

Vitalij Sadovitch

# Fehlertolerante Anzeigengestaltung für Augmented Reality Head-up-Displays

Bewertung und Kompensation von  
Registrierungsfehlern im automobilen  
Kontext

---

# **AutoUni – Schriftenreihe**

Band 145

**Reihe herausgegeben von/Edited by**  
Volkswagen Aktiengesellschaft  
AutoUni

Die Volkswagen AutoUni bietet Wissenschaftlern und Promovierenden des Volkswagen Konzerns die Möglichkeit, ihre Forschungsergebnisse in Form von Monographien und Dissertationen im Rahmen der „AutoUni Schriftenreihe“ kostenfrei zu veröffentlichen. Die AutoUni ist eine international tätige wissenschaftliche Einrichtung des Konzerns, die durch Forschung und Lehre aktuelles mobilitätsbezogenes Wissen auf Hochschulniveau erzeugt und vermittelt.

Die neun Institute der AutoUni decken das Fachwissen der unterschiedlichen Geschäftsbereiche ab, welches für den Erfolg des Volkswagen Konzerns unabdingbar ist. Im Fokus steht dabei die Schaffung und Verankerung von neuem Wissen und die Förderung des Wissensaustausches. Zusätzlich zu der fachlichen Weiterbildung und Vertiefung von Kompetenzen der Konzernangehörigen fördert und unterstützt die AutoUni als Partner die Doktorandinnen und Doktoranden von Volkswagen auf ihrem Weg zu einer erfolgreichen Promotion durch vielfältige Angebote – die Veröffentlichung der Dissertationen ist eines davon. Über die Veröffentlichung in der AutoUni Schriftenreihe werden die Resultate nicht nur für alle Konzernangehörigen, sondern auch für die Öffentlichkeit zugänglich.

The Volkswagen AutoUni offers scientists and PhD students of the Volkswagen Group the opportunity to publish their scientific results as monographs or doctor's theses within the "AutoUni Schriftenreihe" free of cost. The AutoUni is an international scientific educational institution of the Volkswagen Group Academy, which produces and disseminates current mobility-related knowledge through its research and tailor-made further education courses. The AutoUni's nine institutes cover the expertise of the different business units, which is indispensable for the success of the Volkswagen Group. The focus lies on the creation, anchorage and transfer of new knowledge.

In addition to the professional expert training and the development of specialized skills and knowledge of the Volkswagen Group members, the AutoUni supports and accompanies the PhD students on their way to successful graduation through a variety of offerings. The publication of the doctor's theses is one of such offers. The publication within the AutoUni Schriftenreihe makes the results accessible to all Volkswagen Group members as well as to the public.

**Reihe herausgegeben von/Edited by**

Volkswagen Aktiengesellschaft

AutoUni

Brieffach 1231

D-38436 Wolfsburg

<http://www.autouni.de>

Weitere Bände in der Reihe <http://www.springer.com/series/15136>

---

Vitalij Sadovitch

# Fehlertolerante Anzeigengestaltung für Augmented Reality Head-up-Displays

Bewertung und Kompensation  
von Registrierungsfehlern im  
automobilen Kontext

 Springer

Vitalij Sadovitch  
AutoUni  
Wolfsburg, Deutschland

Zugl.: Berlin, Technische Universität, Diss., 2019

Die Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse der im Rahmen der AutoUni – Schriftenreihe veröffentlichten Doktorarbeiten sind allein die der Doktorandinnen und Doktoranden.

ISSN 1867-3635

ISSN 2512-1154 (electronic)

AutoUni – Schriftenreihe

ISBN 978-3-658-29519-6

ISBN 978-3-658-29520-2 (eBook)

<https://doi.org/10.1007/978-3-658-29520-2>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2020

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Springer ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

# Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand in der Konzernforschung der Volkswagen AG. Ich möchte all den vielen Menschen danken, die mich währenddessen unterstützten, inspirierten, motivierten, förderten und forderten aber auch mal auf andere Gedanken brachten.

