

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für Ergonomie

Analyse von Sichteinschränkungen im Fahrzeug

Dipl.-Ing. **Wolfram Michael Remlinger**

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: Univ.-Prof. Dr. phil. Klaus Bengler

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Heiner Bubb (i. R.)
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing., Dr. phil. habil. Birgit Spanner-Ulmer

Die Dissertation wurde am 29.10.2012 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 22.03.2013 angenommen.

Danksagung

Diese Arbeit entstand während und in Folge meiner Tätigkeit am Lehrstuhl für Ergonomie der Technischen Universität München in Garching.

In den Jahren 2005/2006 wurde eine Erweiterung der Fähigkeiten des Menschmodells RAMSIS um kognitive Analyse- und Simulationsfunktionen initiiert. Nach positiver Entscheidung des Lenkungskreises zum Projekt „RAMSIS kognitiv“ ermöglichte mir Herr Dr. Andreas Seidl als Geschäftsführer der Human Solutions GmbH die wissenschaftliche Bearbeitung dieser Aufgabe. Dafür und für die hervorragende Zusammenarbeit über den gesamten Projektverlauf danke ich Herrn Dr. Seidl, sowie Herrn Dr. Hans-Joachim Wirsching und dem gesamten RAMSIS-Lenkungskreis. Ebenso wurde meine wissenschaftliche Weiterqualifizierung von Seiten meiner früheren Chefs in der AUDI AG, Herrn Dr. Peter-Felix Tropschuh und Herrn Ralf-Gerhard Willner, aktiv unterstützt.

Herrn Professor Heiner Bubb und Frau Professor Birgit Spanner-Ulmer gilt sehr großes Lob und Dank für die hervorragende fachliche und insbesondere persönliche Betreuung und Begleitung. Die Inhaber des Lehrstuhls für Ergonomie, Herr Professor Heiner Bubb und sein Nachfolger Herr Professor Klaus Bengler, sowie alle Kollegen und Mitarbeiter sind für den exzellenten wissenschaftlichen und menschlichen Anspruch in der Zusammenarbeit angemessen zu würdigen. Das angenehme Arbeitsklima mit vielen erfrischenden und konstruktiv-kritischen Gesprächen ist für die kreative Forschungstätigkeit sehr förderlich und anregend. Bei der Unterstützung meiner Arbeit möchte ich die ehemaligen Studenten Anja Bichlmeier, Albert Zaindl, Hüseyin Sengül, Andreas Hofmann, Florian Kremser, Jörg Wendrinsky und Stephan Raith besonders erwähnen.

Für meinen Lebensweg bildet meine Familie die Grundlage: Meine Eltern förderten mich viele Jahre durch Ihre Erziehung und in der Ausbildung. Meine Frau Susanne und meine Kinder Alina und Vincent tolerieren, motivieren und unterstützen meine Arbeit mit reichlich Verzicht, Geduld und Verständnis.

Diesen und weiteren, nicht namentlich genannten Personen danke ich vielmals!

Kurzfassung

Derzeitige Entwicklungen der Fahrzeugtechnik erfordern zusätzliche visuelle Aufmerksamkeit vom Fahrer zur Bedienung und Überwachung neuer elektronischer Systeme zur Information, Kommunikation und Fahrerassistenz. Sowohl die Sicht nach außen auf die Straße in den Verkehr, als auch die Überwachung der vielfältigen Anzeigen im Inneren des Fahrzeugs verlangen nach visuellen Zuwendungen, die miteinander konkurrieren. Die behördliche Unfallstatistik, Analysen der Fachpresse und von Verkehrsclubs und die Wissenschaft weisen auf verschiedene Schwachpunkte bezüglich der Sichtbedingungen aktueller Fahrzeuge hin.

Der komplexe visuelle Wahrnehmungsprozess des Menschen kann aufgrund des derzeit noch unvollständigen Forschungsstandes in Neurowissenschaften und Psychologie nur teilweise beschrieben oder gar modelliert werden.

Um das bisher bekannte ergonomische Wissen zum Zweck der verbesserten Fahrzeugauslegung praktisch zu nutzen, wird das anthropometrische 3D-Menschmodell RAMSIS um Fähigkeiten eines kognitiven Menschmodells erweitert. Unter dem Programmtitel „RAMSIS kognitiv“ werden in einem ersten Projektschritt neue Analysefunktionen für die Perzeption des Fahrers zur Implementierung in die Software beschrieben. Es handelt sich dabei zum Einen um physiologisch-visuelle Analysefunktionen bezüglich des Fahrerauges. Zum Anderen können geometrisch-optische Eigenschaften des Fahrzeugs analysiert werden.

Darüber hinaus werden in dieser Arbeit die Möglichkeiten von theoretischen Sichtbewertungsverfahren und Außensichtanalysen am Beispiel von sichtkritischen Verkehrsszenarien exemplarisch durchgeführt und ausführlich diskutiert.

Zwei Versuchsreihen im Fahrsimulator zeigen abschließend mit Hilfe von Probandenversuchen auf, in welcher Weise Fahrer aufgrund von Sichtverdeckungen beeinträchtigt sind. Dabei werden bisher nicht bekannte Blick-, Bewegungs- und Verhaltensstrategien von Fahrern ermittelt und beschrieben. Die im Allgemeinen hohe Anpassungsfähigkeit des Menschen kann die Sichteinschränkungen der Fahrer in den kritischen Verkehrssituationen der Versuchsreihen nur wenig kompensieren. Die Ergebnisse unterstützen die Forderung nach verstärkter Umsetzung technischer Maßnahmen zur Sichtverbesserung sowohl seitens der Fahrzeugauslegung, aber auch bei der Gestaltung und beim Befahren von Verkehrsknotenpunkten.

Abstract

The current development of automotive technology is designated by the implementation of innovative electronic systems for information, communication and driver assistance. The visual control of street and traffic as well as operating and controlling the systems inside the car require rivalling attention of the driver. Official accident statistics, analysis of technical press and automobile clubs and science research point to weaknesses concerning the viewing conditions of current car models.

The human visual cognition process is very complicated and the referring state of knowledge of neurosciences and psychology is still incomplete. Parameters and process of seeing in road traffic can only partly be characterised and modelled.

For the practical use of the common cognitive knowledge the RAMSIS anthropometric man-model-system shall enlarge its skills with cognitive abilities. At the first step the project "RAMSIS cognitive" designs analysis functions for software implementation regarding to the visual perception of the driver.

On the one hand side the simulations are about the optical-physiological conditions of the eye. On the other hand the simulations mark the optical-geometrical attributes of the signals.

Furthermore this paper carries out and compares some possibilities of theoretical sight condition and traffic view evaluation methods.

After all two experiments with test persons in a driving simulator show the interference of the driver's sight in serious traffic situations. The experiments expose unknown strategies of sight, head and body movement and behaviour of the drivers. The in other respects great adaptiveness of humans cannot compensate the interference of the driver's sight. The results maintain the request for better sight conditions. As well the industrial car design as the construction of and driving through traffic junctions have to realize that demand.



Inhaltsverzeichnis

Glossar	5
1 Einleitung und Zielsetzung	13
1.1 Ausgangssituation.....	14
1.2 Ziel der Arbeit.....	18
1.3 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit.....	19
2 Visuelle Wahrnehmung des Menschen	21
2.1 Beschreibung des Prozesses der visuellen Wahrnehmung	21
2.2 Funktion des Auges	23
2.3 Funktion des Gehirns für die visuelle Wahrnehmung	27
2.4 Schwächen, Mängel und Fehler der visuellen Wahrnehmung	34
2.5 Augendominanz	41
2.6 Zusammenfassung des Kapitels	45
3 Bedeutung des Sehens für die Fahraufgabe.....	47
3.1 Beschreibung des Umfanges der Sehaufgaben des Fahrers	47
3.2 Einfluss der Sichteinschränkungen im Verkehrsgeschehen	50
3.2.1 Blickaufgaben-Fahraufgaben.....	51
3.2.2 Unfallgeschehen	52
3.2.3 In der öffentlichen Berichterstattung	56
3.2.4 In der Rechtsprechung.....	63
3.3 Rechtliche Regelungen zu den Sichtbedingungen im Fahrzeug... 64	
3.3.1 Binokulare Sichtverdeckung anhand der europäischen Zulassungsvorschrift 90/630/EWG ehem. 77/649/EWG.....	66
3.3.2 Verfahren der dreidimensionalen Sichtverdeckung nach §35b StVZO	71
3.3.3 Monokulare Sichtverdeckung anhand des GCIE ehemals FMVSS 12872	
3.3.4 Weitere Vorschriften	74
3.3.5 Erläuterung verschiedener Messverfahren	76
3.4 Schwachpunkte der Verfahren hinsichtlich der menschlichen Sichtbedingungen im Straßenverkehr.....	78
3.5 Zusammenfassung des Kapitels	79



4	Sichtanalysefunktionen des 3D-Menschmodells RAMSIS.	81
4.1	Der ergonomische Auslegungsprozess von Fahrzeugen	82
4.2	Beschreibung und Hintergrund des Forschungsprojektes ‚RAMSIS kognitiv‘	85
4.3	Analysefunktionen hinsichtlich der physiologischen Grenzen der visuellen Wahrnehmung im Fahrzeug.....	86
4.3.1	Sichtfelder, Blickfelder, Brillensicht	86
4.3.2	Physiologische und psychologische Blendung	89
4.3.3	Akkomodationsgrenzen	91
4.3.4	Sehschärfe.....	93
4.3.5	Blickabwendungszeiten	95
4.4	Analysefunktionen hinsichtlich der geometrisch-optischen Grenzen der visuellen Wahrnehmung im Fahrzeug.....	98
4.4.1	Geometrische Verdeckung	98
4.4.2	Liquid Crystal Displays.....	99
4.4.3	Head Up Displays	101
4.5	Analysefunktionen der physiologischen Grenzen der Direkten Sicht in den Verkehr	103
4.5.1	Dynamische Sichtgrenzen beim Fahren	110
4.6	Analysefunktionen von geometrischen Grenzen der direkten Sicht 113	
4.6.1	Streckenverlauf und Position im Verkehr	113
4.6.2	Projektion der Sichtbereiche und Daimler-Scholly-Verfahren	114
4.7	Zusammenfassung des Kapitels	116
5	Zusammenhänge der Sichtverdeckungen des Fahrers	117
5.1	Grundsätzliche Einflüsse und Veränderungen durch Fahrerpopulation und Fahrzeuggestaltung	117
5.2	Historische Veränderungen der Verdeckungsverhältnisse von Fahrzeugen	120
5.3	Systematische Analyse der Einflussparameter der Säulengestaltung auf die Sichtverhältnisse innerhalb der gesetzlichen Grenzen.....	122
5.3.1	Identifizierung der Einflussfaktoren.....	122



5.3.2	Geometrische Analysen	123
5.3.3	A-Säulen-Position Längsrichtung	124
5.3.4	A-Säulen-Neigung Längsrichtung	128
5.3.5	Resümee der geometrischen Analyse	132
5.4	Einfluss der anthropometrischen Variationen der Fahrer auf die Sichtverhältnisse	133
5.5	Zusammenhang von Streckenverlauf, Fahrzeuggeometrie und Fahrgeschwindigkeit auf die Sichteinschränkungen in Linkskurven.....	135
5.5.1	Antizipation und Gegenwartsempfinden	135
5.5.2	Berechnung des Vorausschauwinkels	137
5.5.3	Graphische Systematik des Vorausschauwinkels.....	140
5.5.4	Einfluss von Fahrergröße und A-Säulen-Position auf den Vorausschauwinkel	145
5.6	Zusammenhang von Fahrzeuggeometrie und kombinierter Fahrgeschwindigkeit auf die Sichteinschränkungen im Kreuzungsverkehr	147
5.6.1	Sichtverdeckung bei der Annäherung an Kreuzungen.....	147
5.6.2	Rechenbeispiel für kombinierte Annäherungen	149
5.6.3	Allgemeiner Zusammenhang der Annäherung in Stehender Peilung	151
5.7	Analyse der Verschwenkungen der Blickachse	155
5.8	Verdeckungssituationen an Knotenpunkten.....	162
5.9	Mögliche Maßnahmen zur Sichtverbesserung der A-Säulen.....	165
5.10	Zusammenfassung des Kapitels	169
6	Empirische Untersuchungen	171
6.1	Untersuchungsziel und Hypothesen	171
6.2	Experimentdesign	172
6.2.1	Versuchsaufbau	172
6.2.2	Messtechnik.....	173
6.2.3	Versuchsablauf	175
6.3	Untersuchung der Sichtsituation in Linkskurven	176
6.3.1	Modelle des Blickverhaltens in Kurven	177
6.3.2	Versuchsstrecke & Methodik.....	178
6.3.3	Probandenkollektiv.....	180
6.3.4	Ergebnisdarstellung	181



6.3.5	Vergleich von Links- und Rechtskurven.....	192
6.3.6	Ursacheninterpretation des Blick- und Kopfbewegungsverhaltens hinsichtlich der Hypothesenüberprüfung	193
6.4	Untersuchung der Sicht in Kreuzungssituationen	194
6.4.1	Versuchsstrecke & Methodik.....	195
6.4.2	Probandenkollektiv.....	200
6.4.3	Ergebnisdarstellung	202
6.4.4	Interpretation und Hypothesenüberprüfung	213
6.5	Zusammenfassung des Kapitels	216
7	Diskussion und Ausblick	219
8	Zusammenfassung	231
	Literaturverzeichnis	235
	Im Rahmen dieser Dissertation betreute Studienarbeiten:.....	248
	Abbildungsverzeichnis	249
	Anhang A.....	257



Glossar

ACEA	Association des Constructeurs Européens d'Automobiles; Europäischer Automobilherstellerverband
ACT-R	Adaptive Control of Thought-Rational; Software-Architektur für eine Modellierung des Kognitionsprozesses
ADAC	Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e.V.; Mitglieder-stärkste Interessenvereinigung von Kfz.-Fahrern in Deutschland
ADAS	Advanced Driver Assistant System, siehe →Fahrerassistenzsystem
Adaption	Anpassung des Auges an die Lichtstärke mit Iris und Netzhaut
Akkommodation	Linseneinstellung des Auges auf die Sehentfernung
ambinokular	Zusammenfassung der beiden monokularen Sichten des linken und rechten Auges
Antizipation	Annahme oder Vorherahnung eines zukünftigen Geschehens; wichtige menschliche Eigenschaft zur Planung von Handlungen; Ausdruck menschlicher Intelligenz
A-Säulen	Die beiden vorderen dachtragenden Säulen im Fahrzeug, sie fassen die Windschutzscheibe ein
Augendominanz	Das führende Auge eines Menschen; die beiden Augen des Menschen werden beim Sehen nicht vollkommen gleichwertig verwendet. Die visuelle Wahrnehmung eines Auges dringt stärker in das Bewusstsein.
Augpunkt	Geometrische Position der Augen des Fahrers im Fahrzeug; häufig als (einzelner) Mittelpunkt der Positionen vom linken und rechten Fahrerauge verwendet (Mittenaug/Zyklopenauge); teilweise aufgrund von Regularien definiert; Ausgangspunkt für die Auslegung und Prüfung von Sichtverhältnissen im Fahrzeug.
Binokulare Sicht	Visuelle Erfassung mit beiden Augen, dadurch i.d.R. stereoskopisches, also dreidimensionales Sehen
Blickfeld	Der Raumbereich vor dem Kopf, den ein Mensch allein durch Augenbewegungen fixieren kann.
Cab-forward-design	Fahrzeugkarosserie mit weit nach vorne gezogener Frontscheibe bzw. Fahrgastzelle; zumeist Fahrzeuge mit Heck- oder Unterflurmotoranordnung



CATIA	Computer Aided Three-Dimensional Interactive Application; 3D-CAD-System der französischen Softwarefirma Dassault; weit verbreitet bei der Konstruktion von Fahrzeugen
Daimler-Scholly-Verfahren	Geometrisches Verfahren zur gewichteten Bewertung der Sichtverhältnisse eines Pkw nach vorne; Entstehung durch intensive Forschungsarbeiten von Uwe Scholly bei der Daimler AG
Direktblendung	Physiologische Blendung des Auges durch zumeist spontanen Lichteinfall mit hoher Leuchtdichte direkt ins Auge, entweder von der Sonne oder von hellen Scheinwerfern; Beeinträchtigung der Sehfähigkeit für mehrere Sekunden durch den Adaptionsreiz
Eye Ellipse	Genormte 95% Tangenten Grenzkurve der Augpunktpositionen nach SAE J941 zur Bestimmung der Sichtgrenzen unterschiedlicher Fahrer durch die Windschutzscheibe; für einzelne Fahrzeuge nur eingeschränkt realistisch
Fahrerassistenzsystem (FAS)	Vorwiegend (aber nicht ausschließlich) elektronisches System zur Unterstützung des Fahrers bei seinen Fahrzeugführungsaufgaben; es kann informierend, unterstützend oder eingreifend in Funktion treten
Fahrsimulator	Versuchseinrichtung, um Fahrern den Eindruck des Autofahrens möglichst realitätsnah zu suggerieren; gut geeignet als wissenschaftliche Testeinrichtung, um gefahrlos und reproduzierbar bestimmte Fahrsituationen und technische Einrichtungen mit Versuchspersonen zu testen oder Menschen für die Fahrzeugführung zu trainieren; unterschiedliche Ausprägung der Ausstattung; Unterscheidung von statischen und dynamischen Fahrsimulatoren, d.h. mit und ohne Bewegungseinrichtung zur Vermittlung kinästhetischer Eindrücke an den Fahrer
FAT	Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V.; Tochterverein des VDA zum Zwecke der Initiierung gemeinsamer wissenschaftlicher Forschungsaktivitäten der Verbandsmitglieder
Fixation	Gezieltes Ansehen eines Objektes oder Bereiches; dabei werden die Blickachsen beider Augen auf diesen Punkt ausgerichtet sowie Linse und Iris des Auges für eine optimale optische Erfassung unwillkürlich eingestellt



FMVSS	Federal Motor Vehicle Safety Standard; US-amerikanische Zulassungsvorschrift des Transportministeriums
Foveales Sehen	Hochauflösendes (scharfes), farbiges Sehen mit dem menschlichen Auge nahe an der Sehachse; Bilddarstellung erfolgt in der Fovea (Sehgrube) des menschlichen Auges
Führendes Auge	siehe Augendominanz
Gesichtsfeld	Der Raumbereich vor dem Kopf, aus dem das menschliche Auge Licht erfassen kann
GIDAS-Datenbank	German In Depth Accident Study; Gemeinsame Datenbank von Fahrzeugherstellern und Forschungsinstituten zur wissenschaftlichen Analyse von Verkehrsunfällen in Deutschland
GOMS	Goals-Operators-Methods-Selection rules; Methode zur Strukturierung und Modellierung der Mensch-Maschine-Interaktion
Greenhouse	englisch für Gewächshaus; in der Automobilfachsprache der obere Karosseriebereich, der alle Scheiben und das Dach umfasst, also alles oberhalb der sogenannten ‚Gürtellinie‘; beinhaltet auch die dachtragenden Säulen (A,B,C,D)
Heatmap	Falschfarbendiagramm als Darstellungsform von Metadaten in Bildern, bekanntes Beispiel ist das Thermogramm eines Wohnhauses zur Visualisierung von Wärmeverlusten; hier wird die Darstellung zur Anzeige von Fixationsdauer in Videobildern eingesetzt
Hering-Koordinaten	Koordinatensystem auf Basis einer Winkelpfeilung zu zwei bekannten Positionspunkten; Basis zur relativen visuellen Verortung eines Objektes durch das Sehen mit zwei Augen; das im Kern zwei-dimensionale Koordinatensystem besteht aus den Dimensionen Vergenz und Version; durch Ergänzung der Elevation auch als drei-dimensionales Koordinatensystem verwendbar
Hillebrand-Hyperbeln	Kurvenzüge mit jeweils gleicher Version im Hering’schen Koordinatensystem
Horofter	Kurvenzug aller Punkte, die in einer Augenstellung auf den korrespondierenden Stellen der beiden Netzhäute abgebildet werden; in der Theorie idealerweise identisch



	mit Abschnitten der Vieth-Müller-Kreise; in der Praxis jedoch von den Betrachtern flacher empfunden, möglicherweise aufgrund des Einflusses der muskulären Akkomodationsänderung
HUD	Head Up Display; Anzeigedisplay, das über die Spiegelung der Frontscheibe oder eine vorgelagerte Combinerscheibe quasi über die Sicht auf die Fahrbahn eingeblendet wird; eine kontaktanaloge Darstellung erlaubt sogar augmentierte Informationen im Kontext zur Sicht in den Verkehr; nutzbare Vorteile sind Möglichkeiten zur verringerten Blickabwendung und größere Anzeigedistanz zum Auge
Isochronen	Linien gleichen Zeitbedarfs; hier als Darstellung für die räumliche Distanz und den Zeitbedarf bei Blickwechseln verwendet
JAMA	Japan Automobile Manufacturers Association; Japanischer Automobilherstellerverband
Knotenpunkt (hier: Straßen- Knotenpunkt)	Verkehrstechnischer Fach- und Sammelbegriff für die Verbindungspunkte mehrerer Straßen, also Kreuzungen, Einmündungen, Kreisverkehre
Kognition	Informationswahrnehmungsprozess bestehend aus den Schritten Informations-Aufnahme (Perzeption), -Verarbeitung, und -Umsetzung; ursprünglich eine Fähigkeit von Lebewesen, inzwischen auch zunehmend von technischen Systemen realisierbar
Lateralität	Einseitige Ausprägung (hier) von menschlichen Fähigkeiten wie beispielsweise der Geschicklichkeit der Hände (Linkshänder / Rechtshänder)
LCD	Liquid Crystal Display, Flüssigkristallbildschirm, zumeist rechteckige, derzeit noch vorwiegend flache Anzeigefläche, bestehend aus einer Vielzahl von Pixelsegmenten in horizontaler und vertikaler Matrix-Struktur. Jedes einzelne Flüssigkristallsegment zur Darstellung eines Farbanteils eines einzelnen Pixels kann durch Anlegen einer elektrischen Spannung ausgerichtet werden. Die Durchlässigkeit der Hintergrundbeleuchtung von polarisiertem Licht wird damit gesteuert, um aus der Kombination der Pixelmatrix ein Bild darzustellen.
Looked But Failed To See (LBFTS)	“hingeschaut, aber nicht in der Lage es wahrzunehmen”; das in Großbritannien anerkannte Phänomen, dass Verkehrsteilnehmer einzelne Objekte in bestimmten Situationen visuell nicht wahrnehmen können



Monokulare Sicht	Visuelle Erfassung nur mit einem Auge, damit ist keine dreidimensionale Erfassung möglich
One-box-design	Fahrzeugkarosserie, die in ihrer Grundform einem einzigen geometrischen Grundkörper (box) entspricht, also keinen abgesetzten Vorder- oder Hinterwagen besitzt; häufig anzutreffen bei Vans und Transportern
Optischer Fluss	Räumlicher Verlauf von Bildinformationen über einen Zeitraum aufgrund von Bewegung; sowohl Bildobjekte als auch Betrachter (Kamera) können eine Bewegung vollziehen; die Aufzeichnung ist z.B. durch Langzeitbelichtung möglich; wichtiges Element zur unterbewussten Lage- und Bewegungswahrnehmung des Menschen
Parallaxe	Veränderung des wahrnehmbaren Abstandes mehrerer Objekte in unterschiedlicher Entfernung aufgrund einer Veränderung bzw. einem Wechsel des Betrachtungspunktes; basiert auf dem Vergenzwinkel
Peripheres Sehen	Visuelle Wahrnehmung außerhalb des fovealen Sehens, mit größerer Entfernung zur Sehachse; Bildinformationen werden in den Randbereichen nur schwarz-weiß erfasst und im Gehirn Größtenteils unterbewusst verarbeitet
Perzeption	Wahrnehmung, Informationsaufnahme; erster Schritt des Kognitionsprozesses
Photogrammetrie	Räumliche Messung und Modellierung eines Objektes durch synchrone optische Erfassung aus zwei unterschiedlichen Perspektiven und Zusammenführung der beiden jeweiligen Bildinformationen in einem dreidimensionalen Modell
Physiologische Blendung	Vorübergehende Beeinträchtigung des Sehens durch hohe Leuchtdichtewirkung auf das nicht auf diese Helligkeit adaptierte Auge
Psychologische Blendung	Ablenkung und ungewollte Verlagerung bzw. Überlagerung der Fixation auf ablenkende Sichtobjekte; erfolgt zumeist durch Überstrahlung von hellen Objekten in einer anderen Sichtebeine
Querdisparität oder Querdisparation	auch horizontale Disparität, Abbildung eines Punktes an unterschiedlichen horizontalen Positionen der Netzhaut der beiden Augen; der Abstand ist die Disparität; Der Effekt entsteht für alle Punkte, die einen anderen Abstand als die derzeitige Fixation besitzen; eine positive Dispari-



	tät kennzeichnet einen größeren Abstand, eine negative Disparität einen kleineren Abstand als die Fixation; da auch vertikale Differenzen auftreten, nimmt der Mensch jederzeit die vollständige Tiefenstaffelung seines Gesichtsfeldes wahr
RAMSIS	Rechnergestütztes Anthropometrisch-Mathematisches System zur Insassensimulation; eine Computer-Software zur Erzeugung eines 3D-Menschmodells, um im Zusammenspiel mit CAD-Konstruktionssystemen Fahrerplätze vor allem anthropometrisch aber auch systemergonomisch auszulegen
RAS	Richtlinien für die Anlage von Straßen; unterteilt in die Themen RAS-K: Knotenpunkte, RAS-L: Linienführung, RAS-Q: Querschnitte und weitere Unterteilungen
Reflexblendung	Physiologische Blendung des Auges durch indirekten, reflektierten Lichteintrag von hoher Leuchtdichte über hochglänzende Oberflächen
SAE	Society of Automotive Engineers; Amerikanischer Verband der Automobilingenieure
Sakkade	Schnelle Augenbewegung während eines Fixationswechsels von einem auf ein anderes Objekt
Sichtschatten	Der Bereich einer räumlichen Verdeckung durch beispielsweise einen Gegenstand; Der Effekt für die Lichtstrahlen eines Betrachters wird dabei in Analogie zu den Lichtstrahlen einer Leuchte an der Position des Betrachterauges gesetzt
Snellen-Wert	Messgröße der Sehschärfe für das Auflösungsvermögen des Auges; die Angabe erfolgt als Entfernungsrelation 20/x, d.h. der Proband kann ein Zeichen in 20 ft Abstand erkennen, welches ein normalsichtiger in x ft Abstand erkennen würde; als Dezimalzahl ausgerechnet entspricht der Snellen-Wert direkt dem Visus; Verwendung v.a. in den USA
Soft Target	Ferngesteuert oder programmiert fahrbarer Luftsack in Gestalt eines Fahrzeugs zur gefahrlosen Erprobung von Fahrerassistenzsystem mit Kollisionswahrscheinlichkeit
StVO	Straßenverkehrsordnung; deutsche Rechtsverordnung der verbindlichen Straßenverkehrsregeln
StVZO	Straßenverkehrszulassungsordnung; deutsche Rechtsverordnung zur Festlegung der technischen Bedingungen



	an Kraftfahrzeuge zur Teilnahme am öffentlichen Straßenverkehr; wird schrittweise aufgelöst und geht in die Fahrzeugzulassungsverordnung (FZV) über
Tunneleffekt	Verengung des effektiven Blickfeldes des Fahrers mit Zunahme der Fahrtgeschwindigkeit; im Nahbereich des Fahrzeugs sind die seitlichen Bereiche der Straße vom menschlichen Auge nicht mehr als Bild auflösbar
UNECE	United Nations Economic Commission Europe; internationales Gremium der Vereinten Nationen, u.a. zuständig für transnationale Verkehrs- und Fahrzeugregularien
VDA	Verband der Automobilindustrie; Interessenverband der Automobilindustrie in Deutschland
Vektion	Bewegungseindruck aufgrund einer Bildverschiebung des gesamten Gesichtsfeldes; kann außer der Betrachterbewegung auch künstlich z.B. in Simulationsdarstellungen und Großbildkinos erzeugt werden oder durch die (unerwartete) Bewegung sehr großer Fahrzeuge entstehen
Vergenz(winkel)	Koordinatendimension im Hering'schen Koordinatensystem; Zwischenwinkel der beiden Blickachsen auf das Objekt; entspricht der Größe des erforderlichen, nicht krankhaften (schielenden) Konvergierens der Augenstellung
Version(swinkel)	Koordinatendimension im Hering'schen Koordinatensystem; Richtungswinkel auf den Koordinatenursprung im Mittenaugen/Zyklopernaugen, gebildet durch den Mittelwert der beiden Blickachsen; entspricht dem Azimutwinkel (Polarwinkel) im Polarkoordinatensystem
Vieth-Müller-Kreise	Kreisförmige Distanzen mit jeweils gleichem Vergenzwinkel im Hering'schen Koordinatensystem
Visus	Messgröße der Sehschärfe für das Auflösungsvermögen des Auges; Der Wert des Visus ergibt sich aus: 1 Bogenminute / individuelle Sehschärfe als Winkelmaß; dadurch ist der Visuswert dimensionslos
Wii Remote	Controller (Fernbedienung) der elektronischen Spielekonsole Nintendo Wii; beinhaltet Bedienelemente, Vibrationsaktuatoren, Beschleunigungssensoren, einen Infrarotsensor, einen Datenspeicher sowie eine Bluetooth-Funkverbindung



"That guy's gotta stop...He'll see us."

(„Der Typ muss anhalten. Er wird uns schon sehen.“)

Der bekannte Filmschauspieler und Amateur-Rennfahrer James Dean
zu seinem Beifahrer und Rennmechaniker Rolf Wütherich
Sekunden vor seiner tödlichen Kollision
mit einem entgegenkommenden, links abbiegenden Pkw
am 30.September 1955 um 17:59 Uhr
(Frascella & Weisel 2005, S.233)



1 Einleitung und Zielsetzung

**„Es ist ein Grundproblem der Menschen: Wir glauben, was wir sehen. -
Leider. Denn wir sehen längst nicht so gut, wie wir glauben.“**

Mit dieser griffigen Aussage von *Frank C. Keil*, Direktor des Cognition und Development Lab der Yale-Universität, wird die eingeschränkte Zuverlässigkeit des Sehens betont (Berndt, 2006). Dieser Hinweis stellt die Verlässlichkeit des Sehens als vermeintlich unumstößliche Basis unserer subjektiven Wahrnehmung in Frage und rüttelt damit an den Grundfesten menschlichen Bewusstseins.

Denn für jeden einzelnen Menschen gilt der originär und real gesehene Vorgang als Faktum. In der Sprachgeschichte bildet laut *DUDEN* (1997, S.817) das Wort *weid* die indogermanischen Wurzeln des deutschen Wortes *wissen*. Wörtlich bedeutet das Stammwort *wizzen* = „*ich habe gesehen*“. Auch der englische Begriff *witness* = *Zeuge* und das lateinische *videre* = *sehen* leiten sich davon ab.

Die Verlässlichkeit und Richtigkeit des eigenen Sehens ist so selbstverständlich, dass die eigene Gesundheit und Existenz als höchstes Gut des Menschen tagtäglich darauf baut, so beispielsweise beim Überqueren einer befahrenen Straße.

Dass die Sicht vom Fahrerplatz aktueller Pkw in den Straßenverkehr längst nicht immer diese hohen Anforderungen des Menschen an die Güte des Sehens erfüllt, verdeutlicht das Ergebnis einer repräsentativen Ergonomie-Studie. So wurden im Rahmen der deutschen Körpermaß-Reihenmessung ‚*Size Germany*‘ (2009) in den Jahren 2007/2008 den 13.362 vermessenen Personen auch 11 Fragen zur Beurteilung ihrer jeweiligen Fahrzeuge gestellt. Kennzeichnendes Ergebnis dabei war, dass die Sichtbedingungen aus dem Fahrzeug (Rundumsicht) sowohl von Männern wie von Frauen unter allen 11 befragten Aspekten am schlechtesten bewertet wurden! Der Aspekt der Sichtbedingungen erhielt sowohl die deutlich schlechteste durchschnittliche Bewertung als auch die häufigste Nennung von Schwächen!

Diese statistische Beurteilung einer großen Personenzahl fußt jeweils auf den individuellen, subjektiven Eindrücken jedes Einzelnen. Im Laufe der folgenden Arbeit wird auch deutlich werden, durch welche vielfältigen Faktoren und Wirkungsmechanismen diese negativ empfundenen Eindrücke verursacht werden.



1.1 Ausgangssituation

In der nun 125 jährigen Geschichte des Automobils hat die Fahrzeugtechnik bemerkenswerte Entwicklungsschritte durchlaufen. Die Aufgaben des Menschen als Fahrzeugführer haben sich in ihrer Qualität während dieser Zeit nur unwesentlich verändert. Hinsichtlich der Aufgabenquantität ist jedoch seit Beginn des Autofahrens eine kontinuierliche Zunahme zu verzeichnen, die mit der Steigerung der Verkehrsleistung und der Intensivierung der Verkehrsdichte einhergeht. Erfreulicherweise haben in Deutschland die negativen Folgen für Leib und Leben der Menschen, die am Straßenverkehr teilnehmen, aufgrund der verbesserten passiven Sicherheit der Fahrzeuge von 1970 bis 2010 stetig abgenommen (Abbildung 1-1). Dieser deutliche Trend scheint neuerdings zu stagnieren und er gilt nicht für die Zahl der Unfälle insgesamt. Ihre Zahl stagniert bereits seit etwa 10 Jahren. Hinsichtlich der aktiven Sicherheit der Fahrzeuge zur Vermeidung von Unfällen sind also in jüngerer Vergangenheit keine Effekte mehr spürbar (Abbildung 1-2).

Die GIDAS-Datenbank der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) und der Forschungsvereinigung Automobiltechnik (FAT) liefert *Gründl* (2005) als Ursachen für Straßenverkehrsunfälle zu 93,5% so genanntes ‚menschliches Fehlverhalten‘, zu 4,6% ‚Umgebungsbedingungen‘ wie z.B. Witterung und zu 0,7% ‚technische Mängel‘.

Am Aspekt des ‚menschlichen Fehlverhaltens‘ setzen seit einigen Jahren die Maßnahmen der europäischen und nationalen Verkehrsbehörden sowie der Automobilhersteller und -zulieferer unter Programmtitel eSafety an. Fehlerverursachende Aufgaben des menschlichen Fahrers sollen durch zuverlässige technische Systeme unterstützt oder ersetzt werden. Durch die Entwicklung und Verwendung von elektronischen Fahrerassistenzsystemen soll die aktive Sicherheit moderner Fahrzeuge verbessert und dadurch Unfälle vermieden oder die Unfallschwere reduziert werden. Die Fahrzeugtechnik ist damit in eine Epoche der Fahrerassistenzsysteme eingetreten. Das visionäre Ziel am Ende dieses Weges ist das unfallfreie Fahren. Zu diesem Zweck werden große Forschungs- und Entwicklungsbudgets investiert, um mit Hilfe von technischen Sensoren dem Fahrzeug auf unterschiedliche Art und Weise „das Sehen“ zu ermöglichen und damit eine technische Umfelderkennung der Straßensituation und anderer Verkehrsteilnehmer zu realisieren. Viele dieser Projekte zeigen sehr positive Ansätze im Sinne der Verkehrssicherheit. Zukünftige Entwicklungsschritte werden die Leistungsfähigkeit dieser Systeme bei sinkenden Kosten weiter



erhöhen und den Nutzen steigern. (Lange, 2008; Staubach, 2010; Buck, 2005; EU-Commission, 2008)

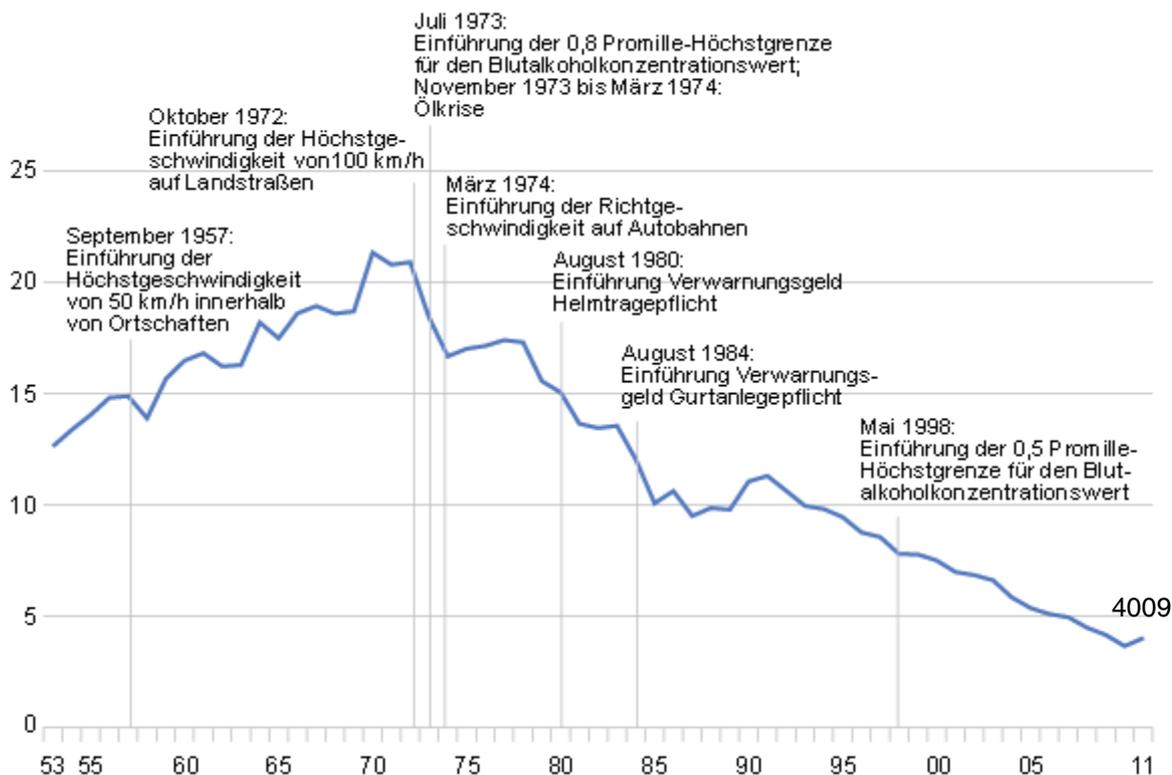


Abbildung 1-1: Entwicklung der Zahl der Straßenverkehrstoten in Deutschland 1953-2011 (Quelle: Statistisches Bundesamt, 2012)

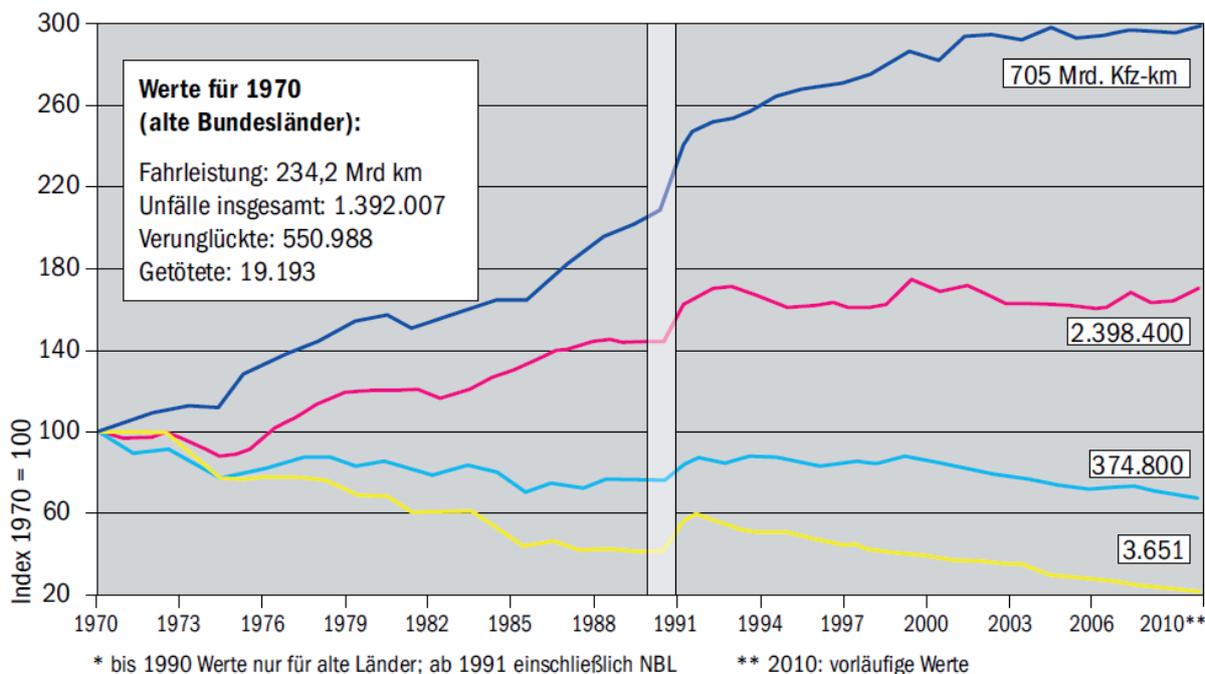


Abbildung 1-2: Entwicklung der Kfz-Fahrleistungen, der Verkehrsunfälle, der Verunglückten und der getöteten Personen in Deutschland (Quelle: ADAC 2011 bzw. Statistisches Bundesamt, 2011)



Im Rahmen der Entwicklungen dieser Assistenzsysteme stoßen viele Projekte immer wieder auf dieselbe Fragestellung: Wie sind die gewonnenen Informationen der technischen Sensorik im Fahrzeug zu verwenden? Häufig sind die Antworten darauf nur durch Einbeziehung ergonomischer Kenntnisse zu finden, denn die möglichen technischen Maßnahmen greifen zumeist weit in den eigentlichen Aufgabenbereich des menschlichen Fahrzeugführers ein. Ob die Fahrerassistenzsysteme nun in ihrer Art der Eingriffswirkung informierend, beratend, kontrollierend, übersteuernd oder automatisierend ausgelegt sind, sie übernehmen Aufgaben, die zuvor dem Fahrer allein oblagen, und müssen effizient und reibungslos mit dem Fahrer zusammenwirken. Dieser Anspruch wird möglicherweise niemals für alle Situationen und Variationen perfekt und umfassend zu realisieren sein.

Mit dem ersten Einsatz elektronischer Assistenzsysteme vor einigen Jahren begann sich die Fahraufgabe zu einer Doppeltätigkeit zu wandeln. Neben die unmittelbare primäre Fahrzeugführung stellt sich die mittelbare Interaktion mit Fahrerinformations-, -kommunikations- und -assistenzsystemen als zunehmend umfassender werdende Sekundäraufgabe. Die Informationsübermittlung dieser elektronischen Systeme erfolgt ebenso wie die ‚natürliche‘ Informationsaufnahme vorwiegend visuell.

Für die ergonomische Gestaltung des Fahrerplatzes ergeben sich daraus zwei wesentliche Aufgabenstellungen:

- Uneingeschränkte visuelle Informationsaufnahme des Fahrers bei direkter Sicht in den Verkehr
- Sichtoptimierung der Anzeigen zur effektiven visuellen Wahrnehmung innerhalb des Fahrzeugs

Aus kritischer Betrachtung der Entwicklung der Fahrzeugtechnik lässt sich desweiteren eine bedenkliche Wechselwirkung beider Aspekte erkennen:

Maßnahmen der Karosseriekonstruktion zur Steigerung der passiven Sicherheit oder des Komforts wurden mittels Einschränkungen der Sichtbedingungen zu Lasten der aktiven Sicherheit realisiert.

Als prägnantestes Beispiel dafür ist die Verbreiterung der A-Säulen zu nennen. Steigende Anforderungen an die Aerodynamik der Fahrzeuge haben die Frontscheibe in



eine flachere Neigungsposition getrimmt. Die Erhöhung der Karosseriesteifigkeit und des Überrollschutzes führten zu einer deutlichen Verbreiterung des Säulen-Querschnittes. Dieser hat bei verschiedenen Karosserietypen bereits die Grenze des erträglichen überschritten. Kapitel 5.3 geht näher auf diese Problematik ein. Zur Kompensation der daraus resultierenden Sichtverdeckung wird bereits daran gearbeitet, ein weiteres elektronisches Assistenzsystem zu entwickeln.

Noch deutlicher wird die Tendenz bei der Analyse der Sichtbedingungen im rückwärtigen Bereich des Fahrzeugs. *Meic-Sidic (2005)* zeigt, dass sich die direkte rückwärtige Sicht der Karosserie aus aerodynamischen, ästhetischen und bauraumbedingten Gründen vielfach dermaßen verschlechtert hat, dass rückwärtige Rangieraufgaben z.B. zum Einparken ohne technische Einparkhilfen nicht mehr zufriedenstellend auszuführen sind. Die notwendige Sicht auf Anzeigen für die Einparkhilfe kann für den Fahrer zu räumlichen oder zeitlichen Konflikten mit der direkten Außensichtkontrolle durch die Scheiben treten.

In beiden Fällen ist ein Trend erkennbar, die negativen Folgen einer karosserietechnischen Maßnahme durch Einsatz zusätzlicher Elektronik zu kompensieren, anstatt die ursächlichen Beeinträchtigungen zu reduzieren.

Das Ressourcenmodell des menschlichen Kognitionsprozesses nach *Eckstein (2005)* erläutert, dass jede Zuwendung zu einer sekundären Tätigkeit innerhalb des Fahrzeugs Ressourcen von der Verkehrsbeobachtung für die primäre Fahrzeugführung abzieht. Die zeitliche Verteilung der Blickzuwendung auf primäre Fahraufgabe und sekundäre Tätigkeit ist ein objektives Merkmal dafür.

Im Hinblick auf den steigenden Einsatz von Fahrerassistenzsystemen ist davor zu warnen, die Zeitanteile der sekundären Aufgaben des Fahrers hinsichtlich der Interaktion mit elektronischen Mensch-Maschine-Schnittstellen zu Lasten der direkten Verkehrsbeobachtung auszuweiten. Trotz der steigenden Effizienz von Fahrerassistenzsystemen sind die beiden folgenden Grundsätze zu verfolgen:

- Minimierung der zeitlichen und räumlichen Blickablenkung vom Verkehr
- Optimierung der Bedingungen zur direkten Verkehrsbeobachtung

Außerdem verlangt eine Reduzierung der Quantität, also der zeitlichen Anteile, der direkten Sicht in den Verkehr eine Verbesserung der Qualität der direkten Sicht anstatt einer Verschlechterung! Vielversprechend erscheint eine Kombination beider



Möglichkeiten durch sogenannte kontaktanaloge Anzeigen unmittelbar im direkten Sichtfeld zu sein.

1.2 Ziel der Arbeit

Die Fahrzeugentwicklung als Bestandteil des modernen industriellen Produktentstehungsprozesses verlangt nach einer schnellen, zielgerichteten und präzise definierten konzeptionellen Auslegung eines neuen Fahrzeugs. Kosten und Zeit verschlingende iterative Optimierungsschleifen sollen nach Möglichkeit vermieden werden. Diesem Anspruch hat sich auch die ergonomische Auslegung von Fahrzeugen unterzuordnen. Daraus lassen sich zwei Anforderungen ableiten:

- Hinreichendes Wissen über die ergonomischen Einflüsse auf den Menschen
- Leistungsfähige Simulationswerkzeuge zur Unterstützung der prospektiven konstruktiven ergonomischen Auslegung

Durch die fortschreitende technologische Entwicklung der Fahrzeugtechnik steigen auch zunehmend die Ansprüche an den Kenntnisstand und die Methoden der Ergonomie. Konkret erfordern die intensive Verwendung von Fahrerkommunikations- und -informationssystemen sowie die Integration neuartiger Fahrerassistenzsysteme zusätzliche Tätigkeiten vom Fahrer. Das bedeutet, dass einerseits zusätzlich kognitive Leistungen bei der Fahrzeugführung erbracht werden müssen und andererseits eine vielfältige Konkurrenz der Aufmerksamkeit zu den bisherigen Aufgaben und Tätigkeiten des Fahrers entstehen. Speziell im Bereich der visuellen Wahrnehmung steigen die Anforderungen an den Fahrzeugführer und ebenso an den konzipierenden Fahrzeug-Ergonomen, der die optimale Auslegung dessen Fahrerplatzes vornehmen soll. Insofern hat diese Arbeit zum Ziel, Kenntnislücken hinsichtlich der Sichtwahrnehmung im Fahrzeug zu schließen und das zentrale Auslegungswerkzeug in der Fahrzeug-Ergonomie, das 3D-Menschmodell RAMSIS, mit zusätzlichen Sichtauslegungsfunktionen zu ergänzen und zu verfeinern.

Die funktionellen Erweiterungen von RAMSIS sollen den Weg zu einem kognitiven Menschmodell einschlagen und ausgehend von der Simulation perceptiver Funktionen des Wahrnehmungsprozesses einen ersten Schritt zu diesem langfristigen methodischen Ziel gehen. Denn es wäre mehr als wünschenswert für die praktische



Auslegung von Anzeige- und Bedienkonzepten in Fahrzeugen auf Basis der kognitiven Ergonomie, ein genauso leistungsfähiges Werkzeug zu erhalten, wie dies RAMSIS seit Anfang der 1990er Jahre für die anthropometrische Ergonomie ist.

1.3 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit

Die Arbeit beginnt in Kapitel 2 mit einer komprimierten Beschreibung des visuellen Wahrnehmungsprozesses des Menschen. Dabei werden vor allem die Funktionsweisen und speziellen Eigenschaften beschrieben, die eine besondere Bedeutung für die visuelle Wahrnehmung als Autofahrer besitzen.

In Kapitel 3 werden die visuellen Anforderungen an Fahrer und Fahrzeug beschrieben, die durch die Aufgabe des Führens eines Kraftfahrzeugs hervorzuheben sind. Dabei wird neben der Beschreibung von Kriterien und Definitionen der Sicht auch auf die Diskussion von derzeitigen Defiziten näher eingegangen. Die Notwendigkeit der Auseinandersetzung mit dem Thema wird daraus deutlich.

Die Projektierung von neuen Anwendungsfunktionen in RAMSIS für die Auslegung von Fahrzeugen wird in Kapitel 4 beschrieben. Existierendes ergonomisches Lehrbuchwissen wird in praktische Auslegungsmethoden für die Gestaltung von Fahrzeugen umgesetzt. Der Anwendungszweck und Nutzen der jeweiligen Auslegungsmethode wird dort erläutert. Durch die Realisierung in RAMSIS stehen diese Funktionen den auslegenden Ergonomen für den praktischen Einsatz zur Verfügung. Darüber hinaus wird dem Nutzer nun die parametrische Erzeugung von einfacher Umgebungsgeometrie ermöglicht.

Besondere Konstellationen der Sichtverdeckung in dynamischen Verkehrssituationen werden in Kapitel 5 theoretisch untersucht. Die konflikträchtigen Verkehrssituationen Kurvenfahrt, Kreuzungsannäherung und Kreisverkehr werden auf Ihre Kritikalität durch Sichtverdeckung durch die A-Säulen analysiert. Die gebräuchlichen Messverfahren der A-Säulen-Verdeckung werden einem kritischen Vergleich unterzogen. Einerseits sind in diesem Kapitel bereits Anwendungsbeispiele für die praktische Verwendung von RAMSIS-Funktionen beschrieben. Bisher stand in der Anwendung von RAMSIS stets die Mensch-Maschine-Schnittstelle im Fokus der Auslegung. Hier wird besonders deutlich, dass auch bei der fahrzeuergonomischen Auslegung mit kogni-



tiven Aspekten die Betrachtung aller drei Elemente des gesamten Regelkreises Fahrer-Fahrzeug-Umgebung eine wesentliche Rolle spielt.

Zwei experimentelle Untersuchungen der Situationen Kurvenfahrt und Kreuzungsannäherung im Fahrsimulator in Kapitel 6 ergänzen die theoretischen Betrachtungen. Dabei wird besonders die Kompensationsfähigkeit der Fahrer beobachtet und untersucht in welcher Weise sie die theoretische Gefährdung durch Kompensationsverhalten abmildert.

Diskussion und Ausblick beleuchten in Kapitel 7, welche Aspekte des Blickverhaltens beim Fahren durch diese Arbeit erklärt werden können und welche offenen Punkte noch weiterhin nach einer Beantwortung verlangen.

Kapitel 8 fasst die Arbeit abschließend zusammen.



2 Visuelle Wahrnehmung des Menschen

In diesem Kapitel werden die zum Verständnis der weiteren Arbeit erforderlichen Grundlagen der visuellen Wahrnehmung (Perzeption) erläutert. Dabei wird neben dem menschlichen Wahrnehmungsprozess, der Kognition, speziell der Ablauf und die Funktionsweise der beteiligten Organe Auge und Gehirn in gesundem Zustand beschrieben. Außerdem werden natürliche Wahrnehmungsphänomene erläutert, die trotz einwandfreier Funktion unbemerkt zu Einschränkungen oder sogar Fehleinschätzungen der menschlichen Kognition führen können. Eine unbekannte Rolle spielt in Bezug auf die Fahrzeugführung die Augendominanz.

2.1 Beschreibung des Prozesses der visuellen Wahrnehmung

Der Mensch besitzt die Fähigkeit, mit Hilfe seiner Augen als optisches Sensorsystem das Licht der Umgebung zu erfassen und sich damit einen subjektiven Eindruck von der geometrischen Beschaffenheit seiner Umwelt zu machen. Obwohl der Mensch noch über acht weitere Sinne zur Erfassung von Reizen unterschiedlicher Modalitäten aus der Umgebung verfügt, so stellt das Sehen im allgemeinen den wichtigsten Wahrnehmungskanal dar. Die überwiegende Zahl der menschlichen Tätigkeiten wird über das Sehen kontrolliert. In der Literatur bei *Grandjean* (1991, S.230-231), *Rockwell* (1972, S.150) und *Hill* (1980) wird durchweg der Anteil des Sehens an der Informationsaufnahme beim Autofahren mit ca. 90% beziffert. *Sivak* (1996) hinterfragt die Verbreitung dieser vermeintlich präzisen numerischen Angabe kritisch, bestätigt jedoch die hohe Bedeutung der visuellen Wahrnehmung im Grundsatz. 80% des menschlichen Gehirns befassen sich nach *Malaka* (2006) mit dem Sehen und 70% der Sinneszellen des menschlichen Körpers sind Teil des Sehapparates.

Das Modell des Wahrnehmungs- oder auch Kognitionsprozesses nach *Rasmussen* (1996; auch Rasmussen et al., 1993) gliedert sich in folgende Schritte:

In der Umgebung entstehende Signale können als Reiz (stimulus) auf einen anwesenden Menschen wirken. Bei diesem erfolgt eine **Informationsaufnahme** oder Perzeption über einen Sinneskanal, dessen Rezeptor den Reiz erfassen kann. Danach erfolgt die **Informationsverarbeitung**. Dabei wird eine Selektion und Interpretation der Information mittels bewusster und unbewusster Prozesse vorgenommen. An-

schließlich kann eine **Informationsumsetzung** mittels Sprache oder Motorik erfolgen. Dabei findet auch eine Adaption oder Modifikation der Information statt. Das Resultat sind gegebenenfalls Wirkungen oder Handlungen des Menschen auf seine Umgebung (Abbildung 2-1).

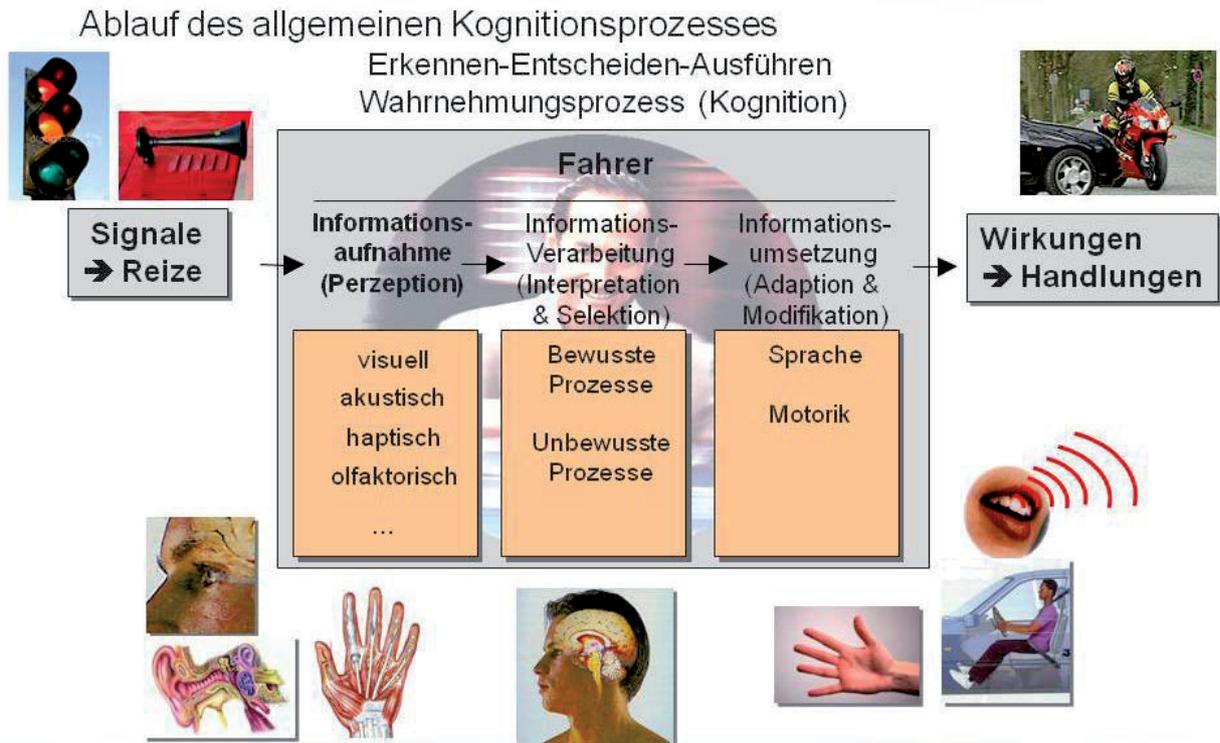


Abbildung 2-1: Wahrnehmungsprozess

Die visuelle Wahrnehmung (Perzeption) lässt sich hinsichtlich ihres Ablaufes in zwei Schritte teilen. Der erste Schritt beinhaltet die optisch-physiologische Rezeption der Lichtsignale durch das Auge. Im zweiten Schritt werden die vom Auge in elektronische Impulse der Nerven umgewandelten Signale durch psychische Prozesse des Gehirns aufbereitet und vorverarbeitet. Erst danach erfolgt die eigentliche Informationsverarbeitung im Sinne eines Entscheidungsprozesses. Somit findet das Sehen nicht nur im Auge sondern zu einem wesentlichen Teil im Gehirn statt. Kapitel 2.3 erläutert diesen psychologischen Anteil des visuellen Wahrnehmungsprozesses.



2.2 Funktion des Auges

Das menschliche Auge (*bulbus oculi*) hat eine annähernd kugelförmige Gestalt mit ca. 24 mm Durchmesser. Es ist in der Lage, elektromagnetische Strahlung im Bereich der Wellenlängen von 380nm bis 780nm, die als sichtbares Licht bezeichnet wird, mittels eines photochemischen Prozesses in elektrische Nervenimpulse umzuwandeln. Die optische Abbildungsfunktion des Auges ähnelt weitgehend dem Funktionsprinzip einer klassischen Fotokamera. Das von einem Objekt abstrahlende Licht tritt durch die Hornhaut (*cornea*) in die mit Kammerwasser (*humor aqueus*) gefüllte Pupille des Auges ein. Die eintretende Lichtmenge wird durch die dahinter liegende Regenbogenhaut (*iris*) in der Funktion einer Ringblende dynamisch reguliert (*Adaptation*). Der Durchmesser des erzeugten Sehlochs (*Pupille*) kann im Bereich von 2 mm bis 8 mm variieren und damit die einfallende Lichtmenge um den Faktor 16 verringern. Der Verlauf des Lichtes geht weiter durch die vom ringförmigen Akkomodationsmuskel (*musculus ciliaris*) verformte Linse (*lens cristallina*) und die gallertartige Flüssigkeit des Glaskörpers (*corpus vitreum*) bis auf die Netzhaut (*retina*) auf der Hinterseite des Auges. Die Netzhaut bildet die Abbildungsebene des optischen Systems. Die Verformung der Linse ermöglicht die Fokussierung des Bildes in Abhängigkeit vom Objektabstand. Das gesamte Auge besitzt einen Brechwert von 58-59 Dioptrin ($f=17\text{mm}$ Brennweite). Die bikonvexe Linse erreicht 19 dpt, die Hornhaut 43 dpt Brechwert. Der Aufbau des Auges ist in Abbildung 2-1 wiedergegeben.

Auf der Netzhaut befinden sich zwei Arten von Fotorezeptoren, die so genannten Stäbchen (*radii*) und Zapfen (*coni*). Die insgesamt 6-7 Mio. Zapfen gliedern sich in die drei Typen Long (L), Middle (M) und Short (S), die ihre jeweils größte Sensibilität in verschiedenen Wellenlängenbereichen besitzen und uns ihre Anregung in den Farben Rot, Grün und Blau vermitteln. Die lichtsensibleren über 120 Mio. Stäbchen erzeugen ein unbuntes, als schwarz-weiß empfundenes Bild und sind besonders für das Sehen bei geringerer Helligkeit und die Wahrnehmung von Bewegung von Bedeutung. Nach neueren wissenschaftlichen Arbeiten nach Gall (2004) wird noch eine dritte Art von Fotorezeptoren im unteren Bereich des Auges vermutet, die sensibel auf blaue Anteile des Lichtes reagieren und den circadianen Rhythmus (organischer Tagesrhythmus) des Menschen beeinflussen. Auf diese Sensorik wird hier nicht weiter eingegangen.

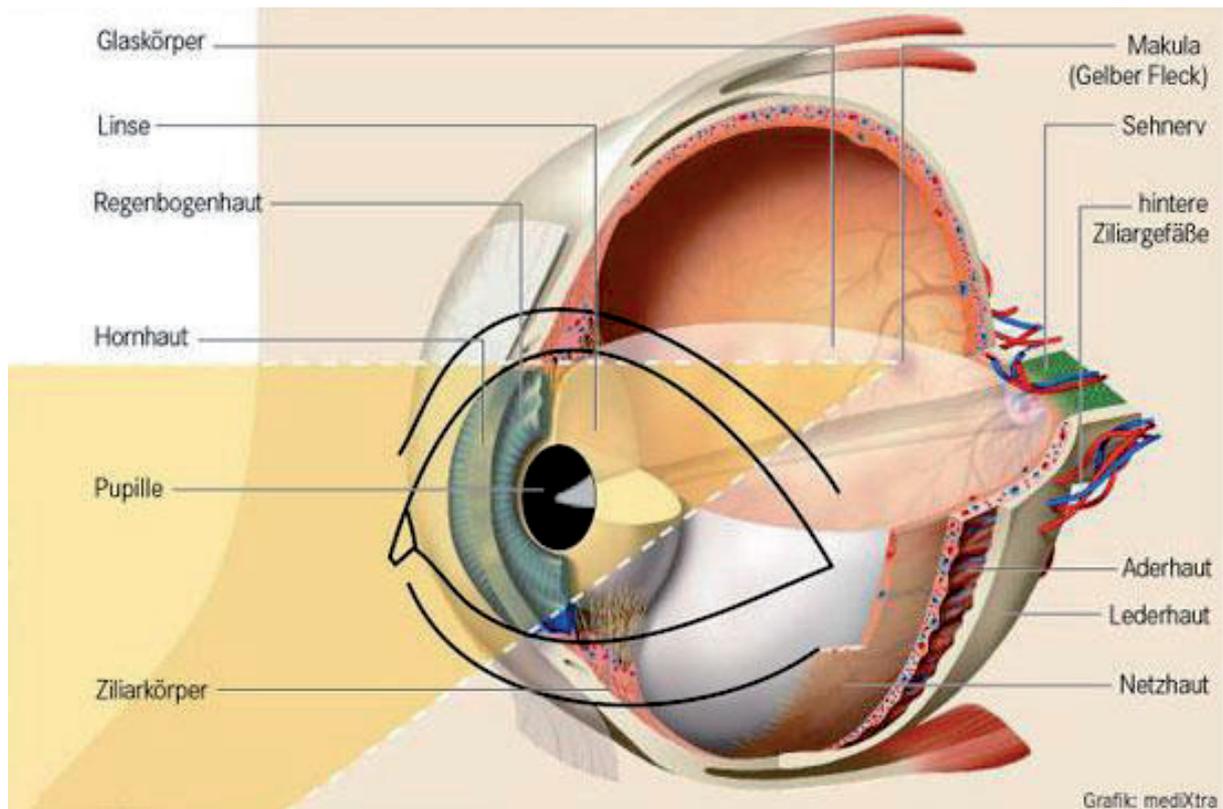


Abbildung 2-1: Aufbau des menschlichen Auges (Quelle: medXtra)



Abbildung 2-2: Qualitative Darstellung der retinalen Sehschärfe (Quelle: Helmert & Marx)



Die Anordnung der Rezeptoren auf der Netzhaut ist sehr unterschiedlich verteilt. Im zentralen Bereich der Hinterfläche des Auges befindet sich die Netzhautgrube, der so genannte Gelbe Fleck (macula). In ihr liegt in einer kleinen Ausdehnung von 0,5 mm Durchmesser ($1^{\circ}40'$) eine hohe Dichte von Zapfen (ca. 10.000 / mm^2), jedoch keine Stäbchen. Nur damit ist scharfes Sehen, auch zentrales oder foveales Sehen genannt, in Richtung der zentralen Sehachse oder auch Fixationsachse möglich. Die daraus resultierende maximale Sehschärfe wird in Kapitel 4.2.4 beschrieben.

Die Anzahl der Zapfen verringert sich deutlich zum Rand der Fovea und weiterhin bis zur Peripherie der Retina. Außerhalb der Fovea ist die Retina außerdem mit den Stäbchen besetzt, deren Dichte am Rand der Fovea am größten ist. In einem Winkelbereich von 1° bis 40° ist damit eine unscharfe Bildwahrnehmung möglich. Im Winkelbereich von 41° bis 70° ist vorwiegend nur eine Bewegungswahrnehmung durch Kontrastveränderungen vorhanden. Abbildung 2-2 stellt diese Schärfeunterschiede in ihrer prinzipiellen Wirkungsweise dar.

Das unterschiedliche Auflösungsvermögen der verschiedenen Netzhautbereiche beruht nicht nur auf einer unterschiedlichen Verteilung und Dichte der Fotorezeptoren. Auch die Anbindung der Fotorezeptoren an die Nervenbahnen ist unterschiedlich. Je nach Zapfentyp und Stäbchen sorgen in den Sehzellen leicht unterschiedliche Varianten des Sehpigment-Moleküls namens Rhodopsin, zusammengesetzt aus dem Protein Opsin und dem Vitamin Retinal, für eine fotochemische Umwandlung der Lichtenergie in elektrische Nervenimpulse.

Während jeder Zapfen in der Netzhautgrube jeweils einzeln mit einer Nervenfaser verbunden ist, sind im Übrigen Bereich der Retina jeweils sechs Zapfen und 120 Stäbchen mit einer Nervenfaser, der so genannten Ganglienzelle, verbunden. Diese Verschaltung führt dazu, dass einerseits die Auflösung des Sehens im peripheren Bereich zusätzlich verringert wird. Andererseits sorgt diese Verschaltung dafür, dass die Empfindlichkeit der Rezeptoren ca. 500-mal höher ist, als im zentralen Bereich der Netzhaut. Diese beiden unterschiedlichen Qualitäten der Netzhautbereiche für die optische Wahrnehmung bilden faktisch zwei kombinierte Sehsysteme. Diese korrespondieren mit der vom Menschen praktizierten Blickstrategie, die im folgenden Kapitel 2.3 erläutert wird.



Von den insgesamt rund 130 Mio. Fotorezeptoren werden etwa 1,6 Mio. Nervenfasern abgeleitet, die als Bündel von 1,8 mm Durchmesser (6°) durch die Netzhaut aus dem Auge nach hinten austreten. An dieser Stelle besitzt die Netzhaut keine Rezeptoren. Sie wird deshalb auch Blinder Fleck (papilla nervi optici) genannt und liegt ungefähr 4,5 mm bzw. 15° nasal neben der Sehachse.

Das Auge besitzt die Möglichkeit, sich innerhalb eines großen Bereiches an unterschiedliche Leuchtdichten zu adaptieren. Neben der schnellen Veränderung der Irisöffnung ist dem Auge auch eine langsamere fotochemische Anpassung der Rezeptoren möglich. Trotzdem besitzen die Zapfen und Stäbchen hinsichtlich der Leuchtdichte unterschiedliche Arbeitsbereiche. Während bei Leuchtdichten über 10 cd/m^2 nur die Zapfen sensieren (photopisches Sehen), können unter $0,01 \text{ cd/m}^2$ nur die Stäbchen reagieren (skotopisches Sehen). Im Bereich dazwischen arbeiten beide Rezeptorarten (mesopisches Sehen).

Das kugelförmige Auge befindet sich umhüllt von seiner Lederhaut (sclera) beweglich eingebettet in einem Fettpolster in der knöchernen Augenhöhle (orbita). Die Bewegung des Auges wird durch sechs tangential angreifende Muskeln vorgenommen. Der so genannte mechanische Augendrehpunkt liegt inmitten des Auges, etwa 13,5 mm hinter der Hornhautvorderfläche. Um diesen Punkt kann das Auge einwärts, auswärts, aufwärts und abwärts, nach innen und außen rotieren. Weist die Fixationsachse des Blicks geradeaus ins Unendliche, so gilt dies als Nullblickrichtung. Die Wirkung des Bewegungsbereiches auf den räumlichen Sichtbereich wird in Kapitel 4.2.1 ausführlicher beschrieben. Die Position der Augen im Kopf des Menschen ist frontal ausgerichtet. Nur dadurch ist eine teilweise Überlagerung der Gesichtsfelder beider Augen mit einem großen Bereich des binokularen und dadurch dreidimensionalen Sehens möglich. Diese Eigenschaft ist evolutionshistorisch typisch für jagende Säugetiere. Fluchttiere besitzen dagegen eine laterale Anordnung der Augen mit einem größeren Gesichtsfeld und deutlich geringerer oder keiner Überdeckung der Gesichtsfelder. Die Entwicklung des räumlichen Sehens ging vor ca. 75 Mio. Jahren einher mit der Entwicklung der menschlichen Hand, charakterisiert durch den opponierenden Daumen, und die Ausbildung der Großhirnrinde zur Verarbeitung der visuellen Perzeption und Steuerung der manuellen Motorik.



Der Aufbau der beiden Augen ist spiegelbildlich identisch. Ihr horizontaler Abstand ist statistisch normalverteilt und beträgt für Männer zwischen 58 und 72 mm, durchschnittlich 65 mm, für Frauen zwischen 56 und 70 mm, durchschnittlich 62 mm.

Aufbau und Funktion des Auges werden beschrieben in *Boff & Lincoln* (1988) *Grandjean* (1991, S.229-240), *Schmidtke* (1993, S.28-36), *Luczak* (1998, S.87-94), *Goersch* (2000, S.65-112), *Gegenfurtner* (2005) und *Shubin* (2008)

2.3 Funktion des Gehirns für die visuelle Wahrnehmung

Der im Folgenden beschriebene Ablauf des Visuellen Wahrnehmungsprozesses ist in Abbildung 2-4 wiedergegeben. Abbildung 2-3 zeigt dazu die anatomischen Verhältnisse. Die beiden aus den Augen austretenden Stränge von Nervenfasern, die jeweils als optischer Nerv (*nervus opticus*) bezeichnet wird, verlaufen ins Innere des Schädels und kommen dort an der Sehnervenkreuzung (*chiasma opticum*) zusammen. Dort erfahren die Sehnervenstränge eine veränderte Aufteilung. Die Nervenstränge der beiden jeweils rechten Netzhauthälften, die das linke Gesichtsfeld auf dem Kopf stehend abbilden, verlaufen weiter zur rechten Gehirnhälfte. Die Nervenstränge der linken Netzhauthälften des rechten Gesichtsfeldes führen ebenso weiter zur linken Gehirnhälfte. Etwa 90% der Sehnervenstränge dieser linken und rechten Sehbahnen oder Sehstränge führen weiter zu den beiden seitlichen Kniekörpern (*corpus geniculatum laterale*) im Zwischenhirn (*thalamus*). Die übrigen 10% führen direkt zum Hypothalamus, um Kopf- und Augenbewegung sowie Akkomodations- und Pupillenreflex zu steuern. Von den Kniekörpern führen auf beiden Seiten durch das Gehirn Sehstrahlen (*radiatio optica*) in Form von Nervenfasern zur linken und rechten Sehrinde (*visueller cortex*) des Großhirns im Bereich des Hinterkopfes. Dort erfolgt in enger Verbindung zu höheren kortikalen Ebenen die Verarbeitung der visuellen Informationen. Die Verarbeitung dieser Informationen erfolgt in der gleichen räumlichen Lage zueinander wie die Abbildung auf der Netzhaut erfasst wurde. Dies bezeichnet man als *retinotop*. Dabei beanspruchen die inneren 10° Sichtbereich des Auges mit 2% der Netzhautfläche ca. 50% des visuellen Cortexes. Mit Hilfe dieser räumlichen Strukturierung im Gehirn können die beiden wesentlichen Komponenten der optischen Wahrnehmung in Zusammenhang gesetzt werden, nämlich die räumliche Lokalisation eines Objektes zu seinen optisch-geometrischen Eigenschaften.

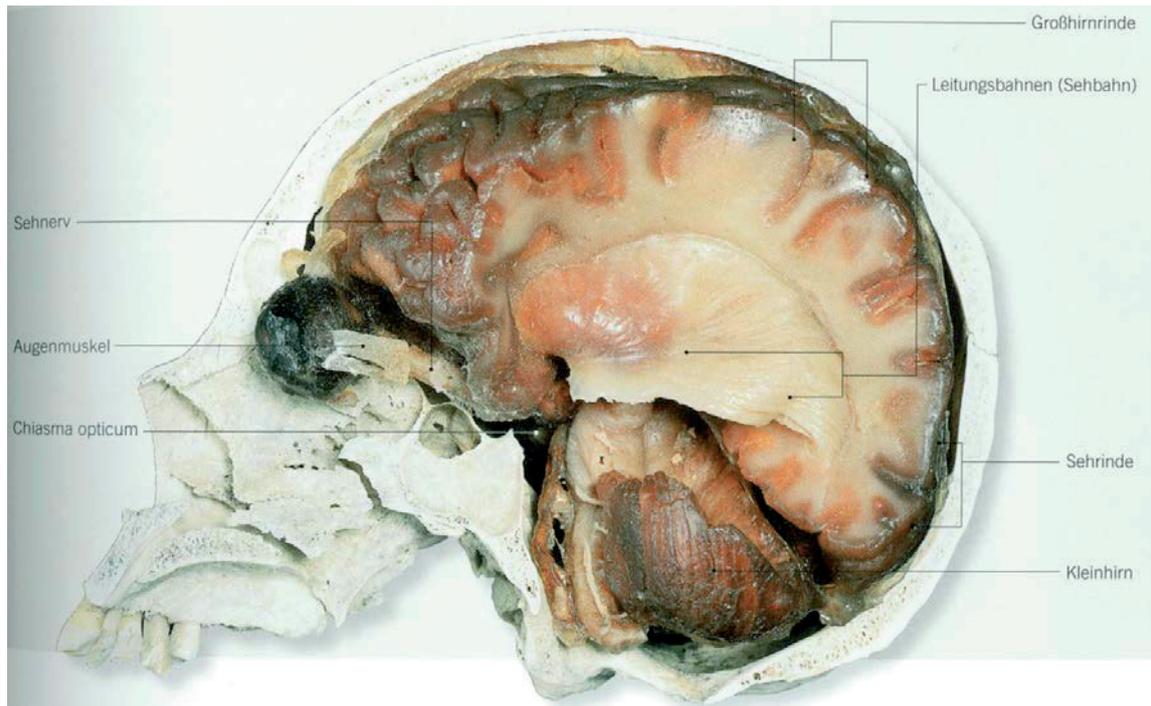


Abbildung 2-3: Präpariertes Gehirn in eröffnetem Schädel mit Sehleitungsbahnen in Seitenansicht (Quelle: von Hagens & Whalley, 2009)

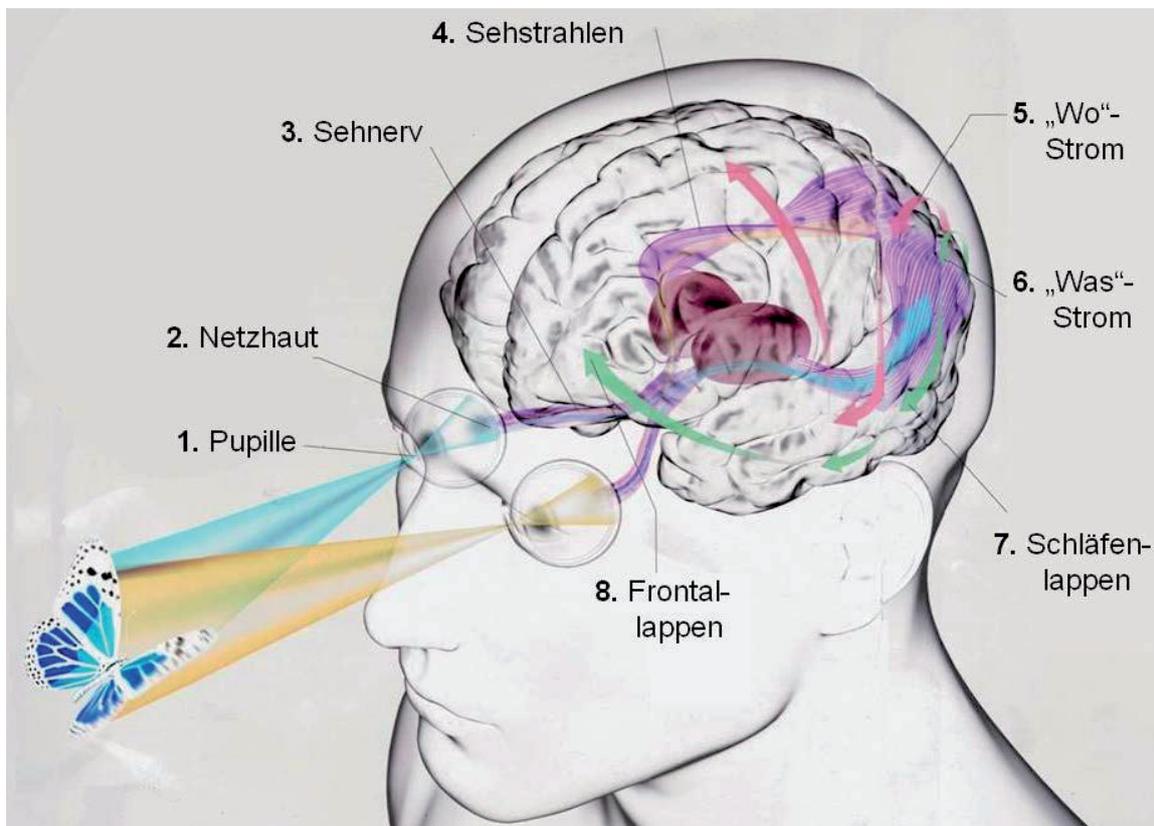


Abbildung 2-4: Visueller Wahrnehmungsprozess (modifiziert nach Carter, 2010)

Bei der Weiterleitung der Sehstrahlen von den Kniekörpern in die Sehrinde erfolgt eine Aufteilung der Informationen in sechs Schichten. In den beiden Sehrinden des



Großhirns sind diese sechs Schichten übereinander angeordnet. Je drei Schichten verarbeiten Informationen des linken Auges, die drei anderen die des rechten Auges, so dass durch die Überlagerung zweier Schichten, jeweils einer jeden Auges, ein direkter Informationsvergleich der beiden Augen stattfinden kann. Die Aufgaben der drei Schichtenpaare sind unterschiedlich. Während in den beiden oberen Schichten die Wahrnehmung der Position und der Bewegung detektiert wird, findet in den vier weiteren Schichten die Verarbeitung von Form, Muster und Farbe statt. Hier erfolgt eine erste Verarbeitungsstufe der visuellen Information. Dabei wird die Erkennung von Ecken und Kanten vorgenommen.

Die Weiterleitung der Bewegungs- und Objektdaten zur Weiterverarbeitung in einer zweiten Stufe erfolgt über zwei unterschiedliche Wege. Die Bewegungs- und Positionswahrnehmung wird auf dem so genannten „Wo-Strom“ auf einem dorsal-parietalen Pfad zum Scheitellappen (Parietalkortex) weitergeleitet. Die Farb-, Muster- und Formwahrnehmung wird auf dem „Was-Strom“ über den ventral-temporalen Pfad zum unteren Schläfenlappen (Temporalkortex) geführt. In der zweiten Stufe erfolgt die Erkennung von Strukturen mittlerer Komplexität und zusammengehörigen Gruppen. In einer dritten Stufe wird eine Objekterkennung unter starker Beeinflussung durch Aufmerksamkeits- und Gedächtnisprozesse vorgenommen. Elemente und Objekte, die bereits früher erkannt und abgespeichert wurden, unterstützen die Bilderkennung maßgeblich.

Auf allen Komplexitätsebenen existieren spezialisierte Filter zur schnellen Verarbeitung der visuellen Informationen. Erst nach dem Durchlaufen dieser Vorverarbeitungsprozesse erreichen die visuellen Informationen das bewusste Denken im Frontallappen des Gehirns und beeinflussen damit die Handlungsprozesse des Menschen. Dort treffen der Was-Strom und der Wo-Strom, die parallel zueinander verarbeitet wurden, wieder zusammen. Die visuelle Wahrnehmung besteht untrennbar aus Objektklassifizierung und Lokalisierung. Diese spezialisierten Filter zur schnellen Verarbeitung der visuellen Informationen haben sich im Laufe der Evolution des Menschen auf optische Eigenschaften der Umwelt angepasst, die unseren Vorfahren Vorteile im täglichen Überlebenskampf in der Natur verschafften. Die Kantendetektion wurde bereits genannt. Gemeinsam mit einer Linienfortführung unterstützt sie die optische Strukturierung des gesehenen Umfeldes in vielfacher Hinsicht. Durch sie wird die Abgrenzung von Objekten gegenüber dem jeweiligen Hintergrund auch dann



möglich, wenn keine Unterschiede in Farbe oder Struktur vorhanden sind, also speziell in widrigen Sichtbedingungen wie Dämmerung oder bei quasi ‚getarnten‘ Objekten. Das Sehen nutzt diese Kanten und Linien auch um die Bildinhalte zu gruppieren, Objekte gegen ihren Hintergrund abzusetzen und so im Gehirn Zusammengehörigkeit und Differenzierung zu interpretieren. Unterbrechungen der Kanten und Linien werden dabei vom Gehirn sinnvoll ergänzt.

Die Ausnutzung von Schattenwirkung, räumlicher Staffelung und Größenabschätzung vermittelt uns einen verlässlichen Tiefeneindruck auch außerhalb des Entfernungsbereiches des Stereo-Sehens. Grundlage für die Einschätzung der Objektgröße bildet dabei vor allem der Größenvergleich innerhalb einer Szene oder eine erfahrungsbasierte Größenabschätzung. Naturgesetze wie die Richtung des natürlichen Lichtes von schräg oben und die schwerkraftbedingte Lage eines ruhenden Körpers auf einer Basis sind solche Vergleichsgrößen, die der Interpretation unbewusst zu Grunde gelegt werden.

Die Erkennung von Farbkontrasten hebt einzelne Objekte wie beispielsweise Blüten und Früchte signalartig hervor. Die Silhouetten und Gesichter von Lebewesen sind hinsichtlich Ihrer Muster für den Menschen aufgrund spezialisierter Gehirnzellen besonders gut zu erkennen. Dies funktioniert bei Gesichtern und auch Händen von Artgenossen in herausragender Weise. Hier genügen bereits wenige aber markante optische Merkmale, um das Gesicht eines Artgenossen als solches zu erkennen.

Diese Informationsverarbeitung erfolgt ständig, aber nur für den Bereich des fovealen Sehens des Auges. Um jedes Objekte im Umfeld des Betrachters ansehen zu können, ist eine entsprechende Bewegung der Augen mit Ausrichtung der Augachsen auf das Blickobjekt erforderlich. Einerseits erfolgt dies aufmerksamkeitsinduziert auf Blickobjekte, die dem Betrachter bereits bekannt sind, und gezielt von ihm angesehen werden wollen. Andererseits kann dieses Blickverhalten ebenso reizinduziert aktiviert werden. Die auf Reize reagierenden Augenbewegungen (Sakkade) springen in schneller Folge zwischen verschiedenen Objekten im Gesichtsfeld, deren optische Eigenschaften das Gehirn zu einem kurzen Kontrollblick herausgefordert haben.

Um für die Blickzuwendung Reize zu erhalten, nutzt das Gehirn sein zweites Blicksystem neben dem des fovealen Sehens, das periphere Sehen. Während die Bildverarbeitung des fovealen Sehens nahezu kontinuierlich das bewusste Denken er-



reicht, erfolgt das periphere Sehen ausschließlich unterbewusst. Sensorisch werden die Signale der Stäbchen und Zapfen außerhalb der hochauflösenden Sehgrube (Fovea) verarbeitet. Bedingt durch die geringe Auflösung dieser Netzhautbereiche kann nur eine schnelle Kontraständerung auf der Netzhaut einen Reiz für das periphere Sehen bewirken. Die Ursache für eine schnelle Kontraständerung kann in der Natur nur in einer Bewegung in der Umgebung liegen, zumeist verursacht durch ein Lebewesen oder auch durch Wind und Wetter. In der natürlichen Umgebung unserer Ahnen ging diese Bewegungswahrnehmung zumeist von einem potentiellen Beutetier oder durch einen Jäger aus, für den man selbst eine mögliche Beute darstellte. In jedem Fall also ein lebenswichtiger Grund für eine schnelle Wahrnehmung und Reaktion.

Kontraständerungen durch die Lichttechnik sind historisch erst seit der Nutzung von künstlichem Licht möglich. Der visuelle Reiz durch Kontraständerung im Bereich des peripheren Sehens entsteht immer, wenn diese Kontraständerung auf der Netzhaut lokal begrenzt ist, etwa durch die Größe des bewegten Objektes. Erfährt dagegen der gesamte Augenhintergrund eine regelmäßige Veränderung der Kontraste, so wird dies vom Gehirn als Bewegungswahrnehmung interpretiert. Man spricht bei dieser Bildveränderung vom optischen Fluss. Auf diese fließende Kontraständerung reagiert das Auge nicht mit einem Blicksprung. Dieser optische Fluss ist für den Menschen die präziseste Möglichkeit seine eigene Bewegung relativ zur Umgebung zu erfassen. Abbildung 2-5 verdeutlicht einen solchen optischen Fluss in Form einer Bewegung im Straßenverkehr.

Der optische Bewegungseindruck wird mit der kinästhetischen Wahrnehmung des Innenohrs, die eine deutlich gröbere Information vermittelt, kontinuierlich abgeglichen. Typische Muster des optischen Flusses sind das Auseinander- bzw. Zusammenfließen, die Translation oder Rotation der Bildinformationen auf der Netzhaut.

Ist nach einem optischen Reiz eine Blickzuwendung auf ein bewegtes Objekt erfolgt, so nimmt das Gehirn unwillkürlich eine Lokalisierung des betrachteten Objektes in drei Dimensionen relativ zur eigenen Position des Betrachters vor. Diese Form der Lokalisierung kann in Form eines besonderen Polarkoordinatensystems dargestellt werden, den Hering-Koordinaten, wie Abbildung 2-6 zeigt.

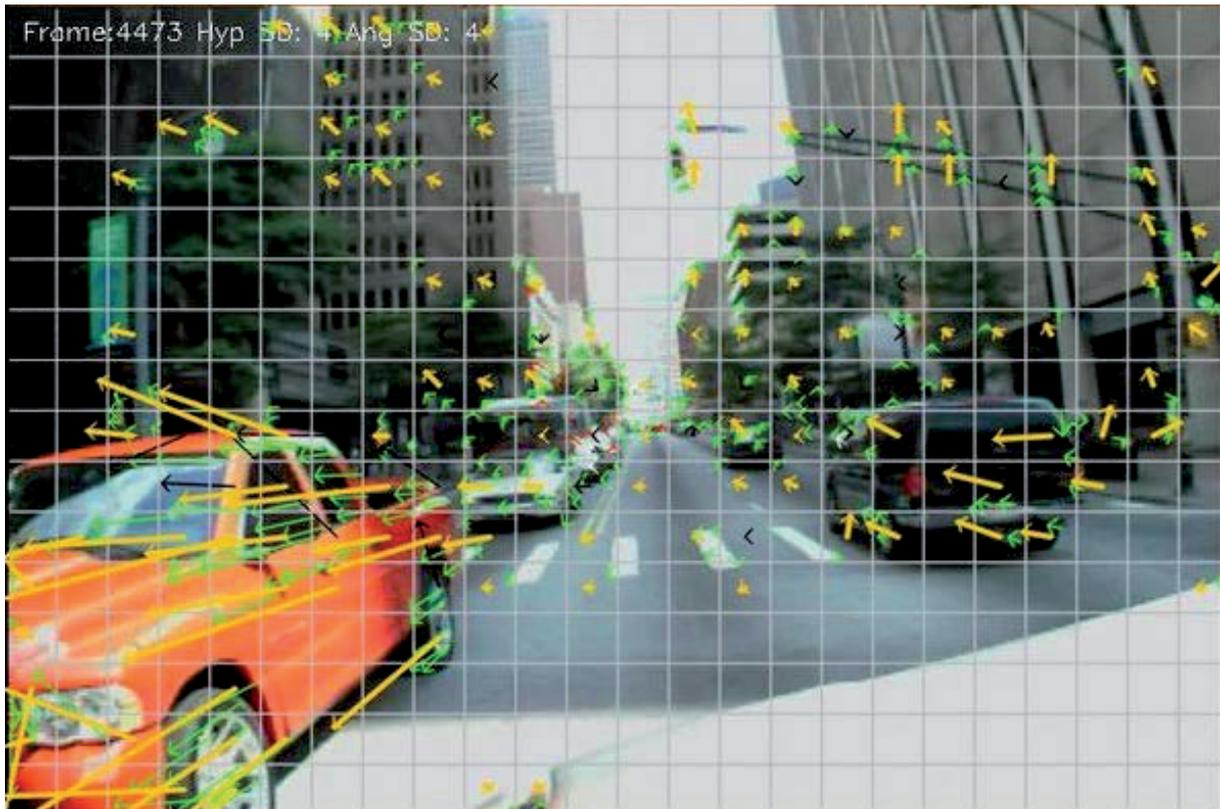


Abbildung 2-5: Optischer Fluss im Straßenverkehr (Quelle: DARPA)

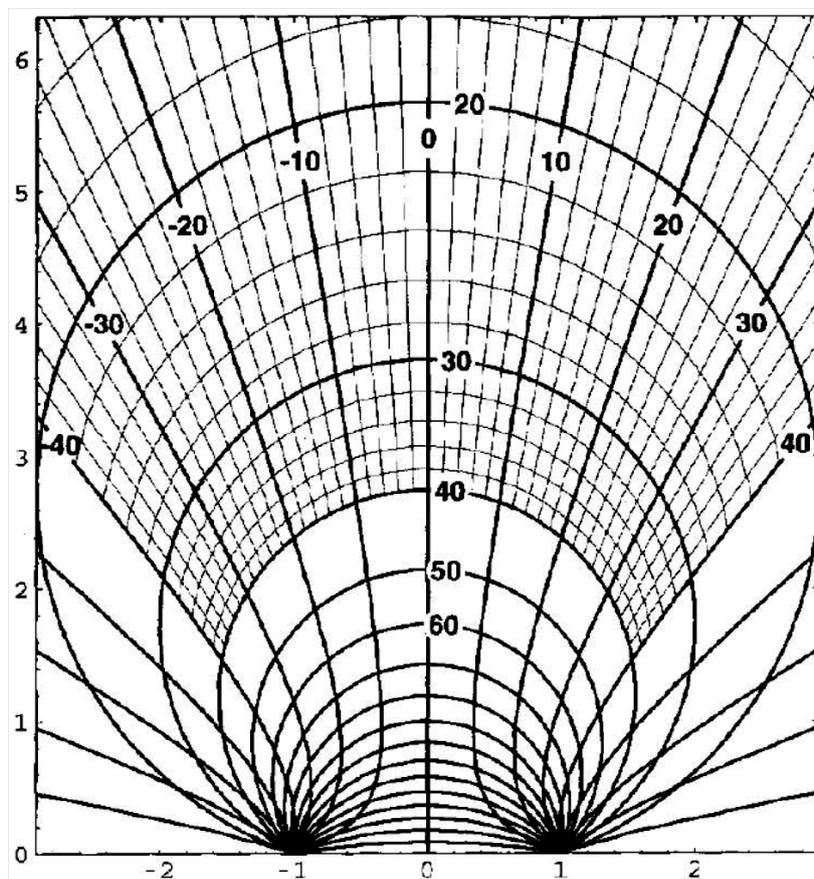


Abbildung 2-6: Hering-Koordinatensystem in der Sehebene (Quelle: Behnisch 2005)



In diesem Koordinatensystem kann für die Ausrichtung der beiden Augachsen in einer Ebene die beiden Dimensionen Version und Vergenz bestimmt werden. Dabei bezeichnet die Version die mittlere Blickrichtung der beiden Augachsen zum Kopf. Die Vergenz gibt die Ausrichtung der beiden Augachsen zueinander an. Die Linien gleicher Version und variabler Vergenz werden Hillebrandt-Hyperbeln bezeichnet. Die Linien gleicher Vergenz, aber unterschiedlicher Version sind die so genannten Vieth-Müller-Kreise, die auch als Horopter bezeichnet werden. Die beiden Augen bilden die Knotenpunkte, durch die alle Linien (Hillebrandt-Hyperbeln und Vieth-Müller-Kreise (Horopter) laufen.

