie, Hrsg.) *Ergonomie Aktuell*, S. 30-33.

Zaindl, A. (2016). Spiegeleratz durch Kamera-Monitor-Systeme – Sicherheitsgewinn durch fahrer-optimierte Darstellung. *Branchenkonferenz Güterkraftverkehr - Symposium Abbiegeunfälle*. Hamburg

## **Veröffentlichte Schutzrechtanmeldungen:**

Bundschuh, L., Ruch, F., Zaindl, A., Zimmermann, A. (2015). Spiegeleratzsystem als Kamera-Monitor-System (KMS) eines Kraftfahrzeugs, insbesondere eines Nutzfahrzeugs DE102015011536A1, EP000003138736A1, Deutsches und Europäisches Patentamt.

Jerg, S., Zaindl, A. (2014). Fahrzeug, insbesondere Nutzfahrzeug, mit einem Kamera-Monitor-System als Spiegeleratzsystem sowie Verfahren zur Betätigung eines derartigen Kamera-Monitor-Systems DE102014006961A1, EP000002955065A1, Deutsches und Europäisches Patentamt.

Kremser, F., Rissel, A., Zaindl, A. (2014). Verfahren zur Bilddarstellung eines indirekten Sichtfeldes im Fahrzeugumfeld eines Fahrzeugs, insbesondere eines Nutzfahrzeugs, mit einem Kamera-Monitor-System DE102014006153A1, Deutsches Patentamt.

Rissel, A., Zaindl, A. (2014). Verfahren zur Darstellung unterschiedlicher indirekter Sichtfelder eines Fahrzeugumfeldes DE102014006150A1, Deutsches Patentamt.

Zaindl, A. (2015). Method and device to support driver of vehicle combination, in particular commercial vehicle combination CN000105539286A, Chinesisches Patentamt.

Zaindl, A. (2014). Verfahren und Vorrichtung zur Unterstützung eines Fahrers eines Fahrzeug-Gespans, insbesondere eines Nutzfahrzeug-Gespans DE102014015753A1, EP000003012154A1, Deutsches und Europäisches Patentamt.

## Anhang B – Vom Autor betreute studentische Arbeiten

### Zum Dissertationsprojekt:

- Badbanchi, S. (2014). *Probandenstudie zur Bewertung eines Spiegeleratzsystems im LKW mittels Head- und Eyetracking* (Diplomarbeit). Technische Universität München.
- Bundschuh, L. (2014). *Erweiterter Spiegeleratz: Konzeptentwicklung für den Einsatz von Augmented Reality* (Masterarbeit). Technische Universität München.
- Erber, T. (2013). *Versuchsaufbau zur Analyse von Blick- und Bewegungsstrategien im LKW* (Semesterarbeit). Technische Universität München.
- Erber, T. (2014). *Weiterentwicklung und Sicherheitsanalysen des Spiegeleratzes am Nutzfahrzeug* (Diplomarbeit). Technische Universität München.
- Franke, T., Fröhlich, F. (2013). *Analyse von Blickstrategien im LKW* (Semesterarbeit). Technische Universität München.
- Gebhart, M. (2014). *Einsatz von Kamera-Monitor-Systemen im Sattelkraftfahrzeug zur Vermeidung von Beeinträchtigungen der rückwärtigen Sicht durch den Auflieger* (Diplomarbeit). Technische Universität München.
- Graf, D. (2014). *Untersuchung zur Blick- und Bewegungsstrategien beim Rangieren mit einem Lkw* (Semesterarbeit). Technische Universität München.
- Guggemos, M. (2014). *Vergleich verschiedener Konzepte für die indirekte Sicht im LKW* (Diplomarbeit). Technische Universität München.
- Hartmann, F. (2013). *Versuchskonzeption zur Verbesserung der Lesbarkeit eines Displays für Alterssichtige mittels einer Fresnel-Linse* (Semesterarbeit). Technische Universität München.
- Kaiser, N., Sirotti, S. (2014). *Konstruktive Umsetzung eines Spiegeleratzsystems am Lastkraftwagen mit Hilfe von RAMSIS und CATIA* (Semesterarbeit). Technische Universität München.
- Krapp, S. (2013). *Kamera-Monitor-Systeme in Kraftfahrzeugen. Einfluss von Latenz auf das Fahrverhalten unter Verwendung digitaler Spiegel und Frontansichten* (Masterarbeit). Technische Universität München.
- Kühlwetter, S. (2014). *Planung und Durchführung einer Probandenstudie zur Evaluierung von Spiegeleratzsystemen am Nutzfahrzeug* (Bachelorarbeit). Technische Universität München.
- Lechner, P. (2012). *Ersatz der Gruppe II und IV Außenspiegel an Lastkraftwagen durch Kamera-Monitor-Systeme* (Bachelorarbeit). Technische Universität München.
- Rissel, A. (2013). *Konzeptuntersuchung und -aufbau eines Kamera Monitor Systems für den Ersatz der Seitenspiegel bei einem Lastkraftwagen* (Masterarbeit). Technische Universität München.
- Ruch, F. (2014). *Umsetzung eines Anzeigeconzepts zur Darstellung der rückwärtigen Sicht im Lastkraftwagen mit automatisiertem Ansichtswechsel* (Bachelorarbeit). Technische Universität München.

- Schmidl, J. (2016). *Konzeptionierung eines Kamera-Monitor-Systems als Frontspiegeleratz am Nutzfahrzeug* (Bachelorarbeit). Hochschule München.
- Seiferth, S. (2014). *Erweiterung des Spiegeleratzsystems am Lkw durch eine Kameranachführung anhand der Trailerposition* (Semesterarbeit). Technische Universität München.
- Starflinger, N. (2012). *Untersuchung der Spiegelnutzung im LKW* (Diplomarbeit). Technische Universität München.
- Topsever, H. F. (2013). *Integration eines Kamera-Monitor-Systems im Lkw für den Spiegeleratz* (Bachelorarbeit). Technische Universität München.
- Wollenweber, A. (2012). *Entwicklung eines Kamera-Monitor-Systems für die indirekte Sicht im LKW* (Diplomarbeit). Technische Universität München.
- Wortmann, A. (2013). *Kameraführung mittels head tracking für das Spiegeleratzsystem* (Semesterarbeit). Technische Universität München.