Der erste Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr. Matthias Rötting, der mit seiner aufgeschlossenen Art der Betreuung stets flexibel auf meine situativen Bedürfnisse reagierte, die notwendigen Fragen stellte und mir immer das Gefühl gab auf dem richtigen Weg zu sein. Außerdem danke ich Prof. Dr. Mark Vollrath für die Übernahme des Zweitgutachtens und Prof. Dr. Henning Jürgen Meyer für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Ferner möchte ich meinen Vorgesetzten dafür danken, dass sie mir die Bearbeitung dieses spannenden Forschungsthemas in einem tollen Arbeitsumfeld ermöglicht haben. Ganz besonderer Dank gilt meinen beiden internen Betreuern, deren Betreuungsschwerpunkte sich bestens ergänzt haben. Danke für die unzähligen fachlichen sowie methodischen Diskussionen und Anregungen! Danke für die hingebungsvolle Unterstützung beim Vorbereiten der Studien! Danke für das fleißige Korrekturlesen! Danke für die Entscheidungshilfen und die motivierenden Worte als auch Fristen! Ohne euch hätte ich diese Arbeit so nicht schreiben können.

Ich möchte auch allen Kollegen danken, mit denen ich in spannenden Projekten zusammenarbeiten konnte. Ich hatte großen Spaß und konnte viel von euch Lernen. Insbesondere danke ich allen Studenten, deren Praktika und Abschlussarbeiten ich betreuen durfte. Ihr seid mir eine große Hilfe und tolle Sparringspartner gewesen! Außerdem danke ich dem Simulatorteam und dem Probandenpool für die Unterstützung bei der Durchführung der Untersuchungen.

Das Netzwerk der Doktoranden des Volkswagen Konzerns habe ich als Ort der gegenseitigen Unterstützung und des wissenschaftlichen Austausches ganz besonders zu schätzen gelernt. In diesem Zuge möchte ich mich beim Doktorandenkolleg und der Doktorandenrunde unserer Abteilung für den tollen Zusammenhalt bedanken. Ich bin froh in diesen Kreisen nicht nur geschätzte Kollegen, sondern auch echte Freunde gefunden zu haben!

Abschließend danke ich meiner Familie. Ihr habt mich zu jeder Zeit mit viel Verständnis unterstützt, mich motiviert und mich mit den Fragen nach dem Fortschritt meiner Arbeit wieder an den Schreibtisch komplimentiert, wenn ich mich selbst nicht überwinden konnte. Ganz besonders möchte ich mich in diesem Zuge bei meinen Eltern, Olga und Leonid, dafür bedanken, dass sie mir sämtliche Türen im Leben geöffnet haben. Danke!

Vitalij Sadovitch

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>XI</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>XV</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>XVII</b>
<b>Kurzfassung</b> .....	<b>XIX</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>XXI</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Theoretischer Hintergrund</b> .....	<b>3</b>
2.1 Kognitionswissenschaftliche Grundlagen .....	3
2.1.1 Informationsverarbeitung.....	3
2.1.2 Visuelle Wahrnehmung.....	4
2.1.3 Aufmerksamkeit.....	10
2.1.4 Situationsbewusstsein .....	11
2.2 Grundlagen der Fahrzeugführung.....	12
2.2.1 Die Fahraufgabe .....	12
2.2.2 Anzeigen zur Fahrerunterstützung .....	13
2.3 Augmented Reality .....	15
2.3.1 Begriffliche Abgrenzung.....	15
2.3.2 Technische Herausforderungen.....	17
2.3.3 Anwendungsbereiche .....	21
2.4 Augmented Reality Head-up-Display .....	22
2.4.1 Displaytechnologie.....	22
2.4.2 Fahrzeugverortung und Umfelderkennung .....	26
2.4.3 Potenziale eines AR-HUD .....	29
2.4.4 Überblick über Anzeigekonzepte und Forschungsergebnisse .....	30
2.4.5 Technische und gestalterische Herausforderungen.....	36
2.4.6 Ansätze zur Reduktion und Kompensation von Registrierungsfehlern .....	39
<b>3 Zielsetzung der Arbeit</b> .....	<b>45</b>
<b>4 Betrachtung und Modellierung von Registrierungsfehlern</b> .....	<b>49</b>
4.1 Kategorisierung von Registrierungsfehlern.....	49
4.1.1 Überblick über bestehende Kategorisierungen .....	49