Die Vergenz, also die unterschiedliche Blickrichtung auf ein Objekt aus zwei Positionen, wird auch als Parallaxe bezeichnet. Wenn der Abstand der beiden Beobachtungspunkte bekannt ist, kann aus der Vergenz der Abstand des Objektes trigonometrisch berechnet werden. Dieses Prinzip wurde beispielsweise bei Scherenfernrohren von Artilleriebeobachtern verwendet.

Die vertikale Richtung der Augachsen, die bei polaren Koordinatensystemen allgemein als Elevation bezeichnet wird, bildet die dritte Dimension der Ortsbestimmung. Somit ermittelt das Gehirn des Betrachters eine dreidimensionale Position des fixierten Objektes aufgrund der Aktivität von Augen- und Halsmuskulatur.

Während für den von den Augen fixierten Punkt eines Objektes die Ortsbestimmung durch die beschriebene Stellung der Augen und dessen Abbildung auf der Mitte der Netzhaut, in der Fovea, erfolgt, wird gleichzeitig für alle anderen Objekte auf der Netzhaut ebenfalls eine Ortsbestimmung relativ zum betrachteten Objekt vorgenommen. Dies geschieht dadurch, dass alle Objekte, die nicht vom Auge fixiert werden, auf der Netzhaut des linken und des rechten Auges eine unterschiedliche Abbildungsposition besitzen. Diese Differenz der Abbildungsposition wird als Querdisparität oder Querdisparation bezeichnet. Sie wird im Gehirn durch die Überlagerung der Informationen beider Augen mittels der Schichtung im Cortex ermittelt. *Behnisch* (2005) und *Mallot* (2009) erläutern weiterhin wie auf Basis dieser Disparität das Gehirn die dreidimensionale Struktur aller Elemente und Objekte in seinem Gesichtsfeld errechnet und damit das Stereosehen ermöglicht. Mit seiner Hilfe kennt das Auge die Position eines Blickobjektes bereits bevor ein Blicksprung dorthin erfolgt und das Auge führt eine entsprechende Entfernungseinstellung der Linse (Akkommodation) bereits während des Blicksprungs durch.



In der biologischen Evolution des Menschen wurden keine überflüssigen Eigenschaften oder Funktionen herausgebildet, bzw. sie haben sich niemals durchgesetzt. Diese Gesetzmäßigkeit verdeutlicht uns, dass diese aufwändige Mehrfachverarbeitung der Örtlichkeit des gesehenen Objektes eine unverzichtbare Eigenschaft für die visuelle Wahrnehmung des Menschen in seinem natürlichen Lebensraum war.

Das Prinzip der Bildaufnahme aus zwei zueinander bekannten Positionen und Perspektiven und die Berechnung der Raumposition von Objekten aus der Disparität der Abbildungspositionen in den beiden Bildern wird auch in der Photogrammetrie genutzt. Dies ist ein technisches Verfahren der geometrischen Vermessung und der Rückführung von Oberflächendaten in den Computer, dem so genannten Reverse Engineering.

Zusammenfassend kann der Vorgang und die Aufgabe der visuellen Wahrnehmung auf das folgende einfache Modell reduziert werden (nach Krinner):

1. *WO* ist der Betrachter selbst?
2. *WO* ist das betrachtete Objekt?
3. *WAS* ist das betrachtete Objekt hinsichtlich seiner Kategorisierung?
4. *WIE* ist das betrachtete Objekt im Detail beschaffen?

Die Funktion des Gehirns im visuellen Wahrnehmungsprozess wird beschrieben von *Mather* (2009, S.159-381), *Gegenfurtner* (2005), *Goldstein* (2008, S.21-256), *Carter* (2010, S.78-87) sowie *Bartenbach & Witting* (2009, S.51-141).

2.4 Schwächen, Mängel und Fehler der visuellen Wahrnehmung

Die Verarbeitung visueller Informationen im menschlichen Gehirn ist sehr effizient und vor allem sehr schnell. Beides ist unumstritten und hat der Menschheit durch zehntausende von Jahren erfolgreicher Existenz in der Natur verholfen. Die Seheigenschaften und Verarbeitungsfunktionen der visuellen Informationen im Gehirn besitzen jedoch auch einige Schwächen. Diese Schwächen können fehlerhafte Seindrücke vermitteln und als Basis für einen Entscheidungsprozess letztlich sogar zu Fehlhandlungen führen. Die moderne Welt des Menschen ist von nicht-natürlichen Abläufen und Verhaltensweisen durchzogen. Technische Geräte und Fahrzeuge mit



deutlich größeren Fortbewegungsgeschwindigkeiten, als in der Natur möglich, besitzen eine hohe Verbreitung. Diese Sachverhalte erschweren eine korrekte visuelle Wahrnehmung in der heutigen Alltagswelt. Das menschliche Sehsystem hat die Eigenschaft, dass es uns Wahrnehmungssprünge oder -lücken nicht vermittelt, sondern sinnvoll überbrückt und überspielt. Aus diesem Grund fallen uns Sehfehler überhaupt nicht auf, wenn sie ohne Konsequenz bleiben. Kommt es jedoch daraufhin zu einer folgenschweren Fehlentscheidung, können wir uns den Wahrnehmungsfehler als Ursache meist nicht erklären.

Eindrucksvolle und allgemein bekannte Wahrnehmungsfehler werden häufig unter den Begriffen ‚optische Täuschung‘, ‚Illusion‘ oder ‚Springbild‘ vermittelt. Im Folgenden sollen einige beispielhafte Alltagssituationen aus dem Verkehr mit möglichen und wahrscheinlichen Fehlwahrnehmungseffekten erläutert werden:

- Auf Landstraßen und Innerorts kommt es häufig zur Bildung von kleineren Fahrzeugkolonnen von zwei oder mehr Fahrzeugen, da tendenziell schnellere Fahrzeuge zu langsameren Fahrzeugen aufschließen, wenn sie diese nicht überholen können oder wollen. Dabei gleicht sich das Bewegungsverhalten der beiden Fahrzeuge oftmals aneinander an. Die Fahrzeuge bewegen sich in der gleichen Spur, der Abstand ist gering und nahezu konstant und die Beschleunigungs- und Bremsmanöver erfolgen nahezu gleichzeitig. Für jeden Fahrer, der diese Fahrzeuge beobachtet, entsteht dadurch die Gefahr, dass diese Fahrzeuge von seinem Sehsystem unterbewusst zu einem Objekt zusammengefasst werden und dadurch ein weiteres gemeinsames Verhalten für die unmittelbare Zukunft unterstellt wird, vergleichbar dem eines Zugfahrzeugs mit Anhänger. Dafür sorgen Interpretationsstrukturen des Gehirns wie das ‚Gesetz der Nähe‘, hier durch räumliche und zeitliche Nachbarschaft initiiert, und das ‚Gesetz des gemeinsamen Schicksals‘ aufgrund der gleichen Bewegung. Sind aufeinander folgende Fahrzeuge noch vom gleichen Typ oder in der gleichen Farbe, so wirkt noch zusätzlich das ‚Gesetz der Ähnlichkeit‘. *Malaka* (2006) und *Wichmann* (2006, VL6) erläutern diese Gesetzmäßigkeiten. Ein beobachtender Fahrer wird in seinen Planungsüberlegungen für sein eigenes weiteres Tun, der Antizipation, unwillkürlich ein weiteres gemeinsames Verhalten der aufeinander folgenden Fahrzeuge unterstellen. Dies erfolgt in der unterbewussten Vorverarbeitung der visuellen Informationen. Tritt nun



die Variante ein, dass das folgende Fahrzeug gegenüber dem voraus fahrenden Fahrzeug plötzlich stark bremst, so kann der beobachtende Fahrer dies nur mit erheblicher zeitlicher Verzögerung entdecken, da seine Interpretationsmuster die Wahrnehmungsschwelle für abweichende Informationen heraufsetzen. Dieses Wahrnehmungsmuster ist ein naheliegender Ursachenaspekt für Auffahrunfälle und Kollisionen an Kreuzungen und Einmündungen aufgrund menschlicher Fehler.

- Eine Vielzahl von Objekten in einer belebten Verkehrssituation, wie in Abbildung 2-7, oder die Zusatztätigkeit eines Bedienvorgangs innerhalb des Fahrzeugs erzeugen häufige Blicksprünge eines Fahrers. Während eines Blicksprunges bewegt sich das Auge mit einer hohen Geschwindigkeit von etwa $500^\circ/\text{s}$. Während dieses Blicksprunges kann das Auge kein Bild erfassen. Das Gehirn füllt in dieser Zeit diesen ‚schwarzen Abschnitt‘ der bewussten Bildwahrnehmung mit einer Bilderwartung sinnvoll aus, die jedoch nicht auf den realen aktuellen visuellen Daten beruht. Dieser Mechanismus wird als sakkadische Suppression bezeichnet. Je häufiger Blicksprünge stattfinden, desto höher ist auch die Bildausfallrate sowohl für das foveale als auch für das periphere Sehen in diesem Zeitabschnitt. Der visuell hochaktive Fahrer ist sich dieser Vielzahl von Wahrnehmungslücken überhaupt nicht bewusst.
- Verschiedene Untersuchungen haben gezeigt, dass ein Beobachter komplexer Situationen eine Veränderung der Szenerie während einer Beobachtungsunterbrechung häufig überhaupt nicht bemerkt. Dies betrifft nahezu beliebige Objekte, die sich außerhalb des unmittelbaren Interessenbereiches liegt. Für den Fahrer eines Fahrzeuges bedeutet dies, dass während einer Blickunterbrechung, beispielsweise eines Blickwechsels zum Ablesen der Fahrzeuginstrumentierung oder durch die Verdeckung von Spritzwasser auf der Frontscheibe, ein Objekt im Vorfeld des Fahrzeugs hinzugekommen oder sich entfernt haben kann, ohne dies zu bemerken. Eine Veränderung ist vom Betrachter im nur dann festzustellen, wenn er den Vorgang der Veränderung optisch erfassen kann. Dieser auch bei *Dornhöfer* (2004) beschriebene Effekt hat die Bezeichnung Veränderungsblindheit (change blindness).

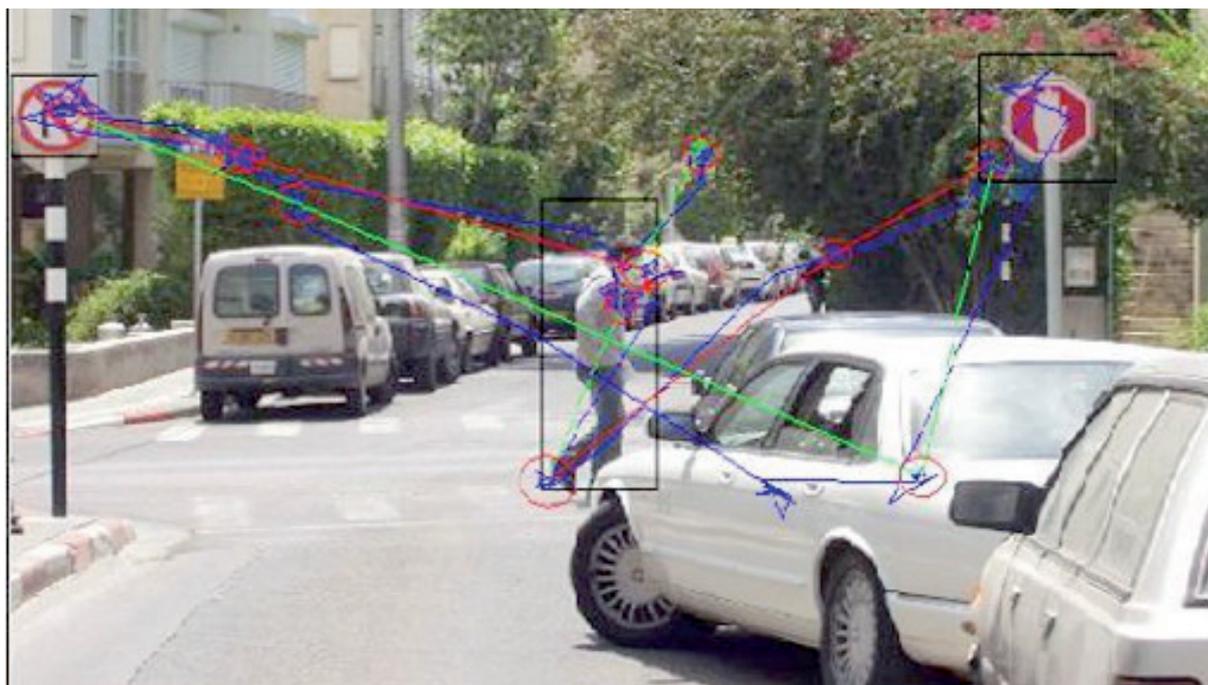


Abbildung 2-7: Belebte Verkehrssituation mit Blicksprüngen
(Quelle: Ben-Gurion-University)



Abbildung 2-8: Verdeckung eines Motorrads durch die A-Säule
(Abbildung modifiziert nach englischer Zeitschrift Bike)



Abbildung 2-9: Abtauchen der Straße in Senken (Quelle: Heise, 2003)

- Eine hohe und andauernde Konzentration auf die Beobachtung eines bestimmten Vorgangs führt dazu, dass die Wahrnehmung von eintretenden Ereignissen oder bewegter Objekte deutlich verspätet erfolgt oder sogar vollständig unterdrückt wird. Das Auge nimmt dieses Ereignis oder Objekt zwar auf, das Gehirn unterdrückt jedoch die Weitergabe an das Bewusstsein. Diese hohe Konzentration auf einen Vorgang kann im Verkehr durch eine übermäßig



hohe emotionale Bedeutung hervorgerufen werden, wie beispielsweise eine Unfallsituation, aber auch eine Verkehrskontrolle oder ein Geschehen abseits der Straße. Dieses Phänomen tritt unweigerlich auch bei Lauftext-, Animations- oder Videofilmanzeigen innerhalb des Fahrzeugs oder am Straßenrand auf. Man spricht bei diesem Vorgang von Unaufmerksamkeitsblindheit (inattentional blindness).

- Sind bei der Betrachtung von geometrischen Objekten deren Konturen teilweise unterbrochen oder verdeckt, so vervollständigt das Gehirn die fehlenden Merkmale sinnvoll. Diese Funktionsweise wird bei *Malaka* (2006) und *Wichmann* (2006) mit dem ‚Gesetz der Geschlossenheit‘ und dem ‚Gesetz der guten Fortführung‘ erklärt. Für einen Fahrer ergibt sich eine solche Sicht beispielsweise durch die Verdeckung der A-Säule oder auch durch die Straßeneinführung. Hierbei gehen viele Fahrer völlig selbstverständlich von einem homogenen Verlauf des Straßenbildes auch zwischen den sichtbaren Bereichen der Straße aus. Straßendecke, Fahrbahnbegrenzungen und Hindernisfreiheit vor und hinter bzw. links und rechts der Verdeckung werden auch uneingeschränkt für den verdeckten Bereich angenommen wie auch die Abbildungen 2-8 und 2-9 suggerieren.
- Bei der unweigerlichen Blickzuwendung auf bewegte Objekte im Blickfeld eines Betrachters wird die Aufmerksamkeit auf andere, durchaus große und kontrastreiche Blickobjekte zurückgenommen. Dieser Effekt ist Prinzip bedingt im menschlichen Wahrnehmungssystem und wird laut *Hesse* (2005, S.90-96) als bewegungsinduzierte Blindheit (motion induced blindness) bezeichnet.

Konkurrieren dagegen zwei oder mehr Objekte um die Aufmerksamkeitszuwendung ähnlicher Ressourcen des Gehirns, so interferieren mehrere Informationsverarbeitungen (crosstalk). Man spricht vom Effekt der geteilten Aufmerksamkeit. Sie führt zu einer reduzierten Verarbeitungskapazität des Betrachters, wie *Guski* (2006, Kap.9) erläutert. Dieser Effekt verdeutlicht die limitierte Leistungsfähigkeit der zuständigen Areale des Gehirns. Eine Aufgabendopplung kann sowohl seitens der verfügbaren Kapazität als auch hinsichtlich einer parallelisierten Verarbeitung nicht flüssig bewältigt werden. Im Alltag bildet dieses Phänomen gerade bei der Fahrzeugführung die Erklärung für typi-



sche Ablenkungseffekte wie beispielsweise durch Gespräche beim Fahren, besonders ausgeprägt beim Telefonieren. Die geistigen Ressourcen, die für die Kommunikation mit Mitmenschen benötigt werden, stehen nicht mehr für die Bewältigung einzelner Fahraufgaben zur Verfügung oder auch umgekehrt bindet die Fahraufgabe geistige Ressourcen, die für ein sinnvolles Gespräch erforderlich wären.

- Wie in Kapitel 2.3 beschrieben hat der optische Fluss eine besondere Bedeutung für die unterbewusste Bewegungswahrnehmung des Menschen. Dieses Wahrnehmungsprinzip führt in der technischen Welt durchaus auch zu Täuschungen bei der Bewegungswahrnehmung. Indem man durch eine breitformatige, den Betrachter umschließende Bildpräsentation eine scheinbare Bewegung des gesamten Umfeldes suggeriert, nimmt der Mensch dies als Bewegung seines eigenen Körpers wahr, obwohl er auf der Stelle verharrt. Dieser Effekt nennt sich Vektion und er wird in 3D-Kinos, Fahr- oder Flugsimulatoren oder auch bei der Virtual Reality Darstellung gezielt eingesetzt. Aber dieser Effekt tritt auch unbeabsichtigt z.B. während einer Bahnfahrt auf (Abbildung 2-10). Häufig ist während eines Halts in einem Bahnhof das gesamte Abteiffenster durch einen anderen Zug auf dem Nebengleis ausgefüllt. Sobald dieser andere Zug, den ein Fahrgast als Betrachter sieht, losfährt, geht er unwillkürlich von einer Bewegung des eigenen Zuges aus, da er ausschließlich eine optische Relativbewegung der Welt draußen vor dem Fenster seines Fahrzeuges wahrnimmt. Die Welt wird laut *Grimm* (2005, Vorlesung 11) als statische Bezugsgröße interpretiert und deshalb aufgrund der Vektion eine Bewegung des eigenen Körpers angenommen.

Dieser Effekt der Vektion kann einen besonderen Einfluss auf das Autofahren in Situationen wie dem Kolonnenfahren neben großen Lkw haben. Dabei wird im Fahrer seine Bewegungswahrnehmung durch den optischen Fluss auf der einen Seite neben ihm maßgeblich durch die geringe Relativbewegung des LKWs geprägt. Da der Lkw unterbewusst als statische Umgebung und nicht als Fahrzeug interpretiert wird, schätzt das Gehirn die Entfernung zum Lkw als deutlich größer ein, als diese tatsächlich ist. Dadurch entsteht nach *Chatziastros* (2003, S.21-72) eine Gefahrentendenz, die Mitte der eigenen Fahrspur tendenziell in Richtung auf

den Lkw hin zu verändern. Abbildung 2-11 verdeutlicht dieses Phänomen durch den Vergleich der unterschiedlichen Vektion der peripheren Sichtgrenzen Schutzwand links und Lkw-Sattelschlepper rechts. Die Längen der Pfeile repräsentieren die relative Geschwindigkeit zum Betrachter. Dabei kann die relative Geschwindigkeit des Lkw noch kleiner und der Einfluss auf die eigene Fahrtspur größer sein, als in der Abbildung dargestellt.

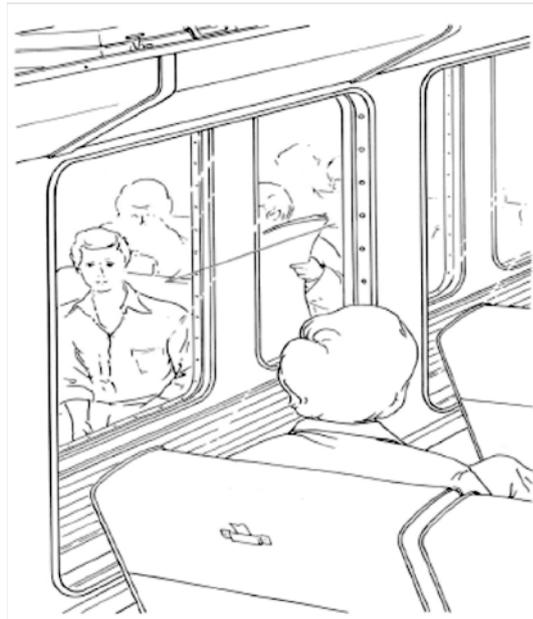


Abbildung 2-10: Vektion beim Blick aus dem Zugabteil (Quelle: Grimm, 2005)



Abbildung 2-11: Visuelles Feld neben einem fahrenden Lkw
(Quelle: Chatziastros, 2003)



2.5 Augendominanz

Die überwiegende Mehrzahl der Menschen besitzt eine einseitig ausgeprägte Bevorzugung einer der beiden Hände, eine so genannte Lateralität. Diese Händigkeit ist gekennzeichnet durch eine höhere feinmotorische Geschicklichkeit und häufig auch durch eine größere Muskelstärke. In der Bevölkerung ist die Händigkeit etwa mit 90% rechtsseitig und 10% linksseitig verteilt. Im Allgemeinen kennt jeder Mensch die Seite seiner Lateralität der Hände. In einigen Fällen werden gebürtige Linkshänder bedingt durch das vorwiegend rechtshändig geprägte Lebensumfeld bewusst oder häufig auch vollkommen unbewusst umgewöhnt. Die Ursache für die Lateralität der Hände ist in einer unterschiedlichen Ausprägung der beiden Gehirnhälften begründet, die die Bewegungen der jeweils gegenseitigen Körperhälfte steuern. Die Dominanz der Hände und Füße ist zumeist miteinander verkoppelt.

Neben der Lateralität der Extremitäten besitzt der Mensch auch eine Lateralität der Ohren und eine der Augen, auf die hier näher eingegangen wird.

Die einseitige Ausprägung des Auges wird als okulare Dominanz oder Augendominanz bezeichnet, das dominante Auge auch als führendes Auge. Die unterschiedliche Ausprägung des Auges ist weniger auffällig als die der Hand und den meisten Menschen unbekannt. Da beide Augen im Gegensatz zu den Händen funktionell miteinander synchronisiert sind und physiologisch keinen Unterschied aufweisen müssen, kann die Ausprägung der Dominanz nur durch sehr detaillierte Beobachtung des Verhaltens eines Menschen oder durch einen Test festgestellt werden. Als einfache und zuverlässige Testverfahren bieten sich dazu der Miles-Test oder der Hole-in-the-card-Test an. In beiden Testverfahren fixiert die Testperson mit beiden Augen durch eine kleine Öffnung etwa in Armlänge vom Auge entfernt ein weiter entferntes Objekt, das die Öffnung ungefähr ausfüllt. Die Testperson sollte sich dabei unbedingt mit dem Körper und dem Kopf gerade zum Objekt ausrichten. Abbildung 2-12 verdeutlicht diese Konstellation. Nun wird die Position der Augen der Testperson und der kleinen Öffnung zum Sichtobjekt starr beibehalten und abwechselnd mit jeweils einem Auge auf das Objekt geblickt. Während die Testperson mit ihrem dominanten Auge das Objekt weiterhin vollständig durch die kleine Öffnung sehen kann, ist beim Sehen mit dem nichtdominanten Auge das Objekt außerhalb der Öffnung und somit nicht zu sehen.



Der Effekt der Augendominanz lässt sich dadurch erklären, als dass die von beiden Augen erfassten Sichtperspektiven vom Gehirn nicht in gleicher Weise verarbeitet werden. Wesentliche Sichtobjekte im Blickfeld des Menschen werden bevorzugt mit dem dominanten Auge fixiert. Wie in Kapitel 2.3 beschrieben besitzt vor allem die Bewegung von Objekten für den Menschen eine hohe Bedeutung. Bei der Betrachtung eines Objektes nehmen die beiden Augen eine Aufgabenteilung vor. Während mit dem dominanten Auge die wesentliche Erfassung und Verfolgung vorgenommen wird, ergänzt das nichtdominante Auge die Informationen aus der zweiten Perspektive, die für die dreidimensionale Wahrnehmung des Objektes erforderlich sind.

In der Bevölkerung ist eine rechtsseitige Augendominanz nach *Arnold-Schulz-Gahmen* (1999) mit 73% zu 27% linksseitig vorherrschend, nach *Ehrenstein et al.* (2005) mit 68% zu 32%. Allerdings liegt kein signifikanter Zusammenhang zwischen der Händigkeit und der Äugigkeit vor. Somit existieren sowohl Personengruppen mit unilateraler (gleichseitiger) Hand- und Augendominanz, als auch mit verschiedenseitiger Ausprägung, der sogenannten Kreuzdominanz. Beide Kombinationen existieren sowohl rechts-, wie auch linksseitig.

In diesen vier Lateralitätsgruppen wurden bereits früher unterschiedliche Reaktionszeiten auf visuelle Stimuli quantitativ erfasst. Pädagogen und Entwicklungspsychologen betonen den Einfluss des führenden Auges auf die Aufmerksamkeit und Konzentrationsfähigkeit speziell von Kindern und Jugendlichen. So ist es nach *Hannaford* (1997, S.25-27 & S.161-164) und *Hohl-Brunner* (2003 S.141-143) von Vorteil, beispielsweise den Sitzplatz im Klassenraum für jeden Schüler so auszurichten, dass Lehrer und Tafel bei normaler Sitzposition im Blickfeld des führenden Auges liegen. Ansonsten sei eine Abwendung der Aufmerksamkeit des Schülers von der Vermittlung der Lehrinhalte deutlich früher und häufiger zu festzustellen.

Abbildung 2-13 zeigt die Verteilung von Händigkeit und Äugigkeit aus einer nicht repräsentativen Vorstudie des Autors mit 91 Personen aus dem universitären Umfeld des Lehrstuhls für Ergonomie (Studenten und Wissenschaftler). Die rot-grün Farbgebung in der Darstellung orientiert sich hier an der Farbcodierung in der Schifffahrt:

rot → linksseitig

grün → rechtsseitig



Eine hohe praktische Bedeutung hat die Kenntnis der Lateralität auch bei einer Reihe von Sportarten. *Griffith* (2003) und *Siefer et.al.* (2003) beschreiben, dass bei vielen Ballsportarten wie beispielsweise Tennis, Tischtennis, Fußball, Basketball, Volleyball, Golf, Baseball und Cricket sowie beim Schießsport mit Pistolen, Gewehren oder dem Bogen die Lateralität einen wesentlichen Einfluss auf die Bewegungsabläufe hat. Beim Schießsport muss der Einfluss der Augendominanz auf die Zielerfassung kontrolliert und ggf. eingeschränkt werden. Dies erfolgt zumeist durch Abdecken des Auges, das nicht in der Linie der Visierichtung liegt. Bei den Ballsportarten beeinflusst die unilaterale oder kreuzdominante Ausprägung stark die Körperhaltung zum Ball und zum anvisierten Ziel. Die Auswirkung kennzeichnet sich beispielsweise bei Rückschlagspielen wie Tennis oder Baseball folgendermaßen: Durch die Schlagstellung des Spielers zum anfliegenden Ball beim Vorhandschlag kann bei unilateraler Ausprägung des Spielers die präzise visuelle Erfassung der ballistischen Flugbahn laut *Porta* erst sehr spät erfolgen. Nämlich erst dann, wenn der Ball in das Blickfeld des von Gegner oder Netz abgewandten Auges tritt, wenn die Schlaghand auf derselben Seite wie das führende Auge liegt. In Kampfsportarten mit asymmetrischer Haltung wie Boxen oder Fechten ist ebenfalls ein Einfluss zu erwarten. Leider ist nur bei wenigen Sportarten dieser Effekt in der Trainingslehre entsprechend dokumentiert.

Als Ursache für die Augendominanz kann eine unterschiedliche Ausprägung der Gehirnhälften nicht als Erklärung dienen, da die Verarbeitung der visuellen Informationen der beiden Augen nicht in den beiden getrennten Gehirnhälften vollzogen wird, wie bereits in Kapitel 2.3 beschrieben wurde.

Insgesamt sind Ursachen und Folgen der Augendominanz wissenschaftlich noch sehr wenig erforscht. Konkrete Auswirkungen auf das Fahren von Fahrzeugen, speziell durch die asymmetrische Gestaltung des Fahrerplatzes und der Verkehrsabläufe sind in der Literatur nicht bekannt. Speziell beim Ablauf seitwärts gerichteter Bewegungsabläufe wie dem Ein-/Aussteigen im Fahrzeug, der Wahrnehmung von Kreuzungsverkehr oder der Bearbeitung von Nebenaufgaben in der Mittelkonsole des Fahrzeugs ist jedoch ein Einfluss der Augendominanz zu vermuten. Bei den hier durchgeführten empirischen Fahrversuchen im Simulator, die in Kapitel 6 beschrieben werden, wird auch der Einfluss des führenden Auges überprüft.



2.6 Zusammenfassung des Kapitels

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass ein wesentlicher Ablauf des menschlichen Sehens dem Auge nachgeschaltet im Gehirn erfolgt und somit psychischer Natur ist. Dieser Teil des Sehprozesses ist einerseits aufgrund einer filterbasierten Informationsverarbeitung im Gehirn sehr schnell und effizient. Andererseits ist dieser Vorgang der filterbasierten Bildauswertung und -interpretation durchaus fehlerbehaftet und nur bedingt für die Anforderungen und Aufgaben menschlicher Tätigkeiten in der modernen Welt geeignet. Die Filterstruktur im menschlichen Gehirn ist durch die lange Evolutionsphase stark auf das Überleben in der Natur ausgerichtet. Die subjektive visuelle Wahrnehmung eines jeden Menschen wird von ihm selbst normalerweise als jederzeit korrekt und absolut verlässlich erlebt. Einige Prinzip bedingte Schwächen im visuellen Wahrnehmungsprozess speziell für die Fahrzeugführung sind in ihren konkreten Ausprägungen und Folgen bisher noch nicht umfassend wissenschaftlich beleuchtet worden.

3 Bedeutung des Sehens für die Fahraufgabe

Während in Kapitel 2 eine Übersicht über die Eigenschaften, Möglichkeiten und Grenzen der visuellen Wahrnehmung seitens des Menschen gegeben hat, soll das folgende Kapitel 3 die Anforderungen und die Bedeutung des Sehens für die Tätigkeit und Aufgaben in der Funktion des Fahrzeugführers umreißen. Die spezifischen Sehaufgaben, die ursächlich auf einzelnen Teilaufgaben des Fahrens beruhen, werden konkreter erläutert. Darüber hinaus geben Auszüge aus der Unfallstatistik und ein Spektrum von Presseberichten ein Spiegelbild über die Kritik an den Sichtverhältnissen aktueller Fahrzeugtechnik. Desweiteren werden die gebräuchlichen und größtenteils gesetzlich vorgeschriebenen Messverfahren zur Bestimmung der Sichtverhältnisse im Fahrzeug vorgestellt.

3.1 Beschreibung des Umfanges der Sehaufgaben des Fahrers

Die konkreten Sehaufgaben des Fahrers leiten sich strukturell aus dem Regelkreis Fahrer-Fahrzeug-Umgebung ab, der eine spezielle Form des allgemeinen Regelkreises Mensch-Maschine darstellt und in Abbildung 3-1 wiedergegeben ist (Bernoat, 1970; Donges, 1977; Bubb 1985 & 1995).

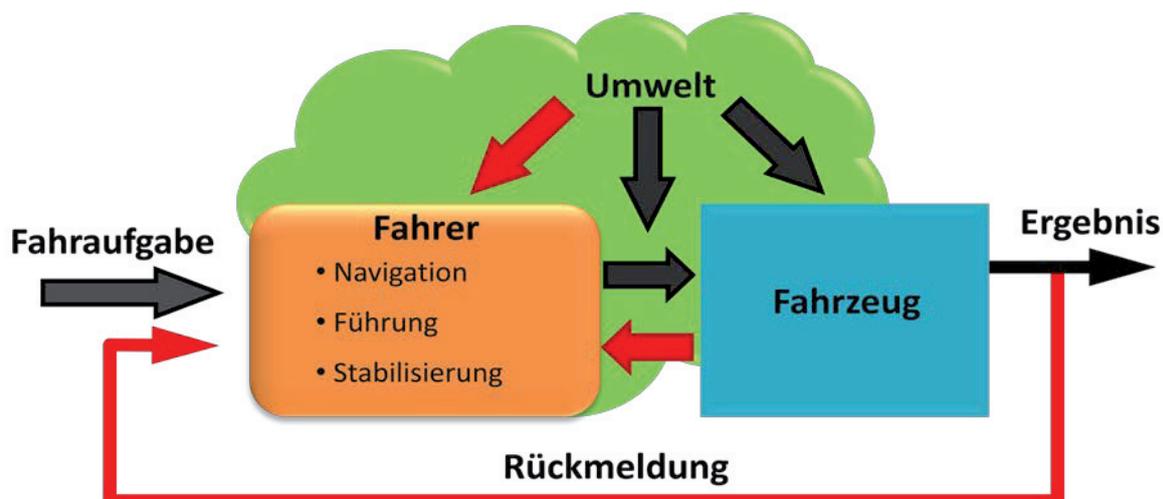


Abbildung 3-1: Regelkreis Fahrer-Fahrzeug in den Regelebenen der primären Fahraufgabe (nach Bernoat und Bubb)



Dieser Regelkreis stellt eine ‚man-in-the-loop-Funktion‘ dar, in denen der Fahrer auf den folgenden drei Regelebenen tätig ist:

- **Navigation**
- **(Bahn-)Führung**
- **Stabilisierung**

Die drei Regelebenen charakterisieren sich neben Ihrer inhaltlichen Rangordnung durch Ihre Aufteilung in eine niedrige, mittlere und höhere Frequenz bei der Regeltätigkeit des Fahrers. Bei einem durch einen Menschen geführten Fahrzeug werden die Aufgaben dieser drei Regelebenen als Primärtätigkeit des Fahrens subsummiert.

Die Sehaufgaben dieser Regeltätigkeit des Fahrers erwachsen aus den Informationen, die der Fahrer aus der Umwelt, von seinem Fahrzeug und als Ergebnismeldung seiner Fahraufgabe erhält.

Die Informationen nimmt der Fahrer über seine

- olfaktorischen
- akustischen,
- haptischen und kinästhetischen

und überwiegend über seine

- **visuellen** Sinnesmodalitäten auf.

Die visuelle Informationsaufnahme des Fahrers, mit der sich diese Arbeit beschäftigt, gliedert sich in die

- direkte Sicht → natürliche Umgebungssicht durch die Fahrzeugscheiben
- indirekte Sicht → Sicht nach hinten über Spiegel oder Videodisplay (z.T. optisch modifiziert)
- Instrumentensicht → synthetische Anzeige physikalischer Größen (z.T. kodiert)

Traditionell vermittelten die direkte und indirekte Sicht Informationen der Umgebung und der Ergebnismeldung der Fahraufgabe. Die Instrumentensicht beinhaltet nur Informationen über den Fahrzeugzustand.

Schon seit einiger Zeit werden Teilumfänge der Navigations- und Stabilisierungsaufgaben sowie seit neuestem auch Aufgaben der Führungsebene mit Hilfe elektronischer Fahrerassistenzsysteme automatisiert. Dabei wird die Steuerung dieser Funk-



tionen durch den Fahrer nur noch mittelbar und im Charakter einer sekundären Tätigkeit ausgeführt.

Mit Verwendung von Fahrerassistenzsystemen, die eine eigene technische Sichtsensoren besitzen, beinhaltet die Instrumentensicht heutzutage auch Umgebungsinformationen und Ergebnissrückmeldungen. Beispiele dafür sind die Fahrzeugposition auf einer Navigationskarte oder der Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug bzw. zum Fahrbahnrand.

Die Teilaufgaben der visuellen Informationsaufnahme lassen sich beispielhaft in folgender Tabelle 3-2 strukturieren, die teilweise kontinuierlich, teilweise situativ in unterschiedlicher Priorisierung erfolgen (Schweigert, 2002 & 2003):

Sichtbereich	Direkte Sicht	Indirekte Sicht	Instrumentensicht
Regelebenen			
Navigation	<ul style="list-style-type: none"> • Ortsbestimmung • Erkennen von Knotenpunkten und Richtungen des Straßenverlaufes 	<ul style="list-style-type: none"> • Rückfahrkamera mit Darstellung der Bahntrajektorie als Einparkhilfe 	<ul style="list-style-type: none"> • Überprüfung von Ressourcen (Kraftstoff, Zeit) • Ortsbestimmung (bei Navi-System) • Überprüfung der Richtungen von Straßen (bei Navi-System)
(Bahn-) Führung	<ul style="list-style-type: none"> • Erkennen des Fahrbahnverlaufes • Erkennen der Fahrbahnbegrenzungen • Erkennen des Bewegungsverlaufes der Verkehrspartner • Erkennen des Fahrbahnzustandes • Erkennen von lokalen Verkehrsregeln (Schilder) 	<ul style="list-style-type: none"> • Bestimmung des Bewegungsverlaufes der Verkehrspartner 	<ul style="list-style-type: none"> • Überwachung der Fahrzeugdistanz (bei ACC) • Überwachung des Spurabstandes (bei Heading Control) • Kontrolle des Sicherheitskorridors (bei ACC oder Totwinkelassistent)
Stabilisierung	<ul style="list-style-type: none"> • Erkennen der Abstandsveränderung zu Fahrzeugen im Vorfeld • Erkennen von Abweichungen zur Fahrspurplanung 	<ul style="list-style-type: none"> • Erkennen der Abstandsveränderung zu Fahrzeugen im rückwärtigen Bereich 	<ul style="list-style-type: none"> • Überprüfung der Fahrgeschwindigkeit • Überprüfung des Aggregatbetriebs (Drehzahl, Verbrauch) • Überprüfung des Beleuchtungszustandes

Tabelle 3-2: Fahrer-Sichtaufgaben direkt, indirekt und auf Instrumente bezüglich der drei Regelebenen



3.2 Einfluss der Sichteinschränkungen im Verkehrsgeschehen

Aufgrund des in Kapitel 2 beschriebenen komplexen Sehsystems des Menschen ist auch die Möglichkeit der Sichteinschränkungen vielfältig.

Die individuellen Einschränkungen der Sehfähigkeit eines Menschen aufgrund physiologischer oder psychologischer Ursachen können sehr unterschiedlich sein. Die bekanntesten und meist verbreiteten Einschränkungen sind eine verminderte Sehschärfe, Akkomodationseinschränkung, eingeschränkte Dämmerungssehfähigkeit, Farbsehschwächen, Linsentrübung, Gesichtsfeldausfall, Winkelfehlsichtigkeit und Netzhautdegeneration. Während die ersten beiden genannten Phänomene altersbedingt bereits ab der zweiten Lebenshälfte nahezu jeden Menschen betreffen, treten die übrigen individuell unterschiedlich und eher in Form von Erkrankungserscheinungen auf. Aus diesem Grund werden in Kapitel 4.3.3 und 4.3.4 dieser Arbeit nur die Akkomodationseinschränkung und die verminderte Sehschärfe weiter berücksichtigt.

Daneben können kurzzeitige Sichtbeeinträchtigungen aufgrund von Blendungseffekten auftreten. Diese werden ebenfalls in Kapitel 4.3.2 näher behandelt.

Die möglichen Sichteinschränkungen im Straßenverkehr können in drei Kategorien eingeteilt werden. Soweit die Ursachen und Bedingungen von Seiten des Menschen beeinflussbar sind, wurden Regularien geschaffen, die die entstehenden Sichteinschränkungen begrenzen.

- a) Sichteinschränkungen aufgrund individueller Einschränkungen der Sehfähigkeit eines Fahrers;

Für die Teilnahme am Straßenverkehr beinhalten die Eignungstests eine augenärztliche Begutachtung der Mindestsehfähigkeit nach entsprechender gesetzlicher Vorschrift.

- b) Sichteinschränkungen aufgrund der Lichtverhältnisse.

Für das Fahren bei reduzierten Lichtverhältnissen sind die Verwendung von Scheinwerfern und eine Geschwindigkeitsanpassung vorgeschrieben. Blendungssituationen durch Scheinwerfer sind aufgrund technischer Regeln für die Beschaffenheit der Scheinwerfer deutlich eingeschränkt. Blendung durch das Sonnenlicht ist aufgrund der mangelnden Beeinflussbarkeit nicht weiter regle-



mentiert. Von den Fahrern wird ein entsprechend sicheres Verhalten gefordert. Sonnenblenden im Fahrzeug oder Sonnenbrillen werden häufig als Hilfsmittel dazu herangezogen.

- c) Sichteinschränkungen aufgrund der räumlich-geometrischen Konstellation der Fahrzeuge im Straßenverkehr

Dieser Aspekt ist sehr stark durch die Gestaltung der technischen Einrichtungen Straße und Fahrzeug beeinflussbar. Die dafür existierenden Regularien für das Fahrzeug sind im folgenden Kapitel 3.3 näher erläutert.

Für den Straßenbau existieren in Deutschland dazu die Straßenbaunormen ‚Richtlinie für die Anlage von Straßen‘ (RAS). Für die sichtgeometrischen Aspekte sind dafür Empfehlungen in den Abschnitten Linienführung (RAS-L), Regelquerschnitt (RAS-Q) und Knotenpunkte (RAS-K) festgehalten.

3.2.1 Blickaufgaben-Fahraufgaben

Die Blickaufgaben eines Fahrers während der Fahrzeugführung wurden bei *Schweigert* (2003) in Anlehnung an die Strukturierungen seiner Fahraufgaben ausführlich beschrieben. Je nachdem welcher Regelebene des Fahrens (Navigation, Führung, Stabilisierung) eine konkrete Teilaufgabe des Fahrers entspricht, ist die zur Verfügung stehende Zeit zur Aufgabenbewältigung unterschiedlich bemessen. So resultiert aus der jeweiligen Erfahrung des Fahrers mit dem dadurch resultierenden Automatisierungsgrad, ob eine Handlung wissens-, regel- oder fertigkeitstbasiert erfolgen kann. Daraus resultiert die benötigte Zeit einer Fahrerhandlung beziehungsweise die mögliche Häufigkeit oder Frequenz einer Tätigkeit des Fahrers. Überschreitet die benötigte Zeit die zur Verfügung stehende Zeit, so nehmen das Fehlerisiko und damit die Unfallwahrscheinlichkeit zu.

Die visuellen Grundaufgaben setzen sich einerseits aus den kontinuierlichen Beobachtungs- und Kontrollaufgaben und andererseits aus situativ erforderlichen Blickzuwendungen zusammen. Die kontinuierliche visuelle Beobachtung ist in jedem Fall der Fahrbahn und je nach Auftreten auch anderen Verkehrsteilnehmern zuzumessen. Die situativ erforderlichen Blicke sind außerordentlich ereignisgesteuert. Häufigkeit und Geschwindigkeit der durchzuführenden Blickaufgaben werden deshalb von



der eigenen Fahrgeschwindigkeit, der Homogenität und Dichte des Verkehrs aber auch von Art und Weise des Verkehrsumfeldes neben der Fahrbahn bestimmt. Die jeweilige Wichtigkeit der Blickzuwendung auf einzelne Merkmale und Objekte des Fahrtverlaufes sind vom Fahrer nicht vor der visuellen Erfassung abzuschätzen, sondern zumeist erst nach erfolgter zumindest peripherer Wahrnehmung und unterbewussten Bewertung.

Bei einem Versuch, die unterschiedlichen Blickaufgaben des Fahrers abschätzen, können die vom Fahrer zu bewältigenden Verkehrssituationen zu Grunde gelegt werden. *Fastenmeier* (1995) strukturiert seine Einteilung von Verkehrssituationen nach den Merkmalen Straßentyp, Trassenverlauf, Verkehrsablauf, Beteiligung anderer Verkehrsteilnehmer und zulässige Geschwindigkeit. Aus seinen gewählten Kategorien ergibt sich eine mögliche Kombinatorik von:

$$\begin{aligned} & \text{Straßentyp} * \text{Trassenverlauf} * \text{Verkehrsablauf} * \\ & \text{Andere Verkehrsteilnehmer} * \text{zulässige Geschwindigkeit} = \\ & 14 * 9 * 7 * 5 * 2 * 3 = 26.460 \text{ grundsätzlich unterschiedliche Verkehrssituationen} \end{aligned}$$

In dieser Kategorisierung wird hinsichtlich der Absolutgeschwindigkeit des Fahrzeugs oder anderer Verkehrsteilnehmer nicht weiter differenziert. Zudem unterscheidet sich das Erscheinungsbild von Verkehrssituationen in der Realität besonders durch das unterschiedliche Verkehrsumfeld maßgeblich voneinander. Dadurch ist für das reale Blickverhalten eher von einer individuellen Sichtsituation für jede einzelne in der Praxis auftretende Verkehrssituation auszugehen, so dass die visuelle Variationsmöglichkeit für die Blickerfassung als unendlich groß anzunehmen ist.

3.2.2 Unfallgeschehen

Wie bereits in der Einleitung (Kap. 1.1) angesprochen hat sich das Unfallgeschehen auf deutschen Straßen in den vergangenen Jahrzehnten durchaus positiv entwickelt. Trotz kontinuierlich steigender Anzahl von Fahrzeugen und der Fahrleistungen insgesamt sinkt die Zahl der Todesopfer seit 40 Jahren. Verkehrspolitische Maßnahmen und technische Weiterentwicklungen der aktiven und passiven Fahrzeugsicherheit



hatten hierbei Erfolg. Die Zahl der Verletzten stagniert jedoch und auch die Zahl der Verkehrsunfälle mit Personenschaden Innerorts verbleibt auf einem hohen Niveau, das etwa zehnfach so hoch ist wie Unfälle auf Autobahnen! Das im Jahr 2001 von der EU formulierte Ziel, der Halbierung der Unfalltoten innerhalb von 10 Jahren wird in Deutschland mit einer Reduzierung um ca. 40% verfehlt.

Bei einer detaillierteren Analyse der Verkehrsunfallstatistiken des *Statistischen Bundesamtes* (2009) lassen sich Brennpunktkonflikte identifizieren, die weiterhin nach wirkungsvollen Ansätzen verlangen:

- Zweirad- und Fußgängerunfälle machten im Jahr 2008 35% aller verunglückten und 39% der getöteten Personen aus.
- Bei 80% der Zusammenstöße von Motorradfahrern waren Pkw als Unfallgegner beteiligt. An 72% dieser Unfälle waren die Pkw-Fahrer die Verursacher!
- Bei Unfällen von Radfahrern im Jahr 2008 war zu 60% ein Pkw unfallbeteiligt. In 74% dieser Fälle war der Pkw-Fahrer der Verursacher!

Auch die Unfallfolgen bei Kollisionen von Pkw und Zweiradfahrern sind sehr ungleichmäßig zwischen den Beteiligten verteilt. Über 90% der Unfallopfer sind Zweiradfahrer!

Bei der Einschätzung der Zweiradunfälle ist zu berücksichtigen, dass der weitaus überwiegende Teil der Verkehrsleistung und auch der Unfälle im Sommerhalbjahr, also der Jahreszeit mit erheblich besseren Licht- und Wetterverhältnissen, entsteht. Somit tritt der negative Einfluss von Dunkelheit und glatten Fahrbahnen, die in der allgemeinen Verkehrsunfallstatistik besonders unfallträchtige Auswirkungen zeigen, beim Zweiradunfall statistisch deutlich weniger auf.

Auf Basis dieser spezifischen Situation werden neuerdings Maßnahmen zum Fußgängerschutz bei der Gestaltung des Vorderwagens von Pkw zur Verbesserung der passiven Sicherheit ergriffen. Deformationszonen beim Stoßfänger und der Motorhaube sollen speziell beim Kopfaufschlag von Fußgängern und Zweiradfahrern die Unfallfolgen abmildern. Diese Optimierungen werden voraussichtlich in einigen Jahren die Unfallfolgen mildern. Die Zahl der Kollisionen lässt sich dadurch aber wahrscheinlich nicht reduzieren.



Bei einer näheren Betrachtung dieser Art von Unfällen ist zu bemerken, dass Fußgänger und Zweiradfahrer bei Kollisionen mit Autos nicht nur hinsichtlich der passiven Sicherheit benachteiligt sind. Auch Ihre Wahrnehmung durch den Autofahrer ist aufgrund ihrer schmalen Silhouette bei der Sicht aus dem Auto eingeschränkt.

Um die entsprechenden Unfälle zu vermeiden, wird an speziellen Fahrerassistenzsystemen wie einem Kreuzungsassistenten entwickelt, beschrieben in *Wiltshko (2004)*, *Meitinger et al. (2006)*, *Meitinger (2008)*, *Klanner et al. (2008)* und *Obojski & Meinecke (2008)*. Damit sollen die anspruchsvollen und unfallträchtigen Aufgaben beim Abbiegen, Einbiegen und Queren von Kreuzungen unterstützt und entschärft werden. Der Nutzen für den Fahrer soll darin liegen, dass Zahl und Umfang seiner Wahrnehmungs- und Koordinationsaufgaben reduziert werden, um dadurch alle wichtigen Faktoren während seiner Aufgabenbewältigung besser kontrollieren zu können

Damit wird vorausgesetzt, dass die Ursache der meisten Unfälle ein kognitives Problem bei der Verarbeitung und Interpretation der Wahrnehmungen des Fahrers handelt. Allerdings stellt die Sichtverdeckung, also die physische Einschränkungen der Informationsaufnahme, ebenfalls eine relevante Ursache dar. (Graab et. al. 2008)

Staubach (Staubach 2009, Petermann & Kiss 2009) unterscheidet bei den Einflussfaktoren die unterschiedlichen Unfalltypenkategorien hinsichtlich des Informationszugangs (Verdeckungen, mangelnde Kontraste), der Informationsaufnahme und der Informationsverarbeitung. Die in Abbildung 3-3 dargestellte Übersicht zeigt die Verteilung von Sichtaufmerksamkeit, Sichtverdeckung und Fehlinterpretation als entsprechende Ursachen für das Fahrerfehlverhalten.

Der Anstoß für die Forschungsaktivität an Kreuzungs- und Abbiegeassistenzsystemen liefert wiederum die Unfallstatistik. Das Abbiegen, das Einbiegen und Kreuzen sowie die Vorfahrtsverletzungen stellen als statistische Unfallkategorien bereits etwa 1/3 aller Unfälle mit Personenschaden dar. (Statistisches Bundesamt, 2009)

Bei der statistischen Analyse der Kreuzungsunfälle ist laut *Daimler (2008)* häufig kein eindeutiger Rückschluss auf den Kern der Unfallursachen möglich, da der wesentliche Faktor im Fehlverhalten der Wahrnehmungen und Handlungen eines Fahrers zumeist nicht umfassend ergründet ist.

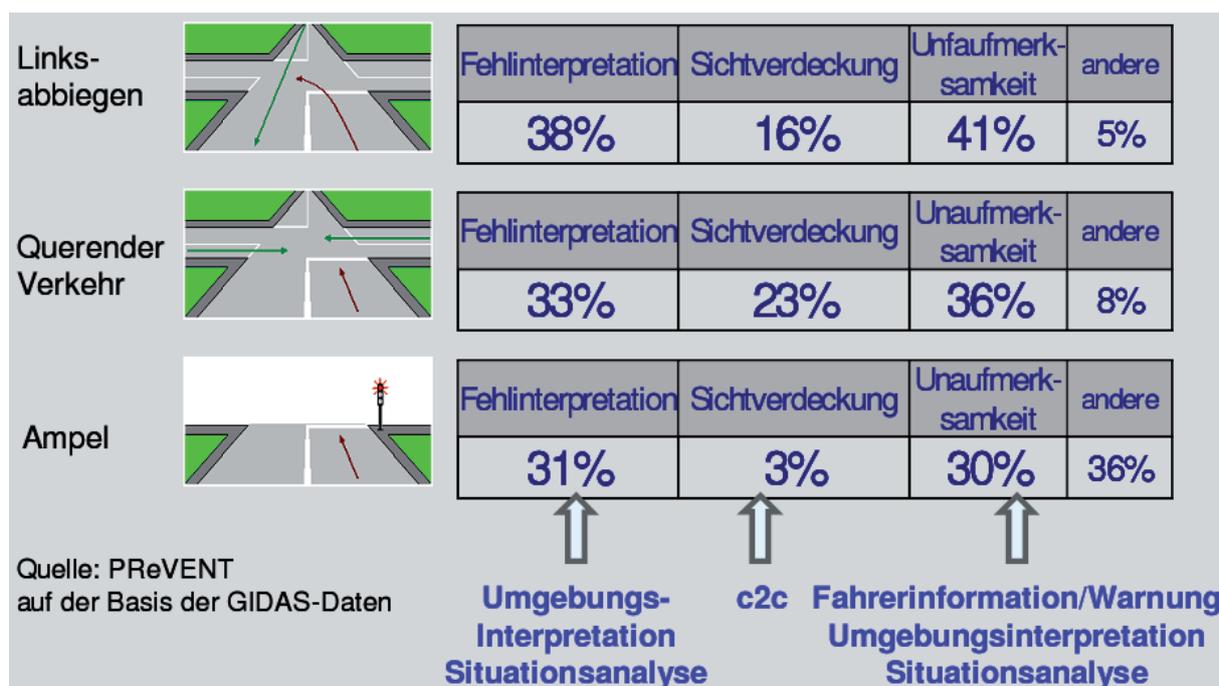


Abbildung 3-3: Ursachen des Fahrerfehlverhaltens

(Quelle: Forschungsprojekt PReVENT / GIDAS in Aktiv, 2007)

Bereits mehrere Jahre bevor man in Deutschland die Wahrnehmungsproblematik als Unfallursache näher untersucht, wurde dies in Großbritannien thematisiert. Zwei Studien des ‚Department for Transport‘, des britischen Verkehrsministeriums, haben bereits in 2002 und 2005 das Phänomen des ‚Übersehens‘ untersucht. Die Ergebnisse und das existierende Gefahrenpotential sind in Großbritannien besonders hinsichtlich der Beeinträchtigung von Zweiradfahrern sehr offensiv publiziert worden. Für diese Gefährdungskonstellation wurde ein Phänomen festgestellt, bei dem die visuelle Wahrnehmung zwar physisch möglich ist, jedoch psychisch unterbleibt. Mögliche kognitionspsychologische Erklärungen wurden bereits in Kapitel 2 erläutert. Für dieses Phänomen existiert in der englischen Fachliteratur bereits die griffige Bezeichnung: „**Looked But Failed To See**“, abgekürzt LBFTS.

21% der britischen Kreuzungsunfälle im Jahr 2004 sind nach einer Studie des ‚Department for Transport‘ auf diese Wahrnehmungsbeeinträchtigung zurückzuführen. Es ist dort statistisch die dritthäufigste Ursache von Fahrfehlern. (Department for Transport, 2002 & 2005)



3.2.3 In der öffentlichen Berichterstattung

In der Automobilpresse und bei den Publikationen von Automobilclubs gewinnt das Thema der Sichtverhältnisse im Fahrzeug an Bedeutung. Abbildung 3-4 verdeutlicht in der kombinierten Darstellung der direkten und indirekten Sicht des Fahrers, dass wesentliche Bereiche rund um das Fahrzeug beim Fahren nicht einsehbar sind. Diese werden allgemein auch als ‚tote Winkel‘ bezeichnet (Hughes et al., 2008).

Die Messung der Sichtverhältnisse ist als zusätzliches Bewertungskriterium in die vorwiegend subjektiven Vergleichsbewertungen von Fahrzeugen durch die Redakteure von Auto-Zeitschriften aufgenommen worden. Abbildung 3-5 zeigt zum einen eine Messung der horizontalen Rundumsicht zweier Fahrzeuge, die durch die Säulen der Karosserie und die Kopfstützen der Fahrzeuge eingeschränkt wird. Andererseits wird die Übersichtlichkeit des Vorderwagens durch den notwendigen Mindestabstand beim Blick auf einen Pylon ermittelt, um die Situation des Einparkens zu bestimmen. Die Messungen werden erzeugt, indem ein Lasertheodolit aus der Position des Fahrerauges die Sichtgrenzen überstreicht und dabei die Winkellage des Sichtstrahls bzw. der Projektionspunkt erfasst wird. Das Verfahren der Messung der horizontalen Sichtverdeckung wird in Kapitel 3.3.2 näher erläutert. Abbildung 3-6 zeigt eine Bewertung der Sichtbedingungen auf Basis von Schulnoten.

Eingehender widmet sich der Allgemeine Deutsche Automobil Club (ADAC) auf Basis der im ADAC-Technikzentrum Landsberg/Lech durchgeführten Fahrzeugtest und der Unfallforschung den Sichtverhältnissen im Fahrzeug. Im Jahr 2006 wurde die Rundumsicht von 87 Fahrzeugen dreidimensional auf Basis von digitalen Bildfolgen ermittelt und vergleichend bewertet. In der Beurteilung wurde die A-Säulenverdeckung beim Linksabbiegen und in engen Linkskurven, die B-Säulenverdeckung beim Spurwechsel und vor dem Rechtsabbiegen und die Verdeckung durch die C-Säulen und die Heckscheibenrahmen beim Einparken und Rückwärtsfahren als realitätsnahe Bewertungskriterien herangezogen. Beeindruckende Negativergebnisse einzelner Fahrzeugmodelle zeigen nahezu vollständige Verdeckungen von Kleinwagen beim Abbiegen (Mitsubishi Colt), die Abdeckung von Zweirädern in der Nebenspur während des Schulterblickes (BMW 1er) und eine extreme Sichtbehinderung beim Rückwärts-Parken (Lexus RX400h) hinsichtlich Fußgängern, anderen Fahrzeugen und baulichen Hindernissen.

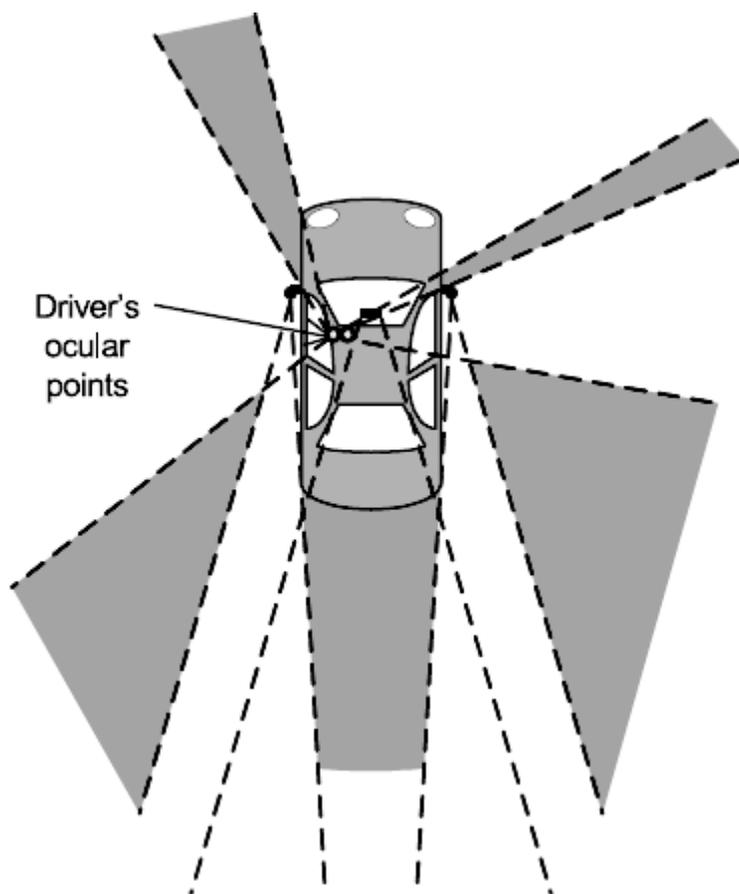


Abbildung 3-4: Fünf nicht einsehbare Bereiche (tote Winkel) eines Pkw (Quelle: Hughes et al.)

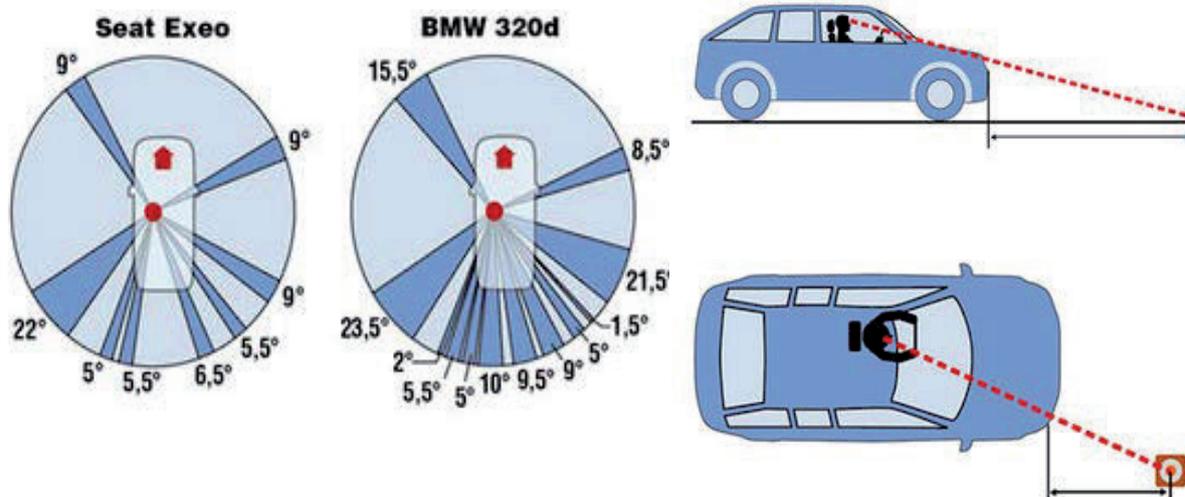


Abbildung 3-5: Vergleichende Messung der Sichtverhältnisse im Fahrzeug (Quelle: AutoMotorSport, 2009)

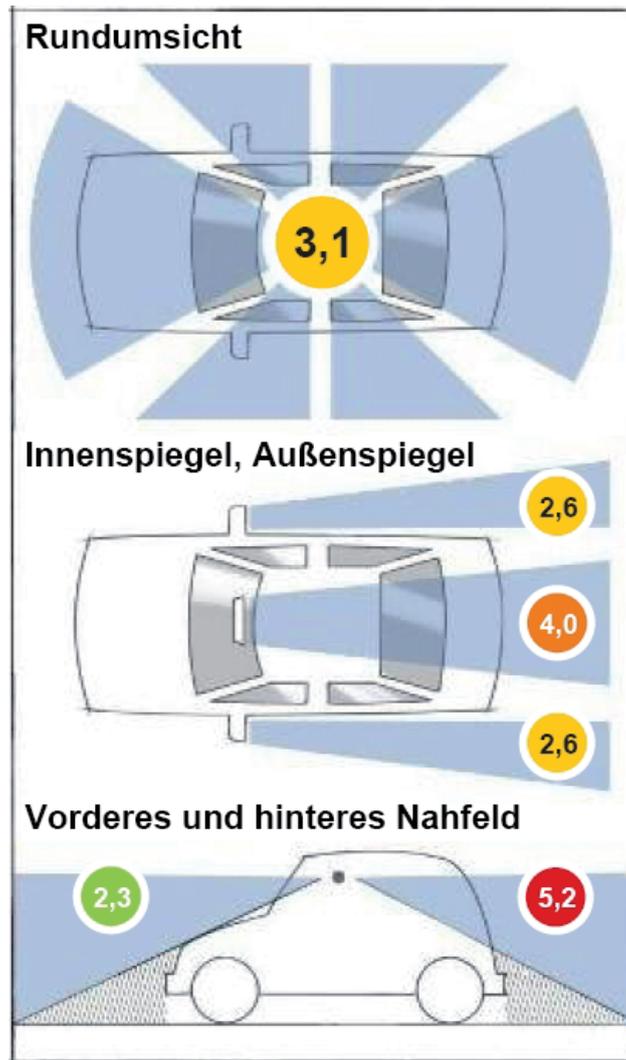


Abbildung 3-6: Schulnotenbewertung der Sichtverhältnisse des Fahrers (Quelle: ADAC Autotest, 2010)



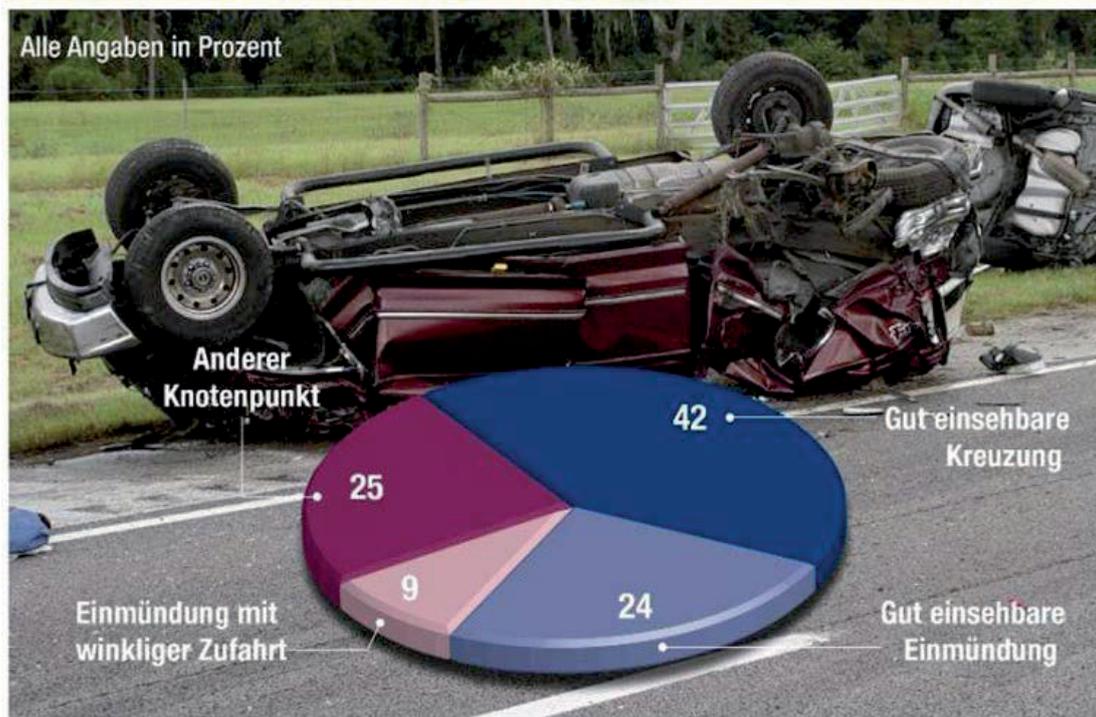
Abbildungen 3-7 und 3-8: Mitsubishi Colt (links) und Renault Grand Espace (rechts) als schlechtestes und bestes Fahrzeug in den ADAC-Sichttests (Quelle: ADAC)



Die Abbildungen 3-7 und 3-8 geben die Sichtverhältnisse der A-Säulen des schlechtesten und besten Fahrzeugs im Test wieder. Der ADAC (2006) stellt ebenso die massive Verschlechterung der Rundumsicht aktueller Fahrzeuge im Vergleich zu Modellen vor 30 Jahren aufgrund deutlich breiterer Säulen und höherer Gürtellinien fest. (SPIEGEL-online, 2006; ZEIT-online, 2006)

Ein weiteres Mal beschäftigte sich der ADAC im Jahr 2008 intensiv mit der A-Säulen-Problematik. Nach einer Studie der ADAC-Unfallforschung sei jeder siebte Tote oder Schwerverletzte bei Unfällen Außerorts im Jahr 2007 in Deutschland, also 5400 Personen, auf Fehler beim Einbiegen und Kreuzen zurückzuführen. Der ADAC identifiziert die ungünstige A-Säulengestaltung vieler Fahrzeuge als wesentlichen Einflussfaktor bei diesen Unfällen. Als schlechteste Fahrzeuge im Vergleichstest von 20 Fahrzeugen haben sich wieder der Mitsubishi Colt CZ3, der Hyundai Santa Fe, der BMW Z4 und der Opel Tigra Twin Top erwiesen. Besonders gut hat wieder der Renault Espace, gefolgt vom Citroen C4 Picasso abgeschnitten. Diese Fahrzeuge weisen auf jeder Seite eine doppelte A-Säule mit jeweils verringertem Querschnitt auf. Auf die eigentlich nicht gestattete gesetzliche Zulassung dieser geometrischen Variante wird in Kapitel 3.3.1 nochmals speziell eingegangen. (Rheinische Post, 2008; ADAC, 2008)

In den Veröffentlichungen der beiden Testkampagnen fordert der ADAC ein vorsichtigeres und aufmerksames Verhalten der Fahrer, Sicherheitsmaßnahmen der Verkehrsführung an Verkehrsknotenpunkten, aber auch geometrische Reduzierungen an den Säulenkonstruktionen der neuen Fahrzeugmodelle durch die Automobilhersteller. Hier sehen die Tester die Aspekte einer guten Aerodynamik und eines attraktiven Designs im Vergleich zur sicherheitsrelevanten Sichtverdeckung deutlich überbewertet. Bei bautechnischen Verbesserungen gefahrenträchtiger Kreuzungen durch Straßenbauämter in Bayern bringt sich die ADAC-Unfallforschung aktiv ein. Der Anlass dafür ist die Tatsache, dass ein hoher Anteil der Unfälle an Verkehrsknoten außerorts, nämlich 66%, in vermeintlich gut einsehbaren Situationen erfolgt (siehe Abbildung 3-9).



¹ Unfälle an Kreuzungen/Einbiegungen außerhalb geschlossener Ortschaften

Abbildung 3-9: Unfallverteilung an gefährlichen Kreuzungen und Einmündungen außerorts (Quelle: ADAC)



Abbildung 3-10: Fotomontage einer Sichtverdeckungssituation durch eine breite A-Säule (Quelle: AutoBild)



Außer dem ADAC hat sich auch der Technische Überwachungsverein Süddeutschland (TÜV Süd) im Auftrag der Zeitschrift Auto-Bild im Jahr 2007 einem ausführlicheren Sichttest von 20 Fahrzeugen gewidmet. Bei diesem Test wurden ebenfalls die horizontalen Winkelabmessungen der Fahrzeugsäulen, sowie die vertikale Sicht zur Fahrbahn mit Hilfe eines Lasertheodolithen aus der Position des Auges ermittelt. Die Vorgehensweise ähnelt dem Verfahren wie es inzwischen auch von AutoMotorSport praktiziert wird. Auch bei diesem Vergleichstest waren die Tester mit den Ergebnissen durchweg sehr unzufrieden. Als Ursache wurde hier ebenfalls die stark designorientierte Formgebung der A-Säulen kritisiert. Abbildung 3-10 verdeutlicht in einer Fotomontage eine typische Situation der Verdeckung eines anderen Verkehrsteilnehmers.

Ein Vergleich zum Referenzfahrzeug aus den frühen 70er Jahren weist auch hier die Verschlechterung der Sicht über die vergangenen Jahrzehnte aus. Zusätzlich zu den Serienfahrzeugen wurde auch der Volvo Safety Concept Car (SCC), ein Prototypenfahrzeug, in den Vergleichstest aufgenommen. Die A-Säulen-Konstruktion dieses Fahrzeuges in Form einer transparenten Fachwerkstruktur wurde von den Testern sehr gelobt. (AutoBild, 2007). Sie ist in den Abbildungen 5-47 und 5-48 wiedergegeben.

In der Berichterstattung der britischen Presse über Sichteinschränkungen bei Verkehrsunfällen vor allem mit Zweiradfahrern haben die massiven A-Säulen als einer der verursachenden Einflussfaktoren einen sehr markanten und polemischen Spitznamen erhalten: „*Killer Pillars*“.

Bereits im Jahr 2003 wurde im Auftrag der Zeitschrift WhatCar? durch die Motor Industry Research Association (MIRA) ein Vergleichstest der Sichtverdeckungen von 50 Fahrzeugen, in sieben unterschiedliche Klassen nach ihrem jeweiligen Fahrzeugkonzept und -größe kategorisiert, durchgeführt. Als Verfahren wurde hierbei ein dreidimensionales Projektionsverfahren in einem Laborraum angewendet. Auch dieses Verfahren wird in Kapitel 3.3.3 näher erläutert. Die jeweiligen flächigen Sichtschatten der Säulen wurden mit einem Verkehrsszenario verglichen, das sich an realitätsnahen Bedingungen orientiert. Zuerst wurde die Größe der Sichtverdeckung 23 m vor einer Kreuzung ermittelt. Dieser Abstand entspricht dem Anhalteweg aus einer Geschwindigkeit von 30 Meilen pro Stunde. Diese Verdeckung wurde dann mit den Abmessungen eines Mittelklassefahrzeugs und eines mittelgroßen Fußgängers



in dieser Distanz verglichen. Bestes Fahrzeug im Test war eine Mittelklasse-Limousine aufgrund seiner relativ geringen A-Säulen-Breite. Vier der fünf schlechtesten Fahrzeuge waren Mini- bzw. Micro-Vans, die aufgrund ihres Karosseriekonzeptes mit ihren A-Säulen allesamt deutlich breitere Sichtverdeckungen erzeugten. Die Testergebnisse sind nachzulesen in *WhatCar?* (2003) und *The Independent* (2004).

Auch MIRA hat seinen Sichtverdeckungstest wiederholt, diesmal mit Unterstützung der Firma Autoglass. Im Jahr 2006 wurden wiederum die A-Säulenverdeckungen von 20 Fahrzeugen vermessen. Bei diesem Test wurden nun die A-Säulenabmessungen in einer horizontalen Ebene ermittelt. Die Breite des Säulenschattens in 23 m Distanz wurde zu den Breitenmaßen eines Mittelklassefahrzeugs und eines Radfahrers verglichen. Bei diesem Test war dieselbe Mittelklasse-Limousine Testsieger. Die letzten Plätze wurden wieder verstärkt durch Mini-Vans und durch SUVs belegt.

Das schlechte Abschneiden der sogenannten Sport Utility Vehicles (SUV), also geländetauglicher Fahrzeuge für überwiegende Straßennutzung, fand in der britischen Presse (Auto Express, 2006; Timesonline, 2006; Neue Osnabrücker Zeitung, 2008; National News, 2008) eine starke Resonanz, da diese Fahrzeugkategorie in Großbritannien auch unter sozialkritischen Aspekten ihrer Eigentümer in der Öffentlichkeit polarisiert und so in bissigem britischem Humor als ‚*Chelsea tractors*‘ tituiert werden.

Eine dritte Messkampagne bei MIRA im Jahr 2009, wieder beauftragt von Autoglass, testete weitere 27 Fahrzeuge. Dieses Mal wurden neben Kompakt- und Mittelklassefahrzeugen auch mehrere ‚White Vans‘, also Kleintransporter, berücksichtigt. Auch diese schneiden tendenziell sehr schlecht ab. MIRA konnte bei diesem Test sechs Fahrzeuge testen, deren Vorgängermodelle bereits 2006 untersucht worden waren. Fünf dieser neuen Modelle reduzierten die A-Säulen-Breite um 14 bis 54% zum jeweiligen Vorgänger und verbesserten somit die Sichtverdeckung. Nur der Testsieger des Jahres 2006, ein Audi A4, verschlechterte sich mit den breiteren A-Säulen seines Nachfolgemodells B8 zum B7 um 40%! Der Citroen Xsara Picasso nahm im MIRA-Test im Jahr 2006 einen der letzten Plätze ein. Sein Nachfolgemodell, der Citroen C4 Picasso, konnte beim ADAC-Test im Jahr 2007 weit vorne landen.

Gerade diese Vorgänger-Nachfolger-Vergleiche belegen, dass die Automobilhersteller ein großes Optimierungspotential hinsichtlich der A-Säulenverdeckung besitzen und die sicherheitsrelevanten Gestaltungsergebnisse sehr stark durch Anstrengungen



bei der Karosserieentwicklung zu beeinflussen sind. Sie untermauern damit auch den Vorwurf der Testinstitute, dass das Design, also die ästhetische Formgestaltung, einen wesentlichen Grund für die eingeschränkten Sichtverdeckungsverhältnisse darstellt.

Eine technische Betrachtung des Zusammenhangs zwischen Karosseriekonzept und A-Säulenverdeckungswinkel ist in Kapitel 5.1 zu finden.

Neben den Vergleichstests der Automobilzeitschriften und durch Verkehrsclubs ermöglicht das Medium Internet auch den Autofahrern selbst, individuelle Eindrücke zu veröffentlichen. In Internetforen findet man einige Kritik zu den Sichtverdeckungen der privaten Fahrzeuge im täglichen Gebrauch. Negative Urteile sind dort vor allem zu Mini-Vans verschiedener Hersteller dokumentiert.

3.2.4 In der Rechtsprechung

Der Begriff der Sichtverdeckung wird seitens der deutschen Verkehrsrechtsprechung etwas anders interpretiert, als dies in der Fahrzeug-Ergonomie und anhand physiologischer Kriterien erfolgt. Sowohl bei der Unfallaufnahme durch die Polizei, als auch bei Verhandlungen vor Gericht erstreckt sich der Begriff der Sichtverdeckung ausschließlich auf Verdeckungen durch Elemente, die sich außerhalb des eigenen Fahrzeuges befinden, also z.B. andere Fahrzeuge, Bebauung oder Pflanzen. Verdeckungen durch den ordnungsgemäßen Zustand des eigenen Fahrzeugs werden im juristischen Sinne als nicht existent oder verkehrsrechtlich irrelevant behandelt. Die Rechtsprechung in Deutschland geht implizit davon aus, dass die für den Straßenverkehr zugelassenen Fahrzeuge keine wahrnehmungs-beeinträchtigende Sichtverdeckung besitzen, respektive der Fahrer hat dafür zu sorgen, dass zusätzliche Sichtbeeinträchtigungen wie beispielsweise Verschmutzungen unmittelbar beseitigt werden. Dieser Rechtsgrundsatz wird besonders deutlich in einem Urteil eines Berufungsverfahrens am Oberlandesgerichtes Hamm vom 31.08.2000:

„Der Führer eines Kraftfahrzeuges (Pkw) ist verpflichtet, sich vor dem Anfahren (hier zum Verlassen eines Parkplatzes) zu vergewissern, dass er niemanden gefährdet. Ein Sichtschatten durch den von der A-Säule (Holm zwischen der Windschutzscheibe und Tür) gebildeten toten Winkel entlastet nicht, weil



der Fahrzeugführer diesen problemlos durch Veränderung seiner Kopfstellung neutralisieren kann.“ (OLG Hamm, 2000)

Da der wesentliche Anteil des statistischen Datenmaterials über Verkehrsunfälle auf die polizeiliche Unfalldatenerfassung hervorgeht, betrifft auch dort der Begriff der Sichtverdeckung ausschließlich Elemente außerhalb des eigenen Fahrzeugs. Aussagen von Unfallbeteiligten über mögliche Verdeckungseffekte durch das eigene Fahrzeug finden üblicherweise keinen Eingang in die Unfalldatenerfassung. Durch einen solchen Hinweis würden sich die Unfallbeteiligten selbst belasten, da sie im Sinne der Rechtsprechung damit auf ein eigenes Versäumnis bzw. Fehlverhalten hinweisen.

Aufgrund dieser Faktenlage ist in Deutschland derzeit mit den offiziellen Unfalldaten keine quantitative Ursachenforschung der Bedeutung der A-Säulenverdeckung als Unfallursache möglich. Während in Großbritannien Phänomene des Übersehens seitens der Behörden gezielt untersucht werden, existiert in Deutschland schlichtweg kein konkretes Zahlenmaterial seitens der Behörden.

Inwiefern die Zulassungsvorschriften für Fahrzeuge tatsächlich eine unbeeinträchtigte Sicht garantieren, werden das folgende Kapitel und Kapitel 5.3 näher betrachten.

3.3 Rechtliche Regelungen zu den Sichtbedingungen im Fahrzeug

Die Sichtbereiche eines Fahrers entsprechend den Positionen wichtiger aufgabenbezogener Sichtobjekte lassen sich in drei Kategorien gliedern:

- Sicht nach vorne → auf Fahrbahn und Verkehr: **Direkte Sicht**
- Sicht nach hinten → auf den rückwärtigen Verkehr **Indirekte Sicht (Spiegelsicht)**
- Sicht nach innen → auf Fahrzeuganzeigen **Instrumentensicht, Displaysicht**

Um eine erforderliche Mindestqualität dieser Sichtbedingungen in jedem für den Straßenverkehr zugelassenen Fahrzeug sicherzustellen, existieren international eine Reihe von gesetzlichen Vorschriften verschiedener Nationen bzw. Wirtschaftsräume.



<p>Sichtfeld</p> <p>StVZO §35</p> <p>ISO 7397 Messung und Beurteilung</p> <p>SAE J1050a Beschreibung und Messung des Fahrersichtfeldes</p> <p>77/649 EWG → 90/630 EWG Mindestdsichtfeld nach vorne Verdeckungen</p> <p>FMVSS 128 Mindestdsichtfeld Verdeckungen Sonnenblenden</p> <p>ECER 125 Vorderes Sichtfeld</p> <p>J/P/061 Sichtfeld im Nahbereich</p>	<p>Scheibenwischer und -wascher</p> <p>FMVSS 104</p> <p>SAE J903 Wischfeld</p> <p>ISO 3469 Testmethoden</p> <p>EWG 78/318 Wischfeld, Funktion</p> <p>ADR 16</p> <p>Scheibenentfrostung</p> <p>EWG 78/317 Bereiche, Zeit</p> <p>SAE J902, SAE J381 Entfrostung Beschlagentfernung</p> <p>ISO 3468, ISO/NP 3470 Testmethoden</p> <p>FMVSS 103 Entfrostung Beschlagentfernung</p> <p>ISO 5898 EntfrostungHeckscheibe</p>	<p>Sicherheitsglas</p> <p>BS AU 178a Spezifikation</p> <p>ECER 43</p> <p>ISO 3637 Material</p> <p>ISO 3538 optische Eigenschaften</p> <p>ISO 3917 Testverfahren</p> <p>FMVSS 205</p> <p>ADR 8</p> <p>Windschutzscheiben Luftdüsenausstattung</p> <p>ISO 3470 Testmethoden</p> <p>Heckscheiben Wischer und -wascher</p> <p>ISO 6255 Anforderungen</p>	<p>Rückspiegel</p> <p>StVZO §56</p> <p>ADR 12 ausgelaufen</p> <p>ADR 14</p> <p>2003/97 EG → 2005/27 EG Beschreibung und Messung des Fahrersichtfeldes</p> <p>ECER 46</p> <p>FMVSS 111 Anordnung Sichtfeld Bedienung</p> <p>FMVSS 107 zurückgezogen</p> <p>ISO 5740 Testverfahren Reflektionsgrad</p>
<p>Schattenbänder</p> <p>SAE J100</p>			

Tabelle 3-11: Wichtige Vorschriften und Richtlinien hinsichtlich der Sicht aus einem Pkw (aktualisiert und ergänzt nach Hudelmaier, 2003)

Die wesentlichen Vorschriften für die direkte und indirekte Sicht in den Regionen Europa, Nordamerika und Australien wurden von Hudelmaier (2003) zusammengestellt und sind mit Aktualisierungen und Ergänzungen in Tabelle 3-11 wiedergegeben. Desweiteren existieren gesonderte Vorschriften für die Länder Japan, Indien und die Gemeinschaft Unabhängiger Staaten (GUS). Die meisten Vorschriften dieser Staaten orientieren sich inhaltlich und formal an den Vorschriften aus Europa und Nordamerika. Darüber hinaus existieren Normen der Ingenieurvereinigungen wie beispielsweise DIN, VDI, SAE oder JAMA, die keinen rechtsverbindlichen Charakter besitzen.

Im Folgenden werden die wichtigsten Verfahren zur Messung der Sicht nach vorne, also des direkten Sichtfeldes erläutert.



3.3.1 Binokulare Sichtverdeckung anhand der europäischen Zulassungsvorschrift 90/630/EWG ehem. 77/649/EWG

Als wichtigste Zulassungsvorschrift in der Europäischen Union für das Sichtfeld von Kraftfahrzeugen fungiert die ‚Richtlinie des Rates‘ 77/649/EWG von 27.09.1977, die in der letzten Änderungsfassung vom 06.12.1990 auch die Bezeichnung 90/630/EWG besitzt. Diese Vorschrift hat bereits eine längere Historie hinter sich. Sie wurde am 06.06.1978 und 10.10.1978 korrigiert und hatte schon am 15.08.1981 durch die 81/643/EWG und am 12.07.1988 durch die 88/366/EWG eine Neufassung erhalten. Diese Änderungen sind insofern von Bedeutung, da sich dadurch auch eine funktionell-inhaltliche Modifizierung ergeben hatte, die in Kapitel 5.3 analysiert wird.

Inhaltlich reglementiert diese Vorschrift eine vertikale und horizontale Mindestgröße der Frontscheibe und vorderen Seitenscheiben des Fahrzeugs in Bezug auf die normierte Sitzposition des Fahrers für die Sicht nach vorne und bis zu $\pm 90^\circ$ zur Seite. Ebenso wird darin eine Mindestgröße für das unverdeckte Sichtfeld festgelegt. Darin dürfen sich ausnahmsweise zwei A-Säulen, Seiten- oder Ausstellfenster, Trennleisten, Rückspiegel, Scheibenwischer und Lenkradkranz inklusive Cockpit befinden. Während die Grenzen und das Messverfahren für die minimale Größe der Frontscheibe, die maximale Größe der A-Säule, die Position des Lenkradaußenkranzes und die Lichtdurchlässigkeit der Scheibe detailliert spezifiziert sind, werden für die weiteren Ausnahmen insbesondere die Trennleisten und Rückspiegel keine begrenzenden Angaben gemacht. Obwohl diese Zulassungsvorschrift explizit nur ein A-Säulen-Paar gestattet, dessen Abmessungen akkurat limitiert sind, gibt es in dieser Vorschrift keine konkreten Beschränkungen hinsichtlich der geometrischen Beschaffenheit der sogenannten Trennleisten. Diese Gesetzeslücke wird aktuell von mehreren Herstellern ausgenutzt, um ein zweites A-Säulen-Paar im Fahrzeug zu realisieren, das als Trennleiste klassifiziert wird. Trennleisten waren ursprünglich schmale Metall- oder Kunststoffleisten ohne strukturelle Anbindung, die verschiedene Teile der Verglasung voneinander abgrenzten und gegeneinander abdichteten, wie beispielsweise die absenkbare Seitenscheibe von einem feststehenden Dreiecksfenster. Ihre Beschaffenheit ist in der Vorschrift jedoch nicht genauer definiert. Querschnitt, Material und Aufbau heutiger Konstruktionslösungen zeigen eindeutig, dass es sich dabei zumeist um ein Strukturbauteil handelt und die Funktion einer Trennleiste deutlich übersteigt.

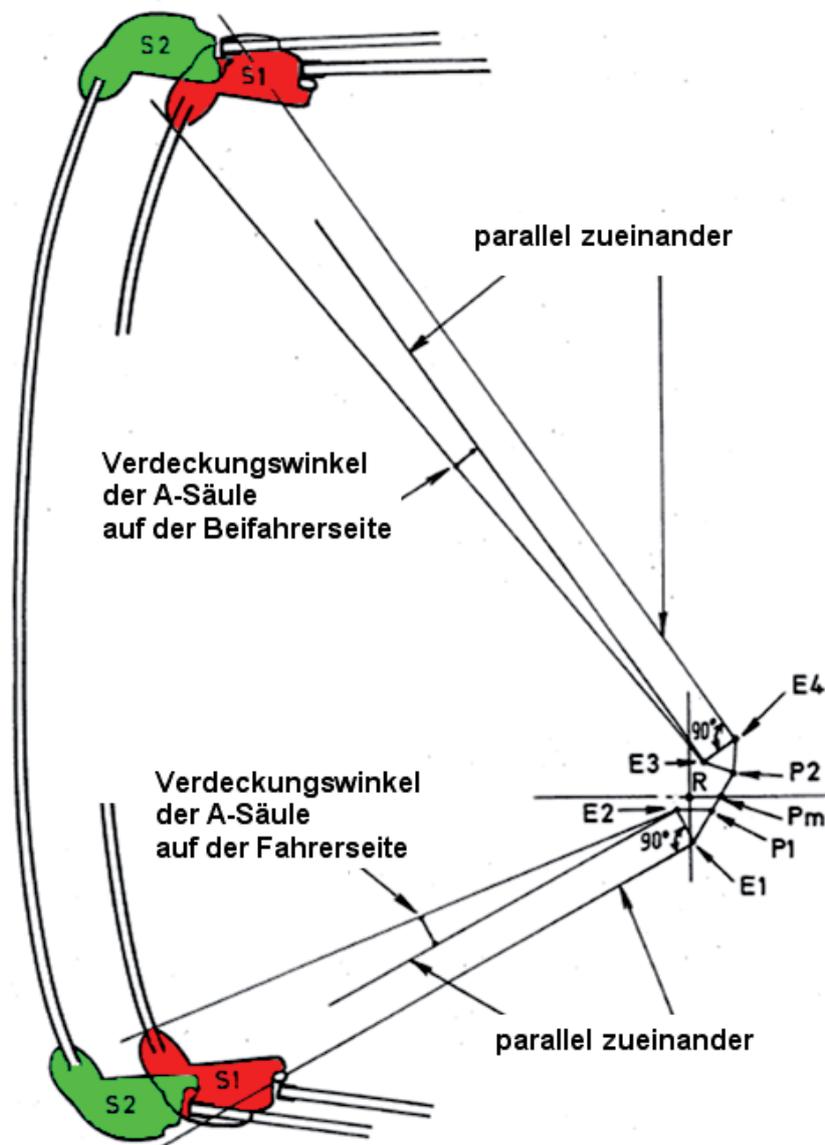
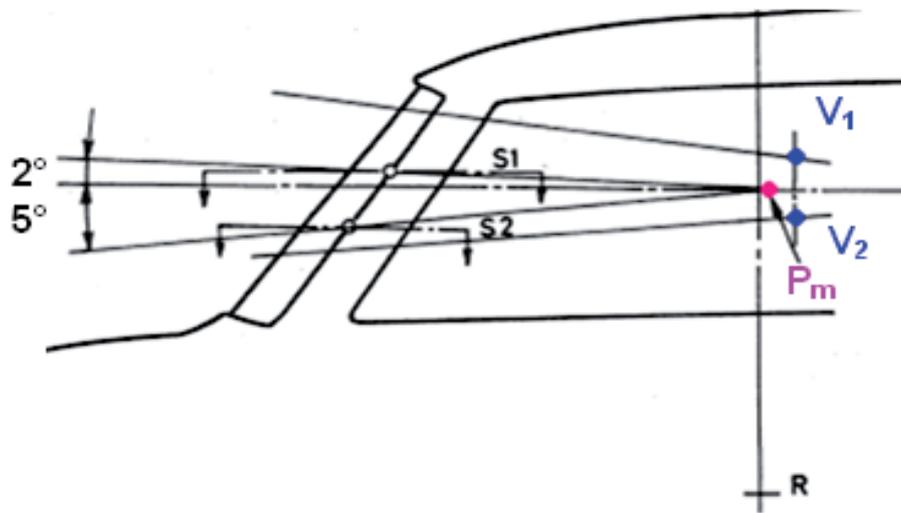


Abbildung 3-12: Zulassungsvorschrift A-Säule (koloriert aus 77/649/EWG)



Die vorschriftenseitige Größenbegrenzung der eigentlichen A-Säule unterliegt folgendem Schema entsprechend der Darstellung in Abbildung 3-12:

Anhand der fahrzeugseitigen Definition des Sitzreferenzpunktes (SAE Seating Reference Point) wird darüber ein horizontales Dreieck definiert. Dieses soll in einem vereinfachten Modell den Kopf mit den beiden Augen (E1-E2) und dem Nackendrehpunkt P1 als Ecken des Dreiecks repräsentieren. Das Dreieck wird mit den beiden Augpunkten auf die A-Säule ausgerichtet. Zwei parallele Sichtstrahlen im Abstand des mittleren Augenabstandes von 65 mm sind jeweils von einem Auge kommend auf die A-Säule gerichtet. Die Ausrichtung des Dreiecks erfolgt in der Weise, dass der außen liegende Sichtstrahl des linken Auges (bei Linkslenker-Fahrzeugen) in einer 5° nach unten geneigten Ebene S2 die äußere Kontur der A-Säule tangiert. Der parallel verlaufende Sichtstrahl des rechten Auges in Richtung einer in 2° nach oben geneigten Ebene S1 darf nun maximal bis zu 6° gedreht werden, um tangential an der inneren Kontur der A-Säule anzuliegen. Dieser Grenzwert limitiert bei symmetrischen Säulen nur die fahrerseitige A-Säule. Da sich dieses Verfahren auf ein Modell der Sicht aus beiden Augen bezieht, handelt es sich hierbei um eine Messung der **binokularen Sichtverdeckung**.