## **Weitere:**

- Karber, S. (2012). *Untersuchung der Pedalnutzung im PKW* (Semesterarbeit). Technische Universität München.
- Karg, C. (2011). *Konstruktion eines pedallosten Fahrkonzeptes* (Semesterarbeit). Technische Universität München.
- Koppmann, F. (2012). *Entwicklung und Evaluierung eines Gabelstaplerkonzeptes für Fahrten in Vorwärts- und Rückwärtsrichtung* (Semesterarbeit). Technische Universität München.
- Wortmann, A. (2013). *Konzeptionierung und Umsetzung eines Prüfstands zur nutzerorientierten Auslegung eines Bedienelements im Nutzfahrzeug* (Diplomarbeit). Technische Universität München.

## Anhang C – Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Volkswagen XL1 mit Spiegelerersatzsystem (Volkswagen AG, 2014).....	1
Abbildung 2-1: Direkte Sicht am Nutzfahrzeug nach ISO (2015).....	7
Abbildung 2-2: Vorgeschriebene Sichtfeldklassen am Nutzfahrzeug (Zaindl, 2016) .....	10
Abbildung 2-3: Vergleich von Pkw-Spiegel ohne und mit asphärischem Bereich.....	12
Abbildung 2-4: Vergleich der Bildbreiten von Plan-und Konvexspiegel ( $d = 20$ m) (Egger, 1990)	13
Abbildung 2-5: Vergrößerungsfaktor konvexer Spiegel über den Objektabstand .....	14
Abbildung 2-6: Links: Variablen zur Berechnung des Vergrößerungsfaktors (ISO, 2015). Rechts: Blickwinkel Auge(Kamera) – Spiegel – Objekt.....	15
Abbildung 2-7: Verzerrung in konvexen Spiegeln .....	16
Abbildung 2-8: Verdeckung direkter Sicht durch Spiegel am Nutzfahrzeug auf der Beifahrerseite (Visualisierung durch Fotomontage).....	18
Abbildung 2-9: Kombinierte Darstellung der Sichtfeldklassen I und III in einem Bild aus einem Simulationsspiel (Foto: Dennis Moosburger) und im BMW i8 (Foto: autobild.de) .....	19
Abbildung 2-10: Perspektiven des Hauptsichtbereiches unterschiedlicher Kamerahöhen $z$ nach Fagerström und Garlund (2012) .....	21
Abbildung 3-1: Schematischer Aufbau des Auges (Böhm, Lux, 2014).....	29
Abbildung 3-2: Akkommodationsfähigkeit über Lebensalter (Baumeister, Kohnen, 2008, S. 599)	31
Abbildung 3-3: Links: Schematischer Aufbau des Auges (Hunziker, 2006). Rechts: Sehzellendichte des Auges über den Blickwinkel (Lingg, 2014).....	32
Abbildung 3-4: Links: Überlappende rezeptive Felder im Gesichtsfeld (schematisiert dargestellt) (Nemetz, Harrer, 1987 zit. nach Gralla, 2007). Rechts: Sehzellendichte des Auges (qualitativ, blau – Zapfen, rot – Stäbchen) über den Blickwinkel (Lingg, 2014).....	33
Abbildung 3-5: Ausdehnungsangaben für den zentralen Netzhautbereich (Gralla, 2007, mod. nach Goersch, 1983).....	35
Abbildung 3-6: Optischer Fluss – Expansion aus der Perspektive eines Lkw-Fahrers bei der Fahrt auf einer Landstraße (Zaindl, 2016, mod. nach Gibson, 1950, S. 121) .....	39

Abbildung 3-7: Zone optischer Ruhe (Remlinger, 2013, S. 105).....	40
Abbildung 3-8: Modell des menschlichen Fahrverhaltens nach Glander (2016).....	43
Abbildung 3-9: Wahrnehmungs- und Kognitionsprozesse (Düntgen 1998).....	44
Abbildung 3-10: Periphere Sicht aus einem Lkw .....	49
Abbildung 3-11: Foveale Ergänzung der peripheren Sicht durch fünf Fixationen .....	50
Abbildung 3-12: Foveale Ausrichtung auf den beifahrerseitigen Hauptspiegel.....	51
Abbildung 3-13: Fovealer Blick in den Spiegel – erst beim direkten Blick in den Weitwinkelspiegel ist der Radfahrer erkennbar. Beim ersten Blick in den Hauptspiegel bleibt er unentdeckt (siehe Abbildung 3-12).....	52
Abbildung 3-14: Optischer Fluss im Spiegelsystem .....	53
Abbildung 3-15: Blickziele des Fahrers bei einer Kreisverkehrsdurchfahrt (Bothe, 2014) .....	55
Abbildung 4-1: Subjektive Nutzung der einzelnen Spiegel bei Geradeausfahrt/Folgen des Straßenverlaufes in verschiedenen Straßenumgebungen (n = 57; Fehlerbalken entsprechen $\pm 1$ SD; HS: Haupt-, WW: Weitwinkel-, RS: Rampen-, F: Frontspiegel, L: Links, R: Rechts) .....	58
Abbildung 4-2: Subjektive Nutzung der einzelnen Spiegel beim Rechtsabbiegen bzw. Autobahnabfahrt auf der Autobahn in verschiedenen Straßenumgebungen (n = 57; Fehlerbalken entsprechen $\pm 1$ SD; HS: Haupt-, WW: Weitwinkel-, RS: Rampen-, F: Frontspiegel, L: Links, R: Rechts).....	60
Abbildung 4-3: Subjektive Nutzung der beifahrerseitigen Spiegel in Situationen mit Bewegungsrichtung nach rechts .....	61
Abbildung 4-4: Gemittelte Minimal- und Maximalwerte der Spiegelnutzung im Vergleich zur Geradeausfahrt (HS: Haupt-, WW: Weitwinkel-, RS: Rampen-, F: Frontspiegel, L: Links, R: Rechts) .....	62
Abbildung 4-5: Fahrversuch mit Blickerfassung (verwendetes System: Dikablis) .....	66
Abbildung 4-6: Prozentuale Nutzungsdauer der Spiegel bei Geradeausfahrt (Fehlerbalken entsprechen $\pm 1$ SD; HS: Haupt-, WW: Weitwinkel-, RS: Rampen-, F: Frontspiegel, L: Links, R: Rechts).....	68