4.1.2	Herleitung einer Taxonomie zur Fehlerkategorisierung .....	51
4.1.3	Metrik zur Fehlerbeschreibung .....	57
4.2	Objektive Fehlerbewertung .....	57
4.2.1	Definition eines Referenzsystems .....	58
4.2.2	Bewertung der Lateraldiskrepanz .....	59
4.2.3	Bewertung der Tiefendiskrepanz .....	61
4.2.4	Zusammenfassung .....	65
4.3	Aufbau einer Testumgebung zur Fehlermodellierung .....	66
4.3.1	Versuchsumgebungen .....	66
4.3.2	Systemarchitektur .....	68
<b>5</b>	<b>Empirische Untersuchung zur subjektiven Fehlerbewertung .....</b>	<b>73</b>
5.1	Fragestellung .....	73
5.2	Methode .....	74
5.2.1	Versuchsaufbau .....	74
5.2.2	Stichprobe .....	75
5.2.3	Szenarien .....	76
5.2.4	Unabhängige Variablen .....	77
5.2.5	Abhängige Variablen .....	78
5.2.6	Versuchsablauf .....	79
5.2.7	Hypothesen .....	79
5.3	Ergebnisse .....	80
5.3.1	Systemakzeptanz .....	81
5.3.2	Akzeptanzschwellen .....	86
5.3.3	Weiterführende Fehlerbewertung .....	90
5.3.4	Erweiterte Erkenntnisse durch Expertenkommentare .....	94
5.4	Diskussion .....	95
5.4.1	Diskussion der Ergebnisse .....	95
5.4.2	Diskussion der Untersuchungsmethode .....	96
5.4.3	Zusammenfassung .....	98
<b>6</b>	<b>Entwicklung fehlertoleranter Gestaltungsmerkmale .....</b>	<b>99</b>
6.1	Explorative Realfahrten .....	99
6.1.1	Methode .....	99
6.1.2	Ergebnisse .....	104
6.1.3	Diskussion .....	107
6.2	Untersuchung des Kompensationspotenzials in einer Navigationsaufgabe .....	107
6.2.1	Methode .....	108
6.2.2	Ergebnisse .....	112
6.2.3	Diskussion .....	117

6.3	Durchführung von Expertenworkshops.....	119
6.3.1	Methode.....	120
6.3.2	Ergebnisse .....	122
6.4	Herleitung generischer Gestaltungsmerkmale.....	124
6.5	Zusammenfassung .....	127
<b>7</b>	<b>Empirische Untersuchung fehlertoleranter Gestaltungsmerkmale.....</b>	<b>129</b>
7.1	Fragestellung .....	129
7.2	Methode.....	129
7.2.1	Vorstudie .....	130
7.2.2	Versuchsaufbau .....	132
7.2.3	Stichprobe .....	132
7.2.4	Primär- und Sekundäraufgaben.....	133
7.2.5	Unabhängige Variablen.....	135
7.2.6	Abhängige Variablen .....	136
7.2.7	Versuchsablauf.....	138
7.2.8	Hypothesen.....	139
7.3	Ergebnisse.....	140
7.3.1	Fehlertoleranz.....	140
7.3.2	Allgemeine subjektive Bewertungsmaße.....	143
7.3.3	Bremsreaktionen .....	146
7.3.4	Tactile Detection Response Task.....	147
7.3.5	Erweiterte Erkenntnisse durch offene Kommentare .....	149
7.4	Diskussion .....	152
7.4.1	Diskussion der Ergebnisse .....	152
7.4.2	Diskussion der Untersuchungsmethode .....	155
7.4.3	Nacherhebung ohne Nebenaufgaben.....	156
7.4.4	Zusammenfassung.....	157
<b>8</b>	<b>Abschließende Diskussion.....</b>	<b>159</b>
8.1	Zusammenfassung der Ergebnisse .....	159
8.2	Fazit und Ausblick.....	162
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>165</b>
	<b>Anhang .....</b>	<b>173</b>