Diese gesetzliche Regelung wurde ursprünglich von der amerikanischen Norm SAE J1050 abgeleitet. Während dieses und weitere Sichtanalysemodelle in dieser SAE-Norm die realen Sichtverhältnisse recht akkurat abbilden, haben die eingangs erwähnten Überarbeitungen und Neufassungen der Zulassungsvorschrift durch die Europäischen Union dazu geführt, dass die Beschränkungen der Sichtverdeckungen inzwischen sehr weit gefasst sind. In der aktuellen Fassung erlaubt die Vorschrift erhebliche Verdeckungen der A-Säulen. Insbesondere eine zunehmende Neigung der A-Säulen zum Zwecke einer sehr flachen Frontscheibenneigung ermöglicht massive Sichtverdeckungen innerhalb der Zulassungsgrenzen. In Kapitel 5.3 wird dies näher analysiert. Einzelne Automobilhersteller verwenden interne Auslegungsvorschriften, die zur realen Verbesserung der Sichtbedingungen der Fahrer deutlich geringere Verdeckungen erlauben und sich dazu teilweise auf die ältere Fassung dieser Vorschrift von 1977 beziehen. (77/649/EWG; SAE J1050; EC; ECE R125; Macey & Wardle, 2009; Marek, 2008; Alesi 2005)



Bei der Anwendung dieses Verfahrens bei realen Fahrzeugen fällt außerdem auf, dass innerhalb des Bereiches der beiden definierten Sichtebenen S1 und S2 diese Vorschrift selbstverständlich eingehalten wird. Direkt oberhalb der oberen Ebene beginnt jedoch häufig der Karosserieknotenpunkt für die Verbindung der A-Säule mit dem oberen Dachrahmen. Knapp unterhalb der unteren Ebene liegt häufig der Karosserieknoten, der die A-Säule mit dem unteren Scheibenquerträger verbindet. Außerdem ist dort auch der Außenspiegel des Fahrzeugs befestigt. Beide Bereiche der Strukturknoten der Karosserie sind vielfach so breit ausgeführt, dass sich die horizontalen Sichtverdeckungsgebiete im Vergleich zu den Messebenen sprunghaft erhöhen. Aufgrund der Akzeleration der Körpermaße der Fahrer und gesteigerter individueller Komfortanforderungen wurden die Verstellbereiche des Fahrersitzes in den 30 bis 40 Jahren seit Entstehen der zugrunde liegenden Normen deutlich erweitert. Aus ergonomischer Sicht ist diese Anpassung der Produkteigenschaften der Fahrzeuge selbstverständlich zu begrüßen. Die erweiterten Verstellbereiche führen vor allem in der vertikalen Position zu veränderten und erheblich größeren Bereichen für die Lage der Fahreraugpunkte. In Abbildung 3-13 skizziert eine RAMSIS-Simulation, dass heutzutage die meisten Augpunktlagen der Fahrerpopulation am oberen Rande der Augellipse und deutlich oberhalb des rot markierten Punktes Pm der Zulassungsvorschrift liegen. Diese Veränderung der Augpunktlagen bleibt bisher für die gesetzliche Zulassung der Sichtverhältnisse unberücksichtigt. Für die realen Fahrerbedürfnisse versuchen viele Automobilhersteller ihre hauseigenen Prüfkriterien den veränderten Realbedingungen anzupassen. Dies gelingt ihnen oft nur, soweit keine anderen Kriterien damit konkurrieren. Bei der direkten Sicht in den Verkehr nach vorne stehen der Verbesserung häufig formalästhetische, strukturtechnische oder aerodynamische Aspekte bei der Fahrzeugkonstruktion entgegen.

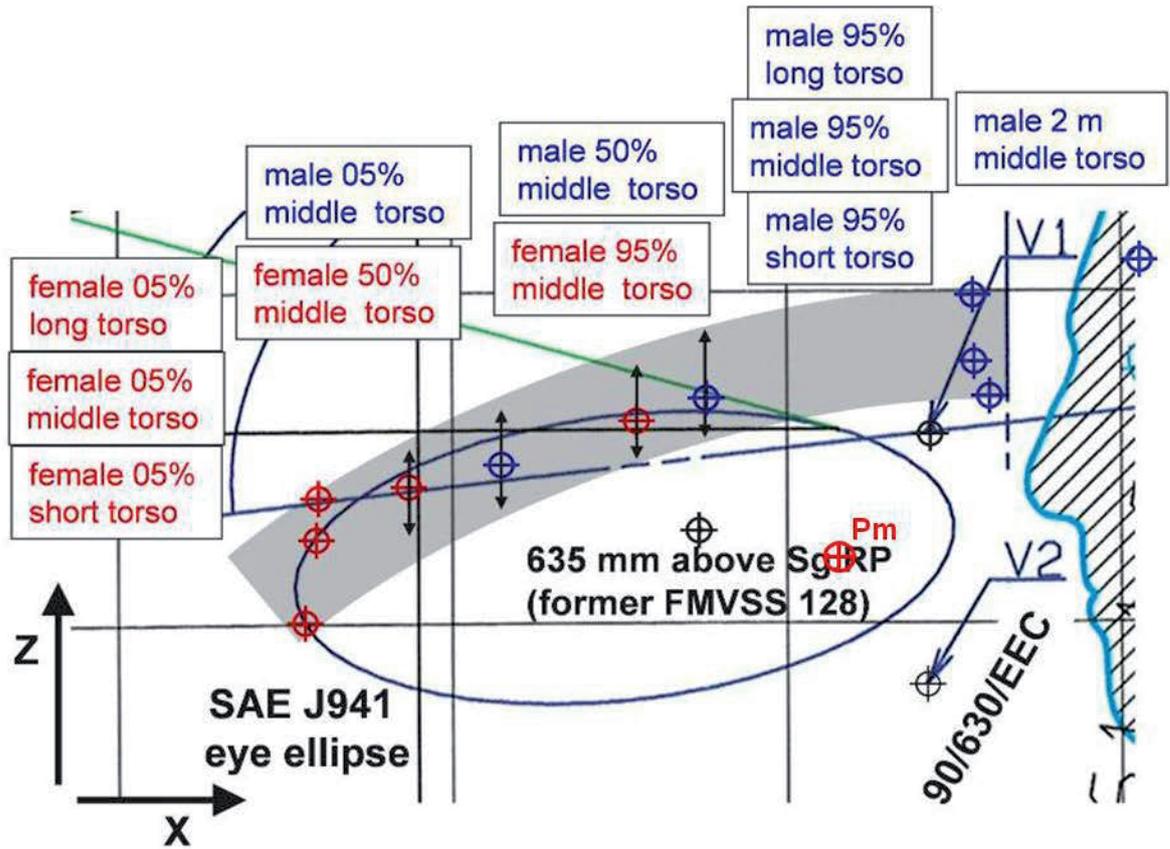


Abbildung 3-13: Augpunktlagen nach SAE-Norm im Vergleich zu RAMSIS-Simulation

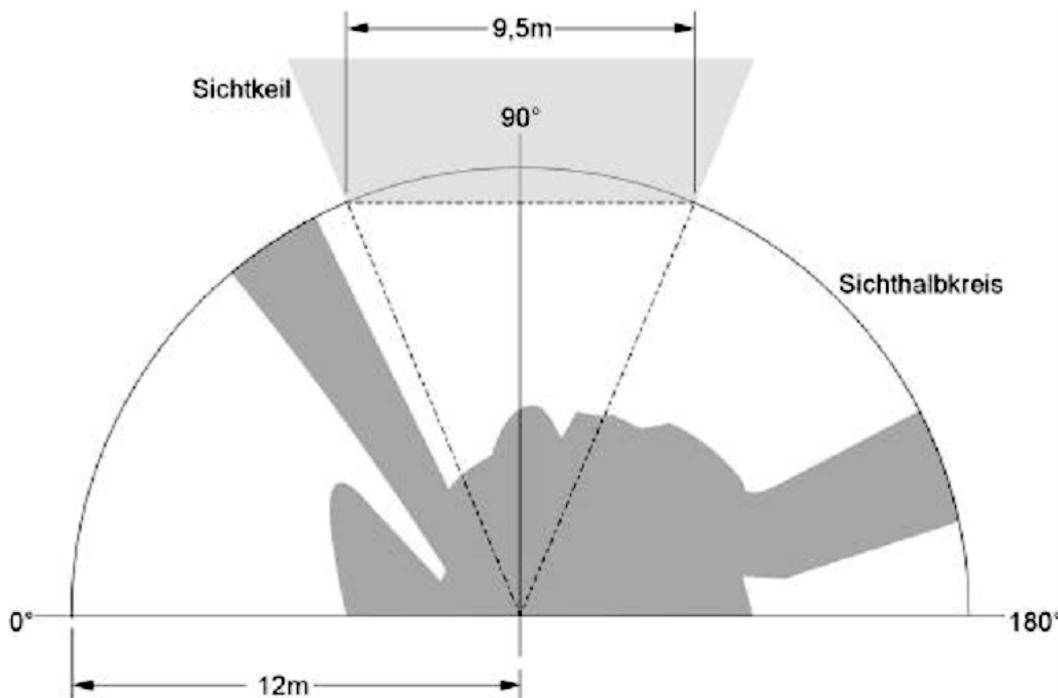


Abbildung 3-14: §35 Sichthalbkreis (aus Hudelmaier)



3.3.2 Verfahren der dreidimensionalen Sichtverdeckung nach §35b StVZO

Als zweite gesetzliche Vorschrift zu Beschränkung von Sichtverdeckungen existiert der § 35b der Straßenverkehrszulassungsordnung (StVZO) als nationale Regelung in Deutschland. Die zugehörige Richtlinie beschreibt folgendes Verfahren:

Funktionell wird aus einem Augpunkt, der sich in diesem Fall 700 mm über der mittleren Sitzstellung und 130 mm vor der Rückenlehne befindet, eine Projektion der Sichtbedingungen auf die Straßenoberfläche vorgenommen. Die Vorschrift verlangt, dass die unteren Begrenzungen der Scheiben innerhalb eines Halbkreises von 12 m Radius um den Augpunkt liegen. Außerhalb dieses 12 m - Halbkreises ist ein mittlerer Sichtkeil festgelegt, der durch eine Breite von 9,5 m im Abstand von 12 m definiert ist. Innerhalb dieses Sichtkeils dürfen maximal zwei Verdeckungen auftreten, innerhalb des gesamten Halbkreises maximal sechs Verdeckungen. Die maximale Größe der verdeckenden Elemente unterliegt einer Beschränkung, die durch eine Funktion aus Verdeckungsbreite und Entfernung festgelegt und in einem Kurvendiagramm in der Vorschrift bezeichnet ist. So werden beispielsweise innerhalb des zentralen Sichtkeils in einem Meter Entfernung Sichtverdeckungsbreiten von 1,3 m gestattet, sofern sie konstruktiv erforderlich sind. Außerhalb des Sichtkeils darf die Verdeckungsbreite in einem Meter Entfernung bereits 3 m Breite betragen. Die Abbildung 3-14 verdeutlicht die Festlegungen.

Die Regelung des § 35 StVZO findet in sehr ähnlicher Form auch in der Norm ISO 5006 für Erdbaumaschinen und in der Europäischen Vorschrift 74/347/EWG für Land- und Forstwirtschaftsmaschinen Verwendung.

In der praktischen Anwendung für die Auslegung von Fahrzeugen spielt diese Vorschrift nur eine sehr untergeordnete Rolle. Obwohl das Verfahren keine wesentliche Ähnlichkeit mit dem der europäischen Zulassungsvorschrift 77/649/EWG aufweist, scheint die Auslegung nach der europäischen Vorschrift auszureichen und die Richtlinie § 35 StVZO automatisch zu erfüllen. Es ist jedenfalls keine Konstellation bekannt, in der allein die Richtlinie § 35 StVZO, nicht aber die Zulassungsvorschrift 77/649/EWG gegen die Zulassung eines Pkw sprechen würde. (StVZO)



3.3.3 Monokulare Sichtverdeckung anhand des GCIE ehemals FMVSS 128

Bei der Ermittlung der Sichtverdeckungsbereiche aller Säulen der Karosserie zum Zwecke der Vergleiche zwischen den Fahrzeugen eines Herstellers, wie Vorgänger und Nachfolgemodell, oder der Wettbewerbsmodelle unterschiedlicher Hersteller bedient man sich in der Industrie häufig eines sehr einfachen Verfahrens zur Messung der Sichtverdeckung. Dieses Verfahren basiert auf der ehemaligen amerikanischen Vorschrift ‚Federal Motor Vehicle Safety Standard‘ (FMVSS) 128. Diese Zulassungsvorschrift wurde zwar bereits 1981 vom US-amerikanischen Transportministerium zurückgezogen. Das Messverfahren aus dieser Norm ist jedoch noch immer sehr verbreitet. Die Vereinbarung der internationalen Automobilhersteller zum Informationsaustausch neuer Fahrzeuge ‚Global Car Manufacturers Information Exchange Group‘ (GCIE, früher ECIE) führt dieses Verfahren in ihren Maßdefinitionen zum Maßvergleich der Fahrzeuge. Die Verfahrensweise lässt sich in Kürze erläutern:

In einer horizontalen Ebene 635 mm oberhalb des Sitzreferenzpunktes (SAE SgR-Point) wird ein Schnitt durch die Säulen des Fahrzeugs vorgenommen. Ausgehend vom SAE-Augpunkt (635 mm über SgR-Point) werden an jede Säule zwei Tangentiallinien erzeugt. Diese Tangenten werden in Ihrer Winkellage zur Fahrtrichtung vermaßt. Dadurch kann jede Säulenverdeckungsbreite und ihre Position zum Augpunkt numerisch dokumentiert und verglichen werden. Die Ergebnisse können auch grafisch dargestellt werden. Die Darstellung wird vielfach als ‚Tortengrafik‘ bezeichnet und ist beispielhaft in Abbildung 3-15 dargestellt.

Dieses Verfahren kann einerseits zeichnerisch mit Hilfe der Konstruktionsdaten des Fahrzeugs ermittelt werden. Es ist ebenso möglich, am realen Fahrzeug mit Hilfe eines Laser-Theodoliten aus der Position des Augpunktes die Winkellagen der tangentialen Sichtstrahlen messtechnisch zu ermitteln, wie in den Abbildungen 3-16 und 3-17 gezeigt. Auch die Messungen von Automobilzeitschriften und Testinstituten setzen wie in Kapitel 3.2.3 beschrieben, dieses Verfahren häufig ein.

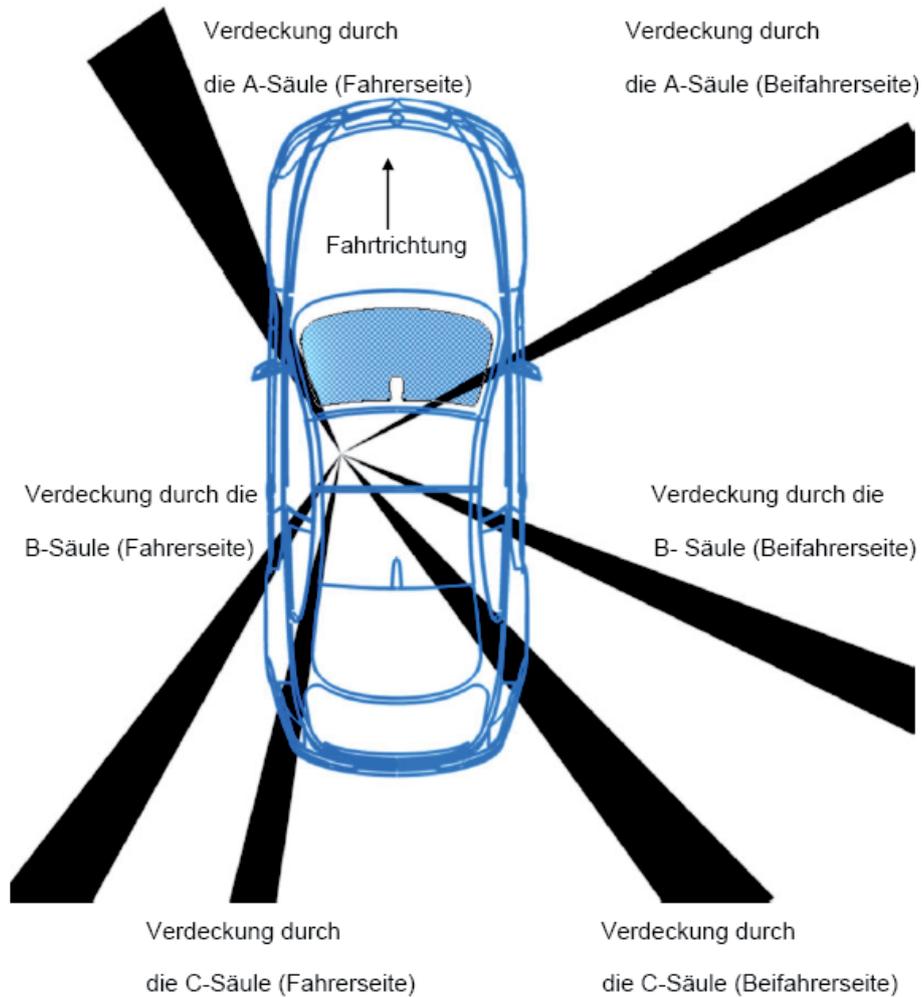


Abbildung 3-15: Monokulare Sichtverdeckung im Horizontalschnitt durch die Säulen des Fahrzeugs (,Tortengrafik‘)



Abbildungen 3-16 und 3-17: links: SAE-Hüftpunktmessmaschine mit Lasertheodolit-Aufsatz zur Sichtfeldvermessung (Quelle: Department of Transport) rechts: Lasermarkierungen der unverdeckten Bereiche im Messraum



Als wesentliche Nachteile dieses Verfahrens sind drei Aspekte zu nennen. Erstens bleibt die vertikale Ausdehnung der Verglasung absolut unberücksichtigt. Zweitens erfolgt die Messung der Verdeckungswinkel der seitlichen und hinteren Säulen aus einer Augpunktlage, die für die Sicht nach vorne ermittelt wurde. Für diese Problemstellung hatte bereits Hudelmaier 2002 ein spezielles Umblickverfahren mit höherem Realitätsbezug entwickelt. Allerdings ist die Praktikabilität des horizontalen Säulenschnittes bestechend einfach. Drittens bleiben die Sichtverdeckungen durch Elemente im Fahrzeuginnenraum wie Kopfstützen oder auch Insassen zumeist unberücksichtigt. (Hudelmaier, 2003; GCIE, 2005)

3.3.4 Weitere Vorschriften

Die internationale Prüfvorschrift ECE R43 definiert die Beschaffenheit der Fahrzeugscheiben, insbesondere die mechanischen Eigenschaften und die optische Beschaffenheit hinsichtlich der Lichttransmission und der Verzerrungsfreiheit der Frontscheibe. Sie ist für die thematische Betrachtung der Sicht in dieser Arbeit nicht weiter von Bedeutung.

Auf Betreiben Japans wird bereits seit mehreren Jahren in der zuständigen Arbeitsgruppe (Working Party on General Safety Provisions: ECE/TRANS/WP.29/GRSG) der Vereinten Nationen (United Nations Economic Commission Europe: UNECE) über eine Ergänzung der ECE R125 beraten. Darin soll ein für den Fahrer sichtbarer Prüfkörper in Form eines Zylinders mit 1 m Höhe und 0,3 m Durchmesser entlang der Seiten und der Front des Fahrzeuges international verbindlich definiert werden. Ebenso muss dieser Prüfkörper auch entlang einer Linie 2 m vor dem Fahrzeug erkannt werden können. Diese Sichtprüfungen sollen Zweiradfahrer und Fußgänger im Nahbereich von hochbauenden Transportern und SUVs davor schützen, von den Fahrern übersehen und von diesen überfahren zu werden. In Japan wird diese Regelung bereits unter der Benennung J/P/061 praktiziert und ist in Abbildung 3-18 illustriert. Sie verlangt, bei entsprechenden Sichtproblemen Zusatzspiegel oder Videosysteme als Hilfsmittel für den Fahrer einzusetzen. (Marek, 2008; Hughes et al., 2008; UNECE)

Front and Side Visibility Standard (Draft)

Forward Visibility Standard (Draft)

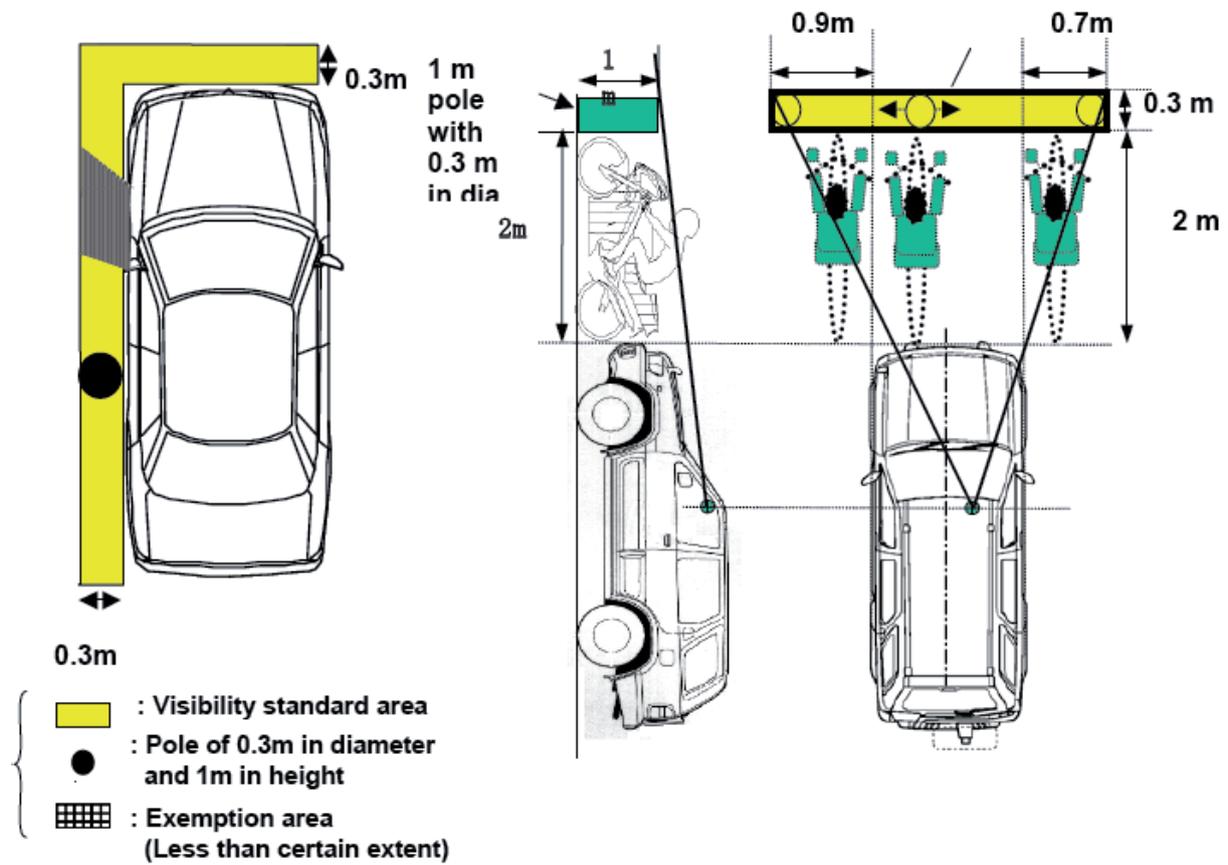


Abbildung 3-18: Sichtvorschrift ‚Japan-Zylinder‘ im Nahbereich des Fahrzeugs
Darstellung für Rechtslenker-Fahrzeuge (Quelle: Marek)

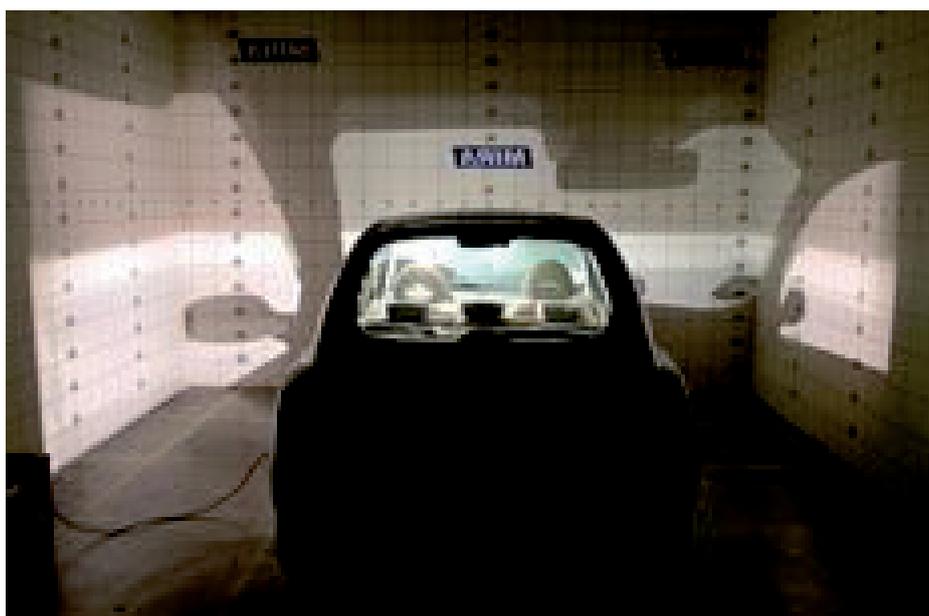


Abbildung 3-19: Schattenprojektion der Sichtverdeckungen (Quelle: MIRA)



3.3.5 Erläuterung verschiedener Messverfahren

Die zuvor beschriebenen Regelungen zur Begrenzung von Sichtverdeckungen beruhen durchweg auf der Möglichkeit, die konkrete Größe der jeweiligen Sichtverdeckung messtechnisch an jedem Fahrzeug ermitteln und nachprüfen zu können.

Der Messvorgang basiert, wie in Abbildung 3-16 dargestellt, auf der Vermessung des Seating Reference Point mit Hilfe der H-Punkt-Messmaschine entsprechend der SAE J826b. Für diese H-Punkt-Messmaschine wurden ergänzende Aufsätze entwickelt, die es ermöglichen, entsprechend der jeweiligen Verdeckungsvorschrift mit einem Theodoliten-Zielfernrohr die verdeckenden Elemente wie z.B. die A-Säulen anzupeilen. Die sich daraus ergebenden Winkelwerte können an Skalen des Messsystems abgelesen werden. Die Zielfernrohre sind inzwischen Laseraufsätzen gewichen, mit denen man die Grenzen der verdeckenden Elemente bequemer und noch genauer anvisieren kann.

Wahrscheinlich älter ist ein Verfahren der Schattenwurf-Projektion. Bei diesem Verfahren wird an die Position des in der Vorschrift definierten Augpunktes eine sehr kleine, aber helle Hochleistungslampe, wie z.B. aus einem Diaprojektor, positioniert. Ist das zu vermessende Fahrzeug nun in einem dunklen Raum präzise positioniert worden, so werden von der Lampe die Verdeckungskonturen aller Elemente des Fahrzeugs auf den Wänden des Raumes projiziert. Es lassen sich alle Konturen entlang der dargestellten Scheibenkanten zweidimensional vermessen, dokumentieren oder auch die eindimensionalen Verdeckungsweiten auf der Projektionswand festhalten. (siehe Abbildung 3-19)

Bei der klassischen 2D-Konstruktion eines Fahrzeuges auf Zeichnungen, konnten diese Verfahren im Konstruktionsprozess auf auch Seiten der Auslegung und Konstruktion theoretisch durchgeführt werden.

Während diese Messverfahren in dieser traditionellen Weise von den Testern der Autozeitschriften noch praktiziert werden, so geht man in der Automobilindustrie und bei zeitgemäß ausgestatteten Testeinrichtungen in einer modernisierten Form dieser Verfahren vor. Dabei werden nicht die Sichtkanten des Fahrzeugs in ihrer physischen Form projiziert, sondern die Konstruktionsdaten der Sichtkanten innerhalb eines 3D-CAD-Systems. Die Funktionsweise eines solchen Verfahrens wird in Kapitel 4.5.2 näher erläutert. Stehen die Konstruktionsdaten eines Fahrzeugs für die Be-



stimmung der Sichtverdeckungskanten nicht zur Verfügung, so ist eine Vermessung dieser Geometriebereiche mit Hilfe eines taktilen 3D-Koordinatenmesssystems oder durch eine Photogrammetrie (3D-Scan) möglich. Abbildung 3-20 verdeutlicht dieses. Eine Rückführung dieser Daten in ein CAD-System als Basis für die geometrische Analyse kann zumeist problemlos durchgeführt werden. Vorteile dieses Verfahrens sind einerseits eine leichtere Bestimmung der transparenten Flächenbereiche bzw. Raumkoordinaten, eine akkurate Dokumentierbarkeit, mit der auch später noch eventuelle Fehler in der Auswertung nachvollziehbar und korrigierbar sind. Außerdem ist auf Basis der rechnergestützten Analyse eine ausführliche und auch vergleichende Auswertung der Messergebnisse sehr viel leichter durchzuführen, als in der traditionellen Vorgehensweise.



Abbildung 3-20: 3D-Scan einer Fahrzeugkarosserie (Quelle: EMS-USA)

Durch die neuere Technik der digitalen Fotografie kann für die Sichtanalyse ein weiteres Verfahren zur Analyse der Sichtverdeckung herangezogen werden. Durch eine rechnergestützte Bildauswertung können aus einem digitalen Foto aus der Perspektive des Fahreraugpunktes die sichtbegrenzenden Konturen des Fahrzeugs errechnet werden. Voraussetzung dafür ist ein monochromer kontrastreicher Hintergrund in den transparenten Sichtbereichen und die Kenntnis der optischen Eigenschaften der Kameraoptik für die digitale Bildauswertung. Dieses Verfahren wird für die Anwen-



derung der Sichtverdeckungsanalyse gegenwärtig kommerziell noch nicht angeboten. Es versprache jedoch eine sehr schnelle und leistungsfähige Durchführung der Analysen.

3.4 Schwachpunkte der Verfahren hinsichtlich der menschlichen Sichtbedingungen im Straßenverkehr

Die zuvor beschriebenen Messverfahren und darauf aufbauenden Regelungen weisen eine Reihe von Schwachpunkten auf, die im Folgenden aufgezählt werden:

- Die Messstellen für die Ermittlung der A-Säulenbreite sind lokal sehr eng begrenzt. Wesentliche Verdeckungsbereiche der Karosseriekonstruktion oberhalb und unterhalb der Messstellen gehen in die Methode nicht ein.
- Ungenauigkeiten in der Definition von Verdeckungsbeschränkungen in der europäischen Zulassungsvorschrift erlauben in bestimmten Konstellationen unverhältnismäßig große Sichtverdeckungen. Kapitel 5.3 wird diesen Zusammenhang ausführlicher analysieren.
- Die Messverfahren gehen für die Ermittlung der Sichtverdeckungen von einer Normposition des Fahrerkopfes aus. Die Variationen der Kopfpositionen durch die unterschiedlichen Körpermaße vieler Fahrer werden ignoriert. Kapitel 5.4 zeigt die deutlichen Auswirkungen durch die unterschiedlichen Augpunktlagen auf.
- Jeder einzelne Fahrer nimmt bei seiner Fahrtätigkeit Kopfbewegungen mit Veränderung der Augpunktlagen vor. Die europäische Zulassungsvorschrift berücksichtigt diese Kopfbewegung ausschließlich in der Weise, dass eine günstigere Ausrichtung des Kopfes zur Säule vorgenommen wird, um mit Hilfe des maximal wirksamen Augenabstandes mit beidäugigem Sehen die A-Säulenverdeckung zu reduzieren. Diese optimale Konstellation wird vom Fahrer im Verkehr nicht durchgehend hergestellt. Die vielfältigen Sichtenforderungen an den Fahrer erzeugen häufig auch eine suboptimale Ausrichtung des Kopfes zur Sichtverdeckung. Zudem ist ein funktionell beidäugiges Sehen



im Verkehr von vielen Fahrern und in vielen Situationen in der Realität nur mit Einschränkung vorhanden.

- In den praktizierten Messverfahren wird die Breite der A-Säulenverdeckung bewertet. Die relative Lage der Säule zum Fahrerauge hat zumeist keinen Einfluss auf die Bewertungskriterien, obwohl die Lage eine wesentliche Wirkung auf die Verdeckungswirkung besitzt.
- Die relative Position von Verkehrsobjekten, Fahrsituationen und Sichtperspektiven findet bei den Sichtverdeckungsanalysen häufig keine Berücksichtigung, obwohl diese den wesentlichen Einfluss auf das Übersehen als mögliche Kollisionsursache beinhalten. Bei vielen Analyseverfahren wird das Fahrzeug im ‚leeren Raum‘ betrachtet.
- Die vorgestellten Sichtanalyseverfahren beinhalten lediglich die Bewertung der Sicht nach außen in den Verkehr. Diese Außensicht konkurriert im Wahrnehmungsprozess des Fahrers mit der Sicht auf die Anzeigen im Fahrzeuginneren. In Kapitel 4 werden einige Methoden vorgestellt, um die Sicht auf Anzeigen im Fahrzeuginnenraum zu verbessern. Eine verbesserte Anzeigenwahrnehmung sollte indirekt auch die Wahrnehmung des Verkehrs erleichtern.
- Es ist außerdem festzuhalten, dass alle vorgestellten Sichtanalyseverfahren lediglich die geometrischen Bedingungen von optischen Verbindungen in bestimmte Richtungen überprüfen. Keines dieser Verfahren ist Prinzip bedingt in der Lage die Güte der kognitiven Wahrnehmbarkeit durch den Fahrer zu testen.

3.5 Zusammenfassung des Kapitels

In der Zusammenfassung dieses Kapitels ist festzuhalten, dass die Analyse der Sichtverdeckungen sowohl von gesetzlicher Seite als auch von Automobilclubs und Zeitschriften bereits seit langer Zeit ein wichtiges Thema ist. Grund dafür ist die nicht zu unterschätzende Bedeutung der Sicht für die Verkehrssicherheit bzw. das Unfallgeschehen. Bei der näheren Betrachtung der Analyse zeigt sich, dass die Durchführung relativ aufwändig ist und die Definitionen und Verfahren seit Jahrzehnten nicht



weiterentwickelt oder an die Veränderungen der aktuellen Karosseriebauweisen der Fahrzeuge angepasst wurden. Wichtige Einflussfaktoren auf die Sicht in den Verkehr finden keine Berücksichtigung in den Sichtbewertungsverfahren. Auch ist für die Sicht des Fahrers auf die Instrumente im Fahrzeuginnenraum bisher kein Analyse- und Bewertungsverfahren bekannt, um eine Sichtauslegung im Fahrzeuginneren zu quantifizieren. Alle vorgestellten Methoden können ausschließlich die geometrische Sichtbarkeit berücksichtigen. Eine Beurteilung der resultierenden kognitiven Wahrnehmung durch den Fahrer bleibt bei den etablierten Verfahren bisher gänzlich unberücksichtigt.



4 Sichtanalysefunktionen des 3D-Menschmodells RAMSIS

Im vorigen Kapitel 3 wurde die Bedeutung des Sehens für das Verkehrsunfallgeschehen sowie Testverfahren und Regelungen für die geometrischen Eigenschaften des Fahrzeugs beschrieben.

Im nun folgenden Kapitel 4 werden die die Sichtanalyse- und -bewertungsfunktionen für das 3D-Menschmodell RAMSIS vorgestellt, die im Rahmen des dreijährigen Forschungsprojektes ‚RAMSIS kognitiv‘ vom Autor definiert und spezifiziert wurden. Das Forschungsprojekt wurde vom RAMSIS-Eigentümerkonsortium, bestehend aus der deutschen Automobilindustrie beauftragt und finanziert. RAMSIS (Rechnergestütztes Anthropometrisch-Mathematisches System zur Insassensimulation) ist ein Simulations-Programm zur ergonomischen Auslegung von Fahrzeugen. Die technische Besonderheit dabei ist, dass RAMSIS als Computer-Aided-Engineering-Software (CAE) in einem unmittelbaren Zusammenspiel mit Computer-Aided-Design (CAD) eingesetzt wird.

RAMSIS wurde 1987 begonnen zu entwickeln und ist seit 1994 im praktischen Einsatz vorwiegend zur anthropometrischen Auslegung und Analyse von Fahrzeugen (Seidl et al. 1995). Seitdem wird es kontinuierlich weiterentwickelt und wird weltweit von der überwiegenden Zahl der Pkw-Hersteller, aber auch in vielen anderen Fahrzeugbranchen eingesetzt.

Aufgrund der steigenden Bedeutung von Fahrerinformations- und -kommunikationssystemen sowie von Fahrerassistenzsystemen hat die visuelle Informationsaufnahme über Anzeigen im Fahrzeuginneren teilweise zu Lasten der Sicht in den Verkehr deutlich an Bedeutung zugenommen und erfordert eine wesentliche Berücksichtigung bei der Gestaltung des Fahrerplatzes.

Aus diesem Grund hat das Projekt „RAMSIS kognitiv“ zum Ziel gehabt, das 3D-Menschmodell um wichtige Analyse- und Auslegungsfunktionen für die visuelle Wahrnehmung zu ergänzen und damit die aktuellen und zukünftigen Anforderungen der ergonomischen Fahrzeugauslegung zu entsprechen.

Die spezifizierten Analysefunktionen wurden seitens der Human Solutions GmbH programmiert und in die Software RAMSIS integriert. Sie bilden sowohl die optisch-geometrischen Eigenschaften der reizinduzierenden Signale als auch die optisch-



physiologischen Eigenschaften des Auges ab. Diese Umfänge modellieren somit Eigenschaften der menschlichen Perzeption, also des ersten Schrittes des visuellen Kognitionsprozesses. Vorveröffentlichungen zum Themenumfang dieses Kapitels sind bereits durch *Remlinger & Bubb* (2007, 2008 und 2008), *Remlinger et al.* (2008, 2009 und 2009) sowie *Lorenz, Remlinger et al.* (2011 und 2011) erfolgt.

Die im Kognitionsprozess folgenden Schritte der Interpretation und Selektion sowie der Adaption und Modifikation sind in den hier erarbeiteten Funktionsumfängen von RAMSIS noch nicht enthalten und sollen in späteren Forschungsprojekten erarbeitet werden.

Die inhaltlichen Umfänge sind im Besonderen für Sichtanalysen im Fahrzeug konfiguriert. Ihr Anwendungsspektrum deckt andere Bereiche, in denen die visuelle Wahrnehmung des Menschen von ähnlicher Bedeutung ist, mit ab.

4.1 Der ergonomische Auslegungsprozess von Fahrzeugen

Die Schwerpunkte von RAMSIS lagen bisher im Bereich der anthropometrischen Ergonomieauslegung der konstruktiven Geometrie von Fahrzeuginnenräumen, speziell Fahrerplätzen.

Die ergonomische Gestaltung der Anzeige- und Bedienkonzepte im Fahrzeug ist seit Einführung moderner Infotainment- und Fahrerassistenzsysteme wieder ein wichtiger und weiterhin wachsender Aufgabenbereich, der vor allem kognitive bzw. systemergonomische Kenntnisse erfordert. Beide ergonomischen Arbeitsfelder sind bei der produktergonomischen Auslegung von Fahrzeugen eng miteinander verzahnt. Die geometrisch-funktionelle Gestaltung des Human-Machine-Interface (HMI), also das Layout der Anzeigen und Bedienelemente, bildet die Nahtstelle beider Aufgabenfelder. Der Wahrnehmungs- und Interaktionsprozess des Fahrers besitzt sowohl physiologische als auch psychologische Anteile. Jede Information hat neben der inhaltlichen Komponente (Was) zusätzliche eine örtliche Komponente (Wo), im Fahrzeug speziell mit dem räumlichen Bezug zum Fahrer. Für die integrierte und anspruchsvolle ergonomische Auslegung moderner Fahrzeuge ist es erforderlich, den methodischen Arbeitsprozess der anthropometrischen und der kognitiven Ergonomieauslegung miteinander zu verbinden. Abbildung 4-1 verdeutlicht die Naht-



stelle beider Arbeitsfelder der Ergonomie unter beispielhafter Darstellung gebräuchlicher softwaregestützter Auslegungswerkzeuge in der Fahrzeugentwicklung.

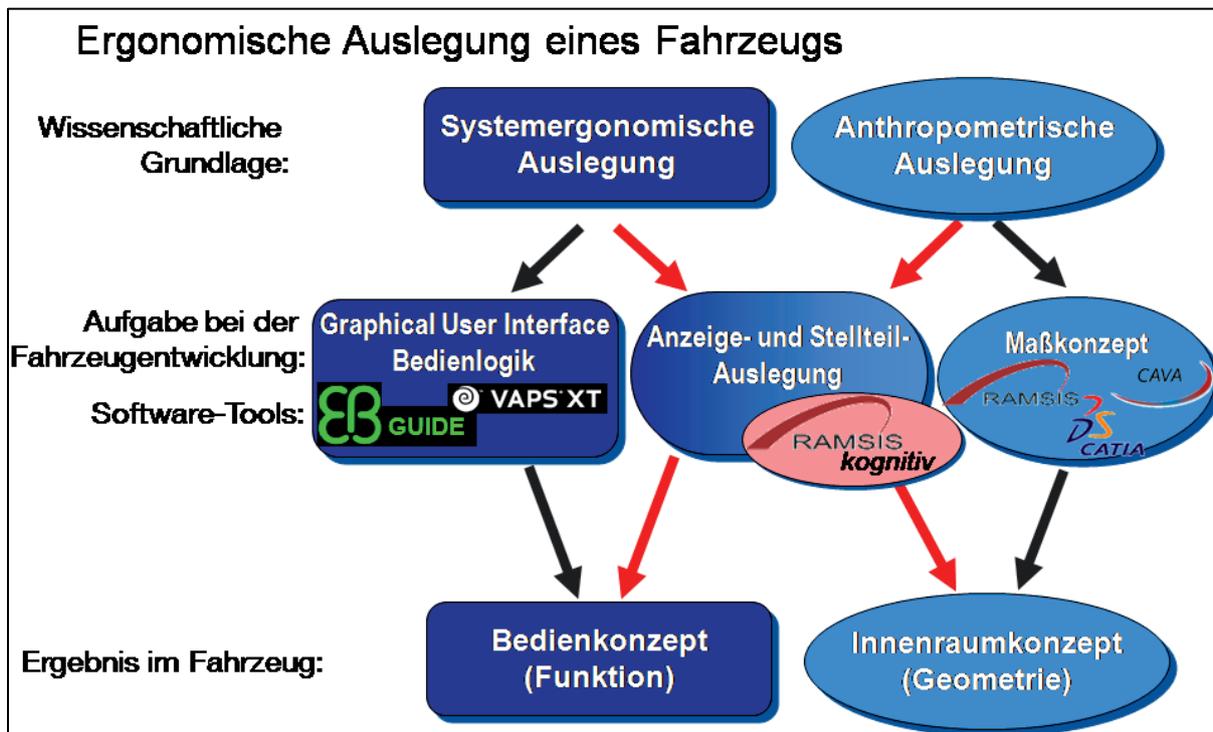


Abbildung 4-1: Anzeig- und Stellteilauslegung als Schnittmenge der Anthropometrischen und Systemergonomischen Fahrzeugauslegung

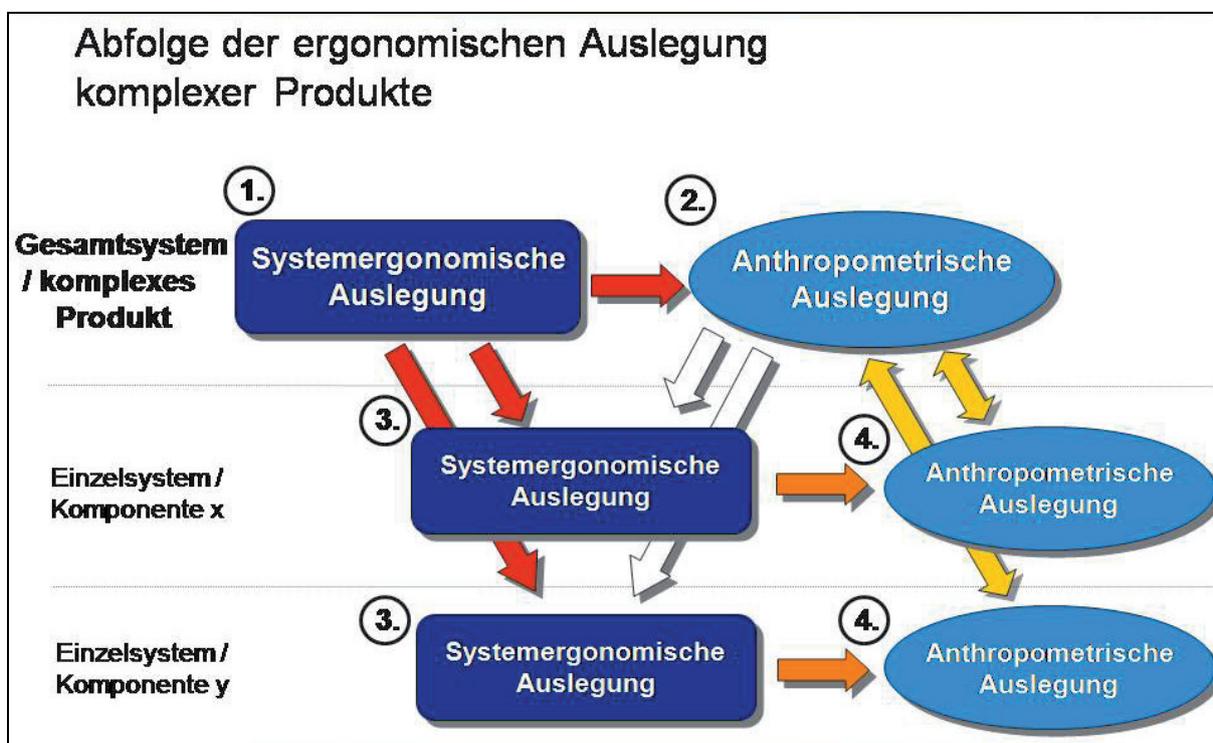


Abbildung 4-2: Abfolge der ergonomischen Auslegung komplexer Produkte



Neben der inhaltlichen Vernetzung der beiden Arbeitsfelder existiert auch eine sinnvolle prozesstechnische Reihenfolge der Auslegungstätigkeiten. Gerade bei der arbeitsteiligen Entwicklungsbearbeitung komplexer moderner Produkte wie dem Fahrzeug unter Beteiligung einer Vielzahl von Organisationen und Personen ist ein sinnvoll strukturierter Prozess effizienzprägend. Abbildung 4-2 stellt modellhaft die Reihenfolge der Bearbeitung für die Auslegung des Gesamtsystems und der Einzelsysteme bzw. Komponenten dar (Remlinger et al., 2007). Die Nummerierung von 1. bis 4. zeigt die Reihenfolge der Bearbeitung der einzelnen Arbeitsschritte. Die Pfeile verdeutlichen, welche vorangegangenen Schritte, welche nachfolgenden beeinflussen. Zum Ende der Auslegungsfolge muss ein stimmiger Abgleich zwischen den Anthropometrischen Auslegungen des Gesamtsystems und der Einzelkomponenten erfolgen, um ein schlüssiges Gesamtkonzept zu erlangen (orangefarbene Pfeile).

Die beiden Aspekte, stetig wachsende Bedeutung der Anzeige-/Bedienkonzepte und effiziente Ergonomieauslegung, führten das RAMSIS-Softwarehaus, die Human Solutions GmbH, zur Entwicklung eines neuen Funktionsmoduls für das RAMSIS-Menschmodell. Das Projekt ‚RAMSIS kognitiv‘, das gemeinsam mit dem Lehrstuhl für Ergonomie der Technischen Universität München unter Finanzierung der deutschen Automobilhersteller Audi, BMW, Daimler, Porsche und Volkswagen durchgeführt wurde, will den ersten Schritt vom anthropometrischen 3D-Menschmodell in Richtung eines kognitiven Menschmodells gehen. In diesem dreijährigen Projekt wurden elf Auslegungs- und Analysefunktion für Anzeigen im Fahrzeug entwickelt und in der Anwendersoftware implementiert. Damit konnte für die frühe Phase des Kognitionsprozesses des Fahrers, die visuelle Perzeption, ein leistungsfähiges und anwendungsorientiertes Auslegungswerkzeug realisiert werden.

Die erste Implementierung dieser Funktionen erfolgte in das RAMSIS-Modul für die CAD-Software CATIA V5 von Dassault, die zum Zeitpunkt des Projektes in der Automobilindustrie und speziell bei den Projektauftraggebern am meisten verbreitet war. Das neuere Alternativsystem Siemens NX (früher Unigraphics) wurde im Projekt noch nicht berücksichtigt.



4.2 Beschreibung und Hintergrund des Forschungsprojektes ,RAMSIS kognitiv'

Mit zunehmendem Einsatz elektronischer Assistenzsysteme verändert sich die Fahraufgabe mehr und mehr zu einer Doppeltätigkeit. Neben die unmittelbare primäre Fahrzeugführung stellt sich die mittelbare Interaktion des Fahrers mit Fahrerinformations-, -kommunikations- und -assistenzsystemen als zunehmend umfassender werdende Sekundäraufgabe. Die Informationsübermittlung dieser elektronischen Systeme erfolgt ebenso wie die ‚natürliche‘ Informationsaufnahme vorwiegend visuell.

Das Ressourcenmodell des menschlichen Kognitionsprozesses macht deutlich, dass jede Zuwendung zu einer sekundären Tätigkeit innerhalb des Fahrzeugs Ressourcen von der Verkehrsbeobachtung für die primäre Fahrzeugführung abzieht. *Eckstein* (2005) erläutert, wie die zeitliche Verteilung der Blickzuwendung ein objektives Merkmal dafür sein kann.

Für die ergonomische Gestaltung des Fahrerplatzes ergeben sich daraus zwei wesentliche Aufgabenstellungen:

- Uneingeschränkte visuelle Informationsaufnahme des Fahrers bei direkter Sicht nach außen in den Verkehr
- Sichtoptimierung der Anzeigen zur effektiven visuellen Wahrnehmung der Informationen im Fahrzeug

Bei der Definition der Projektziele für die Entwicklung der neuen Funktionen von ‚RAMSIS kognitiv‘ standen deshalb sowohl die Auslegung von Displays und Instrumenten als auch die Außensichtbewertung im Vordergrund. Denn der Anstieg der visuellen Aufgaben des Fahrers insgesamt erfordert nicht nur eine belastungs- und ablenkungsarme Gestaltung der neu hinzukommenden Anzeigen, sondern auch eine Optimierung der klassischen Sehaufgaben des Fahrers. Aus diesem Generalziel wurde die Entwicklung von Sichtanalysefunktionen abgeleitet, die in den folgenden Kapiteln erläutert werden. Mit Hilfe dieser Funktionen können mögliche Sichtbeeinträchtigungen auf Basis virtueller CAD-Modelle mit dem 3D-Menschmodell RAMSIS lange vor Aufbau und der Erprobung eines Prototypen analysiert werden. Im Rahmen des dreijährigen und dreistufigen Projektes ‚RAMSIS kognitiv‘ wurden Sichtfunktionen für die Fahrzeugauslegung entwickelt, die sowohl die optisch-physiologischen Grenzen des Menschen als auch die optisch-geometrischen Bedingungen des Fahr-



zeugs analysieren. Daraus abgeleitet können die Analysefunktionen des Projektes in folgender Tabelle 4-3 strukturiert werden:

	Informationswahrnehmung innerhalb des Fahrzeugs	Informationswahrnehmung mittels direkter Sicht in den Verkehr
Physiologische Grenzen der visuellen Wahrnehmung	<ul style="list-style-type: none">• Sichtfelder, Blickfelder, Brillensicht• physiologische und psychologische Blendung• Akkomodationsgrenzen des Auges• Sehschärfe• Blickabwendungszeiten	<ul style="list-style-type: none">• dynamische Sichtgrenzen beim Fahren• Vorausschaublicke
Geometrisch-optische Grenzen der visuellen Wahrnehmung	<ul style="list-style-type: none">• Geometrische Sichtverdeckung• Liquid Cristal Displays• Head-up-Displays	<ul style="list-style-type: none">• Streckenverlauf und Position im Verkehr• Projektion der Sichtbereiche und Daimler-Scholly-Verfahren

Tabelle 4-3: Struktur der in ‚RAMSIS kognitiv‘ entwickelten Analysefunktionen

4.3 Analysefunktionen hinsichtlich der physiologischen Grenzen der visuellen Wahrnehmung im Fahrzeug

In diesem Abschnitt werden alle diejenigen neuen RAMSIS-Analyse-Funktionen beschrieben, die die visuelle Wahrnehmung im Fahrzeug aufgrund von physiologischen Grenzen des Menschen einschränken:

4.3.1 Sichtfelder, Blickfelder, Brillensicht

Eine grundlegende Funktion für die Auslegung von Anzeigen in Fahrzeugen ist in der Funktion der Darstellung der Blickfelder zu sehen. Da jede Person aufgrund ihrer individuellen Körpermaße und Komfortansprüche eine unterschiedliche Sitzposition und damit auch eine unterschiedliche Position der Augen im Fahrzeug einnimmt, ist das Variationsspektrum der Bevölkerung bei der Positionierung und Gestaltung der Anzeigen zu berücksichtigen.



Das Menschmodell RAMSIS bietet eine sehr gute Prognose für die Körperhaltung und Augpunktlagen der unterschiedlichsten Körpermaßtypen und kann nun mittels der neuen Analysefunktion der Ablesbarkeit jeweils das maximale und das optimale Blickfeld auf Basis der Basisdaten aus *Lange* (Lange et al. 2008) und *Schmidtke* (1989, B5.1) dreidimensional in Bezug auf den Körper des Fahrers und die Geometrie des Fahrzeugs darstellen. Abbildung 4-4 zeigt die Bereiche in einem Polardiagramm.

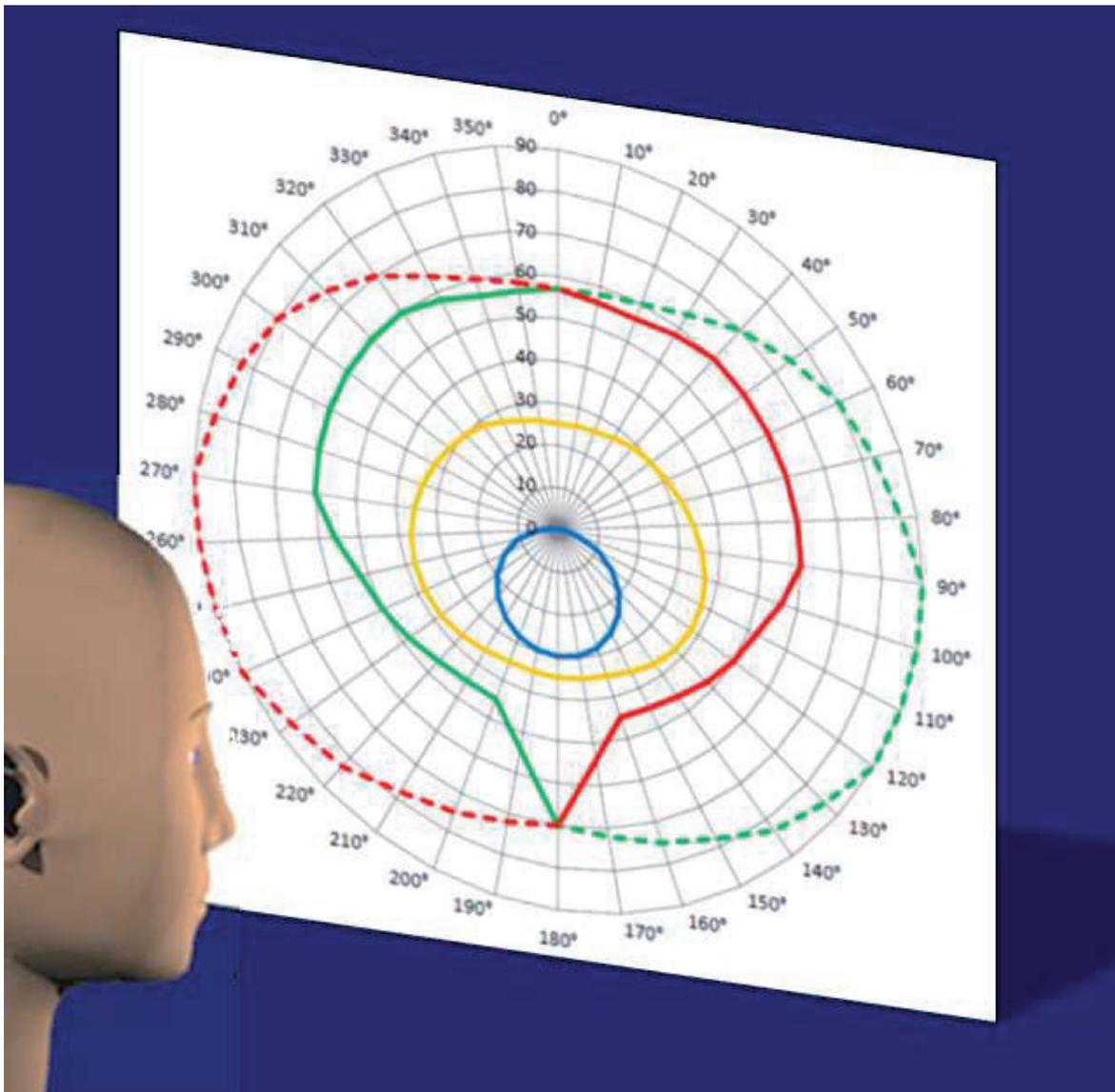
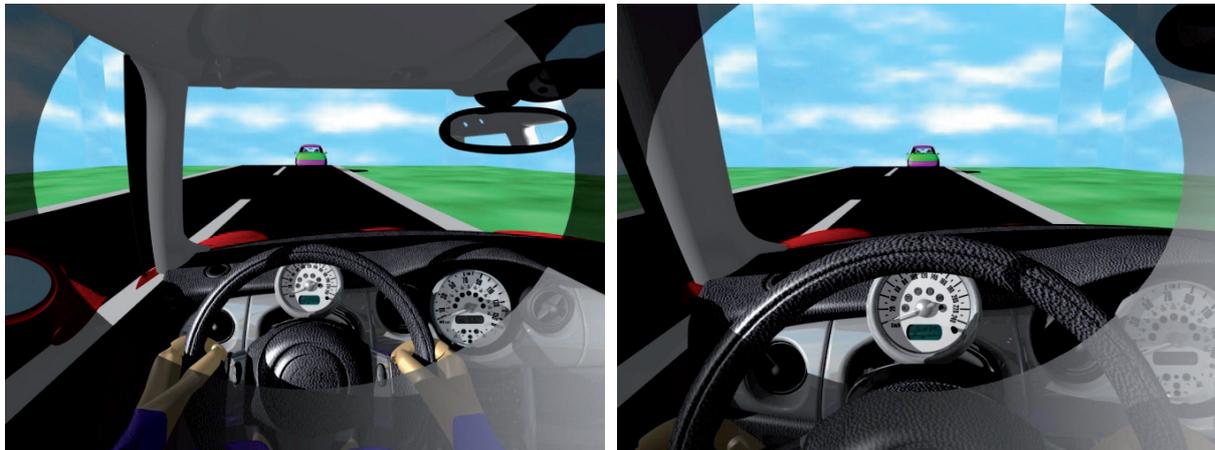


Abbildung 4-4: Polardiagramm der räumlichen Sehfelder des Menschen
 Gesichtsfeld monokular: linkes Auge (**rot**) / rechtes Auge (**grün**), Gesichtsfeld binokular: durchgezogene rot-grüne Linien,
 Gesichtsfeld ambinokular: gestrichelte Linien
 (nach Schober 1970 bzw. Flügel et al 1986),
 optimales (**blau**) und maximales (**gelb**) Blickfeld (nach Lange 2008)



Damit lässt sich sehr einfach eine geeignete Lage und Ausrichtung einer Anzeige ermitteln, die für alle Fahrer in einer günstigen Position für einen schnellen und komfortablen Blickwechsel ohne Kopfbewegung, allein mittels einer schnellen Augenbewegung zu ihrer normalen Fahrhaltung als Ausgangsposition liegt. Da RAMSIS auch eine Sichtperspektive aus dem Fahrerauge simulieren kann, ist das Ergebnis der Anordnung aus unterschiedlichen subjektiven Perspektiven leicht nachprüfbar. Die Abbildungen 4-5 und 4-6 verdeutlichen die unterschiedlichen maximalen Blickfelder für einen mittelgroßen Mann (M50%) und eine kleine Frau. (F05%). Die Ermittlung der Blickfelder hat bei der Fahrzeugauslegung eine besondere Relevanz. Die Sitzpositionen und Augpunktpositionen kleiner Frauen liegen aufgrund der notwendigen Pedalbetätigung weit vorne, so dass deren Blickfeldkegel auf der Instrumententafel als nutzbarer Anordnungsbereich für wichtige Anzeigen sehr klein wird.



Abbildungen 4-5 (links) und 4-6 (rechts): Maximales Blickfeld aus Fahrersicht mittels RAMSIS-Simulation: links: Sicht eines mittelgroßen Manns, rechts: Sicht einer kleinen Frau

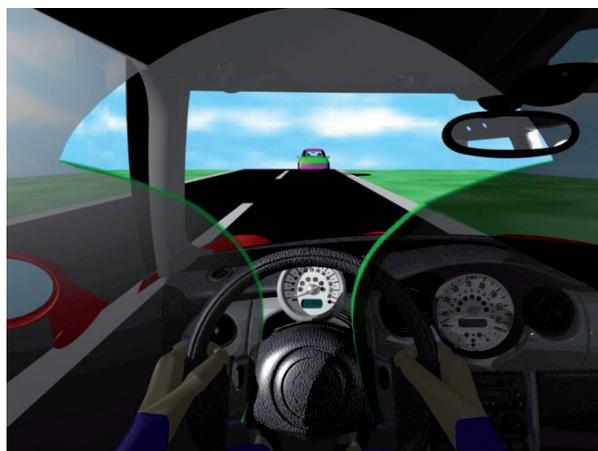


Abbildung 4-7: Fahrerblickfeld mit Gleitsichtbrille (Sicht mittlerer Mann)



Die zusätzliche Möglichkeit der Darstellung der Gesichtsfeldgrenzen in der neuen RAMSIS-Funktion erlaubt zudem die Überprüfung der Wahrnehmbarkeit von Signalen von beispielsweise Kontrollleuchten im peripheren Bereich oder von bewegten Objekten.

Bei der Korrektur von Sehschärfeeinbußen durch eine Brille kann die Geometrie der Brillengläser die Blickfeldgrenzen einschränken. Dies ist bei der Verwendung von Gleitsichtlinsen besonders stark. Aus diesem Grund sind die Begrenzungen der Brillengläser bei zwei unterschiedlich großen Brillenfassungen ebenfalls in der Funktion hinterlegt. Abbildung 4-7 zeigt deutlich, dass das Tragen von Gleitsichtbrillen die seitliche Augenbewegung im Nahbereich erheblich einschränkt und für Blicke auf die Mittelkonsole des Fahrzeugs immer eine Kopfbewegung erforderlich ist. Ebenfalls ist ein dreidimensionaler Tiefenkorridor für den Scharfsehbereich der Gleitsichtgläser in der RAMSIS-Funktion hinterlegt. (Fahrner 1998, Goersch 2000, Hartmann et al. 1987, Reiner 1978).

4.3.2 Physiologische und psychologische Blendung

Aufgrund der großflächigen Verglasung der Innenräume von Fahrzeugen ist ein großer Teil des Fahrzeuginnen bei entsprechender Wetterlage der direkten Sonneneinstrahlung ausgesetzt. Die Sonneneinstrahlung kann außerdem je nach Fahrzeugposition aus nahezu beliebigen Winkeln oberhalb des Horizonts in das Fahrzeug einfallen. Ein typischer Fall dafür ist der direkte Blick in die tiefstehende Sonne über den Horizont. Hier tritt zumeist eine Direktblendung (engl.: direct glare) auf. Wenn die Sonne auf eine hochglänzende Oberfläche im Fahrzeuginnenraum trifft, wird der Sonnenstrahl durch Bereiche der zumeist gewölbten Flächen häufig auch in Richtung der Fahreraugen reflektiert. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von Reflexblendung (engl.: reflected glare) durch Tageslichtspiegelung (daylight reflection). Die Oberflächen, die zur Blendungsgefahr beitragen können, sind einerseits hochglänzende Flächen der Innenausstattung wie Zierleisten oder Applikationsflächen und andererseits die Deckgläser der Anzeigen. Mit zunehmender Anzahl und Größe der Anzeigen wird von den Automobilherstellern immer häufiger aus vermeintlich ästhetischen Aspekten auf eine effektive lichtgeschützte Anordnung durch eine Hutze oder in einer Vertiefung verzichtet. Sowohl die Direktblendung als auch die Reflexblendung



dung kann zu einem starken Lichteinfall mit physiologischer Blendung (engl. disability glare) des Auges führen. Dieser Lichteinfall mit hoher Leuchtdichte führt zu einer starken Helligkeitsadaptation des Auges, so dass aus dem Lichteinfall der Umgebung kein Bild erfasst werden kann.

In ähnlicher Form tritt ein Blendungseffekt auch bei der Sicht durch die Frontscheibe auf, wenn eine Spiegelung sehr heller Gegenstände (z.B. weißes Papier auf der Instrumententafel) oder von Flächenabschnitten in sehr kontrastreicher Farbgebung erfolgt. Die Abbildung dieser hellen Flächen durch Reflektion in der Frontscheibe wirken für den Sehapparat ablenkend und irritierend. Der Betrachter kann die dunkleren Informationen im Hintergrund nicht erfassen oder sich nicht uneingeschränkt auf die Blickobjekte hinter der Frontscheibe konzentrieren. Dieser Blendungseffekt wirkt nicht vorwiegend im Auge, sondern im Gehirn und wird deshalb als psychologische Blendung (engl.: discomfort glare) bezeichnet.

Für die Anzeigen tritt eine Beeinträchtigung der Ablesbarkeit bereits dann ein, wenn Teilbereiche der Deckscheiben eine Reflektion aus Bereichen hoher Umgebungshelligkeit wie beispielsweise hellen Wolken am Himmel bewirken, auch ohne dass eine direkte Spiegelung der Sonne stattfindet. Obwohl das Auge nicht einer physiologischen, sondern einer psychologischen Blendung ausgesetzt ist, ist der Helligkeitsunterschied zwischen dem hellen Reflektionsbereich auf dem Deckglas und der dahinter liegenden Anzeige so groß, als dass die Reflektion überstrahlt und das Auge nicht auf die niedrige Helligkeit der Anzeige adaptieren kann.

Die Frontscheibe kann auch bei Nacht störende Spiegelungen zeigen. Dann sind es häufig hinterleuchtete Anzeigen wie Displays, Instrumente oder Schalterbeleuchtungen, die sich in der Frontscheibe für den Fahrer sichtbar spiegeln. Dieses Phänomen wird auch mit dem Begriff Nachtspiegelung (night reflection) bezeichnet.

Um bei der Auslegung des Fahrerplatzes die Entstehung von Blendungseffekten überprüfen zu können, wurde in RAMSIS eine Funktion zur Analyse der Reflektion erstellt. Diese Funktion stellt die Möglichkeit bereit, den Verlauf von reflektierten Lichtstrahlen im Fahrzeuginnenraum geometrisch nachzuverfolgen und die Herkunft des reflektierten Lichts zu identifizieren (Abbildungen 4-8 und 4-9). Die Funktion erzeugt ein Strahlenbündel, das von der ausgewählten Oberfläche ins Auge treten würde, und konstruiert entgegen der Richtung des Lichtes den Ausgangsverlauf die-

ser Strahlen. Diese auf die Oberfläche eintretenden Strahlengänge werden hinsichtlich ihres Herkunftsortes analysiert. Die Ergebnisse der konstruktiven Berechnung zeigen den Strahlengang von ihrem jeweiligen Ausgangspunkt über die reflektierende Fläche bis zum Fahrerauge. Durch diese geometrische Repräsentation des eigentlich ‚unsichtbaren‘ Lichtverlaufes werden mögliche Optionen zur Beseitigung dieses Blendungseffektes leichter erkennbar.

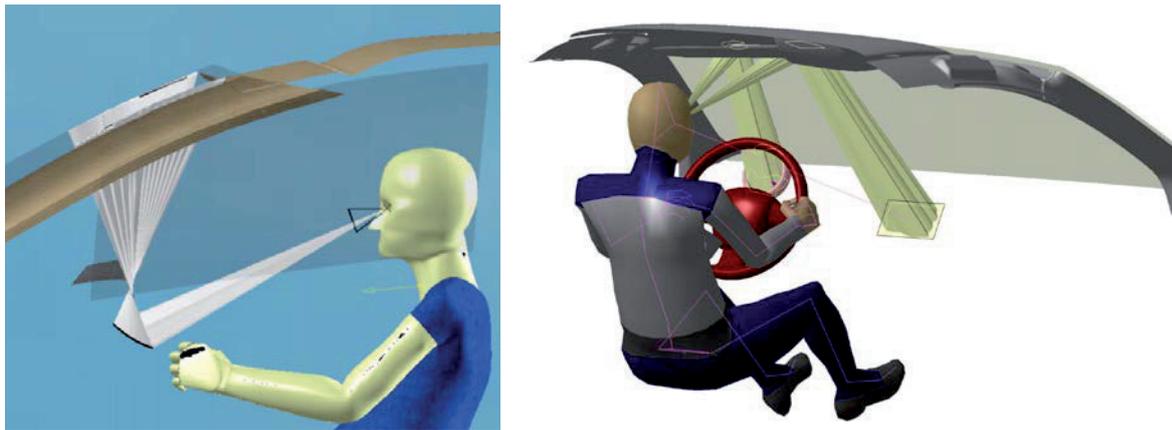
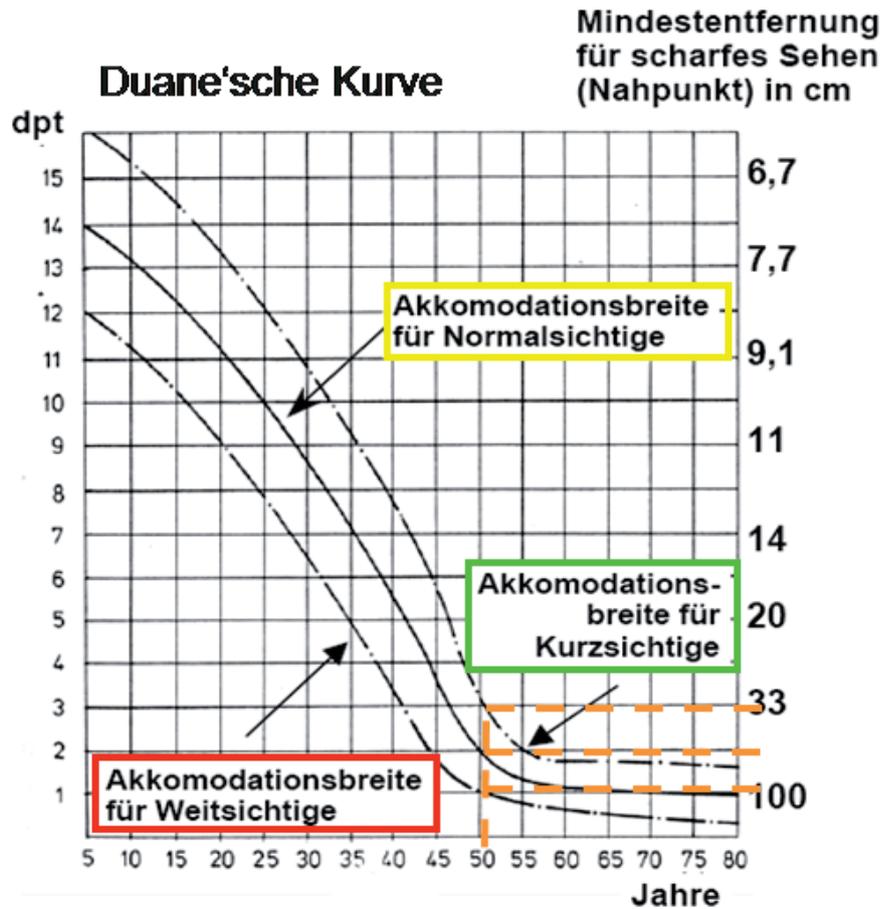


Abbildung 4-8 (links) und 4-9 (rechts): Simulierter Reflektionsstrahlengang von Blendungseffekten: links: Tagspiegelung von Sonnenlicht, rechts: Nachtspiegelung beleuchteter Anzeigen in der Frontscheibe

4.3.3 Akkomodationsgrenzen

Die Linse des Auges verliert mit fortschreitender Alterung des Menschen an Elastizität. Dadurch verringert sich der Brechwert des optischen Systems und es erhöht sich die Brennweite (Kehrwert des Brechwertes) des Auges. Der Nahpunkt, also die minimale Sehentfernung in der das Auge scharf sehen kann, entfernt sich vom Auge. Diese Veränderung über das Alter ist als Duane'sche Kurve bekannt (Abbildung 4-10).

Um die Auswirkungen für die Positionierung von Anzeigen im Fahrzeug darstellen zu können, kann RAMSIS in einer neuen Funktion die Mindestsehentfernung für Normalsichtige, Kurzsichtige und Weitsichtige als Kugelsegmente um das Fahrerauge geometrisch erzeugen. Abbildung 4-11 zeigt die Mindestsehentfernungen im Fahrzeug. Die minimale Sehentfernung ist in der RAMSIS-Funktion anhand des zu prüfenden Alters eines Fahrers einstellbar. (Draeger 1995)



Abbildungen 4-10 (oben) und 4-11 (unten):
 Mindestsehentfernungen im Fahrzeug:
 oben: altersbedingter Akkomodationsverlust;
 unten: Distanzen im Fahrzeug für 50-jährigen mittelgroßen Fahrer



4.3.4 Sehschärfe

Als anguläre Sehschärfe wird die optische Auflösung des Auges bezeichnet, die zur Trennung benachbarter Konturen erforderlich ist. Sie wird in Deutschland üblicherweise als Visus angegeben, der den Kehrwert des vorhandenen Winkelauflösungsvermögens in Bogenminuten angibt. Die normale Sehschärfe eines jungen, gesunden Erwachsenen beträgt eine Bogenminute und somit Visus 1. Kinder oder Jugendliche können schärfer sehen bis hin zu 0,5 Bogenminuten, bzw. Visus 2. Als Mindestsehschärfe zum Erwerb der deutschen Führerscheinstufe B wird ein Visus 0,7 verlangt, der auch mit Hilfe einer Sehhilfe (Brille, Kontaktlinsen) hergestellt werden kann. Die Verwendung der Sehhilfe ist dann für den Fahrer verpflichtend. Für andere Führerscheinstufen und in anderen Ländern werden unterschiedliche, meist Mindestsehschärfen verlangt, die zumeist höher liegen als in Visus 0,7.

International ist die Angabe auch als Snellen-Wert gebräuchlich. Hierbei wird der tatsächliche erforderliche Sehabstand zu dem als normal festgelegten Sehabstand ins Verhältnis gesetzt. Die Angabe der Sehstärke wird als Bruch oder als Dezimalwert angegeben. Die normale Sehschärfe Visus 1 beträgt als Snellen-Wert metrisch 6/6 oder als englisches Foot-Maß 20/20. Der jeweils gemessene Snellen-Wert beträgt dann beispielsweise 20/40 für die halbe normale Sehschärfe. Das bedeutet in diesem Fall, dass die gemessene Person im Abstand von 20ft ein Sehzeichen erkennen kann, das eine normalsichtige Person in 40ft Abstand erkennt.

Viele Menschen weisen aufgrund der individuellen Beschaffenheit ihrer Augen eine sehr unterschiedliche Sehschärfe auf. Über das Lebensalter verliert jeder Mensch nicht kontinuierlich, sondern phasenweise an Sehschärfe. Da die Erneuerung der Fahrerlaubnis und auch des Sehtests in Deutschland und einigen anderen Ländern nicht obligatorisch ist, liegt die tatsächliche aktuelle Sehstärke vieler Fahrer unter dem gesetzlich vorgeschriebenen Mindestwert.

Als weitere Analysefunktion zur Prüfung der Informationsaufnahme im Fahrzeug ist eine Sehschärfeanalyse in RAMSIS integriert. Mit Hilfe dieser Funktion kann auf den eingestellten Fixationspunkt des RAMSIS-Manikins entsprechend der Sehschärfe des Fahrers lesbare Zeichen dargestellt werden (Abbildung 4-12). Diese Zeichen dienen dazu, die Größe von Beschriftungen von Anzeigen oder Stellteilen, also auf Zifferblättern, Displays oder Schalterkappen, hinsichtlich der Lesbarkeit zu prüfen.



Die eingeblendeten Zeichen der DIN-Schrift (DIN 1451) können in ihrer Größe verändert werden, indem der Sehwinkel entsprechend des Sehschärfe-Visus, verändert wird. (Krueger 1989 S.14 & 55, Lachenmayr 1993 S.37-46, Becker 2005). Die hier entwickelte Analysefunktion entspricht auch den Vorgaben und Anforderungen der Normen DIN EN ISO 894-2, DIN EN ISO 13406 und DIN EN ISO 15008 an die Ablesbarkeit von Schrift.

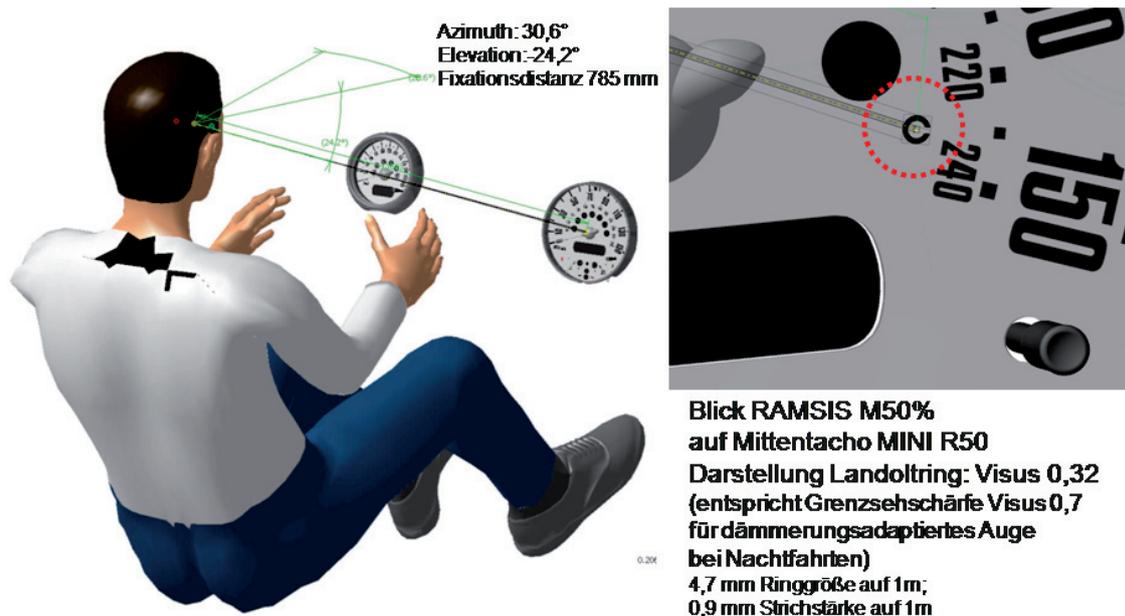


Abbildung 4-12: Sehschärfeanalyse für Fahrzeuginstrumentierungen

Mit Hilfe dieser neuen RAMSIS-Funktion ist dadurch die Möglichkeit gegeben, aufgrund der als CAD-Modell erstellten Anzeigeoberflächen die Zeichengrößen, -abstände, Linienstärken und auch Ausrichtungen zum Fahrerauge systematisch zu überprüfen und gegebenenfalls anzupassen. Dadurch können die ergonomisch empfohlenen Zeichengrößen direkt, auch perspektivisch, in die geometrische Gestaltung der Fahrerumgebung übertragen werden. Denn ein häufig festzustellender Mangel der Beschriftung in Fahrzeugen ist, dass nicht der Sichtwinkel zur Beschriftung aus der Perspektive der Insassen berücksichtigt wurde. Der Anwender kann sich die Zeichendarstellung auch in Visus-Werten darstellen lassen, die bei nachlassender Sehschärfe älterer Fahrer auftreten.



4.3.5 Blickabwendungszeiten

Nimmt das Auge willentlich oder reizinduziert einen Blickwechsel vor (vgl. Kapitel 2.3), so sind dazu eine Augenbewegung und möglicherweise zusätzlich eine Bewegung des Kopfes oder sogar weiterer Abschnitte des Körpers erforderlich. Ob mehr als das Auge bewegt werden muss, ist von der Position des Auges vor und nach dem Blickwechsel abhängig. Ein Blickwechsel oder Fixationswechsel, der innerhalb des optimalen Blickfeldes möglich ist, erfolgt zumeist ausschließlich durch das Auge. Da das Ziel eines Blickwechsels bereits vor Beginn des Blickwechsels der Person unterbewusst bekannt ist, können die ballistische Augen- und, falls erforderlich, die Kopfbewegung parallel erfolgen. Auch die Akkomodation der Augenlinse auf die neue Sehentfernung erfolgt während der Bewegung. Die erforderlichen Bewegungen für den Blickwechsel erfordern jedoch Zeit. Ist ausschließlich eine Augenbewegung erforderlich, so kann ist der Zeitbedarf recht gering, denn die Bewegung des Auges ist mit einer Geschwindigkeit von $500^\circ/\text{sec}$. die schnellste Bewegung die der Mensch vornehmen kann. Wird jedoch eine Kopfbewegung benötigt, so ist die Richtungsänderung mit $100^\circ/\text{sec}$ nach Angaben von *Rassl* (2004) deutlich langsamer.

In jedem Fall ist der Zeitbedarf für einen Blickwechsel des Fahrers von der Straße auf eine Anzeige im Inneren des Fahrzeuges und wieder zurück ein relevanter Zeitanteil für die Dauer der Blickabwendung von der Beobachtung der Straße und des Verkehrs (engl.: eyes off-road time). Die Ablesedauer einer Anzeige, die je nach Informationsgehalt und Verständlichkeit sehr unterschiedlich ist, kommt jeweils hinzu, um die gesamte Blickabwendungsdauer zu kalkulieren. Diese gesamte Blickabwendungsdauer wird häufig als sogenannte Verkehrsblindzeit bezeichnet, also als Zeitabschnitt, in dem keine visuelle Wahrnehmung aus dem Verkehr erfolgen kann.

Wie einige Untersuchungen gezeigt haben, ist die von Fahrern subjektiv akzeptierte Blickabwendungsdauer auf 1 bis 1,5 Sekunden (Bruckmayr & Reker 1994) beschränkt und liegt im Mittel bei 1,35 Sekunden (Rassl, 2004, S. 66) für Blicke ins Fahrzeuginnere. Das hat zur Folge, dass der Zeitbedarf der für den Blickwechsel auf eine Anzeige die akzeptierte Ablesezeit beschränkt. Im Umkehrschluss erlaubt ein geringer Zeitbedarf für den Blickwechsel eine längere akzeptierte Ablesedauer.

Um den Zeitverlust durch den Blickwechsel auf eine bestimmte Anzeigeposition zu kalkulieren, sind in RAMSIS zwei Möglichkeiten der Darstellung des Zeitbedarfs für



den einfachen Blickwechsel implementiert. Zum einen kann durch eine Auswahl von Start und Ziel des Blickwechsels eine konkrete Zeitdauer errechnet werden. Alternativ dazu lassen sich auf die jeweilige Haltung des Fahrers bezogene Isochronen, also Linien gleichen Zeitbedarfs, einblenden, die den Zeitbedarf für den Blickwechsel anzeigen. Diese Darstellung ist in der Abbildung 4-13 oben für einen Normalsichtigen und unten für einen Gleitsichtbrillenträger wiedergegeben.

Die Notwendigkeit der Benutzung einer Brille erzeugt eine weitere Verzögerung für einen Blickwechsel. Die Blickabwendungszeiten steigen an, weil das nutzbare Blickfeld sich deutlich verkleinert. Der Fixationswechsel erfolgt innerhalb des optimalen bzw. maximalen Blickfeldes durch schnelle ballistische Augenbewegungen mit einer Geschwindigkeit von ca. $500^\circ/\text{sec}$. Das an eine einfache Brille oder sogar an eine Brille mit Gleitsichtglas trainierte Auge besitzt jedoch ein deutlich eingeschränktes Blickfeld. So können viele horizontalen Blickwechsel des Auges vor allem im Nah- und Übergangsbereich, die also im Innenraum des Fahrzeugs wechseln, nach Angaben von *Hartmann et al.* (1987) nur mit Hilfe von deutlich langsameren Kopfbewegungen mit ca. $100^\circ/\text{sec}$ erfolgen.



Abbildung 4-13: Blickabwendungszeiten als Isochronen eines Normalsichtigen (oben) und eines Gleitsichtbrillen-trägers (unten)



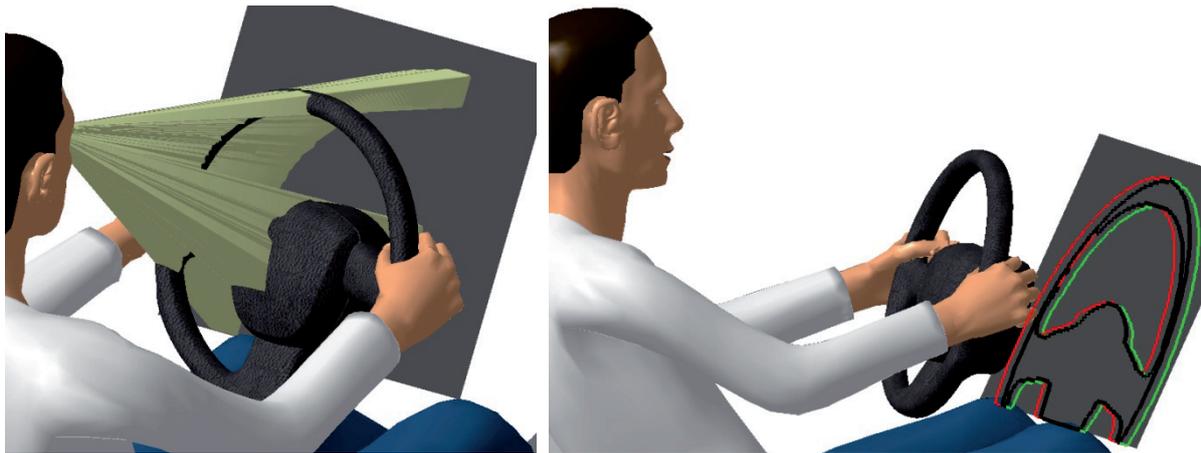
4.4 Analysefunktionen hinsichtlich der geometrisch-optischen Grenzen der visuellen Wahrnehmung im Fahrzeug

In diesem Abschnitt werden alle diejenigen neuen RAMSIS-Analyse-Funktionen beschrieben, die die visuelle Wahrnehmung im Fahrzeug aufgrund von geometrischen Grenzen der Anzeigeobjekte optisch einschränken:

4.4.1 Geometrische Verdeckung

Die grundlegende Voraussetzung für die visuelle Wahrnehmung eines Objektes ist seine unverdeckte Sichtbarkeit. Eine Reihe von Bauteilen im Fahrzeuginterieur kann die direkte Sicht vom Fahrerraum beeinträchtigen. Herausragende Beispiele dafür sind Lenkrad, Schalthebel oder die A-Säulen des Fahrzeugs. Um eine optimale Sichtbarkeit von Anzeigen sicherzustellen, ist also die verdeckungsfreie Positionierung für die Augenpositionen aller Fahrer eine Basisanforderung. Eine solche geometrische Prüfung der Konstruktionsgeometrie ist eine klassische Aufgabe für ein CAD-Programm. Leider besitzt das CAD-System CATIA V5 von Dassault nur eingeschränkte Funktionalität für diese Anforderung. Die konische Projektion einer Objektgeometrie von einem Augpunkt auf eine zweite Objektgeometrie ist nur mit Einschränkungen möglich. Aus diesem Grund wurde diese elementare Basisfunktion für RAMSIS funktionell integriert. Dazu werden ausgehend vom Fahrerraum Bündel von Sichtstrahlen auf die betreffenden Geometrien ausgesandt. Die Strahlen, die auf ein schattengebendes Objekt treffen, werden von diesem begrenzt. Alle direkt auf die Hintergrundgeometrie treffenden Sichtstrahlen werden erst dort limitiert. Die Ränder der Schattengrenzen werden dabei explizit hervorgehoben. Die Berechnungsgenauigkeit ist durch eine Einstellung der Dichte des Strahlenbündels auszuwählen.

Abbildung 4-14 zeigt eine typische Anwendung, die zum Standardprogramm einer ergonomischen Fahrerplatzauslegung zählt: Es handelt sich dabei um die Analyse der Sicht durch den Lenkradkranz, die oftmals für die Auslegung und Positionierung der Instrumente von Bedeutung ist. Da die Sichtverdeckung der Anzeigen häufig ein binokulares Problem darstellt, denn die Sichtschatten des linken und rechten Auges überlappen sich nur teilweise, kann die Analysefunktion monokulare und binokulare Verdeckungen ermitteln. Abbildung 4-15 zeigt diese Anforderung auf eine ebene Fläche für die Anordnung von Anzeigen und Instrumenten. Die resultierende gekrümmte unverdeckte Fläche wird auch als ‚Lenkradbanane‘ bezeichnet.



Abbildungen 4-14 (links) und 4-15 (rechts): Analyse des Sichtschattens des Lenkrades für die Sicht auf das Kombiinstrument: links: halbseitige Darstellung der abgeschatteten Sichtstrahlen, rechts: Darstellung der monokularen und binokularen Sichtgrenzen auf der Zifferblattebene → ‚Lenkradbahnane‘

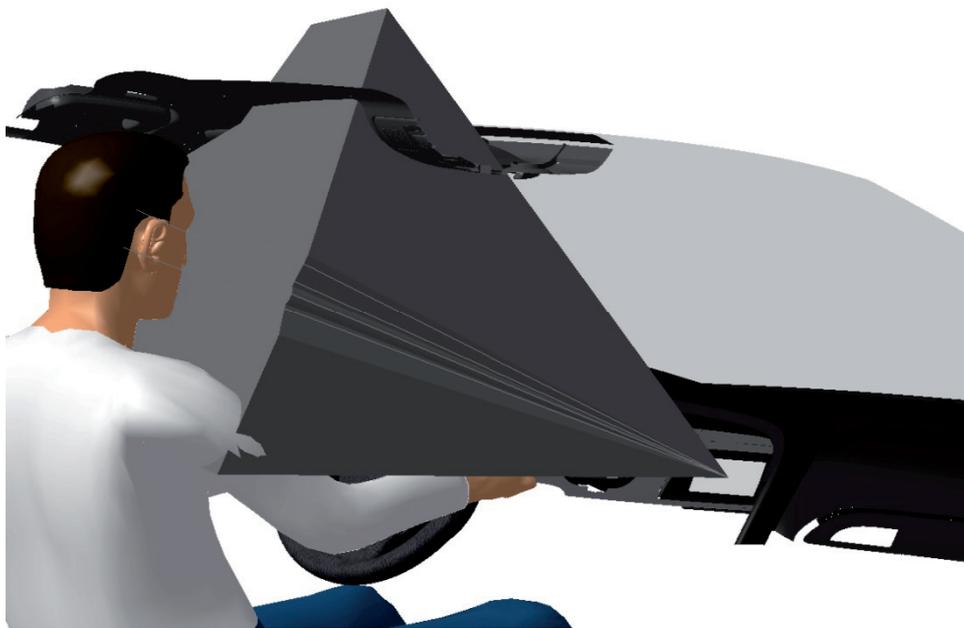


Abbildung 4-16: Einsehbereich (‚Tulpe‘) eines LCD im Fahrzeug (Halbseitendarstellung)

4.4.2 Liquid Crystal Displays

Die Verwendung von Flüssigkristallbildschirmen (Liquid Crystal Displays, LCD) im Fahrzeug hat in den vergangenen Jahren eine hohe Verbreitung für die Verwendung in Navigations- und Infotainmentsystemen erfahren. In kleinerem Umfang werden bereits LCDs für eine flexible Gestaltung und Bilddarstellung in der Fahrzeuginstru-



mentierung im Kombiinstrument eingesetzt. Der Einsatz von sogenannten Dual-View-Displays, also Displays mit gleichzeitiger unterschiedlicher Bilddarstellung für Fahrer- und Beifahrerperspektive stehen in Serienfahrzeugen kurz bevor.