Abbildung 4-7: Vergleich der prozentualen Spiegelnutzung bei Geradeausfahrt und beim Rechtsabbiegen (Fehlerbalken entsprechen $\pm 1$ SD; HS: Haupt-, WW: Weitwinkel-, RS: Rampen-, F: Frontspiegel, L: Links, R: Rechts) .....	70
Abbildung 4-8: Durch eine Kopfbewegung kann der Fahrer im Hauptspiegel das Trailerende erkennen. Links: Das Trailerende und der Rückwärtige Verkehr ist im Hauptspiegel nicht zu erkennen. Rechts: Verbesserung der Sichtsituation durch eine Kopfbewegung (der Effekt wurde während der Fahrt mithilfe der Spiegelverstellung simuliert. Kameraposition blieb fix) .....	72
Abbildung 4-9: Konstruktion einer Sichterweiterung im Spiegel. Links: Das Ende des Trailers ist für den Fahrer nicht einsehbar. Rechts: durch eine Beugung nach vorne (grün) kann er dieses dennoch einsehen (Zaindl et al., 2013) .....	73
Abbildung 4-10: Simulation einer zunehmenden Sichterweiterung im Spiegel durch eine Beugung nach vorne (Zaindl et al., 2013) .....	74
Abbildung 4-11: Versuchsaufbau zum Rückwärtsrangieren in eine 90°-Lücke (Graf, 2014) .....	75
Abbildung 4-12: Blick in Versuch – der Fahrer rangiert um 90° in eine Parklücke, die sich auf der Beifahrerseite befindet. Er blickt in den Hauptspiegel und beugt sich dabei weit nach vorne (Graf, 2014) .....	76
Abbildung 4-13: Visualisierung des vom Fahrer eingesehenen Bereiches – der Fahrer nimmt über den Hauptspiegel nur einen kleinen Teil seiner Umgebung wahr (qualitative Darstellung) .....	78
Abbildung 4-14: Kamerapositionen im Versuchsaufbau zur Messung der Kopfposition in der Kabine (Badbanchi, 2014) .....	79
Abbildung 4-15: Auswertung der Kopfpositionen aller Probanden im Realversuch (nach Badbanchi, 2014; n = 19, 460 733 ausgewertete Kopfpositionen, 256 min Gesamtfahrdauer, Ursprung entspricht dem Nullpunkt jedes einzelnen Probanden, Fehlerbalken entsprechen $\pm 1$ SD) .....	80
Abbildung 4-16: Kopffrotation aller Probanden über die Versuchsfahrt (nach Badbanchi, 2014; prozentual, Auflösung 1°) .....	81
Abbildung 5-1: Bereiche fovealer Motivation bei höheren Geschwindigkeiten .....	87
Abbildung 5-2: Bereich fovealer Motivation bei einer Kurvenfahrt – die kurveninnere Seite wird vermehrt betrachtet .....	88
Abbildung 5-3: Mögliche Bereiche fovealer Motivation mit indirekter Sicht .....	89

Abbildung 5-4: Bereiche peripherer Einsehbarkeit (bei Geradeausfahrt) .....	90
Abbildung 5-5: Bereiche fovealer Motivation in unterschiedlichen Situationen (qualitativ v. o. n. u.): Autobahn – Landstraße – Stadtverkehr .....	92
Abbildung 5-6: Sichtfeldklassen beim Rechtsabbiegen. Es entsteht ein großer Bereich, der nicht einsehbar ist (Palacios, 2012).....	93
Abbildung 5-7: Anzeige verdeckter Sichtfelder im Auflieger des Nutzfahrzeuges (Zaindl, 2014) 94	
Abbildung 5-8: Prototyp des Spiegeleratzsystems von außen und innen .....	96
Abbildung 5-9: Sichtfeld des beifahrerseitigen Spiegeleratzsystems (qualitativ) im Vergleich zu den Sichtfeldklassen nach ECE R46. Das fahrerseitige Sichtfeld entspricht dem gespiegelten beifahrerseitigen (Zaindl, 2016).....	97
Abbildung 5-10: Hauptaußen-, Weitwinkel- und Anfahrspiegel werden in kombinierter Ansicht dargestellt (Zaindl et al., 2015).....	98
Abbildung 5-11: Standard- und Rangieransicht im direkten Vergleich .....	100
Abbildung 5-12: Die Rangieransicht mit knickwinkelabhängiger Aktivierung in einer 90°-Kurve .....	101
Abbildung 5-13: Knickwinkel über Fahrgeschwindigkeit (Bothe, 2014) .....	103
Abbildung 5-14: Anzeige des Frontbereiches im Display des Infotainmentsystems. Bei dieser Art der Darstellung wird der komplette Anfahrbereich aus Front- und Anfahrspiegel angezeigt.....	104
Abbildung 5-15: Vergleich Frontspiegeleratz mit aktuellem Frontspiegel.....	105
Abbildung 6-1: Optischer Fluss im KMS (zum Vergleich mit dem Spiegelsystem siehe Abbildung 3-14).....	107
Abbildung 6-2: Simulation der seitlichen Überwachung durch den Fahrer mit RAMSIS in CATIA. Links: KMS. Rechts: Spiegelsystem (Zaindl et al., 2015) .....	108
Abbildung 6-3: Foveale Ausrichtung auf das beifahrerseitige KMS. Links: Im ersten Blick kann der Radfahrer durch die periphere Sicht bereits entdeckt werden. Rechts: durch den zweiten Blick wird der Radfahrer identifiziert .....	109
Abbildung 6-4: Direkter Vergleich zwischen Spiegelsystem und KMS: Es befindet sich ein Pkw im Anfahrspiegelbereich.....	110