# Abbildungsverzeichnis

<b>Abbildung 2.1:</b>	Informationsverarbeitungsmodell.....	3
<b>Abbildung 2.2:</b>	Aufbau des menschlichen Auges.....	5
<b>Abbildung 2.3:</b>	Wirkungsbereich von Tiefenreizen .....	8
<b>Abbildung 2.4:</b>	Modell des Situationsbewusstseins .....	12
<b>Abbildung 2.5:</b>	Arten von Head-up-Displays am Beispiel einer Navigationsanzeige und einer Warnung. ....	15
<b>Abbildung 2.6:</b>	Reality-Virtuality-Continuum .....	16
<b>Abbildung 2.7:</b>	Klassifikation von Augmented Reality Visualisierungstechniken .....	17
<b>Abbildung 2.8:</b>	Funktionsprinzip eines Head-up-Displays .....	23
<b>Abbildung 2.9:</b>	Anzeigekonzepte zur kontaktanalogen Darstellung von Navigationshinweisen.....	31
<b>Abbildung 2.10:</b>	Anzeigekonzepte zur kontaktanalogen Darstellung von Gefahrenwarnungen.....	33
<b>Abbildung 2.11:</b>	Anzeigekonzepte zur kontaktanalogen Darstellung von ACC-Informationen und Sicherheitsabständen. ....	34
<b>Abbildung 2.12:</b>	Anzeigekonzepte zur kontaktanalogen Darstellung von Lane Assist Informationen und Spurverlassenswarnungen .....	34
<b>Abbildung 2.13:</b>	Anzeigekonzepte zur kontaktanalogen Darstellung von Verkehrszeichen. ....	35
<b>Abbildung 2.14:</b>	Anzeigekonzepte zur kontaktanalogen Darstellung von Points of Interests.....	36
<b>Abbildung 2.15:</b>	Verdeckungseffekte in einem AR-HUD. ....	37
<b>Abbildung 4.1:</b>	Taxonomie zur Kategorisierung von Registrierungsfehlern .....	52
<b>Abbildung 4.2:</b>	Positions- und Orientierungsfehler in Relation zum Fahrerblickpunkt	55
<b>Abbildung 4.3:</b>	Visualisierung der Fehlerkategorien.....	56
<b>Abbildung 4.4:</b>	Visualisierung der Fehlerkategorien II.....	56
<b>Abbildung 4.5:</b>	Metrik zur Beschreibung von Registrierungsfehlern .....	57
<b>Abbildung 4.6:</b>	Auswirkungen von Positions- und Orientierungsfehlern auf die Lateraldiskrepanz.....	60
<b>Abbildung 4.7:</b>	Berechnete Lateraldiskrepanzen durch Positions- und Orientierungsfehler für verschiedene Registrierungsdistanzen.....	61
<b>Abbildung 4.8:</b>	Auswirkungen von Fahrzeugnickbewegungen auf die Tiefendiskrepanz .....	62
<b>Abbildung 4.9:</b>	Auswirkungen von vertikalen Kurven auf die Tiefendiskrepanz.....	63

<b>Abbildung 4.10:</b>	Berechnete Tiefendiskrepanzen durch Positions- und Orientierungsfehler für verschiedene Registrierungsdistanzen.....	65
<b>Abbildung 4.11:</b>	Stereoskopischer Fahrsimulator .....	67
<b>Abbildung 4.12:</b>	Schematische Darstellung der Systemarchitektur. ....	68
<b>Abbildung 4.13:</b>	Tooling zur dreidimensionalen Repräsentation realer Straßenpfade....	71
<b>Abbildung 5.1:</b>	Versuchsaufbau der Filmstudie im Fahrsimulator .....	75
<b>Abbildung 5.2:</b>	Fahrszenarien aus der Fahrerperspektive. ....	76
<b>Abbildung 5.3:</b>	Systemakzeptanz der Novizen (Filmstudie) bei den untersuchten Fehlerarten und Fehlerausprägungen.....	82
<b>Abbildung 5.4:</b>	Systemakzeptanz der Experten (Realfahrtstudie) bei den untersuchten Fehlerarten und Fehlerausprägungen .....	83
<b>Abbildung 5.5:</b>	Interaktionsdiagramm der Usefulness (Novizen).....	85
<b>Abbildung 5.6:</b>	Interaktionsdiagramm der Satisfaction (Novizen).....	86
<b>Abbildung 5.7:</b>	Logistisches Funktionsdiagramm der Akzeptanzwahrscheinlichkeit für laterale Positionsfehler.....	88
<b>Abbildung 5.8:</b>	Logistisches Funktionsdiagramm der Akzeptanzwahrscheinlichkeit für Latenz.....	89
<b>Abbildung 5.9:</b>	Logistisches Funktionsdiagramm der Akzeptanzwahrscheinlichkeit für Yaw-Orientierungsfehler. ....	89
<b>Abbildung 5.10:</b>	Logistisches Funktionsdiagramm der Akzeptanzwahrscheinlichkeit für Pitch-Orientierungsfehler.....	89
<b>Abbildung 5.11:</b>	Positionsgenauigkeit von Fahrbahn- und Objektaugmentierungen bei den untersuchten Fehlerarten und Fehlerausprägungen. ....	91
<b>Abbildung 5.12:</b>	Positionsstabilität von Fahrbahn- und Objektaugmentierungen bei den untersuchten Fehlerarten und Fehlerausprägungen. ....	92
<b>Abbildung 5.13:</b>	Funktionsunterstützung von Fahrbahn- und Objektaugmentierungen bei den untersuchten Fehlerarten und Fehlerausprägungen. ....	93
<b>Abbildung 5.14:</b>	Störempfinden von Fahrbahn- und Objektaugmentierungen bei den untersuchten Fehlerarten und Fehlerausprägungen.....	94
<b>Abbildung 6.1:</b>	Anzeigevarianten der Fahrbahnaugmentierung.....	100
<b>Abbildung 6.2:</b>	Anzeigevarianten der Fahrbahnaugmentierung II.....	101
<b>Abbildung 6.3:</b>	Anzeigevarianten der Objektaugmentierung.....	101
<b>Abbildung 6.4:</b>	Anzeigevarianten der Objektaugmentierung II. ....	102
<b>Abbildung 6.5:</b>	Positionsvarianten der Augmentierungen.....	103
<b>Abbildung 6.6:</b>	Ranking der Anzeigevarianten A1 - A4 und B1 - B4 zur Fahrbahnaugmentierung .....	105