Wie bereits zuvor beschrieben ist das allgemeine Helligkeitsniveau im Fahrzeuginnenraum sehr hoch. Aus diesem Grund werden bereits spezielle technische Maßnahmen ergriffen, damit die Bilddarstellung von LCDs im Fahrzeug eine zufriedenstellende Helligkeit und Kontrastdarstellung besitzen. Diese optischen Eigenschaften sind jedoch zumeist nur in einem begrenzten Winkelbereich zu erzielen. Aufgrund der Anordnung des Displays im Fahrzeuginnenraum ergeben sich vielfach Blickrichtungen, die sehr weit seitlich zur Bildschirm-Normalen ausgelenkt sind. Möglicherweise unterscheiden sich die Blickrichtungen auf das Display auch durch die Innenraumgestaltung in unterschiedlichen Fahrzeugmodellen voneinander. Die neuentwickelte Analysefunktion der Displaysicht in RAMSIS dient nun dazu, die optischen Eigenschaften der Displays und die Anordnung relativ zur Blickrichtung der Insassen seitens der technischen Auslegung möglichst gut aufeinander abzustimmen. Dazu besitzt die Funktion zwei Vorgehensweisen, um den Einsehbereich der LCDs darzustellen: Um einerseits die Verwendung bestehender LCDs hinsichtlich der gewünschten Einbauposition zu überprüfen, müssen die optischen Eigenschaften dieses Displays messtechnisch mit Hilfe eines Goniometers in den unterschiedlichen Abstrahlrichtungen ermittelt werden. Bei der Modellierung der Anzeigefläche des Displays werden in der RAMSIS-Funktion die messtechnisch ermittelten optischen Grenzen in 4, 8, 12 oder 16 Abstrahlrichtungen numerisch eingegeben. Auf dieser Basis wird ein trichterförmiger oder besser tütenförmiger geometrischer Körper dargestellt, der von den Fachleuten auch als ‚Tulpe‘ bezeichnet wird. Dieser tütenförmige Körper repräsentiert das Raumsegment, aus dem ein Fahrzeuginsasse mit den optisch spezifizierten Eigenschaften auf das Display sehen kann. Die Übereinstimmung der Augpunktlage mit dem tütenförmigen Körper kann nun einfach überprüft werden.

Um andererseits für die Entwicklung oder Optimierung eines geeigneten Displays die gewünschten Einblickwinkel zu berücksichtigen, kann in einer zweiten Anwendungsform die Lage der Augpunkte zum Einsehbereich und der Displaynormalen bestimmt werden. Diese können dann als separate Geometrie dem Displayentwickler dazu dienen, durch Modifikation des Displays die gewünschten Einsehbereiche zu ermög-



lichen. Abbildung 4-16 zeigt in einer halbseitigen Darstellung die so genannte ‚Tulpe‘ für den Einsehbereich des Displays.

Diese Funktion kann in gleicher Weise dazu eingesetzt werden, die Einsehbereiche des Dual-View-Displays zu ermitteln, um so die Einsicht in die jeweiligen Bilder für Fahrer, Beifahrer und Fondpassagiere zu definieren. Ebenso ist die Funktion hilfreich, um die Abstrahlbereiche von Leuchten innerhalb des Fahrzeugs zu überprüfen. Lese- und Innenleuchten sollen ihr Licht in definierten Bereichen abstrahlen, um einen optimalen Nutzen für die Insassen zu haben und die Blendung des Fahrers zu vermeiden. Die funktionelle Implementierung in die RAMSIS-Version für CATIA V5 ermöglicht in dieser und anderer neuer Sichtanalyse-Funktionen die direkte Nutzung der parametrischen CAD-Funktionalität.

4.4.3 Head Up Displays

Die Verwendung von Head-Up-Displays zur Informationsdarstellung ist vor allem in der militärischen Fliegerei seit vielen Jahren bekannt. Durch die Verwendung eines halbdurchlässigen Combiner-Spiegels kann der Pilot oder auch der Fahrer eines Straßenfahrzeuges bei der Sicht durch die Frontscheibe aufgrund einer Teilspiegelung gleichzeitig auf eine Anzeige blicken, die eigentlich unterhalb der Frontscheibe flachliegend in der Instrumententafel angeordnet ist. Dabei kann auch die Frontscheibe selbst die Funktion des Combiner-Spiegels übernehmen. Der Fahrzeugführer erhält dadurch eine Informationsanzeige, die in die Außensicht eingespiegelt vor der Frontscheibe zu schweben scheint.

In den 1990er Jahren begann der Automobilhersteller General Motors mit Fahrzeugen der Marken Chevrolet und Cadillac mit dem Einbau von HUDs in Serienfahrzeuge. Die europäischen Hersteller BMW, Citroen Peugeot und Audi folgten und verwenden diese Anzeigetechnologie derzeit in mehreren Fahrzeugbaureihen. Dieser speziellen Anzeigetechnik wird eine große Zukunft prognostiziert. Seine herausragenden Vorteile sind die Reduzierung von Blickabwendungszeiten von der Sicht in den Verkehr und die gute Erkennbarkeit auch bei Akkomodationseinschränkungen älterer Fahrer. Nachteile dieser Anzeigetechnik, die erst zu einem späten Einsatz im Fahrzeug geführt haben, sind das anspruchsvolle und voluminöse optische System



und die erforderliche Präzision der Fertigung für eine akkurate Informationsdarstellung. Beides führt zu relativ hohen Kosten in Entwicklung und Fertigung für diese Anzeigetechnik. In einer besonderen Ausprägung dieser Technik kann sogar eine augmentierte Anzeige kontaktanalog in die Außensicht eingebracht werden. Das bedeutet, dass zusätzliche synthetische Anzeigehalte mit Kontextbezug zur Außensicht, wie beispielsweise Warnhinweise auf spezielle Hindernisse, in einer präzisen räumlichen Überlagerung zur realen Sicht hinzugefügt werden können. Diese Erfindung geht auf *Bubb* (1975) zurück und konnte trotz seiner Vorteile bei der Nutzung noch immer nicht in Serienfahrzeugen realisiert werden.

Der Bauraum in der Instrumententafel für die Unterbringung des HUD ist eng begrenzt. Außerdem benötigt das HUD eine Einbauposition, die exakt auf die Augpunktlagen der Insassen und die Bildposition abgestimmt ist. Da die Lage der Augpunkte der unterschiedlichen Fahrer aufgrund der unterschiedlichen Körpermaße variiert, verlangt es ergonomische Kenntnisse, diese Anforderung zu realisieren.

Weil außerdem die Positionierung des HUD einen großen Einfluss auf die Karosseriestruktur und das Package der Komponenten im Bereich der Instrumententafel besitzt, muss die Auslegung der HUD-Anzeige zu einem sehr frühen Zeitpunkt der Fahrzeug-Entwicklung vorgenommen werden.

Zu diesem Zweck wurde die Funktion zur Analyse des HUD in RAMSIS konzipiert. Auf Basis einer Reihe von Sichtparametern kann der optische Strahlengang der HUD-Anzeige von der Lage der Augpunkte ausgehend in Gegenrichtung des Strahlengangverlaufes über die reflektierende Frontscheibe zur Position des virtuellen Bildes respektive durch den Ausschnitt in der Oberseite der Instrumententafel bis zum ersten Spiegel der HUD-Optik konstruiert werden. Der Verlauf der begrenzenden Strahlen wird von folgenden Parametern bestimmt:

- Mittelpunkt, Breite und Höhe der Eyebox (Sichtbereich auf das HUD)
- Horizontaler und vertikaler Winkel der optischen Achse
- Abstand, Größe und Neigung der Virtuellen Bildebene
- Geometrie der Frontscheibe
- Design-Geometrie der Instrumententafel
- Package-Position des ersten Spiegels der HUD-Optik



Durch Variation dieser Parameter kann die Auslegung der HUD-Anzeige optimiert und gemeinsam mit der Design-Geometrie von Frontscheibe und Instrumententafel abgestimmt werden. Als Ergebnisse liefert die Analysefunktion Lage und Größe des virtuellen Bildes. Damit können mögliche Maskierungseffekte der im Hintergrund liegenden Fronthaube und der Verkehrsobjekte auf der Straße für alle Augpunktlagen getestet werden. Die Abbildungen 4-17 und 4-18 zeigen beispielhaft die Ergebnisse.



Abbildungen 4-17 (links) und 4-18 (rechts): Auslegung eines Head Up Displays (HUD), links: Strahlengangsanalyse, rechts: Bildposition aus der Fahrersicht

Außerdem wird die dafür erforderliche Lage und Größe des ersten Spiegels des bildgebenden Systems und ein Bauraumdummys für das notwendige Volumen des optischen Systems ermittelt. All diese Daten sind als Vorgaben für die eigentliche Konstruktion des optischen Systems des HUD, wie bei Mayer (2007) und Ott et al. (2008) beschrieben, erforderlich und können so dem Komponenten-Entwickler zur Verfügung gestellt werden. Weitergehende Analysen der Blickfelder, Mindestsehentfernung und Zeichengrößen der HUD-Anzeige mit Hilfe der Funktionen der physiologischen Grenzen der Wahrnehmung können auf dieser Basis anschließen.

4.5 Analysefunktionen der physiologischen Grenzen der direkten Sicht in den Verkehr

In diesem Abschnitt werden alle diejenigen neuen RAMSIS-Analyse-Funktionen beschrieben, die die visuelle Wahrnehmung des Blickes auf die Fahrbahn aufgrund von physiologischen Grenzen optisch einschränken:



Das allgemeine Blickverhalten des Fahrers bei der Fahrzeugführung ist aus einigen Untersuchungen wie von *Schweigert* (2003) und *Diem* (2004), die zumeist anhand von Blickbewegungsanalysen vorgenommen wurden, weitgehend bekannt. Damit der Fahrer seine Regelaufgaben der Bahnführung und Stabilisierung vornehmen und der vorgegebenen Fahrspur der Straße folgen kann, muss er vorausschauend den vor ihm liegenden Fahrspurverlauf erfassen. Dazu treten bei Geradeausfahrt verstärkt Fixationen im Bereich des Fluchtpunktes am Horizont und im Bereich von 3° - 9° unterhalb des Horizontes auf, um die Stabilisierung vorzunehmen. Die Sakkaden springen dabei vielfach zu den seitlichen Fahrspurbegrenzungen. Um das Fahrzeug gegenüber seitlichen Drifts und in Kurvenfahrten auf der Bahnkurve zu stabilisieren, ist außerdem die periphere Wahrnehmung des sogenannten optischen Flusses, also dem Vorbeiströmen der Umgebung, von hoher Bedeutung, wie bei *Donges* (1977), *Chatziastros* (2003) und *Wolf* (2009) beschrieben. Die abgeleiteten Blickmodelle in *Land & Lee* (1994), *Schweigert* (2003) und *Goldstein* (2008 S.239-242) beschreiben Blickwechsel zwischen Fluchtpunkt geradeaus und Tangentenpunkt der Kurve. Aufgrund der Regelfrequenz des Fahrer-Fahrzeug-Umgebung-Systems und des Gegenwartsempfindens des Fahrers beträgt die zeitliche Vorausschau des Fahrerblickes zwischen 0,9 und 3 sec. mit einem Optimum bei 2 sec. (Bubb 1993 S.345).

Um diese Blickfassung kontinuierlich vornehmen zu können, muss der Fahrer einen freien Blick auf den vor ihm liegenden Straßenverlauf besitzen. Bei Analyse von Fahrzeuggeometrien ist jedoch festzustellen, dass bei Linkskurvenfahrt die Sicht auf den vorausliegenden Straßenverlauf mit dem Tangentenpunkt der Kurve und erst recht die periphere Sicht Richtung Kurvenmittelpunkt stark eingeschränkt ist. Ursache dafür sind sehr massive und optisch eng stehende A-Säulen der Fahrzeugkarosserie. Diese Situation ist sowohl bei sportlichen Oberklassefahrzeugen mit sehr aerodynamischer Frontscheibenneigung, als auch bei der Fahrzeugkategorie der (Micro- /Mini-)Vans im sogenannten One-Box-Design anzutreffen. Es hat zur Folge, dass Kurven mit Radien kleiner als 60m bei sportlicher Fahrweise mit hoher Querbewegungsbeschleunigung vom Fahrer schlecht einzusehen sind. Bei Radien kleiner 30m trifft das auch für eine entspanntere Fahrweise zu. Diese kleinen Kurvenradien sind Außerorts zumeist nur auf sehr engen, kurvigen Landstraßen anzutreffen. Allerdings entspricht nahezu jede Linksabbiegesituation und jeder Kreisverkehr dieser beschriebenen Konstellation.

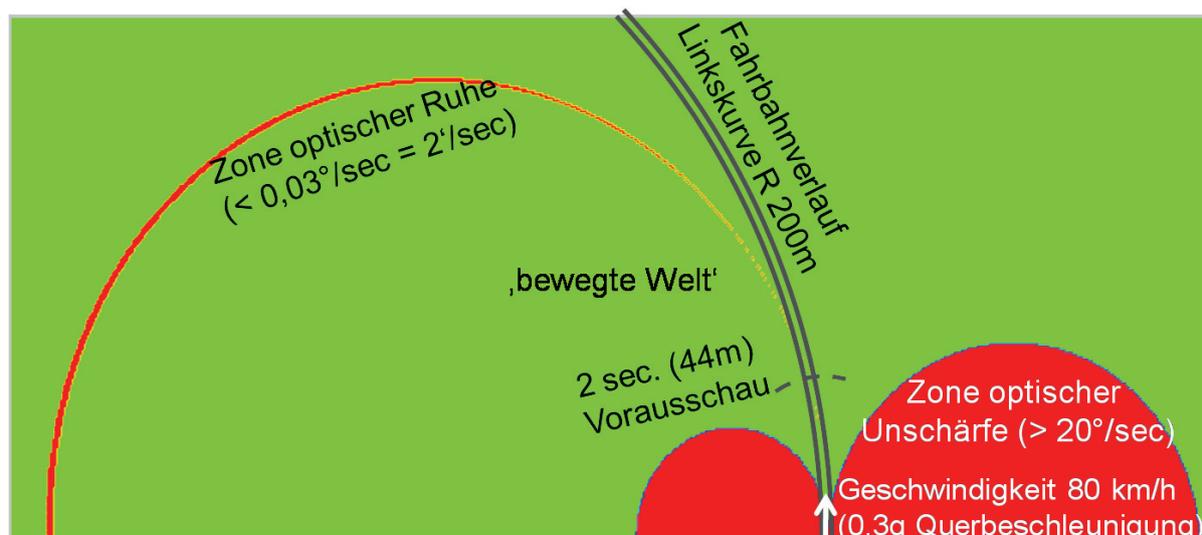


Abbildung 4-19: Dynamische Wahrnehmungsgrenzen des Fahrers bei Kurvenfahrt durch den Optischen Fluss (Draufsicht)

Um bereits bei der ergonomischen Fahrerplatzauslegung der Karosseriegeometrie berücksichtigen zu können, welche Sichtbereiche für die dynamische Wahrnehmung des Umfeldes von Bedeutung sind, wird für RAMSIS eine Analysefunktion für die Vorausschau und zur Darstellung dynamischer Sichtgrenzen entwickelt. Die Abbildung 4-19 zeigt bei Linkskurvenfahrt diejenigen Zonen mit ihren qualitativen Grenzen, die sich außerhalb der dynamischen Wahrnehmungsgrenzen des Auges befinden. Das ist einerseits eine schmale Zone optischer Ruhe, die im direkten Vorfeld der Fahr- richtung beginnt und sich mit einer stärkeren Krümmung als die Kurve bis zum Radi- usmittelpunkt windet. 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. Allerdings ist die Breite dieser Zone im Vorfeld so schmal, dass die fehlende Bewegung keine verkehrstechnische Relevanz besitzt. Die andere Grenze der dynamischen Wahrnehmung ist der Übergang zur optischen Unschärfe. In den Bereichen seitlich vom Fahrzeug bewegt sich die Umge- bung des fahrenden Fahrzeugs so schnell vorbei, so dass der optische Fluss in kreisförmigen Zonen seitlich des Fahrzeugs größer ist als zwanzig Grad pro Sekunde ($20^\circ/\text{sec}$). Hier kann das Auge des Fahrers aufgrund der begrenzten Dynamik des menschl- ichen Sehens kein Bild der Umgebung mehr auflösen.



Die Geschwindigkeit des optischen Flusses in Kurvenfahrt, den der Fahrer von seiner Umgebung wahrnimmt, kann für jeden einzelnen Punkt P in folgender Weise berechnet werden:

In einem ersten Schritt kann die relative Geschwindigkeit des Punktes P mit den Abständen X, Y und Z zum Fahrerauge bestimmt werden:

$$v(P) = \omega(\text{Fahrzeug}) * \sqrt{(X\text{Abstand}(P))^2 + (\text{Kurvenradius} - Y\text{Abstand}(P))^2}$$

Dabei ist die Kurvengeschwindigkeit

$$\omega(\text{Fahrzeug}) = \frac{v(\text{Fahrzeug})}{\text{Kurvenradius}}$$

Also ergibt sich für den Geschwindigkeitsbetrag:

$$v(P) = v(\text{Fahrzeug}) * \frac{\sqrt{(X\text{Abstand}(P))^2 + (\text{Kurvenradius} - Y\text{Abstand}(P))^2}}{\text{Kurvenradius}}$$

Im nächsten Schritt ist der sichtbare Anteil dieses Geschwindigkeitsvektors zu bestimmen. Es geht nunmehr um den Bewegungsanteil senkrecht zur Blickrichtung des Fahrers auf den betrachteten Punkt.

$$v_{\text{sichtbar}}(P) = v(P) * \sqrt{\sin^2(\tau(P)) + \cos^2(\tau(P)) * \left(\frac{Z\text{Abstand}(P)}{\text{Sichtlinienlänge}(P)}\right)^2}$$

Dabei ist τ der Winkel zwischen der Sichtlinie vom Fahrerauge auf den Punkt P und der Bewegungsrichtung des Punktes P:

$$\begin{aligned} \tau(P) = & -270^\circ + \arccos\left(\frac{\text{Kurvenradius} - Y\text{Abstand}(P)}{\sqrt{(X\text{Abstand}(P))^2 + (\text{Kurvenradius} - Y\text{Abstand}(P))^2}}\right) \\ & + \arctan\left(\frac{X\text{Abstand}(P)}{Y\text{Abstand}(P)}\right) - \arctan\left(\frac{v(\text{Fahrzeug})}{2 * \text{Kurvenradius}}\right) \end{aligned}$$

Es berechnet sich die

$$\text{Sichtlinienlänge}(P) = \sqrt{X\text{Abstand}(P)^2 + Y\text{Abstand}(P)^2 + Z\text{Abstand}(P)^2}$$



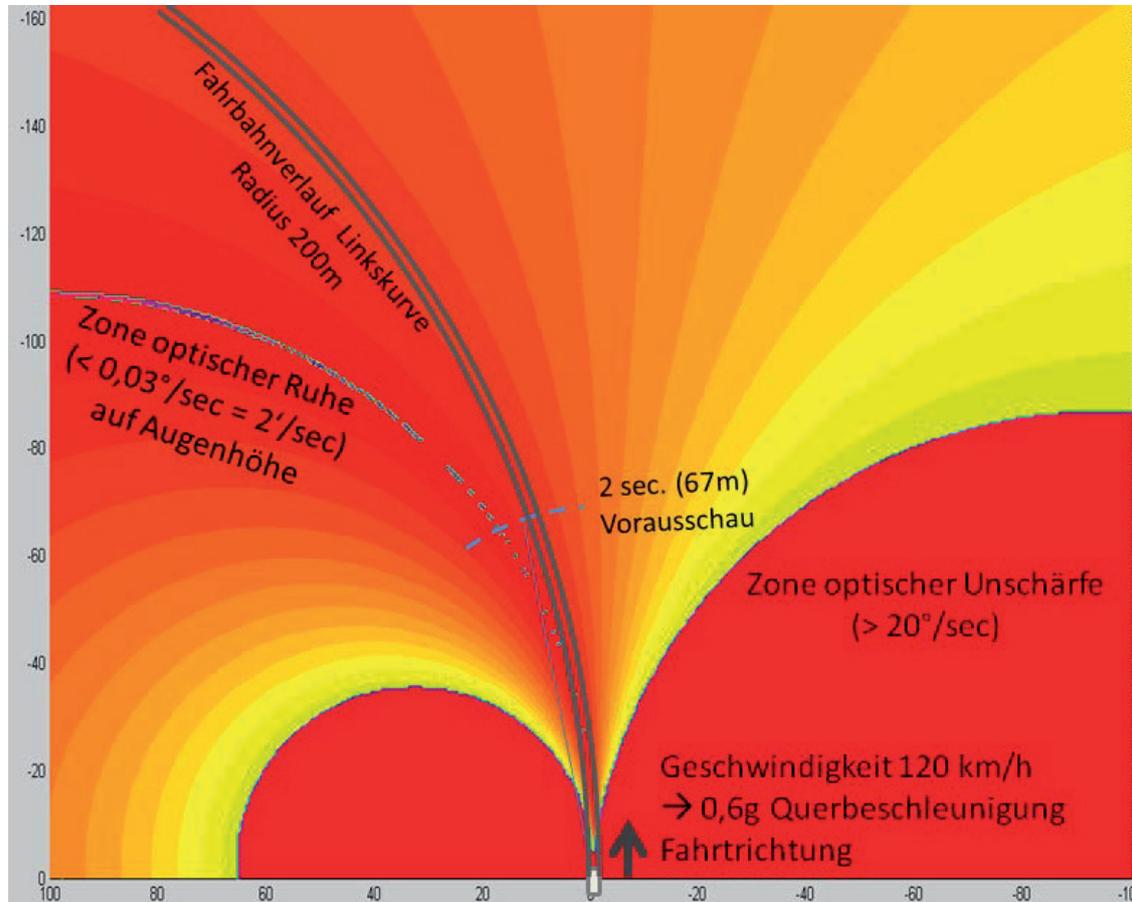
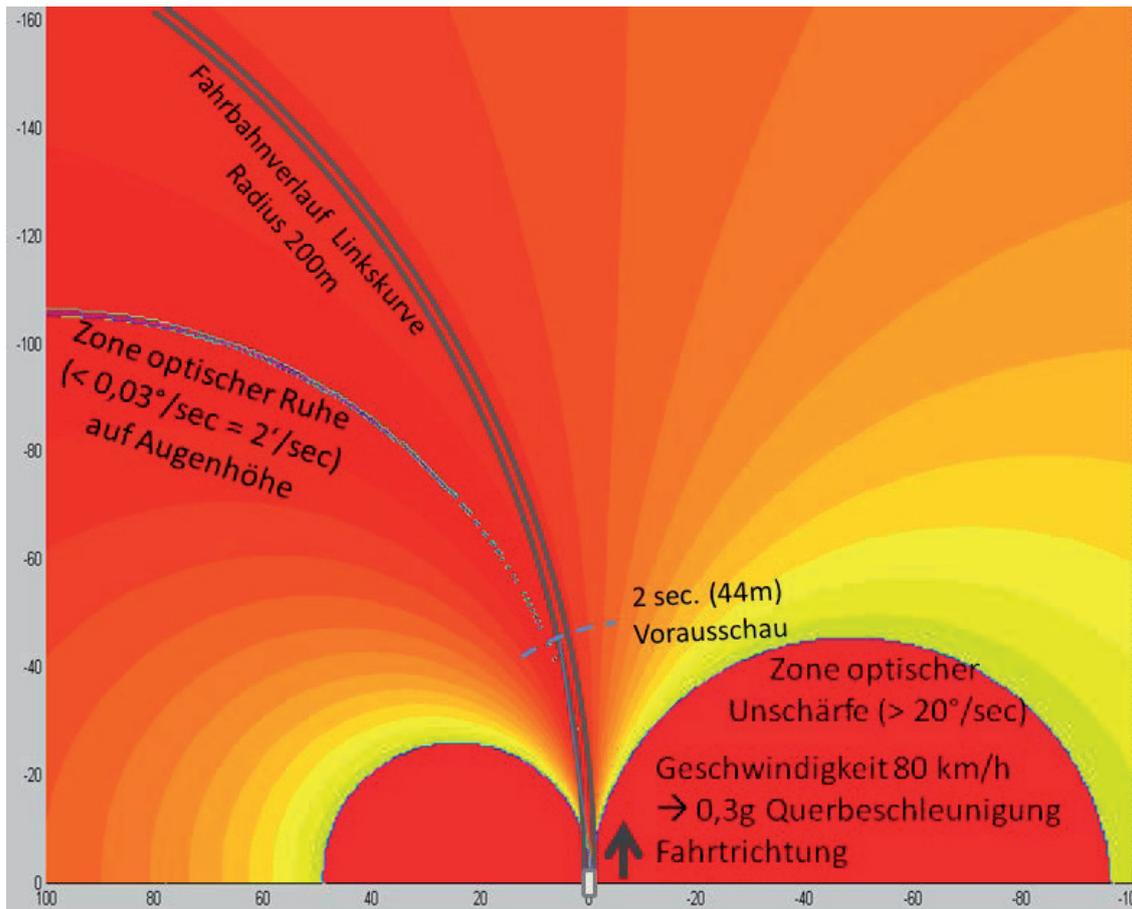
Die Geschwindigkeit des optischen Flusses des Punktes P im Auge des Fahrers ergibt sich schließlich zu:

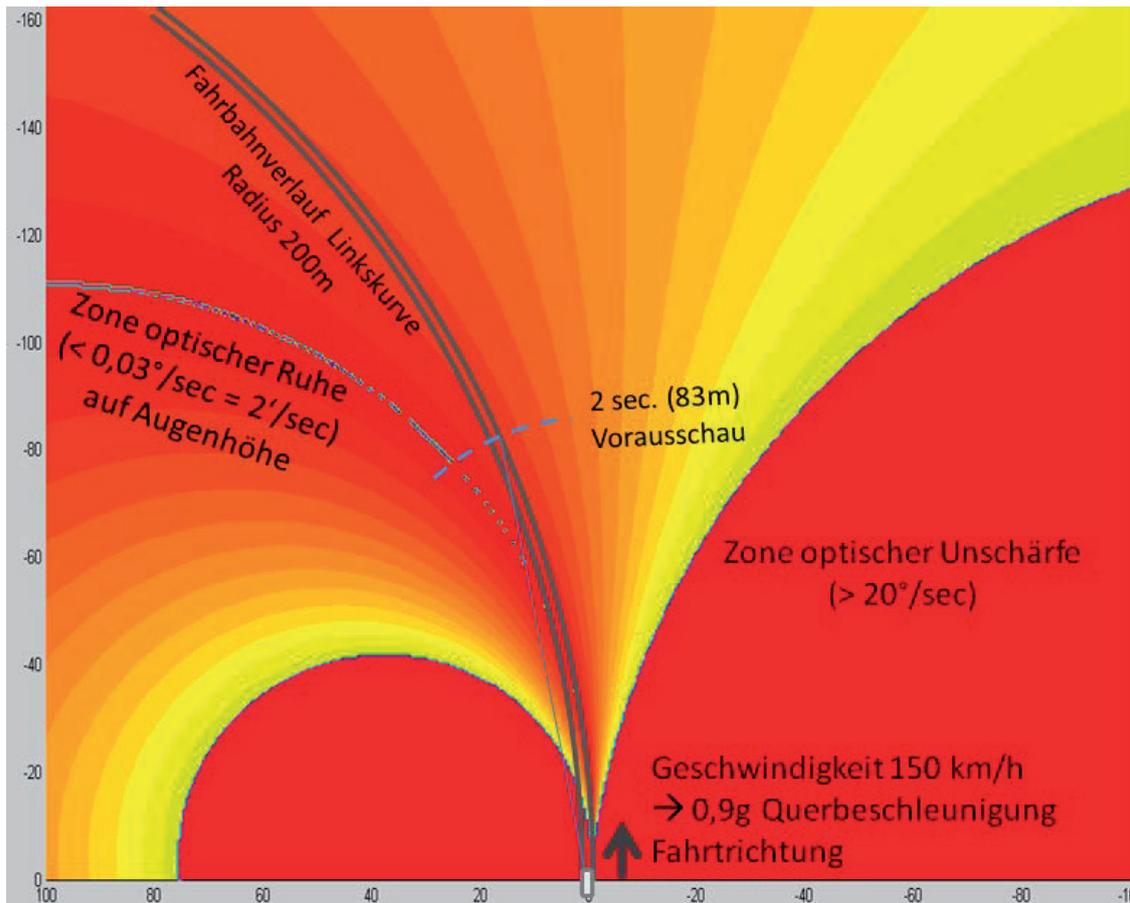
$$v_{\text{optischer Fluss}}(P) = \arcsin \left(\frac{v_{\text{sichtbar}}(P)}{\text{Sichtlinienlänge}(P)} \right)$$

Die Abbildungen 4-20 bis 4-22 verdeutlichen die graduellen Unterschiede im optischen Fluss mit Hilfe einer Falschfarbendarstellung. In diesen Abbildungen ist die Geschwindigkeitswahrnehmung der Umgebung in Linkskurvenfahrt in den Geschwindigkeiten 80, 120 und 150 km/h vergleichend dargestellt. Die Abbildungen geben den vom Fahrer wahrnehmbaren optischen Fluss in Draufsicht wieder. In den Abbildungen ist die Position des Fahrzeugs jeweils in der Mitte des unteren Bildrandes. Die Fläche bildet einen Entfernungsbereich von jeweils 100m zur Seite und 150m nach vorne ab. Der skizzierte Verlauf der Linkskurve krümmt sich mit einem konstanten Radius von 200m. Die Fahrtgeschwindigkeiten von 80, 120 und 150 km/h führen zu Querbewegungen von 0,3g, 0,6g und 0,9g. Die Falschfarbendarstellungen verdeutlichen den graduellen Anstieg des optischen Flusses zwischen den Zonen optischer Ruhe und optischer Unschärfe.

Gordon (1966) und Gibson (1982) entdeckten, beschrieben und interpretierten dieses für die Bewegungswahrnehmung wichtige Phänomen ausführlich. (Schweigert 2003, Goldstein 2008, Kramer 2008 S. 140-149, Wolf 2009)

Bei der Betrachtung der drei Abbildungen ist auch der so genannte *Tunneleffekt* ersichtlich, der mit zunehmender Geschwindigkeit für die Sichtwahrnehmung einen immer kleiner werdenden Bereich der voraus liegenden Fahrbahn ermöglicht. Die aufgrund der hohen relativen Geschwindigkeit nicht scharf zu erkennenden Zonen neben dem Fahrer sind in den Abbildungen als tiefrote kreisförmige Bereiche wiedergegeben. Die Darstellungen entstammen einer Berechnung in MATLAB. Das zugehörige Programm ist dem Anhang beigelegt.





Abbildungen 4-20 bis 4-22: Falschfarbendarstellung des Optischen Flusses des Fahrers in den Geschwindigkeiten 80, 120 und 150 km/h; das Fahrzeug befindet sich in der Mitte des unteren Bildrandes; die graduelle Aufhellung verdeutlicht den Anstieg der Geschwindigkeit von der Zone optischer Ruhe bis zur Grenze der optischen Unschärfe

Für eine Geradeausfahrt weitet sich die schmale und spitze Zone der optischen Ruhe in großer Entfernung ebenfalls zu halbkreisförmigen Bereichen aus. Abbildung 4-23 zeigt die Größe dieser Bereiche, die bei der Fahrtgeschwindigkeit von 50 km/h bereits einen Durchmesser von über 30 km betragen. Aufgrund dieser großen Entfernungen sind die Zonen optischer Ruhe für die Umgebungswahrnehmung im Straßenverkehr irrelevant. Abbildung 4-24 macht die Größenverhältnisse der beiden Zonen bei Geradeausfahrt erkennbar. Die abgebildete Fläche reicht je 100m zu beiden Seiten und 350m nach vorne. Die spitz von vorne einlaufende Grenzlinie der Zone optischer Ruhe bildet den Beginn der roten Linie in Abbildung 4-23

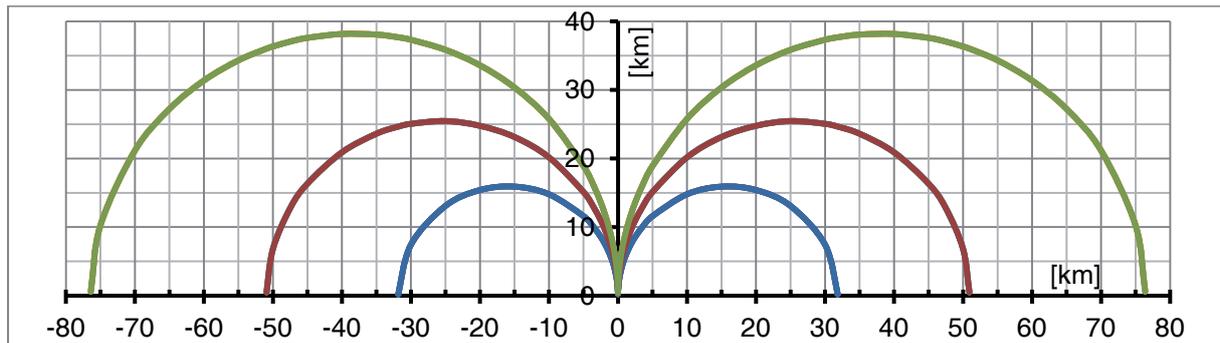


Abbildung 4-23: Grenzlinien der Zone optischer Ruhe im gesamten Gesichtsfeld des Fahrers für eine Geradeausfahrt mit den Geschwindigkeiten 50 (blau), 80 (rot) und 120 km/h (grün); (Beachte die Skalierung in km!)

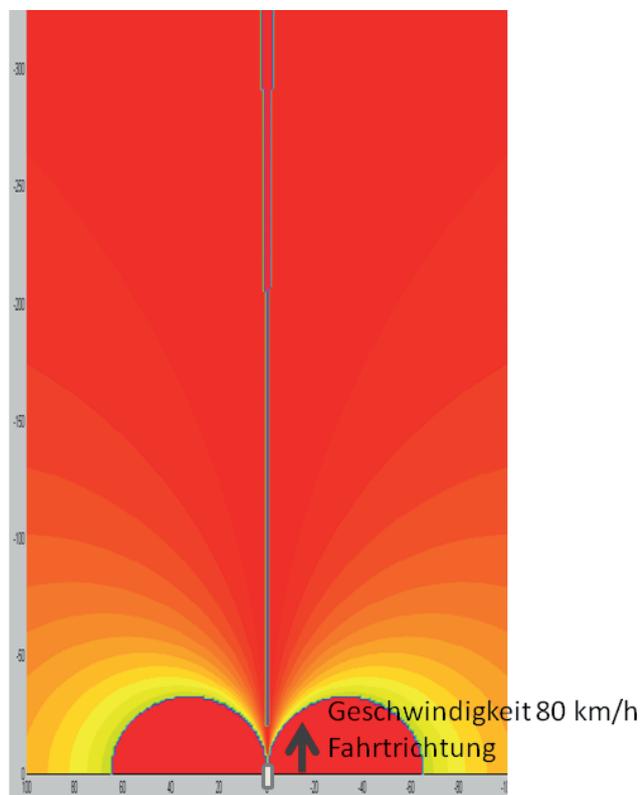


Abbildung 4-24: Falschfarbendarstellung des Optischen Flusses des Fahrers für eine Geradeausfahrt mit 80 km/h; das Fahrzeug befindet sich in der Mitte des unteren Bildrandes; die tiefroten Halbkreise beiderseits des Fahrzeugs repräsentieren die Zone optischer Unschärfe, die spitze Grenzlinie vor dem Fahrzeug bildet den Beginn der Halbkreise der optischen Ruhe (vgl. Abb. 4-23)

4.5.1 Dynamische Sichtgrenzen beim Fahren

Die Fahrdynamik beim Steuern eines Fahrzeugs fordert nicht nur eine akkurate optische Wahrnehmung des Fahrers, sondern beeinflusst auch sehr wesentlich sein ki-



ästhetisches Empfinden. Die fahrdynamischen Grenzen des Fahrzeugs werden durch den Kraftschluss der Reifen mit der Fahrbahn gebildet. Da im allgemeinen Verkehrsgeschehen im Wesentlichen Haftreibungsbedingungen vorliegen liegt die physikalische Grenze der Beschleunigungen je nach Fahrbahnoberfläche bei bis zu 1g. Effekte von Adhäsions- und Formschluss-Einflüssen können den Reibungskoeffizienten zwischen Reifen und Straße nur in Ausnahmefällen geringfügig über $\mu > 1$ bringen. Dieser Sonderfall ist jedoch im allgemeinen Verkehrsgeschehen irrelevant. Die Gesetzmäßigkeiten der Kraftschlussbedingungen für das Beschleunigen, Bremsen und die Seitenführung des Fahrzeugs ergeben sich aus dem Kamm'schen Kreis. (Risch 2002). Die grafische Darstellung des Kamm'schen Kreises ist ein theoretisches Schema für die Vektoraddition der momentan am Reifen übertragenen Kräfte, entwickelt von dem Kraftfahrzeug-Wissenschaftler Wunibald Kamm. Das mögliche Spektrum eines auf den Momentanzustand folgenden Bewegungsbereiches des Fahrzeugs kann ebenso grafisch aufgetragen werden. *Forbes* (1970) veröffentlichte bereits erste Überlegungen zur Berücksichtigung des Bewegungsbereiches des eigenen Fahrzeugs auf das erforderliche Sichtfeld.

Es ist in Abbildung 4-25 für zwei unterschiedliche auf die Straße übertragbare Beschleunigungen mit der Ausgangsgeschwindigkeit von 100 km/h dargestellt. Der kleinere, rote der beiden markanten geometrischen Bereiche in Form eines „Hirschgeweihs“ repräsentiert den möglichen Aufenthaltsbereich des Fahrzeugs bei Ausnutzung der reibungsbedingten Kraftübertragung von 0,9g. Das größere, gelbe „Hirschgeweih“ repräsentiert den Bereich, in dem sich ein Fahrzeug bei der von Normalfahrern akzeptierten Sicherheitsgrenze von 0,3g befinden würde. Die Flanken des Gebildes werden durch den Mindestradius bei einem der Querbeschleunigung entsprechendem Lenkeinschlag gebildet. Die obere Stirnseite wird begrenzt durch den jeweils erforderlichen Bremsweg je nach Kurvenradius der Fahrbahn.

Diese virtuell vor dem Fahrzeug liegende Fläche des ‚Hirschgeweihs‘ stellt einen wichtigen Bereich der Sicht im Vorfeld dar. Denn nur in diesem Korridor kann und wird sich die zukünftige Fahrspur des Fahrzeugs befinden.

Abbildung 4-26 zeigt diese Situation als RAMSIS-Simulation aus der Fahrersicht. Darin ist erkennbar; dass speziell der linke Rand des möglichen Aufenthaltsbereiches durch die linke A-Säule des eigenen Fahrzeuges verdeckt wird.

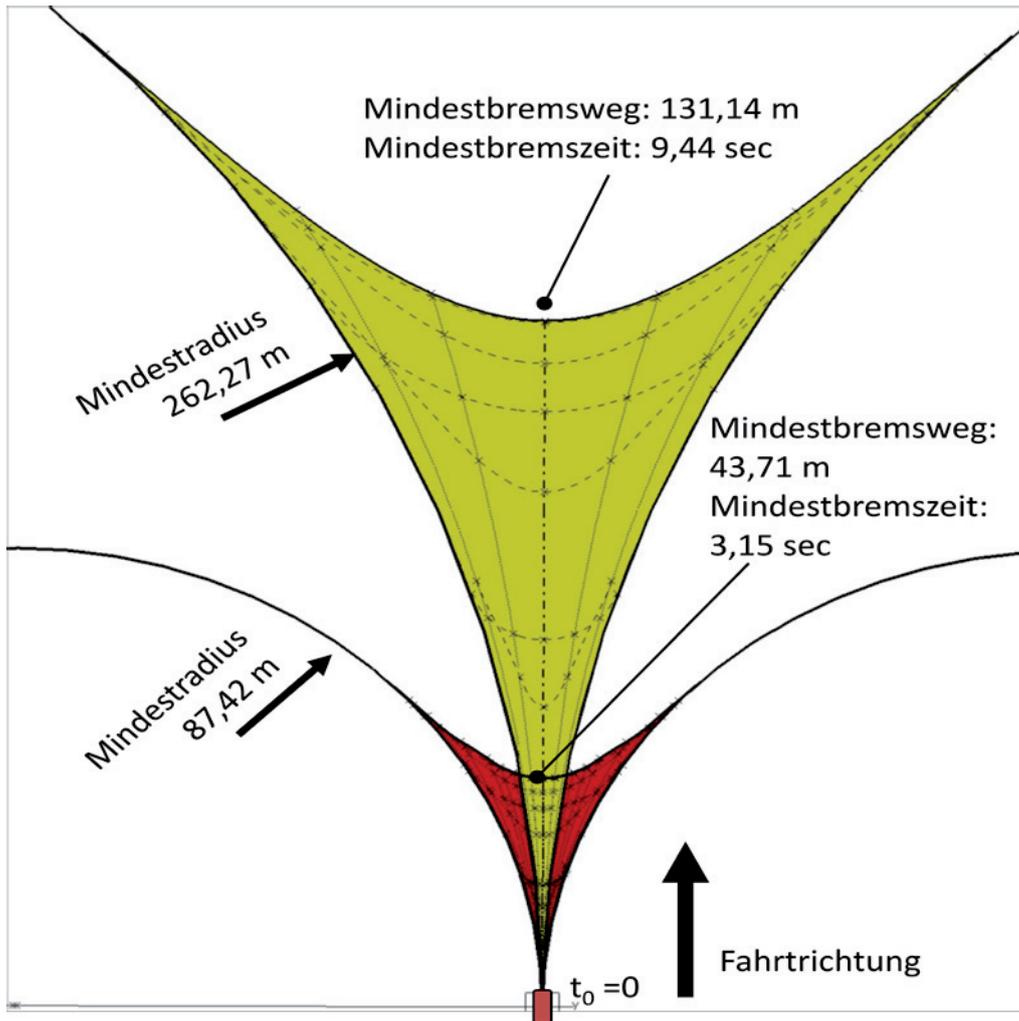


Abbildung 4-25: ‚Hirschgeweih‘ entsprechend des Kraftübertragungsmodells des Kamm’schen Kreises aus 100km/h jeweils für 0,9g und 0,3g Gesamtbeschleunigung (Draufsicht)



Abbildung 4-26: ‚Hirschgeweih‘ aus 100km/h jeweils für 0,9g und 0,3g Gesamtbeschleunigung (Fahrersicht)



Diese Zone kann in kritischen Verkehrssituationen einen nutzbaren Korridor bilden, um Hindernissen auszuweichen oder eine sehr sportliche Linkskurvenfahrt zu praktizieren. Erfahrungsgemäß vermeiden Menschen jedoch die Bewegung in einen nicht einsehbaren Bereich hinein.

4.6 Analysefunktionen von geometrischen Grenzen der direkten Sicht

In diesem Abschnitt werden alle diejenigen neuen RAMSIS-Analyse-Funktionen beschrieben, die die visuelle Wahrnehmung des Blickes auf die Fahrbahn aufgrund von geometrischen Grenzen des Fahrzeugs optisch einschränken:

4.6.1 Streckenverlauf und Position im Verkehr

Die Sichtverdeckungseffekte, die der Fahrer in einem realen Fahrzeug erhalten wird, lassen sich durch die geometrische Nachbildung der Regelkreiselemente Fahrer-Fahrzeug-Umgebung simulieren und analysieren. Dies ist prinzipiell möglich, sobald die Geometriemodelle des Fahrzeugs bei der Neuentwicklung durch die Konstruktion im CAD-System entstehen. Das 3D-Menschmodell RAMSIS steuert die geometrische Abbildung des Menschen in seinen anthropometrischen Variationen und einer realistischen Haltungsprognose als Fahrer des Fahrzeugs bei. Mit Hilfe einer neuen Analysefunktion in RAMSIS für die Sicht auf Verkehrsobjekte wird auch eine Auswahl von Elementen für die Repräsentation der Umgebung bereitgestellt. Dazu kann einerseits eine Straßensituation bestehend aus Straßentyp und Straßengeometrie ergänzt durch die Situation eines Knotenpunkt frei ausgewählt und parametrisch dargestellt werden. Im zweiten Schritt wird die Szenerie durch Einfügen von Verkehrsteilnehmern wie Fußgängern, Radfahrern, Kraftfahrzeugen und Verkehrszeichen ergänzt. Die Positionen dieser Elemente in Bezug auf das zu prüfende Fahrzeug sind im Rahmen sinnvoller Grenzen frei einstellbar. Somit können typische Verkehrssituationen mit Sichtverdeckungseffekten wie beim Spurwechsel, Abbiegen oder Einparken leicht erstellt werden und anhand der RAMSIS Sichtsimulation aus den Augen des Fahrers darstellbar. Somit ist eine erste statische Simulation der Sicht in den Verkehr bereits unmittelbar nach der Erstellung der CAD-Modelle der neuen Kompo-

nenen während einer Fahrzeugentwicklung durchführbar. Gefährdungssituationen, wie sie im realen Verkehrsgeschehen auf den Straßen weltweit und alltäglich durch Sichtverdeckungen für den Fahrer entstehen, können unmittelbar bei der Geometriegestaltung der Karosseriekomponenten minimiert werden. Abbildung 4-26 zeigt beispielhaft einen Ampelhalt als Verkehrssituation. Die hier dargestellten Komponenten Straße, Ampel, Fußgänger, Motorrad- und Fahrradfahrer sind neben anderen Elementen in der Analysefunktion enthalten. Die an der Ampel haltenden Verkehrsteilnehmer bilden zu prüfende Elemente aus der Sicht des Fahrers als RAMSIS-Simulation.



Abbildung 4-26: Parametrisch einstellbare Verkehrssituation mit Verkehrsteilnehmern und -objekten zur Sichtanalyse mit 3D-CAD-Geometrie

4.6.2 Projektion der Sichtbereiche und Daimler-Scholly-Verfahren

Für den Einfluss der Fahrzeuggeometrie auf die Sichtverdeckung wurde auch ein quantitatives Analyse- und Bewertungsverfahren in RAMSIS implementiert, das sogenannte Daimler-Scholly-Verfahren. In den Jahren 2000-2005 wurden bei der DAIMLER AG durch *Scholly* (2006) umfangreiche Blickbewegungsanalysen von Fahrern im realen Verkehrsgeschehen durchgeführt. Eine wesentliche Voraussetzung zur neutralen Erfassung der Blickdichte der Sicht nach vorne war die Durchführung von Versuchen mit einem Versuchsfahrzeug ohne Sichtverdeckungen, dem sogenannten Glaskuppelauto, das in Abbildung 4-27 ersichtlich ist.

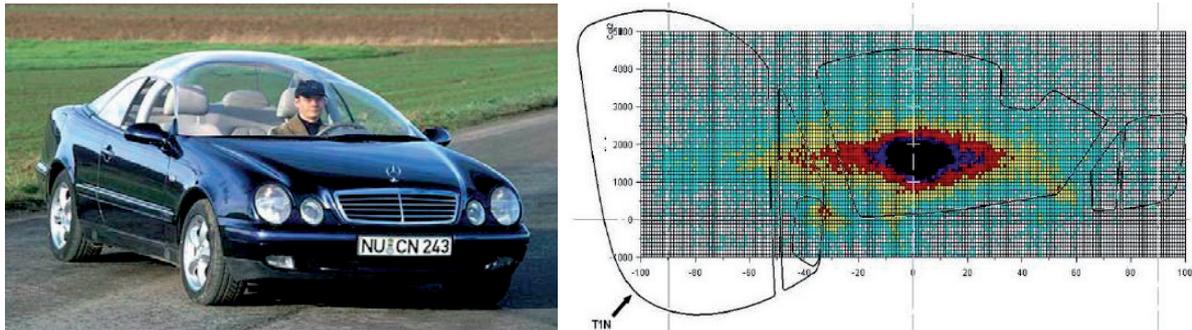


Abbildung 4-27: Versuchsfahrzeug „Glaskuppelauto“ (links) mit Darstellung der Blickdichteverteilung aus Eye Tracking-Versuchen (rechts) (Quelle: Renner)

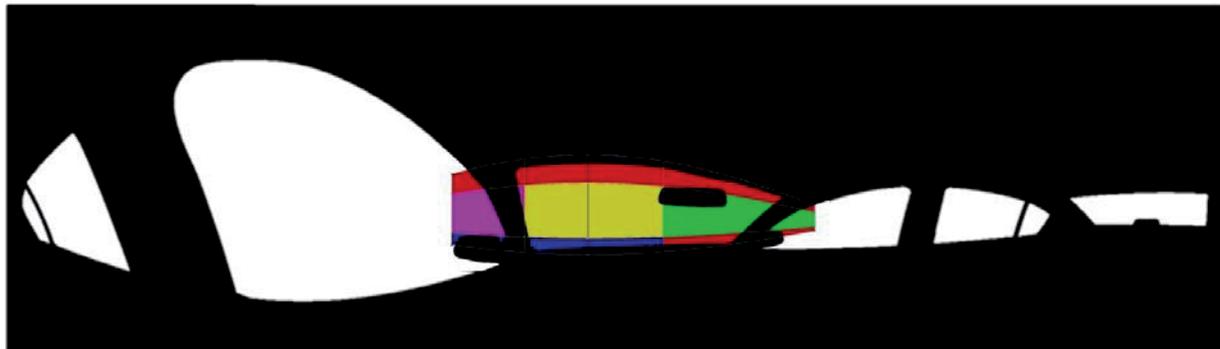


Abbildung 4-28: Projektion der Sichtbereiche des Fahrers überlagert mit den Bewertungszonen des Daimler-Scholly-Verfahrens

Die daraus resultierenden Versuchsergebnisse wurden in ein geometrisch gewichtetes Bewertungsverfahren überführt. Mit diesem Bewertungsverfahren lässt sich bereits auf Basis der CAD-Konstruktionsdaten des Fahrzeugs eine gewichtete Bewertungsgröße ableiten, wie groß die Sichtverdeckung des zukünftigen Fahrzeugs sein wird und in welchen Bereichen der Sicht nach vorne die Verdeckungen besonders störend und beeinträchtigend wirken. Um dieses Verfahren mit Hilfe der neuen RAMSIS-Funktion im CAD-Modell durchführen zu können, wird eine augpunktbezogene Projektion der Front- und Seitenscheiben mit ihren Randeinfassungen durchgeführt. Auf dieser Basis erfolgt eine Aufteilung in Zonen mit unterschiedlicher Blickhäufigkeit. Abbildung 4-28 zeigt beispielhaft die Abwicklung einer konischen Projektion der gesamten Fahrzeugverglasung und die Bewertungszonen des Daimler-Scholly-Verfahrens für die Sicht nach vorne. Die verschiedenen Farbzonen stehen für unterschiedlich stark gewichtete Bereiche der Sichtverdeckung. Eine zahlenmäßige Bilanzierung der durchsichtigen und undurchsichtigen Anteile der Sichtzonen liefert mehrere Bewertungszahlen, die zu einem gewichteten Gesamtergebnis



zusammengefasst werden. Verschiedene Fahrzeugmodelle können so detailliert miteinander verglichen werden. Sind die CAD-Daten eines zu bewertenden Fahrzeugs nicht vorhanden, so ist eine dreidimensionale Vermessung der Scheibenflächen und deren Berandungen erforderlich.

Dieses Sichtbewertungsverfahren wurde bereits innerhalb der europäischen Automobilherstellervereinigung ACEA und auch mit Vertretern des japanischen Automobilherstellerverbandes JAMA als einheitliches Verfahren abgestimmt. Die Vorgehensweise harmonisiert gut mit den Methoden französischer und japanischer Hersteller. Es wurde als gemeinsamer Herstellervorschlag für die Ermittlung der Sichtverhältnisse im Rahmen eines neuen Testverfahrens der unabhängigen Vereinigung Euro-NCAP für die Aktive Sicherheit von Fahrzeugen eingebracht. Diese Initiative zum Test der Aktiven Sicherheit wurde von Euro-NCAP bisher jedoch nicht umgesetzt.

4.7 Zusammenfassung des Kapitels

Kapitel 4 beschreibt die im Forschungsprojekt ‚RAMSIS kognitiv‘ erarbeiteten Analyse- und Auslegungsfunktionen für die Perzeption, also die visuelle Informationsaufnahme, des Fahrers. Diese Funktionen erlauben es, die optischen Eigenschaften und Bedingungen visueller Signale auf dem Weg von der Aussendung bis zur Erfassung im Auge des Fahrers zu überprüfen. Damit steht nun eine Reihe von Simulationswerkzeugen zur Verfügung, um die Perzeption des Fahrers als Voraussetzung für die visuelle Wahrnehmung zu optimieren. Der Auslegungsprozess eines Fahrzeugbedienkonzeptes ist wechselseitig sehr eng mit dem funktionellen Bedienkonzept als auch mit dem geometrischen Innenraumkonzept verbunden.

Aufgrund der Modellierung der optisch-geometrischen Eigenschaften der Umgebung und der optisch-physiologischen Eigenschaften des Sehapparates findet eine beiderseitige Abbildung der optischen Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine statt. Die Umgebungsbedingungen als drittes wesentliches Element des Regelkreises Mensch-Maschine-Umwelt finden in diesen Simulationsfunktionen bisher nur geringe Berücksichtigung. Sie können nun mit Hilfe von parametrierbaren Straßensituationen ebenfalls abgeprüft werden.



5 Zusammenhänge der Sichtverdeckungen des Fahrers

In Kapitel 4 wurde beschrieben, welche neuen Funktionen zur Sichtanalyse und -auslegung im Fahrzeug für das Menschmodell RAMSIS geschaffen wurden. Sie erlauben im Fahrzeugentwicklungsprozess eine Reihe von zusätzlichen ergonomischen Untersuchungen, die eine Steigerung der kundenrelevanten Produktreife bei der Auslegung eines Fahrzeugs ermöglicht.

Aufgrund der verbreiteten Bauweise und Beschaffenheit aktueller Fahrzeuge und der Sitzhaltung der Fahrerpopulation mit unterschiedlichen Körpermaßen ergeben sich charakteristische Sichtbedingungen am Fahrerplatz. Die Sichtverhältnisse weisen grundsätzliche Zusammenhänge von Fahrer und Fahrzeug auf, die in den Kapiteln 5.1 bis 5.4 systematischer beleuchtet werden sollen.

Diese Wechselwirkungen zwischen der Karosseriebauart und der Sitzhaltung des Fahrers führen weiterhin unter Berücksichtigung der Fahraufgabe zu prinzipiellen Sichteinschränkungen und -verdeckungen wesentlicher Bereiche der Fahrumgebung. Diese werden in den Kapiteln 5.5 bis 5.8 betrachtet.

5.1 Grundsätzliche Einflüsse und Veränderungen durch Fahrerpopulation und Fahrzeuggestaltung

Ausgangspunkt aller ergonomischen Betrachtungen eines modernen Fahrzeuges ist die etablierte Sitzhaltung des Fahrers bei der Durchführung der Fahraufgabe. Der Fahrer nimmt dazu eine Sitzhaltung ein, die es ihm erlaubt, mit seiner jeweiligen Kraft und Beweglichkeit die primären Bedienelemente Lenkrad und Pedalerie jederzeit, gleichzeitig und vollständig zu kontrollieren und zu bewegen. Währenddessen ist eine umfassende ununterbrochene Sichtkontrolle des Verkehrsweges rund um sein Fahrzeug durchzuführen. Gleichzeitig müssen sich alle Körperwinkel des Fahrers in einer möglichst komfortablen Winkellage befinden, um auch über eine längere Fahrdauer ohne spürbare Beeinträchtigung und ermüdungsarm die Führungsaufgabe zu erfüllen. Dazu hat sich in der 125-jährigen Entwicklungsgeschichte des Kraftfahrzeuges eine sehr einheitliche Sitzhaltung des Fahrers im Pkw ergeben (Abbil-



dung 5-1), die einigen systematischen Einflussparametern unterworfen ist, die hier einfürend erläutert werden sollen:

- Die Variabilität der Körpermaße in der Bevölkerung erfordert eine Einstellbarkeit der relativen Lage von Sitz zu Lenkrad und Pedalerie, um eine uneingeschränkte Bedienbarkeit für alle Personen sicherzustellen. Dabei erfordert insbesondere die unterschiedliche Beinlänge der Fahrer einen veränderlichen Abstand des Sitzes zur Pedalerie. Die Unterschiede der Körperhöhe im Sitzen macht vielfach eine Veränderung der Höheneinstellung des Fahrersitzes erforderlich, damit die einwandfreie Sicht des Fahrers auf die Fahrbahn und die Anzeigeeinrichtungen gewährleistet ist.
- Die konstruktiv vorgesehene Verwendung des Fahrzeugs, das sogenannte Fahrzeugkonzept, hat einen wesentlichen Einfluss auf die Karosseriegestaltung und die geometrischen Verhältnisse von Innenraum und Fahrerplatzgestaltung. Nutzfahrzeuge und Gelände-Pkw haben aufgrund größer dimensionierter Fahrwerke und tragender Strukturen eine höhere Anordnung der Karosserie und somit auch des Fahrerplatzes. Dadurch und aufgrund der zu meist niedrigeren Fahrgeschwindigkeit im Haupteinsatzbereich ist eine gute Übersichtlichkeit im Nahbereich vor dem Fahrzeug notwendig. Die Augpunktlage des Fahrers ist hoch angeordnet. Der Fahrer besitzt eine steilere Sichtlinie nach vorne unten. Diese Sichtbedingungen und ein häufig höherer Kraft- und Bewegungseinsatz bei Betätigung der Bedienelemente erfordern eine steile und aufrechte Sitzposition. Diese Konstellation erlaubt eine steile Anordnung der Frontscheibe und ihrer seitlich begrenzenden A-Säulen.
- Sportwagen sowie Limousinen, die sehr hohe Fahrtgeschwindigkeiten erreichen sollen, benötigen dagegen eine niedrige Fahrzeughöhe, um den Luftwiderstand des Fahrzeugs zu reduzieren. Ihr Einsatzgebiet liegt vorwiegend im Langstreckenbetrieb auf gut ausgebauten Straßen. Der Fahrzeugschwerpunkt ist sehr niedrig, um auch hohe Kurvengeschwindigkeiten sicher zu ermöglichen. Diese Anforderungen erfordern auch eine möglichst niedrige Positionierung des Fahrerkörpers. Die Sitzposition des Fahrers ist entsprechend flach und gestreckt ausgelegt. Seine Sichtlinie kann sehr flach nach vorne verlaufen. Anordnungen des Motors vor dem Fahrer begrenzen die Absenkung des Fah-



rerkopfes, da seine Sicht über die Motorhaube gewährleistet sein muss. Die hohe Bedeutung der Luftwiderstandsreduzierung erfordert außerdem eine sehr flache und damit strömungsgünstige Anordnung der Frontscheibe und der seitlich begrenzenden A-Säulen. In einer designorientierten Skizze von Otl Aicher in Abbildung 5-2 ist dieser prinzipielle Zusammenhang nur sehr vereinfacht und plakativ wiedergegeben.

(Müller 2010, Macey et al.2009)

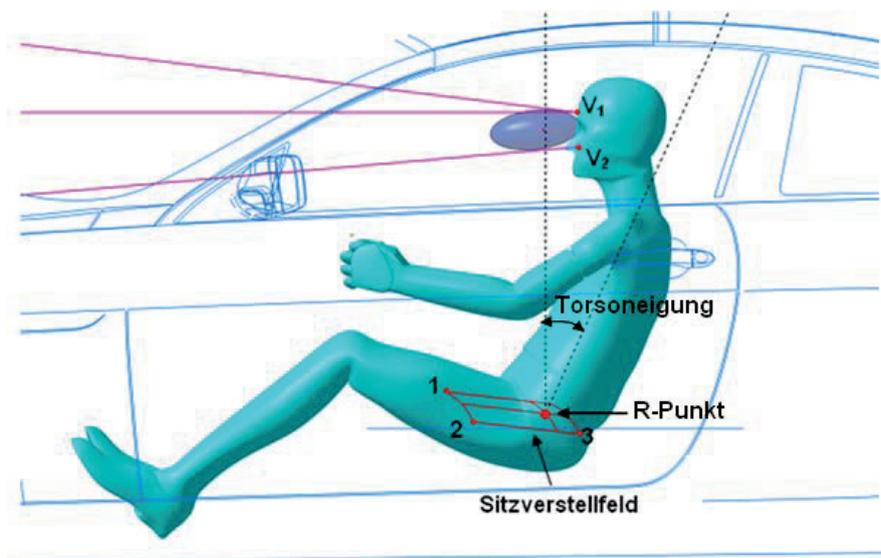


Abbildung 5-1: Einfluss der Sitzhaltung des Fahrers auf die Sichtbedingungen

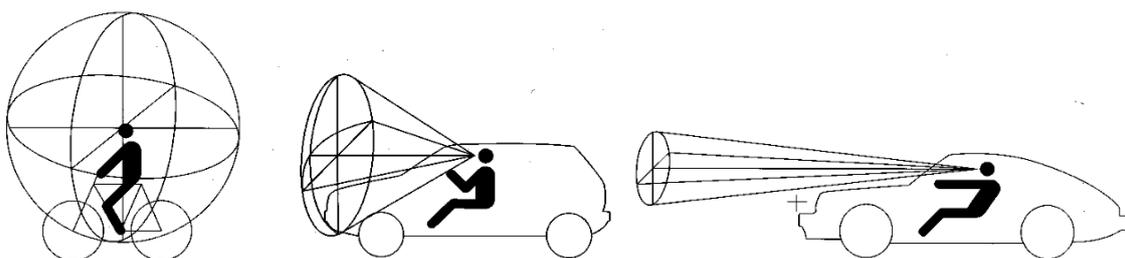


Abbildung 5-2: Plakative Unterschiede des Fahrzeugtyps auf die Sichtbedingungen
(Quelle: Otl Aicher)



5.2 Historische Veränderungen der Verdeckungsverhältnisse von Fahrzeugen

Fortschritte in der technischen Entwicklung der Fahrzeuge erzielten in den vergangenen 30 Jahren eine Erhöhung der Fahrleistungen bei einer Reduzierung des Kraftstoffverbrauches.

Während in dieser Zeit das Fahrzeuggewicht aufgrund steigender Komfort- und Sicherheitsanforderungen stieg und somit kontraproduktiv wirkte, konnten Effizienzsteigerungen im Antriebsstrang und eine Reduzierung des Luftwiderstandes Fahrleistungen und Verbräuche verbessern. Da sich der Fahrzeugquerschnitt in den Folgegenerationen einer Modellreihe aufgrund der Komfortansprüche in der Regel nicht reduzierte, sondern eher erhöhte, konzentrierten sich die aerodynamischen Optimierungen auf den Luftwiderstandsbeiwert (c_w). Eine wesentliche Maßnahme dazu war die stärkere Neigung der Frontscheibe und die Ausrundung ihres Übergangs zur Seitenscheibe. Ausgehend von den späten 1970er-Jahren erhöhte sich die Frontscheibenneigung der meisten Fahrzeuge um 5-10°, so dass 25-30 Jahre später die Mehrzahl der Pkw eine Frontscheibenneigung von ungefähr 60° aufweisen. Eine noch flachere Frontscheibe reduziert den Luftwiderstand nicht mehr wesentlich (Hucho 2005).

Die Abbildung 5-3 zeigt diesen Veränderungstrend exemplarisch in den Modellfolgen des Volkswagen Golf, BMW 3er, Audi 100/A6 und der Mercedes-Benz S-Klasse der Jahre 1975 bis 2005 stellvertretend für die Entwicklung der unterschiedlichen Fahrzeugklassen in Deutschland. In Abwägung der Aerodynamik und funktioneller Eigenschaften findet sich die Frontscheibenneigung weit verbreiteter Fahrzeugbaureihen bei einem Wert von ca. 60° ein.

Da in dem Entwicklungszeitraum der vergangenen 30 Jahre gleichzeitig auch die Anforderungen an den Komfort und die passive Sicherheit der Fahrzeuge anstiegen, wurde auch die Steifigkeit der Fahrgastzelle deutlich verbessert. Dies bewirkte zu meist eine Vergrößerung der Säulenquerschnitte der Fahrzeugmodelle, die eine stärkere Sichtverdeckung durch die A-Säulen verursachen. So ist zwischen den Jahren 1985 bis 2005 der Sichtverdeckungswinkel der A-Säulen beim Audi A6 von 9 auf 11°, beim BMW 3er von 9,5 auf 12,5° und bei der Mercedes-Benz S-Klasse von 9,5 auf 14° erhöht worden. Scholly (2006) errechnet den Anstieg der A-Säulen-



Verdeckungsbreite in den Jahren 1975 bis 2000 im Mittel von 67 Fahrzeugen von 10° auf 13° (Abbildung 5-4). Laut der Maßdaten, die vom Fahrzeugvermesser *Auto-graph dimensions GmbH* stammen, konnte beim Volkswagen Golf gegen den allgemeinen Trend der Verdeckungswinkel von 10,5 auf 9,5° reduziert werden.

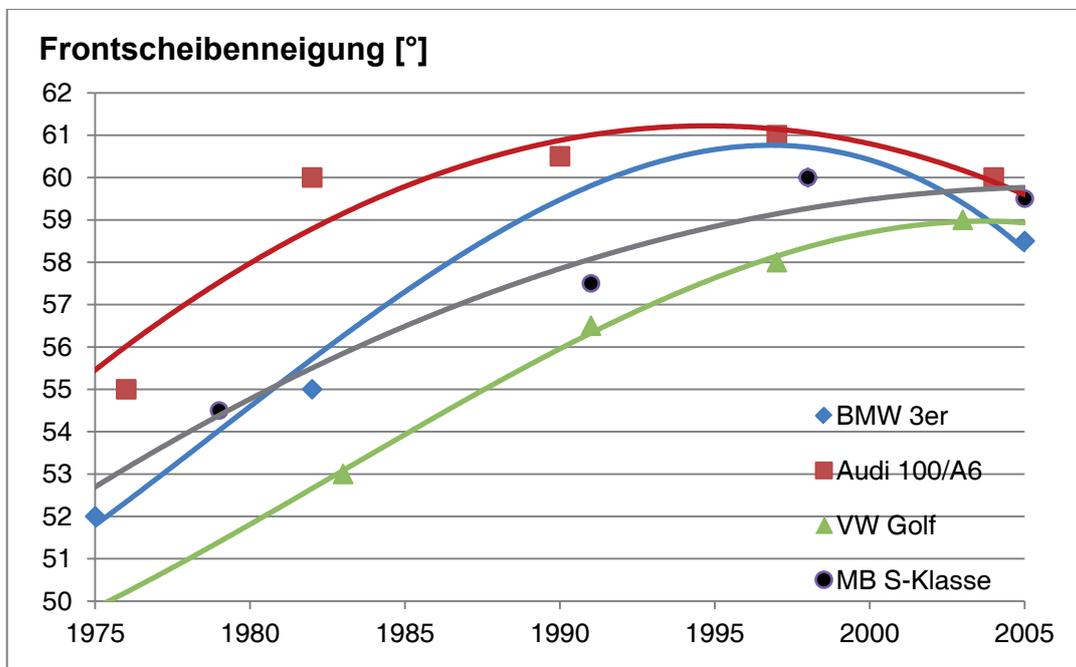


Diagramm 5-3: Entwicklung der Frontscheibenneigung ausgewählter Fahrzeugbau-reihen von 1975 bis 2005 mit Trendverläufen

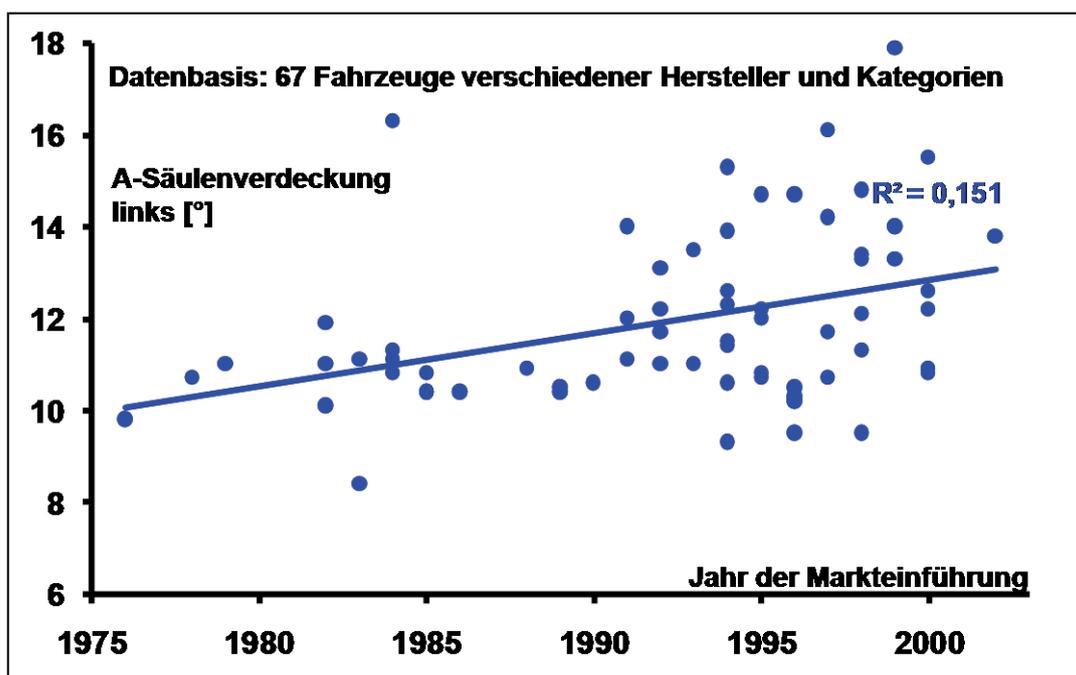


Diagramm 5-4: Historische Entwicklung der A-Säulen-Verdeckungsbreite (Quelle: Scholly)



5.3 Systematische Analyse der Einflussparameter der Säulengestaltung auf die Sichtverhältnisse innerhalb der gesetzlichen Grenzen

5.3.1 Identifizierung der Einflussfaktoren

Die konstruktive und formale Gestaltung der A-Säulen eines Pkw besitzt einige Limitierungen, Zielgrößen und Freiheitsgrade. Als Limitierungen sind vor allem die gesetzlichen Vorschriften und Regelungen zu nennen, die bereits in Kapitel 3.3 erläutert wurden. **Zielgrößen** der A-Säule bei der Fahrzeugentwicklung sind die Optimierung von:

- Karosseriesteifigkeit
- Festigkeit gegenüber Dacheindrückung beim Überschlag
- Aerodynamik
- Ein- und Ausstieg
- ästhetischem Design

und der

- Sichtbedingungen

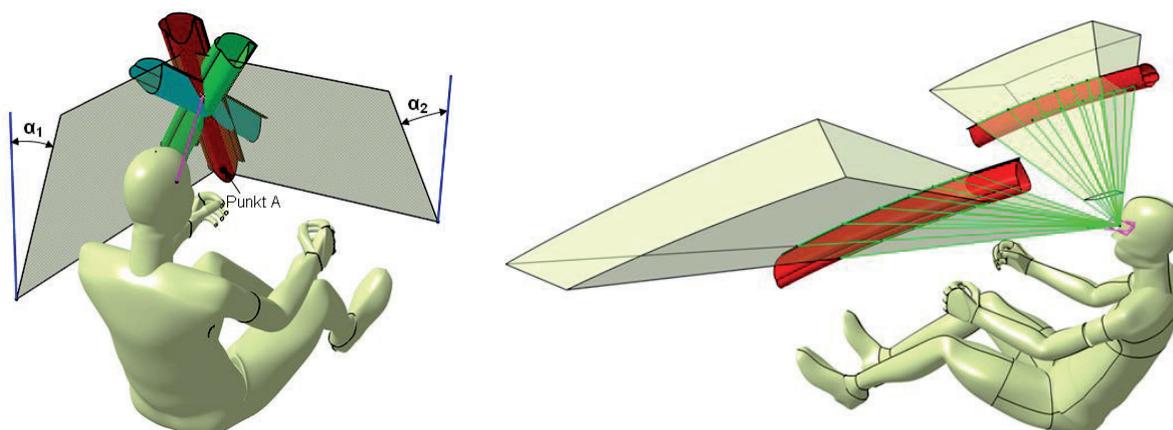
Die verbleibenden geometrischen **Freiheitsgrade** für die Gestaltung und Konstruktion der A-Säule sind:

- A-Säulen-Querschnitt
- A-Säulen-Neigung in Längs- und Querrichtung
- A-Säulen-Krümmung
- A-Säulen-Position in Längs- und Querrichtung

Für die Konzeption und Gestaltung einer Pkw-Karosserie ist von Interesse, in welcher Weise diese Gestaltungsfreiheiten der A-Säule die Sichtbedingungen beeinflussen. Dazu wurde im Rahmen einer Diplomarbeit durch *Sengül* (2009) eine umfangreiche systematische geometrische Analyse der Einflussparameter durchgeführt.

Als Messgrößen zur Ermittlung der Sichtverhältnisse dienten vier bekannte Messverfahren, die schon in den Kapiteln 3.3 und 4.6 beschrieben wurden, nämlich der

- **monokulare Verdeckungswinkel im Horizontalschnitt (ehem. FMVSS 128),**
- **binokulare Verdeckungswinkel nach 77/649/EWG**
- **die projizierte Verdeckungsfläche**
- **die gewichtete Verdeckungsfläche nach Daimler-Scholly**



Abbildungen 5-5 links und 5-6 rechts : Parametrische Neigungsvariation der A-Säule (links) und automatische Sichtschattengenerierung (rechts)

Die Nutzung eines parametrischen CAD-Systems wie CATIA V5 erlaubt durch Erstellung einer Makro-Programmierung eines Konstruktionsaufbaus eine systematische Variation der geometrischen Freiheitsgrade einer A-Säulen-Konstruktion innerhalb sinnvoller Grenzen und einer automatisch erstellten Sichtanalyse jeder Variation. Abbildung 5-5 zeigt eine Variation der A-Säulen-Neigung in zwei unterschiedlichen Dimensionen. Von der roten zur blauen Darstellung verändert sich die Säule mit zunehmender Frontscheibenneigung, von der roten zur grünen Darstellung wirkt eine stärkere Seitenscheibenneigung. Abbildung 5-6 verdeutlicht eine automatische Schattengenerierung im CAD-System entsprechend der Sicht des Fahrers, die zur geometrischen Analyse numerisch ausgewertet wird.

5.3.2 Geometrische Analysen

Indem man die geometrischen Modifikationen systematisch variiert und jede Variante mit allen vier Messverfahren bewertet, ist sowohl eine Analyse der geometrischen



Veränderungen als auch ein Vergleich der Aussagekraft der vier Messverfahren möglich.

Für die geometrische Variation der A-Säule existieren vier maßgebliche Freiheitsgrade: die Position in Längs- und Querrichtung, die A-Säulenkrümmung und die A-Säulenneigung in Längsrichtung. Dafür liegen jeweils 19, zusammen 76 numerische Analysen vor.

Folgende Einflussfaktoren besitzen einen untergeordneten Effekt:

- Eine Positionsveränderung der A-Säulen in Fahrzeug-Querrichtung (Y-Achse) nach außen führt zu einer Reduzierung der Sichtverdeckung.
- Eine Veränderung der A-Säulen-Krümmung ist praktisch ohne Einfluss auf die Sichtverdeckung des Fahrers.
- Die jeweilige Wirkung einer Verbreiterung und Verringerung des A-Säulenquerschnittes auf die Sichtverdeckung ist offensichtlich. Diese Veränderung wird in jeder einzelnen Analysesituation durchvariiert und ist in den Auswertediagrammen jeweils in mehreren Graphen wiedergegeben.
- Die Beeinflussung der Sichtverhältnisse durch Änderung der A-Säulen-Neigung in Querrichtung kann nicht isoliert betrachtet werden, da bei dieser Veränderung eine optische Verdrehung des Profilquerschnittes erfolgt, die die Messergebnisse deutlich beeinträchtigt.

Die beiden dominierenden Einflussgrößen A-Säulen-Position in Längsrichtung sowie A-Säulenneigung in Längsrichtung sind im Folgenden ausführlicher beschrieben.

5.3.3 A-Säulen-Position Längsrichtung

Die Verschiebung der A-Säule in Fahrzeuglängsrichtung (X-Achse) zeigt aufgegliedert nach den Messverfahren folgende charakteristische Aussage, die in den Diagrammen 5-7 bis 5-10 dargestellt sind:

Sowohl der monokulare als auch der binokulare Verdeckungswinkel weisen eine degressive Reduzierung der Sichtverdeckung mit zunehmender Verschiebung nach vorne auf. Im zulassungsrelevanten Verfahren der binokularen Sichtverdeckung besteht eine limitierende 6°-Grenze. Der Übergang von A nach B im Diagramm zeigt,



die gesetzliche Erlaubnis, bei 100 mm Längs-Verschiebung, die A-Säule um 11mm zu verbreitern.

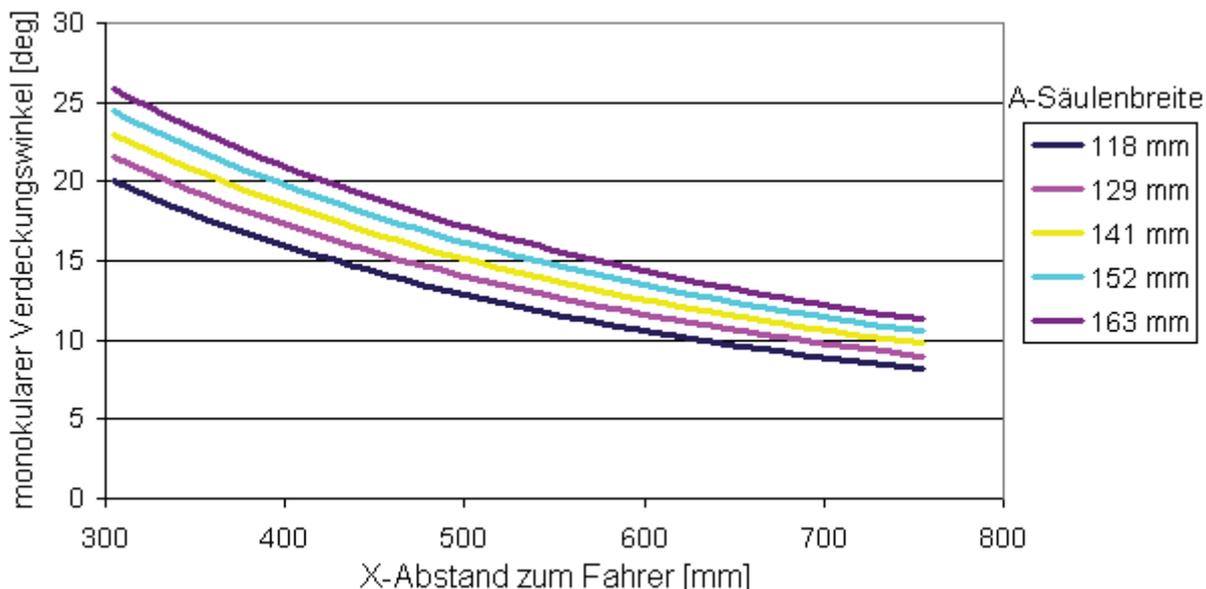


Diagramm 5-7: Monokularer A-Säulen-Verdeckungswinkel links (nach FMVSS 128) über die Längs-Verschiebung (X-Achse)

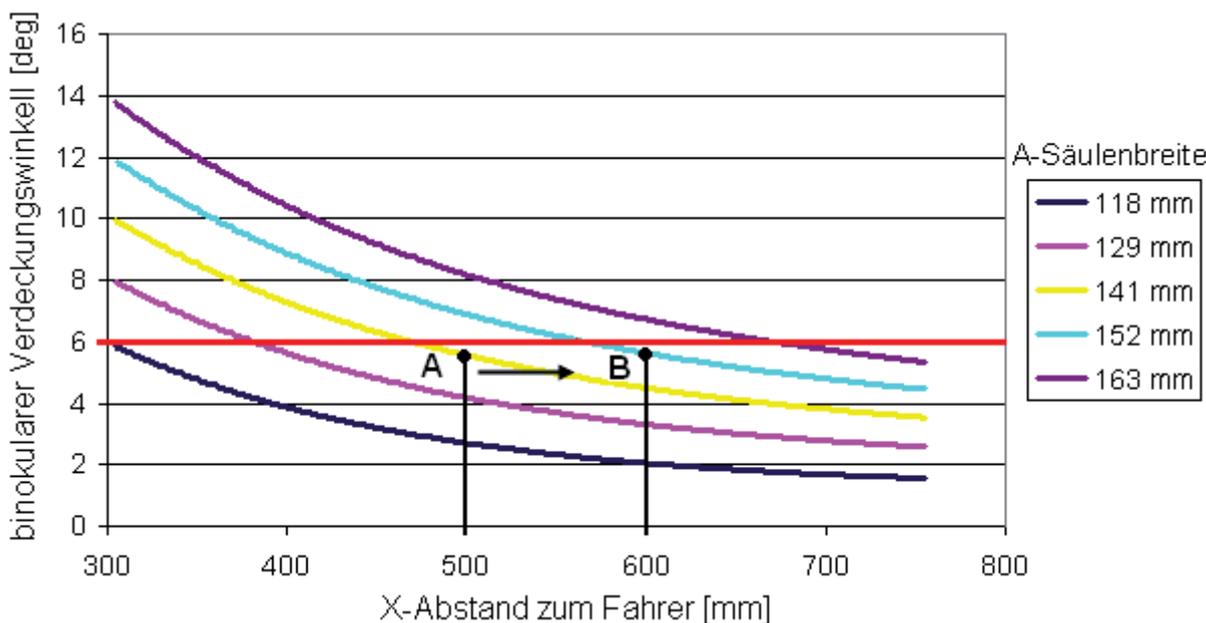


Diagramm 5-8: Binokularer A-Säulen-Verdeckungswinkel links (nach 77/649/EWG) über die Längs-Verschiebung (X-Achse)

Die projizierte Verdeckungsfläche weist ebenfalls mit zunehmender Verschiebung nach vorne den abnehmenden Charakter der Sichtverdeckung auf. Allerdings zeigt dieses Verfahren auch eine reduzierte Verdeckungswirkung in einer Verschiebung

nach hinten. Der obere Teil der A-Säule liegt soweit links hinten, dass er sich bereits außerhalb des Blickfeldes des Fahrers befindet.

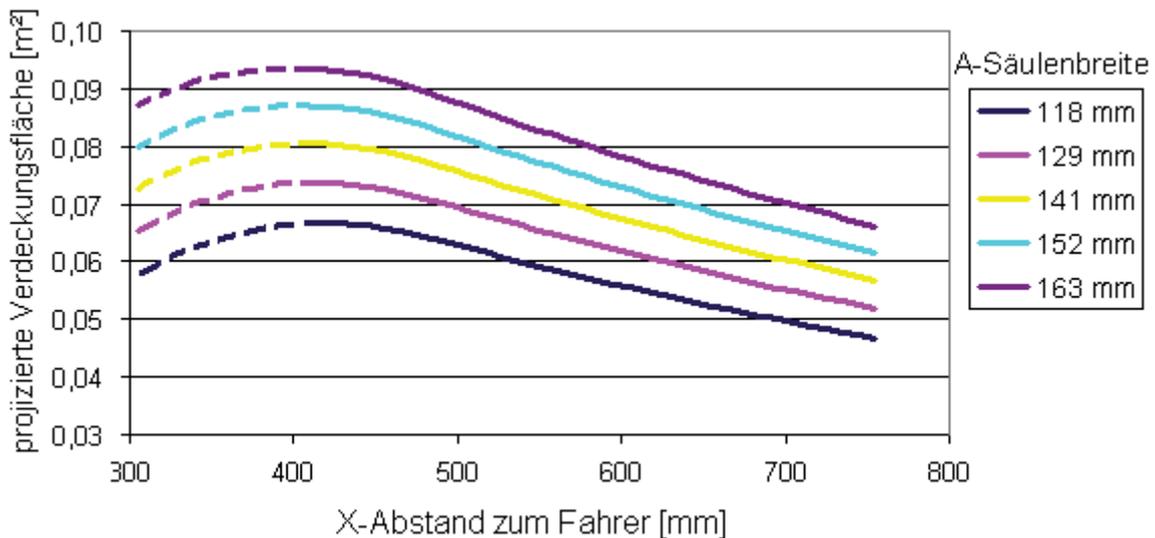


Diagramm 5-9: Projizierte A-Säulen-Verdeckungsfläche links über die Längs-Verschiebung (X-Achse)

Das Verfahren nach Daimler-Scholly zeigt keine solche Abnahme der Sichtverdeckung! Da die Verschiebung der A-Säule nach vorne dazu führt, dass die A-Säule auch weiter in das Blickfeld des Fahrers hinein wandert, ist die Sichtverdeckungswirkung trotz perspektivischer Verkleinerung der A-Säule auf gleichbleibendem und sogar steigendem Verdeckungsniveau. In dieser Auswertung zeigt sich, dass eine blickbezogene Gewichtung in die geometrische Bewertung eingeht. Abbildung 5-11 verdeutlicht die Veränderungen aus der Fahrerperspektive.

Aus dem Vergleich der unterschiedlichen Bewertungsverfahren ist zu erkennen, dass erst das relativ neue und noch recht unbekanntes Daimler-Scholly-Verfahren den negativen Einfluss weit vorne und damit enger stehender A-Säulen-Positionen aufzeigt. Dieser Effekt ist in der Praxis bei vielen (Micro-, Mini-) Vans festzustellen. Durch deren typisches One-Box-Design, bei dem die kurze Motorhaube stetig in die Frontscheibenfläche übergeht, liegen sowohl Frontscheibe als auch A-Säule sehr weit vom Fahrerauge entfernt. Die Position der A-Säulen ist in Ihrer Winkellage dadurch deutlich enger und tritt bereits bei geringeren Kurvenradien besonders bei Linkskurven und Abbiegevorgängen ins Blickfeld des Fahrers und verbleibt dort länger.

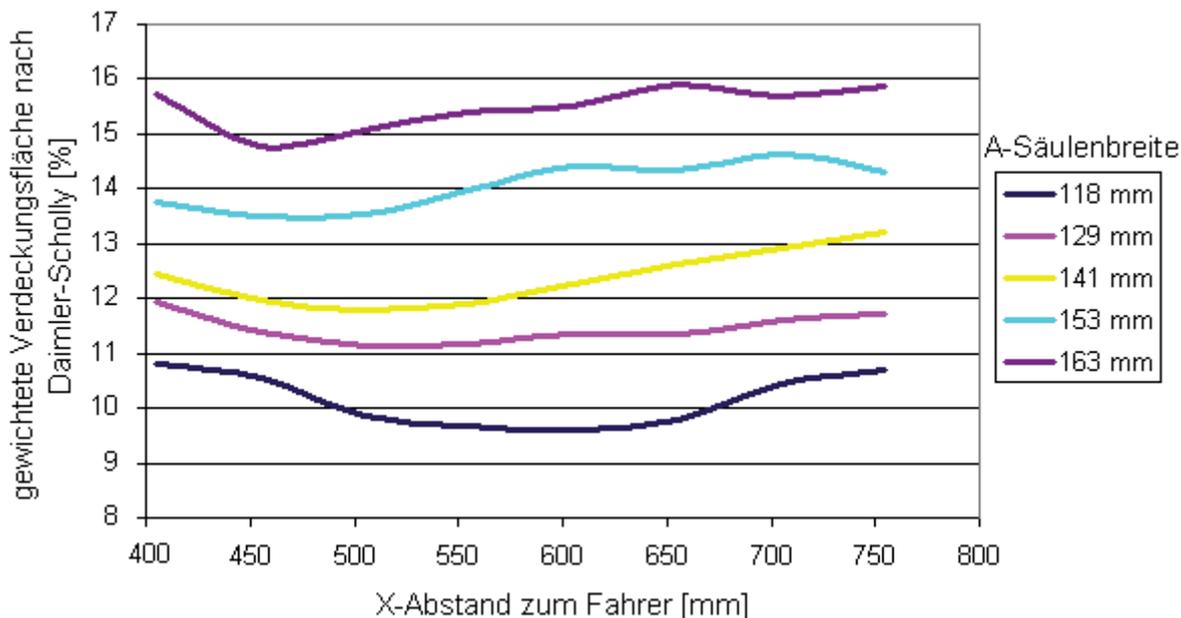


Diagramm 5-10: Gewichtete A-Säulen-Verdeckungsfläche (Daimler-Scholly-Verfahren) links über die Längs-Verschiebung (X-Achse)

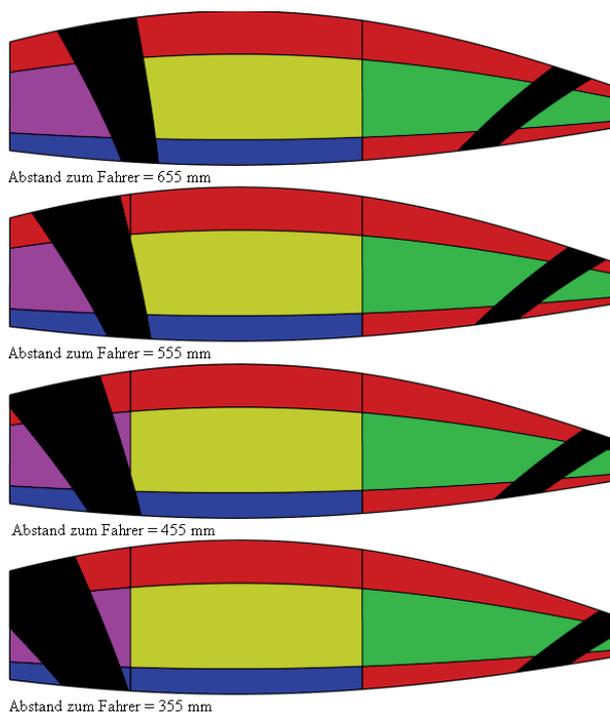


Abbildung 5-11: Gewichtete A-Säulen-Verdeckungsfläche (Daimler-Scholly-Verfahren) in unterschiedlichen Längs-Verschiebungspositionen (X-Achse)



5.3.4 A-Säulen-Neigung Längsrichtung

Die Auswertung des Einflusses der A-Säulen-Neigung in Längsrichtung, entsprechend der Frontscheibenneigung, auf die Sichtverdeckung offenbart im Vergleich der Messverfahren eine Überraschung.

Der monokulare Verdeckungswinkel, die projizierte Verdeckungsfläche und das Daimler-Scholly-Verfahren zeigen eine sehr einheitliche Tendenz auf. Mit zunehmender Neigung der A-Säule steigt die Sichtverdeckung progressiv an. Grund dafür ist der Effekt, dass mit zunehmender Neigung das Querschnittsprofil der A-Säule in größerer Winkellage zu den Sichtstrahlen des Auges verläuft und dadurch im sogenannten ‚schleifenden Schnitt‘ eine vergrößerte wirksame Länge erhält. Die Diagramme 5-12 bis 5-14 zeigen dies.