Abbildung 6-5: direkter Vergleich zwischen Spiegelsystem und KMS in der Rangieransicht: Beim Rechtsabbiegen befindet sich ein Radfahrer direkt an der vorderen rechten Ecke des Lkw ..... 110

Abbildung 6-6: Theoretische Veränderung der subjektiven Überwachung der Sichtbereiche vom Spiegelsystem zum KMS beim Rechtsabbiegen in der Stadt ..... 112

# Anhang D – Ergebnisse statistischer Untersuchungen

Alle statistischen Tests wurden mit dem Programm JASP durchgeführt

## ANOVA – Fahrerbefragung: Spiegelnutzung bei Geradeausfahrt

Cases	Sum of Squares	df	Mean Square	F	p	$\eta^2$	$\eta^2_p$	$\omega^2$
Straßentyp	25.056	2	12.528	12.028	< .001	0.012	0.023	0.011
Spiegel	1039.740	6	173.290	166.369	< .001	0.482	0.489	0.478
Straßentyp * Spiegel	6.918	12	0.576	0.553	0.880	0.003	0.006	0.000
Residual	1087.433	1044	1.042					

Note. Type III Sum of Squares

### Assumption Checks

Test for Equality of Variances (Levene's)

F	df1	df2	p
8.152	20	1044	< .001

### Post Hoc Tests

Post Hoc Comparisons - Straßentyp

		Mean Difference	SE	t	p <sub>tukey</sub>
Autobahn	Landstraße	-0.175	0.077	-2.276	0.060
	Stadt	-0.374	0.076	-4.903	< .001
Landstraße	Stadt	-0.199	0.077	-2.575	0.027

Post Hoc Comparisons - Spiegel

		Mean Difference	SE	t	p <sub>tukey</sub>
F	HS L	-2.603	0.117	-22.294	< .001
	HS R	-2.487	0.117	-21.271	< .001
	RS L	0.017	0.123	0.140	1.000
	RS R	-0.624	0.119	-5.228	< .001
	WW L	-1.261	0.118	-10.693	< .001
	WW R	-1.320	0.117	-11.256	< .001
HS L	HS R	0.116	0.113	1.020	0.949
	RS L	2.620	0.120	21.858	< .001
	RS R	1.979	0.116	17.108	< .001
	WW L	1.342	0.114	11.734	< .001
	WW R	1.283	0.114	11.290	< .001
HS R	RS L	2.505	0.120	20.863	< .001
	RS R	1.864	0.116	16.083	< .001
	WW L	1.226	0.115	10.705	< .001
	WW R	1.167	0.114	10.256	< .001
RS L	RS R	-0.641	0.122	-5.238	< .001
	WW L	-1.279	0.121	-10.563	< .001
	WW R	-1.337	0.120	-11.109	< .001
RS R	WW L	-0.638	0.117	-5.455	< .001
	WW R	-0.696	0.116	-5.993	< .001
WW L	WW R	-0.059	0.115	-0.511	0.999

## ANOVA – Fahrerbefragung: Spiegelnutzung beim Rechtsabbiegen

Cases	Sum of Squares	df	Mean Square	F	p	$\eta^2_p$	$\omega^2$
Straßentyp	27.71	2	13.856	10.015	< .001	0.019	0.009
Spiegel	1258.10	6	209.683	151.556	< .001	0.471	0.461
Straßentyp * Spiegel	10.51	12	0.876	0.633	0.815	0.007	0.000
Residual	1415.36	1023	1.384				

Note. Type III Sum of Squares

### Assumption Checks

Test for Equality of Variances (Levene's)

F	df1	df2	p
13.67	20	1023	< .001

### Post Hoc Tests

Post Hoc Comparisons - Straßentyp

		Mean Difference	SE	t	p <sub>tukey</sub>
Autobahn	Landstraße	-0.232	0.090	-2.577	0.027
	Stadt	-0.398	0.089	-4.459	< .001
Landstraße	Stadt	-0.166	0.089	-1.861	0.151

Post Hoc Comparisons - Spiegel

		Mean Difference	SE	t	p <sub>tukey</sub>
F	HS L	-2.108	0.135	-15.592	< .001
	HS R	-2.982	0.136	-21.992	< .001
	RS L	0.304	0.144	2.105	0.350
	RS R	-0.803	0.139	-5.779	< .001
	WW L	-1.009	0.138	-7.327	< .001
	WW R	-2.063	0.135	-15.324	< .001
HS L	HS R	-0.875	0.132	-6.648	< .001
	RS L	2.412	0.141	17.158	< .001
	RS R	1.305	0.135	9.670	< .001
	WW L	1.099	0.134	8.216	< .001
HS R	WW R	0.045	0.131	0.347	1.000
	RS L	3.286	0.141	23.313	< .001
	RS R	2.180	0.135	16.099	< .001
	WW L	1.973	0.134	14.708	< .001
RS L	WW R	0.920	0.131	7.024	< .001
	RS R	-1.107	0.144	-7.678	< .001
	WW L	-1.313	0.143	-9.182	< .001
RS R	WW R	-2.367	0.140	-16.905	< .001
	WW L	-0.206	0.138	-1.501	0.744
	WW R	-1.260	0.134	-9.375	< .001
WW L	WW R	-1.053	0.133	-7.913	< .001