<b>Abbildung 6.7:</b>	Ranking der Anzeigevarianten C1 - C4 zur Objektaugmentierung....	106
<b>Abbildung 6.8:</b>	Ranking der Anzeigevarianten D1 - D4 zur Objektaugmentierung ...	106
<b>Abbildung 6.9:</b>	Navigationsszenario aus der Topview-Perspektive.....	108
<b>Abbildung 6.10:</b>	Untersuchte Anzeigevarianten: A: Teppich, B: Schlauch, C: Pfeil....	109
<b>Abbildung 6.11:</b>	Abbiegefehler unter den Stufen der Tiefendiskrepanz mit den untersuchten Anzeigevarianten.....	112
<b>Abbildung 6.12:</b>	Abbiegefehler unter den Gruppen der Sensorpräzision mit den untersuchten Anzeigevarianten.....	113
<b>Abbildung 6.13:</b>	VdL-Score (Van der Laan et al., 1997) zur Bewertung der Akzeptanz der Anzeigevarianten unter den Gruppen der Sensorpräzision.....	114
<b>Abbildung 6.14:</b>	SUS-Score (Brooke, 1996) zur Bewertung der Usability der Anzeigevarianten unter den Gruppen der Sensorpräzision. ....	115
<b>Abbildung 6.15:</b>	SEA-Score (Eilers et al., 1986) zur Bewertung der Anstrengung der Anzeigevarianten unter den Gruppen der Sensorpräzision. ....	115
<b>Abbildung 6.16:</b>	Allgemeine Anzeigenbewertung der Anzeigevarianten unter den Gruppen der Sensorpräzision. ....	116
<b>Abbildung 6.17:</b>	Visualisierung von Registrierungsfehlern für die Experten-Workshops .....	121
<b>Abbildung 6.18:</b>	Fotografie exemplarischer Workshopergebnisse. ....	122
<b>Abbildung 6.19:</b>	Kategorien von Augmentierungen am Beispiel ausgewählter Fotografien der Workshopergebnisse.....	123
<b>Abbildung 6.20:</b>	Variationen geometrischer Körper am Beispiel eines Würfels .....	124
<b>Abbildung 6.21:</b>	Augmentierung von Fahrbahnen und Objekten durch (A) Markierung und (B) Einfassung.....	125
<b>Abbildung 6.22:</b>	Fehlertolerante Gestaltungsmerkmale zur Markierung und Einfassung von Fahrbahnen und Objekten.....	127
<b>Abbildung 7.1:</b>	Anzeigevarianten der Vorstudie .....	130
<b>Abbildung 7.2:</b>	Mittleres Störimpfinden gegenüber dem Registrierungsfehler für die untersuchten Anzeigevarianten in Form von Markierungen und Einfassungen.....	131
<b>Abbildung 7.3:</b>	Visualisierung der untersuchten ACC-Szenarien.....	134
<b>Abbildung 7.4:</b>	Versuchsperson mit Shutterbrille und tDRT-Apparatur.....	134
<b>Abbildung 7.5:</b>	Darstellung der unabhängigen Variablen .....	135
<b>Abbildung 7.6:</b>	Mittlere Fehlertoleranz der Anzeigevarianten.....	141
<b>Abbildung 7.7:</b>	Störimpfinden der Anzeigevarianten bei auftretenden Registrierungsfehlern.....	142
<b>Abbildung 7.8:</b>	Ranking der Anzeigevarianten hinsichtlich der Fehlertoleranz. ....	142