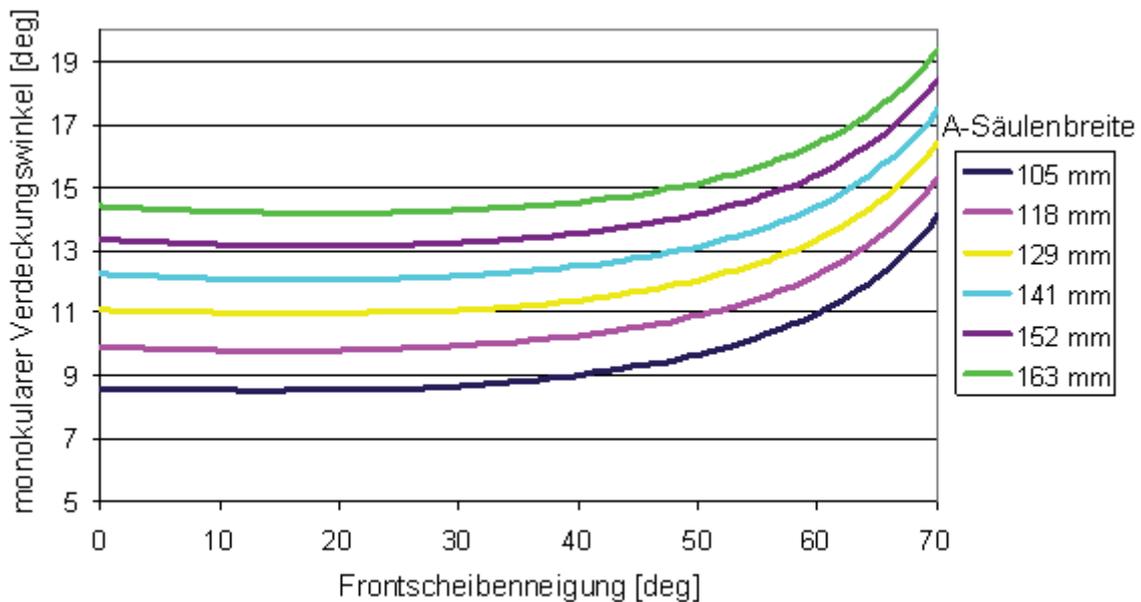


Diagramm 5-12: Monokularer A-Säulen-Verdeckungswinkel links (nach FMVSS 128) über die A-Säulenneigung längs (Frontscheibenneigung)

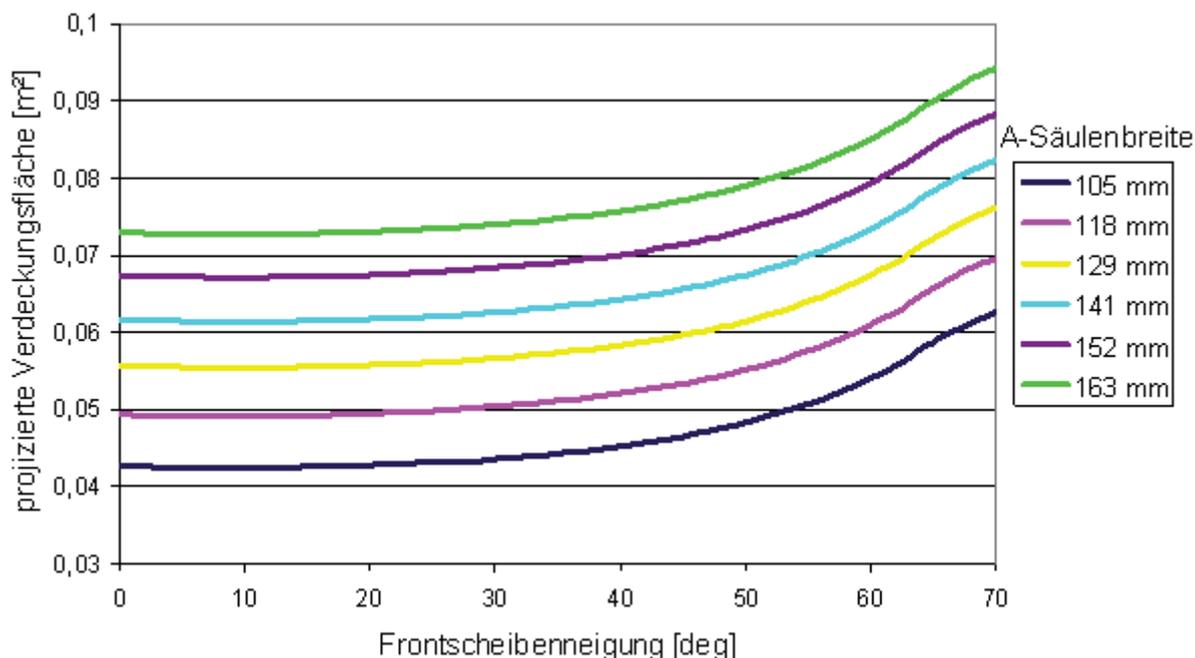


Diagramm 5-13: Projizierte A-Säulen-Verdeckungsfläche links über die A-Säulenneigung längs (Frontscheibenneigung)

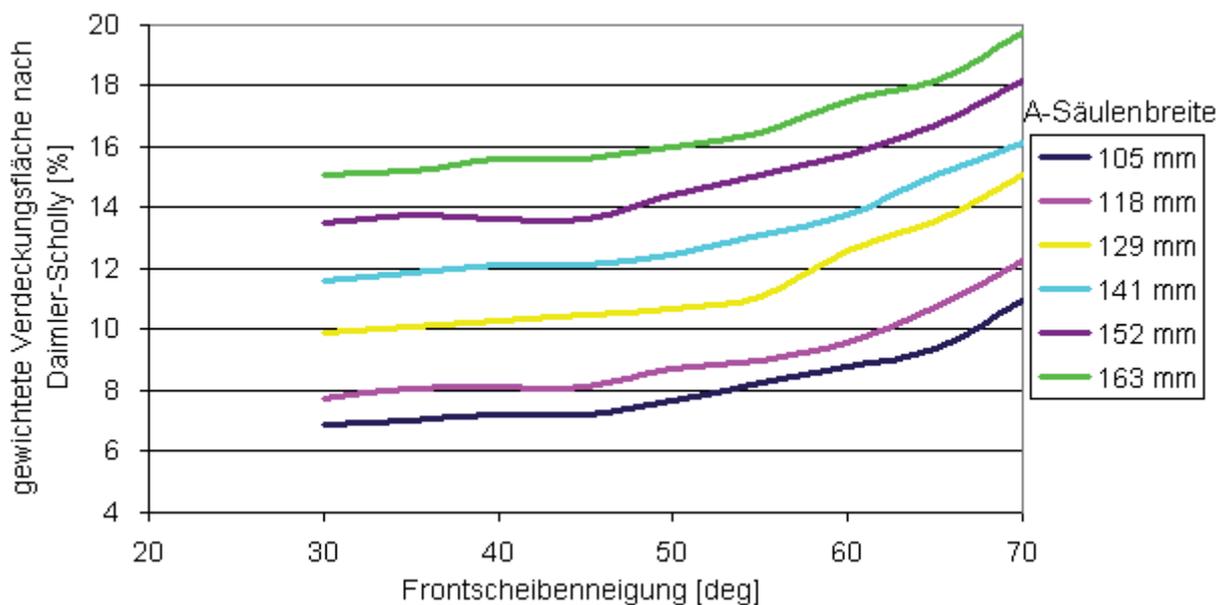


Diagramm 5-14: Gewichtete A-Säulen-Verdeckungsfläche (Daimler-Scholly-Verfahren) links über die A-Säulenneigung längs (Frontscheibenneigung)

Allerdings weisen die Messergebnisse des Zulassungsverfahrens nach 77/649/EWG dazu einen komplett abweichenden Verlauf aus. Hier nimmt die Sichtverdeckung mit



zunehmender Sichtverdeckung progressiv ab. Das Kurvenverhalten in Abbildung 5-15 kehrt sich also praktisch um!

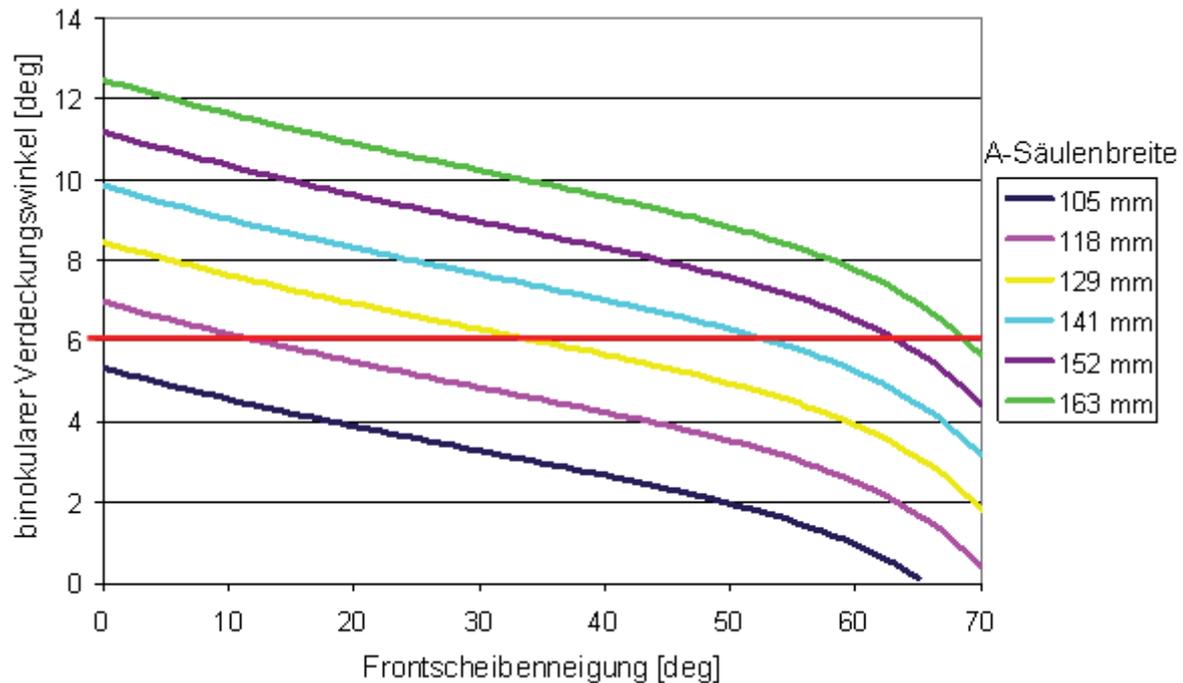


Diagramm 5-15: Binokularer A-Säulen-Verdeckungswinkel links (nach 77/649/EWG) über die A-Säulenneigung längs (Frontscheibenneigung)

Die Ursache für dieses überraschende wie unrealistische Verhalten des Messergebnisses liegt in der Definition des binokularen Verdeckungswinkels begründet. Abbildung 5-16 verdeutlicht, dass für die Winkelermittlung der rechte Schenkel als Sichtstrahl an der frontscheibenseitigen Kante des oberen A-Säulen-Schnittes angelegt wird und der linke Schenkel an der seitenscheibennahen Kante des unteren Säulenschnittes. Diese Festlegung bewirkt, dass der eingeschlossene Winkel mit zunehmender Säulenneigung kleiner wird anstatt größer, wie es der Wirkung in der Realität entspräche. Man muss diese Definition in der europäischen Zulassungsvorschrift als fehlerhaft bezeichnen, denn sie widerspricht dem realen Effekt und unterläuft den Zweck dieser Vorschrift, ein ausreichendes Sichtfeld festzulegen und die Verdeckungen zu begrenzen.

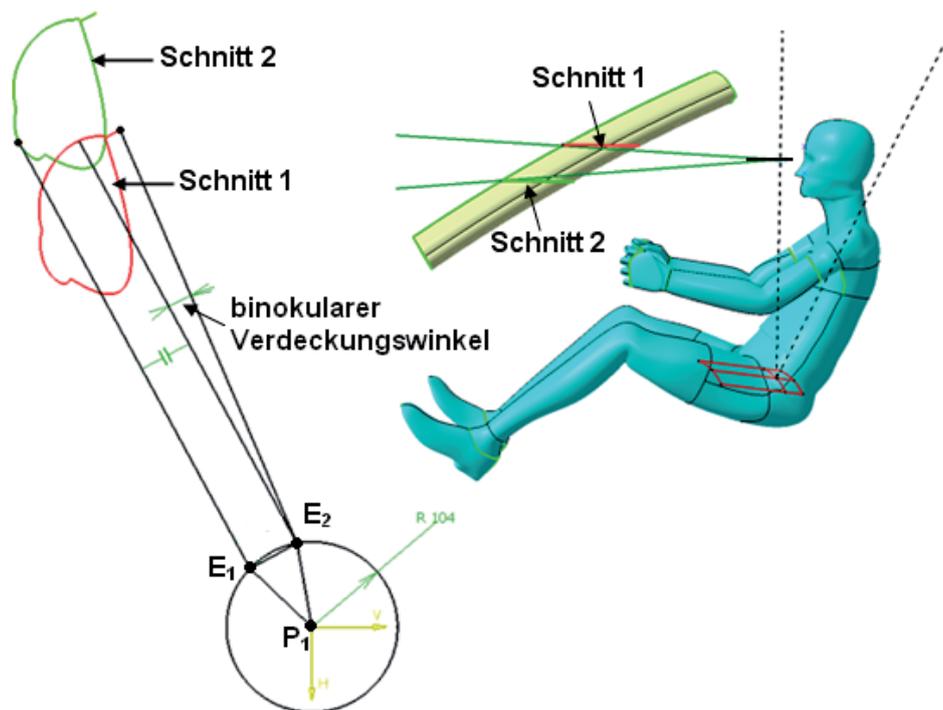


Abbildung 5-16: Ermittlung des binokularen Verdeckungswinkels nach 77/649/EWG

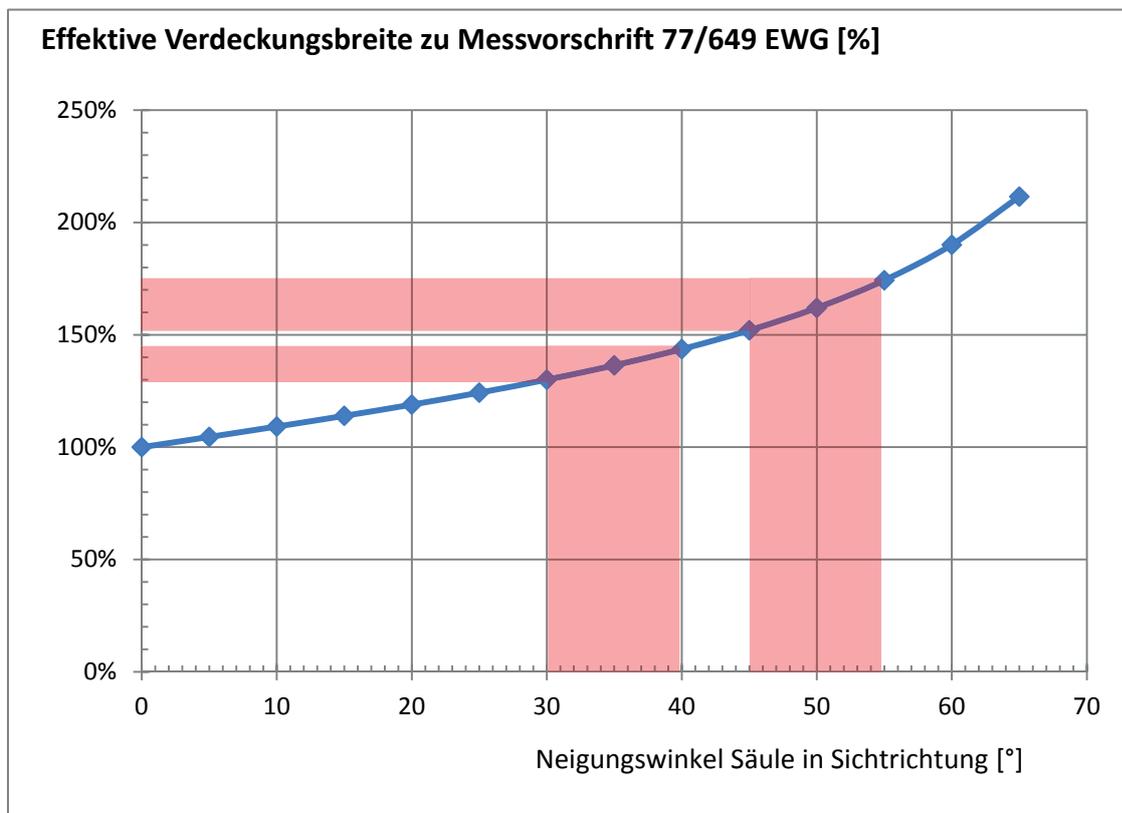


Diagramm 5-17: Vergleich der übergroßen effektiven Verdeckungsbreite der A-Säulen in Relation zur Zulassungsvorschrift 77/649EWG



Der Effekt der überbreiten A-Säulen ist im Diagramm 5-17 dargestellt. Der Kurvenzug verdeutlicht den Anstieg der effektiven Säulenverdeckung in Relation zur durch die Messvorschrift gestatteten Säulenverdeckung. Die A-Säulen auf der Fahrerseite verlaufen üblicherweise entlang einer Frontscheibenneigung von 60-65°. Die Blickwinkelposition zur Fahrtrichtung beträgt im Mittel 25-30°. Daraus ergibt sich in der Blickrichtung des Fahrers eine effektive Neigung von 30-40°. Die Definition der Messvorschrift führt zu einer um 30-45% größeren Säulenbreite, als durch die Messvorschrift sinngemäß erfasst wird. Im Hinblick auf die Position der Säule auf der Beifahrerseite, bei der die Vorschrift keine amtliche Anwendung findet, aber durch die Symmetriespiegelung implizit wirksam wird, ist die tatsächliche Säulenbreite sogar 50-75% größer als laut Messvorschrift ermittelt, da die Neigung der Frontscheibe in dieser Perspektive noch stärker einwirkt.

Würde die Zuordnung der Sichtstrahlen zu den beiden Pfostenschnitten getauscht, also der innere Sichtstrahl am unteren Schnitt des Pfostens und der äußere Sichtstrahl am oberen Schnitt angelegt werden, so entspräche der qualitative Trend der Maßermittlung dem Verdeckungseffekt. Die Konstruktion der dadurch schlankeren A-Säulen-Querschnitte erforderte bei gleichbleibendem Design eines Fahrzeuges und gleicher Steifigkeit der Struktur einen größeren Materialeinsatz z.B. durch dickere Wandstärken oder aufwändigere Werkstoffe. Insofern wäre der Sicherheitsgewinn durch geringere A-Säulenquerschnitte mit höherem Kosten- bzw. Energieeinsatz bei der Herstellung und dem Betrieb des Fahrzeugs zu erkaufen.

5.3.5 Resümee der geometrischen Analyse

Insgesamt erläutert diese systematische parametrische Analyse die Entstehung und Wirkungsweise der in Kapitel 3.2 wiedergegebenen kritischen Sichtbedingungen aktueller Fahrzeuge. Die gegenwärtig geringe Kritik von Fahrern gegenüber dieser Sicherheitsbeeinträchtigung lässt sich erstens durch den schleichenden Veränderungsprozess über mehrere Jahrzehnte erklären. Zweitens bestehen zwischen den am Markt angebotenen Fahrzeugen in der subjektiven Wahrnehmung nur geringe Unterschiede in der Sichtverdeckung.



Obwohl das Phänomen der großen Sichtverdeckung der A-Säulen auch im Kreise von fahrzeugtechnischen Sachverständigen und Unfallgutachtern analysiert und diskutiert wurde, ist bisher keine offene Kritik an der Zulassungsvorschrift bekannt geworden (Schmidtke 1989, Hangel 1993, Scholly 1998, Pflieger 2003, Glaser 2008). Von Seiten der Automobilhersteller, die im Rahmen der Typzulassung neuer Fahrzeugmodelle am stärksten von dieser Vorschrift betroffen sind, besteht kein Anlass zur Kritik, da die aktuelle Regelung einige Freiheiten zulässt, um alle Zielgrößen bei der Auslegung der A-Säulen in Einklang zu bringen.

5.4 Einfluss der anthropometrischen Variationen der Fahrer auf die Sichtverhältnisse

Wie bereits in Kapitel 5.1 angesprochen nehmen Fahrer mit unterschiedlichen Beinlängen mit Hilfe der Sitzverstellung unterschiedliche Sitzpositionen zu den Pedalen im Fahrzeug ein. Aus den Unterschieden in der Position von Sitz und Hüfte im Fahrzeug und den Variationen in den Oberkörperabmessungen resultieren sehr unterschiedliche Augpunktlagen über die Fahrerpopulation. Verstellbare Lenkräder und Sitzhöhenverstellungen erleichtern zudem die Einstellung einer bequemen individuellen Sitzposition. Eine der zentralen Anwendungen des Menschmodells RAMSIS ist die Simulation der Fahrerhaltungen und der wahrscheinlichen Augpunktlagen über das Körpermaßspektrum der Fahrerpopulation. Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Simulation von 10 unterschiedlichen Manikins in insgesamt 25 verschiedenen Sitzpositionen im CAD-Datenmodell des BMW 6er Cabrio [E64] durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5-18 wiedergegeben. Die Ergebnisse der Augpunktverteilung der RAMSIS-Simulation im Vergleich zur genormten SAE-Augpunktellipse ist sehr ähnlich zu der in anderen europäischen Pkw.

Die Unterschiede der Augpunktposition betragen dabei in Fahrzeuglängsrichtung (X-Koordinate) bis zu 260 mm und in der Höhe Z-Koordinate) bis zu 80 mm zwischen den Augpunktlagen sehr kleiner Frauen (5.% Frau Sitzzwerg) und sehr großer Männer (95.% Mann Sitzriese).

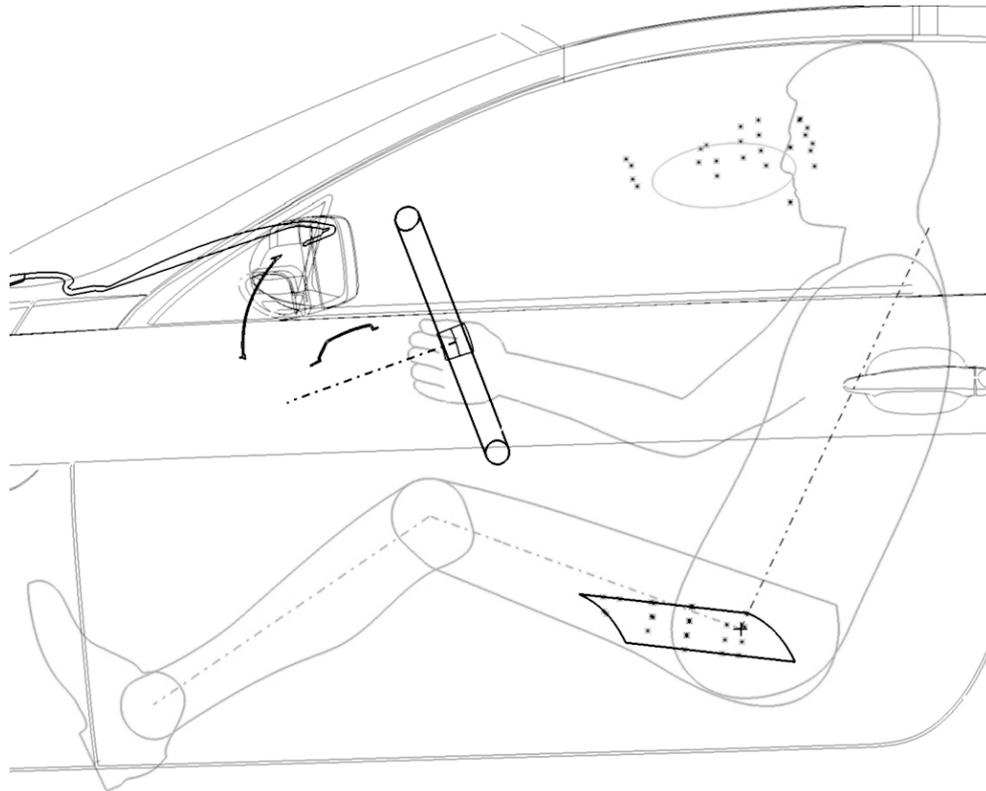


Abbildung 5-18: Hüft- und Augpunktlagen einer RAMSIS-Simulation im Fahrerplatzpackage des BMW 6er Cabrio [E64]

Obwohl der Verlauf der A-Säulenneigung nach hinten oben eine ähnliche Richtung wie die Tendenz der Augpunktlagen von kleinen zu großen Personen aufweist, treten hinsichtlich des relativen Blickverlaufes zu den A-Säulen Unterschiede in der Größe der Blickzuwendung auf. Eine RAMSIS-Simulation der Kopf- und Augenbewegung des Fahrers um an der A-Säule vorbeizuschauen, ergibt folgendes Ergebnis:

Um mit dem linken Auge an der linken A-Säule vorbeischaun zu können, muss der sehr große Mann seine Blickrichtung um 24° nach links wenden. Die sehr kleine Frau muss die Blickrichtung um einen Winkel von 36° drehen, also Kopf und Auge um 12° oder 50% mehr bewegen als der sehr große Mann!

Der binokulare Verdeckungswinkel beträgt dabei 4° für den sehr großen Mann, für die sehr kleine Frau $9,2^\circ$. Diese RAMSIS-Simulation prognostiziert 80-85% der Blickwinkeländerung mittels der Kopfbewegung und nur den 15-20% mittels Augenbewegung. Der Grund dafür ist das RAMSIS-Haltungsmodell, das den Wechsel zu einer Dauerhaltung zu Grunde legt und nicht das Bewegungsverhalten eines kurzzeitigen Blickwechsels berücksichtigt. Da das optimale Blickfeld des Menschen in der



Literatur durchgängig einen Wert von jeweils 15° horizontaler Augenbewegung ausweist, ist in Realität für diesen Fall eine deutlich geringere Kopfbewegung und dafür eine größere Augenbewegung zu erwarten.

Je geringer der Anteil der Kopfbewegung für einen horizontalen Blickwechsel ist, desto geringer ist der effektive Abstand der Sehstrahlen der beiden Augen. Dies führt zu einer größeren binokularen Verdeckung der A-Säule, als in der RAMSIS-Simulation theoretisch ermittelt wurde.

5.5 Zusammenhang von Streckenverlauf, Fahrzeuggeometrie und Fahrgeschwindigkeit auf die Sichteinschränkungen in Linkskurven

5.5.1 Antizipation und Gegenwartsempfinden

Die Regelaufgabe der Fahrzeugführung beruht auf dem Modell des Regelkreises Mensch-Maschine-Umgebung, der bereits in Kapitel 3.1 und Abbildung 3-1 erläutert wurde. Die Regelaufgabe lässt sich gewöhnlich in die drei hierarchischen Regelebenen Navigation, Bahnführung und Stabilisierung aufgliedern. *Braess und Donges* (2006) erläutern den Zeitbedarf für fertigkeitbasierte Aufgaben des Fahrers im Bereich der Stabilisierung und teilweise der Bahnführung in der Größenordnung einer Sekunde und darunter (Abbildung 5-19). Die visuelle Informationsaufnahme für diese Aufgaben erfolgt zu einem hohen Anteil über das periphere Sehen des optischen Flusses der bewegten Umgebung, wie in Kapitel 2.3 beschrieben wurde. Die regelbasierte Aufgabenebene, die auch unvorhergesehene Ereignisse bewusst bewältigen kann, benötigt Antizipationszeiten von mindestens zwei bis drei Sekunden. In diesem Zeitfenster können im Gehirn des Menschen bereits anspruchsvolle Vorverarbeitungen vorgenommen werden, wie beispielsweise eine relative Geschwindigkeitsschätzung zur Abstandsregelung des Fahrzeuges durch den Fahrer.

Für die entsprechende Informationsaufnahme ist ein foveales Sehen unvermeidbar. Das bedeutet, dass die Sichtstrahlausrichtung zur Fixation der Straße oder des vorausfahrenden Fahrzeuges auf den Bereich gerichtet sein muss, der sich geschwindigkeitsabhängig mindestens zwei Sekunden vor dem eigenen Fahrzeug befindet. Diverse experimentelle Untersuchungen mit Blickbewegungsanalysen, dem so-



nannten Eye Tracking, haben dieses Modell konsolidiert. Das dabei ermittelte Blickverhalten der Fahrer wird in Kapitel 6.3 erläutert.

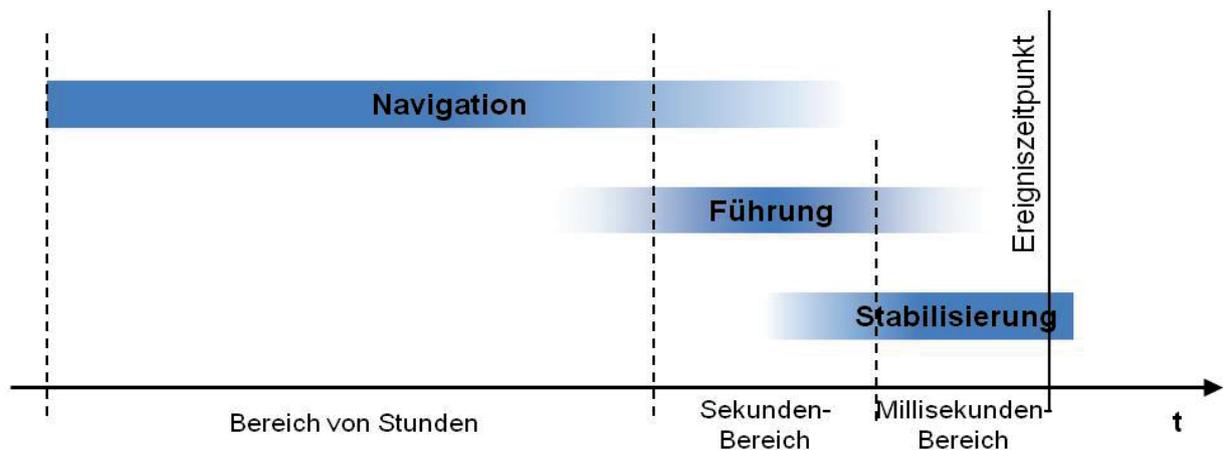


Abbildung 5-19: Zeithorizonte der drei Regelebenen (modifiziert nach Braess & Donges)

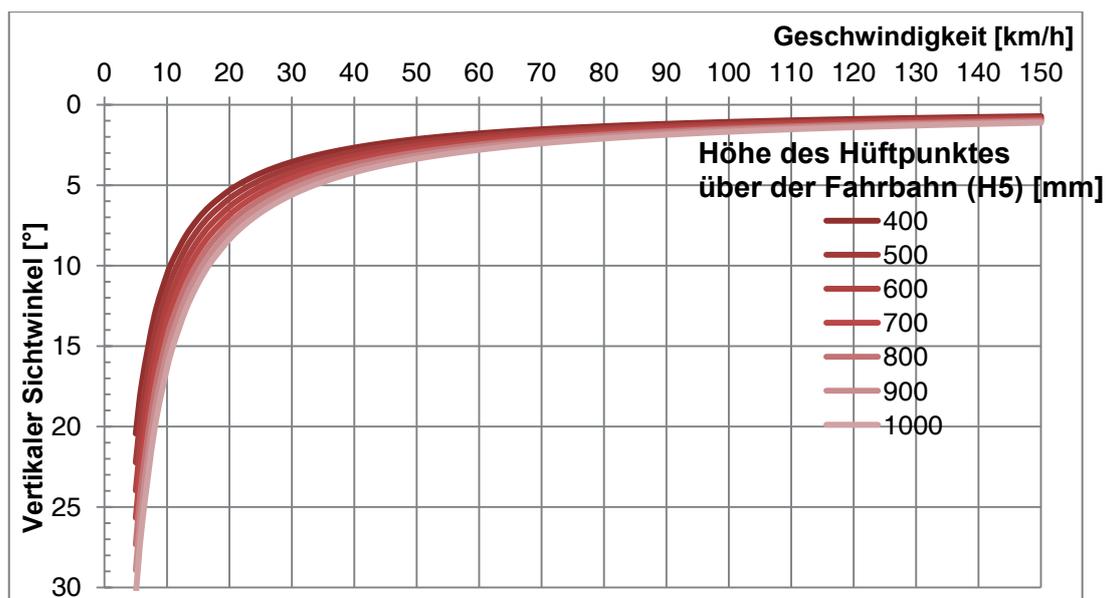


Abbildung 5-20: Vertikaler Sichtwinkel des Fahrers auf die Fahrbahn bei zwei Sekunden Vorausschau

Die allgemeine Gültigkeit und Notwendigkeit des Regelverhaltens des Fahrers äußert sich auch in der rechtsverbindlichen Realisierung des erforderlichen Sicherheitsabstandes im Straßenverkehr von zwei Sekunden Passierabstand eines Wegpunktes, der gleichbedeutend der Abstandsregel des „halben Tacho“ ist, also des Abstandes der halben Fahrgeschwindigkeit in Metern. Mit dieser ‚Daumenregel‘ wird für die täg-



liche Anwendung das Gebot aus §4(1) der Straßenverkehrsordnung (StVO 2009) interpretiert, hinter einem vorausfahrenden Fahrzeug auch bei plötzlicher Bremsung anhalten zu können.

Diese Vorausschau des Fixationspunktes des Fahrers bestimmt einerseits durch den Blick auf die Fahrbahn die Neigung des Sichtstrahls in der vertikalen Ebene. Je langsamer die eigene Fahrtgeschwindigkeit ist, desto näher ist der Fixationsbereich und desto steiler der Sichtstrahl. Abbildung 5-20 zeigt den vertikalen Sichtwinkel des Fahrers auf die Fahrbahn in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit und der Sitzhöhe über der Fahrbahnhöhe (Maß H5) für zwei Sekunden Vorausschau. Es ist das Spektrum von kompakten Kleinwagen bis hin zum Van aufgetragen. Ausgesprochene Sportwagen mit extrem niedrigen Augpunktlagen sind darin nicht repräsentiert. Bereits bei Geschwindigkeiten größer als ca. 35 km/h beträgt der Sichtwinkel weniger als 5° nach unten. Der Unterschied des vertikalen Sichtwinkels für eine Differenz der Sitzhöhe von ca. 500 – 600 mm beträgt bei Geschwindigkeiten im Stadtverkehr 3° bis 7°.

5.5.2 Berechnung des Vorausschauwinkels

Auch die horizontale Auslenkung des Sichtstrahls ist durch die Fahrtgeschwindigkeit und die vorausliegende Streckenführung bestimmt. Jeder Kurve, die der Fahrer ansteuert, läuft sein Sichtstrahl entsprechend voraus. Die seitliche Auslenkung des Sichtstrahls bei Kurvenstrecken oder in Abbiegesituationen überlagert sich häufig mit der sichtverdeckenden A-Säule auf der Fahrerseite und führt dabei zu Sichtkonflikten.

Die mutmaßliche seitliche Auslenkung des Sichtstrahls ist bei Kenntnis des Kurvenverlaufs der Strecke vor dem Fahrzeug und der aktuellen Fahrtgeschwindigkeit auf Basis der zeitlichen Vorausschauprognose von beispielsweise zwei Sekunden zu berechnen. Die Abbildung 5-21 erläutert die geometrischen Größen der Herleitung und Berechnung.

Die eigene Fahrzeugposition befindet sich im Punkt B. Die vorausliegende Strecke ist ein Linkskurvenabschnitt mit einem Kreisbogensegment vom Radius r . Der Winkel



δ ist der Winkel zwischen der Richtung des Geschwindigkeitsvektors v und der Sichtlinie BC auf den Fixationspunkt C der Vorausschau.

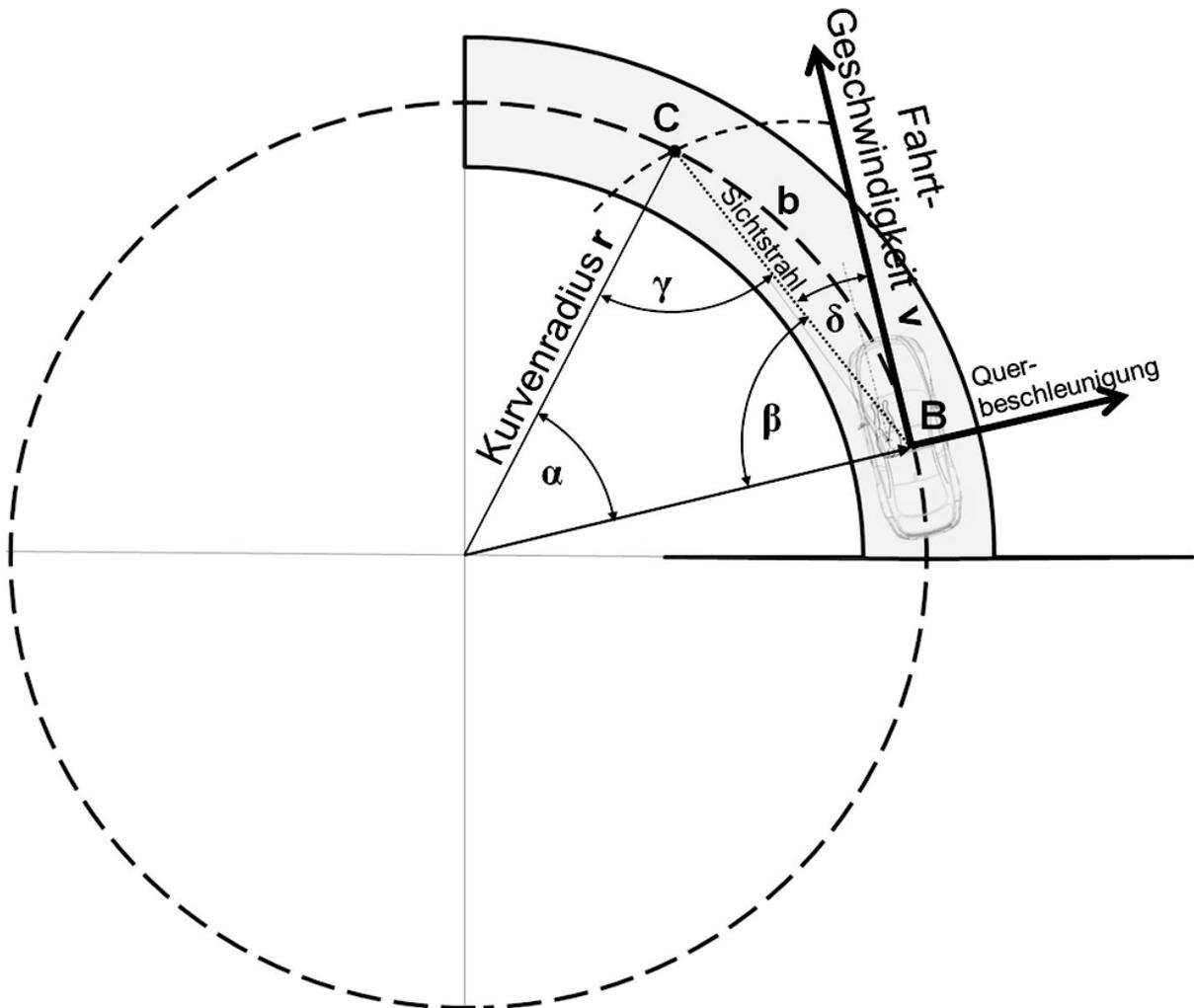


Abbildung 5-21: Ermittlung des Vorausschauwinkels bei Kurvenfahrt

Die Berechnung des Blickrichtungswinkels δ des Fahrers im Punkt B leitet sich als Funktion der Fahrgeschwindigkeit v , des Kurvenradius r und der Vorausschauzeit t auf den Fixationspunkt C folgendermaßen her:

Der Geschwindigkeitsvektor v der aktuellen Fahrzeugbewegung steht senkrecht zum Kreismittelpunkt der Kurve mit dem Radius r . β ist der Nebenwinkel zu δ .



So gilt:
$$\delta = 90^\circ - \beta$$

Aus der Summe der Innenwinkel des Dreiecks ergibt sich:

$$180^\circ = \alpha + \beta + \gamma$$

Da es sich um ein gleichschenkliges Dreieck mit den Schenkellängen Radius r handelt, gilt $\gamma = \beta$ und somit gilt:

$$\beta = \frac{180^\circ - \alpha}{2}$$

Der Winkel α verhält sich zur Kreisbogenlänge b der Kurve wie der Vollkreiswinkel zum Vollkreisumfang:

$$\alpha = \frac{360^\circ}{2\pi r} b$$

Die Länge des Kreisbogenabschnittes b ergibt sich aus der Fahrgeschwindigkeit mal der Vorausschauzeit t_v und wird umgerechnet in die korrekten Einheiten:

$$b[m] = v \left[\frac{m}{s} \right] \cdot t_v [s]$$

Alle Formeln ineinander eingesetzt ergeben sich zur folgenden Berechnung:

$$\delta = 90^\circ - \frac{180^\circ - \frac{180^\circ}{\pi r} \cdot v \cdot t_v [s]}{2}$$

Sollte der Radius der Kurve unbekannt sein, so lässt sich dieser aus der Querbesehleunigung des Fahrzeugs errechnen, welche im Fahrzeug messbar ist:

$$r = \frac{v^2}{a_y}$$

So ergibt sich alternativ folgende Formel (mit den Geschwindigkeitsangaben in der Einheit m/s):

$$\delta = 90^\circ - \frac{180^\circ - \frac{180^\circ}{\pi \frac{v}{a_y}} \cdot t_v}{2}$$



und vereinfacht zu:

$$\delta = 90^\circ \cdot \frac{a_y \cdot t_v}{\pi \cdot v}$$

Der Vorausschauwinkel δ ist also eine Funktion der Geschwindigkeit v , der Querbewegungsbeschleunigung a_y und der Vorausschauzeit t_v . Da die Vorausschauzeit t_v mit der Modellprognose als Wert von 2..3 Sekunden konstant gesetzt werden kann und die beiden Größen Geschwindigkeit und Querbewegungsbeschleunigung messbar sind, kann der modellhafte Vorausschauwinkel errechnet werden. Dieses Berechnungsmodell gilt für Fahrtabschnitte, bei denen von der Fahrzeugposition B bis zum Fixationspunkt C der Kurvenradius und die Fahrtgeschwindigkeit gleichbleibend sind.

Praktische Versuchsdurchführungen im Rahmen einer Diplomarbeit von *Hofmann* (2009) haben diesen Zusammenhang im realen Straßenverkehr nachgeprüft. Das Blickverhalten der Fahrer in Linkskurven wurde mittels des Eye Tracking Systems DIKABLIS aufgezeichnet und ausgewertet und mit den ebenfalls aufgezeichneten Fahrdynamikwerten abgeglichen. Die mit erheblichem messtechnischem Aufwand mit insgesamt acht Probanden durchgeführten Versuchsfahrten konnten die theoretisch hergeleiteten Zusammenhänge bestätigen. Besonders in Fahrsituationen stationärer Kreisfahrt, wie sie im Straßenverkehr beim Durchfahren von Kreisverkehren auftreten, konnte dieses Vorausschauverhalten von zwei Sekunden jeweils über mehrere Sekunden lang beobachtet und mittels Eye Tracking dokumentiert werden.

5.5.3 Graphische Systematik des Vorausschauwinkels

Der quantitative Zusammenhang des Vorausschaublickes kann grafisch aufgetragen werden, wie in Abbildung 5-22 dargestellt ist. In diesem Diagramm ist zwecks besserer Anschaulichkeit die Abszisse quasi in Fahrtrichtung vertikal dargestellt. Auf ihr ist die Fahrgeschwindigkeit in km/h aufgetragen. Die Querbewegungsbeschleunigung ist auf der Ordinate nach links verzeichnet, da die Anwendung bevorzugt für den Sichtverdeckungskonflikt mit der linken A-Säule verwendet werden kann. Die strahlenförmig vom Nullpunkt auslaufenden Linien stellen die Graphen gleicher Vorausschauwinkel dar. Sie beginnen aus der Fahrtrichtung nach links gegen den Uhrzei-



gersinn. Je weiter Vorausschaublicke im Fahrzeug nach links schwenken, desto weiter links sind die Werte auch im Diagramm verzeichnet. Es ist jedoch zu beachten, dass die Skalierung nicht linear ist und ebenfalls nicht dem Winkelmaß entspricht! Die gekrümmten Kurvenzüge repräsentieren jeweils gleiche Kurvenradien des Fahrbahnverlaufes. Je stärker die Linkskurve gekrümmt ist, also je kleiner der Kurvenradius ist, desto weiter ist der Kurvenzug von der als Fahrtrichtung fungierenden vertikalen Ordinate entfernt.

Das blau markierte Zahlenbeispiel kann die Lesweise des Diagramms erläutern:

Bei einer Fahrgeschwindigkeit von 50,5 km/h erfährt der Fahrer auf einem Kurvenradius von 80 m eine Querbefchleunigung von 2,46 m/s². Der dabei vorgenommene Vorausschauwinkel beträgt 10°.

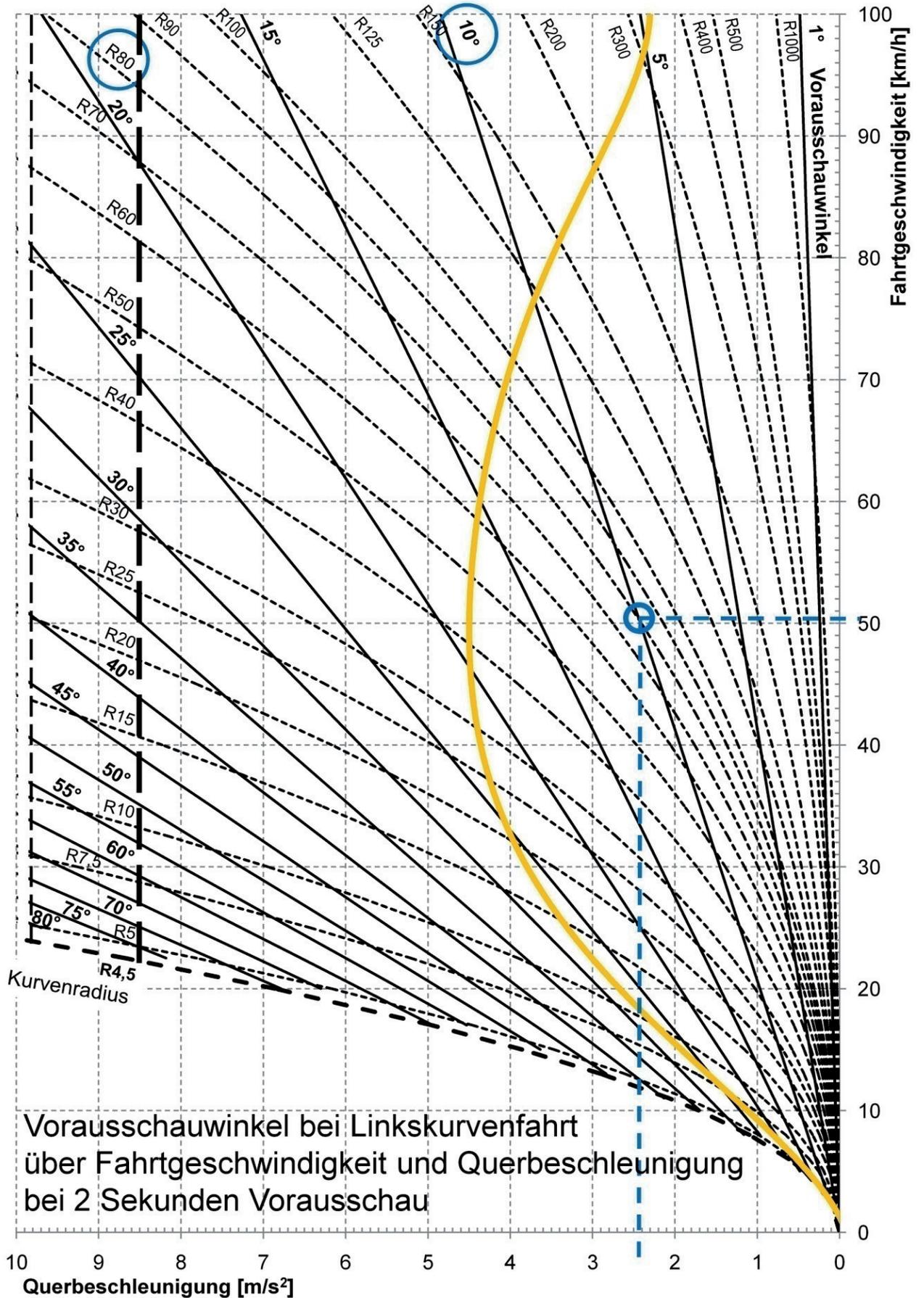
Die zuvor eingeführte Berechnungsformel weist folgendes exaktes Ergebnis aus:

$$\delta = 90^\circ \cdot \frac{2,46\text{m} \cdot 2\text{sec} \cdot 3,6\text{sec}}{\text{sec}^2 \cdot \pi \cdot 50,5\text{m}} = 10,05^\circ$$

Die Wahl der Größen für die Achsen des Diagramms und die Ausrichtung wurde so gewählt, um eine hohe Anschaulichkeit und für die Variation des Vorausschauwinkels und der Querbefchleunigung eine möglichst gute Auflösung und Lesbarkeit zu erreichen.

Die untere Grenze des Diagrammbereiches bildet ein Radius von 4,5 m, da kein Pkw bekannt ist, dessen Spurkreisradius der Fahrzeugmitte diesen Wert unterschreitet. Als linke Diagrammgrenze ist eine Querbefchleunigung von 8,5 m/s² gewählt, da bei Pkw mit Profilreifen auch unter günstigen Reibpaarungen von Reifen und Straßenbelag keine höheren Querbefchleunigungen in einer stationären Kreisfahrt auftreten. Nach oben ist der Diagrammbereich theoretisch offen. Der Darstellungsbereich wurde mit maximal 100 km/h gewählt, da in diesem Geschwindigkeitsbereich auch bei hohen Querbefchleunigungen nur geringe Vorausschauwinkel erzielt werden.

Zusätzlich ist in diesem Diagramm als orangefarbene Kurve die Sicherheitsgrenze eingetragen, die ein Normalfahrer im Fahrbetrieb seines Pkw selten überschreitet. (Hamberger 1998 S.53, Nickel 2001 S.4) Das bedeutet, dass die Mehrzahl der Fahrer sich bei ihren Kurvenfahrten rechts dieser Kurve aufhält.





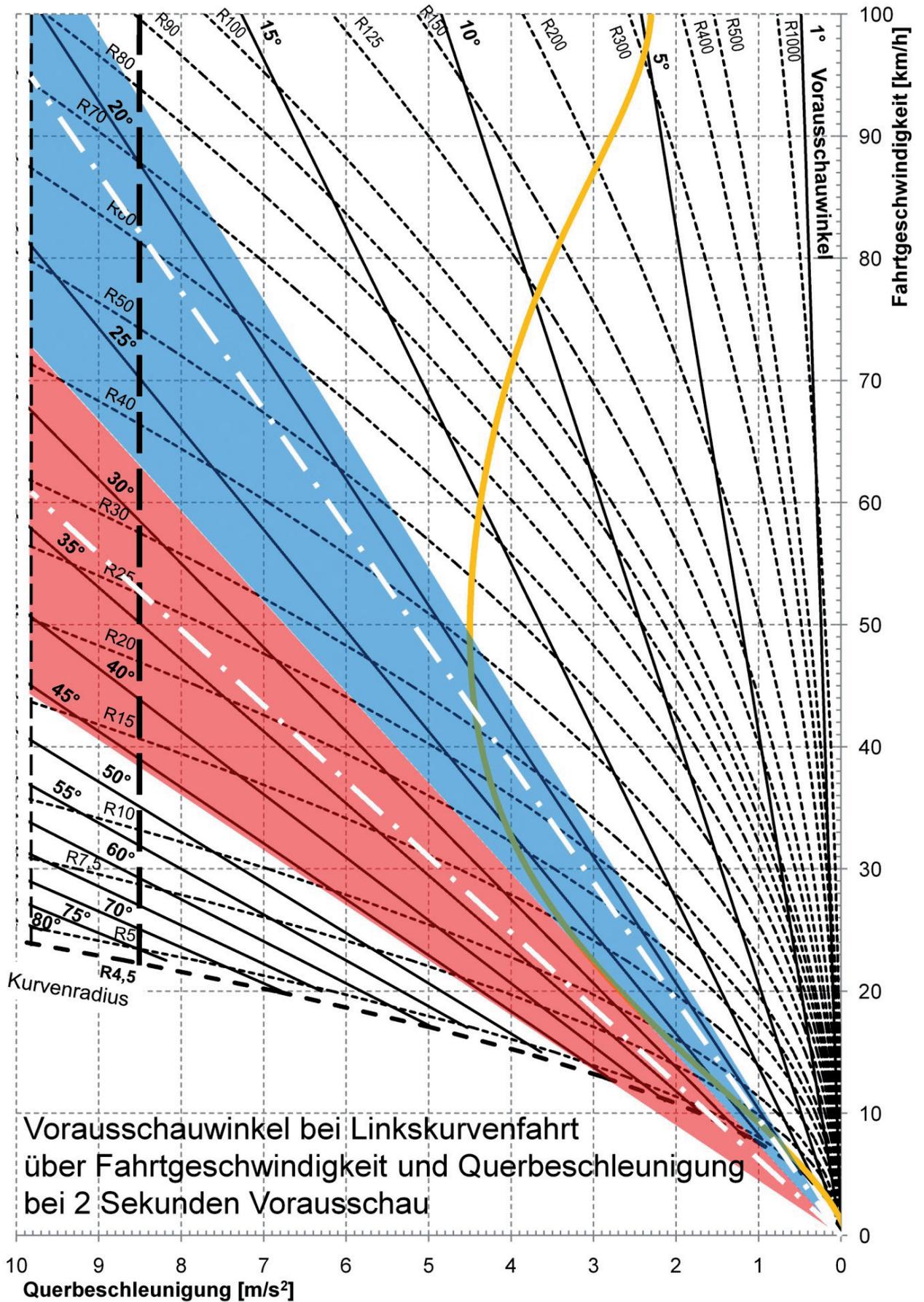
Ein Fahrzeug, das sich bei dynamischer Kurvenfahrt seinen Haftgrenzen nähert, respektive das ESP-System regelnd eingreift, befindet sich tendenziell weiter im linken Bereich des Diagramms. Dabei wird auch ersichtlich, dass besonders im unteren Geschwindigkeitsbereich in engen Kurven oder Abbiegungen bereits für den Normalfahrer eine A-Säulenposition erst ab ca. 28° zur Fahrermitte als verdeckungsfrei gelten kann.

In Abbildung 5-23 sind im Diagramm ergänzend zur Vorausschau die Sichtverdeckungswinkel der linken A-Säule eines BMW 6er (Cabriolet) [E64] eingetragen. Dieser Fahrzeugtyp bildet das Mock-up im Fahrsimulator des LfE. Der monokulare Verdeckungswinkel, gemessen vom SAE-Augpunkt, reicht von $21,7^\circ$ bis $32,9^\circ$ Grad. Diese Nominalgrenzen des Verdeckungsbereiches sind mit den weißen strichpunktieren Linien markiert. Die Darstellungsform weist für die linke A-Säule eine Analogie zu den sogenannten Tortendiagrammen auf (vgl. Abbildung 3-15 Kapitel 3.3.3).

Die Verdeckungswinkel realer Fahrer weichen aufgrund der individuellen Sitzpositionen im Fahrzeug deutlich von diesem Nominalwert ab. Der monokulare Sichtverdeckungswinkel einer kleinen Frau (5.% Körperhöhe, mittlere Proportion, Bezugsjahr 2009) wurde mit Hilfe einer RAMSIS-Insassensimulation im Bereich von $28,2^\circ$ bis $45,8^\circ$ ermittelt und ist im Diagramm rot hinterlegt. Der monokulare Sichtverdeckungswinkel eines großen Mannes (95.% Körperhöhe, mittlere Proportion, Bezugsjahr 2009) wurde mit RAMSIS im CAD-Modell dieses Fahrzeugs im Bereich von $19,4^\circ$ bis $28,2^\circ$ analysiert und ist im Diagramm blau hinterlegt. Zufällig schließen in diesem Beispiel die Sichtverdeckungsgrenzen der beiden Auslegungspersentile für die ergonomische Auslegung aneinander an. Unter anderen geometrischen Verhältnissen kann es zu einer teilweisen Überlagerung oder zu einer Lücke zwischen diesen Verdeckungsbereichen kommen.

← Vorhergehende Seite:

Abbildung 5-22: Darstellung des Zusammenhangs zwischen Fahrtgeschwindigkeit (Abszisse), Querbeschleunigung (Ordinate nach links), Vorausschauwinkel (durchgezogene gerade Linien) und Kurvenradius (gestrichelte gekrümmte Linie); orange: Komfortgrenze der maximal akzeptierten Beschleunigung von Normalfahrern





Die im Diagramm keilförmig vom Ursprung ausgehenden Verdeckungszone gliedern somit den Sichtbereich des Fahrers in drei Bereiche:

- Der Bereich rechts der jeweiligen Verdeckungszone stellt den Sichtbereich durch die Frontscheibe dar.
- Der Bereich der jeweiligen Verdeckungszone repräsentiert den aus der Fahrhaltung durch die A-Säule verdeckten Bereich der Straße.
- Der Bereich links der Verdeckungszone kann durch die fahrerseitige Seitenscheibe eingesehen werden.

5.5.4 Einfluss von Fahrergröße und A-Säulen-Position auf den Vorausschauwinkel

Die Analyse der Diagrammdarstellung verdeutlicht drei charakteristische Sachverhalte des Verdeckungswinkels:

- Die durch die A-Säule verdeckten Zonen in den zu beobachtenden Vorausschaubereichen werden mit zunehmender Fahrtgeschwindigkeit größer. Die sich darin befindlichen Objekte werden jedoch mit zunehmender Distanz perspektivisch kleiner. Das bedeutet, dass die Wahrscheinlichkeit, also das Risiko, dass Objekte verdeckt werden, mit größerer Geschwindigkeit stark anwächst.
- Die Sichtverdeckung ist für kleine Personen, bzw. Personen mit kürzeren Beinen grundsätzlich größer, da sie näher an der A-Säule sitzen und damit die Säule perspektivisch stärker abdeckt als bei großen Personen bzw. Personen mit längeren Beinen. Für die vorliegende, nicht ungewöhnliche Konstellation ist die Sichtverdeckung der kleinen Frau um 57% größer als der Referenzwert der monokularen Sichtverdeckung und 100% größer als die des großen Mannes.

← Vorhergehende Seite:

Abbildung 5-23: A-Säulen-Verdeckungswinkel im Bereich der Kurvenvorausschau: blau → Verdeckung vom Augpunkt großer Mann; rot → Verdeckung vom Augpunkt kleine Frau; strichpunktiert: Nominalwert BMW 6er [E64] vom Standardaugpunkt 635 mm über dem R-Punkt



Diese größere Verdeckung hat in der Praxis einen deutlich nachteiligen Effekt auf die Sicht in den Verkehr. Aufgrund der nichtlinearen Skalierung der Verdeckungswinkel im Diagramm sind diese großen Unterschiede erst durch Ablesen und den Vergleich der Skalenwerte erkennbar.

- Die Position der Säulenverdeckung im Sichtfeld kleiner Personen liegt relativ zum Augpunkt weiter außen als dies bei großen Personen der Fall ist. Dies resultiert aus der weiter vorne liegenden Sitz- und Augpunktposition gegenüber den größeren Fahrern. Aus dem Diagramm ist außerdem abzulesen, dass bei einer tendenziell dynamischen Fahrzeugführung in Kurven und beim Abbiegen großgewachsene Fahrer sogar gezwungen sind, in Linkskurven durch die Seitenscheibe auf die Fahrbahn zu blicken. Aus diesem Aspekt heraus ist die engere Winkelposition großer Personen nachteilig zu bewerten, da die Sichtbeeinträchtigung nicht nur in sehr engen Kurven mit kleinen Radien, sondern auch bei größeren Kurvenradien, langsameren Geschwindigkeiten als bei kleineren Personen und dadurch im Verkehrsalltag erheblich häufiger eintritt.

So ist zusammenzufassen, dass der horizontale Blickwinkel des Sichtstrahls des Fahrers im Wesentlichen abhängig ist von der Fahrgeschwindigkeit und des Kurvenradius der Straße, somit also dem jeweiligen Fahrstil, der die persönlich präferierte Querbeschleunigung prägt.

Die entstehenden Sichtbehinderungen durch die A-Säule sind nicht nur bestimmt durch die jeweiligen der Fahrzeuggestaltung, sondern werden auch erheblich durch die individuelle Augpunktlage, bedingt durch die körpermaßabhängige Sitzposition, beeinflusst. Kleinere Fahrer erleben dadurch größere Verdeckungszonen, größere Fahrer werden dagegen häufiger mit dem Verdeckungseffekt konfrontiert.



5.6 Zusammenhang von Fahrzeuggeometrie und kombinierter Fahrgeschwindigkeit auf die Sichteinschränkungen im Kreuzungsverkehr

Während bei der Vorausschau des Fahrers für die Bahnführungsaufgabe die fahrerseitige (bei linksgesteuerten Fahrzeugen linke) A-Säule einen störenden Effekt aufweist, ist die Position der beifahrerseitigen (bei linksgesteuerten Fahrzeugen rechten) A-Säule in der Regel kein Sichthindernis bei der Vorausschau der eigenen Bahnführung.

5.6.1 Sichtverdeckung bei der Annäherung an Kreuzungen

Im Bereich von Knotenpunkten, also Straßenkreuzungen und -einmündungen, können beide A-Säulen Verdeckungen im Verkehr bewirken. Bei der Beobachtung der kreuzenden Straße entsteht so ein nicht einsehbarer Bereich. Dieser Verdeckungsbereich der Straße ist auf der beifahrerseitigen A-Säule aufgrund der größeren Distanz zum Fahrerraum kleiner als auf der Fahrerseite. Die Größe des Verdeckungswinkels beifahrerseitig beträgt etwa 65-90% des Winkels auf der Fahrerseite. Abbildung 5-24 zeigt diese Möglichkeiten der Sichtverdeckung.

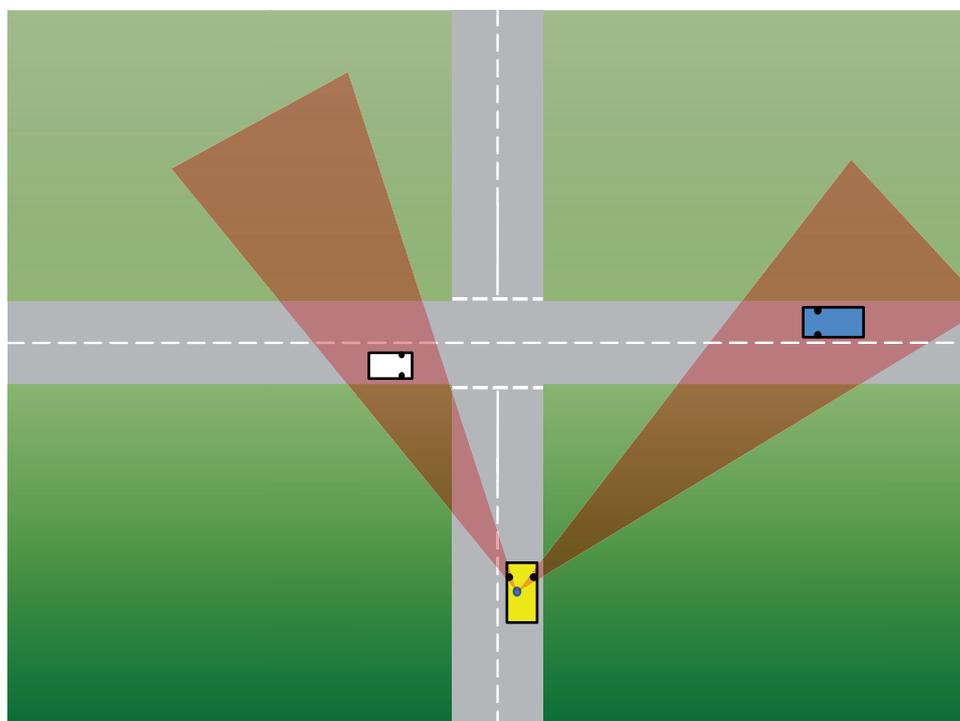


Abbildung 5-24: Kreuzungsannäherung mit Querverkehr im Verdeckungsbereich der A-Säule



Bei einer Beobachtung des Querverkehrs im Stillstand des eigenen Fahrzeugs in senkrechter Position zur Querstraße sind die Verdeckungswinkel zumeist auf beiden Seiten unkritisch, weil sie nur einen Teil der Querstraße verdecken und näherkommende Fahrzeuge sich nur kurzzeitig im Sichtschatten der A-Säule befinden können. Somit reicht eine genügend lange oder wiederholte Beobachtungsphase im Stillstand des Fahrzeugs aus, um annähernde Fahrzeuge entdecken zu können. Dieser Sachverhalt verändert sich wesentlich, wenn die Beobachtung der Querstraße schon während der Annäherung, also in der Bewegung des eigenen Fahrzeugs stattfindet. So ist zu erwarten, dass der Fahrer die von ihm beobachtete Verkehrssituation in gleicher Weise, wie bei stehendem Fahrzeug, interpretiert. Dieser Logik folgend erwartet er, dass sich ein annäherndes Fahrzeug bei ausreichend langer oder ausreichend häufiger Beobachtung aus dem Sichtschatten herausräte und er es entdeckte. Die tatsächliche Situation kann jedoch vollständig von dieser Erwartung abweichen. Die länger andauernde oder mehrfache Beobachtung des kreuzenden Straßenbereiches garantiert nämlich keineswegs, ein annäherndes Fahrzeug im Querverkehr zu entdecken!

Es kann bei der Beobachtung während der Annäherung an eine Kreuzung der Fall eintreten, dass sich ein Fahrzeug bereits im Verdeckungswinkel befindet und dort auch über eine längere Zeit verbleibt (Forbes 1970, Pflieger 2003, Glaser 2008).

Dieser Fall tritt ein, wenn zwei geometrische Bedingungen erfüllt sind:

1. Der Abstand der beiden Fahrzeuge zur Kreuzung muss in einem Verhältnis stehen, wie der Tangens des Winkels der A-Säulen-Position zum Fahrerauge.
2. Das Verhältnis der Geschwindigkeiten der beiden Fahrzeuge muss ebenfalls im Zahlenverhältnis zueinander stehen, wie der Tangens des A-Säulenwinkels.

Dieses Zusammenwirken geometrischer und dynamischer Größen zweier Fahrzeuge hat im Straßenverkehr und in der Fahrausbildung dazu keinen Bekanntheitsgrad. In der Seefahrt, Luftfahrt und Raumfahrt dagegen ist diese Konstellation eine wichtige Größe, die in der Schulung von Fahrzeugführern aktiv vermittelt wird. Sie wird als ‚Stehende Peilung‘ bezeichnet und definiert bei Annäherung zweier Fahrzeuge ihren Kollisionskurs (engl.: constant bearing & decreasing range)! Die Verwendung dieses Begriffes in der Kommunikation von Schiffs- oder auch Luftfahrzeugführung gilt als



Alarmierung einer Situation höchster Gefahr. Der Fahrzeugführer des kurshaltepflichtigen Fahrzeugs reagiert notfalls darauf mit einem „Manöver des letzten Augenblicks“, also einem sofortigen Ausweichmanöver auf Parallelkurs des kreuzenden, eigentlich ausweichpflichtigen Fahrzeugs. Diese Verhaltensweise wird im Straßenverkehr nicht geschult, da sie trotz Kollisionsvermeidung zumeist zum Abkommen von der Straße führen würde. Allerdings ist nicht einzusehen, dass die Beobachtung zur Entdeckung einer solch konflikträchtigen Konstellation nicht in der Straßenverkehrsausbildung berücksichtigt wird.

5.6.2 Rechenbeispiel für kombinierte Annäherungen

Bei einer Annäherung eines Pkw an eine Kreuzung mit einer Ausgangsgeschwindigkeit von 80 km/h muss ein Fahrer in einem Abstand von 123,5 m mit seiner Verzögerung beginnen, wenn er beispielsweise mit 2 m/s^2 verzögern wird, um an der Kreuzung anzuhalten. Bei einer Ausgangsgeschwindigkeit von 100 km/h und einer Verzögerung von 3 m/s^2 liegt der Abstand mit 128 m nur geringfügig höher. Sollte der Fahrer bereits mit der Distanz von 120-130 m auch mit der Beobachtung der Querstraße beginnen, so beträgt die Länge des Sichtschattens der A-Säulen seines Fahrzeugs (hier: BMW 6er Cabrio [E64]) auf der Querstraße auf der Fahrerseite 32 m, also je nach Abmessungen des Pkw 6-8 Fahrzeuglängen, aufgrund $11,2^\circ$ Verdeckungswinkel. Auf der Beifahrerseite beträgt die Länge sogar 65 m, also 13-16 Fahrzeuglängen, aufgrund $6,5^\circ$ Verdeckungswinkel. Diese Größenverhältnisse sind in der Abbildung 5-25 wiedergegeben.

Die Häufigkeit, in der sich ein Fahrzeug im Sichtschatten des Verdeckungswinkels befindet, ist gleich der Verkehrsdichte [Fz./km] multipliziert mit der effektiven Schattenbreite [km]. Die effektive Schattenbreite ergibt sich aus der Schattenbreite minus der Länge des verdeckten Fahrzeuges (z.B. VW Golf: 4,2 m).

Die durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke (DTV) einer deutschen Bundesstraße beträgt 9160 Fz./24h oder ca. 382 Fz./h. (Straßenbaubericht 2006) Bei einer durchschnittlichen Fahrtgeschwindigkeit des Verkehrs auf der Vorfahrtstraße von 80 km/h folgen die Fahrzeuge in einem Abstand von 9,4 Sekunden oder 209 m. Daraus ergibt sich für die rechte A-Säule eine Verdeckungshäufigkeit von $\frac{65 \text{ m}}{209 \text{ m}} = 0,31$. Das bedeutet in dieser theoretischen Betrachtung, dass statistisch immerhin bei rund jeder drit-

ten Kreuzungsannäherung an eine Bundesstraße in der Erstbeobachtung im Abstand von 125-130 m eine Sichtschattenverdeckung eintritt!

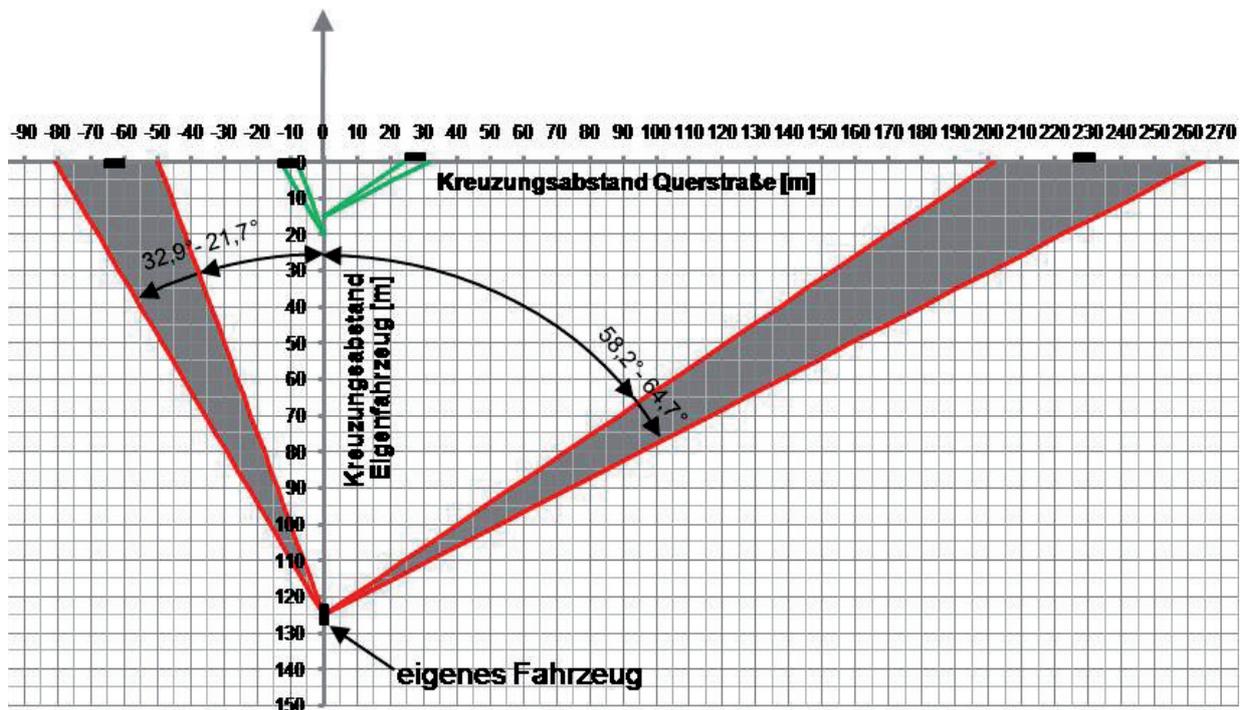


Abbildung 5-25: Geometrische Situation der Kreuzungsannäherung mit den A-Säulen-Verhältnissen eines BMW 6er [E64] bei 80km/h

Damit die Sichtverdeckung anhält muss aber auch das zweite Kriterium der Geschwindigkeitspaarung erfüllt sein. Der konkrete kritische Geschwindigkeitsbereich des Querverkehrs von rechts müsste für den A-Säulenwinkel von $58,2^{\circ}$ - $64,7^{\circ}$ bei immerhin 130-170 km/h liegen, wenn die eigene Annäherungsgeschwindigkeit bei 80km/h liegt. Nähert sich jedoch ein solch schnelles Fahrzeug in dieser Situation der Kreuzung und verzögert dieses Fahrzeug mit $3,25$ - $4,25$ m/s² aufgrund seiner hohen Geschwindigkeit entsprechend stark, beispielsweise weil der Fahrer an der Kreuzung abbiegen möchte oder weil vor der Kreuzung ein Verkehrszeichen die Geschwindigkeit beschränkte, so bliebe dieses Fahrzeug tatsächlich die ganze Zeit über im Sichtschatten des eigenen Fahrzeugs. Erst in einem Abstand von 15 m vor der Kreuzung würde die Silhouette des Fahrzeugs perspektivisch so weit anwachsen, dass es über den Sichtschatten der Säule hinauswächst und aus der Perspektive des Fahrers wahrgenommen werden kann! Eine Häufigkeit des Auftretens dieser Ausgangsgeschwindigkeit in Verbindung mit einer entsprechenden Verzögerung kann leider nicht



quantifiziert werden, weil das Verzögerungsverhalten von Fahrern in einer solchen Annäherungssituation im Straßenverkehr nicht bekannt ist.

Für die linke A-Säule ergibt sich eine Verdeckungshäufigkeit von 0,14 Fahrzeugen. Hier tritt also etwa jedes siebte Mal ein Fahrzeug bei der Annäherung an eine Bundesstraße im Sichtschatten der linken A-Säule.

Die Erfüllung des zweiten Kriteriums für den Verbleib im Sichtschatten ist auf der linken Seite mit einer moderaten Geschwindigkeit von 33 bis 50 km /h gegeben. Die erforderliche Verzögerung beträgt aufgrund des A-Säulenwinkels von $21,7^\circ$ - $32,9^\circ$ auch nur 0,8 bis $1,26 \text{ m/s}^2$. Auf der linken Seite wächst das Fahrzeug bei ca. 20 m eigener Distanz zur Kreuzung über den Schatten der A-Säule hinaus und ist dadurch sichtbar.

Für unser Beispielfahrzeug des BMW 6er Cabrio gilt also:

Während ein sich von rechts annäherndes Fahrzeug übermäßig schnell sein muss und stark verzögert, um tatsächlich zu einem Konflikt zu führen, so ist die Annäherung des linken Fahrzeuges hier überaus moderat und eher für ein Fahrzeug mit beschränkter Höchstgeschwindigkeit (z.B. Kleinkraftrad auch Fahrrad) anzunehmen.

Barnoski et al. (1970) erarbeiteten bereits basierend auf der Auftretenswahrscheinlichkeit von Verkehrsobjekten für die Projektion der Rundumsicht (vgl. Abbildung 4-27) eine Maßzahl, die Figure of Merit (FOM), für eine sichtoptimale Gestaltung der Karosserie. Dieses Bewertungsverfahren wurde in der Folgezeit nicht weiter aufgegriffen.

5.6.3 Allgemeiner Zusammenhang der Annäherung in stehender Peilung

Die vorher genannten Zahlenverhältnisse sind für eine Sichtschattenverdeckung der nominalen A-Säulenpositionen eines BMW 6er Cabrio errechnet. Für Fahrzeuge mit anderen A-Säulenpositionen ergeben sich andere Positions-, Geschwindigkeits- und Verzögerungsgrößen. Die prinzipielle Abhängigkeit der Geschwindigkeits- und Verzögerungsverhältnisse bei der Kreuzungsannäherung von der Säulenposition zum Fahrerraum ist in Abbildung 5-26 dargestellt. Für jede Winkellage der A-Säulen, sowohl auf der Fahrerseite als auch auf der Beifahrerseite besteht ein fester Zusam-



menhang für die Positions-, Geschwindigkeits- und Verzögerungsverhältnisse des Fahrzeugs zum Querverkehr. Beide Achsen des Diagramms sind dreifach beschriftet. Während die erste, rote Skala sowohl für die Entfernungspaarungen in m als auch für die Geschwindigkeitspaarungen in km/h verwendet werden kann, stellt die zweite, blaue Skala die Verzögerungspaarungen in m/s^2 dar. Der Bereich der physikalisch möglichen Verzögerungen bis ca. $9,81 \text{ m/s}^2$ sind in der Diagrammfläche blau hinterlegt. Für eine jede Konstellation der stehenden Peilung müssen die Paarungen der drei Fahrzeuge hinsichtlich Position, Geschwindigkeit und Verzögerung nicht notwendigerweise in einem Punkt des Diagramms zusammentreffen. Es genügt, wenn die drei Paarungen der Größen Position, Geschwindigkeit und Verzögerung jeweils im Bereich der Winkellagen der A-Säulen des jeweiligen Fahrzeuges liegen.

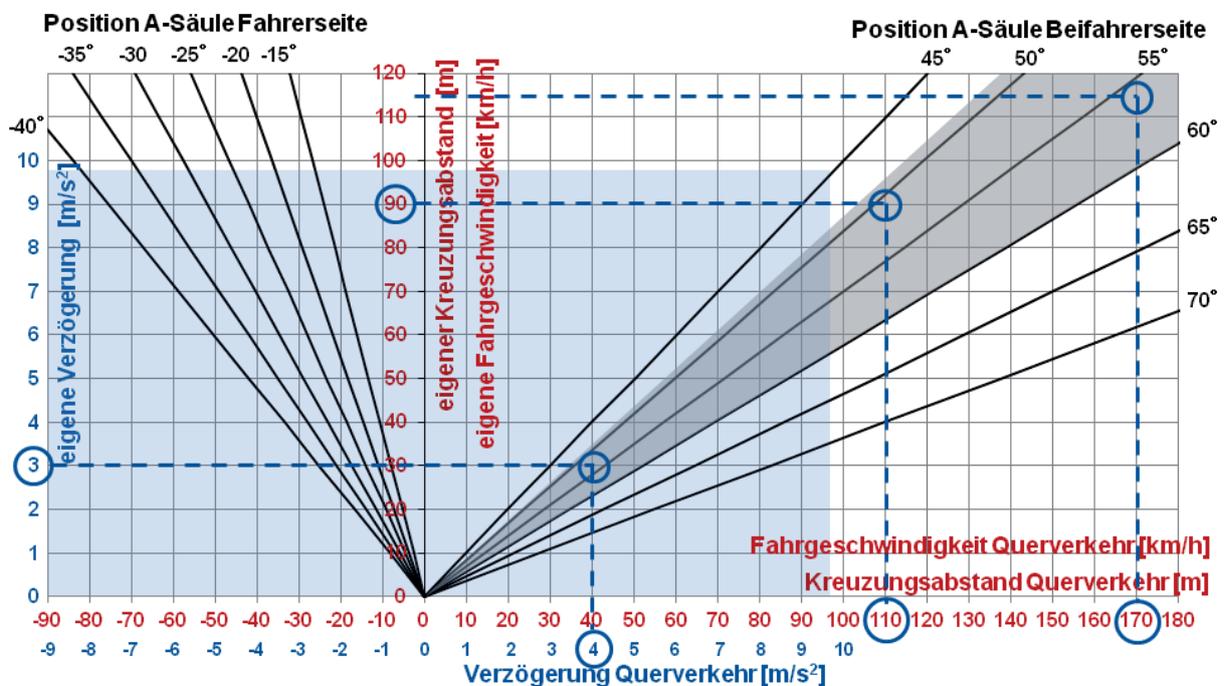


Abbildung 5-26: Darstellung der kritischen Positions-, Geschwindigkeits- und Verzögerungsverhältnisse in ‚Stehender Peilung‘ in Abhängigkeit der A-Säulen-Position

Die Winkellagen sind in Fünf-Grad-Schritten dargestellt. Zwischenwerte können einfach interpoliert werden. Die durchgehenden Winkellinien verdeutlichen, dass für jede Position, jede Geschwindigkeit und jede Verzögerung jeweils ein komplementärer Wert und eine Kombinationen der drei Größen existieren, in dem sich der mögliche Kollisionspartner ungesehen annähern kann!



Ein Ablesebeispiel dreier kombinierter Wertepaare ist im Diagramm mit gestrichelten Linien markiert:

- Die eigene Position liegt in 115 m Abstand des Kreuzungspunktes. Die Position eines von rechts annähernden Fahrzeugs auf der Querstraße ist 170 m von diesem Punkt entfernt. Die Position des querenden Fahrzeugs liegt in einer Peilung von $\arctan\left(\frac{170m}{115m}\right) = 55,9^\circ$
- Die eigene Geschwindigkeit beträgt 90 km/h. Die des Fahrzeugs auf der Querstraße 110 km/h. Der ArcusTangens des Verhältnis der Geschwindigkeiten beträgt $\arctan\left(\frac{110 \text{ km/h}}{90 \text{ km/h}}\right) = 50,7^\circ$
- Das eigene Fahrzeug verzögert mit 3 m/sec^2 . Das andere Fahrzeug mit 4 m/sec^2 . Der ArcusTangens des Verhältnis der Beschleunigungen beträgt $\arctan\left(\frac{4 \text{ m/sec}^2}{3 \text{ m/sec}^2}\right) = 53,1^\circ$
- Alle drei Winkelverhältnisse liegen bei diesem Beispiel (SEAT Altea) innerhalb des Verdeckungswinkels der rechten A-Säule des eigenen Fahrzeugs, der in diesem Beispiel von 49° bis 60° reicht und als Sektor im Diagramm dunkel hinterlegt ist.

Solange der ArcusTangens des Verhältnisses der Verzögerungen beider Fahrzeuge innerhalb des verdeckten Winkelsektors bleibt, so werden auch das Verhältnis der Geschwindigkeiten und das der relativen Positionen dort verbleiben. Das bedeutet, dass das Fahrzeug auf der Querstraße über den gesamten Annäherungsverlauf durch die rechte A-Säule des eigenen Fahrzeuges verdeckt bleibt und deshalb mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht entdeckt wird.

Für eine A-Säulenposition, die weiter vorne liegt als in unserem Beispielfahrzeug BMW 6er, sind die kritischen Werte für Position, Geschwindigkeit und Verzögerung für die ‚Stehende Peilung‘ entsprechend niedriger und treffen dadurch im alltäglichen Verkehrsgeschehen häufiger ein. Man kann in diesem Fall deshalb von einer höheren Wahrscheinlichkeit einer Sichtverdeckung für die Fahrer dieser Fahrzeuge ausgehen. Diese Situation trifft besonders für Fahrzeuge im One-Box-Design, also Vans und sogenannte Micro- und Minivans (z.B. SEAT Altea), oder für Fahrzeuge im Cab-forward-Design (z.B. VW New Beetle), also einer weit vorne positionierten Fahrgastzelle zu.



Diese Gestaltungsvarianten der Karosserien besitzen sehr große Abstände von der Frontscheibe und somit auch von der A-Säule zum Fahrerauge. Das führt zwangsläufig zu einer weiter innen liegenden und damit gefährlicheren A-Säulen-Position als bei Limousinen und SUVs! Die Tabelle 5-27 zeigt das Spektrum der Positionen der A-Säulen mit ausgewählten Fahrzeugen als Beispiel. Im Winkelbereich von ca. 25° fahrerseitig links und 60° beifahrerseitig rechts enden die A-Säulen-Positionen von Fahrzeugen in ungünstiger Konstellation, während sie bei Fahrzeugen mit günstigerer Position in diesem Winkelbereich erst beginnen!

	A-Säule links außen	A-Säule links innen	Modell:	A-Säule rechts innen	A-Säule rechts außen
↓ A-Säulenlage besser	28°	17°	SEAT Altea '04	49°	60°
	25°	17°	VW New Beetle '99	47°	55°
	30°	20,5°	Ford C-Max [C214] '03	52,5°	61°
	32,9°	21,7°	BMW 6er Cabrio [E64] '04 *	58,2°	64,7°
	31,5°	22°	VW Golf V '03	54°	61,5°
	34°	23,5°	Audi A6 [C5] '04	57,5°	68°
	38°	25,5°	BMW 3er [E90] '05	61°	69°
	39°	25°	MB S-Klasse [W221] '06	60°	70°
	40,1°	29,4°	BMW X3 [E83] '05	60,5°	66,8°

*Tabelle 5-27: A-Säulen-Positionen ausgewählter Fahrzeuge
(Datenquelle: Autograph Dimensions GmbH, * LfE)*

Das Diagramm 5-28 verdeutlicht die wirksamen Verdeckungsweiten im Straßenverkehr durch die monokularen Verdeckungsweiten unterschiedlicher A-Säulen. Man kann daraus ablesen, dass beispielsweise eine A-Säule mit 12° Sichtverdeckung bereits in ca. 23 m Abstand vom Fahrerauge sogar einen Kastenwagen mit 5 m Fahrzeuglänge in Seitenansicht vollständig verdecken kann.

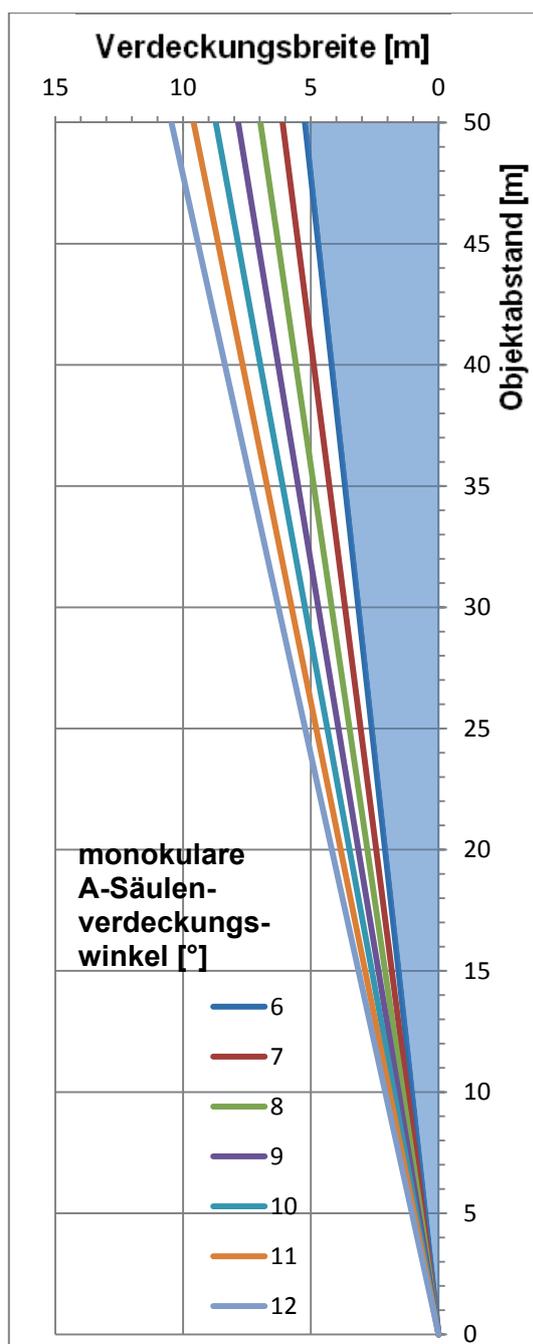


Diagramm 5-28:
 Sichtverdeckungsbreiten im Verkehr durch verschiedene A-Säulen-Verdeckungswinkel bei unterschiedlichem Objektstand

5.7 Analyse der Verschwenkungen der Blickachse

In Kapitel 5.5 wurden die Sichteffekte der Vorausschau in stationärer Linkskurvenfahrt hergeleitet und in Kapitel 5.6 das Phänomen der Stehenden Peilung bei Annäherung an eine Kreuzung erläutert. Ein weiterer Effekt der Sichtverdeckung durch die A-Säulen während eines Fahrverlaufes ist die Verschwenkung der Blickachse gegenüber der momentanen Ausrichtung des Fahrzeuges.



Wie in Kapitel 5.5.2 ausführlich hergeleitet, erfolgt der Sichtstrahl des Fahrers zu meist auf den antizipierten Fahrtverlauf des eigenen Fahrzeuges gerichtet, um die Regelaufgabe der Stabilisierung und Bahnführung durchzuführen. Bedingt durch die Kurvigkeit des vorausliegenden Streckenverlaufes ist der Sichtstrahl deshalb häufig gegenüber der aktuellen Richtung des eigenen Fahrzeuges seitlich ausgeschwenkt. Diese Verschwenkung des Sichtstrahls kann groß werden, wenn der Fahrer bei seiner Vorausschau in einen Streckenabschnitt blickt, der sich maßgeblich von dem Abschnitt unterscheidet, auf dem sich sein Fahrzeug gegenwärtig noch befindet. Solche Verhältnisse ergeben sich beispielsweise beim Zufahren von einer Geraden auf eine Kurve oder beim Durchfahren von Kurvenkombinationen im Wechsel von Rechts- und Linkskrümmungen. Diese Situationen sind beispielsweise auf kleinen Landstraßen anzutreffen, bei denen eine schwierige Topographie zu engen Kurvenverläufen zwingt. Sehr häufig existieren diese Situationen außerdem im urbanen Verkehr, nämlich bei Abbiegevorgängen und in Kreisverkehren. *Pfleger (2003)* beschreibt Linkskurvenfahrten in Radien von 20-25 m, die Sichtabschattungen der Fahrlinie über eine Länge von 20 m erzeugen.

Auf Basis von kinematischen Ablaufsimulationen, die im Rahmen dieser Arbeit durch *Kremser & Wendrinsky (2009)* im CAD-System CATIA erstellt wurden, können die Sichtverschwenkungen während dieser Fahrmanöver dargestellt werden. Da die Wiedergabe dieser dynamischen Abläufe in diesem Schriftdokument nicht möglich ist, werden sie hier in Form von Bildfolgen gezeigt. Dargestellt ist in den Abbildungen 5-29 bis 5-36 die Draufsicht einer Kreuzung während eines Linksabbiegevorganges. Das Fahrzeug nähert sich als punktförmiger Körper auf der Straße von links und ist nur durch die roten keilförmigen Sichtschatten seiner A-Säulen repräsentiert. Das Blickfeld des Fahrers wird durch den gelblichen Keil dargestellt. Der Bereich der Streckenvorausschau von 2-3 Sekunden ist innerhalb der Keile durch eine dunklere Zone markiert. Der Abstand zum Fahrzeug verändert sich mit der Veränderung der Fahrgeschwindigkeit während des Abbiegevorganges. Der hier wiedergegebene Fahrtablauf beginnt mit 50 km/h. Das Fahrzeug verzögert 2,2 s lang über eine Strecke von 33 m mit 3 m/s^2 um eine Kurvengeschwindigkeit von 21,4 km/h zu erreichen. Dabei verspürt der Fahrer in der Kurvenfahrt im minimalen Radius von 14,2 m eine etwas sportliche Querschleunigung von 4 m/s^2 . Nach dem Abbiegen beschleunigt das Fahrzeug wieder mit 2 m/s^2 bis zu einer Geschwindigkeit von 50 km/h. Die Bild-



folge zeigt die Annäherung (Abbildungen 5-29 und 5-30), das Einblicken in die Abbiegung (Abbildungen 5-31 und 5-32), das Durchfahren der Kurve (Abbildungen 5-33 und 5-34) und das Ausfahren aus der Kurve in die Gerade (Abbildungen 5-35 und 5-36). Zusätzlich sind hier noch zwei stehende Verkehrsobjekte (blau) eingezeichnet, die in dieser Analyse nicht von Bedeutung sind.

In den Abbildungen ist sehr deutlich zu erkennen, wie das gelblich markierte Blickfeld zu den rot markierten fahrzeugfesten A-Säulenverdeckungsbereichen nach links schwenkt (Abbildungen 5-31 bis 5-33) und anschließend wieder zurückschwenkt (Abbildungen 5-34 bis 5-36). In den Abbildungen 5-33 und 5-34 blickt der Fahrer dabei durch die Seitenscheibe auf die Straße, um seine Fahrtstrecke einzusehen. In Abbildungen 5-32 sowie in der Phase zwischen den Abbildungen 5-34 und 5-35 ist sein Blickfeld durch die linke A-Säule seines Fahrzeugs gestört.

In dieser Simulation ist zu erkennen, dass über längere Phasen des Abbiegens wesentliche Bereiche der Kreuzung durch den Sichtschatten der A-Säule zeitweise verdeckt sind. Sogar die Beobachtung des unmittelbaren Streckenverlaufes (Abbildung 5-32) ist in der Phase, in der sich Fußgänger und Radfahrer in unmittelbarer Nähe befinden würden, für den Fahrer stark behindert. Vergleiche dazu auch Abbildung 5-45 in Kapitel 5.8.

Die Abbildungen 5-37 bis 5-44 zeigen in einer weiteren Bildfolge das Durchfahren eines Kreisverkehrs. Es handelt sich wiederum um eine Draufsicht auf den Knotenpunkt mit dem Fahrzeug als punktförmiges Objekt und den Sichtschatten und dem Blickfeld als vom Fahrer ausgehende Keile. Das Fahrzeug nähert sich dem Kreisverkehr mit 90 km/h, verzögert 6,4 s lang über 104 m mit 3 m/s^2 . Der Einfahrradius in der Zufahrt des Kreisverkehrs beträgt 23,75 m, der Radius in der Kreisspur 13,5 m. Die Fahrgeschwindigkeit im Kreisverkehr beträgt 21 km/h, so dass eine Querbewegungsbeschleunigung von lediglich $2,5 \text{ m/s}^2$ auf den Fahrer wirkt. Mit dem Ausfahren aus dem Kreisverkehr beschleunigt der Fahrer mit 2 m/s^2 . Die Bildfolge zeigt die Annäherung (Abbildungen 5-37), das Einblicken in die Abbiegung (Abbildung 5-38), das Einfahren (Abbildung 5-39), das Durchfahren (Abbildungen 5-40 bis 5-42), das Ausfahren (Abbildung 5-43) und das Weiterfahren auf der Geraden (Abbildung 5-44).