## ANOVA – Fahrerbefragung: (2x3x7) Fahrsituation; Straßentyp; Spiegel

Cases	Sum of Squares	df	Mean Square	F	p	$\eta^2_p$	$\omega^2$
Straßentyp	52.581	2	26.290	21.713	< .001	0.021	0.010
Situation	83.243	1	83.243	68.749	< .001	0.032	0.017
Spiegel	2206.250	6	367.708	303.682	< .001	0.469	0.444
Straßentyp * Situation	0.285	2	0.143	0.118	0.889	0.000	0.000
Straßentyp * Spiegel	11.815	12	0.985	0.813	0.637	0.005	0.000
Situation * Spiegel	94.167	6	15.695	12.962	< .001	0.036	0.018
Straßentyp * Situation * Spiegel	5.712	12	0.476	0.393	0.967	0.002	0.000
Residual	2502.789	2067	1.211				

Note. Type III Sum of Squares

### Assumption Checks

Test for Equality of Variances (Levene's)

F	df1	df2	p
11.44	41	2067	< .001

### Post Hoc Tests

Post Hoc Comparisons - Straßentyp

		Mean Difference	SE	t	p <sub>tukey</sub>
Autobahn	Landstraße	-0.203	0.059	3.444	0.002
	Stadt	-0.386	0.059	6.587	< .001
Landstraße	Stadt	-0.183	0.059	3.095	0.006

Post Hoc Comparisons - Situation

		Mean Difference	SE	t	p <sub>tukey</sub>
Geradeausfahrt	rechts Abbiegen	-0.399	0.048	8.291	< .001

Post Hoc Comparisons - Spiegel

		Mean Difference	SE	t	p <sub>tukey</sub>
F	HS L	-2.355	0.089	-26.400	< .001
	HS R	-2.735	0.089	-30.581	< .001
	RS L	0.161	0.095	1.695	0.619
	RS R	-0.713	0.091	-7.802	< .001
	WW L	-1.135	0.091	-12.541	< .001
HS L	WW R	-1.691	0.089	-18.956	< .001
	HS R	-0.379	0.087	-4.377	< .001
	RS L	2.516	0.092	27.292	< .001
	RS R	1.642	0.089	18.505	< .001
HS R	WW L	1.220	0.088	13.894	< .001
	WW R	0.664	0.086	7.679	< .001
	RS L	2.896	0.092	31.339	< .001
	RS R	2.022	0.089	22.727	< .001
WW L	WW L	1.600	0.088	18.171	< .001
	WW R	1.044	0.087	12.037	< .001

Post Hoc Comparisons - Spiegel

		Mean Difference	SE	t	p <sub>tukey</sub>
RS L	RS R	-0.874	0.094	-9.265	< .001
	WW L	-1.296	0.093	-13.867	< .001
	WW R	-1.852	0.092	-20.088	< .001
RS R	WW L	-0.422	0.090	-4.687	< .001
	WW R	-0.978	0.089	-11.022	< .001
WW L	WW R	-0.556	0.088	-6.332	< .001

## ANOVA – Realversuch: Prozentuale Spiegelnutzung bei Geradeausfahrt

Cases	Sum of Squares	df	Mean Square	F	p	$\eta^2_p$	$\omega^2$
Straßentyp	0.089	2	0.044	0.046	0.955	0.000	0.000
Spiegel	671.986	6	111.998	115.413	< .001	0.673	0.657
Straßentyp * Spiegel	14.113	12	1.176	1.212	0.273	0.041	0.002
Residual	326.056	336	0.970				

Note. Type III Sum of Squares

### Assumption Checks

Test for Equality of Variances (Levene's)

F	df1	df2	p
18.71	20	336	< .001

### Post Hoc Tests

Post Hoc Comparisons - Straßentyp

		Mean Difference	SE	t	p <sub>tukey</sub>
Autobahn	Landstraße	-0.037	0.128	-0.287	0.955
	Stadt	-0.029	0.128	-0.226	0.972
Landstraße	Stadt	0.008	0.128	0.062	0.998

Post Hoc Comparisons - Spiegel

		Mean Difference	SE	t	p <sub>tukey</sub>
F	HS L	-4.009	0.195	-20.550	< .001
	HS R	-0.973	0.195	-4.985	< .001
	RS L	-0.014	0.195	-0.073	1.000
	RS R	-0.051	0.195	-0.260	1.000
	WW L	-0.054	0.195	-0.279	1.000
	WW R	-0.094	0.195	-0.484	0.999
HS L	HS R	3.036	0.195	15.565	< .001
	RS L	3.995	0.195	20.478	< .001
	RS R	3.958	0.195	20.291	< .001
	WW L	3.955	0.195	20.272	< .001
HS R	WW R	3.914	0.195	20.066	< .001
	RS L	0.958	0.195	4.913	< .001
	RS R	0.922	0.195	4.726	< .001
	WW L	0.918	0.195	4.707	< .001
RS L	WW R	0.878	0.195	4.501	< .001
	RS R	-0.036	0.195	-0.187	1.000
	WW L	-0.040	0.195	-0.206	1.000
RS R	WW R	-0.080	0.195	-0.411	1.000
	RS L	-0.004	0.195	-0.019	1.000
	WW L	-0.044	0.195	-0.224	1.000
WW L	WW R	-0.040	0.195	-0.205	1.000

## ANOVA – Realversuch: Prozentuale Spiegelnutzung beim Rechtsabbiegen an der Ampel

Cases	Sum of Squares	df	Mean Square	F	p	$\eta^2_p$	$\omega^2$
Situation	63.37	1	63.366	17.156	< .001	0.071	0.035
Spiegel	676.24	6	112.707	30.515	< .001	0.450	0.382
Situation * Spiegel	143.74	6	23.957	6.486	< .001	0.148	0.071
Residual	827.35	224	3.694				