---

<b>Abbildung 7.9:</b> Allgemeine Bewertung der AR-Anzeigevarianten.....	143
<b>Abbildung 7.10:</b> Hedonische Qualität der Anzeigevarianten .....	144
<b>Abbildung 7.11:</b> Allgemeine Bewertung der AR-Referenzanzeige und der konventionellen HUD-Anzeige .....	145
<b>Abbildung 7.12:</b> Bremsreakionszeiten im Szenario C (kritischer ACC-Fehler) bei der AR-Referenzanzeige und der konventionellen HUD-Anzeige ....	147
<b>Abbildung 7.13:</b> Mittlere Hitraten und Reaktionszeiten der taktilen Detection Response Task für die AR-Referenzanzeige und die konventionellen HUD-Anzeige. ....	149
<b>Abbildung 7.14:</b> Positive und negative Kommentare zu den AR-Anzeigevarianten ....	150
<b>Abbildung 7.15:</b> Positive und negative Kommentare zu der konventionellen HUD- Anzeige im Vergleich zur AR-Referenzanzeige .....	151
<b>Abbildung 7.16:</b> Mittlere Fehlertoleranz der Anzeigevarianten ohne Ausführung der Nebenaufgaben .....	157

# Tabellenverzeichnis

<b>Tabelle 4.1:</b>	Lateraldiskrepanzen durch Yaw-Orientierungsfehler .....	60
<b>Tabelle 4.2:</b>	Tiefendiskrepanzen durch Fahrzeugnickbewegungen. ....	63
<b>Tabelle 4.3:</b>	Tiefendiskrepanzen durch vertikale Kurven.....	64
<b>Tabelle 5.1:</b>	Ausprägung der unabhängigen Variablen .....	77
<b>Tabelle 5.2:</b>	Systemakzeptanz von Novizen und Experten bei den untersuchten Fehlerarten und Fehlerausprägungen.....	81
<b>Tabelle 5.3:</b>	Abgeleitete Genauigkeitsanforderungen .....	88
<b>Tabelle 6.1:</b>	Bedingungen der einzelnen Trials .....	104
<b>Tabelle 7.1:</b>	Bremsreaktionszeiten im Szenario C (kritischer ACC-Fehler) .....	146
<b>Tabelle 7.2:</b>	Kumulierte Anzahlen ausgewerteter Stimuli aller sechs Anzeigevarianten pro Event .....	148

# Abkürzungsverzeichnis

<b>Pkw</b>	Personenkraftwagen
<b>FAS</b>	Fahrerassistenzsystem
<b>FIS</b>	Fahrerinformationssystem
<b>HUD</b>	Head-up-Display
<b>AR-HUD</b>	Augmented Reality Head-up-Display
<b>STSS</b>	Short-term Sensory Store
<b>SEEV</b>	Saliency-Effort-Expactency-Value
<b>ACC</b>	Adaptive Cruise Control
<b>AR</b>	Augmented Reality
<b>VR</b>	Virtual Reality
<b>AV</b>	Augmented Virtuality
<b>HMD</b>	Head-mounted-Display
<b>HWD</b>	Head-worn-Display
<b>VST</b>	Video See-Through
<b>OST</b>	Optical See-Trough
<b>DOF</b>	Degrees of Freedom
<b>FOV</b>	Field of View
<b>PGU</b>	Picture Generation Unit
<b>LDA</b>	Look-down-Angle
<b>TFT</b>	Thin-Film-Transistor
<b>LCD</b>	Liquid-Crystal-Display
<b>DLP</b>	Digital Light Processing
<b>HOE</b>	Holographisch Optisches Element
<b>PVB</b>	Polyvinylbutyral
<b>ADASIS</b>	Advanced Driver Assistance Systems Interface Specification
<b>GNSS</b>	Globales Navigationssatellitensystem
<b>GPS</b>	Global Positioning System
<b>DGPS</b>	Differential Global Positioning System
<b>IMU</b>	Inertial Measurement Unit
<b>RTK</b>	Realtime-Kinematic-System
<b>TOF</b>	Time of Flight