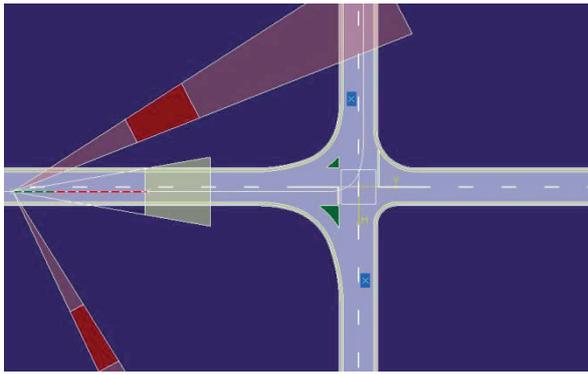


Abbildung 5-29

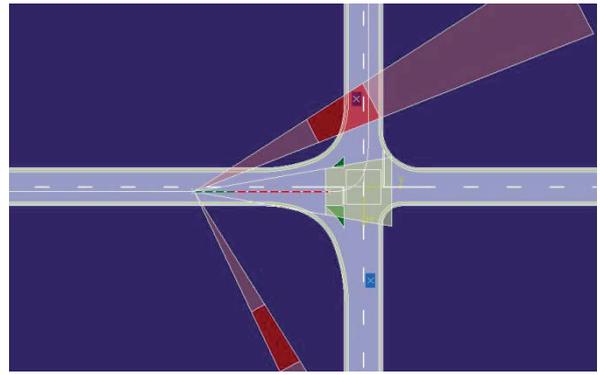


Abbildung 5-30

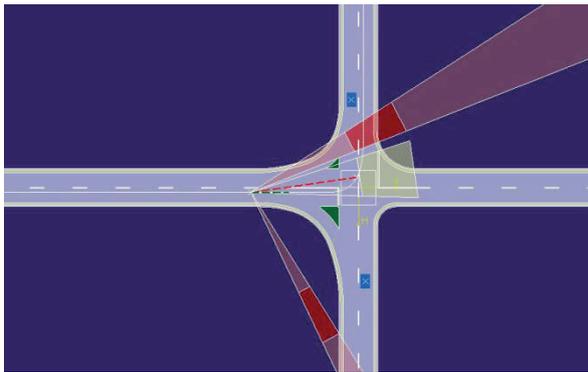


Abbildung 5-31

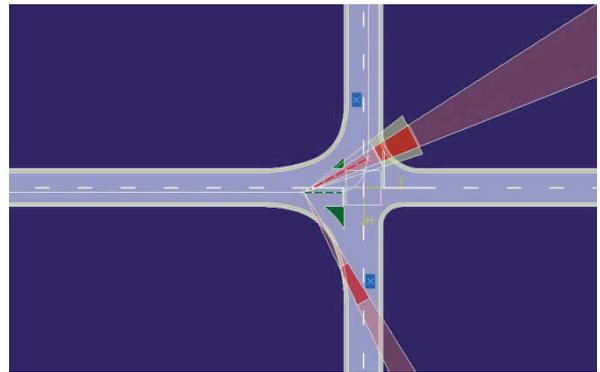


Abbildung 5-32

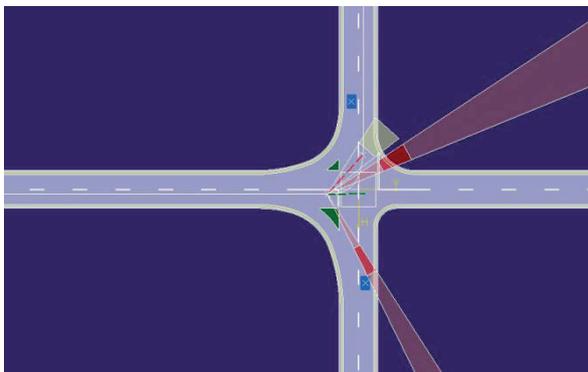


Abbildung 5-33

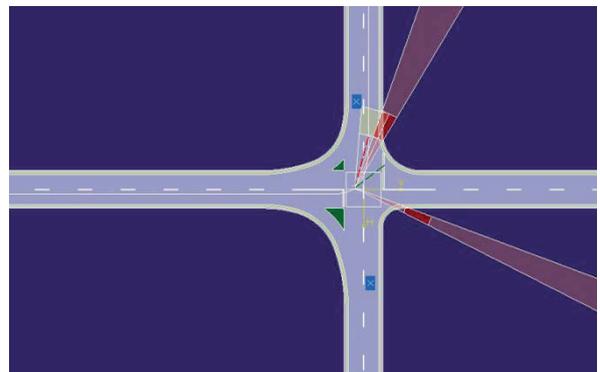


Abbildung 5-34



Abbildung 5-35



Abbildung 5-36



Die Analyse dieser Simulation offenbart zwei grundsätzliche Probleme des Knotentyps Kreisverkehr. Will ein Fahrer bei der Zufahrt auf einen Kreisverkehr flüssig einfahren, so muss er voraus kalkulieren, ob zum Zeitpunkt seines Einbiegens eine ausreichend große Lücke im Verkehrsstrom des Kreisverkehrs vorzufinden ist. Dazu beobachtet der Fahrer in der Vorausschau seinen eigenen zukünftigen Fahrtverlauf und muss nun zusätzlich den Bereich des Kreisverkehrs taxieren, von wo anderen Fahrzeuge auf denselben Abschnitt zufahren. Dies sind im Wesentlichen der Viertelkreisbogen, der vor der eigenen Einfahrt liegt, und die davor liegende Zufahrt. Diese Situation ist in Abbildung 5-38 erkennbar. Die Sicht auf diese beiden Bereiche wird jedoch von der eigenen A-Säule massiv behindert. Die Sichtbehinderung reduziert sich erst dadurch, dass das zufahrende Fahrzeug vor dem Kreisverkehr stark verlangsamt oder anhält. Dadurch wird der Verkehrsfluss deutlich reduziert und die Kapazität des Kreisverkehrs muss unter ihren Möglichkeiten bleiben, weil Lücken zum Einfahren nicht genutzt werden, da sie nicht gut genug einsehbar sind.

Das zweite, Prinzip bedingte Problem stellt die eigentliche Kreisfahrt im Kreisverkehr dar. Aufgrund der Notwendigkeit Kreisverkehre platzsparend zu konzipieren, erhalten Minikreisverkehre ohne Verkehrsinsel einen Spurkreisradius ab ca. 11 m, kleinere, einspurige Kreisverkehre einen Spurkreisradius ab ca. 20 m (Bondzio 2006).

Aus Abbildung 5-41 kann abgelesen werden, dass die Vorausschau in diesen Radien auch bei moderaten Querschleunigungen für viele Fahrzeuge voll im Sichtschatten der linken A-Säule liegt. Die Abbildungen 5-40 und 5-42 zeigen diese Situation in der Simulation ebenfalls. Das bedeutet auch, dass eine starke Verzögerung eines vorausfahrenden Fahrzeugs im Kreisverkehr schwierig zu erfassen ist, da sich dieses Fahrzeug bei vorgeschriebenem Sicherheitsabstand größtenteils im Sichtschatten der A-Säule befindet. Insgesamt ist festzustellen, dass die geometrischen Gestaltungen von Kreisverkehren und von A-Säulen aktueller Fahrzeuge derzeit nicht sicherheitskompatibel sind!

← *Vorhergehende Seite:*

Bildfolge 5-29 bis 5-36: Verschwenkung der Blickachse beim Abbiegen:

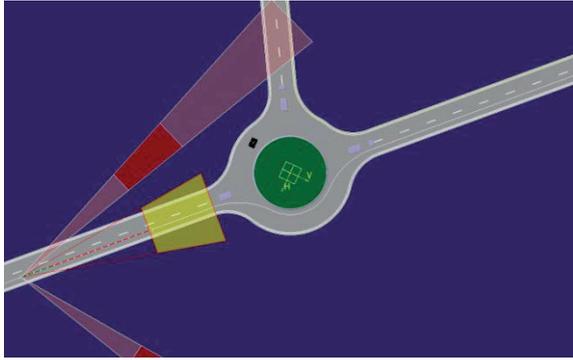


Abbildung 5-37

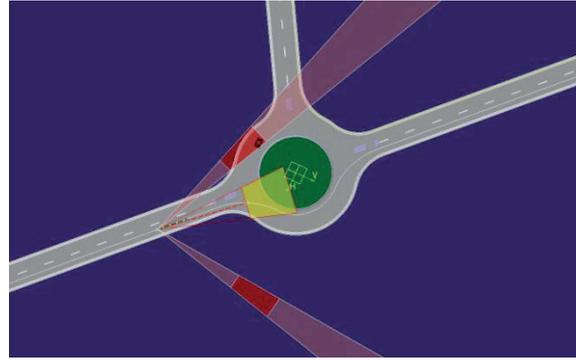


Abbildung 5-38

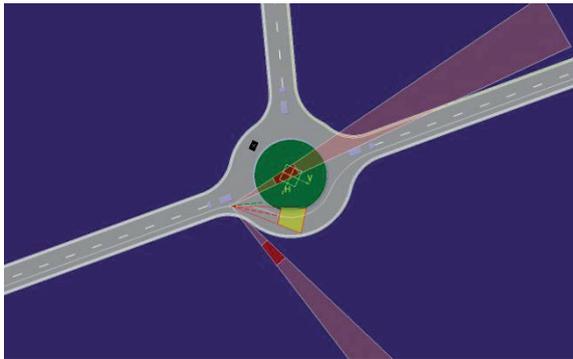


Abbildung 5-39

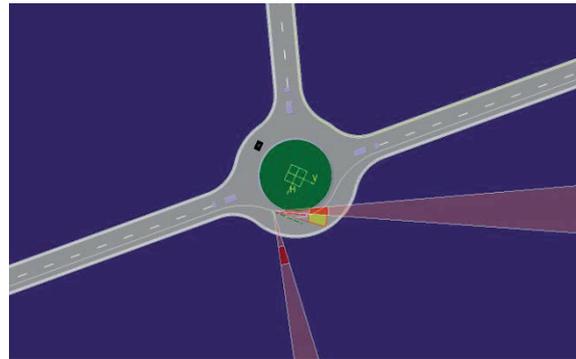


Abbildung 5-40

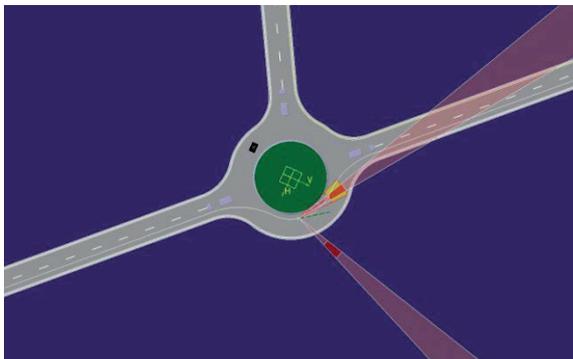


Abbildung 5-41

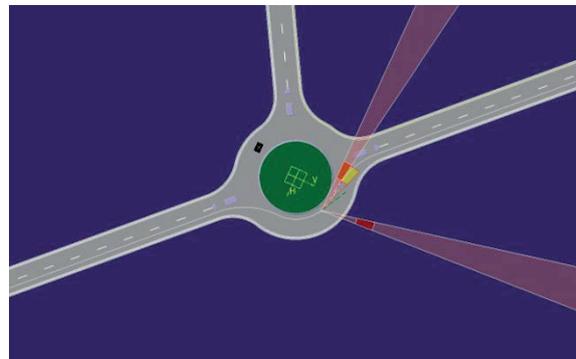


Abbildung 5-42

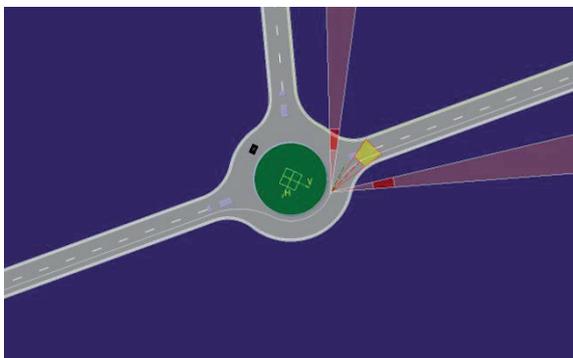


Abbildung 5-43

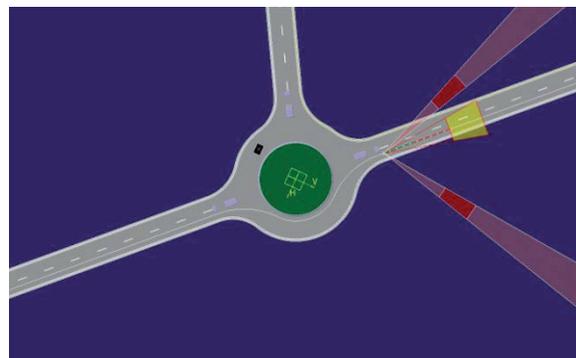


Abbildung 5-44



In diesen Ablaufsimulationen können die Eingangsparameter wie Geschwindigkeits- und Beschleunigungsgrößen, die Straßengeometrie und natürlich die A-Säulen-Positionen, beliebig modifiziert werden. Dadurch lassen sich auch besondere Konstellationen von speziellen Fahrzeugen und besonderen Knotenpunkten in bestimmten Fahrabläufen untersuchen. Solche Analysen ließen sich mit bestehenden Simulationsprogrammen für Unfallrekonstruktionen wie beispielsweise PC-Crash, Vista FX3, Aras 360 oder Crash Zone sehr anschaulich durchführen, wenn darin die Sichtverdeckungsgebiete der Säulenpositionen ergänzt würden. Damit wäre es einerseits leichter möglich, kritische Sichtverdeckungen als Unfallursache zu entdecken. Andererseits könnten außerdem systematisch Knotenpunkte von Straßen auf ihre Sichtkritikalität bei der Annäherung analysiert werden. Durch eine solche Simulation könnte eine Software zur Unfallrekonstruktion bereits als Vorsorgemaßnahme eingesetzt werden.

Eine weitere Möglichkeit zur unmittelbaren Analyse von Sichtverdeckungen der A-Säulen ist die numerische Auswertung von fahrdynamischen Daten. Aus der Kenntnis der tatsächlichen Geschwindigkeit und der Gierbewegung eines Fahrzeugs und der Streckenführung kann der horizontale Vorausschauwinkel des Fahrers errechnet und mit der A-Säulen-Position des Fahrzeugs verglichen werden. Häufigkeit und Dauer der Sichtkonflikte während einer Fahrt lassen sich dadurch dokumentieren. Diese Möglichkeit besteht zum einen in der nachträglichen Auswertung einer Fahrt mit der Aufzeichnung von Geschwindigkeit und Gierbewegung bzw. Querbewegung. Damit könnte eine fahrerspezifische, eine fahrzeugspezifische oder eine streckenspezifische Sichtverdeckungsrate ermittelt werden.

Zum anderen ist sogar eine Echtzeitauswertung während der Fahrt möglich, wenn die Streckenvorausschau eines Navigationssystems genutzt würde, um den aktuellen mutmaßlichen Vorausschauwinkel des Fahrers zu bestimmen. Unter Nutzung dieser Möglichkeit ließen sich fahrerunterstützende Warnungen geben oder seitens des Fahrzeugs automatisch die Geschwindigkeit dynamisch limitieren. Somit könnte die Gefahr des Übersehens wichtiger Objekte aufgrund einer Sichtverdeckung durch die A-Säulen reduziert bzw. sogar vermieden werden.

← *Vorhergehende Seite:*

Bildfolge 5-37 bis 5-44: Verschwenkung der Blickachse bei Kreisverkehrsdurchfahrt



5.8 Verdeckungssituationen an Knotenpunkten

Die theoretischen Betrachtungen der dynamischen Sichtverdeckung durch die A-Säulen in Kapitel 5.5 und 5.6, nämlich die der Streckenvorausschau in Linkskurvenfahrten und die der Verdeckung des Querverkehrs an Kreuzungen stellen nur beispielhaft die plakativsten Verkehrssituationen für die Verdeckungsproblematiken dar. In Verkehrssituationen an Knotenpunkten, besonders im städtischen Umfeld, existieren eine Reihe von weiteren Verdeckungsproblemen durch die A-Säulen des Fahrzeugs. Diese können sowohl durch dynamische Verdeckungseffekte, vergleichbar den vorgestellten Beispielen, als auch durch statische Verdeckungen oder aber durch eine Kombination bzw. Übergangssituation von statischen und dynamischen Situationen entstehen. Sie sind im Folgenden aufgeführt:

- Kreuzen oder Einbiegen an einer Querstraße
Das eigene Fahrzeug steht in stumpfwinkliger Halteposition zur Querstraße. Dadurch verdeckt eine der A-Säulen (sowohl rechts als auch links möglich) die in dieser Richtung verlaufende Querstraße. Die Verkehrsbeobachtung ist deutlich erschwert und gelingt nur mittels einer wesentlichen Positionsverlagerung von Kopf und Oberkörper des Fahrers. Diese Situation tritt bei stumpfwinkligem Zusammentreffen zweier Straßen in der Halteposition auf oder auch kurzzeitig während jedes Einbiegens mit sehr kleinem Radius aus einer Ausfahrt in eine Querstraße.
- Kreuzen oder Einbiegen an einer mehrspurigen Kreuzung
In Kreuzungen mit mehreren Fahrspuren für jede Fahrtrichtung können aufgrund der geometrischen Bedingungen der Kreuzungsdimension und der eigenen A-Säulen-Position, haltende Fahrzeuge durch die eigene linke fahrerseitige A-Säule verdeckt werden. Diese Fahrzeuge befinden sich entweder im Bereich hinter deren Haltelinie der Querstraße oder auch in Linksabbiegerposition der entgegenkommenden Fahrtrichtung. Bei den Übergangsphasen der Vorfahrtsberechtigung, also wenn man bei grünem Ampelzeichen selbst in die Kreuzung einfahren darf, entsteht die Gefahr diese Fahrzeuge zu übersehen, die gleichzeitig die Kreuzung freimachen wollen.

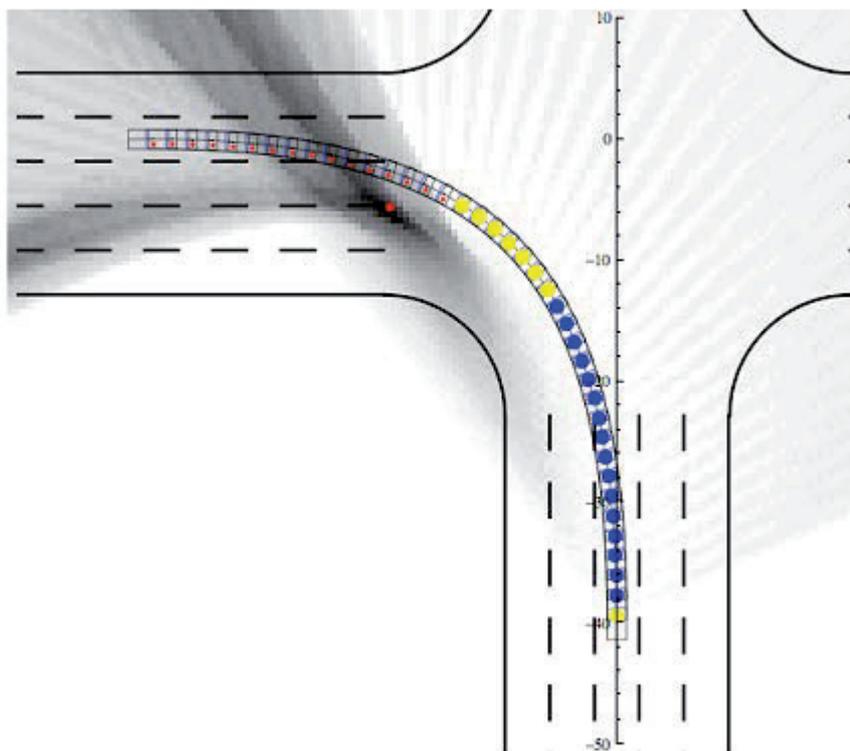


Abbildung 5-45: Darstellung der Sichtschattenkonzentration über den Fahrtverlauf beim Linksabbiegen durch Schattenverdichtung (aus Reed 2008)

- Linksabbiegen in mehrspurigen Kreuzungen

Beim Linksabbiegen in Kreuzungen mit mehreren Fahrspuren für jede Fahrtrichtung können entweder eine Verkehrsinsel mit Fußgängerübergang in der Mitte der Querstraße oder auch der Fußgängerübergang der diagonal gegenüber liegenden Straßenecke im Sichtschatten der A-Säule liegen. Glaser (2008) beschreibt, wie in der Praxis Fußgänger oder auch Radfahrer, die die Querstraße überqueren wollen, in die man selbst einbiegt, häufig durch die eigene A-Säule verdeckt werden. Diese Situation wird dadurch verschärft, dass querende Verkehrsteilnehmer in beide Richtungen auftauchen können. Häufig erhalten die Nutzer des Übergangs ihre Grünphase während der eigenen Linksabbieger-Ampelphase.

Abbildung 5-45 zeigt durch die räumliche Überlagerung des A-Säulenschattenverlaufes während des zeitlichen Ablaufes eines Abbiegevorganges die Konzentration des Sichtverdeckungsgebietes auf einen engen Bereich der Kreuzung. Die in dieser Darstellung von Reed (2008) gewählte Überlagerung des A-Säulenverdeckungsgebietes macht deutlich, dass sich der nicht



einsehbarer Bereich über den zeitlichen Verlauf des Abbiegevorganges räumlich stark konzentriert. Der Schattenbereich in Relation zum Fahrspurverlauf des Abbiegevorganges variiert geringfügig aufgrund der individuellen Augpunktlage eines Fahrers zur A-Säulen-Position seines jeweiligen Fahrzeugs.

- **Anfahren von der eigenen Haltelinie an mehrspurigen Kreuzungen**
Beim Anfahren von der Haltelinie an einer Kreuzung mit mehreren Fahrspuren für jede Fahrtrichtung kann sich die Verkehrsinsel des Fußgängerüberwegs, der unmittelbar vor dem eigenen Fahrzeug die Fahrbahn quert, im Sichtschatten der eigenen linken fahrerseitigen A-Säule befinden. Wartende Fußgänger, die trotz eigener Rotphase den Stillstand der Fahrzeuge zum Überqueren nutzen wollen, können aufgrund der Verdeckung nicht gesehen werden. Diese Konfliktsituation kann auch mit Radfahrern hinter der rechten beifahrerseitigen A-Säule entstehen.
- **Einfahren in Kreisverkehre (vergleiche Kapitel 5.7)**
Beim Einfahren in einen Kreisverkehr kann die Beobachtung des Verkehrs im Kreisverkehr oder der Fahrzeuge, die aus der vorhergehenden Einmündung in den Kreisverkehr einfahren, durch die Position der eigenen linken A-Säule verdeckt sein. Die Ausrichtung des eigenen Fahrzeugs in der Einmündung, der Durchmesser des Kreisverkehrs und die Lage der A-Säule beeinflussen hier die Verdeckungskonstellation.
- **Durchfahren des Kreisverkehrs (vergleiche Kapitel 5.7)**
Beim Durchfahren des Kreisverkehrs entsteht unweigerlich die Situation einer Linkskurvenfahrt. Dabei kann der voraus liegende Bereich einer Einmündung oder der Ausfahrt in den Verdeckungsbereich des eigenen A-Säulen-Schattens geraten. Diese Sichtverdeckung kann Konflikte mit einfahrenden Fahrzeugen oder auch mit Fußgängern und Radfahrern an Überwegen der Ausfahrt verschärfen.



5.9 Mögliche Maßnahmen zur Sichtverbesserung der A-Säulen

In den vorhergehenden Kapiteln wurden die Ursachen und Wirkungen der Sichtverdeckungsproblematik der A-Säulen aufgezeigt. Nachdem nun die Kritikalität dieser geometrischen Konstellation für die tägliche Verkehrssicherheit deutlich wird, stellt sich unweigerlich die Frage nach Möglichkeiten zur Verbesserung dieser Situation. Dazu lassen sich sechs unterschiedliche technische Ansätze ausfindig machen:

- Verschlinkung und Verschiebung der A-Säulen

Als konventionelle Optimierungsmaßnahme bietet sich die Verschlinkung des Querschnittes der A-Säulen an. Dies sollte außerdem mit einer Positionierung weiter nach außen vom Sichtfeld des Fahrers einher gehen. Eine steilere Neigung der A-Säule unterstützt diese Maßnahme. Die konsequente Umsetzung dieser Maßnahme durch alle Hersteller verlangt jedoch nach einer Verschärfung der Reglementierung. Dazu müsste die Vorschrift 77/649/EWG wie in Kapitel 5.3 beschrieben sachlich korrigiert und inhaltlich verschärft werden. Ein solcher behördlicher Druck würde die Hersteller dazu bewegen, wirksame technische Änderungen zu vollziehen. Der BMW X3 beweist, dass es möglich ist, auch mit einem Fahrzeug am Markt erfolgreich zu sein, das weit günstigere Sichtbedingungen aufweist, als die Masse der Fahrzeugmodelle. *Daimler* (2004) verringerte nach eigenen Angaben die Sichtverdeckungen der A-Säulen der Mercedes-Benz A-Klasse von der Modellgeneration W168 zum Nachfolger W169 um 10% rechts und sogar 25% links.

Im Automobildesign der 1950er und 60er Jahre wurden in den USA und auch in Europa in vielen Fahrzeugen sehr steile und sogar nach vorn geneigte A-Säulen realisiert. Wie in Abbildung 5-46 ersichtlich, war die nach hinten geneigte Windschutzscheibe dazu als sogenannte ‚Panoramascheibe‘ in den Übergängen zu den A-Säulen horizontal um bis zu 90° gekrümmt. Dies führte aufgrund der damals noch geringen Fertigungsqualität der Verglasung zu deutlichen optischen Verzerrungen in den Krümmungsbereichen der Scheibe. Die Sicht nach vorne ist durch diese Verschiebung der A-Säulen unübertroffen gut.



Abbildung 5-46: Großes unverdecktes Fahrersichtfeld durch eine ‚Panorama‘-Windschutzscheibe im Opel Rekord P1 von 1958
(Quelle: Auto-Motor-Sport)



Abbildungen 5-47 und 5-48: A-Säule mit Fachwerk-Struktur im Volvo Safety Concept Car (linkes Bild: von außen, rechtes Bild: Sicht von innen)

- ‚Fachwerk‘-Säulenstruktur

Ein zweiter, innovativer Ansatz zur Verbesserung der Sichtbedingungen ist die konstruktive Ausbildung der A-Säule als Fachwerkstruktur. Sie erlaubt es, die äußeren und inneren Schalen der A-Säule in einem durchsichtigen Kunststoff auszuführen und dadurch eine teiltransparente A-Säule mit Durchblickmöglichkeiten zu gestalten. Der Hersteller Volvo hat dieses Konzept in seinem *Safety Concept Car* realisiert und auf der *North American International Auto Show 2001* in Detroit vorgestellt. Die Abbildungen 5-47 und 5-48 zeigen diese sichteffektive Lösung.

- Aufteilung in mehrere Säulen

Der dritte Lösungsansatz stellt die strukturelle Aufteilung der A-Säule in zwei schmalere A-Säulen auf jeder Seite dar. Jede einzelne der beiden Säulen wä-



re etwa halb so breit ausgeführt wie eine heutige A-Säule. Gemeinsam bringt das Säulenpaar die strukturellen Festigkeitseigenschaften einer einzelnen A-Säule auf. Der Zwischenraum zwischen beiden Säulen wäre groß genug, um eine Verkehrsbeobachtung wie durch ein Fenster zu ermöglichen. Keine der beiden einzelnen Säulen wäre jedoch breit genug, um einen Verkehrspartner vollständig zu verdecken. Diese Lösung ist aktuell durch die bestehende Zulassungsvorschrift 77/649/EWG explizit untersagt. Sie wird jedoch durch eine Interpretationslücke in der Vorschrift derzeit von mehreren Herstellern praktiziert. Beispiele dafür bieten der Renault Espace oder die beiden Citroën C3 Picasso und C4 Picasso. Sie klassifizieren die zweite A-Säulen-Hälfte als Dichtungsträger der Türdichtung. Die Abbildungen 3-7 und 3-8 zeigen solche Konstruktionen.

Für diese Lösung wurde im Jahr 2008 der Patentschutz für die Daimler AG beantragt (DE10 2008 058 182).

- Sichtprisma

Ein optischer Ansatz zur Reduzierung der Sichtverdeckung stellt die Anordnung einer Prismenlinse neben der A-Säule dar. Bei diesem Konzept wird ein progressiv keilförmiger, also prismatischer, Linsenkörper entlang der A-Säule auf der Frontscheibe aufgebracht. Diese Prismenlinse sorgt über die gesamte Höhe der A-Säule dafür, dass die Umgebung des Fahrzeugs, die sich eigentlich im Sichtschatten der A-Säule befindet, durch Umlenkung der Lichtstrahlen für den Fahrer in der Prismenlinse erkennbar werden. Es handelt sich um eine in den USA patentierte Erfindung zweier Briten, die mit dem Namen Serravista bezeichnet wird. Ihre optische Wirksamkeit ist vom britischen Automobilinstitut MIRA bestätigt worden. Allerdings ist in dieser Studie nicht die möglicherweise inhomogene Wirkung auf den optischen Fluss während des Fahrens untersucht worden.

Der Aufbau des Systems ist in der Abbildung 5-49 links skizziert. Die Wirkung des Systems ist in dieser Abbildung im Vergleich Mitte und rechts erkennbar, die dieselbe Verkehrssituation mit und ohne Prismenlinse darstellen. Der Nachteil dieses Konzeptes ist die horizontal verzerrte Abbildung, da die Objekte im Bereich der Linse gestaucht wiedergegeben werden müssen, um den Sichtschatten zusätzlich abzubilden. Diese optische Lösung dürfte für die Au-

tomobilhersteller als Erstausrüstung derzeit im Straßenverkehr nicht erlaubt sein, da die Vorschrift für die Zulassung der Frontscheiben nach ECE R125 eine solche optische Verzerrung nicht gestattet. Eine Nachrüstung durch den Halter erscheint gegebenenfalls möglich. (US Patent 7.475.932, MIRA 2007)



Abbildung 5-49: Prismenlinse im Horizontalschnitt (links), Fahrersicht ohne (Mitte) und mit Prismenlinse (rechts)
(Quellen: US Patent 7475932, MIRA 2007)

- Kamera-System

Als weiterer Ansatz besteht die Möglichkeit der Anzeige des von der A-Säule verdeckten Bereiches mittels eines Videoübertragungs-Systems. Bei diesem Lösungsansatz wird der verdeckte Sichtbereich mittels einer außen an der A-Säule befestigten Mini-Video-Kamera aufgenommen und auf einem im Fahrzeuginneren befindlichen Display wiedergegeben. Für die Bilderfassung dieses Konzeptes besitzt der koreanische Automobilhersteller Kia ein europäisches Patent (DE60211501T2).

Dieses System könnte im Idealfall so ausgeführt werden, dass der fehlende Bildbereich homogen auf der inneren A-Säulen-Verkleidung dargestellt würde. Eine helle Innenverkleidung der A-Säule könnte quasi als eine Projektionsfläche für das Kamerabild dienen oder die Innenverkleidung wäre als biegsames Display beispielsweise in OLED-Technik ausgeführt. Für die Anordnung eines gebogenen Displays auf den Verkleidungen der A-Säulen zur Bilddarstellung der Verdeckungen besitzt die Ford Motor Company ein europäisches Patent (EP1285814A1).

Eine solche Darstellungsform entspricht dem Prinzip der Augmented Reality. Die Helligkeits- und Kontrastverhältnisse der natürlichen Sicht durch die Scheiben des Fahrzeugs können derzeit mittels Display- oder Projektions-



technik noch nicht erreicht werden. Somit wäre bei einem Blick auf die Bildwiedergabe Adaption des Fahrerauges an die Helligkeit sowie eine Akkomodation an die kurze Entfernung erforderlich.

- Querverkehrsassistent

Derzeit befindet sich ein weiteres elektronisches Assistenzsystem in Entwicklung, der sogenannte Querverkehrsassistent. Bei diesem System wird mittels Radarsensorik in einem weiten Bereich des Vorfeldes des Fahrzeugs das Bewegungsverhalten der Verkehrspartner ermittelt und daraus rechnerisch eine mögliche Kollisionsgefahr prognostiziert. Diese Systeme sollten in der Lage sein, auch Fahrzeuge in stehender Peilung zu identifizieren und den Fahrer auf diese Gefahr aufmerksam zu machen. Eine solche Funktion wäre mit der am Ende von Kapitel 5.7 beschriebenen Möglichkeit zur Echtzeitauswertung der eigenen Streckenvorausschau gut kombinierbar. Bei diesen Systemen würde auch eine Warnung des potentiellen Kollisionspartners mittels Licht- oder Hupsignalen oder auch Car-to-Car-Communication erfolgen können, um auf die Gefahr hinzuweisen.

5.10 Zusammenfassung des Kapitels

Kapitel 5 erläutert detailliert die in der aktuellen Fahrzeugtechnik bestehende Problematik der Sichtverdeckung durch die A-Säulen des Fahrzeugs. Die für die Zulassung der A-Säulengestaltung der Fahrzeuge zu Grunde liegende europäische Vorschrift muss als inhaltlich fehlerhaft bezeichnet werden! Die darin verankerte Maßgabe der Verdeckungsbeschränkung läuft der tatsächlichen Verdeckungsgröße entgegen. Neben der statischen Verdeckungsproblematik des Verkehrsumfelds im stillstehenden Fahrzeug existieren zwei gravierende dynamische Verdeckungseffekte, bei der Streckenvorausschau von Linkskurvenfahrten und bei den Kontrollblicken während einer Kreuzungsannäherung. Anhand der theoretischen Betrachtungen wirken diese Verdeckungseffekte wiederkehrend hindernd auf den Fahrer und führen unter bestimmten geometrischen und fahrdynamischen Konstellationen zu einer Kollisionsgefahr mit anderen Verkehrsteilnehmern.



Derzeit existieren eine Reihe von technischen Ansätzen, die Sichtverdeckungsproblematik von A-Säulen zu reduzieren. Allerdings ist der jeweilige Nutzen dieser Maßnahmen nicht quantifiziert und sie werden derzeit bei der Gestaltung neuer Fahrzeugmodelle noch nicht konsequent verfolgt.



6 Empirische Untersuchungen

Nachdem in Kapitel 5 die Relevanz der Sichtverdeckung der A-Säulen im Fahrtverlauf beleuchtet wurde, stellt sich die Frage: Wie gehen die Fahrer bei der tagtäglichen Fahrzeugführung mit diesen Beeinträchtigungen um? Obwohl Forschungsinstitute, Automobilclubs, Autozeitschriften und auch Kunden selbst, wie in Kapitel 3 beschrieben, die Sichteinschränkungen vieler aktueller Fahrzeugmodelle monieren, verlaufen jeden Tag eine Vielzahl von Fahrten völlig konfliktfrei. Wie meistert ein Fahrer seine verantwortungsvolle Fahraufgabe in Situationen mit Verdeckungskonflikten? Werden die Schwächen der Fahrzeuge durch die Fähigkeiten und Stärken des Menschen kompensiert?

6.1 Untersuchungsziel und Hypothesen

Zur Beantwortung dieser Fragen wurden zusammen mit *Bichlmeier* (2009) und *Zaindl* (2009) zwei Versuchsreihen durchgeführt, aus denen das Zusammenspiel von Fahrer und Fahrzeug in Situationen von Sichtverdeckungen analysiert wurde. Die beiden Versuchsreihen befassen sich mit den dynamischen Sichtverdeckungen in Linkskurvenfahrt und bei Kreuzungsannäherung, die bereits in den Kapiteln 5.5 und 5.6 theoretisch betrachtet wurden. Die Auswertung der Ergebnisse soll Antworten auf die oben genannten Fragen geben. Konkret bedeutet dies, dass die Testpersonen der beiden Versuchsreihen in Situationen der Sichtverdeckung entweder Maßnahmen zur Kompensation der Sichtbeeinträchtigung vornehmen werden oder ein aus der Sichtbeeinträchtigung resultierendes Risiko akzeptieren.

Hypothesen:

Daraus folgt konkret als Kernhypothese für die Ergebnisse der beiden Versuchsreihen, dass die Versuchspersonen ein Kompensationsverhalten wie Kopf- und Oberkörperbewegungen ausführen werden, um die Sichtbeeinträchtigung zu verringern und eine verbesserte Sicht in die Verdeckungsbereiche der A-Säulen zu erlangen. Dieses Verhalten müsste sich vor allem in einer horizontalen Bewegung der Kopfposition ausweisen.



Darüber hinaus wird erwartet, dass dieses Verhalten bei Fahrern mit größerer Fahrerfahrung deutlicher ausgeprägt ist.

Schließlich wird erwartet, dass sich das Bewegungsverhalten von Fahrern mit linker beziehungsweise rechter Augendominanz markant unterscheidet.

Sollte eine ausgeprägte Kompensationsbewegung statistisch nicht festzustellen sein, so wäre dies der Hinweis auf eine hohe Risikoakzeptanz oder ein geringes Risikobewusstsein.

6.2 Experimentdesign

6.2.1 Versuchsaufbau

Beide Versuchsreihen wurden im statischen Fahrsimulator des Lehrstuhls für Ergonomie durchgeführt, der in Abbildung 6-1 ersichtlich ist. Der Simulator besteht aus einem starren Mock-up auf Basis der Karosserie eines BMW 6er Cabrio [E64]. Ein starres Mock-up kann den Versuchspersonen keine kinästhetische Rückmeldung über die Beschleunigungskräfte des Fahrzeuges zu vermitteln. Während dies häufig als Nachteil für das Realitätsempfinden der Bewegungen beim Fahren aufgefasst wird, ist die Bewegungslosigkeit des Mock-ups für diese Versuchsreihen ein wertvoller Vorteil. Alle Bewegungen des Probanden im Mock-up sind von diesem selbst induziert und stellen keinesfalls eine Reaktion auf Trägheitsbewegungen aufgrund von Fahrzeugbeschleunigungen dar.

Lenkrad und Pedalerie des Mock-ups sind mit realitätsnaher Krafrückmeldung versehen. Für die Außensichtdarstellung in den Versuchen wurden drei Frontsichtkanäle mittels Projektion auf ein Leinwand-Triptychon projiziert und damit für die Fahrersicht ein Field-of-View von 210° erreicht. Dies ist für die periphere optische Geschwindigkeitswahrnehmung von Bedeutung. Die drei Kanäle zur Projektion der Spiegelsicht wurden nicht verwendet. Als Simulationssoftware wurde das System SILAB des Instituts für Verkehrswissenschaften Würzburg (IVWW) eingesetzt. In dieser Software wurden für beide Versuchsreihen unterschiedliche Versuchsstrecken und Verkehrsszenarien erstellt, die später noch beschrieben werden. In SILAB wurden auch die Fahrdynamik- und Streckendaten der Versuche aufgezeichnet. Die synchrone Berechnung der beteiligten Simulationskomponenten erfolgt auf einem Rechnercluster

mit verteilten Aufgaben für die einzelnen Sichtkanäle, die Streckenberechnung, die Verkehrsberechnung, die Steuerung der Bedienelemente im Mock-up sowie die Datenaufzeichnung.

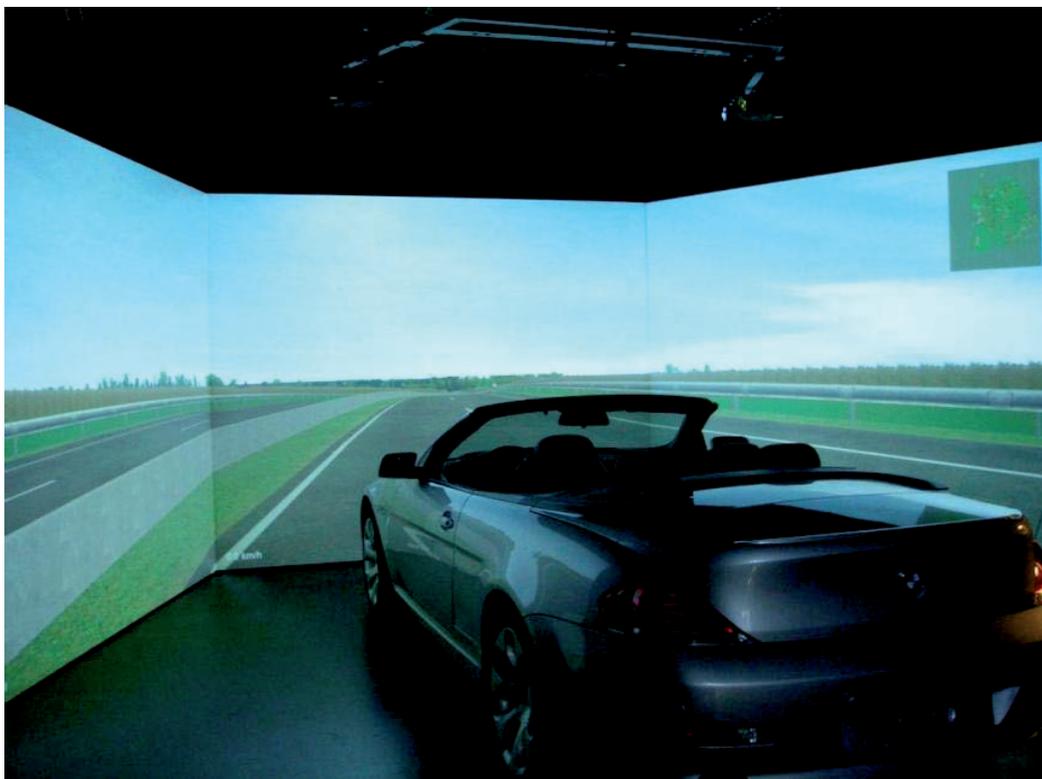


Abbildung 6-1: Statischer Fahr Simulator des LfE (Bild: LfE)

6.2.2 Messtechnik

In den beiden Versuchsreihen wurden folgende Daten mit Hilfe der beschriebenen Messtechnik erfasst:

- Körpergröße, Stammlänge, Beweglichkeit der Halswirbelsäule und dominantes Auge: → anthropometrische Messverfahren
- Vorbefragung der persönlichen Daten, Fahrerfahrung, Simulatorerfahrung, Einstellung zu Technik, des aktuellen Befindens, Nachbefragung: zum Versuchserleben: → Online-Aufnahme der Daten in der Software GrafStat (Vollständiger Fragebogen in der Anlage)

- Vermessung der Sitzposition und der Position des Fahrerkopfes in der individuellen Grundhaltung jedes Fahrers: → FARO-Koordinaten-Messarm (siehe Abbildung 6-2)



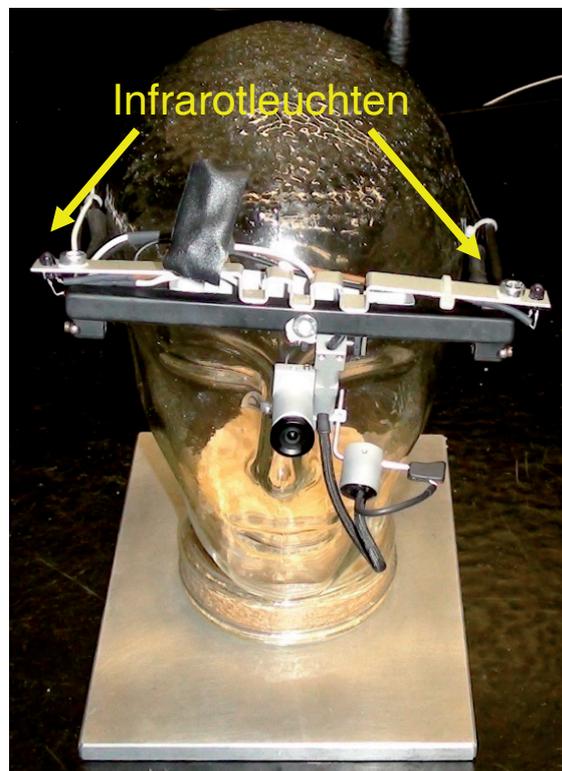
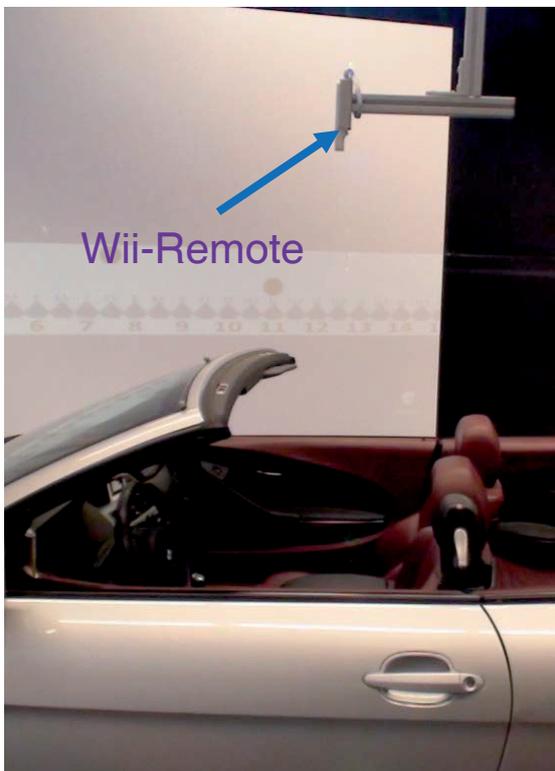
Abbildung 6-2: FARO-3D-Koordinaten-Messarm (Quelle: FARO)

- Eye Tracking der Blickbewegungen während der Versuchsfahrt: → DIKABLIS mit Software D-LAB der Firma Ergoneers GmbH (Unternehmens-Ausgründung des LfE) (siehe Abbildung 6-3)



Abbildungen 6-3 & 6-4: links: DIKABLIS Eye Tracking (Quelle: Ergoneers) rechts: Wii-Remote (Quelle: Nintendo)

- Headtracking der Kopfbewegungen während der Versuchsfahrt: → Aufzeichnung von Infrarot-Marker-Positionen am DIKABLIS-,Brillengestell' mit Hilfe einer Wii-Remote (Fernbedienung der Wii-Spielekonsole) (in den Abbildungen 6-4 bis 6-6 dargestellt)



Abbildungen 6-5 & 6-6: Head Tracking Vorrichtung mit Wii-Remote als fixierter Sensor und Infrarot-Leuchten als aktive Infrarot-Marker am DIKABLIS-System

6.2.3 Versuchsablauf

Die Zeitdauer für jede Versuchsperson betrug 30-40 Minuten, davon ca. 15 Minuten für die eigentliche Versuchsfahrt. Die Variation ergab sich vor allem aus unterschiedlich langen Eingewöhnungsfahrten, je nachdem ob bei den Versuchspersonen bereits Simulatorerfahrung vorlag.

Der Versuchsablauf erfolgte in beiden Versuchsreihen nach folgendem Schema:



6.3 Untersuchung der Sichtsituation in Linkskurven

Die erste Versuchsreihe untersuchte das Vorausschauverhalten der Fahrer bei der Fahrzeugführung und insbesondere dabei den Einfluss der Sichtverdeckung durch die fahrerseitige, linke A-Säule. Während des Versuchsablaufes wurden die Probanden wiederholt in die in Kapitel 5.5 beschriebene Situation gebracht, dass der Be-

reich ihrer Streckenvorausschau massiv durch die A-Säule ihres Fahrzeuges verdeckt werden würde.

6.3.1 Modelle des Blickverhaltens in Kurven

In der Literatur ist ein konkretes Blickverhaltensmodell für die Streckenvorausschau in Kurvenfahrt durch eine Reihe von Wissenschaftlern ausführlich publiziert worden: *Land et al.* (Land & Lee 1994, Land & Horwood 1996 & 1998, Wann & Land 2000, Land & Tatler 2001), *Salvucci & Gray* (2004) und *Wilkie et al.* (Wilkie & Wann 2003, Robertshaw & Wilkie 2008) beschreiben es als 'two-point visual control model of steering' (near point - far point). Dieses Sichtmodell basiert auf dem regelungstechnischen 2-Ebenen-Modell des menschlichen Lenkverhaltens von *Donges* (1977) (vergleiche auch Rockwell 1971, Shinar et al. 1977, Cohen & Zwahlen 1989, Cohen & Hirsig 1990, Mestre et al. 2004, Mars 2008, Green, Underwood et al. 1999, Möbus et al. 2007).

Alle diese Autoren beschreiben ein Sichtmodell der Sicht auf den Bereich zwischen voraus liegender Fahrspur und dem kurveninneren Fahrbahnrand mittels eines Sichtstrahls entlang des Tangentenpunktes der Kurve wie in Abbildung 6-7 dargestellt. Die Sichtentfernung des Fixationspunktes ist laut des Modells auf die Fahrbahn gerichtet mit einer Distanz entsprechend eines Vorlaufs des Fahrzeugs von ein bis drei Sekunden.

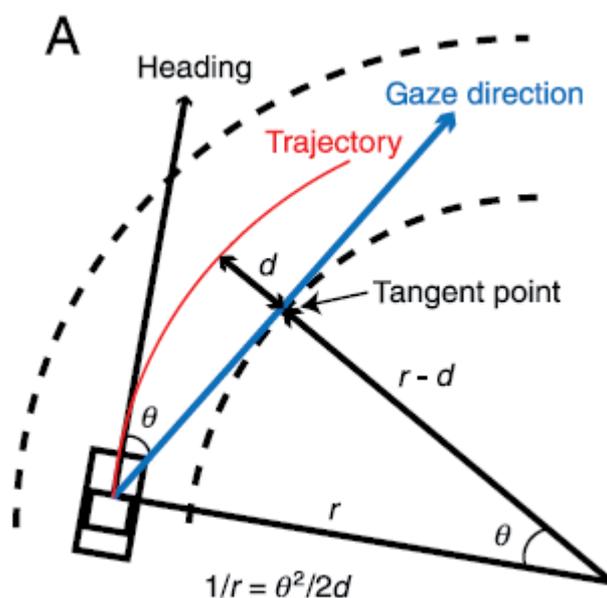


Abbildung 6-7: Blickverhaltensmodell entlang des Tangentenpunktes
(aus Mars 2008)



6.3.2 Versuchsstrecke & Methodik

Die Erstellung der Versuchsstrecke hatte zum Schwerpunkt, elf Linkskurven zu gestalten, die beim Befahren mit dem Simulator-Mock-up BMW 6er Cabrio [E64] in einer definierten Geschwindigkeit eine möglichst lang anhaltende Verdeckung der Strecke bei der Vorausschau des Fahrers zu erzeugen. Zu diesem Zweck wurden Kurvenradien im Bereich von 45 bis 60 m gewählt. Die Kurven besaßen eine Richtungsänderung von 104 bis 212°, damit sich der Fahrer über einen Zeitraum 2 bis 4,8 Sekunden in der Sichtverdeckungssituation befindet. Die Kurvenein- und -ausfahrten wurden mit Klothoiden versehen, die sich an der Richtlinie für die Anlage von Straßen: Teil Linienführung von anbaufreien Straßen (Landstraßen), RAS-L, (Weingart 1995) orientiert. Drei Rechtskurven in vergleichbarer Geometrie erlauben eine Vergleichbarkeit von Links- und Rechts-Orientierungen.

Um den Streckenverlauf möglichst natürlich erscheinen zu lassen, wurden diese Kurven in eine ebene Überlandstrecke von etwa 10 km Länge eingefügt. Mehrere kleine Kurven lockerten die Streckengestaltung auf. Das Umfeld der Strecke wurde mit einer unauffälligen Streckenbepflanzung in Form von Gras, Feldern, Strauchwerk und Bäumen versehen, die jeweils die Sicht auf die nächste Kurve erlauben, aber die Sicht auf den weiteren, voraus liegenden Streckenabschnitt verhindern. Die Breite der einspurigen Straße entsprach aufgrund der engen Kurvenradien dem Regelquerschnitt RQ 9,5, also 6,5 m. Um keine Ablenkungseffekte zu erzeugen, wurde auf einen Gegenverkehr verzichtet. Dadurch traten auch keine Schwierigkeiten beim Passieren von Fahrzeugen in der schmalen Straßenbreite auf. Abbildung 6-8 vermittelt einen Eindruck von der Streckengestaltung.

Um die Fahrer gleichartig aber möglichst unauffällig in die definierten Sichtverdeckungssituationen zu bringen, konnten die Versuchspersonen ihre Fahrgeschwindigkeit nicht selbst regeln. Ihnen wurde bei der Einweisung ein Szenario erläutert, in dem sie ein automatisches Geschwindigkeitsregelsystem zu testen hätten. Somit war es möglich, die Geschwindigkeit des Fahrzeugs vorzugeben. In Vorversuchen wurden die geeigneten Geschwindigkeitsprofile für die Verdeckungen in den Hauptversuchen kalibriert.

Die Fahrtstrecke von 10 km wurde von jeder Versuchsperson zweimal durchfahren. Im ersten Durchlauf betrug die maximale Geschwindigkeit auf den geraden Strecken



100 km/h. In definierter Distanz vor einer Kurve wurde auf 55 km/h verzögert und im Kurvenausgang wieder beschleunigt. Im zweiten Durchlauf war die Geschwindigkeit mit 110 km/h auf den Geraden und 60 km/h in den Kurven geringfügig höher. In den insgesamt 22 Links- und sechs Rechtskurven würde die Querbeschleunigung dadurch in der Realität zwischen 4,6 und 6,3 m/s² betragen. Diese Werte wären in der Realität sehr dynamisch und lägen deutlich über dem allgemeinen Komfortbereich. Dadurch, dass die Versuche in einem starren Fahrsimulator stattfanden, war für die Versuchspersonen jedoch keine Querbeschleunigung spürbar.

Da das Beschleunigungsempfinden in einem starren Fahrsimulator geringer ausgeprägt ist, als beim Fahren von Realfahrzeugen, wird dies häufig durch eine Veränderung des Field of View in den Einstellungen der Sichtprojektion kompensiert wie es *Colombet et al.* (2010) beschreiben. Die Projektion eines Field of view des Fahrers von 196° auf einer 210°-Projektionsfläche führt hier zu einem Zoomeffekt mit dem Faktor 1,07. Dies hat zur Folge, dass die geometrischen Sichtverdeckungskonstellationen gegenüber den Werten aus Kapitel 5.5 und Abbildung 5-22 im Experiment um diesen Zoomfaktor angepasst werden mussten.



Abbildung 6-8: Langgezogene enge Linkskurve in der Versuchsstrecke

6.3.3 Probandenkollektiv

Die Probanden für diese erste Versuchsreihe wurden aus dem universitären Umfeld rekrutiert. Es handelt sich um Studenten, Dozenten, Angestellte der Hochschule, sowie Freunde und Angehörige dieser Personengruppen.

Für die Versuchsdurchführung stellten sich insgesamt 47 Personen zur Verfügung. Sieben Personen konnten aufgrund von Unwohlsein oder Übelkeit nicht die Versuchsfahrt zu Ende führen, so dass 40 Personen die Versuchsreihe vollständig absolvierten.

Das Altersspektrum der sieben weiblichen (17,5%) und 33 (82,5%) männlichen Versuchspersonen erstreckt sich zwischen 19 und 65 Jahren, bei einem Durchschnitt von 28,7 Jahren und einer Standardabweichung von 10 Jahren. Diagramm 6-9 gibt die Altersverteilung im Detail wieder.

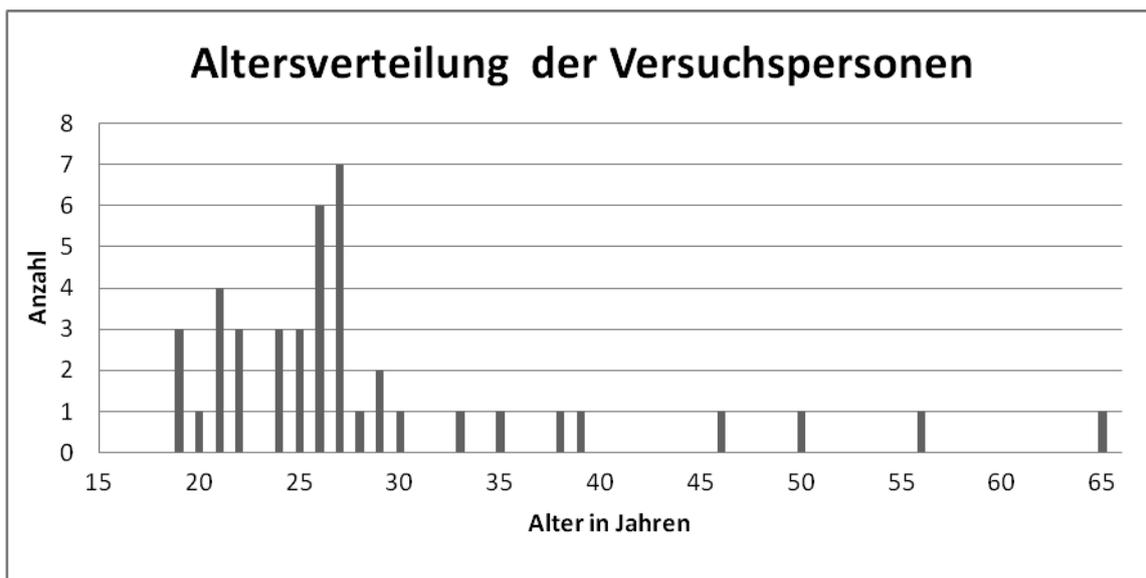


Diagramm 6-9: Altersverteilung der Versuchspersonen

Die Körpergröße der Probanden betrug zwischen 165 und 194 cm und repräsentierte somit das 60. bis 99,9. Perzentil bei den Frauen und das 5. bis 99. Perzentil bei den Männern bezogen auf das Jahr 2010. Die Körperhöhe im Sitzen (Stammlänge) erstreckte sich zwischen 88 und 101 cm. Die errechneten Beinlängen betrugen zwischen 77 und 95 cm. Diagramm 6-10 gibt das Spektrum der Körperhöhe sowie der Stammlänge und Beinlänge wieder, die ausschlaggebend für die gewählte Sitzposition sind.

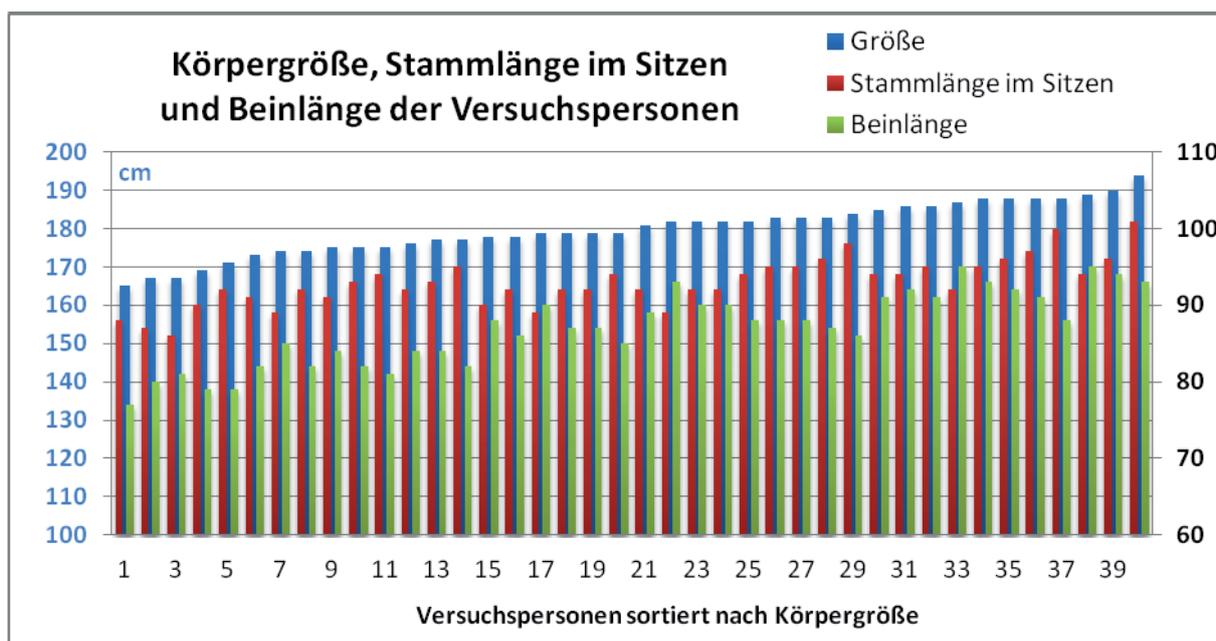


Diagramm 6-10: Größenverteilung der Versuchspersonen

Personen mit einer Körpergröße kleiner als 165 cm nehmen eine weit vorne liegende Sitzposition ein. Dadurch wurden die Infrarot reflektierenden Marker am Gestell des Blickbewegungsmesssystems zum Tracking der Kopfbewegung bereits durch den oberen Rahmen der Frontscheibe des BMW 6er Cabrios verdeckt.

Ein Test der Beweglichkeit der Halswirbelsäule aller Probanden ergab keine wesentliche Beeinträchtigung. Alle Probanden konnten ihren Kopf beschwerdefrei mehr als 45° zu beiden Seiten drehen. Die Beweglichkeit lag im Mittel bei 73° mit einer Standardabweichung von 8,8°.

6.3.4 Ergebnisdarstellung

Erfasste Sitzpositionen:

Abbildung 6-11 zeigt die von den Versuchspersonen eingenommenen Sitzpositionen. Die Positionen der Hüftpunkte und Augpunkte weisen eine sehr typische Verteilung in einem modernen Pkw auf und bestätigen damit die gute Vergleichbarkeit zur Sitzposition in einem fahrenden Fahrzeug. Unterschiede zu der mit RAMSIS in Kapitel 5.4 vorgenommenen Simulation der Augpunktpositionen entstehen in zweierlei Hinsicht. Zum einen liegt das tatsächlich gemessene Sitzverstellfeld etwa 30 mm tiefer

als das im Sitzplan des Fahrzeugs angegebene. Diese Abweichung ist beispielsweise durch eine dauerhafte Kompression der Sitzpolsterung durch die Benutzung erklärbar. Um etwa den gleichen Betrag sind dadurch auch die Augpunktlagen im Versuch gegenüber der Simulation abgesenkt. Ein zweiter Unterschied besteht darin, dass keine Versuchspersonen beteiligt waren, die den Körpermaßen einer sehr kleinen Frau ähneln. Dieser Effekt ist der oben genannten Verdeckungsproblematik der Messtechnik durch den Dachrahmen geschuldet.

Von den 40 Versuchspersonen waren aufgrund von Fehlern im Kalibriervorgang des FARO-Messarmes nur 31 Messungen präzise und damit eindeutig auswertbar.

Abbildung 6-11 zeigt die gemessenen Hüft- und Augpunktlagen der Versuchspersonen.

Ein Vergleich der eingenommenen Kopfhaltung vor Fahrtbeginn zeigt einen Unterschied der Ausrichtung des Kopfes zur Fahrtrichtung zwischen Versuchspersonen mit Augendominanz auf dem linken bzw. rechten Auge.

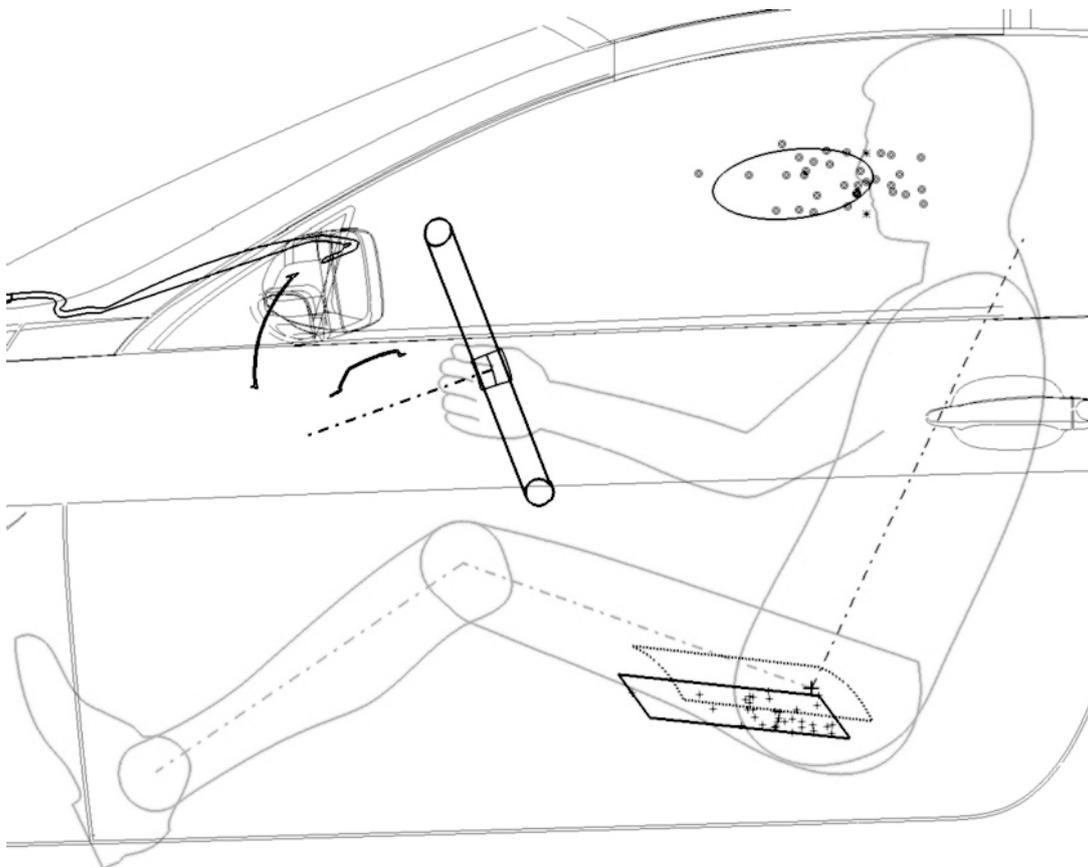


Abbildung 6-11: Augpunkt- und Hüftpunktlagen der Versuchspersonen (Seitenansicht)

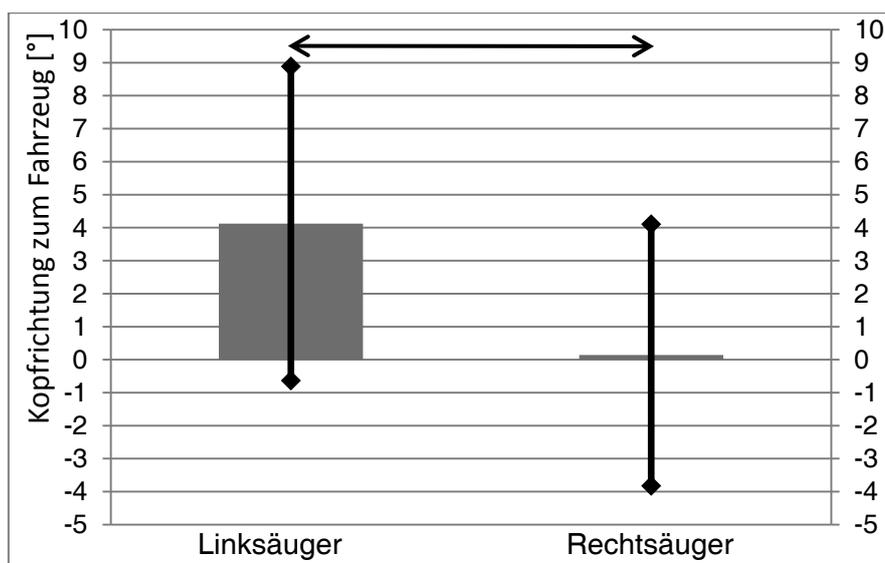


Diagramm 6-12: Messergebnis der neutralen Kopfhaltung der Versuchspersonen mit linker und rechter Augendominanz; Höhe blaue Balken: Mittelwerte, Enden der schwarzen Linien: Standardabweichungen

Während 23 Versuchspersonen mit rechter Augendominanz eine nahezu gerade Ausrichtung des Kopfes aufwiesen, tendierten die 8 Personen mit linker Augendominanz eine im Mittel um etwas über 4° nach rechts gedrehte Kopfhaltung auf. Diagramm 6-12 gibt dies wieder.

Der einseitige t-Test für unverbundene Stichproben weist mit einem α -Fehler von 0,029 einen signifikanten Unterschied aus (Tabelle 6-13).

	Linksäuger	Rechtsäuger
Mittelwert [°]	4,1	0,1
Standardabweichung [°]	4,8	4,0
α -Fehler	0,029	

Tabelle 6-13: Messergebnis der neutralen Kopfhaltung der Versuchspersonen mit linker und rechter Augendominanz

Damit bestätigt sich die Einzelhypothese der unterschiedlichen Kopfposition für linke und rechte Augendominanz hinsichtlich der Ausgangshaltung der Fahrer.

Befragungsergebnisse:

Die Befragung wurde für die 40 Versuchspersonen ausgewertet, für die auch die Blickbewegungsanalyse präzise Aufzeichnungen lieferte.



In den Antworten der Probanden wurde der Schwerpunkt der Sichteinschränkungen eindeutig den Linkskurven zugeordnet. Während 36 Personen (90%) eine schwache, mittlere und starke Tendenz der Verdeckung zur linken Seite äußerten, wurde nur von zwei Personen (5%) eine schwache Tendenz zur Verdeckung zur rechten Seite angegeben. Zwei Personen (5%) machten keine Angaben.

In der Befragung der Versuchspersonen empfanden 15 Probanden (37,5%) in Linkskurven die Geschwindigkeit als unangepasst, während nur 1 Person (2,5%) dies für Rechtskurven äußerte, obwohl sich die Geschwindigkeitssituation in beiden Kurvenrichtungen objektiv als gleich darstellte. Daraus ist festzuhalten, dass die subjektiv empfundene Sichtverdeckung bei den Probanden eindeutig linkslastig und somit der A-Säule zuzuordnen war.

Blickbewegungen:

Von den 40 Versuchspersonen konnten 39 Datensätze vollständig und einwandfrei analysiert werden. Eine Blickaufzeichnung war aufgrund von Analyseschwierigkeiten mit den Kontaktlinsen eines Probanden nur in Teilabschnitten zu verwenden.

Das Blickbewegungsverhalten der Probanden offenbarte überraschende Ergebnisse. Die augenscheinliche Analyse der Blickfilme zeigte große Unterschiede im Blickverhalten der Versuchspersonen und besaß markante Abweichungen von der in der Literatur beschriebenen Charakteristik.

In der bekannten Modellbeschreibung des Blickverhaltens in Kurven ist eine Beobachtung der Fahrbahn im Bereich der Vorausschauentfernung mit einem Sehstrahlverlauf vorwiegend tangential zum inneren Kurvenscheitel als einheitliches Fahrerverhalten dargestellt.

Das Blickverhalten einiger Probanden in der Versuchsreihe unterscheidet sich jedoch markant von diesem Modell. 16 Versuchspersonen weisen die markante Fixation im Bereich des kurveninneren Tangentenpunktes nur teilweise oder gar nicht auf.

Für das Blickverhalten der Probanden hinsichtlich der fixierten Bereiche der Fahrbahn sind voneinander verschiedene Varianten zu erkennen. So können vier unterschiedliche Blicktypen kategorisiert werden:



- Blicktyp „**Innen**“ : 24 Personen (60%)

Die Blickorientierung erfolgt am inneren, linken Fahrbahnrand in Links- und am inneren, rechten Fahrbahnrand in Rechtskurven. Dieser Typus stimmt vollständig mit dem in der Literatur beschriebenen Blickverhalten am inneren Tangentenpunkt überein. (siehe Abbildungen 6-14 und 6-15)

- Blicktyp „**Außen**“ : 5 Personen (12,5%)

Die Blickorientierung erfolgt am äußeren, rechten Fahrbahnrand in Links- und am äußeren, linken Fahrbahnrand in Rechtskurven. Dieser Typus weicht vollständig von dem bekannten Blickmodell ab. Es findet kaum eine Orientierung an der Kurveninnenseite statt. Der Blickverlauf folgt überwiegend der kurvenäußeren Fahrbahnbegrenzung. (siehe Abbildungen 6-16 und 6-17)

- Blicktyp „**Links**“ : 4 Personen (10%)

Die Blickorientierung verläuft entlang der linken Fahrspurbegrenzung, also entlang der Fahrbahnmitte, teilweise auch an der linken Fahrbahnbegrenzung. Der Blickverlauf hangelt sich an der linken Grenze der benutzten Fahrspur entlang. Bei diesem Typus zeigt sich in den Linkskurven das Blickverhalten der Literatur. (siehe Abbildungen 6-18 und 6-19)

- Blicktyp „**Rechts**“ : 7 Personen (17,5%)

Die Blickorientierung verläuft durchweg am rechten Fahrbahnrand sowohl in Links- wie auch in Rechtskurven. Der Blick der Fahrer tastet im Wesentlichen die rechte Fahrbahnbegrenzung ab. In diesem Fall weisen nur die Rechtskurven das typische Blickverhalten am Tangentenpunkt der Kurve auf. (siehe Abbildungen 6-20 und 6-21)

Eine Person wechselte während des Versuches nach dem ersten Durchlauf die Blickstrategie. Dies wurde von der Versuchsperson bei der Nachbefragung bestätigt und als bewusstes Vorgehen bezeichnet. Diese Person wurde ihrer Strategie des ersten Durchlaufes zugeordnet.

Die Differenzierung dieser vier Blicktypen erweist sich nicht als einfach. Aufgrund der Nähe des geometrischen Verlaufes von innerer und äußerer Begrenzung der Kurven

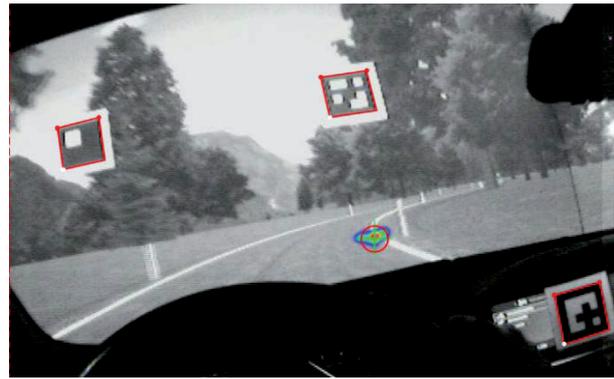
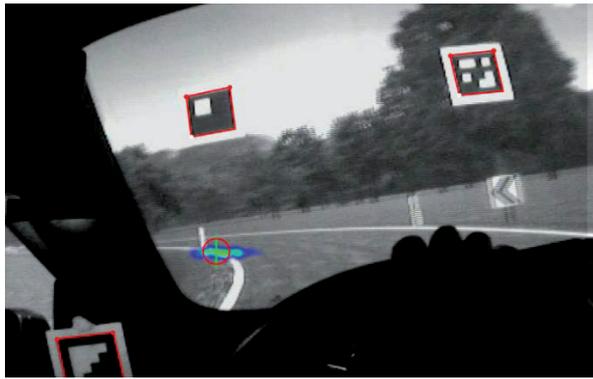


liegen die Blickorte auf den linken oder rechten Fahrbahnrand auf den Blickfilmen nur geringfügig auseinander. Eine begrenzte Präzision des Eye Tracking Systems oder eine eingeschränkte Güte der Kalibrierung machen eine Unterscheidbarkeit der Fixationsbereiche sehr schwierig. Die Entdeckung dieser unterschiedlichen Typen beruht zum einen auf der hohen technischen Qualität des verwendeten Eye Tracking Systems und seiner Auswertesoftware sowie einer akkuraten Auswertung mit hohem manuellem Aufwand. Zum anderen wird ein abweichendes Blickverhalten bei einigen Versuchspersonen durch auffällige Blicksprünge deutlich. Diese Blicksprünge wechseln jeweils von einer Richtungstafel zur nächsten, die auf der Außenseite einiger enger Kurven der Versuchsstrecke in regelmäßigem Abstand postiert sind. Dadurch wird unverkennbar, dass diese Versuchspersonen eindeutig auf den äußeren Rand der Fahrbahn blicken.

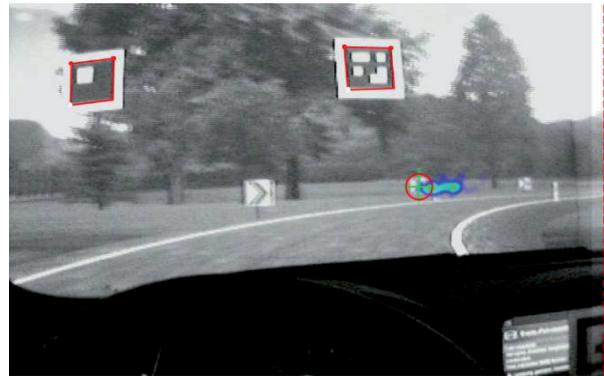
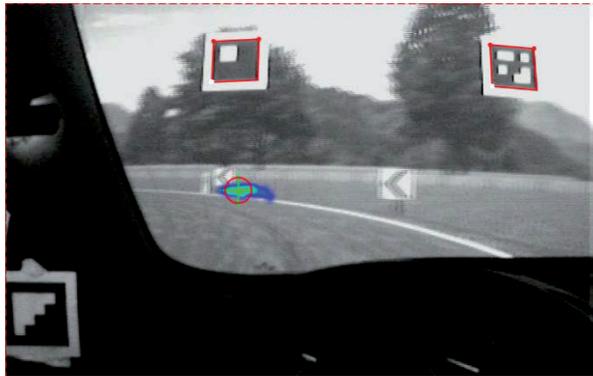
Bei der Betrachtung des Blickverhaltens der Versuchspersonen auf geraden Streckenabschnitten der simulierten Versuchsstrecke werden ebenfalls Unterschiede im Blickverhalten deutlich. Viele Fahrer mit den Blicktypen „Links“ und „Rechts“ weisen diese ausgeprägte einseitige Tendenz zu großen Teilen auch auf den Geraden Strecken auf. Diejenigen Fahrer, die mit ihren Fixationen zwischen linker und rechter Fahrbahnseite wechseln, zeigen eine Häufigkeitstendenz zu ihrer in den Kurven bevorzugten Seite.

Der Typus „Innen“, der dem Standardverhalten der Fachliteratur entspricht, weist durchweg auch auf den geraden Strecken ein Blickverhalten ähnlich der Beschreibung im Lehrbuch auf. Bei Ihnen ist ein häufiger Blickwechsel zwischen linkem und rechtem Fahrbahnrand zu erkennen. Dies erfolgt in einigen Fällen weit voraus in der Nähe des Expansionspunktes des optischen Flusses am Horizont. Acht Versuchspersonen vom Typus „Innen“ wechseln erst beim Einlenken in die Kurve, also dann, wenn sich der Ursprung des optischen Flusses verschiebt, mit ihrer Fixation auf den Bereich des inneren Tangentenpunktes der Kurve.

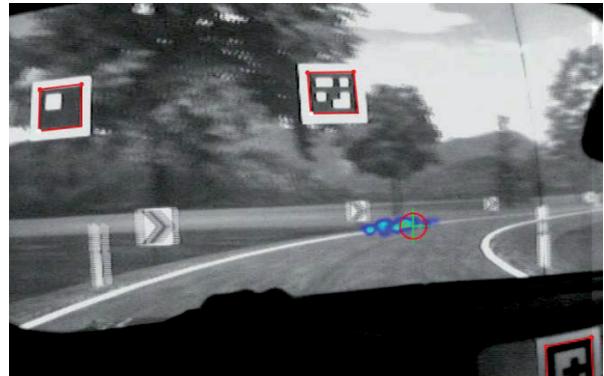
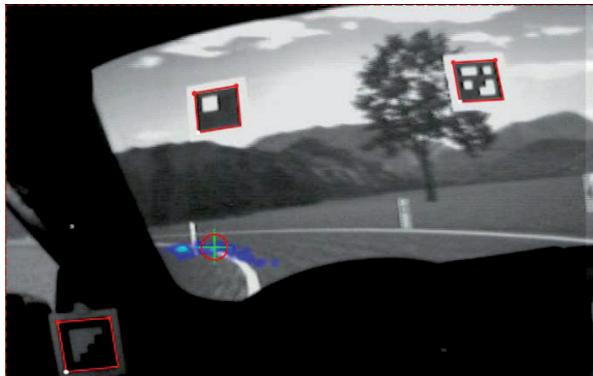
Die Fahrer vom Blicktypus „Außen“ zeigen alle auf den geraden Streckenabschnitten eine Konzentration auf den Expansionspunkt. Durch Ihr Blickverhalten auf die äußere Kurvenbegrenzung müssen sie mit ihrer Blickrichtung während der Kurvenfahrt nur geringfügig einschwenken. Die erkennbar unterschiedliche Charakteristik des Blickverhaltens der vier Blicktypen wird durch die folgenden exemplarischen Abbildungen aus den Blickfilmen verdeutlicht.



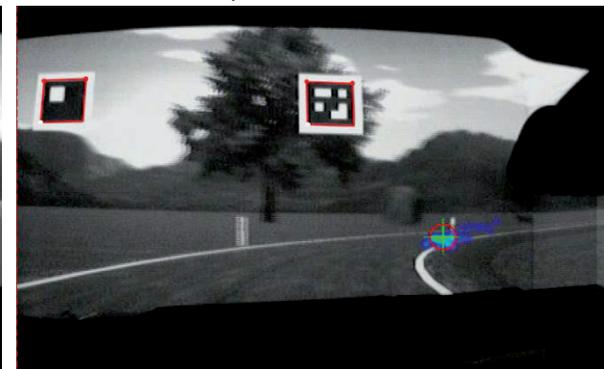
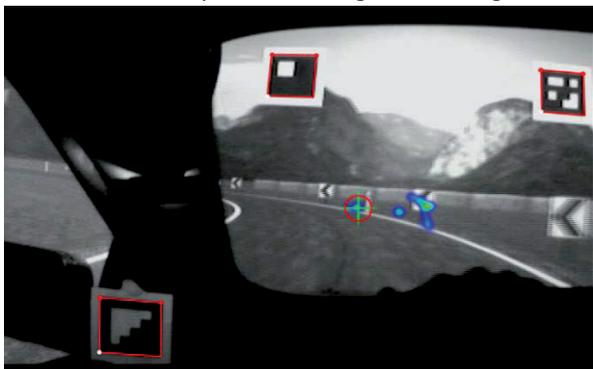
**Abbildungen 6-14 und 6-15: Blicktyp „Innen“ mit Heatmap der Fixationen über 3 sec.
(Orientierung am jeweils kurveninneren Fahrbahnrand)**



**Abbildungen 6-16 & 6-17: Blicktyp „Außen“ mit Heatmap der Fixationen über 3 sec.
(Orientierung am jeweils kurvenäußeren Fahrbahnrand)**



**Abbildung 6-18 & 6-19: Blicktyp „Links“ mit Heatmap der Fixationen über 3 sec.
(Orientierung durchweg am linken Fahrbahnrand)**



**Abbildung 6-20 & 6-21: Blicktyp „Rechts“ mit Heatmap der Fixationen über 3 sec.
(Orientierung durchweg am rechten Fahrbahnrand)**



Die Kreuze weisen auf den jeweiligen aktuellen Fixationspunkt der Pupille. Die Farbflecken der Heatmap weisen die Fixationsdauern in den vergangenen zwei bis drei Sekunden aus. Während die manuelle, besser als augenscheinlich zu bezeichnende Auswertung der Blickfilme die Fixationen einem bestimmten Fixationsobjekt oder -bereich zuordnen kann, ist eine numerische Analyse der Blickorte des Versuches nicht möglich. Trotz der messtechnischen Errechnung der Fixationspositionen bezüglich der eingeblendeten optischen Marker sind die numerischen Unterschiede der Fixationsorte zu klein für eine eindeutige Differenzierung. Die unterschiedlichen Kurvenradien in Verbindung mit den Sakkadensprüngen erlauben keine eindeutige numerische Zuordnung der Fixationsorte zu den Blicktypen.

Die augenscheinliche Auswertung der Blickfilme zeigt weiterhin, dass die Sichtbehinderung durch die Verdeckung der A-Säule sehr unterschiedlich auf die verschiedenen Blicktypen einwirkt. Die Blicktypen „Rechts“ und „Außen“ sind aufgrund ihrer Blickstrategie in den Linkskurven prinzipiell weniger durch die A-Säule eingeschränkt als dies beim Blicktyp „Innen“ oder „Links“ der Fall ist.

Bei einigen Versuchspersonen war eine deutliche Ausweichbewegung mit dem Kopf festzustellen, bei anderen war der Blick dagegen scheinbar auf die sichtverdeckende A-Säule fixiert. Bei kleinen Versuchspersonen ist die Beeinträchtigung der Sicht aufgrund ihrer weiter vorne liegenden Sitzposition geringer.

Insgesamt ist festzustellen, dass sich in Linkskurven die maximale seitliche Blickauslenkung der überwiegenden Zahl der Versuchspersonen im Bereich unmittelbar rechts neben der A-Säule oder scheinbar auf der A-Säule befindet. Ein Überspringen des Blickes über die A-Säule nach links in die Seitenscheibe kann nur bei wenigen Probanden und nur in einzelnen Kurven festgestellt werden. Dieses Verhalten trifft auch nur für Versuchspersonen der Blicktypen „Links“ und „Innen“ zu.

Aufgrund der Aufgliederung der Versuchspersonen in die neu entdeckten unterschiedlichen Blicktypen ist eine detaillierte Interpretation der Reaktionen auf die Sichtverdeckung nicht sinnvoll durchzuführen. Die Wirkung des A-Säulenverdeckungseffektes ist für die vier Typen aufgrund des jeweils bevorzugten Blickortes deutlich unterschiedlich. Für die unterschiedlichen Blicktypen wäre jeweils eine unterschiedliche Versuchskonstellation zu schaffen und für jeden Blicktypen in ausreichender Versuchspersonenzahl zu analysieren.



Das zur Verfügung stehende Mock-up des Fahrsimulators in Form des BMW 6er Cabrio erlaubt jedoch keine Variation der A-Säulen-Position. Zur Bestimmung des Blicktypen bei der Rekrutierung von Versuchspersonen wäre jeweils ein aufwändiger Pre-Test erforderlich. Im Rahmen dieser Versuchsreihe kann aufgrund der unterschiedlichen Blicktypen somit keine generelle Erkenntnis über das Kompensationsverhalten ermittelt werden.

Kopfbewegungen:

Die Auswertung des Kopfbewegungstrackings mit den aktiven Infrarotmarkern und dem Wii-Controller während der Simulatorfahrten zeigen das Bewegungsmuster von Kopf und Oberkörper der Versuchspersonen.

In diesen Trackingaufzeichnungen sind zwei unterschiedliche, sich z.T. überlagernde Bewegungsmuster festzustellen, die zu drei Verhaltenstendenzen führen:

- Drei Versuchspersonen (7%) wiesen über die gesamte Versuchsdauer eine nahezu starre Kopfhaltung auf. Für drei dieser Versuchspersonen erfolgten dabei die vorausschauenden Blicke in die Kurven praktisch ausschließlich mit den Augenbewegungen, die sich dabei horizontal mehr als 35° zu jeder Seite drehten. Dies entspricht dem maximalen Blickfeld, also dem größtmöglichen Bewegungsraum des menschlichen Auges.
- Eine zweite Tendenz zeigte sich in einer ausschließlich rotatorischen Bewegung des Kopfes. Während die Position der Halswirbelsäule ihre Lage im Raum beibehält schwenkt der Kopf mittels einer Drehung entsprechend der Kurvenvorausschau. Die Stärke der Kopfdrehung dieses Bewegungsmusters war sehr unterschiedlich. Das Spektrum der Kopfbewegung reichte von wenigen Grad bis hin zu Kopfbewegungen von bis zu ca. 40° bei einzelnen Versuchspersonen. Das bedeutet, dass sich die Aufteilung der Blickvorausschau in Kopf- und Augenbewegung der Versuchspersonen sehr unterschiedlich darstellte. Die tendentielle Ausprägung des rotatorischen Bewegungsmusters zeigte sich bei diesen 23 Versuchspersonen (56%) über alle Kurven jeweils sehr ähnlich. Somit ist von einem individuellen Verhaltensmuster auszugehen.
- Die dritte Verhaltenstendenz äußert sich in einer translatorischen Kopf- bzw. Oberkörperbewegung. Auch diese war unter den neun betreffenden Ver-



suchspersonen (37%) unterschiedlich stark festzustellen. Auch die vorherrschende Richtung der Kopfbewegung zeigte sich unterschiedlich intensiv in Fahrzeuglängs- und -querrichtung. Die Überlagerung der Translationsbewegung mit einer Rotationsbewegung des Kopfes war ebenfalls individuell verschieden.

Der Grad der Ausprägung der jeweiligen Rotations- und auch Translationsbewegung ist sehr unterschiedlich.

Die folgenden drei Abbildungen 6-22 bis 6-24 zeigen exemplarische Bewegungsmuster dieser Kopfbewegungen von drei Versuchspersonen in vergleichbaren Situationen aus der Sicht von oben (Draufsicht / Top View).

In den Abbildungen entsprechen die blauen Markierungen der LED am linken Bügel der Brille, die roten Markierungen der LED am rechten Bügel. Die grüne Markierung repräsentiert die daraus errechnete mutmaßliche Position der Halswirbelsäule im Mittel 120mm hinter der Nasenwurzel. Die Ausrichtung der abgebildeten Diagramme entspricht der Fahrtrichtung des Fahrzeuges.

Alle Versuchspersonen blickten während des Versuches bei der Streckenvorausschau der Kurven mehrfach bis zu 35-40° nach links und rechts. Die Ergebnisse geben ein sehr inhomogenes Verhalten der Bewegungsstrategien wieder. Einzelne Versuchspersonen nahmen die Blickbewegung vollständig durch die Bewegung der Augen vor, obwohl sich diese Bewegung bereits an den Grenzen des maximalen Blickfeldes von +/- 35° befindet und weit außerhalb des optimalen Blickfeldes von +/- 15° liegen. Die übliche Aufteilung der Blickbewegung in Kopf- und Augenbewegung bei den übrigen Versuchspersonen erfolgt in seiner Ausprägung sehr individuell hinsichtlich der Bewegungsanteile.