Note. Type III Sum of Squares

### Assumption Checks

Test for Equality of Variances (Levene's)

F	df1	df2	p
17.01	13	224	< .001

### Post Hoc Tests

Post Hoc Comparisons - Situation

		Mean Difference	SE	t	p <sub>tukey</sub>
Rechts Abbiegen Ampel	Stadt_gerade	1.032	0.249	4.142	< .001

Post Hoc Comparisons - Spiegel

		Mean Difference	SE	t	p <sub>tukey</sub>	
F	HS L	-3.987	0.466	-8.553	< .001	
	HS R	-3.722	0.466	-7.985	< .001	
	RS L	0.027	0.466	0.058	1.000	
	RS R	-0.027	0.466	-0.057	1.000	
	WW L	-0.048	0.466	-0.103	1.000	
	WW R	-0.854	0.466	-1.832	0.528	
HS L	HS R	0.265	0.466	0.568	0.998	
	RS L	4.014	0.466	8.611	< .001	
	RS R	3.960	0.466	8.496	< .001	
	WW L	3.939	0.466	8.450	< .001	
	WW R	3.133	0.466	6.721	< .001	
	HS R	RS L	3.749	0.466	8.043	< .001
RS R		3.695	0.466	7.928	< .001	
WW L		3.674	0.466	7.882	< .001	
WW R		2.868	0.466	6.153	< .001	
RS L		RS R	-0.054	0.466	-0.115	1.000
		WW L	-0.075	0.466	-0.161	1.000
	WW R	-0.881	0.466	-1.890	0.489	
	RS R	WW L	-0.021	0.466	-0.046	1.000
		WW R	-0.827	0.466	-1.775	0.567
		WW L	WW R	-0.806	0.466	-1.729

## Anhang E – Fragebogen zur subjektiven Spiegelnutzung

### Fragebogen zur Nutzung Ihrer Spiegel am LKW

Herzlich Willkommen,

Wir wollen Sie in den nächsten Seiten zu Ihren Sichtbedingungen in Ihrem LKW befragen.

Wir benötigen diese Antworten, um neue Spiegelkonzepte so zu gestalten, dass sie Ihren Arbeitsplatz im LKW sicherer und komfortabler machen.

Natürlich werden Ihre Angaben anonym verarbeitet, und auch Ihr Arbeitgeber wird keine Ihrer Angaben erhalten.

Bitte beantworten Sie die Fragen so wahrheitsgetreu wie möglich. Falls Sie sich bei einer Antwort nicht sicher sind, antworten Sie einfach trotzdem, es gibt keine falschen Antworten.

Wir danken Ihnen schon im Vornherein für Ihre Mitarbeit und Unterstützung.

Mit freundlichen Grüßen

Albert Zaindl, Antonio Palacios



vom Lehrstuhl für Ergonomie an der Technischen Universität  
München

## Angaben zur Person

Alter: \_\_\_\_\_ Beruf: \_\_\_\_\_

Geschlecht: (Männlich) (Weiblich)

Haben Sie Probleme mit der  
Wirbelsäule? (Was & Wo?)

\_\_\_\_\_

Haben Sie sonstige körperliche  
Einschränkungen in der  
Bewegungsfähigkeit?

\_\_\_\_\_

Haben Sie eine bekannte  
Sehschwäche?  
(wenn ja: welche?)

\_\_\_\_\_

Haben Sie eine Lesebrille?

\_\_\_\_\_

	Im Alltag	Im LKW
Tragen Sie eine Gleitsichtbrille?	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> Nein	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> Nein

\_\_\_\_\_

## Angaben zur Fahrerfahrung

Seit wann besitzen Sie Ihren Führerschein?

---

Seit wann sind sie als LKW-Fahrer unterwegs

---

Welche Führerscheinklassen besitzen Sie?

---

In welchem Segment sind Sie im Moment  
tätig? (Fernverkehr, Nahverkehr, Baustelle...)

---

Wie viele Stunden verbringen Sie etwa  
durchschnittlich pro Woche im LKW?\*

Ca.:

---

Wie viele km fahren Sie in etwa pro Jahr?

Ca.:

---

## Angaben zum LKW

Welche Art LKW fahren Sie am häufigsten? (Sattel, Kastenwagen,...)?

---

Welche Marke?

---

Welches Modell?

---

Welche Kabine?

---

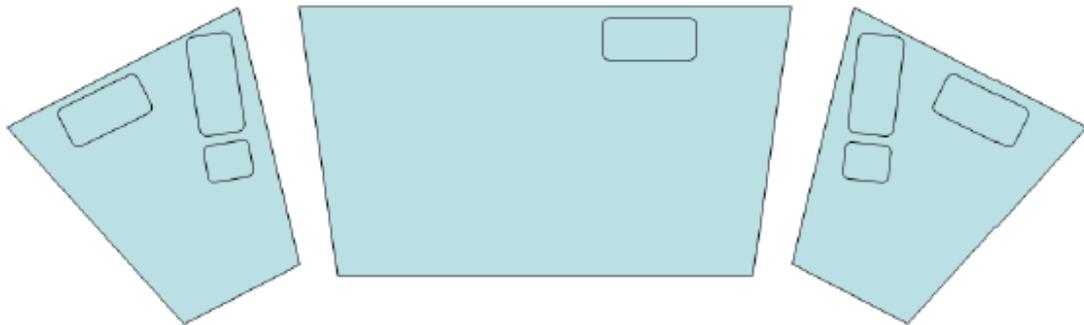
Welches Baujahr (ungefähr)?

---

Welche Spiegel sind verbaut?

(bitte die Spiegel einfach ankreuzen)

---



Sind sonstige Spiegel verbaut?