<b>Radar</b>	Radio Detection and Ranging
<b>Lidar</b>	Light Detection and Ranging
<b>LDW</b>	Lane Departure Warning
<b>HDD</b>	Head-down-Display
<b>GPU</b>	Graphics Processing Unit
<b>VTD</b>	Virtual Test Drive
<b>HMI</b>	Human-Machine-Interface
<b>KML</b>	Keyhold Markup Language
<b>FBX</b>	Filmbox
<b>CAN</b>	Controller Area Network
<b>SD</b>	Standard Deviation
<b>tDRT</b>	Tactile Detection Response Task
<b>WVAO</b>	Wissenschaftliche Vereinigung für Augenoptik und Optometrie
<b>SUS</b>	System Usability Scale
<b>SEA</b>	Skala zur Erfassung erlebter Anstrengung

# Kurzfassung

Augmented Reality Head-up-Displays ermöglichen eine kontaktanaloge Darstellung von Informationen im Sichtfeld des Fahrers eines Personenkraftwagens. Durch die Erweiterung der realen Umgebung mit virtuellen Informationen, die direkt an ihrem Bezugspunkt verortet sind, wird der Fahrer sowohl visuell als auch kognitiv bei der Wahrnehmung und Verarbeitung der Anzeigehalte entlastet. Aufgrund einer eingeschränkten Genauigkeit der Fahrzeugsensorik und des Kartenmaterials sowie fahrdynamischer Einflüsse können dabei jedoch räumliche Abweichungen zwischen den virtuellen Anzeigehalten und der Umgebung entstehen. Ferner wirkt sich die Latenz der Informationsverarbeitung in einer zeitlich verzögerten Darstellung aus. Diese Effekte, die in dieser Arbeit als Registrierungsfehler bezeichnet werden, beeinflussen maßgeblich die Qualität eines Augmented Reality Head-up-Displays. Gegenstand dieser Arbeit sind die Bewertung unterschiedlicher Arten von Registrierungsfehlern und die Entwicklung fehlertoleranter Gestaltungsansätze zur Kompensation dieser.

Mittels einer eigenen Taxonomie werden im ersten Schritt diverse Fehlerquellen und daraus resultierende Fehlerarten kategorisiert. Basierend auf dieser Taxonomie erfolgt anschließend eine objektive Bewertung der Fehlerarten hinsichtlich daraus entstehender Diskrepanzen in der Augmentierung. Diejenigen Registrierungsfehler, die zu den größten Abweichungen führen, werden in einer empirischen Probandenstudie hinsichtlich des Einflusses auf die Nutzerakzeptanz eines Augmented Reality Head-up-Displays untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass bereits relativ gering ausgeprägte Registrierungsfehler die Akzeptanz signifikant beeinflussen, wobei Unterschiede zwischen den verschiedenen Fehlerarten bestehen. So wirkt sich eine fehlerhafte Rotation der Anzeige um die Querachse des Fahrzeuges am stärksten auf die wahrgenommene Nützlichkeit der Anzeige aus. Ferner existieren Unterschiede in der Wahrnehmung statischer Diskrepanzen durch Positions- und Orientierungsfehler und dynamischer Artefakte durch Latenz und Jitter. Basierend auf den Untersuchungsergebnissen werden in dieser Arbeit Genauigkeitsanforderungen an ein Augmented Reality Head-up-Display abgeleitet.

Zur Kompensation von Registrierungsfehlern erfolgt darüber hinaus eine Einführung und Evaluation des Ansatzes einer fehlertoleranten Anzeigengestaltung. Basierend auf mehreren Expertenworkshops und Vorstudien, deren Durchführung in einem realen Versuchsfahrzeug stattfindet, werden generische Gestaltungsmerkmale hergeleitet, die eine fehlertolerante Darstellung begünstigen. Die Evaluation der Gestaltungsmerkmale in einem stereoskopischen Fahrsimulator zeigt Unterschiede bei der Wahrnehmung und Bewertung von Registrierungsfehlern in Abhängigkeit der verwendeten Anzeigevarianten auf. So bewirkt zum Beispiel der Einsatz diffuser Konturen eine erhöhte, wahrgenommene Registrierungsgüte, trotz auftretender Ungenauigkeiten bei der Objektmarkierung. Somit stellt der gestalterische Ansatz fehlertoleranter Anzeigen eine sinnvolle Ergänzung technischer Maßnahmen zur Kompensation von Registrierungsfehlern in Augmented Reality Anwendungen dar.