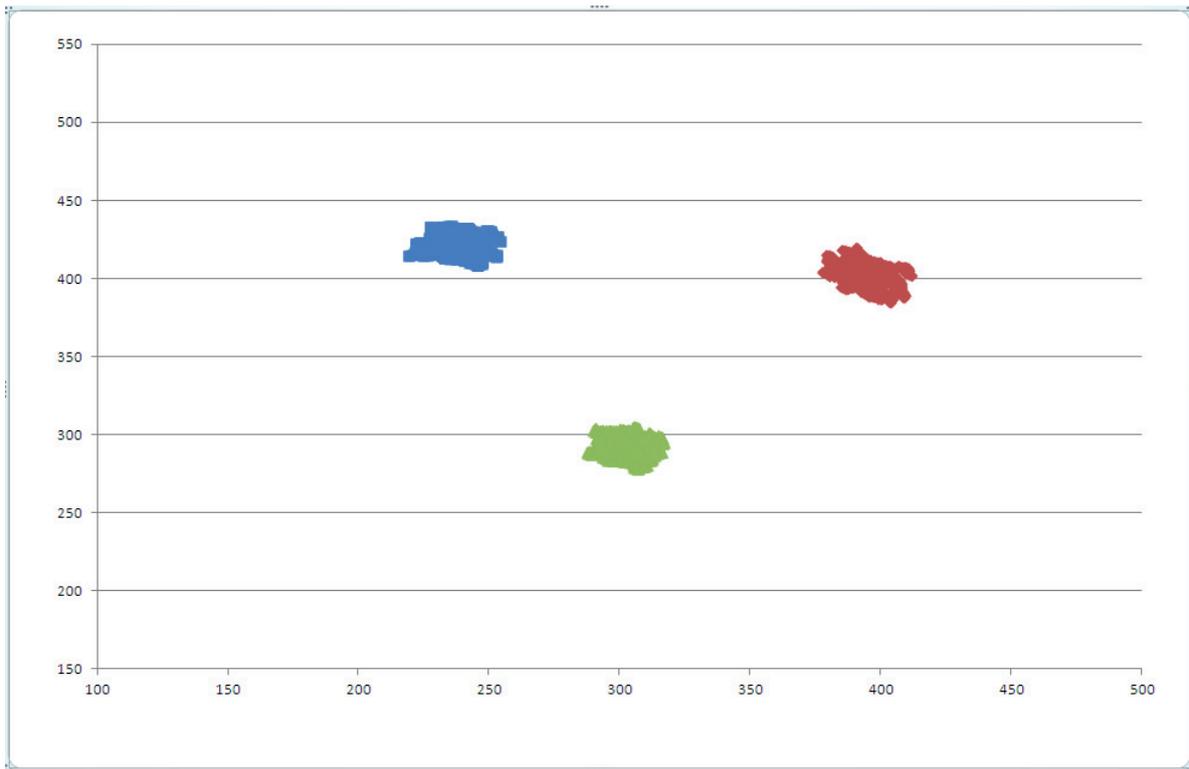


Diagramm 6-22: Bewegungsmuster einer Versuchsperson mit starrer Kopfposition

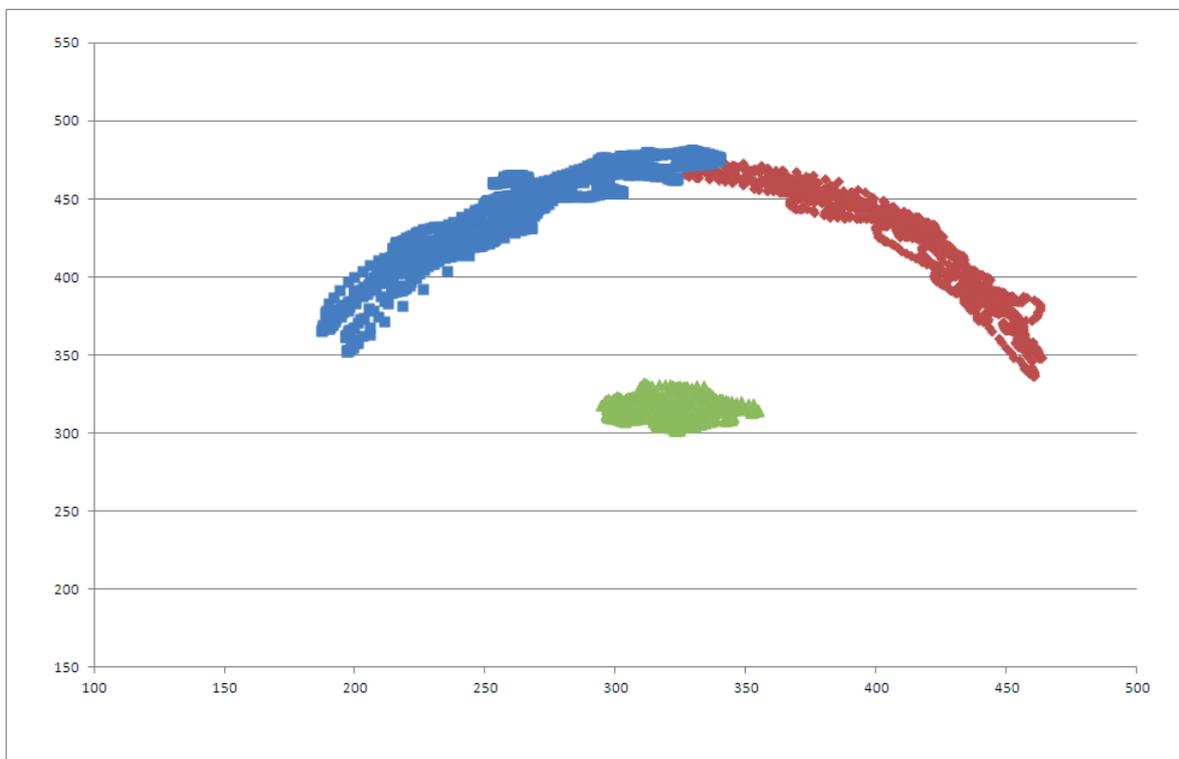


Diagramm 6-23: Bewegungsmuster einer Versuchsperson mit ausgeprägter Rotationsbewegung des Kopfes

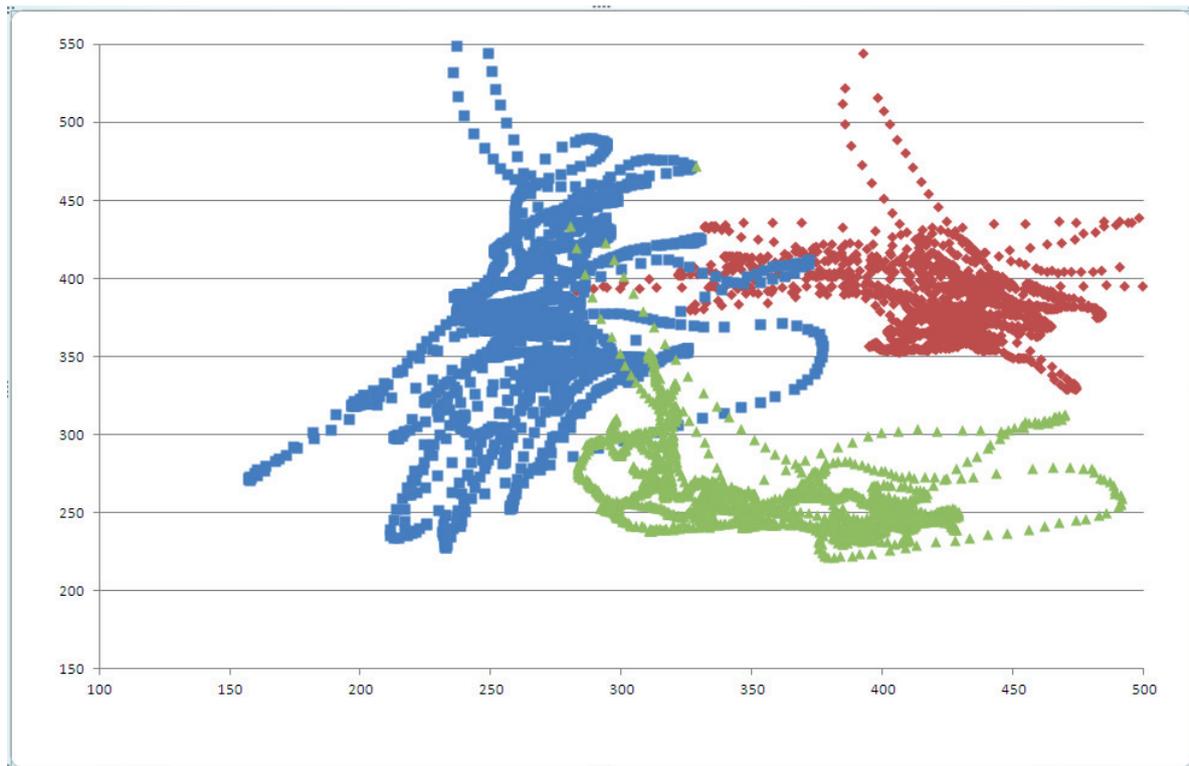


Diagramm 6-24: Bewegungsmuster einer Versuchsperson mit Kopfbewegungen in alle Richtungen

6.3.5 Vergleich von Links- und Rechtskurven

Im direkten Vergleich der jeweils drei krümmungsgleich angelegten Links- und Rechtskurven der Versuchsstrecke zeigte sich, dass 36 von 37 auswertbaren Versuchspersonen in den Rechtskurven eine größere Bewegungsaktivität aufwiesen. Dies betraf sowohl die rotatorische als auch die translatorische Kopfbewegung. Als Merkmale für die individuelle Bewegungsaktivität des Kopfes wurden sowohl die zeitliche Mittelung als auch die Intensität der Abweichung von Kopfposition und Kopfdrehung herangezogen.

Im asymmetrischen Vergleich aller Linkskurven mit den drei Rechtskurven zeigten 82% der Versuchspersonen in den Rechtskurven eine stärkere rotatorische Aktivität und 76% der Versuchspersonen eine stärkere translatorische Aktivität.

Insgesamt waren von den 28 Kurvendurchfahrten 22 nach links und lediglich 6 nach rechts gekrümmt, so dass bei symmetrischem Blickverhalten während dieser Versuchsfahrt eine ausgeprägte Tendenz nach links zu erwarten wäre.



Jedoch besitzen 86% der Versuchspersonen über die gesamte Versuchsfahrt eine mittlere Kopfdrehung, die um durchschnittlich $4,3^\circ$ nach rechts weist. Selbst in den Linkskurven zeigten nur 24% der Versuchspersonen eine mittlere Kopfdrehung nach links.

Dieses ungleiche Blickverhalten in den beiden Kurvenrichtungen wird auch in einer Untersuchung von *Hristov* (2009) auf realen Straßen festgestellt.

Die Unterschiede im Bewegungsverhalten der Fahrer in Rechts- und Linkskurven kann ebenfalls als Hinweis darauf gedeutet werden, dass die A-Säule zu einer Einschränkung des aktiven Blickverhaltens in der Kurvenvorausschau führt. Als Beleg dafür können die Untersuchungsergebnisse jedoch nicht gewertet werden.

6.3.6 Ursacheninterpretation des Blick- und Kopfbewegungsverhaltens hinsichtlich der Hypothesenüberprüfung

In dieser Untersuchung und deren statistischer Analyse sind sowohl hinsichtlich der Blickbewegungstypologie als auch in Bezug auf die Kopfbewegungscharakteristik sehr uneinheitliche, jedoch nach klaren Merkmalen strukturierbare Verhaltensweisen festzustellen. Somit stellte sich das Verhalten der Versuchspersonen in diesem Fahrsimulatorexperiment deutlich differenzierter dar, als dies aus den in der Literatur bekannten Studien zu erwarten war. Im Hinblick auf die erkennbaren verschiedenartigen Bewegungsmuster und vor allem in Bezug auf die unterscheidbaren Blicktypen kann das Spektrum der bekannten Verhaltensmodelle erweitert werden.

Allerdings sind im Rahmen dieser Versuchsreihe keine Hinweise auf mögliche Ursachen oder Zusammenhänge dieser Ausprägungen zu erkennen. Auch ist zwischen beiden Verhaltensmustern keine Wechselbeziehung ersichtlich. Es wurden die Eigenschaften der Versuchspersonen Alter, Geschlecht, Fahrerfahrung, Fahrzeugbenutzung, Größe, Sitzposition, Brille und Augendominanz statistisch auf ihren Einfluss auf die Zuordnung zu den verschiedenen Blicktypen oder der Kopfbewegungscharakteristik geprüft. Es ergeben sich daraus keine belastbaren Hinweise auf die Ursache der unterschiedlichen Verhaltensweisen bei der Streckenvorausschau mit Sichteinschränkungen durch die A-Säule.



Allein zeigten die Versuchspersonen mit dem Blicktyp „Außen“ eine geringere durchschnittliche Körpergröße als die übrigen Blicktypen. Allerdings ist dieses Merkmal aufgrund der niedrigen Fallzahl von fünf Personen nicht aussagekräftig.

In der Ausgangshaltung der Kopfposition der Fahrer ist ein eindeutiger Unterschied zwischen Personen mit linker und rechter Augendominanz festzustellen. Aufgrund der Zugehörigkeit zu unterschiedlichen Blicktypen ist diese Differenzierung in den dynamischen Kopfpositionen nicht mehr feststellbar.

Insgesamt erfolgte bei den teilnehmenden Versuchspersonen eine verhältnismäßig gering ausgeprägte Reaktion auf die störende A-Säule. Dies hängt einerseits damit zusammen, dass der Grad der Verdeckung für verschiedene Blicktypen unterschiedlich stark zur Wirkung kommt.

Im Umkehrschluss könnte das Verhalten einzelner Blicktypen auch eine Reaktion auf das eingeschränkte Sichtangebot moderner Fahrzeuge sein. Als Interpretation der Ergebnisse der Versuchsreihe entsteht der Eindruck, dass das Blickverhalten der Fahrer nicht nur bedarfsgerecht erfolgt, sondern auch angebotsorientiert. Es wird nicht nur dahin geblickt, wo es wichtig ist, sondern auch dahin, wo es leicht möglich ist!

Des Weiteren ist außerdem bei einigen Versuchspersonen ein Wahrnehmungseffekt zu unterstellen, der in Kapitel 2.4 als ‚Gesetz der Geschlossenheit‘ und als ‚Gesetz der guten Fortführung‘ erläutert ist. Die Fahrer ergänzen die durch die A-Säule entstehende Bildunterbrechung der Straße durch eine Ergänzung in Ihrem visuellen Gedächtnis.

6.4 Untersuchung der Sicht in Kreuzungssituationen

In der ersten Versuchsreihe wurde das vorausschauende Blickverhalten der Fahrer in Kurvensituationen ohne mögliche Konfliktsituationen mit anderen Verkehrsteilnehmern untersucht. Die zweite Versuchsreihe beschäftigt sich nun mit dem Einfluss der A-Säulensichtverdeckung in Kreuzungssituationen und mit anderen Verkehrsteilnehmern, also in potentiell konfliktbehafteten Verkehrssituationen.

Die erste Versuchsreihe hat Hinweise darauf geliefert, dass einige Fahrer kein ausgeprägtes Kompensationsverhalten hinsichtlich der Sichteinschränkung durch den



Verdeckungsbereich der A-Säule zeigen. Die im Folgenden beschriebene zweite Versuchsreihe soll nun zeigen, in welcher Weise die Verdeckungseffekte der A-Säulen des Versuchsfahrzeuges die Versuchspersonen bei der Bewältigung von Kreuzungskonflikten behindern können.

6.4.1 Versuchsstrecke & Methodik

Versuchsaufbau, Messtechnik und Versuchsablauf entsprechen dem der zuvor in Kapitel 6.2 beschriebenen Eigenschaften. Ergänzend dazu wurde für jede Versuchsperson die Lage des Sichtschattens der A-Säule individuell bestimmt, um während des Versuchsablaufes den Querverkehr präzise im verdeckten Bereich fahren zu lassen.

Die Versuchsstrecke im Fahrsimulator basiert auf einem Verkehrsknotenpunkt als 90°-Kreuzung zweier gerader, ebener Straßen im Überlandbereich. Die Strecke besitzt eine Straßenbreite von sieben Metern, angelehnt an den Regelquerschnitt 10,5 nach RAS-Q. Über die gesamte Versuchsstrecke werden sieben Varianten dieser Kreuzung insgesamt neun Mal in gerader Richtung von jeder Versuchsperson durchfahren. Die sieben Varianten unterscheiden sich vor allem hinsichtlich des vorhandenen kreuzenden Verkehrs, der jeweils bevorrechtigt ist. Ansonsten sind die Kreuzungen lediglich durch unterschiedliche Landschaftsgestaltung der Umgebung optisch zu unterscheiden. Zwei Varianten werden jeweils zweimal durchfahren. In einer der sieben Varianten ist die Einsehbarkeit der querenden Straße eingeschränkt. In den übrigen Kreuzungssituationen kann die Querstraße von der Versuchsperson mindestens 160 m vor der Kreuzung voll eingesehen werden. Um die Abfolge der neun Kreuzungssituationen abwechslungsreicher und natürlicher zu gestalten, sind diese Situationen in eine Überlandfahrt von etwa 10 Minuten Fahrtdauer eingebettet. Als Zwischenstrecken dienen unverzweigte Landstraßen mit Kurven, zum Teil auch mit Randbebauung. Die Gestaltung der umgebenden Landschaft, ist einem ländlichen Charakter angenähert.

Im Bereich der Kreuzung ist kein weiterer Längsverkehr vorhanden.

Die Reihenfolge der Kreuzungssituationen (Tabelle 6-25) folgt einem logischen Ablauf der Versuchsfragestellung, so dass alle Versuchspersonen eine identische Reihenfolge ohne Permutation absolvieren.



Die neun Kreuzungen weisen folgende spezifische Konfliktsituationen auf:

Situation 1	Querverkehr spiegelbildlich von links und rechts, unverdeckt und jeweils gleich schnell
Situation 2	freie Kreuzung , kein Querverkehr
Situation 3	Querverkehr, durch die A-Säule im Sichtschatten rechts
Situation 4	Querverkehr in stehender Peilung neben der A-Säule, aber sichtbar rechts
Situation 5	Bebauung mit Sichtverdeckung bis nahe zur Querstraße, entsprechend der ADAC-Maßnahme (ADAC-Kreuzung)
Situation 6	Querverkehr von links und rechts, also hinter den A-Säulen im Sichtschatten beidseitig
Situation 7	Querverkehr, durch die A-Säule im Sichtschatten links
Situation 8	freie Kreuzung , kein Querverkehr (vgl. Situation 2)
Situation 9	Querverkehr, durch die A-Säule im Sichtschatten rechts (vgl. Sit.3)

Tabelle 6-25: Reihenfolge der Kreuzungen

In der folgenden Beschreibung werden die neun Kreuzungssituationen näher erläutert:

Situation 1 (Querverkehr spiegelbildlich):

Während der Annäherung des Fahrzeugs der Versuchsperson an die Kreuzung querren, wie in Abbildung 6-26 gezeigt, je ein Fahrzeug von links wie von rechts in symmetrischem Abstand mit gleicher Geschwindigkeit die Kreuzung. Die Fahrgeschwindigkeit ist ausreichend hoch eingestellt, damit der Querverkehr vor dem Fahrzeug der Versuchsperson die Kreuzung passiert.

Diese Situation soll den Probanden gleich zu Beginn das Auftreten von Querverkehr eindeutig vermitteln, ohne dass bereits eine Konfliktsituation entstehen kann. In dieser Situation kann bereits der Abstand der Kreuzungsbeobachtung und die Seite der Erstentdeckung untersucht werden.

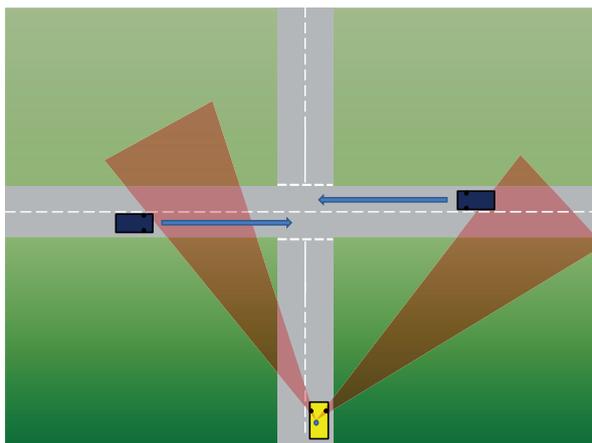


Abbildung 6-26: Situation 1
(Querverkehr spiegelbildlich)

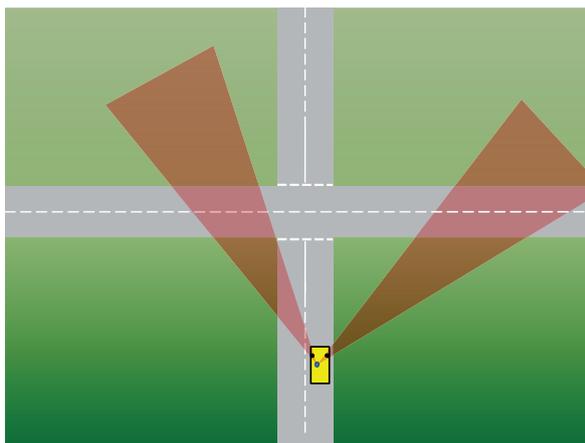


Abbildung 6-27: Situation 2
(freie Kreuzung 1)

Situation 2 (freie Kreuzung 1):

In Situation 2 (Abbildung 6-27) soll die Versuchsperson gezielt die Variante des Nicht-Entdeckens von Querverkehr auch als korrekt erfasste Möglichkeit erleben. Bei den Versuchspersonen soll keinesfalls der Eindruck entstehen, in jeder Kreuzungssituation sei Querverkehr zu erwarten. In dieser Situation kann die Charakteristik jeder Versuchsperson bei der Annäherung an eine freie Kreuzung beobachtet werden.

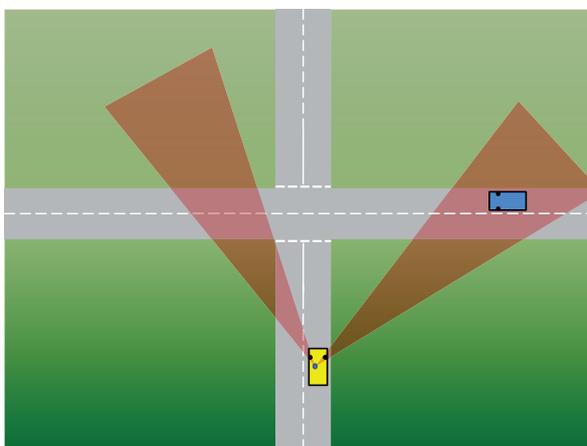


Abbildung 6-28: Situation 3
(Sichtschatten rechts 1)

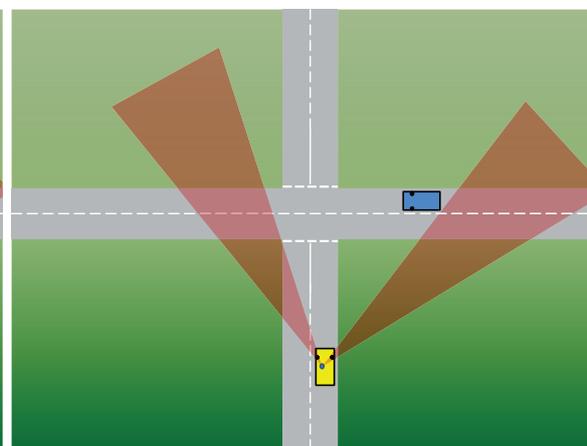


Abbildung 6-29: Situation 4
(sichtbar rechts)

Situation 3 (Sichtschatten rechts 1):

In Situation 3 (Abbildung 6-28) wird erstmals ein vorfahrtsberechtigtes Fahrzeug im Querverkehr eingesetzt, das sich im Sichtschatten der rechten A-Säule des Fahrzeugs befindet. In normaler Fahrhaltung der Versuchsperson ist es vollständig ver-



deckt. Aufgrund einer Synchronisierung der Annäherungsgeschwindigkeit zum Ego-Fahrzeug der Versuchsperson verbleibt es auch bei Verzögerung oder Beschleunigung in dieser konflikträchtigen Verdeckungsposition. Das programmierte Verhalten des querenden Fahrzeugs hinsichtlich Abstand zur Kreuzung, Geschwindigkeit und Verzögerung entspricht dem in Kapitel 5.6 beschriebenen Zusammenhang.

In dieser Situation sind die Annäherungsgeschwindigkeit, das Blickverhalten und vor allem das Bewegungsverhalten der Versuchsperson von Interesse. Zentrale Frage dabei ist, ob und wann ein Fahrer das andere Fahrzeug entdeckt.

Situation 4 (sichtbar rechts):

Situation 4 (Abbildung 6-29) ähnelt sehr stark der vorangegangenen Situation. Auch hier bewegt sich das von rechts annähernde Fahrzeug synchronisiert zum eigenen Fahrzeug und befindet sich dadurch durchgehend in stehender Peilung. Gravierender Unterschied dabei ist jedoch, dass sich das Fahrzeug im Querverkehr nun nicht in der Verdeckung der A-Säule befindet, sondern für die Versuchspersonen vollständig durch die Frontscheibe direkt links neben der rechten A-Säule sichtbar ist. Durch die Position in Stehender Peilung findet eine relative Bewegung des Fahrzeugs zum Fahrerauge statt. Es vergrößert dabei kontinuierlich und langsam seine sichtbare Silhouette.

Beobachtungsgegenstand sind auch hier Annäherungsgeschwindigkeit, Augen- und Kopfbewegung. Das Verhalten in dieser Situation soll mit dem der vorhergehenden direkt verglichen werden.

Situation 5 (ADAC-Kreuzung):

Diese Situation (Abbildung 6-30) unterscheidet sich von allen übrigen Kreuzungen dieser Untersuchung durch die Verdeckung der Sicht auf den rechtsseitigen Bereich der querenden bevorrechtigten Straße durch eine Sichtschutzwand. Obwohl sich hier kein Fahrzeug auf der Querstraße befindet, kann dies die Versuchsperson erst wenige Meter vor der Kreuzung feststellen. Diese Situation entspricht einer Maßnahme, die der ADAC gemeinsam mit Straßenbauämtern in Bayern beim Umbau von Kreuzungen

zungen in das reale Verkehrsgeschehen einbringt. Hiermit soll eine Verringerung von Kreuzungsunfällen erzielt werden.

Diese Situation soll im Fahrsimulator aufzeigen, ob durch diese Maßnahme eine Änderung im Annäherungsverhalten der Versuchspersonen festzustellen ist.

Außerdem sollen die Versuchspersonen nach dem Durchlaufen zweier konfliktträchtiger Kreuzungssituationen durch das Ausbleiben von Querverkehr wieder etwas beruhigt werden.

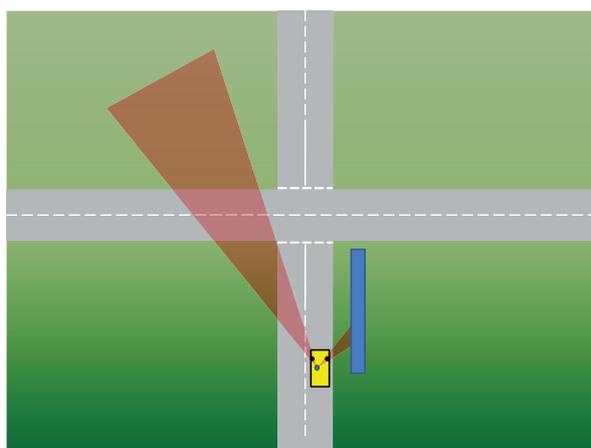


Abbildung 6-30: Situation 5
(ADAC-Kreuzung)

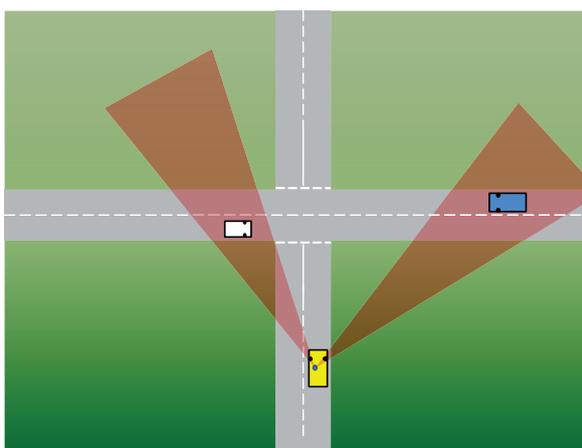


Abbildung 6-31: Situation 6
(Sichtschatten beidseitig)

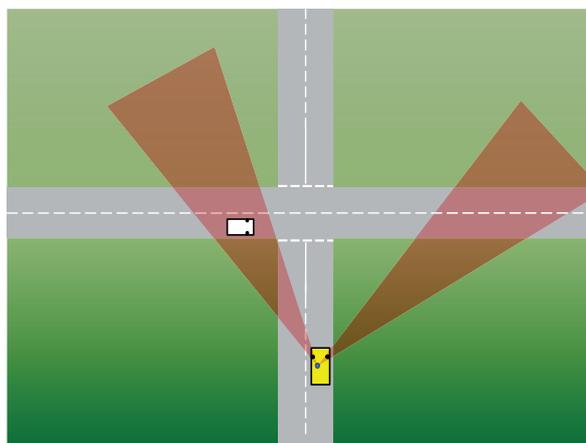


Abbildung 6-32: Situation 7 (Sichtschatten links)

Situation 6 (Sichtschatten beidseitig):

Diese Situation (Abbildung 6-31) stellt wiederum eine verschärfte Konfliktsituation dar. Von beiden Seiten nähert sich jeweils an querendes Fahrzeug. Beide Fahrzeuge



bewegen sich wieder synchronisiert in stehender Peilung der Kreuzung. Beide verbleiben durchgängig im Sichtschatten der A-Säulen.

Auch in dieser Situation ist das Annäherungsverhalten mit Geschwindigkeit Augen- und Kopfbewegung interessant. Es ist weiterhin zu beobachten, welches der beiden Fahrzeuge zu welchem Zeitpunkt von den Versuchspersonen bemerkt wird.

Situation 7 (Sichtschatten links):

Die Situation 7 (Abbildung 6-32) ist spiegelbildlich gleich zur Situation 3 aufgebaut. Das bevorrechtigte Fahrzeug nähert sich synchronisiert im Sichtschatten der linken A-Säule an. Im Vergleich zu Situation 3 sollte das eigene Fahrzeug bei einer Entdeckung einen größeren Abstand zur Kreuzung aufweisen, während das querende Fahrzeug sich näher zur Kreuzung befindet und langsamer fährt, als bei einer Annäherung von rechts.

Situation 8 (freie Kreuzung 2):

Situation 8 stellt eine Wiederholung von Situation 2 (Abbildung 6-27) dar. Hier soll untersucht werden, ob sich durch die vorhergegangenen Kreuzungssituationen möglicherweise eine Veränderung in der Annäherungscharakteristik der Fahrer einstellt.

Situation 9 (Sichtschatten rechts 2):

Auch diese Situation ist wiederum eine Wiederholung von Situation 3 (Abbildung 6-28). Sie dient zur Überprüfung von Lerneffekten gegenüber dem ersten Durchlauf dieses Kreuzungskonfliktes.

6.4.2 Probandenkollektiv

Die Rekrutierung der Versuchspersonen erfolgte wiederum aus dem universitären Umfeld des Lehrstuhls. Von 53 Versuchspersonen, die am Versuch teilnahmen, konnten die Datenaufzeichnungen von 46 Versuchspersonen verwendet werden. Bei sechs Personen wurden aufgrund ihrer weit vorne liegenden Sitzposition die Infra-



rotmarker für die Wii-Controller durch den Dachrahmen des Fahrzeug-Mock-ups partiell verdeckt. Bei einer Versuchsperson war die Datenaufzeichnung der Simulator-Software SILAB gestört.

Zwei der 46 Versuchspersonen haben den Versuch nach Durchfahren der Situation 7 aufgrund von Unwohlsein die Simulatorfahrt abgebrochen. Für die Auswertung des Lerneffektes in Situation 9 stehen somit ihre Daten nicht zur Verfügung, wohl aber für die Auswertung der vorherigen Kreuzungssituationen.

Das Altersspektrum der 11 weiblichen (24%) und 35 männlichen (76%) Versuchspersonen liegt zwischen 19 und 63 Jahren. Der Altersdurchschnitt beträgt 26,0 Jahre mit einer Standardabweichung von 10,2 Jahren. Diagramm 6-33 gibt einen Überblick über die Altersverteilung.

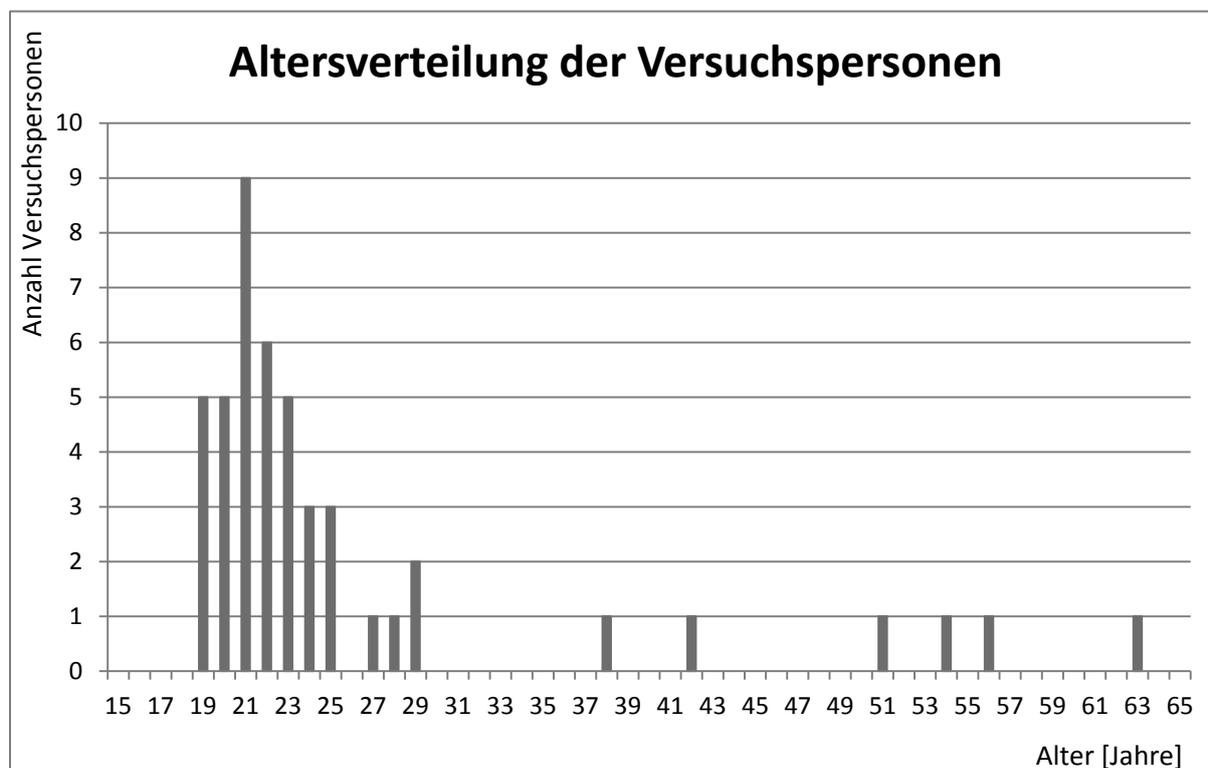


Diagramm 6-33: Altersverteilung der Versuchspersonen

Die Körpergröße der Probanden reicht von 157 cm (10. Perzentil Frau) bis 192 cm (97. Perzentil Mann) bezogen auf das Jahr 2010. Die Körperhöhe im Sitzen beträgt zwischen 83cm und 100 cm. Die errechnete Beinlänge erstreckt sich von 72 cm bis 96 cm. Diagramm 6-34 zeigt das Körpermaßspektrum, das für der gewählten Sitzposition zugrunde liegt.

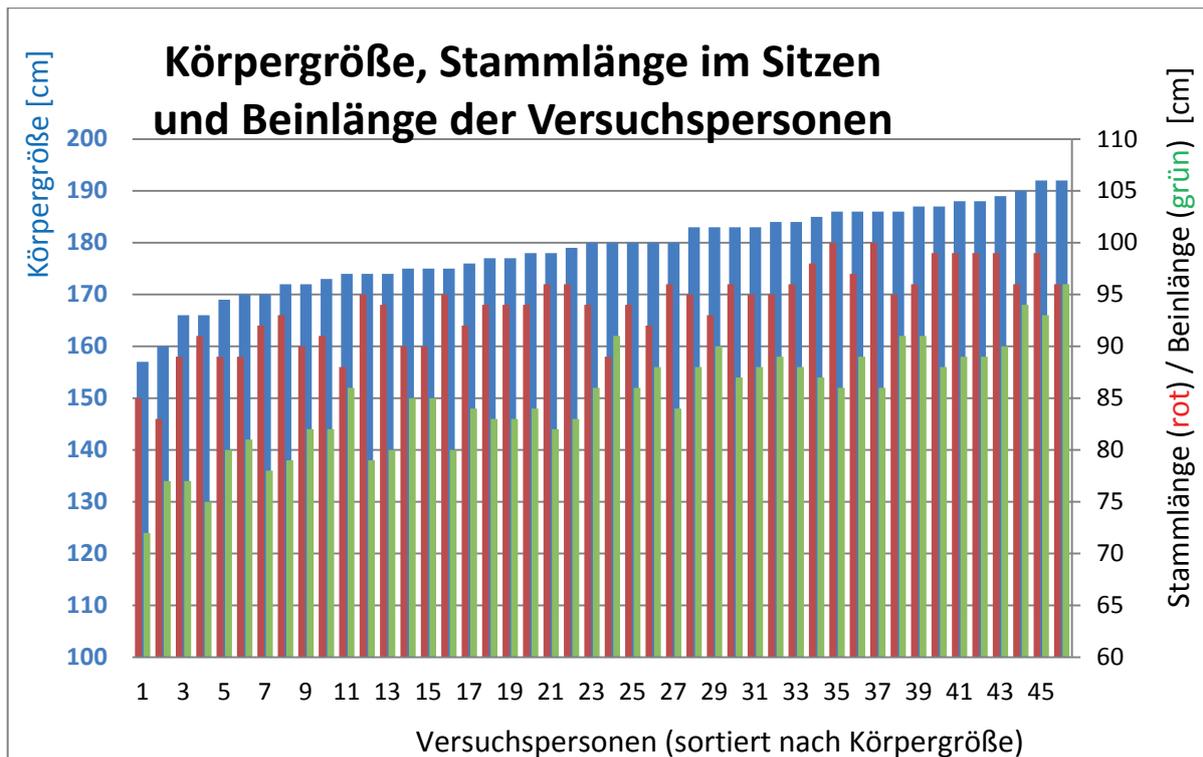


Diagramm 6-34: Verteilung der Körpergrößen der Versuchspersonen

Der Test der Beweglichkeit der Halswirbelsäule zeigt keine Beeinträchtigungen. Alle Versuchspersonen konnten den Kopf mindestens 60° zu beiden Seiten drehen. Die Beweglichkeit lag im Mittel bei $77,9^\circ$ mit einer Standardabweichung von $8,7^\circ$ nach links und $8,1^\circ$ nach rechts.

6.4.3 Ergebnisdarstellung

Es folgt die Auswertung der Aufzeichnungsdaten in Reihenfolge der Kreuzungssituationen:

Auswertung Situation 1 (Querverkehr spiegelbildlich):

In dieser Situation näherten sich die beiden Fahrzeuge im Querverkehr in symmetrischer Richtungspeilung und gleich schnell. Die Auswertung der Blickfilme zeigt, dass die Richtungszuwendungen der ersten Blicke der Versuchspersonen mit 28 mal linksseitig und 25 mal rechtsseitig nahezu gleich verteilt war. Die in der Auswertung der Blickfilme zu bestätigenden Entdeckungen der Fahrzeuge aufgrund einer eindeu-



tigen Fixierung waren in dieser Situation 18 mal linksseitig und 20 mal rechtsseitig. In 84% der eindeutig entdeckten Fahrzeuge stimmt die Erstentdeckung mit der ersten Blickzuwendung überein.

Ein Einfluss der Augendominanz auf die Richtungszuwendung oder die Entdeckung ist nicht zu erkennen.

Auswertung Situation 2 (freie Kreuzung 1):

In dieser Situation erfolgte kein Konfliktereignis mit querendem Verkehr. Allerdings ist in dieser Situation die jeweilige Annäherungsstrategie der Versuchspersonen an die Kreuzung zu beobachten. Anhand der aufgezeichneten Geschwindigkeitsprofile der Versuchspersonen mit den synchronisierten Blickfilmen des Eye Trackings lassen sich dadurch zwei charakteristische Strategien der Annäherung erkennen:

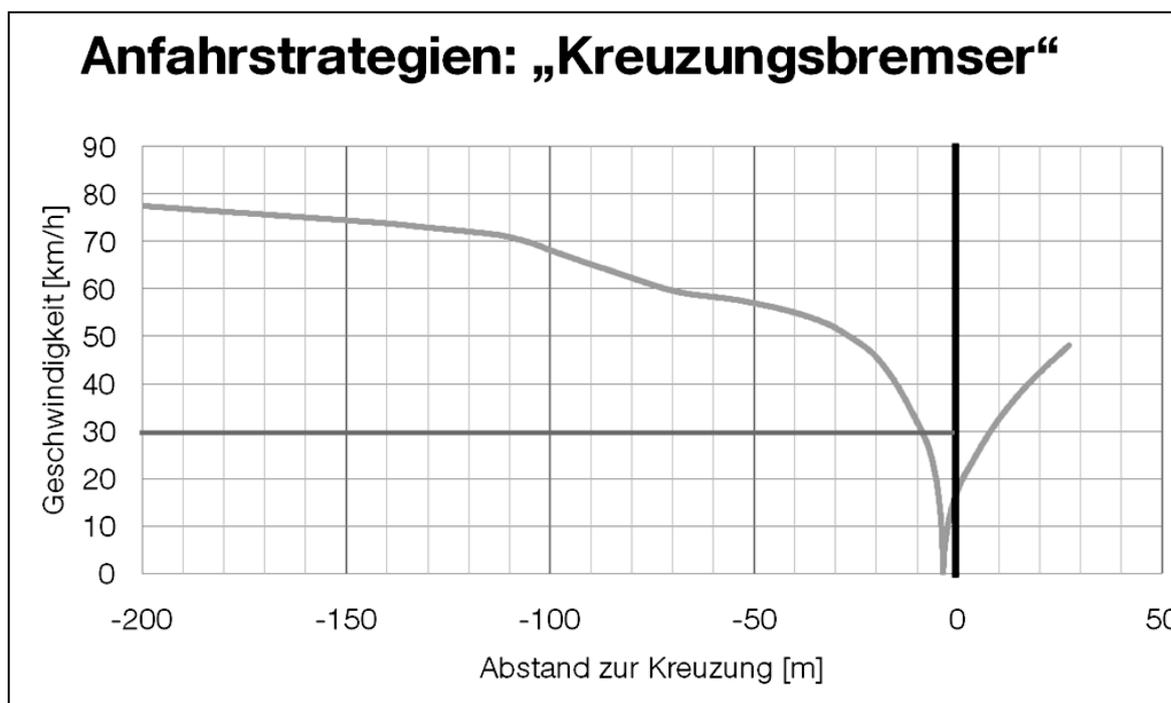


Diagramm 6-35: Geschwindigkeitsprofil bei der Kreuzungsannäherung eines „Kreuzungsbremser“

- Die Strategie des einen Typus kennzeichnet sich dadurch, dass während der Annäherung an die Querstraße stark, teilweise bis zum Stillstand abgebremst wird. Als charakteristische Grenze wird die Unterschreitung von 30 km/h herangezogen. Diagramm 6-35 stellt das charakteristische Geschwindigkeitsprofil

der Annäherung einer Versuchsperson des dieses Typs dar. Viele der Fahrer, die diese Annäherungsstrategie praktizieren, beobachten erst in kurzem Abstand zur Kreuzung konsequent die Querstraße und schauen zuvor hauptsächlich in die eigene Fahrspur. Die Fahrer mit dieser Annäherungsstrategie werden hier im Folgenden als „Kreuzungsbremser“ bezeichnet. In der Situation 2 praktizieren 10 der 46 Versuchspersonen (22%) diese Strategie. 9 der 10 Versuchspersonen verfolgen diese Strategie über den gesamten Versuchsverlauf und bleiben dadurch ohne Kreuzungskonflikte.

- Die Strategie des anderen Typus basiert auf einer Beobachtung der Querstraße bereits in sehr großem Abstand zur Kreuzung. Wird dabei kein Querverkehr entdeckt, so dass eine vermeintlich risikolose Querung möglich ist, erfolgt nur eine geringe Reduzierung der Fahrtgeschwindigkeit und ein Passieren der Kreuzung in relativ hohem Tempo. Der Fahrertypus mit dieser Annäherungsstrategie wird im Folgenden als „Kreuzungshuscher“ bezeichnet. Diagramm 6-36 verdeutlicht den Geschwindigkeitsverlauf einer Versuchsperson dieser Strategie bei der Annäherung an die Kreuzung. In der Situation 2 praktizieren 36 der 46 Versuchspersonen (78%) diese Strategie.

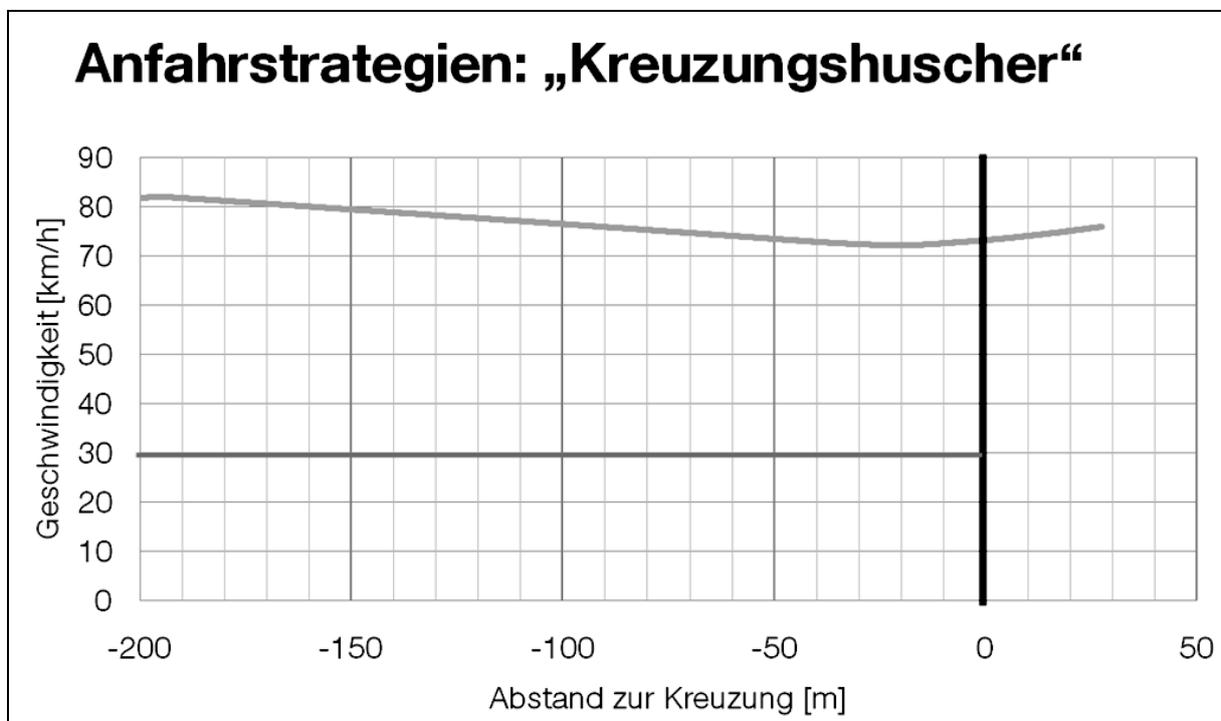


Diagramm 6-36: Geschwindigkeitsprofil bei der Kreuzungsannäherung eines „Kreuzungshuschers“



Der statistische Vergleich der beiden Versuchspersonengruppen zeigt dass die „Kreuzungshuscher“ in einem mittleren Abstand von 186 m (bei einer Standardabweichung von 79 m), die Kreuzungsbremser erst bei 141 m (bei einer Standardabweichung von 100 m) in dieser Situation ihren ersten Beobachtungsblick nach Querverkehr tätigen. Ein Alpha-Fehler von 0,065 verfehlt die Signifikanzgrenze von 5% nur knapp.

Auswertung Situation 3 (Sichtschatten rechts 1):

Das im Sichtschatten der rechten A-Säule annähernde Fahrzeug wurde in dieser Situation von 26 der 46 Versuchspersonen (57%) nicht entdeckt. Sie überfuhren die Kreuzung, ohne Vorfahrt zu gewähren. In der Simulation wurde das vorfahrtberechtigte Fahrzeug jeweils unmittelbar vor Erreichen der Kreuzung abrupt angehalten, um den Versuchspersonen im Hinblick auf die folgenden Versuchssituationen das Kollisionserlebnis zu ersparen. In der Realität wäre in diesen Fällen jeweils ein schwerer Unfall der beiden Fahrzeuge, mutmaßlich mit erheblichen Personenschäden, unvermeidbar gewesen.

Nur 20 Versuchspersonen (43%) hielten an und gewährten die Vorfahrt. Dabei ist zu bemerken, dass alle 10 Versuchspersonen, die anhand der Situation 2 dem Typus des „Kreuzungsbremser“ zugeordnet wurden, den Querverkehr ordnungsgemäß passieren ließen.

Um das Fahrzeug bereits frühzeitig während der Annäherung im Sichtschatten der rechten A-Säule entdecken zu können, mussten die Versuchspersonen eine translatorische Kopfbewegung vornehmen und seitlich an der A-Säule vorbei in den eigentlich verdeckten Bereich sehen. Dies wäre auch in der gemessenen Bewegungsaktivität des Kopfes zu erkennen. Auf diesen Zusammenhang wird später eingegangen.

Auswertung Situation 4 (sichtbar rechts):

In dieser Situation erkennen 14 der 46 Versuchspersonen (30%) das annähernde Fahrzeug nicht, obwohl es für alle Fahrer kontinuierlich in der Frontscheibe sichtbar gewesen ist, und verletzen die Vorfahrt. Es sind also trotz Sichtbarkeit noch mehr als



die Hälfte der Versuchspersonenzahl der Situation zuvor. Diese hohe Zahl der Konflikte weist darauf hin, dass nicht allein eine Sichtverdeckung zum Übersehen von Verkehrsteilnehmern führt, sondern auch trotz optischer Sichtbarkeit im visuellen Wahrnehmungsprozess in hoher Zahl gravierende Fehler entstehen! Eine Interpretation des Sichtverhaltens wird im folgenden Abschnitt erfolgen.

Für die Versuchspersonen, die das Fahrzeug entdeckt haben, ist ein möglicher Lerneffekt aus der vorhergehenden Situation sehr unwahrscheinlich, da dort aufgrund des programmierten Anhaltens des Konfliktfahrzeugs in keiner Weise auf das Übersehen hingewiesen wurde.

Auswertung Situation 5 (ADAC-Kreuzung):

Da sich in dieser Situation kein Querverkehr befindet, der zum Konflikt führen kann, konzentriert sich die Auswertung allein auf das Geschwindigkeitsverhalten bei der Annäherung. Die gezielte Verdeckung der Querstraße durch die Sichtschutzwand führt dazu, dass nur noch 2 von 46 Versuchspersonen (4%) die Strategie des „Kreuzungshuschers“ praktizierten und 44 Versuchspersonen (96%) nur mit geringer Endgeschwindigkeit an den Kreuzungspunkt heranzufahren, um nach Querverkehr Ausschau zu halten.

Auswertung Situation 6 (Sichtschatten beidseitig):

16 der 46 Versuchspersonen (37%) entdecken in dieser Situation weder im linken noch im rechten Sichtschatten die beiden annähernden Fahrzeuge, verletzen das Vorfahrtsrecht und überqueren die Kreuzung.

Bei der Auswertung dieser Situation ist festzustellen, dass eine Reihe von Versuchspersonen beim Überqueren ihren Fehler wahrgenommen haben muss.

Auswertung Situation 7 (Sichtschatten links):

Das Fahrzeug, das sich im Sichtschatten der linken A-Säule näherte, wurde nur von 3 Versuchspersonen (7%) übersehen. In dieser Situation ist ein erheblicher Lerneffekt



fekt aus der vorhergehenden Situation festzustellen. Viele Versuchspersonen suchten aktiver als zuvor.

Auswertung Situation 8 (freie Kreuzung 2):

Diese Situation entspricht einer Wiederholung der Situation 2. Da inzwischen zwei Versuchspersonen den Versuch wegen Unwohlsein abbrechen mussten, sind noch 44 Versuchspersonen auszuwerten. 24 Versuchspersonen agieren als ‚Kreuzungsbremser‘ (55%), lediglich 20 Personen als ‚Kreuzungshuscher‘ (45%). Alle 10 ‚Kreuzungsbremser‘ der Situation 2 verfolgen hier wiederum diese Strategie, wobei einer davon zwischendurch gewechselt hatte.

Die Zunahme der Personenzahl gegenüber Situation 2 ist eindeutig durch die Entdeckung von Querverkehr in vorausgegangenen Situationen als Lerneffekt festzustellen.

Des Weiteren weist die Analyse der Kopfbewegung eine vergrößerte Kopfbewegung bei den meisten verbliebenen ‚Kreuzungshuschern‘ aus. Die Bewegungsaktivität nahm im Mittel um 85% zu.

Auswertung Situation 9 (Sichtschatten rechts 2):

Die abschließende Situation stellt wiederum eine Wiederholung der Situation 3 dar. Das Fahrzeug im Sichtschatten der rechten A-Säule wurde von 10 der nunmehr 44 Versuchspersonen (27%) nicht entdeckt. 32 Versuchspersonen (73%) nahmen das Fahrzeug wahr und gewährten Vorfahrt. Die Erkennungsrate liegt in dieser Wiederholung also um 30% höher als in der Situation 3. Diese Steigerung ist auf den Lerneffekt zurückzuführen.

Situation 9 zeigt jedoch auch eine höhere Zahl von Konflikten als die vorige Konfliktsituation 7. Diese Verschlechterung lässt sich teilweise damit erklären, dass ein Fahrzeug hinter der rechten A-Säule schwieriger zu entdecken ist, als hinter der linken A-Säule. Außerdem trägt auch die vorherige konfliktfreie Situation zu einer Reduzierung der Vorsicht der Versuchspersonen bei.



Auswertung über den gesamten Versuchsablauf:

Diagramm 6-37 verdeutlicht die Veränderung der Versuchspersonen, die in den fünf Konfliktsituationen Vorfahrt gewähren (grüne Farbmarkierung) beziehungsweise die Vorfahrt verletzen (rote / orange Farbmarkierung). Die Situationen 2, 5 und 8 sind in diesem Diagramm nicht enthalten, da diese beiden Situationen wegen des fehlenden Querverkehrs grundsätzlich konfliktfrei sind. Die jeweils intensiveren Farbtöne kennzeichnen die Versuchspersonenzahl die ihr Verhalten bis zum Ende der Versuchsreihe nicht mehr verändern. Von Situation zu Situation zeigen bis zu 14 Versuchspersonen (30%) eine Veränderung ihrer Fahrzeugerkennung.

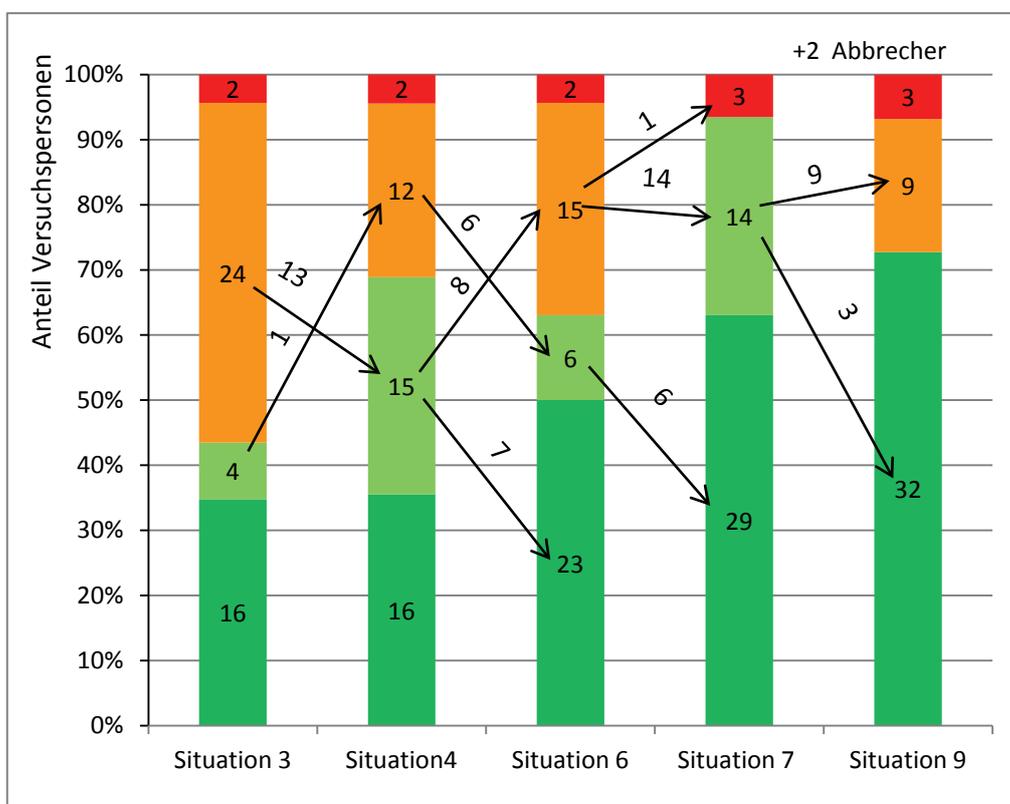


Diagramm 6-37: Anzahl der konfliktbehafteten (hell- & dunkelrot) und konfliktfreien (hell- & dunkelgrün) Versuchspersonen; die beiden dunkleren Farbtöne zeigen ein stabiles Verhalten bis zum Versuchsende

In der Betrachtung des gesamten Versuchsdurchlaufes kommt den Situationen 2 und 8 (ohne Querverkehr) eine besondere Bedeutung zu. Anhand dieser beiden Situationen lassen sich die Versuchspersonen in ihrem Verhalten typisieren. Wie bereits beschrieben, kann anhand der Annäherungsgeschwindigkeit und des Blickverhaltens



die Strategie des ‚Kreuzungsbremser‘ und die des ‚Kreuzungshuscher‘ unterschieden werden.

In der Betrachtung der Anzahl der Kreuzungskonflikte ist herauszustellen, dass 9 von 10 Versuchspersonen, die in Situation 2 als ‚Kreuzungsbremser‘ identifiziert wurden und bei dieser Strategie blieben, im weiteren Versuchsverlauf keine einzige Konfliktsituation hatten!

Die Gruppe der ‚Kreuzungshuscher‘ (laut Situation 2) hat einen Mittelwert von 2,0 Kreuzungskonflikten von maximal 5 möglichen und eine Standardabweichung von 1,5. Die Gruppe der ‚Kreuzungsbremser‘ besitzt im Mittel 0,2 Kreuzungskonflikte bei einer Standardabweichung von 0,7. Das Diagramm 6.4.2-6 bildet dies grafisch ab. Der einseitige t-Test für unverbundene Stichproben weist mit einem α -Fehler von 0,001 einen signifikanten Unterschied aus, wie in der Tabelle 6-39 wiedergegeben ist. Dies ist ein Beleg dafür, dass Fahrer des Typus ‚Kreuzungsbremser‘ weniger häufig in vergleichbaren Kreuzungskonfliktsituation anzutreffen sind.

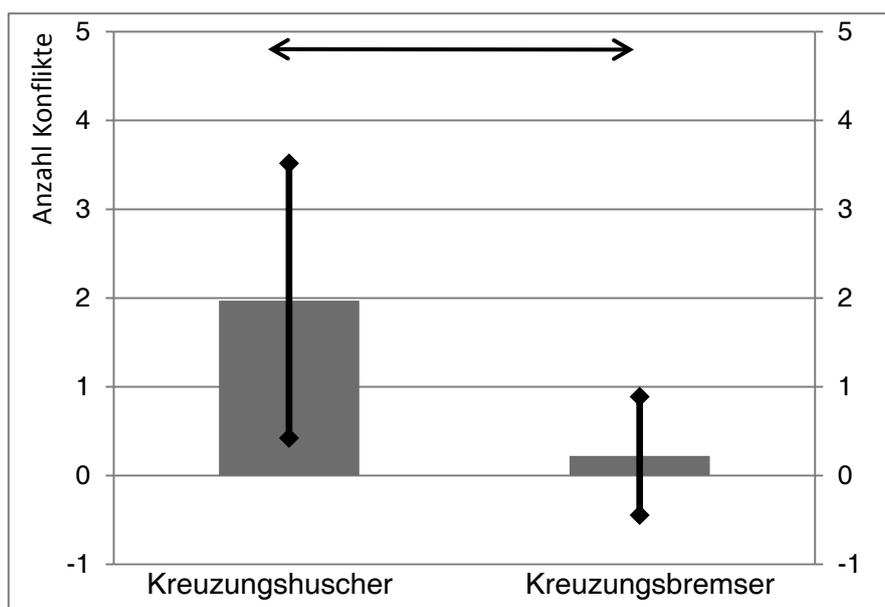


Diagramm 6-38: Anzahl der Kreuzungskonflikte der beiden Annäherungsstrategien

	Kreuzungs- huscher	Kreuzungs- bremser
Mittelwert [Anzahl]	2,0	0,2
Standardabweichung	1,5	0,7
α -Fehler	0,0010	

Tabelle 6-39: Anzahl der Kreuzungskonflikte der beiden Annäherungsstrategien



Allerdings haben sieben Versuchspersonen ebenso ohne jeden Kreuzungskonflikt die Versuchsreihe absolviert, die in Situation 2 als ‚Kreuzungshuscher‘ kategorisiert wurden. Das zeigt, dass nicht allein der Typus der Annäherungsstrategie entscheidend für die erfolgreiche Bewältigung der konflikträchtigen Kreuzungen sein kann.

Bedenklich ist die Tatsache, dass zwei Versuchspersonen (4,3%) keines der sechs Fahrzeuge in den fünf Verdeckungssituationen wahrgenommen haben! Auch diese Versuchspersonen haben den Versuch durchaus motiviert und konzentriert absolviert. Das Risiko im realen Straßenverkehr erscheint für diese Personen und ihre Umgebung in vergleichbaren Situationen erheblich zu sein.

Ebenfalls bemerkenswert ist die Tatsache, dass insgesamt 72 von 227 Konfliktsituationen, also 33%, nicht von den Versuchspersonen gemeistert werden konnten. Dies lässt hoffen, dass diese konstruierten Situationen mit hohem Risikopotential in der Realität möglichst selten eintreffen mögen.

Auswertung des Kopfbewegungsverhaltens:

Die in Kapitel 6.1 formulierte Kernhypothese erwartet ein Bewegungsverhalten des Fahrers, um eine verbesserte Sicht in die Verdeckungsbereiche der A-Säulen zu erlangen. Das Kopfbewegungsverhalten hinsichtlich der Suchblicke der Versuchspersonen kann besonders gut in den Situationen 2 und 8 analysiert werden, da dort kein Gefahrenobjekt auftaucht und das Suchverhalten beeinflusst.

Da allerdings die beiden unterschiedlichen Verhaltensstrategien große Unterschiede im Bewegungsverhalten der Suchblicke bewirkt, wird eine separierte Analyse des Typus ‚Kreuzungshuscher‘ vorgenommen. Nur bei Versuchspersonen mit diesem Typus sind deutliche Unterschiede in der Wahrnehmungsquote festzustellen.

In Situation 2 können 36 Versuchspersonen mit diesem Typus untersucht werden. Eine starre Kopfhaltung wie bei einzelnen Versuchspersonen der ersten Versuchsreihe war nicht anzutreffen, da ein Blick zur rechten A-Säule ohne Kopffotation undurchführbar ist. In dieser Versuchsreihe sind sowohl Versuchspersonen mit reiner Rotationsbewegung, als auch mit überlagerter Rotations- und Translationsbewegung beteiligt. Da die Rotationsbewegung des Kopfes keine Sichtverbesserung in den Schattenbereich der A-Säule bewirkt, wird die translatorische Bewegungsaktivität als Merkmal betrachtet. Als Maß für die Bewegungsaktivität einer Versuchsperson wird



die Standardabweichung der Koordinaten des Mittelpunktes der beiden Augen während des Verlaufes der Situation gewählt.

Die Analyse der Kopfbewegungsaktivität der ‚Kreuzungshuscher‘ in Situation 2 zeigt einen Unterschied zwischen den beiden Personengruppen, die in Situation 3 die Querverkehr erkannt haben, und denen, die ihn übersahen. Die Kopfbewegungsaktivität war mit 16,1 mm zu 7,7 mm im Mittel doppelt so groß.

Diagramm 6-40 und Tabelle 6-41 geben die die statistischen Daten dazu wider. Der einseitige t-Test für unverbundene Stichproben weist mit einem α -Fehler von 0,005 einen signifikanten Unterschied aus.

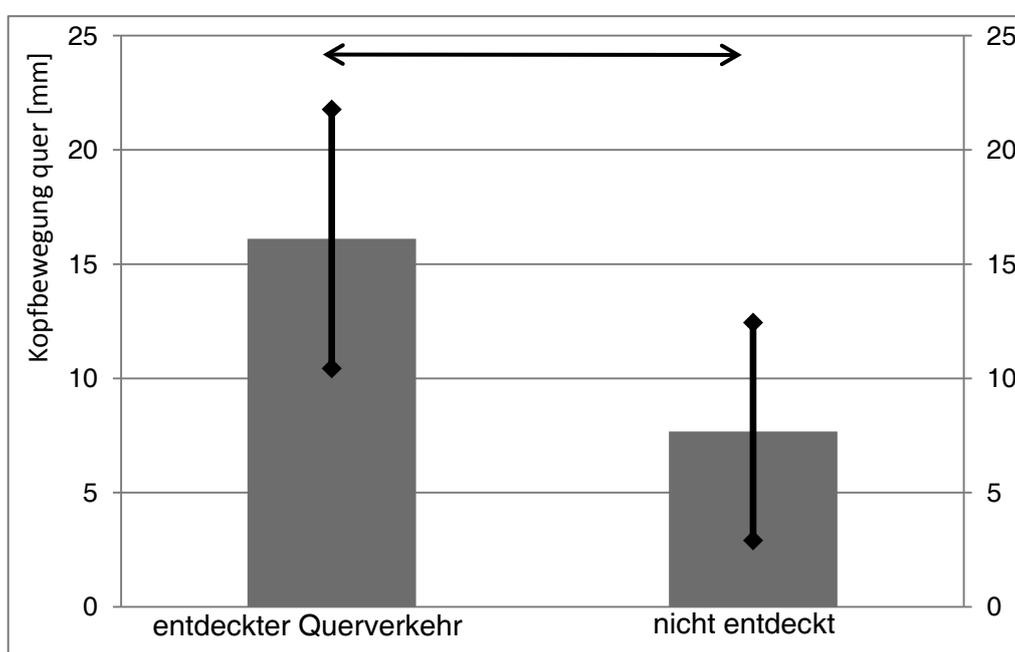


Diagramm 6-40: Kopfbewegungsaktivität quer zur Fahrtrichtung bei ‚Kreuzungshuschern‘ zu Anfang des Versuchs (Situation 2 / 3)

	entdeckter Querverkehr	nicht entdeckt
Mittelwert [mm]	16,1	7,7
Standardabweichung	5,7	4,8
α -Fehler	0,0005	

Tabelle 6-41: Kopfbewegungsaktivität quer zur Fahrtrichtung bei ‚Kreuzungshuschern‘ zu Anfang des Versuchs (Situation 2 / 3)

Die Betrachtung der Kopfbewegungsaktivität quer zur Fahrtrichtung der ‚Kreuzungshuscher‘ in Situation 2 im Vergleich zu ihrer Quote von Kreuzungskonflikten in der Versuchsreihe weist eine hohe negative Korrelation von -0,65 aus. Dies



kann als deutlicher Hinweis auf den Erfolg von Kopfbewegungen während der Suchblicke gewertet werden.

Der Zusammenhang ist in Diagramm 6-42 dargestellt.

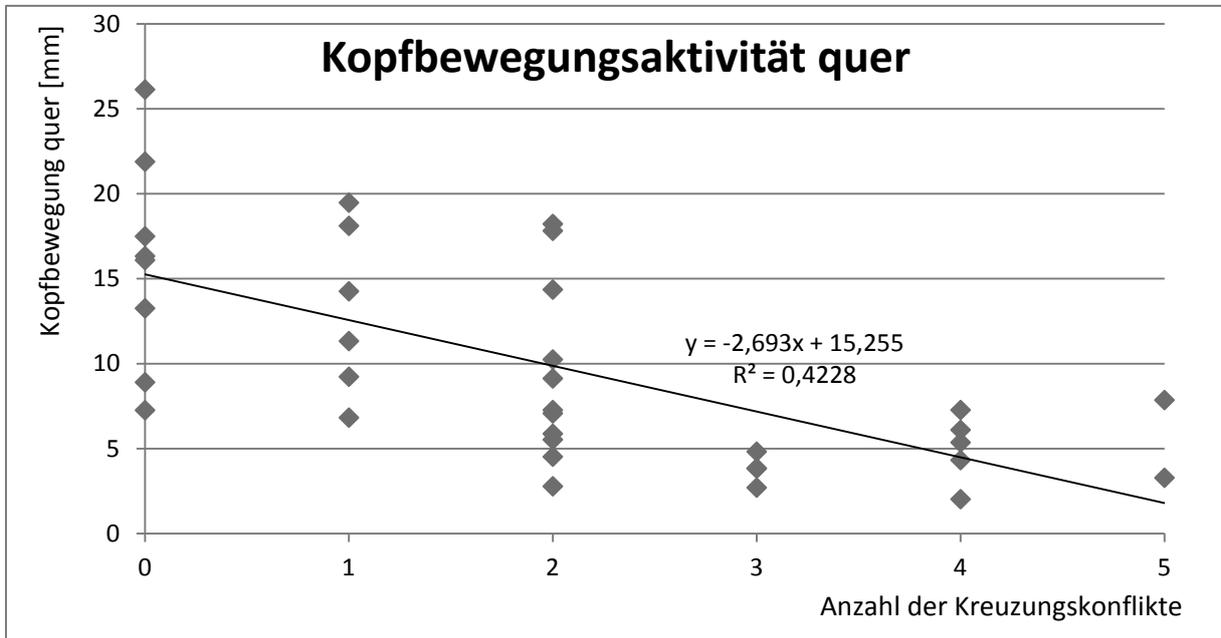


Diagramm 6-42: Kopfbewegungsaktivität quer zur Fahrtrichtung bei ‚Kreuzungshuschern‘ im Vergleich zur Anzahl der Kreuzungskonflikte über die Versuchsreihe

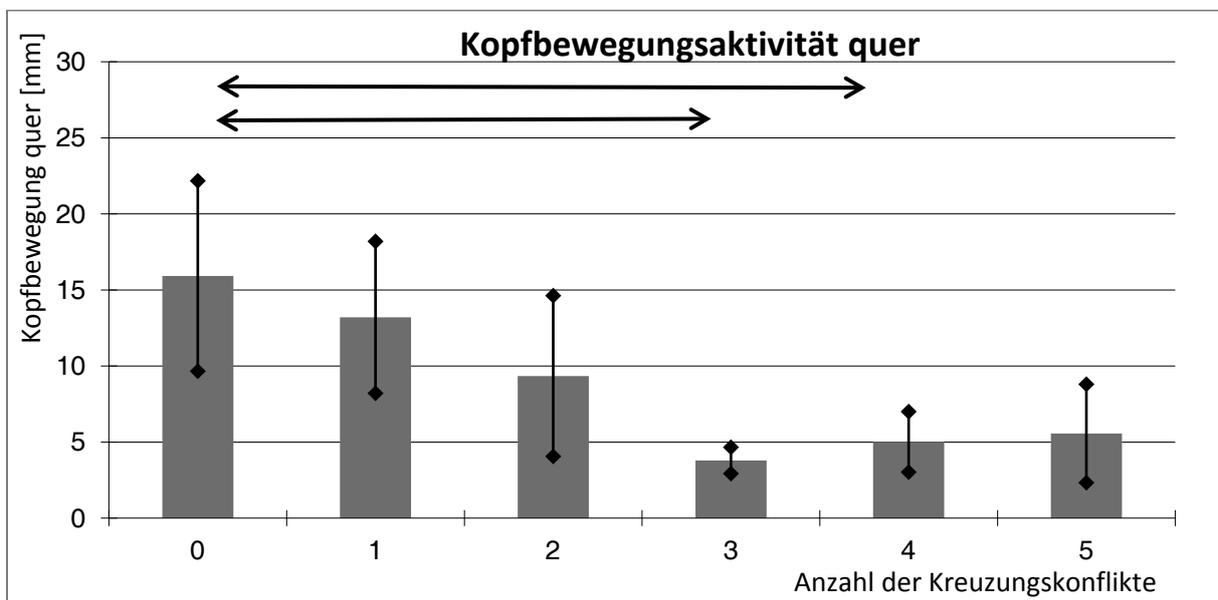


Diagramm 6-43: Mittelwerte der Kopfbewegungsaktivität quer zur Fahrtrichtung bei ‚Kreuzungshuschern‘ in Gruppen nach Fehleranzahl



Allerdings kann eine signifikante Unterscheidbarkeit der Kopfbewegungsaktivität in Bezug auf die Häufigkeit der Kreuzungskonflikte mittels einer Varianzanalyse lediglich nur für zwei Gruppen eindeutig bestätigt werden (Diagramm 6-43). Die Anzahl der Versuchspersonen pro Fehlergruppe ist zu gering, um den beobachteten Effekt statistisch zu bestätigen.

6.4.4 Interpretation und Hypothesenüberprüfung

Die Ergebnisse dieser Versuchsreihe mit Querverkehr im Sichtschatten der A-Säulen bei der Annäherung an Überlandkreuzungen zeigen relativ viele Fälle von unterbliebener oder eingeschränkter Wahrnehmung der vorfahrtsberechtigten Verkehrspartner. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Annäherungssituationen bei erzwungenen Entfernungs- und Geschwindigkeitskombinationen erfolgte. Dennoch weisen die Ergebnisse auf ein hohes Gefahrenpotential hin, denn diese Konstellationen treffen in einer bestimmten Wahrscheinlichkeit, im realen Verkehrsgeschehen tatsächlich ein. Aus einer solchen Situation entstehende Unfälle beinhalten ein hohes Verletzungsrisiko für die Fahrzeuginsassen.

Bemerkenswert für die Risikoentstehung ist, dass sich die Fahrer der Möglichkeit des Übersehens nicht bewusst sind. Sie beobachten die Querstraßen ausführlich und in Ihrem visuellen Gedächtnis wird die Querstraße als frei wahrgenommen. Diese Fehlwahrnehmung wird vermutlich durch Verarbeitungsfunktionen im Gehirn erzeugt, die als ‚Gesetz der Geschlossenheit‘ und ‚Gesetz der guten Fortführung‘ bekannt sind und räumliche Unterbrechungen der Sicht sinnvoll ergänzen (vergleiche Kapitel 2.4).

Die Ergebnisse von Situation 4 machen darüber hinaus deutlich, dass die reine Sichtbarkeit eines Objektes ein notwendiges jedoch kein hinreichendes Kriterium für die Sichtwahrnehmung durch den Fahrer ist. Im Falle einer stehenden Peilung eines Objektes entsteht auch bei einer Sichtbarkeit des Fahrzeugs kein optischer Fluss. Deshalb wird im peripheren Sehen kein Bewegungsreiz induziert und das foveale Sehen kann allenfalls durch aktive Blickzuwendung in diesem Sichtfeldbereich, also Fixierung, das Fahrzeug erfassen. In realen Verkehrssituationen können sich im Blickfeld des Fahrers weitere bewegte Objekte befinden. In diesem Fall würde die

Wahrnehmung eines Objektes in stehender Peilung aufgrund eines weiteren konkurrierenden Objektes mit einem anderen, dominierenden Bewegungsreiz zusätzlich beeinträchtigt werden. Dieser Effekt wird als ‚bewegungsinduzierte Blindheit‘ bezeichnet.

Die Verarbeitung der visuellen Wahrnehmung im Gehirn des Menschen impliziert im Falle einer Nicht-Wahrnehmung eines gefährlichen Objektes ein Nicht-Vorhandensein desselben. „Was ich nicht sehe, ist auch nicht da!“ Dieser induktive Schluss ist nicht objektiv logisch. Würde unser Gehirn jedoch anders funktionieren und eine vollständige Wahrnehmung seiner Umgebung verlangen, wäre der Mensch aufgrund seiner lückenhaften optischen Wahrnehmung nicht entscheidungsfähig und somit zum ständigen Zaudern verdammt.

Dennoch können den Menschen durch Lernen Fähigkeiten vermittelt werden, die das unterbewusste Handeln ergänzen und sie vor gefährlichen Fehlern schützen.



Abbildung 6-44: ‚Soft Target‘, ein antriebener Luftsack in Gestalt eines Fahrzeugs zur gefahrlosen Erprobung von Fahrerassistenzsystemen auf Teststrecken, wäre auch für Fahrsicherheitstrainings mit Kollisionsgefahr sinnvoll einsetzbar (Quelle: the Engineer)

In der Fahrschul Ausbildung für den Führerschein von Straßenverkehrsfahrzeugen in Deutschland ist die drohende Kollisionsgefahr durch Fahrzeuge im Sichtschatten der A-Säule in stehender Peilung kein spezielles Ausbildungsthema. Für eine nachhaltige Schulung dieser latenten Gefahr wäre ein Fahrsimulator gut geeignet, da in ihm,



wie in der durchgeführten Versuchsreihe, gefahrlos entsprechende Situationen absolviert werden können. Ein praktisches Fahrsicherheitstraining solcher kombinierter Kreuzungsannäherungen mit Sichtverdeckungen in der Realität wäre mit einigem technischen Aufwand ebenfalls möglich. Dabei könnte auf einem speziellen Trainingsgelände beispielsweise ein sogenanntes Soft Target, ein aufblasbarer Luftsack in Gestalt eines Fahrzeugs, bei der Annäherung eines Trainingsteilnehmers auf eine Kreuzung mit präzisiertem Timing im Sichtschatten der A-Säule auf die Kreuzung zubewegt werden. Im Fall, dass der Trainingsteilnehmer die Annäherung dieses Dummy-Fahrzeugs nicht bemerkt, würde eine gefahrlose Kollision des eigenen Fahrzeugs mit diesem Luftsack erfolgen. Solche sogenannten Soft Targets, wie in Abbildung 6-44 dargestellt, werden bereits zur Erprobung von Fahrerassistenzsystemen auf den Testgeländen der Fahrzeughersteller eingesetzt.

Neben der hohen Zahl von Fehlwahrnehmungen zeigt die Versuchsreihe ebenso sehr positive Aspekte im Sinne der Verkehrssicherheit auf. Über den Versuchsverlauf konnten zwei starke Lerneffekte beobachtet werden, die beide förderlich für das konfliktfreie Überqueren der Kreuzung, also der Verkehrssicherheit, sind:

Zum einen kann festgestellt werden, dass von Situation 2 zu Situation 8 der Anteil der Versuchspersonen, die die sichere Strategie des ‚Kreuzungsbremers‘ wählten, von 22% auf 55% zunahm. Das bedeutet eine Vergrößerung dieser Gruppe um 150%! Diese Strategie erleichtert den Fahrern eine konfliktfreie Überquerung der Querstraße deutlich, da dadurch die Möglichkeit eines Fahrzeugs in Stehender Peilung minimiert wird.

Zum anderen ist als zweiter Lerneffekt die erhöhte Bewegungsaktivität des Kopfes zu erkennen. Versuchspersonen mit einer hohen Anzahl von Kreuzungskonflikten weisen eine tendenziell geringere Bewegungsaktivität auf. Bei allen Versuchspersonen vom Typ Kreuzungshuscher, die zum Ende der Versuchsreihe die Kreuzung konfliktfrei passieren, ist ihre Bewegungsaktivität in Querrichtung angestiegen.

Im Hinblick auf die Überprüfung der Hypothesen von Kompensationsbewegungen der Fahrer bei Sichtverdeckungen zeigen die Ergebnisse beider Versuchsreihen ein uneinheitliches Bild. Während ein Teil der Versuchspersonen wie



erwartet ein deutliches Kompensationsverhalten zeigte, um den gravierenden Sichtbehinderungen durch die A-Säule während der Versuchsfahrten auszuweichen, zeigte sich ein anderer Teil der Versuchspersonen in ihrem Verhalten von der Sichtbehinderung nur wenig beeinflusst. Einflüsse der Augendominanz konnten nur in geringem Umfang erkannt werden. Einflüsse des Alters oder der Fahrerfahrung waren nicht feststellbar.

Das Verhalten der Versuchspersonen führt zu dem Schluss, dass die objektiv hohe Beeinträchtigung der Sicht aufgrund der visuellen Wahrnehmungsverarbeitung im menschlichen Gehirn subjektiv weniger gravierend wahrgenommen wird, also ein geringes Risikobewusstsein besteht. Die durch Sichtverdeckung entstehenden Informationslücken werden durch psychische Bildverarbeitungsmechanismen ergänzt, so dass physische Kompensationsmaßnahmen nicht zwangsläufig erfolgen.

6.5 Zusammenfassung des Kapitels

Kapitel 6 beschreibt zwei Versuchsreihen in einem statischen Fahrsimulator zur experimentellen Untersuchung des Fahrerverhaltens bei Sichtverdeckungseffekten. Die erste Versuchsreihe betrachtet das Verhalten des Fahrers bei der Beeinträchtigung der Streckenvorausschau auf Linkskurven durch die linke A-Säule des Fahrzeugs. Die zweite Versuchsreihe konfrontiert die Versuchspersonen mit der anhaltenden Verdeckung von bevorrechtigten Fahrzeugen bei der Annäherung an Überlandkreuzungen.

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass nur ein Teil der Versuchspersonen ausgeprägte Such- oder Ausweichbewegungen zeigen. Vielmehr wird deutlich, dass die menschliche Wahrnehmungsverarbeitung vieler Fahrer ihre visuellen Informationslücken überspielt. Bewegungsaktivitäten zur Entdeckung von verdeckten Gefahrenobjekten unterbleiben dadurch vielfach. Wahrnehmungsschwächen werden somit nicht bewusst und deshalb auch nur eingeschränkt kompensiert.

Daneben konnten in den beiden Versuchsreihen mehrere bisher in der Literatur noch nicht beschriebene Verhaltensweisen der Fahrer entdeckt werden. Die Fokussierung des Kurvenblickverhaltens der Versuchspersonen unterscheidet sich charakteristisch und lässt sich so in die vier unterschiedlichen Blicktypen *Innen*, *Außen*, *Links* und



Rechts gliedern. Diese Erkenntnis ist als Erweiterung oder Verfeinerung des bis dato in der Literatur beschriebenen Blickverhaltens in Kurvenfahrten zu sehen.

Ebenso unterscheidet sich das Bewegungsverhalten von Augen und Kopf-Oberkörper unterschiedlicher Fahrer bei der Kurvenfahrt. Dadurch konnte eine starre Haltung von rein rotatorischem sowie einer translatorisch-rotatorischem Bewegungsverhalten unterscheiden werden.

Für die Kreuzungsannäherung sind zwei unterschiedliche Strategien zu identifizieren. Auch hier hat das individuell unterschiedliche Bewegungsverhalten der Fahrer einen wesentlichen Einfluss auf die Wahrnehmungsqualität.



7 Diskussion und Ausblick

In den vorhergehenden Kapiteln 1 bis 6 wurde die die Thematik der Sichteinschränkungen im Fahrzeug aus unterschiedlichen Blickwinkeln analysiert. Hinsichtlich des Ziels dieser Arbeit, die Möglichkeiten für eine sichtoptimierte ergonomische Auslegung von neuen Fahrzeugmodellen zu verbessern, werden die identifizierten Ansatzpunkte diskutiert und eine Maßnahmenableitung vorgeschlagen. Diese Ansatzpunkte können einerseits als gegenwärtig existierende Defizite im Zusammenwirken von Fahrer, Fahrzeug und Verkehrsumgebung verstanden werden und bilden andererseits ein Potential zur Verbesserung der Straßenverkehrssicherheit in der Zukunft. Für die thematisch involvierten Institutionen stellt die Nutzung dieser Potentiale eine moralische Verpflichtung zum Handeln dar. Denn die Existenz von Sicherheitsdefiziten bedeutet durch tagtäglich eintretende Unfälle Beeinträchtigungen der Gesundheit und menschliches Leid, die möglicherweise vermeidbar sind.

Sichteinschränkungen im Wahrnehmungsprozess des Fahrers sind als Informationslücken zu verstehen, die zu schließen sind, um daraus entstehende Fehlermöglichkeiten zu reduzieren beziehungsweise zu vermeiden. Die in dieser Arbeit identifizierten Verbesserungsmöglichkeiten der Sichteinschränkungen können sowohl entlang der Reihenfolge der Schritte des Wahrnehmungsprozesses, entsprechend der Darstellung in Abbildung 2.1.1 in Kapitel 2.1, als auch hinsichtlich der beteiligten Elemente Fahrer-Fahrzeug-Umgebung aufgeschlüsselt werden. Dadurch können sie auch den an der Verkehrssicherheit beteiligten Institutionen als Optimierungsauftrag zugeordnet werden.

- **Ergebnisaspekte bezüglich der Informationsaussendung und Reizentstehung:**

Beginnend bei der Entstehung und Aussendung optischer Informationen und Reize von anderen Verkehrsteilnehmern und aus der Umgebung des Fahrzeugs ist eine unbeeinträchtigte Sichtbarkeit eine zwar triviale, jedoch zentrale Basisanforderung, die sich hinsichtlich der Verbesserungsmaßnahmen an unterschiedliche Adressaten richtet:



- Die Fahrzeughersteller sind aufgefordert, die in Kapitel 5.9 aufgezählten technischen Möglichkeiten zur Reduzierung der Sichtverdeckungen durch die dachtragenden Säulen des Fahrzeugs effektiv einzusetzen. Die Motivation der Automobilhersteller zur Umsetzung dieser Möglichkeiten ist derzeit begrenzt. Mit den in Kapitel 4 dokumentierten Sichtanalysefunktionen in der Software ‚RAMSIS kognitiv‘ stehen dem fahrgaugauslegenden Ingenieur und Ergonomen grundlegende Methoden für die prospektive ergonomische Auslegung der Sichtbedingungen zur Verfügung. Durch die auslegungs- und problemorientierte Bereitstellung von ergonomischem Wissen in Form eines praxisnahen Werkzeuges soll in Zukunft eine positive Wirkung auf die Verkehrssicherheit damit ausgelegter Fahrzeuge erzielt werden. Allerdings fehlen dem Anwender zu den Funktionen noch handhabbare Auslegungs- und Bewertungsverfahren. Die Automobilhersteller müssten einzeln oder gemeinschaftlich Verfahrensweisen, sogenannte ‚Kochrezepte‘, erarbeiten, in welcher Form die nun in RAMSIS angebotenen Analyse- und Auslegungsfunktionen zielgerichtet zu verwenden sind. Speziell für die Bewertung von Außensichtbedingungen wäre dem Anwender sehr geholfen, wenn einzelne Straßensituationen und Verkehrsszenarien und deren Bewertungsmerkmale in einer Art Prüfkatalog beschrieben würden. Für einen solchen Prüfkatalog kämen beispielsweise die sechs Verkehrssituationen in Betracht, die in Kapitel 5.8 beschrieben werden, aber auch weitere. Im Sinne einer frühzeitigen und eindeutigen Abprüfbarkeit von Sicherheitsanforderungen neuer Fahrzeuge wäre Durchführung und Prüfung mittels Sichtsimulation eine wesentliche Voraussetzung zur konkreten Berücksichtigung in der frühen Phase des Fahrzeugentwicklungsprozesses.
- Um einen akzeptablen Mindeststandard für alle Fahrzeuge zu garantieren, ist der europäische Gesetzgeber dringend gehalten, die Zulassungsvorschriften 77/649/EWG bzw. 90/630/EWG für das Sichtfeld im Fahrzeug neu zu formulieren und, wie in den Kapiteln 3 und 5 beschrieben, die darin enthaltenen widersinnigen Effekte zu eliminieren. Das Daimler-Scholly-Verfahren kann die Sichtverdeckung sehr viel rea-



listischer quantifizieren. Es wurde bereits im Rahmen der EURO-NCAP-Vereinigung abgestimmt, ist jedoch bisher nicht offiziell zum Einsatz gekommen. Die Verwendung dieses Verfahrens würde eine realistischere Bewertung der Sichtverdeckung nach vorne ermöglichen.

- Automobilclubs und –fachzeitschriften sollten regelmäßig und systematisch Sichttests von Fahrzeugen im Markt nach vergleichbaren und realitätsnahen Kriterien durchführen und veröffentlichen. Die vereinzelt Untersuchungen der Vergangenheit, wie in Kapitel 3.2 dargestellt, sind nicht ausreichend, um die Bedeutung der Sichtverdeckung bei den Fahrzeugkäufern und Fahrzeugentwicklern nachhaltig ins Bewusstsein zu rücken. Die Hersteller könnten dadurch stärker motiviert werden, bessere Sichtbedingungen in der Fahrzeuggestaltung zu berücksichtigen.

- Die dynamischen Sichtanalysen mit Berücksichtigung der Vorausschau des Fahrers in Kapitel 5 zeigen auf, dass gerade in gefahrenträchtigen Fahrmanövern wie in Kreuzungen und Kreisverkehren die Gestaltung von A-Säulen wichtige Bereiche der Straße anhaltend verdeckt. Hierbei erscheint es nicht ausreichend zu sein, allein mit den Werkzeugen und Methoden der Fahrzeugergonomie künftige Pkws zu optimieren. Die Projektierung und Planung von Straßen und Knotenpunkten durch Tiefbauingenieure in Behörden und Planungsbüros sollte ebenfalls vor der Realisierung neuer Straßenbauten einer geometrischen Sichtverdeckungsuntersuchung im Computer unterzogen werden, ähnlich wie dies mit ‚RAMSIS kognitiv‘, in Kapitel 4.6.1 beschrieben, möglich ist. Dadurch ließen sich konfliktrichtige Verdeckungskonstellationen von Fahrzeugen bei Straßenneubauten besser vermeiden. Hier wäre das Verhältnis von Nutzen zu Aufwand am größten, da für alle Verkehrsteilnehmer für die gesamte Nutzungsdauer der Straße ein positiver Effekt entstünde und die Lebensdauer von Bauwerken vergleichsweise lang ist.



- Der Aspekt der Sichtverdeckung durch das eigene Fahrzeug (vergleiche Kapitel 3.2.2 ‚*Looked, but failed to see*‘) muss Einzug auch in die deutsche Unfallrekonstruktion finden, um so auch in der Unfallforschung und behördlichen Unfallstatistik Niederschlag zu finden. Nur so können die ursächlichen Effekte, die entweder durch eine ungünstig gestaltete Mensch-Maschine-Schnittstelle oder durch eine unübersichtliche Straßensituation oder durch ein individuelles Fehlverhalten eines Fahrers hervorgerufen werden, differenziert werden. Entsprechend dem populären Sinnspruch der betrieblichen Unfallprävention „Gefahr erkannt – Gefahr gebannt!“ könnten dann darauf aufbauend Maßnahmen abgeleitet werden.

Diese Ansätze beziehen sich allesamt auf eine verbesserte geometrische Gestaltung von Fahrzeug und Verkehrsumgebung und richten sich entsprechend an ihre ingenieurtechnischen Auslegungen und die zugehörigen behördlichen Rahmenbedingungen.

- **Ergebnisaspekte bezüglich der Informationsaufnahme (Perzeption):**

Bezüglich des zweiten Schrittes des Wahrnehmungsprozesses haben sich in den vorangegangenen Kapiteln mehrere Ansätze zu einer verbesserten Informationsaufnahme des Fahrers gezeigt:

- Das Phänomen der ‚stehenden Peilung‘ ist hinsichtlich des Auftretens im Straßenverkehr weitgehend unbekannt. Diese Erkenntnis sollte nicht nur bei der Ausbildung von Schiffsführern Lehrinhalt sein, sondern auch in der Straßenverkehrs- und -fortbildung geschult werden. Eine breit angelegte Informationskampagne könnte viele Führerscheininhaber sensibilisieren. Die Akzeptanz von Vorfahrtsbeschilderungen und Geschwindigkeitseinschränkungen an Kreuzungen ließe sich durch eine Bekanntheit und den Verweis auf dieses Phänomen erhöhen. Eine praktische Schulung in Fahrsicherheitstrainings der Automobilclubs mit sogenannten Soft Targets oder in Zukunft auch in Ausbildungsfahrsimulatoren vermittelte den Effekt eindrucksvoll und gefahrlos.



- Im Hinblick auf eine Empfehlung an die Fahrer, sich bei der Sichtbeobachtung von Kreuzungen mit Kopf und Oberkörper aktiv auch in Querrichtung zu bewegen, erscheint die sportliche Gestaltung der Seitenwangen der Sitze kontraproduktiv zu wirken. Die ausgeprägten Seitenwangen bieten eine gute Unterstützung bei Kurvenfahrt, erschweren jedoch eine seitliche Bewegung des Fahrers bei der Verkehrsbeobachtung.

- Für die verbesserte Auslegung der Fahrerassistenzsysteme bieten die vorliegenden Ergebnisse mehrere Möglichkeiten zur Weiterentwicklung der Fahrerunterstützung durch gezielte Auswertung der Umfeldsensierung. Der mutmaßliche horizontale Vorausschauwinkel des Fahrers in kurvigen Strecken oder bei Abbiegevorgängen zeigt sich aufgrund der Kenntnis des Streckenverlaufes durch die Navigationssysteme, wie in Kapitel 5 erläutert, als situativ vorausberechenbar und damit prognostizierbar. Außerdem wird die Verwendung von eingebauten Eye-Tracking-Systemen im Fahrzeug bereits erprobt. Eine echtzeitfähige Auswertung der Außensensorik könnte die Winkel-Position eines Verkehrsobjektes erfassen und mit dem Bereich der A-Säulenverdeckung des Fahrers vergleichen. Im Falle der Verdeckung ließe sich der Fahrer entweder gezielt warnen oder, wenn nötig, sogar die Fahrgeschwindigkeit begrenzen. Alternativ dazu kann vom Fahrzeug ein Hinweis auf relevante Objekte gegeben werden, die aufgrund der mutmaßlichen Vorausschau des Fahrers weitab vom Fixationsbereich befinden. Solche gezielten Warnfunktionen könnten beispielsweise Radfahrer und Fußgänger beim Linksabbiegen betreffen oder auch Fahrzeuge im Querverkehr in ‚stehender Peilung‘. Die Unterstützung durch Fahrerassistenz-funktionen gewänne durch eine solche situative und kooperative Fahrerunterstützung spürbar an Qualität. Wenn solche Funktionen der Fahrerassistenz praxisingerecht implementiert werden, ist eine hohe Akzeptanz der Nutzer zu erwarten.



Bei den durchgeführten Untersuchungen zur Sichtwahrnehmung im Verkehr wiesen drei Aspekte auf noch fehlende Kenntnisse über den Wirkmechanismus beim Wahrnehmungsprozess des Fahrers hin. Sie sind als offene Fragen zu verstehen, die zukünftig durch weitere wissenschaftliche Arbeiten zu beantworten wären:

- Die hier durchgeführten Untersuchungen erfolgten in einfachen, reizarmen Verkehrssituationen und stellten die zusätzlichen visuellen Effekte durch weitere optische Informations- und Ablenkungsquellen wie Radfahrer, Fußgänger sowie Hinweisschilder nicht dar. In der Realität ist in urbanen Kreuzungssituationen häufig ein Überfluss an Informationsreizen festzustellen, die zu Aufmerksamkeitskonflikten führen können. Die Identifikation der unbewussten Kriterien für die Auswahl und Filterung der für die Fahraufgabe relevanten Informationen wäre eine herausfordernde wissenschaftliche Fragestellung für die Zukunft. Solche komplexeren Verkehrssituationen an belebten Knotenpunkten innerorts könnten ebenfalls mit Hilfe von weiteren, umfangreicheren Simulatorexperimenten untersucht werden.
- In der zweiten Versuchsreihe wurde bei der Sicht auf die Kreuzungssituation unter anderem aufgezeigt, dass die Sichtbarkeit des Verkehrsteilnehmers bei nicht oder kaum vorhandenem optischen Fluss für einen hohen Anteil der Fahrer nicht gegeben ist. Aus dieser grundsätzlichen Erkenntnis resultiert die zusätzliche Frage, wie groß der optische Fluss ausgeprägt sein muss, um eine Aufmerksamkeitswirkung beim peripheren Sehen zu erzielen. Ist die relative Geschwindigkeit von mindestens zwei Bogenminuten pro Sekunde ein hinreichendes Kriterium für die periphere Wahrnehmung von Verkehrsteilnehmern? Falls sich dies bestätigen ließe, so könnte ein technisch generierter Hinweis auf Verkehrsteilnehmer im Vorfeld des Fahrerzeugs, die einen geringeren optischen Fluss als $2^\circ/\text{sek}$ erzeugen, zur sicheren Entdeckung sinnvoll sein.