(bitte ebenso mit einzeichnen, und erklären, warum dieser Spiegel verbaut ist)

Hatten Sie schon mal eine kritische Situation mit dem LKW, bei dem Sie ein Objekt (Fahrzeug, Mensch, Tier,...) übersehen hatten? (Falls Nein, weiter mit nächster Seite). Falls Sie mehrere Situationen hatten, suchen Sie sich bitte 2 davon aus. Zum einen die, die am häufigsten passiert, und zum anderen die gefährlichste.

Ja       Nein

Situation 1 (häufigste Situation)

Wie häufig kommt diese Situation vor?

Extrem selten,  jährlich,  monatlich,  wöchentlich,  öfter

Was wollten Sie in dem Moment vor der Situation (also bevor Sie die Situation erkannten) gerade machen?

Bitte zeichnen Sie diese Situation ein (Bitte LKW & Trailer oder Anhänger mit ungefährem Einknickwinkel beim Geschehen einzeichnen. Ebenso das Objekt und andere an der Situation beteiligten Objekte auch einzeichnen. Gegebenenfalls bitte auch die Straße und sonstige wichtige Gegenstände mit einzeichnen):

Bitte kreuzen Sie an, was für diese Situation zutrifft:

Sie sahen nicht in den (für die Situation wichtigen) Spiegel

Sie sahen in den Spiegel, haben das Objekt aber nicht gesehen

das Objekt befand sich im Toten Winkel der Spiegel

Sie haben das Objekt nicht gesehen, weil es durch das Chassis (z.B. A-Säule) verdeckt wurde

sonstiges:

Situation 2: (gefährlichste Situation)

Wie häufig kommt diese Situation vor?

Extrem selten,  jährlich,  monatlich,  wöchentlich,  öfter

Was wollten Sie in dem Moment vor der Situation (also bevor Sie die Situation erkannten) gerade machen?

Bitte zeichnen Sie diese Situation ein (Bitte LKW & Trailer oder Anhänger mit ungefährem Einknickwinkel beim Geschehen einzeichnen. Ebenso das Objekt und andere an der Situation beteiligten Objekte auch einzeichnen. Gegebenenfalls bitte auch die Straße und sonstige wichtige Gegenstände mit einzeichnen):

Bitte kreuzen Sie an, was für diese Situation zutrifft:

- sie sahen nicht in den (für die Situation wichtigen) Spiegel
- Sie sahen in den Spiegel, haben das Objekt aber nicht gesehen
- das Objekt befand sich im Toten Winkel der Spiegel
- Sie haben das Objekt nicht gesehen, weil es durch das Chassis (z.B. A-Säule) verdeckt wurde
- sonstiges:

In welchen Situationen würden Sie sich mehr Unterstützung als durch die aktuelle Sicht der Spiegel wünschen?

Gibt es etwas, das Sie stört, wenn Sie in einen Spiegel sehen? Was könnte die Sicht verbessern?

Bitte bewerten Sie folgende Aussagen wahrheitsgetreu

Ja    Nein

trifft zu

trifft nicht zu

Beim Blick in die Spiegel benötige ich zum Teil große Kopfbewegungen

mein Blick springt oft vom linken Spiegel direkt zum rechten (oder umgekehrt)

Manche Spiegel nutze ich nie (welche: \_\_\_\_\_)

Vereiste Spiegel hindern mich am Losfahren

Um stark verdreckte Spiegel zu reinigen unterbreche ich meine Fahrt

In schwierigen Situationen vergesse ich in die Spiegel zu sehen

Ich verzichte Regelmäßig auf den Sicherungsposten beim Rangieren

Ich benötige meine Spiegel zum sicheren Aussteigen

Ich vergrößere meinen Sichtbereich im Spiegel durch gezielte Kopfbewegungen

Für welche andere Zwecke, die nichts mit dem Fahren zu tun haben, benutzen Sie Ihre Spiegel noch? (z.B. Frisieren, Rasieren,... )

---

Stellen Sie sich vor, sie könnten eine oder mehrere Kamera(s) und den (die) dazu gehörigen Monitor(e) irgendwo frei am LKW anbringen um Ihre Sicht zu verbessern (egal wo).

- welchen Bereich würden diese (ein-)Sehen? (in Worten, oder auch gezeichnet)

- Wo würden Sie den dazugehörigen Monitor (oder die dazugehörigen Monitore) in der Kabine platzieren?



Wie häufig nutzen Sie ihre Spiegel in Abhängigkeit zur Fahrsituation?

1  2  3  4  5 : gar nicht  
 1  2  3  4  5 : sehr häufig

Fahrsituation	Häufigkeit der Spiegelnutzung (von 1= gar nicht bis 5=sehr häufig)							
	Hauptaußenspiegel		Weitwinkelspiegel		Rampenspiegel		Frontspiegel (Frontkamera)	
	links	rechts	links	rechts	links	rechts		
Autobahn	Geradeausfahrt	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5
	Spurwechsel nach links	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5
	Spurwechsel nach rechts	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5
	Auffahrt	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5
	Abfahrt	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5
einspurige Landstraße	Geradeausfahrt	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5
	Abbiegen links	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5
	Abbiegen rechts	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5
	Anfahrt auf Kreuzung	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5
	überholen von Fahrzeugen	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5
geschlossene Ortschaft (Stadt)	Geradeausfahrt	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5
	Abbiegen links	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5
	Abbiegen rechts	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5
	Halten an Ampel	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5
	Losfahrt an Ampel	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5
	Stop auf der Straße	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5
Rangieren	Stop an Kreuzung/Einmündung	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5
	Rückwärts in Lücke	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5
	Geradeaus durch enge Straße	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5
	Rückstoßen	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5
	Rückwärts um Kurve	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5
Rampe	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5	