- Der Einfluss der Lateralität des Sehens im Hinblick auf eine räumliche Asymmetrie der Wahrnehmung bleibt leider auch nach der Durchführung dieser Versuche unklar. Die aus der Literatur bekannten Experimente zur Lateralität des Auges konzentrieren sich ausschließlich auf das bewusste, fokussierte, hochauflösende Farb-Sehen. Ob und wie auch das unterbewusste, periphere Kontrast-Sehen mit den Stäbchen einen Lateralitätseinfluss und damit eine Wahrnehmungsasymmetrie besitzt, bleibt eine offene Frage. Eine zukünftige Untersuchung könnte die Entdeckungsquote von Objekten im Hinblick auf die Lateralität vergleichend untersuchen. Die Objekte sollten dazu jeweils nur für ein Auge sichtbar, im Hintergrund einer Sehaufgabe erscheinen und entweder nur fokussiert oder nur peripher wahrnehmbar sein. So ließe sich feststellen, ob die Unterschiede der Lateralität im fokussierten Sehen auch in der peripheren Wahrnehmung bestehen. Dieser Aspekt ist für die weitere Forschung im Bereich der Verkehrssicherheit interessant. Bei sehr belebten Verkehrssituationen mit einer Tendenz zur Reizüberflutung des Fahrers würde ein solcher Lateralitätseffekt einen wesentlichen Einfluss auf die Reihenfolge und Priorität der bewussten und unterbewussten Wahrnehmung von Informationen aus dem Verkehr besitzen.

- **Ergebnisaspekte bezüglich der Informationsverarbeitung und -umsetzung:**

Die in im Projektumfang von ‚RAMSIS kognitiv‘ modellierten und in Kapitel 4 beschriebenen Funktionen repräsentieren allesamt lediglich perzeptive Eigenschaften und Merkmale. Damit ist nur die Informationsaufnahme als erste Stufe des Wahrnehmungsprozesses berücksichtigt. Der Kern des Kognitionsprozesses, die Informationsverarbeitung, bietet ein ungleich größeres Feld zur Analyse und Simulation für die Auslegung der fahrzeugtechnischen Mensch-Maschine-Schnittstelle. Speziell zu den Themenfelder Informations- und Kommunikationssysteme und Fahrerassistenzsysteme werden an vielen wissenschaftlichen Einrichtungen weltweit Kenntnisse zum gesamten Kognitionsprozess des Fahrers erarbeitet. Die beispielsweise von *Deml et al.* (2008) beschriebenen kognitiven Softwarearchitekturen namens ACT-R (Adaptive Control of Thought-Rational),



QN-MHP (Queueing Network-Model Human Processor) oder auch GOMS (Goals-Methods-Operators-Selection rules) sind prinzipiell in der Lage, einzelne menschliche Wahrnehmungs- und Entscheidungsprozesse simulierend abzubilden. Eine ausreichende Simulationsqualität und -präzision des Fahrerverhaltens für die praktische Produktauslegung besitzen die Systeme derzeit noch nicht.

Einige Ideen sollen im Folgenden grob skizzieren, in wie weit eine simulationsfähige Modellierung als Verbindung zwischen dem relativ weit entwickelten Werkzeug des anthropometrischen Menschmodells und den vielfachen experimentellen Erkenntnissen der kognitiven Ergonomie geschaffen werden könnte:

Dazu erscheint die Zusammenführung der bereits existierenden Simulationenwerkzeuge, nämlich einer funktionellen Fahrsimulation des Fahrzeugs und einer detaillierten Umfeldsimulation der Verkehrsumgebung, mit der Verknüpfung eines mathematisch-kognitiven Fahrermodells vielversprechend. Auf diese Weise ließe sich auf Basis einer komplexen Computersimulation prognostizierend testen und bewerten, welche Beanspruchung unterschiedlich modellierte Fahrertypen jeweils mit einem definierten Aufgabenset in einem in Entwicklung befindlichen Fahrzeugmodell in standardisierten Verkehrssituationen erfahren würden. Auf dieser Basis ließen sich quantitative Prognosen hinsichtlich der kognitiven Güte der konkreten Gestaltung einer Mensch-Maschine-Schnittstelle im Sinne einer Belastungs-Beanspruchungs-Bilanzierung tätigen.

In einer solchen Zukunftsvision würden die Resultate aufwändiger wissenschaftlicher Untersuchungen mehr Nutzen bringen als heute. Anstatt nur als dokumentiertes Einzelergebnis einen kleinen Bestandteil der Fachliteratur zu bilden, würden sie dann auch als Parametersatz oder Modellalgorithmus in ein solches kognitives Menschmodell eingepflegt werden können. Die Ergebnisse stünden als ergänzende Komponente eines reproduzierbaren Modellverhaltens dauerhaft für die rechnerbasierte Auslegung und Analyse zur Verfügung.

Auf Basis eines solchen kognitiven Menschmodells der Zukunft könnten standardisierte Prüfverfahren zur Erfüllung von Vorschriften wie beispielsweise des ESoP (European Statement of Principles) oder eines ‚Code of Practice‘ des europäischen RESPONSE-Projektes oder der AAM-Guidelines (Alliance of Automobile Manufacturers) mittels Computersimulation erfolgen. Damit würde eine verlässli-



che und reproduzierbare Absicherung möglich werden, so wie dies derzeit schon bei Crashsimulationen für die Zertifizierung der passiven Sicherheit für die Zulassung von Fahrzeugen gelebte Praxis ist.

Ein solches kognitives Menschmodell wäre vermutlich auch eine wesentliche Hilfe dafür, die Aufgabenteilung zwischen Mensch und Maschine bei kooperativem, assistiertem beziehungsweise pilotiertem oder teilautonomen Fahren zu bestimmen und die sinnvollen Fähigkeiten und Grenzen des Reglereingriffs in das Fahrzeugverhalten zu prüfen.

Um eine derartige umfassende kognitive Simulation eines Regelkreises Mensch-Maschine-Umwelt möglichst realitätsnah zu verwirklichen, sind für die Repräsentation der drei Elemente Fahrer-Fahrzeug-Verkehrsumgebung komplexe Modelle erforderlich. Möchte man das gesamte Berechnungssystem beherrschbar halten, bereits vorhandene Softwaremodelle nutzen und außerdem eine dezentrale modulare Software-Entwicklung ermöglichen, so würde sich eine Software-Architektur der Co-Simulation anbieten. Dabei werden verschiedene Simulationsprogramme auf unterschiedlichen Rechnerplattformen parallel betrieben und mittels Datenaustausch gekoppelt. Sie tauschen dabei gegenseitig parametrisierte Zwischenergebnisse ihres jeweiligen Simulationsprozesses aus, um sich wechselseitig in der iterativen mathematischen Berechnung zu optimieren. Diese Strategie wird in den letzten Jahren zunehmend häufiger für anspruchsvolle verknüpfte Simulationsverfahren in der Automobilentwicklung eingesetzt. Mit einer solchen Software-Architektur ließen sich die Simulationsverfahren von bestehenden 3D-Menschmodellen aus der Ergonomie, Fahrerassistenzreglern der realen Fahrzeugsteuergeräte, Straßenmodelle und Fremdverkehrssimulationen wie sie in Fahrsimulationen eingesetzt werden, und Fahrermodelle aus der Fahrdynamik effektiv miteinander kombinieren. Weiterzuentwickelnde oder neu zu schaffende kognitive Modelle des menschlichen Wahrnehmungs- und Entscheidungsprozesses würden eine solche Co-Simulation vervollständigen. Damit könnten Fahrabläufe unter Berücksichtigung von modelliertem menschlichem Verhalten zunehmend realistischer im Computer simuliert werden. Das Wissen und die mathematische Modellierung menschlicher Wahrnehmung und Handlungsweise in einer solchen Co-Simulation könnte mit jeder neuen wissenschaftlichen Erkenntnis aus Experimenten ergänzt und verfeinert werden.



Die Ergebnisgrößen eines solchen kognitiven Menschmodells wären quantitativ ermittelbare Werte der Haupt- und Nebenaufgaben, die heutzutage bei User-Tests als objektive Kenngrößen experimentell ermittelt werden. Dies sind beispielsweise Bedienhäufigkeiten, -folgen, -dauern und -fehler, Blickhäufigkeiten und -folgen, Erkennungsraten, auch Fahrgeschwindigkeiten, Beschleunigungsverhalten, Spur- und Abstandshaltedgütern und Lenkaktivitäten. Resultierende Effekte wie der Zeitbedarf für eine Aufgabe oder sogar die Kollisionswahrscheinlichkeit in Konfliktsituationen ließen sich daraus kalkulieren. Ein solches Simulationssystem mit einem kognitiven Menschmodell wäre nicht nur dazu geeignet, die Gestaltungskonzepte der Mensch-Maschine-Schnittstelle von Fahrzeugen vorab zu simulieren, sondern auch Straßenbauprojekte und Verkehrsleitsysteme vorab objektiv auf ihre Praxistauglichkeit zu untersuchen. Der vergleichende Einsatz eines solchen Systems mit Ereignissen aus dem realen Verkehrs- und auch Unfallgeschehen würde nicht nur die Rekonstruktion und Aufklärung von Einzelfällen unterstützen können, sondern ermöglichte auch eine kontinuierliche Praxisvalidierung zur stetigen Verbesserung eines solchen kognitiven Menschmodells.

- **Ergebnisaspekte bezüglich der Wirkungen durch Handlungen:**

Für den abschließenden Schritt des Wahrnehmungsprozesses hat sich aus den Untersuchungen folgende Fragestellung ergeben, die in weiterführenden Simulatorexperimenten Beantwortung finden kann:

- Ob die Handlungsstrategie des Kreuzungsbremers auch innerorts entsprechende Sicherheitsvorteile zeigen kann, bleibt nach der hier durchgeführten Untersuchung noch offen. Innerorts können bei einer Kreuzungsannäherung bereits geringe Annäherungsgeschwindigkeiten zu einer Verdeckung in stehender Peilung von Fußgängern und Radfahrern führen. Um hier eine sichteffektive Wirkung der Verzögerung zu bewirken, ist möglicherweise ein Anhalten bis zum Stillstand erforderlich. Es erscheint lohnenswert für die Verkehrssicherheit, den Erfolg dieser Handlungsstrategie zu untersuchen.

Insgesamt bietet die zielgerichtete Auseinandersetzung mit dem Themenfeld des Wahrnehmungsprozesses bei der Fahrzeugführung auch in Zukunft ein fachlich er-



giebiges und im Sinne der allgemeinen Verkehrssicherheit wertvolles Aufgabenfeld. Die vorangegangene Diskussion hinsichtlich der unterschiedlichen Aufgaben für Automobilhersteller, Behörden, Automobilclubs, Fahrerausbildung, Unfallforschung und Wissenschaft zeigt, dass speziell ein Zusammenwirken der derzeit noch getrennt agierenden, beteiligten Institutionen ein nutzbringendes Verbesserungspotential für den Straßenverkehr aufweist.



8 Zusammenfassung

Dieses abschließende Kapitel will die Arbeit inhaltlich zusammenfassen.

Die Ausgangssituation für die wissenschaftliche Untersuchung der Sichtverhältnisse im Fahrzeug stellte sich folgendermaßen dar: Durch umfangreicher gewordene kognitive Anforderungen an die Fahrer aufgrund von zusätzlichen Aufgaben der neuen Fahrerassistenzsysteme und schwierigerer Verkehrssituationen treten Schwachpunkte in der Sichtauslegung von Pkw immer deutlicher hervor. Die fortschreitende technische Entwicklung des Fahrzeugs führte und führt zu steigenden Anforderungen an die visuelle Wahrnehmung bei der Fahrtätigkeit. Dieser Sachverhalt diente als Motivation und Zielsetzung für diese Arbeit, einen effektiven Beitrag zur verbesserten Sichtauslegung bei der Fahrzeugentwicklung zu leisten, indem spezielle Kenntnisse erweitert und in praktisch anwendbare Methoden überführt wurden.

Dazu wurden in einem ersten Schritt die Grundlagen des visuellen Wahrnehmungsprozesses aus der Literatur recherchiert. Das Literaturstudium zeigte, dass hoch entwickelte Verarbeitungsmechanismen im menschlichen Gehirn eine kontinuierliche Bewältigung der enormen visuellen Informationsmenge und eine zeitgerechte Interpretation des Informationsinhaltes ermöglichen. Es wurde erkennbar, dass diese in der menschlichen Entwicklung evolutionär entstandenen Wahrnehmungsfunktionen nicht an die menschliche Tätigkeit als Autofahrer angepasst sind. Aus den Grundlagen des Sehens wurden Effekte auf die Fahraufgabe mitsamt ihrer impliziten Schwächen deutlich gemacht.

Im Anschluss daran wurde die Bedeutung des Sehens für die Fahraufgabe und damit auch für die Verkehrssicherheit aus unterschiedlichen Perspektiven analysiert und reflektiert. Die Maßnahmen und Wirkungseffekte seitens der Behörden einerseits und von der Fachpresse andererseits wurden kritisch betrachtet. Dabei wurden ergänzend die existierenden technischen Anforderungen an die Sicht im Fahrzeug sowie die in der Praxis verwendeten Analyse- und Vergleichsverfahren erläutert.

Darauf folgte die Beschreibung der Sichtanalyse- und Bewertungsverfahren, die im Rahmen des dreijährigen Industrieforschungsprojektes ‚RAMSIS kognitiv‘ zur Implementierung im 3D-Menschmodell definiert und spezifiziert worden waren. Die Beschreibung der Funktionen behandelte sowohl die geometrisch-optischen Bedingun-



gen der Reize als auch die physiologischen Möglichkeiten der visuellen Wahrnehmung. Dadurch ergaben sich anwendbare Funktionen für die Informationswahrnehmung innerhalb des Fahrzeugs und auch bezüglich der direkten Sicht in den Verkehr, die bereits inzwischen im Softwarepaket des 3D-Menschmodells RAMSIS den Anwendern für den ergonomischen Auslegungsprozess zur Verfügung gestellt wurden.

Mit Hilfe von CAD-Untersuchungen unter Verwendung von RAMSIS konnten systematische Zusammenhänge zwischen A-Säulen-Geometrie, den Augpunktlagen der Insassen und der resultierenden Verdeckungswirkung aufgezeigt werden. Dabei erwies sich das gesetzliche Zulassungsverfahren als nicht realitätskonform. In Kombination mit der Berechnung der Fahrzeugbewegung und der mutmaßlichen Streckenvorausschau des Fahrers konnten im CAD-System dynamische Ablaufsimulationen generiert werden. Dadurch ließen sich grundsätzliche Wirkungszusammenhänge von Sichtgeometrie und Fahrtgeschwindigkeit in sichtkritischen Verkehrskonstellationen unterschiedlicher Strecken- und Knotenpunktvarianten wie Kurvenfahrt, Abbiegevorgang, Kreuzung und Kreisverkehr darlegen. Mehrere technische Möglichkeiten für sichtverbessernde Maßnahmen an den Fahrzeugen wurden ebenfalls aufgezeigt.

In zwei quantitativen Fahrsimulatorstudien wurde untersucht, wie unterschiedliche Fahrer sich in Fahrsituationen mit intensiver Verdeckungsproblematik verhalten. Die erste Versuchsreihe zeigte, dass sich viele der Fahrer mit einer wiederkehrenden, massiven Sichtbeeinträchtigung durch die A-Säule in Linkskurven arrangieren konnten. Eine detaillierte Analyse des Eye Trackings konnte das in der Literatur beschriebene Modell des Blickverhaltens in Kurven durch die Entdeckung neuer Varianten differenzieren und somit erweitern. Über das bekannte Nahpunkt-Fernpunkt-Modell hinaus, ließ sich das Blickverhalten der unterschiedlichen Fahrer auf vier verschiedenen Fahrbahnorientierungen in den Typologien „Innen“, „Außen“, „Links“ und „Rechts“ aufschlüsseln.

Auch im Bewegungsverhalten von Kopf und Oberkörper konnten drei charakteristische Bewegungsmuster, nämlich eine starre Kopfhaltung, eine rotatorische Kopfbewegung sowie zusätzlich eine translatorische Oberkörperbewegung, in unterschiedlich starker Ausprägung entdeckt werden. Bei der Annäherung an Kreuzungen in der zweiten Versuchsreihe erwiesen sich die zwei unterschiedlichen Verhaltensstrate-



gien der Fahrer, der ‚Kreuzungsbremser und der ‚Kreuzungshuscher‘, neben der Bewegungsaktivität als wesentlicher Einflussfaktor der Fahrer für die Gefahrenerkennung und damit auf das Unfallrisiko im Kreuzungsbereich.

Beide Versuchsreihen zeigten aus dem Verhalten und der Befragung vieler Fahrer, dass das subjektiv empfundene Informationsdefizit deutlich geringer eingeschätzt wurde, als die tatsächliche Sichtverdeckung den Fahrern wirklich vorenthielt. Entsprechend den Modellen der Grundlagenliteratur ergänzten anscheinend die Wahrnehmungsmechanismen des Gehirns die faktischen Informationslücken auf vermeintlich schlüssige Weise, so dass die Vehemenz der Verdeckungen vielen Fahrern nicht angemessen auffiel.

Die abschließende Diskussion der Arbeit führte zu der begründeten Schlussfolgerung, dass eine konsequentere Sichtauslegung der Fahrzeuge, eine effektivere Gestaltung der Fahrerassistenzfunktionen und weitergehende Aktivitäten in der Kognitionsforschung die Straßenverkehrssicherheit weiter steigern können. Insbesondere die Entwicklung eines kognitiven Menschmodells in Kopplung mit Fahrzeug- und Umgebungssimulationen wurde als lohnendes Forschungsfeld für weitere Wissenschaftsprojekte ausgewiesen.



Literaturverzeichnis

- ADAC (2006): *Vielen fehlt der Durchblick*,
<http://www1.adac.de/Tests/Autotest/rundumsicht/default.asp> , Zugriff 01/2010
- ADAC (2008): *Zu wenig Durchblick*, online-Pressemitteilung vom 15.12.2008, Zugriff 01/2009
- Aicher, Otl (1996): *Kritik am Auto : schwierige Verteidigung des Autos gegen seine Anbeter ; eine Analyse*, Ernst & Sohn Verlag, ISBN 3-433-02649-1
- Alesi, R. (2005): *Konzeptentwicklung bei BMW – Worin liegen die Ursachen für das Aussehen unserer Autos?*, Gastvorlesung TU München, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik (FTM) 08.11.2005
- Arnold-Schulz-Gahmen, B.E. (1999): *Visumotorik und Seitenbevorzugung, in Fahr- und Steuertätigkeiten: Sehfunktionen*, Fazit und Kurzfassungen zum Seminar des Forum Arbeitsphysiologie anlässlich der Arbeitsmedizinischen Herbsttagung 1999 des Verbandes Deutscher Betriebs- und Werksärzte e.V. am 12.10.1999 in Nürnberg
- AutoBild (2007): *Eine Sekunde ohne Durchblick*, AutoBild 20/2007, 17.05.2007, Zugriff 01/2010
- AutoExpress (2006): *Blind Spot offenders named*, AutoExpress, 17.08.2006, http://www.autoexpress.co.uk/news/autoexpressnews/202148/blind_spot_offenders_named.html , Zugriff 01/2010
- Barnoski, Richard L.; Maurer, John R.; Kugler, B. Andrew (1970): *Assessment of Automotive Visibility by a Figure of Merit*, in Tagungsband '1970 International Automobile Safety Conference Compendium', Detroit und Brüssel, S.644-676, (Hrsg.): SAE, New York
- Becker, Michael E. (2005): *Pixelalat – von Bildschirmauflösungen, Zeichengrößen und Lesbarkeit*, in Computerfachwissen 3/2005, S.4-10, ISSN 1430-0400
- Bartenbach, Christian & Witting, Werner (2009): *Handbuch für Lichtgestaltung – Lichttechnische und wahrnehmungsphysiologische Grundlagen*, Springer-Verlag Wien ISBN978-3-211-75779-6
- Behnisch, Matthias (2005): *Stereovision: Grundlagen*, <http://www.techfak.uni-bielefeld.de/~rhaschke/lehre/WS04/humanoids/ausarbeitung/Stereoalgorithmen1.pdf> ; Zugriff 05/2009
- Berndt, Christina (2006): *Wahrnehmung - Wie Bilder den Verstand täuschen*, in SPIEGEL online, 16. Mai 2006, www.spiegel.de/wissenschaft/mensch/o,1518,415299,00.html, Zugriff 10/2011



- Bernotat, R. (1970): *Anthropotechnik in der Fahrzeugführung*, Ergonomics, Vol. 13, No. 3, S. 353-377, London
- Boff, Kenneth R.; Lincoln, Janet E. (1988): *Engineering Data Compendium*, Harry G. Armstrong Aerospace Medical Research Laboratory, Wright Patterson Air Force Base, Bd. 1-3
- Bondzio, Lothar (2006): *Das neue Merkblatt für die Anlage von Kreisverkehren*, IVU-Seminar 14.11.2006, Ludwigsburg
- Braess, Hans-Hermann, Donges, Edmund (2006): *Technologien zur aktiven Sicherheit von Personenkraftwagen - „Konsumierbare“ oder echte Verbesserungen?*, Tagung „Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz“, Garching, 4.-5. April 2006
- Bruckmayr, Eckard; Reker, Klaus (1994): *Neue Informationstechniken im Kraftfahrzeug*; Zeitschrift für Verkehrssicherheit 1/1994
- Bubb, Heiner (1975): *Untersuchung über die Anzeige des Bremsweges im Kraftfahrzeug*; Dissertation Technische Universität München
- Bubb, Heiner (1985): *Arbeitsplatz Fahrer – Eine ergonomische Studie*; Automobil-Industrie, Heft 3/1985, S. 265-275
- Bubb, H.: *Systemergonomie*. In Schmidtke, H. (Hrsg.): *Ergonomie*. 3. Auflage, Hanser-Verlag, München Wien, 1993
- Bubb, Heiner (1995): *Ergonomie in Mensch-Maschine Systemen*; Komfort und Ergonomie in Kraftfahrzeugen, Veranstaltungsunterlagen Haus der Technik, Essen
- Buck, Manfred (2005): *eSafety-Aktivitäten in der EU*; Vortrag, 9.Fachkolloquium Straße und Verkehr, 10 November 2005, Stuttgart
- Carter, Rita; Aldridge, Susan; Page, Martyn; Parker, Steve (2010): *Das Gehirn – Anatomie, Sinneswahrnehmung, Gedächtnis, Bewusstsein, Störungen*; München, Dorling Kindersley Verlag
- Chatziastros, Astros (2003): *Visuelle Kontrolle der Lokomotion*, Dissertationsschrift, Justus-von-Liebig-Universität Gießen
- Cohen, Amos S.; Hirsig, René. (1990): *Blicktechnik in Kurven*, bfu-Report Nr. 13 der Schweizerischen Beratungsstelle für Unfallverhütung, Bern
- Cohen, Amos S.; Zwahlen, Helmut T. (1989): *Zur Bedeutung des fovealen Sehens bei der Informationsaufnahme bei hoher Beanspruchung*, in Derkum, Harald (Hrsg.): „Sicht und Sicherheit im Straßenverkehr“ Forschungsgemeinschaft Auto, Sicht, Sicherheit, Tagungsband der 3. Konferenz ‚Vision in Vehicles‘, Aachen, 1989, Verlag TÜV Rheinland Köln, ISBN 3-88585-867-3
- Colombet, Florent; Paillot, Damien & Merienne, Frederic (2010): *Impact of geometric field of view on speed perception*, in Trends in Driving Simulation Design and



- Experiments, Driving Simulation Conference 2010 Proceedings 9.-10. September 2010, Paris
- Daimler AG (2004): *Die neue Mercedes-Benz A-Klasse*, in Pressemappe; Daimler AG, Stuttgart
- Daimler AG (2008): *AUGEN AUF! Was läuft falsch, wenn es an der Kreuzung kracht? Ein aufwendiges Projekt zur Unfallanalyse verspricht Aufklärung und Abhilfe*, in HighTechReport 01/2008; Daimler AG, Stuttgart
- Deml, Barbara; Neumann, Hendrik; Müller, André; Wünsche, Hans-Joachim (2008): *Fahrermodellierung im Kontext kognitiver Automobile*, in *at-Automatisierungstechnik* 56, 11/2008, S.601-608, Oldenbourg Wissenschaftsverlag
- DE 60211501T2 : *Sichtsystem für ein Fahrzeug zur Beseitigung der Sichtverdeckung durch die A-Säule*, DE 602 11 501 T2 2007.05.03, Übersetzung der europäischen Patentschrift, Patentinhaber: Kia Motors Co. Ltd., Erfinder: Hong, Jong-Myeon, Guro-gu, 03.05.2007
- DE 102008058182: *Säulenordnung für einen Kraftwagenrohbau und Kraftwagenrohbau mit einer Säulenordnung*, DE 10 2008 058 182, Patentinhaber Daimler AG, Erfinder: Frank Lauer, Hans-Peter Tabarelli, 20.11.2008
- Department of Transport (2005): *Review of the 'Looked but Failed to See' Accident Causation Factor*; Road Safety Research Report No. 60, Department for Transport, London, November 2005
- Department of Transport (2009): *Direct Rear Visibility of Passenger Cars: Laser-Based Measurement Development and Findings for Late Model Vehicles*; DOT HS 811 174, U.S. Department for Transport, Springfield Virginia
- Diem, Carsten (2004): *Blickverhalten von Kraftfahrern im dynamischen Straßenverkehr*; Dissertation Technische Universität Darmstadt
- DIN 1451-2 (1986): *Schriften: Serifenlose Linear-Antiqua; Verkehrsschrift*
- DIN EN ISO 894-2 (2008): *Ergonomische Anforderungen an die Gestaltung von Anzeigen und Stellteilen- Teil 2: Anzeigen*
- DIN EN ISO 13406-2 (2001): *Ergonomische Anforderungen für Tätigkeiten an optischen Anzeigeeinheiten in Flachbauweise*,
- DIN EN ISO 15008-6 (2009): *Straßenfahrzeuge: Ergonomische Aspekte von Fahrerinformations- und -assistenzsystemen – Anforderungen und Bewertungsmethoden der visuellen Informationsdarstellung im Fahrzeug*
- Donges, Edmund (1977): *Ein Zwei-Ebenen-Modell des menschlichen Lenkverhaltens im Kraftfahrzeug*; Dissertation Technische Universität Darmstadt, Forschungsbericht Nr. 27 des Forschungsinstitut für Anthropotechnik, Meckenheim



- Dornhöfer, Sascha (2004): *Veränderungsblindheit, Drei explorative Untersuchungen in statischer und dynamischer verkehrsbezogener Umgebung*; Dissertation Technische Universität Dresden
- Draeger, Jörg (1995): *Die Rolle des Fern- und Nahpunktes des Auges des Piloten für die anthropometrische Cockpitgestaltung – funktionelle Risiken bei Ihrer Vernachlässigung*, In K.-P. Gärtner (Hrsg.), *Anthropometrische Cockpitgestaltung (DGLR-Bericht 95-02, S. 177-181)*. Bonn: 1995 Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt e.V..
- DUDEN 1997: *DUDEN Etymologie – Das Herkunftswörterbuch der deutschen Sprache*, Band 7, Dudenverlag, Mannheim, ISBN 3-411-20907-0
- EC : European Commission-Enterprise and Industry-Sectors-Reference documents-Directives and regulations-Directive 77/649/EEC,
<http://ec.europa.eu/enterprise/sectors/automotive/documents/directives/directive-77649/EEC> , Zugriff 01/2010
- EU-Commission (2008): *eSafety–Moderne Informations- und Kommunikationstechnologien für mehr Sicherheit im Straßenverkehr*, Informationsblatt, EU Commission Information Society and Media
- ECE R125 : United Nations Economic Commission Europe Regelung Nr. 125, *Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung von Kraftfahrzeugen hinsichtlich des Sichtfeldes des Fahrzeugführers nach vorn*, 09.11.2007 (früherer Titel: TRANS/WP.29/2005/82)
- Eckstein, Lutz (2005): *Towards a Global Approach on HMI*, Vortrag auf dem 5. Europäischen Kongress für Intelligent Transport Systems (ITS) 1.-3. Juni 2005 in Hannover
- Ehrenstein, Walter H.; Arnold-Schulz-Gahmen, Birgit E. & Jaschinski, Wolfgang (2005): *Eye preference within the context of binocular functions*, Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology, 243: S.926–932, Springer-Verlag, ISSN: 0721-832X
- EP 1285814A1: *Überwachungseinrichtung für Fahrzeuge*, EP 1 285 814 A1, Patentinhaber: Ford Global Technologies Inc., Tochtergesellschaft der Ford Motor Company, Erfinder: Robert Spahl, 21.08.2001
- Fahrner, Dieter (1998): *Brillenkunde*, Pforzheim, Verlag Bode.
- Fastenmeier, Wolfgang (1995): *Die Verkehrssituation als Analyseeinheit im Verkehrssystem*; in: Autofahrer und Verkehrssituation; Band-Hrsg.:W. Fastenmeier, Reihe: Mensch-Fahrzeug-Umwelt, Hrsg.: H.Häcker, Band 33, Verlag TÜV Rheinland, Bonn, ISBN 3-8249-0278-8
- Flügel, Bernd; Greil, Holle; Sommer, Karl (1986): *Anthropologischer Atlas*; Edition Wötzel, Frankfurt/Main, ISBN 3-92583100-2



- Forbes, Lyman M. (1970): *Geometric Vision Requirements in the Driving Task*, in Tagungsband '1970 International Automobile Safety Conference Compendium', Detroit und Brüssel, S.677-689 (Hrsg.): SAE, New York
- Frascella, L., Weisel, A. (2005): *Live Fast, Die Young: The Wild Ride of Making Rebel Without a Cause*, Touchstone, New York
- Gegenfurtner, Karl; Walter, Sebastian & Braun, Doris: *Visuelle Informationsverarbeitung im Gehirn*, Tutorial, Universität Giessen; <http://www.allpsych.uni-giessen.de/karl/teaching.html>; Zugriff 03/2009
- Gall, Dietrich (2004): *Die Messung circadianer Strahlungsgrößen*, Vortrag, Technische Universität Ilmenau
- GCIE (2005): *Description of the Package Drawings and Dimension List*, Part 3, Global Car Manufacturers Information Exchange Group, 2005
- Gegenfurtner, Karl (2005): *Sinnesphysiologie und Wahrnehmung*, Vorlesungsskript WS 2005/2006, Universität Giessen; <http://www.allpsych.uni-giessen.de/karl> ; Zugriff 05/2009
- Gegenfurtner, Karl; Walter, Sebastian & Braun, Doris: *Visuelle Informationsverarbeitung im Gehirn*, Tutorial, Universität Giessen; <http://www.allpsych.uni-giessen.de/karl/teaching.html>; Zugriff 03/2009
- Gibson, James Jerome. (1982): *Wahrnehmung und Umwelt*, Verlag Urban & Schwarzenberg, ISBN 3541099313, München
- Glaser, Hannes (2008): *Prüfung der Sichtabschattung aus dem Fahrzeug und im Verkehrsgeschehen*, Vortrag im Abendseminar Aktuelle Wahrnehmung und Informationsfehler im Straßenverkehr der Europäischen Vereinigung für Unfallforschung und Unfallanalyse (EVU) Ländergruppe Österreich 02.12.2008, Wien
- Goersch, Helmut (2000): *Handbuch für Augenoptik*, Hrsg: Carl Zeiss. Oberkochen
- Goldstein, E. Bruce (2008): *Wahrnehmungspsychologie – Der Grundkurs*, Hrsg: Hans Irtel, 7. Auflage, Spektrum, Springer-Verlag, Berlin
- Gordon, Donald A. (1966): *Perceptualbasis of vehicular guidance: I-V*, Public Roads, Vol 34(3), S.53-68
- Graab, Birgit; Donner, Eckard; Chiellino, Ulrich; Hoppe, Maria (2008): *Analyse von Verkehrsunfällen hinsichtlich unterschiedlicher Fahrerpopulationen und daraus ableitbarer Ergebnisse für die Entwicklung adaptiver Fahrerassistenzsysteme* ; 3.Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz, 07. – 08. April 2008, München
- Grandjean, Etienne (1991): *Physiologische Arbeitsgestaltung – Leitfaden der Ergonomie*, 4. überarbeitete Auflage, Ott-Verlag Thun, ISBN3-7225-6651-7



- Green, Paul (2001): *Where do drivers look while driving (and for how long)?*, Human Factors in Traffic Safety, Lawyers and Judges Publishing Company, S.77-110, Tucson
- Griffiths, Geraint (2003): *Eye dominance in sport - A comparative study*; Optometry Today Vol 43:16, London
- Grimm, Paul (2005): *Grafische Datenverarbeitung: Wahrnehmung*; Vorlesungsskript Fachhochschule Erfurt
- Gründl, Martin (2005): *Fehler und Fehlverhalten als Ursache von Verkehrsunfällen und Konsequenzen für das Unfallvermeidungspotenzial und die Gestaltung von Fahrerassistenzsystemen*, Dissertationsschrift Uni Regensburg
- Guski, Rainer (2006): *Einführung in die Allgemeine Psychologie 1*, Vorlesungsskript, Ruhr-Universität Bochum, 2006/2007
- Hamberger, Werner (1998): *Verfahren zur Ermittlung und Anwendung von Prädiktiven Streckendaten für Assistenzsysteme in der Fahrzeugführung*, Dissertation am Institut für Straßen- und Schienenverkehr der Technischen Universität Berlin
- Hangel, Dieter (1993): *Sichtverhältnisse aus Kraftfahrzeugen*, Diplomarbeit am Institut für Verkehrswesen der Universität für Bodenkultur, Wien, 1993
- Hannaford, Carla (1997): *Mit Auge und Ohr, mit Hand und Fuß – Gehirnorganisationsprofile erkennen und optimal nutzen*, Kirchzarten, ISBN 978-3-932098-15-4
- Hartmann, Erwin et al. (1987): *Sehvermögen mit Mehrstärken- und Gleitsichtbrillen am Arbeitsplatz*, Dortmund. Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz
- Heise, Wulf (2003): *Räumliche Linienführung*, Vorlesungsskript, Universität Kassel
- Hesse, Rüdiger (2005): *Psychophysische Untersuchungen zur Rolle der Fovea centralis bei der Bewegungswahrnehmung*, Dissertationsschrift, Johannes-Gutenberg-Universität Mainz
- Hill, Brian L. (1980): *Vision and Visibility and Perception*, Perception, volume 9 (2), S.183-216
- Hristov, Borislav (2009): *Untersuchung des Blickverhaltens von Kraftfahrern auf Autobahnen*; Dissertationsschrift, Technische Universität Dresden
- Hucho, Wolf-Heinrich (2005): *Aerodynamik des Automobils*, Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden, ISBN 3528039590
- Hudelmaier, Jörg (2003): *Sichtanalyse im Pkw unter Berücksichtigung von Bewegung und individuellen Körpercharakteristika*, Dissertationsschrift, Technische Universität München



- Hughes, Ciarán; Glavin, Martin; Jones, Edward; Denny, Patrick (2008): *Automotive Blind-Zones: A Review of Legislation and the Use of Close-Range Camera Systems*, International Symposium on Vehicular Computing Systems, 22.-24. Juli 2008, Dublin
- Kramer, Ulrich (2008): *Kraftfahrzeugführung – Modelle – Simulation - Regelung*; Carl Hanser Verlag, München, ISBN 978-3-446-40671-1
- Krinner, Ludwig & Krinner, Christiane : *Sehen! Eine ganzheitliche Betrachtung über das Sehen und Winkelfehlsichtigkeit speziell bei Kindern*; Informationsbroschüre Augenoptik Krinner, Ergoldsbach
- Krueger, Helmut (1989): *Arbeiten mit dem Bildschirm – aber richtig!* , Hrsg.: Bayerisches Staatsministerium für Arbeit und Sozialordnung
- Lachenmayr, Bernhard (1993): *Potentielle Sehschärfe bei Störungen der brechenden Medien: Prüfung der sogenannten retinalen Sehschärfe*, München, Quintessenz-Verlag
- Land, M. F. & Lee, D. N. (1994): *Where We Look When We Steer*, Nature, 369, S. 742-744
- Land, M. F. & Horwood, J. M. (1996): *The relations between head and eye movements during driving*, Vision in Vehicles V, Hrsg: A. G. Gale, I. D. Brown and C. M. Haslegrave, S. 153-160, Amsterdam, Elsevier
- Land, M. F. & Horwood, J. M. (1998): *How speed affects the way visual information is used in steering*, Vision in Vehicles VI, Hrsg: A. G. Gale, I. D. Brown and C. M. Haslegrave, S. 153-160, Amsterdam, North Holland
- Land, M. F. & Tatler, B. W. (2001): *Steering with the head: The visual strategy of a racing driver*, Current Biology, 11, S.1215-122,
- Lange, Christian (2008): *Wirkung von Fahrerassistenz auf der Führungsebene in Abhängigkeit der Modalität und des Automatisierungsgrades*, Dissertationsschrift, Technische Universität München
- Lange, Wolfgang et. al. (1991): *Kleine Ergonomische Datensammlung*, Hrsg: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitssicherheit. Köln: Verlag TÜV Rheinland
- Lorenz, Daniel; Remlinger, Wolfram; Bengler, Klaus; Bubb, Heiner (2011): *Sichtauslegung des Fahrzeugs mit ‚RAMSIS kognitiv‘*. In: Human Machine Interaction Design – Von der nutzergerechten zur energieeffizienten Gestaltung, Tagungsunterlagen zum 3.Symposium Human Machine Interaction Design, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design Stuttgart
- Lorenz, Daniel; Remlinger, Wolfram; Bengler, Klaus; Bubb, Heiner; Matz, S ; Kremser, Florian (2011): *Sichtauslegung eines kompakten Elektrofahrzeugs mit ‚RAMSIS kognitiv‘*. In: 2. Automobiltechnisches Kolloquium, Antriebstechnik, Fahrzeugtechnik, Speichertechnik, VDI, Düsseldorf



- Luczak, Holger (1998): *Arbeitswissenschaft*, Berlin, Springer Verlag, ISBN-3-540-59138-9
- Macey, Stuart & Wardle, Geoff (2009): *H-point – The fundamentals of Car Design & Packaging*, Culver City, CA, USA, 2009; ISBN-978-1-933492-37-7
- Malaka, Rainer (2005): *Mensch-Computer-Interaktion*, Vorlesungsskript 2005/2006, Uni Heidelberg, <http://www.cl.uni-heidelberg.de/courses/archiv/ws05/mci/>
- Mallot, Hanspeter A. (2009): *Kognitive Neurobiologie*, Vorlesungsskript, Universität Tübingen; http://www.uni-tuebingen.de/cog/teaching/ws2007_08/Cog.Neuro/Chap_4_Stereopsis.pdf, Zugriff 05/2009
- Marek, Clemens (2008): *Entwicklung von Package-Konzepten*, Vorlesungsskript, Fachhochschule Aachen, Zugriff 02/2009
- Mars, Franck (2008): *Driving around bends with manipulated eye-steering coordination*, Journal of Vision, ISSN 1534-7362, 8(11:10, S.1-11
- Mather, George (2009): *Foundations of Sensation and Perception*, Psychology Press Ltd, Hove, ISBN 978-1-84169-699-7
- Mayer, Ralf (2007): *Anspruchsvolle Kunststoff-Optik – Designbeispiel und Herstellung*, Vorträge 3. ViaOptic Technologietag 2007 "Nichtabbildende Optik - Von der Lichtquelle bis zum geprüften Produkt" 2007; http://www.viaoptic.de/main/de/download/vortrag_dr_Mayer_07.pdf
- Meic-Sidic, Toni (2005): *Entwicklung eines Bewertungsverfahrens zur Beurteilung der 360°-Rundumsicht*, Diplomarbeit, Universität Stuttgart
- Meitinger, Karl-Heinz; HeiBing, Bernd & Ehmanns, Dirk (2006): *Linksabbiegeassistentz*, Vortrag auf der Tagung Aktive Sicherheit 2006, München
- Meitinger, Karl-Heinz; (2008): *Top-Down-Entwicklung von Aktiven Sicherheitssystemen für Kreuzungen*, Dissertationsschrift, Technische Universität München
- Mestre, D.; Mars, Franck; Durand, S.; Vienne, F. & Espié, S. (2004): *A visual aid for curve driving*, Driving Simulator Conference Europe, Paris
- MIRA (2007): *Serravista Benchmark Testing*, Test Results Sheet MIRA-1015504-001#01, MIRA Ltd.
- Möbus, Claus; Hübner, Swen & Garbe, Hilke (2007): *Driver Modelling: Two-Point- or Inverted Gaze-Beam-Steering*, Prospektive Gestaltung von Mensch-Technik-Interaktion, 7. Berliner Werkstatt Mensch-Maschine- Systeme, 10. - 12. Oktober 2007, Berlin, Hrsg.: M. Rötting, G. Wozny, A. Klostermann und J. Huss, , Fortschritt-Berichte VDI-Reihe 22, Nr. 25, S. 483 – 488, Düsseldorf: VDI Verlag, ISBN 978-3- 18-302522-0



- Müller, Alexander (2010): *Systematische und nutzerzentrierte Generierung des Pkw-Maßkonzepts als Grundlage des Interior- und Exteriordesign*, Dissertation Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Forschungs- und Lehrgebiet Technisches Design, Bericht-Nr.586
- National News (2007): *Windscreen blindspot 'makes SUVs much more dangerous'*, Eddie Cunningham, 08.06.2007, National News, Dublin, Zugriff 03/2008
- Neue Osnabrücker Zeitung (2006): *„Blinde Flecken“ hinter der A-Säule*, mid Nuneaton, 16.08.2006, Neue Osnabrücker Zeitung online, Zugriff 03/2008
- Nickel, Markus (2001): *Längs- und Querbesehleunigung bei normaler Fahrt*, Diplomarbeit an der Fachhochschule Köln
- Obojski, Marian Andrzej & Meinecke, M.-M. (2008): *Kreuzungsassistenz bei der Volkswagen AG*, Vortragsfolien DLR
- OLG Hamm (2000): Urteil des Oberlandesgericht Hamm vom 31.08.2000; Aktenzeichen 27 U 33/00 und 15 O 156/99 Landgericht Dortmund
- Ott, P.; Pogany, P. (2008): *Optik-Design von Head-up-Displays mit CAD-kompatiblen Freiformflächen*. Photonik, vol.2, ISSN 1432-9778, p.68-71
- Petermann, Ina & Kiss, Miklos (2009): *Nutzerzentrierte Gestaltung von Übergabe- und Übernahmeprozessen zwischen Fahrer und drei aufeinander aufbauenden Automatisierungsstufen*, in Fahrer im 21.Jahrhundert, VDI-Berichte Nr. 2085, S.153-166, Tagung Braunschweig
- Pfleger, Ernst (2003): *Sichtabschattungen und Blickabsenzen-Beispiele für human-errors aus der Blickforschung - Kurzfassung*, in ÄKVÖ Symposium: ‚Blindflug-Trugbild – Toter Winkel, Ludwig-Boltzmann-Institut für Verkehrssystemanalyse, interdisziplinäre Unfallforschung und Unfallrekonstruktion, Wien
- Pöppel, Ernst (1998): *Wie kommt die Zeit in den Kopf?*, in Zeitschrift für Kulturaustausch 3/1998, Institut für Auslandsbeziehungen e.V.
- Pöppel, Ernst (2000): *Gespräch mit Reinhold Gruber*, Abdruck des Gesprächs vom 03.05.2000, α-Forum, BR-online
- Porta, Jofre: *Lateralität*; Vortragsfolien <http://www.globaltennisteam.com>; Zugriff 06/2009
- RAS-K; RAS-L; RAS-Q: *Richtlinie für die Anlage von Straßen, -Planung und Ausführung von Knotenpunkten, -Linienführung, -Regelquerschnitte*; Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen FGSV, Köln
- Rasmussen, J. (1986): *Information processing and human-machine-interaction*, New York, Elsevier Science Pub. Co. Inc.



- Rasmussen, J.; Pejtersen, A.M. & Goodstein, L.P. (1993): *Cognitive systems engineering*, New York, Wiley. 1993,
- Rassl, Robert (2004): *Ablenkungswirkung tertiärer Aufgaben im Pkw, Systemergonomische Analyse und Prognose*. Dissertation am Lehrstuhl für Ergonomie, Technische Universität München
- Reed, Matthew P. (2008): *Intersection Kinematics: A Pilot Study of Driver Turning Behavior with Application to Pedestrian Obscuration by A-Pillars*. University of Michigan Transport Research Institute, Report-Nr. UMTRI-2008-54, Ann Arbor,
- Reiner, Josef (1978): *Gesichtsfeld- und Blickfeldbegrenzung durch die Brille in Kraftfahrzeugen*. 29. Sonderdruck der wissenschaftlichen Vereinigung für Augenoptik und Optometrie e.V., Fachvorträge des Jahreskongresses 1978 in Stuttgart
- Remlinger, Wolfram & Bubb, Heiner (2007): *Erweiterte Möglichkeiten der Sichtanalyse mit dem Menschmodell RAMSIS*. in M. Grandt und A. Bauch (Hrsg.), *Simulationsgestützte Systemgestaltung (DGLR-Bericht 2007-04, S.189-198)* Bonn: Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt e.V.
- Remlinger, Wolfram; Bubb, Heiner (2008): *RAMSIS kognitiv - das Menschmodell lernt sehen*. In: Jahresdokumentation 2008. Bericht zum 54. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft vom 9.-11. April 2008 in München. Dortmund, GfA-Press, 2008, S. 51-56.
- Remlinger, Wolfram; Bubb, Heiner (2008): *Sichtanalyse mit dem Menschmodell RAMSIS unter Berücksichtigung altersbedingter Sehschwächen*. In: *Produktdesign für alle: Für Junge = für Alte?*. Tagungsband 15. und 16. Mai 2008 BG-Akademie Dresden, S. 131-135
- Remlinger, Wolfram; Bubb, Heiner; Wirsching, Hans-Joachim (2008): *New Features for the Sight Analysis with RAMSIS*. 11th SAE Digital Human Modeling for Design and Engineering Conference, June 17-19, 2008 in Pittsburgh PA (SAE Paper No. 08DHM-0014)
- Remlinger, Wolfram; Bubb, Heiner; Wirsching, Hans-Joachim (2009): *Sight Analysis with 'RAMSIS Cognitive': Step II*. (SAE Paper No. 2009-01-2295)
- Remlinger, Wolfram; Bubb, Heiner.; Wirsching, Hans-Joachim (2009): *Sichtauslegung von Anzeigen mit 'RAMSIS kognitiv'*. In: *Der Fahrer im 21. Jahrhundert*, Tagungsband zur 5. VDI-Tagung, 4.-5. November 2009 in Braunschweig
- Renner, Götz : *DC in-house customer and marketing research. A complementary and brand-focused resource for meeting marketing challenges*, Vortragsfolien Acceptance & Behavior Analysis Customer Research Center, DaimlerChryslerAG



- Rheinische Post (2008): *ADAC: Viele Autos falsch konstruiert*, http://www.rp-online.de/auto/news/ADAC-Viele-Autos-falsch-konstruiert_aid_651181.html , 17.12.2008, Zugriff 01/2010
- Risch, Matthias (2002): *Der Kamm'sche Kreis – Wie stark kann man beim Kurvenfahren bremsen*. In Praxis der Naturwissenschaften Heft 5/51. Jahrgang, Aulis-Verlag Deubner, Köln
- Robertshaw, Katherine D. & Wilkie, Richard M. (2008): *Does gaze influence steering around a bend?*, Journal of Vision, 8(4):10, S.1-13, 2008
- Rockwell, Thomas H. (1971): *Eye movement analysis of visual information acquisition in driving: an overview*. Paper presented at the North Carolina State University, Raleigh, 1971.
- Rockwell, Thomas H. (1972): *Skills, Judgment and Information Acquisition in Driving*, in Human Factors in Highway Traffic Safety Research, Hrsg: T.W. Forbes, Wiley-Interscience, New York, 1972
- SAE J1050 : *Describing and Measuring the Driver's Field of View* , Society of Automotive Engineers Rev. Jan 2003
- Salvucci, Dario D. & Gray, Rob (2004): *A two-point visual control model of steering*, Perception, volume 33, S. 1233-1248, 2004
- Schmidtke, Heinz (1993): *Ergonomie*, München, Carl Hanser Verlag, 1993, ISBN 3-446-16440-5
- Schmidtke, Heinz (1989): *Handbuch der Ergonomie (HdE)*, Hrsg: Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung, Hanser Verlag München, ISBN 978-3-927038-70-7
- Schober, Herbert (1970): *Das Sehen*, Band 1, VEB Fachbuchverlag, Leipzig
- Scholly, Uwe (1998): *Bewertung der Sicht im Pkw*, Diplomarbeit am Lehrstuhl für Ergonomie, Technische Universität München, 1998
- Scholly, Uwe (2006): *Sicht im Pkw – Evaluationsmethoden in der Praxis*, Tagungsunterlagen Herbstkonferenz der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (GfA), 28.-29.10.2006, Sindelfingen
- Schweigert, Manfred (2002): *Einfluss von Nebenaufgaben auf das Fahrerblickverhalten*, in Tagungsband ‚Der Fahrer im 21. Jahrhundert‘, VDI-Berichte 1768, S.59-75, Braunschweig
- Schweigert, Manfred; Bubb, Heiner (2003): *Fahrerblickverhalten und Nebenaufgaben*, Dissertation am Lehrstuhl für Ergonomie, Technische Universität München



- Seidl, Andreas, Geuss; Hartwich; Krist, Renate (1995): *RAMSIS – ein System zur Erhebung und Vermessung dreidimensionaler Körperhaltungen von Menschen zur ergonomischen Auslegung von Bedien- und Sitzplätzen im Auto*, FAT-Bericht 123, Forschungsvereinigung Automobiltechnik, Frankfurt
- Shinar, David; McDowell, Edward D.; Rockwell, Thomas H. (1977): *Eye Movements in Curve Negotiation*, in *Human Factors*, 19(1), S. 63-71
- Shubin, Neil (2008): *Der Fisch in uns*, Fischer Verlag Frankfurt, ISBN 3-100-72004-0
- Siefer, Anke; Ehrenstein, Walter H.; Arnold-Schulz-Gahmen, Birgit E.; Sökeland, Jürgen; Luttmann, Alwin (2003): *Populationsstatistik und Assoziationsanalyse sensomotorischer Seitenbevorzugung und deren Relevanz für verschiedene berufliche Tätigkeitsfelder*, *Zentralblatt für Arbeitsmedizin, Arbeitsschutz und Ergonomie*, Band 53, S.346-353, Heidelberg
- Sivak, Michael (1996): *The information that drivers use: is it indeed 90% visual?*, in *Perception*, volume 25, S. 1081-1089
- Size Germany (2009): *SizeGERMANY – Die deutsche Reihemessung*, Internetportal der Statistischen Daten, Human Solutions GmbH & Hohensteiner Institute, passwortgeschützter Zugriff 10/2009, <https://portal.sizegermany.de/SizeGermany/pages/home.seam>
- SPIEGEL-online (2006): *A-Säule schluckt Smart*, Felix Rehwald, gms <http://www.spiegel.de/auto/werkstatt/0,1518,434298,00.html> , 30. August 2006 Zugriff 01/2010
- Statistisches Bundesamt (2009): *Unfallentwicklung auf deutschen Straßen 2008*, Statistisches Bundesamt Wiesbaden
- Statistisches Bundesamt (2009): *Verkehrsunfälle 2008, Zweiradunfälle im Straßenverkehr*, Statistisches Bundesamt Wiesbaden
- Statistisches Bundesamt (2009): *Verkehrsunfälle 2008, Zeitreihen*, Statistisches Bundesamt Wiesbaden
- Staubach, Maria (2009): *Factors correlated with traffic accidents as a basis for evaluating Advanced Driver Assistance Systems*, in *Accidents Analysis and Prevention*, Elsevier
- Staubach, Maria (2010): *Identifikation menschlicher Einflüsse auf Verkehrsunfälle als Grundlage zur Beurteilung von Fahrerassistenzsystem-Potentialen*, Dissertationsschrift, Technische Universität Dresden
- Straßenbaubericht 2006 : Unterrichtung durch die Bundesregierung, Deutscher Bundestag 16. Wahlperiode, Drucksache 16/3984, 29.12.2006



- StVO : Straßenverkehrs--Ordnung (StVO) vom 16. November (BGBl. I S. 1565), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 5. August 2009 BGBl. I S. 2631) geändert worden ist.
- StVZO : Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO) § 35b Einrichtungen zum sicheren Führen der Fahrzeuge (2003) und Absatz 2 Richtlinien für die Sicht aus Kraftfahrzeugen 1991
- The Independent (2004): *Car Choice: Plenty of space and no corners cut on visibility*, James Ruppert, 09 November 2004, <http://www.independent.co.uk/life-style/motoring/features/car-choice-plenty-of-space-and-no-corners-cut-on-visibility-532525.html> , Zugriff 01/2010
- Timesonline (2006): *Windscreen frames create deadly blind spots in cars*, Ben Webster, 09 Oktober 2006, The Times, London <http://www.timesonline.co.uk/tol/news/article665952.ece> , Zugriff 01/2010
- Underwood G.; Chapman P.; Crundall D.; Cooper S. & Wallen R. (1999): *The visual control of steering and driving: Where do we look when negotiating curves*, Vision in vehicles VII, Hrsg: Gale A. G., Brown I. D., Haslegrave C. M., Taylor S. P., Elsevier Science, Oxford
- UNECE : United Nations Economic Commission Europe Working Party on General Safety Provisions, http://www.unece.org/trans/main/wp29/meeting_docs_grsg.html , Zugriff 03/2010
- US Patent 7475932: *Windscreen*, United States Patent Milner, Patent No. US 7,475,932 B2, Inventor Peter James Milner & Kirsten Milner, Jan. 13 2009
- Weingart, Wolfgang: *Linienführung von anbaufreien Straßen (Landstraßen) nach RAS-L 1995* , Vorlesungsskript Hochschule Anhalt, Dessau
- WhatCar? (2003): *Visibility Test 2003*, <http://www.whatcar.com/car-news/visibility-tests-2003/178348> , 09. September 2003, Zugriff 01/2010
- Wichmann, Felix A. (2005): *Allgemeine Psychologie I: Wahrnehmung*, Objektwahrnehmung; Vorlesungsskript Universität Tübingen WS 2005/2006
- Wilkie, Richard M. & Wann, John P. (2003): Eye-movements aid the control of locomotion, *Journal of Vision*, 3, S. 677-684
- Wiltshko, Thomas (2004): *Sichere Information durch infrastrukturgestützte Fahrerassistenzsysteme zur Steigerung der Verkehrssicherheit an Straßenknotenpunkten*, Dissertationsschrift Uni Stuttgart
- Wolf, Hagen (2009): *Untersuchungen des Lenkgefühls von Personenkraftwagen unter besonderer Berücksichtigung ergonomischer Methoden und Kenntnisse*, Dissertation am Lehrstuhl für Ergonomie, Technische Universität München



ZEIT-online (2006): *Verbauter Sicht*, Felix Rehwald, dpa, 29.08.2006, <http://www.zeit.de/auto/autonews/rangieren> , Zugriff 01/2010

77/649/EWG : *Sichtfeld*, Richtlinie des Rates vom 27. September 1977, zuletzt geändert durch 90/630/EWG

Im Rahmen dieser Dissertation betreute Studienarbeiten:

Bichlmeier, Anja (2009): *Untersuchung von Sichtverdeckungseffekten der A-Säule auf das Verhalten von Pkw-Fahrern*, Diplomarbeit am Lehrstuhl für Ergonomie, Technische Universität München

Hofmann, Andreas (2009): *Sichtverdeckungsanalyse auf Basis von Fahrdynamikdaten*, Diplomarbeit am Lehrstuhl für Ergonomie, Technische Universität München

Kremser, Florian & Wendrinsky, Jörg (2009): *Simulation und Analyse der Sichtbeeinflussung von A-Säulen*, Semesterarbeit am Lehrstuhl für Ergonomie, Technische Universität München

Raith Stephan (2009): *Digitalisierung von Verkehrsteilnehmern*, Konstruktive Semesterarbeit am Lehrstuhl für Ergonomie, Technische Universität München

Sengül, Hüseyin (2009): *Parametrische Konstruktion und Verdeckungsanalyse der A-Säulen im Pkw*, Diplomarbeit am Lehrstuhl für Ergonomie, Technische Universität München

Zaindl, Albert (2009): *Simulation von Kreuzungskonflikten durch Sichtverdeckungen der A-Säule*, Diplomarbeit am Lehrstuhl für Ergonomie, Technische Universität München



Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Entwicklung der Zahl der Straßenverkehrstoten in Deutschland 1953-2011 (Quelle: Statistisches Bundesamt, 2012)	15
Abbildung 1-2: Entwicklung der Kfz -Fahrleistungen, der Verkehrsunfälle, der Verunglückten und der getöteten Personen in Deutschland (Quelle: ADAC 2011 bzw. Statistisches Bundesamt, 2011)	15
Abbildung 2-1: Wahrnehmungsprozess	22
Abbildung 2-1: Aufbau des menschlichen Auges(Quelle: medXtra)	24
Abbildung 2-2: Qualitative Darstellung der retinalen Sehschärfe (Quelle: Helmert & Marx)	24
Abbildung 2-3: Präpariertes Gehirn in eröffnetem Schädel mit Sehleitungsbahnen in Seitenansicht (Quelle: von Hagens & Whalley, 2009)	28
Abbildung 2-4: Visueller Wahrnehmungsprozess (modifiziert nach Carter, 2010)	28
Abbildung 2-5: Optischer Fluss im Straßenverkehr (Quelle: DARPA)	32
Abbildung 2-6: Hering-Koordinatensystem in der Sehebene (Quelle: Behnisch 2005)	32
Abbildung 2-7: Belebte Verkehrssituation mit Blicksprüngen (Quelle: Ben-Gurion-University)	37
Abbildung 2-8: Verdeckung eines Motorrades durch die A-Säule (Abbildung modifiziert nach englischer Zeitschrift Bike)	37
Abbildung 2-10: Vektion beim Blick aus dem Zugabteil (Quelle: Grimm, 2005)	40
Abbildung 2-11: Visuelles Feld neben einem fahrenden Lkw (Quelle: Chatziastros, 2003)	40
Abbildung 2-12: Testverfahren zur Augendominanz	43
Abbildung 2-13: Verteilung der Lateralität von Hand und Auge	43
Abbildung 3-1: Regelkreis Fahrer-Fahrzeug in den Regelebenen der primären Fahraufgabe (nach Bernotat und Bubb)	47
Tabelle 3-2: Fahrer-Sichtaufgaben direkt, indirekt und auf Instrumente bezüglich der drei Regelebenen	49
Abbildung 3-3: Ursachen des Fahrerfehlverhaltens (Quelle: Forschungsprojekt PReVENT / GIDAS in Aktiv, 2007)	55
Abbildung 3-4: Fünf nicht einsehbare Bereiche (tote Winkel) eines Pkw (Quelle: Hughes et al.)	57
Abbildung 3-5: Vergleichende Messung der Sichtverhältnisse im Fahrzeug (Quelle: AutoMotorSport, 2009)	57
Abbildung 3-6: Schulnotenbewertung der Sichtverhältnisse des Fahrers (Quelle: ADAC Autotest, 2010)	58



Abbildungen 3-7 und 3-8: Mitsubishi Colt (links) und Renault Grand Espace (rechts) als schlechtestes und bestes Fahrzeug in den ADAC-Sichttests (Quelle: ADAC)	58
Abbildung 3-9: Unfallverteilung an gefährlichen Kreuzungen und Einmündungen außerorts (Quelle: ADAC)	60
Abbildung 3-10: Fotomontage einer Sichtverdeckungssituation durch eine breite A-Säule (Quelle: AutoBild)	60
Tabelle 3-11: Wichtige Vorschriften und Richtlinien hinsichtlich der Sicht aus einem Pkw (aktualisiert und ergänzt nach Hudelmaier, 2003)	65
Abbildung 3-12: Zulassungsvorschrift A-Säule (koloriert aus 77/649/EWG)	67
Abbildung 3-13: Augpunktlagen nach SAE-Norm im Vergleich zu RAMSIS-Simulation	70
Abbildung 3-14: §35 Sichthalbkreis (aus Hudelmaier)	70
Abbildung 3-15: Monokulare Sichtverdeckung im Horizontalschnitt durch die Säulen des Fahrzeugs (,Tortengrafik')	73
Abbildungen 3-16 und 3-17: links: SAE-Hüftpunktmessmaschine mit Lasertheodolit-Aufsatz zur Sichtfeldvermessung (Quelle: Department of Transport) rechts: Lasermarkierungen der unverdeckten Bereiche im Messraum	73
Abbildung 3-18: Sichtvorschrift ,Japan-Zylinder' im Nahbereich des Fahrzeugs Darstellung für Rechtslenker-Fahrzeuge (Quelle: Marek)	75
Abbildung 3-19: Schattenprojektion der Sichtverdeckungen (Quelle: MIRA)	75
Abbildung 3-20: 3D-Scan einer Fahrzeugkarosserie (Quelle: EMS-USA)	77
Abbildung 4-1: Anzeige- und Stellteilauslegung als Schnittmenge der Anthropometrischen und Systemergonomischen Fahrzeugauslegung	83
Abbildung 4-2: Abfolge der ergonomischen Auslegung komplexer Produkte	83
Tabelle 4-3: Struktur der in ,RAMSIS kognitiv' entwickelten Analysefunktionen	86
Abbildung 4-4: Polardiagramm der räumlichen Sehfelder des Menschen Gesichtsfeld monokular: linkes Auge (rot) / rechtes Auge (grün), Gesichtsfeld binokular: durchgezogene rot-grüne Linien, Gesichtsfeld ambinokular: gestrichelte Linien (nach Schober 1970 bzw. Flügel et al 1986), optimales (blau) und maximales (gelb) Blickfeld (nach Lange 2008)	87
Abbildungen 4-5 (links) und 4-6 (rechts): Maximales Blickfeld aus Fahrersicht mittels RAMSIS-Simulation: links: Sicht eines mittelgroßen Manns, rechts: Sicht einer kleinen Frau	88
Abbildung 4-7: Fahrerblickfeld mit Gleitsichtbrille (Sicht mittlerer Mann)	88
Abbildung 4-8 (links) und 4-9 (rechts): Simulierter Reflektionsstrahlengang von Blendungseffekten: links: Tagspiegelung von Sonnenlicht, rechts: Nachtspiegelung beleuchteter Anzeigen in der Frontscheibe	91
Abbildungen 4-10 (oben) und 4-11 (unten): Mindestsehentfernungen im Fahrzeug: oben: altersbedingter Akkomodationsverlust; unten: Distanzen im Fahrzeug für 50-jährigen mittelgroßen Fahrer	92
Abbildung 4-12: Sehschärfeanalyse für Fahrzeuginstrumentierungen	94



Abbildung 4-13: Blickabwendungszeiten als Isochronen eines Normalsichtigen (oben) und eines Gleitsichtbrillen-trägers (unten)	97
Abbildungen 4-14 (links) und 4-15 (rechts): Analyse des Sichtschattens des Lenkrades für die Sicht auf das Kombiinstrument: links: halbseitige Darstellung der abgeschatteten Sichtstrahlen, rechts: Darstellung der monokularen und binokularen Sichtgrenzen auf der Zifferblattebene → ‚Lenkradbanane‘	99
Abbildung 4-16: Einsehbereich (‚Tulpe‘) eines LCD im Fahrzeug (Halbseitendarstellung)	99
Abbildungen 4-17 (links) und 4-18 (rechts): Auslegung eines Head Up Displays (HUD), links: Strahlengangsanalyse, rechts: Bildposition aus der Fahrersicht	103
Abbildung 4-19: Dynamische Wahrnehmungsgrenzen des Fahrers bei Kurvenfahrt durch den Optischen Fluss (Draufsicht)	105
Abbildungen 4-20 bis 4-22: Falschfarbendarstellung des Optischen Flusses des Fahrers in den Geschwindigkeiten 80, 120 und 150 km/h; das Fahrzeug befindet sich in der Mitte des unteren Bildrandes; die graduelle Aufhellung verdeutlicht den Anstieg der Geschwindigkeit von der Zone optischer Ruhe bis zur Grenze der optischen Unschärfe	109
Abbildung 4-23: Grenzlinien der Zone optischer Ruhe im gesamten Gesichtsfeld des Fahrers für eine Geradeausfahrt mit den Geschwindigkeiten 50 (blau), 80 (rot) und 120 km/h (grün); (Beachte die Skalierung in km!)	110
Abbildung 4-24: Falschfarbendarstellung des Optischen Flusses des Fahrers für eine Geradeausfahrt mit 80 km/h; das Fahrzeug befindet sich in der Mitte des unteren Bildrandes; die tiefroten Halbkreise beiderseits des Fahrzeugs repräsentieren die Zone optischer Unschärfe, die spitze Grenzlinie vor dem Fahrzeug bildet den Beginn der Halbkreise der optischen Ruhe (vgl. Abb. 4-23)	110
Abbildung 4-25: ‚Hirschgeweih‘ entsprechend des Kraftübertragungsmodells des Kamm’schen Kreises aus 100km/h jeweils für 0,9g und 0,3g Gesamtbeschleunigung (Draufsicht)	112
Abbildung 4-26: ‚Hirschgeweih‘ aus 100km/h jeweils für 0,9g und 0,3g Gesamtbeschleunigung (Fahrersicht)	112
Abbildung 4-26: Parametrisch einstellbare Verkehrssituation mit Verkehrsteilnehmern und -objekten zur Sichtanalyse mit 3D-CAD-Geometrie	114
Abbildung 4-27: Versuchsfahrzeug „Glaskuppelauto“ (links) mit Darstellung der Blickdichteverteilung aus Eye Tracking-Versuchen (rechts) (Quelle: Renner)	115
Abbildung 4-28: Projektion der Sichtbereiche des Fahrers überlagert mit den Bewertungszonen des Daimler-Scholly-Verfahrens	115
Abbildung 5-1: Einfluss der Sitzhaltung des Fahrers auf die Sichtbedingungen	119
Abbildung 5-2: Plakative Unterschiede des Fahrzeugtyps auf die Sichtbedingungen (Quelle: Otl Aicher)	119
Diagramm 5-3: Entwicklung der Frontscheibenneigung ausgewählter Fahrzeugbau-reihen von 1975 bis 2005 mit Trendverläufen	121



Diagramm 5-4: Historische Entwicklung der A-Säulen-Verdeckungsbreite (Quelle: Scholly)	121
Abbildungen 5-5 links und 5-6 rechts : parametrische Neigungsvariation der A-Säule (links) und automatische Sichtschattengenerierung (rechts)	Pa- 123
Diagramm 5-7: Monokularer A-Säulen-Verdeckungswinkel links (nach FMVSS 128) über die Längs-Verschiebung (X-Achse)	125
Diagramm 5-8: Binokularer A-Säulen-Verdeckungswinkel links (nach 77/649/EWG) über die Längs-Verschiebung (X-Achse)	125
Diagramm 5-9: Projizierte A-Säulen-Verdeckungsfläche links über die Längs-Verschiebung (X-Achse)	126
Diagramm 5-10: Gewichtete A-Säulen-Verdeckungsfläche (Daimler-Scholly-Verfahren) links über die Längs-Verschiebung (X-Achse)	127
Abbildung 5-11: Gewichtete A-Säulen-Verdeckungsfläche (Daimler-Scholly-Verfahren) in unterschiedlichen Längs-Verschiebungspositionen (X-Achse)	127
Diagramm 5-12: Monokularer A-Säulen-Verdeckungswinkel links (nach FMVSS 128) über die A-Säulenneigung längs (Frontscheibenneigung)	128
Diagramm 5-13: Projizierte A-Säulen-Verdeckungsfläche links über die A-Säulenneigung längs (Frontscheibenneigung)	129
Diagramm 5-14: Gewichtete A-Säulen-Verdeckungsfläche (Daimler-Scholly-Verfahren) links über die A-Säulenneigung längs (Frontscheibenneigung)	129
Diagramm 5-15: Binokularer A-Säulen-Verdeckungswinkel links (nach 77/649/EWG) über die A-Säulenneigung längs (Frontscheibenneigung)	130
Abbildung 5-16: Ermittlung des binokularen Verdeckungswinkels nach 77/649/EWG	131
Diagramm 5-17: Vergleich der übergroßen effektiven Verdeckungsbreite der A-Säulen in Relation zur Zulassungsvorschrift 77/649/EWG	131
Abbildung 5-18: Hüft- und Augpunktlagen einer RAMSIS-Simulation im Fahrerplatzpackage des BMW 6er Cabrio [E64]	134
Abbildung 5-19: Zeithorizonte der drei Regelebenen (modifiziert nach Braess & Donges)	136
Abbildung 5-20: Vertikaler Sichtwinkel des Fahrers auf die Fahrbahn bei zwei Sekunden Vorausschau	136
Abbildung 5-21: Ermittlung des Vorausschauwinkels bei Kurvenfahrt	138
Abbildung 5-22: Darstellung des Zusammenhangs zwischen Fahrtgeschwindigkeit (Abszisse), Querschleunigung (Ordinate nach links), Vorausschauwinkel (durchgezogene gerade Linien) und Kurvenradius (gestrichelte gekrümmte Linie); orange: Komfortgrenze der maximal akzeptierten Beschleunigung von Normalfahrern	143



Abbildung 5-23: A-Säulen-Verdeckungswinkel im Bereich der Kurvenvorausschau: blau → Verdeckung vom Augpunkt großer Mann; rot → Verdeckung vom Augpunkt kleine Frau; strichpunktiert: Nominalwert BMW 6er [E64] vom Standardaugpunkt 635 mm über dem R-Punkt	145
Abbildung 5-24: Kreuzungsannäherung mit Querverkehr im Verdeckungsbereich der A-Säule	147
Abbildung 5-25: Geometrische Situation der Kreuzungsannäherung mit den A-Säulen-Verhältnissen eines BMW 6er [E64] bei 80km/h	150
Abbildung 5-26: Darstellung der kritischen Positions-, Geschwindigkeits- und Verzögerungsverhältnisse in ‚Stehender Peilung‘ in Abhängigkeit der A-Säulen-Position	152
Tabelle 5-27: A-Säulen-Positionen ausgewählter Fahrzeuge (Datenquelle: Autograph Dimensions GmbH, * LfE)	154
Diagramm 5-28: Sichtverdeckungsbreiten im Verkehr durch verschiedene A-Säulen-Verdeckungswinkel bei unterschiedlichem Objektabstand	155
Bildfolge 5-29 bis 5-36: Verschwenkung der Blickachse beim Abbiegen:	159
Bildfolge 5-37 bis 5-44: Verschwenkung der Blickachse bei Kreisverkehrsdurchfahrt	161
Abbildung 5-45: Darstellung der Sichtschattenkonzentration über den Fahrtverlauf beim Linksabbiegen durch Schattenverdichtung (aus Reed 2008)	163
Abbildung 5-46: Großes unverdecktes Fahrersichtfeld durch eine ‚Panorama‘-Windschutzscheibe im Opel Rekord P1 von 1958 (Quelle: Auto-Motor-Sport)	166
Abbildungen 5-47 und 5-48: A-Säule mit Fachwerk-Struktur im Volvo Safety Concept Car (linkes Bild: von außen, rechtes Bild: Sicht von innen)	166
Abbildung 5-49: Prismenlinse in Horizontalschnitt (links), Fahrersicht ohne (Mitte) und mit Prismenlinse (rechts) (Quellen: US Patent 7475932, MIRA 2007)	168
Abbildung 6-1: Statischer Fahr Simulator des LfE (Bild: LfE)	173
Abbildung 6-2: FARO-3D-Koordinaten-Messarm (Quelle: FARO)	174
Abbildungen 6-3 & 6-4: links: DIKABLIS Eye Tracking (Quelle: Ergoneers) rechts: Wii-Remote (Quelle: Nintendo)	174
Abbildungen 6-5 & 6-6: Head Tracking Vorrichtung mit Wii-Remote als fixierter Sensor und Infrarot-Leuchten als aktive Infrarot-Marker am DIKABLIS-System	175
Abbildung 6-7: Blickverhaltensmodell entlang des Tangentenpunktes (aus Mars 2008)	177
Abbildung 6-8: Langgezogene enge Linkskurve in der Versuchsstrecke	179
Diagramm 6-9: Altersverteilung der Versuchspersonen	180
Diagramm 6-10: Größenverteilung der Versuchspersonen	181
Abbildung 6-11: Augpunkt- und Hüftpunktlagen der Versuchspersonen (Seitenansicht)	182



Diagramm 6-12: Messergebnis der neutralen Kopfhaltung der Versuchspersonen mit linker und rechter Augendominanz; Höhe blaue Balken: Mittelwerte, Enden der schwarzen Linien: Standardabweichungen	183
Tabelle 6-13: Messergebnis der neutralen Kopfhaltung der Versuchspersonen mit linker und rechter Augendominanz	183
Abbildungen 6-14 und 6-15: Blicktyp „Innen“ mit Heatmap der Fixationen über 3 sec. (Orientierung am jeweils kurveninneren Fahrbahnrand)	187
Abbildungen 6-16 & 6-17: Blicktyp „Außen“ mit Heatmap der Fixationen über 3 sec. (Orientierung am jeweils kurvenäußeren Fahrbahnrand)	187
Abbildung 6-18 & 6-19: Blicktyp „Links“ mit Heatmap der Fixationen über 3 sec. (Orientierung durchweg am linken Fahrbahnrand)	187
Abbildung 6-20 & 6-21: Blicktyp „Rechts“ mit Heatmap der Fixationen über 3 sec. (Orientierung durchweg am rechten Fahrbahnrand)	187
Diagramm 6-22: Bewegungsmuster einer Versuchsperson mit starrer Kopfposition	191
Diagramm 6-23: Bewegungsmuster einer Versuchsperson mit ausgeprägter Rotationsbewegung des Kopfes	191
Diagramm 6-24: Bewegungsmuster einer Versuchsperson mit Kopfbewegungen in alle Richtungen	192
Tabelle 6-25: Reihenfolge der Kreuzungen	196
Abbildung 6-26: Situation 1 Abbildung 6-27: Situation 2 (Querverkehr spiegelbildlich) (freie Kreuzung 1)	197
Abbildung 6-28: Situation 3 Abbildung 6-29: Situation 4 (Sichtschatten rechts 1) (sichtbar rechts)	197
Abbildung 6-30: Situation 5 Abbildung 6-31: Situation 6 (ADAC-Kreuzung) (Sichtschatten beidseitig)	199
Abbildung 6-32: Situation 7 (Sichtschatten links)	199
Diagramm 6-33: Altersverteilung der Versuchspersonen	201
Diagramm 6-34: Verteilung der Körpergrößen der Versuchspersonen	202
Diagramm 6-35: Geschwindigkeitsprofil bei der Kreuzungsannäherung eines „Kreuzungsbremers“	203
Diagramm 6-36: Geschwindigkeitsprofil bei der Kreuzungsannäherung eines „Kreuzungshuschers“	204
Diagramm 6-37: Anzahl der konfliktbehafteten (hell- & dunkelrot) und konfliktfreien (hell- & dunkelgrün) Versuchspersonen; die beiden dunkleren Farbtöne zeigen ein stabiles Verhalten bis zum Versuchsende	208
Diagramm 6-38: Anzahl der Kreuzungskonflikte der beiden Annäherungsstrategien	209
Tabelle 6-39: Anzahl der Kreuzungskonflikte der beiden Annäherungsstrategien	209
Diagramm 6-40: Kopfbewegungsaktivität quer zur Fahrtrichtung bei ‚Kreuzungshuschern‘ zu Anfang des Versuchs (Situation 2 / 3)	211



Tabelle 6-41: Kopfbewegungsaktivität quer zur Fahrtrichtung bei ,Kreuzungshuschern‘ zu Anfang des Versuchs (Situation 2 / 3)	211
Diagramm 6-42: Kopfbewegungsaktivität quer zur Fahrtrichtung bei ,Kreuzungshuschern‘ im Vergleich zur Anzahl der Kreuzungskonflikte über die Versuchsreihe	212
Diagramm 6-43: Mittelwerte der Kopfbewegungsaktivität quer zur Fahrtrichtung bei ,Kreuzungshuschern‘ in Gruppen nach Fehleranzahl	212
Abbildung 6-44: ‚Soft Target‘, ein angetriebener Luftsack in Gestalt eines Fahrzeugs zur gefahrlosen Erprobung von Fahrerassistenzsystemen auf Teststrecken, wäre auch für Fahrsicherheitstrainings mit Kollisionsgefahr sinnvoll einsetzbar (Quelle: the Engineer)	214



Anhang A

MATLAB-Programm zur Berechnung des Optischen Flusses und Darstellung in einem Falschfarben-Diagramm:

```

clear all
close all
home = pwd;
cd(home);

%Variablen- und Konstantendefinition
Schrittweite = 0.5;% sw=Schrittweite in m
SpalteStart = -100; %Startwert Spalte/Y-Wert in m
SpalteEnd = 100; % Endwert Spalte/Y-Wert in m
ZeileEnd = 0; % Startwert Zeile/X-Wert in m
ZeileStart = -200; % Endwert Zeile/X-Wert in m
Spaltenzahl = (SpalteEnd-SpalteStart) / Schrittweite +1 ;
Zeilenzahl = (ZeileEnd-ZeileStart) / Schrittweite +1;

Augenhoehe = 0.001; %Augenhöhe über Fahrbahn in m
Kurvenradius = -200; %Kurvenradius in m, für Linkskurve mit negativem Vorzeichen
vkmh = 80; %Fahrgeschwindigkeit in km/h
vms = vkmh / 3.6 ; %Fahrgeschwindigkeit in m/sec umgerechnet
Winkelv = vms / Kurvenradius; %Winkelgeschwindigkeit Kreisfahrt
Sekantenwinkel = atand(vms/2/Kurvenradius); %Bestimmung des Sekantenwinkels

%zi Zeilenindex;
%si Spaltenindex;
% Azimuthwinkel des Punktes vom Auge
% Elevationswinkel des Punktes vom Auge
% RadialAbstand = radialer Abstand des Punktes vom Auge
% vxy = relative Ortsgeschwindigkeit des Punktes
% gw = Winkel?
% dw = Winkel?
% tw = Winkel zwischen Ortsgeschwindigkeit und Sichtlinie auf den Punkt
% vsichtbar = sichtbare Geschwindigkeit der Ortsgeschwindigkeit
% OptFluss = optischer Fluss, also sichtbare Winkelgeschwindigkeit jedes Punktes
XKoord = ZeileStart : Schrittweite : ZeileEnd ;
YKoord = SpalteStart : Schrittweite : SpalteEnd ;

for zi=1:Zeilenzahl
    for si=1:Spaltenzahl

        % Berechnung Azimuthwinkel
        if (YKoord (si) == 0)
            Azimuthwinkel (zi,si) = 90;
        else
            if (XKoord (zi) * YKoord (si) < 0)
                Azimuthwinkel (zi,si)= 180 + atand(XKoord(zi)/ YKoord(si));
            else
                if (XKoord (zi) * YKoord (si) > 0)
                    Azimuthwinkel (zi,si)= atand(XKoord(zi)/YKoord(si));
                else
                    if XKoord (zi) == 0 && YKoord (si) > 0
                        Azimuthwinkel (zi,si) = 180;
                    else
                        Azimuthwinkel (zi,si) = 0;
                    end
                end
            end
        end
    end
end

```



```
end
% Berechnung Radialabstand
Radialabstand (zi,si) = sqrt(Augenhoehe^2 + XKoord (zi)^2 + YKoord (si)^2);

% Berechnung Elevationswinkel
Elevationswinkel (zi, si) = asind(Augenhoehe /Radialabstand (zi,si));

% Berechnung vxy
vxy (zi, si) = -Winkelv * sqrt ((XKoord(zi))^2+(YKoord(si)+Kurvenradius)^2);

% Berechnung Hilfswinkel
if (XKoord(zi)^2+(YKoord(si)-Kurvenradius)^2) == 0
    gw (zi,si)= 90;
else
    gw                                     (zi,si)=
acosd((YKoord(si)+Kurvenradius)/sqrt((XKoord(zi))^2+(YKoord(si)+Kurvenradius)^2));
end
dw (zi,si)= 180-gw(zi,si)- Azimuthwinkel(zi,si)+180;
% Berechnung Winkel zwischen Geschwindigkeitsvektor und Sichtlinie
tw (zi,si)= 90-dw (zi,si)-Sekantenwinkel;
% Berechnung sichtbarer Anteil der Geschwindigkeit
vsichtbar (zi,si)= vxy (zi, si)* sqrt( (sind(tw (zi,si)))^2      +( (cosd(tw(zi,si)))^2 *
(sind(Elevationswinkel(zi, si)))^2 ) );
% Berechnung des optischen Flusses
OptFluss (zi,si)= asind (vsichtbar (zi,si)/Radialabstand (zi,si));
if OptFluss (zi,si)>=20
    OptFluss (zi,si)=100;
    OptFluss2 (zi,si)=20;
else
    if (OptFluss (zi,si)<= 0.03)
        OptFluss (zi,si)=100;
        OptFluss2 (zi,si)=0;
    else
        OptFluss2 (zi,si)=5;
    end
end
end
end
end

%x = XKoord (51)
%y = YKoord (51)
%sichtbaregeschwindigkeit = vxy (51, 51) * sqrt( (sind(tw (51,51)))^2      +( (cosd(tw(51,51)))^2 *
(sind(Elevationswinkel(51, 51)))^2 ) )
%xygeschw=vxy (51, 51)
%sinustwinkel=sind(tw (51,51))
%cosinustwinkel=cosd(tw(51,51))
%sinuselevwinkel=sind(Elevationswinkel(51, 51))
%cosinuselevwinkel=cosd(Elevationswinkel(51, 51))

% Grafikausgabe
figure
clf
surfc ( YKoord, XKoord, OptFluss);
% contour ( YKoord, XKoord,OptFluss, 0.05 );
% contour ( YKoord, XKoord,OptFluss, 20 );
% clabel (C,h);
%axis ([SpalteStart SpalteEnd ZeileStart ZeileEnd 0 20]);
view ([180 90])
shading interp
colormap hsv
```



Versuchsbegleitender Fragebogen der zweiten Versuchsreihe mit soziodemographischen Fragen, Fragen zur Simulatoreignung, zur Einstellung zum Fahrzeug und Technik, sowie zum Erleben des Versuches:

Aufgabe:

Sie sollen die vorgegebene Strecke durchfahren.

Dabei sollen sie möglichst nach STVO fahren, also Geschwindigkeiten als auch Vorfahrten beachten.

An Kreuzungen/ Einmündungen sollen sie immer geradeaus fahren, bzw. der vorgeschriebenen Fahrtrichtung folgen.

Bei der Strecke handelt es sich überwiegend um eine Überlandfahrt. Es werden verschiedene Situationen im Alltagsverkehr untersucht.

Ablauf:

1. Fragebogen bis Frage 54 beantworten (ca. 10 Min)
2. Dikablis-Brille anlegen
3. Evtl. Übungsfahrt (ca. 10min)
4. Dikablis-Brille kalibrieren (ca.5min)
5. Versuchsfahrt (ca. 10 Min)
6. abschließende Fragen zur Fahrt beantworten (ca. 5 Min)

Die Angaben im Fragebogen sind freiwillig und werden streng vertraulich behandelt. Möchten Sie eine Frage nicht beantworten klicken Sie bitte auf weiter.

1. Größe

cm

2. Winkel links

3. Winkel rechts

4. Sitzhöhe

cm

5. Wie lautet Ihre eMail? (für eventuelle Nachfragen; wird nicht an dritte weitergegeben; Falls keine angegeben wird einfach auf "weiter" drücken)

6. Wie alt sind sie?

Jahre

7. Welchen höchsten Bildungsabschluss besitzen Sie?

- | | |
|---|---|
| <input type="radio"/> Hauptschulabschluss | <input type="radio"/> abgeschlossenes Studium |
| <input type="radio"/> Realschulabschluss | <input type="radio"/> sonstiges: |
| <input type="radio"/> Hochschulreife | <input type="text"/> |



abgeschlossene Berufsausbildung

8. Welchen Beruf haben Sie?

9. Sind sie...

weiblich?

männlich?

10. Welche Händigkeit besitzen Sie?

Linkshänder

angepasster Rechtshänder

Rechtshänder

Links- und Rechtshänder

11. Tragen Sie eine Brille/Kontaktlinsen?

nein

zum Lesen

ja

zum Autofahren

12. Tragen sie eine Gleitsichtbrille?

nein

ja

13. Wieviel Dioptrien haben Sie links?

14. Wieviel Dioptrien haben Sie rechts?

15. Sind Sie...

kurzsichtig?

weder noch

weitsichtig?

16. Haben Sie (noch) eine andere Sehschwäche? nein ja, welche Art?:

17. Sind Sie farbenblind? nein ja

18. Haben Sie schon an einem Fahrversuch teilgenommen?

Ja, in einem Simulator

Ja, im Simulator und Versuchsfahrzeug

Ja, in einem Versuchsfahrzeug

Nein, noch nie

19. Wird es Ihnen als Beifahrer/Mitfahrer im KFZ übel?

nein

ja

gelegentlich

20. Wird es Ihnen beim Achterbahn fahren oder bei anderen Fahrgeschäften übel?

nein

ja

gelegentlich

21. Führendes Auge ermitteln:

Nun möchte ich mit ihnen einen kleinen Test durchführen. Bilden Sie mit Ihren beiden Händen eine kleine Öffnung zwischen Daumen und Zeigefinger. Stellen/Setzen Sie sich bitte gerade hin, strecken Sie die Arme nach vorne aus und schauen sie zuerst mit beiden Augen durch die Öffnung auf ein Ziel in mindestens 5m Entfernung (z.B. Lichtschalter).



Bitte halten Sie nun Ihre Körperhaltung unverändert. Kneifen Sie dann ein Auge zu und schauen Sie durch die Öffnung der Hände, dann mit dem anderen. Mit welchem Auge können Sie einäugig das Objekt weiterhin sehen?

- links rechts

22. Besitzen Sie einen Führerschein?

- nein

ja, seit (Jahreszahl):

23. Welche Fahrerlaubnisklassen besitzen Sie? (Mehrere Antworten möglich)

- PKW sonstiges:

Motorrad

LKW

24. Wieviele Kilometer fahren Sie etwa im Jahr?

25. Ich fahre derzeit....

- immer den gleichen PKW verschiedene PKW

26. Welche Marke(n) und welche(s) Modell(e) ?

27. Wie oft fahren Sie derzeit mit dem PKW?

- 1 mal wöchentlich 3-5 mal wöchentlich
 1-3 mal wöchentlich normalerweise täglich

28. Wo fahren Sie am häufigsten? (mehrere Antworten möglich)

- Stadtverkehr Autobahn
 Landstrasse

29. Was fahren Sie öfter? (mehrere Antworten möglich)

- Kurzstrecke (bis 10 km) Langstrecke (über 100 km)
 Mittelstrecke (10 km bis 100 km)

30. Haben Sie Erfahrung mit einem Automatikgetriebe?

- nein ja

31. Hatten Sie schon einmal einen (mehrere Antworten möglich)

- Unfall andere kritische Situation
 Beinaheunfall

32. falls ja. Um welche Situation handelte es sich

- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Zusammenstoß mit Fahrzeug das einbiegt oder kreuzt | <input type="checkbox"/> Zusammenstoß mit Fahrzeug, das anfährt, anhält oder steht |
| <input type="checkbox"/> Zusammenstoß mit Fahrzeug das vorausfährt oder wartet | <input type="checkbox"/> Zusammenstoß mit Fahrzeug, das seitlich in gleicher Richtung fährt |
| <input type="checkbox"/> Abkommen von der Fahrbahn | <input type="checkbox"/> Aufprall auf Hindernis auf der Fahrbahn |
| <input type="checkbox"/> Zusammenstoß mit | <input type="checkbox"/> Unfall anderer Art |



entgegenkommenden Fahrzeug
 Zusammenstoß zwischen Fahrzeug
 und Fußgänger

33. Haben Sie dabei das betreffende Objekt spät oder gar nicht gesehen?

nein ja

34. Im Vergleich zu anderen Autofahrern würde ich mich folgendermaßen einschätzen?

ungeübt -3 -2 -1 +1 +2 +3 erfahren

35. Ich würde meinen Fahrstil beschreiben als...

ruhig/ausgeglichen -3 -2 -1 +1 +2 +3 sportlich/dynamisch

36. Meine Kontrolle über das Fahrzeug schätze ich wie folgt ein.

Ich habe in manchen Situationen Schwierigkeiten -3 -2 -1 +1 +2 +3 Ich beherrsche es in jeder Situation

37. Mit einem fremden Fahrzeug zurecht zu kommen fällt mir leicht

-3 -2 -1 +1 +2 +3 bereitet mir Schwierigkeiten

38. Technische Dinge um das Auto sind mir gleichgültig

-3 -2 -1 +1 +2 +3 finde ich interessant

39. Autofahren bedeutet für mich ein notwendiges Übel

-3 -2 -1 +1 +2 +3 Spaß

40. Beim Autofahren fühle ich mich gestresst

-3 -2 -1 0 +1 +2 +3 bleibe ich entspannt

41. Ich probiere gerne neue technische Geräte aus. trifft nicht zu

-3 -2 -1 +1 +2 +3 trifft zu

42. Ich spiele gerne Computerspiele. überhaupt

-3 -2 -1 +1 +2 +3 oft



nicht

Welche Erfahrungen haben Sie mit folgenden Systemen?

	keine	mal	aus -	ab u.	oft	sehr oft
		gesehen	probiert	zu		genutzt
43. Geschwindigkeits-regelanlage (Tempomat)	<input type="radio"/>					
44. Elektronische Abstandsregelanlage (ACC)	<input type="radio"/>					
45. Navigationssystem	<input type="radio"/>					
46. Bedieneinheit für Multimedia (iDrive, MMI, COMAND)	<input type="radio"/>					
47. Head-Up-Display	<input type="radio"/>					
48. Elektronische Einparkhilfe	<input type="radio"/>					

49. Ich fühle mich im Moment..

entspannt/ ocker	-3	-2	-1	+1	+2	+3	gestresst/nervös
	<input type="radio"/>						

50. Ich bin im Moment..

erholt	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	müde
	<input type="radio"/>							

51. Ich fühle mich..

gesund	-3	-2	-1	+1	+2	+3	krank
	<input type="radio"/>						

Ich bin derzeit außergewöhnlich belastet.

	stark	-3	-2	-1	+1	+2	+3	schwach
52. Im beruflichen Umfeld.		<input type="radio"/>						
53. Im persönlichen Umfeld.		<input type="radio"/>						
54. Im familiären Umfeld.		<input type="radio"/>						

Fragen nach der Fahrt:

55. Ich fühlte mich von den eingeblendeten Markern gestört.

sehr gar nicht
 etwas

56. Ich fühlte mich auf der Strecke immer sicher.

ja
 nein, ich welchen Situationen nicht?

57. Ich hatte immer die volle Sicht auf die Kreuzungen



- ja
- nein, in welchen Situationen nicht?

58. Ich hatte immer die gewünschte Übersicht über die anderer Verkehrsteilnehmer

- ja
- nein, warum nicht?

59. War Ihr linkes Sichtfeld in den Kreuzungen eingeschränkt?

- | | | | | | | | |
|-------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------|
| stark | -3 | -2 | -1 | +1 | +2 | +3 | gar nicht |
| | <input type="radio"/> | |

60. War Ihr rechtes Sichtfeld in den Kreuzungen eingeschränkt?

- | | | | | | | | | |
|-------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------|
| stark | -3 | -2 | -1 | 0 | +1 | +2 | +3 | gar nicht |
| | <input type="radio"/> | |

61. In manchen Abschnitten war die Sicht auf die Kreuzungen nicht optimal. Konnten Sie dabei eine verstärkte Bewegung Ihres Kopfes (Drehen, Nicken, etc.) feststellen?

- ja
- nein

62. Ich achte beim Anfahren an Kreuzungen

- eher auf den linksseitigen Verkehr
- auf den links- und rechtsseitigen Verkehr jeweils gleich stark
- eher auf den rechtsseitigen Verkehr

63. Zum Ende der Fahrt achtete ich stärker auf den Querverkehr an den Kreuzungen, als zu Beginn der Fahrt

- | | | | | | | | |
|-----------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------|
| trifft nicht zu | -3 | -2 | -1 | +1 | +2 | +3 | trifft zu |
| | <input type="radio"/> | |

64. Ich habe ein oder mehrere Auto(s) im Querverkehr erst spät erkannt

- | | | | | | | | |
|-----------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------|
| trifft nicht zu | -3 | -2 | -1 | +1 | +2 | +3 | trifft zu |
| | <input type="radio"/> | |

65. Das Verhalten des Querverkehrs war

- | | | | | | | | |
|--------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------|
| überraschend | -3 | -2 | -1 | +1 | +2 | +3 | kalkulierbar |
| | <input type="radio"/> | |

Vielen Dank