## Anhang F – Rechtsabbiegesituationen im Fahrversuch

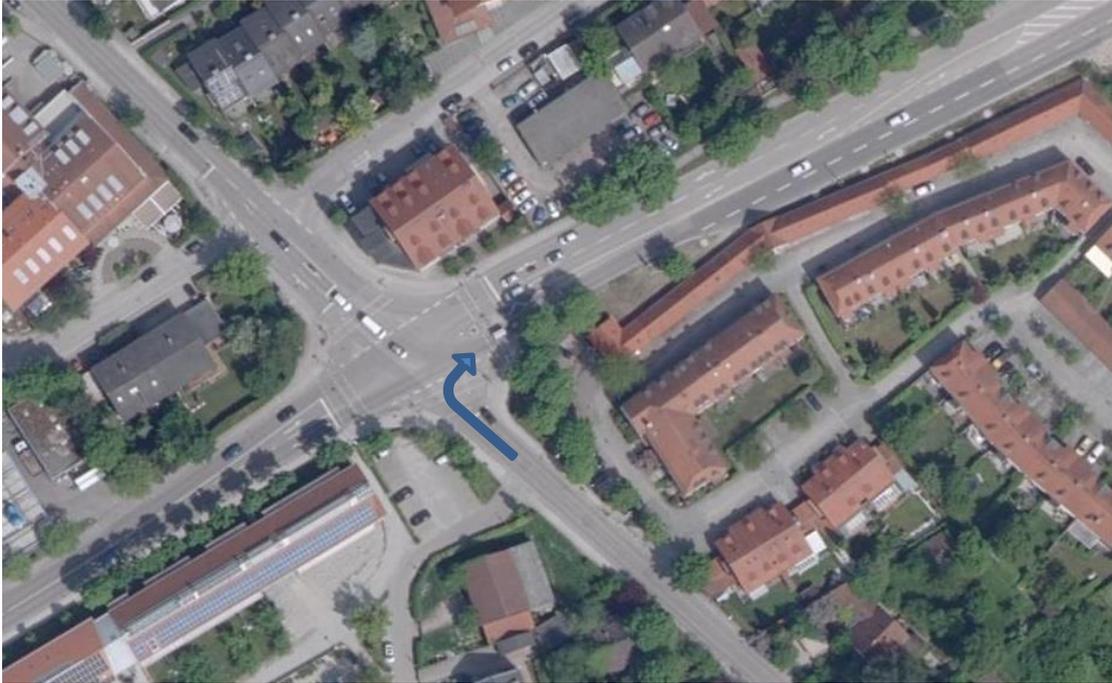


Abbildung Anhang 1: Rechtsabbiegesituation Nr. 1 (Bayernatlas: <http://v.bayern.de/CGfRY>)

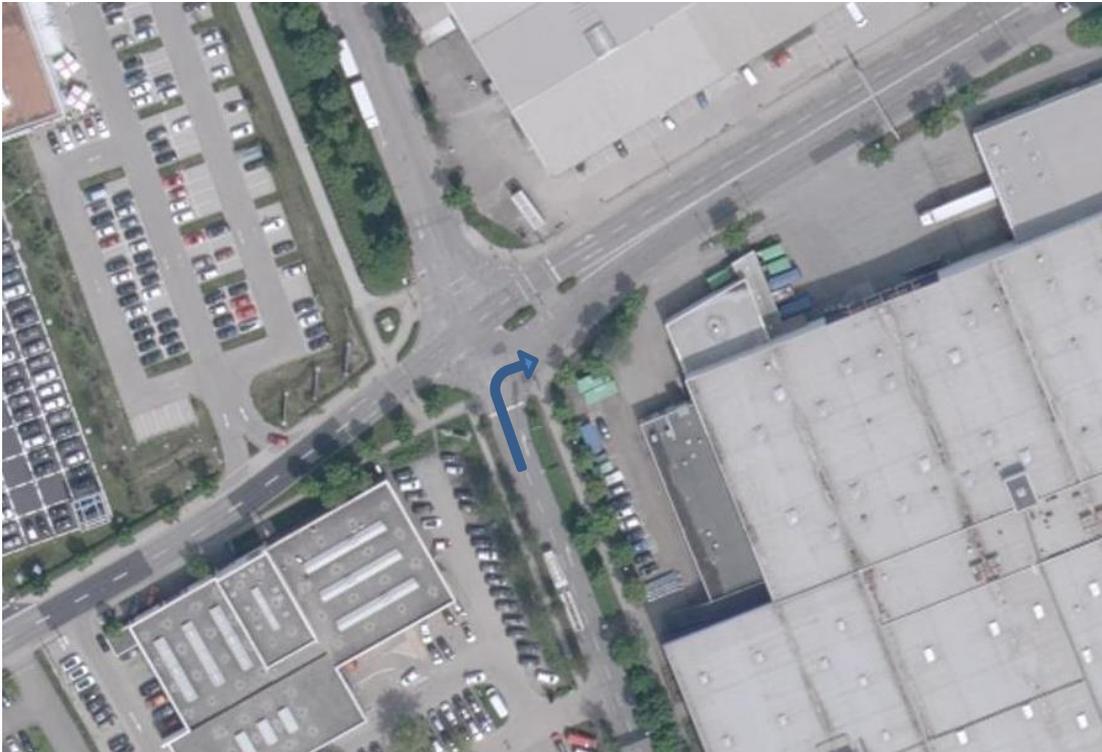


Abbildung Anhang 2: Rechtsabbiegesituation Nr. 2 (Bayernatlas: <http://v.bayern.de/GXypH>)



Abbildung Anhang 3: Rechtsabbiegesituation Nr. 3 (Bayernatlas: <http://v.bayern.de/8FRhF>)



Abbildung Anhang 4: Rechtsabbiegesituation Nr. 4 (Bayernatlas: <http://v.bayern.de/Vcy7d>)



Abbildung Anhang 5: Rechtsabbiegesituation Nr. 5 (Bayernatlas: <http://v.bayern.de/z85mm>)



Abbildung Anhang 6: Rechtsabbiegesituation Nr. 5 (Bayernatlas: <http://v.bayern.de/TZTtX>)