# Abstract

Augmented reality head-up displays enhance the driver's view by a superimposition of virtual content onto the real environment. Virtual objects are thereby attached to a given reference point in reality, which supports the driver in processes of visual perception and cognition. However, due to limited accuracy of the vehicle sensors and map data, spatial deviations between the virtual content and the environment may occur. Additionally, system latency and driving dynamics lead to a delay in occurrence. These effects, which are referred to as registration errors, reduce the usability of augmented reality head-up displays significantly. Subjects of this thesis are the assessment of registration errors and the development of an error-tolerant design approach to counteract these.

In the first step, error sources and resulting types of errors are categorized by introducing a novel taxonomy. Based on this taxonomy, error types are assessed objectively regarding their impact on resulting deviations. The registration errors that lead to the largest deviations are investigated in an empirical study with regard to their influence on the user acceptance of an augmented reality head-up display. The results show that even relatively small registration errors significantly influence the system acceptance. Furthermore, differences in the effects between different types of errors are noted. The results indicate that an incorrect pitch rotation around the lateral vehicle axis has the strongest effect on the perceived usefulness of augmented reality visualizations. Moreover, perceptual differences were observed between static errors due to an incorrect position or orientation and dynamic errors due to latency or jitter. Based on the results of the empirical study, accuracy requirements for the development of augmented reality head-up displays are concluded.

With the objective to counteract registration errors, an error-tolerant design approach is introduced and evaluated. Based on workshops with augmented reality experts and a number of pretests error-tolerant design attributes are derived. The identified attributes are evaluated in a stereoscopic driving simulator. The results show significant differences in the perception and assessment of registration errors depending on the design of virtual objects. For instance, the use of diffuse instead of sharp shapes leads to a higher perceived registration accuracy, despite occurring errors. Consequently, the error-tolerant design approach is a useful supplement to several technical approaches in order to counteract registration errors in augmented reality.



# 1 Einleitung

Der Fahrer eines Personenkraftwagens (Pkw) wird in modernen Fahrzeugen durch eine Vielzahl von Fahrerassistenzsystemen (FAS) und Fahrerinformationssystemen (FIS) bei der Ausführung der komplexen Fahraufgabe unterstützt. Die Systeme beinhalten sowohl Komfortfunktionen als auch Informations- und Kommunikationsfunktionen (Ablaßmeier, 2009). Aufgrund der Vielzahl von dargestellten Informationen ist eine ergonomische Auslegung des Fahrerarbeitsplatzes von hoher Bedeutung.

Neben einem Kombiinstrument und einer Mittelkonsole sind viele Fahrzeuge heutzutage auch mit einem Head-up-Display (HUD) ausgestattet, das mittels einer Reflexion an der Windschutzscheibe die Darstellung von Informationen im direkten Sichtfeld des Fahrers ermöglicht. Dadurch reduzieren sich sowohl die Anzahl an Blickabwendungen von der Straße als auch die Ablesezeiten zur visuellen Aufnahme der Informationen (Milicic, 2010). Eine Erweiterung der herkömmlichen Technologie stellt das Augmented Reality Head-up-Display (AR-HUD) dar, das in der deutschsprachigen Literatur auch als kontaktanalogen HUD bezeichnet wird. Durch eine perspektivische Darstellung der Inhalte werden die virtuellen Informationen dabei in der Umgebung verortet. So kann zum Beispiel ein Navigationshinweis direkt an dem realen Abbiegepunkt positioniert werden. Dies reduziert im Vergleich zu einer abstrakten Darstellung auf einer 2D-Karte den kognitiven Interpretationsaufwand, den der Fahrer aufbringen muss (Gabbard, Fitch & Kim, 2014).

Zusätzlich zu einer komplexen Displaytechnologie erfordert die Realisierung eines AR-HUD umfangreiche und hochgenaue Informationen über das Fahrzeugumfeld und die Position des Egofahrzeuges. Aufgrund mangelnder Genauigkeit von Sensordaten und dem verfügbaren Kartenmaterial sowie den Einflüssen der Fahrdynamik (zum Beispiel Nickbewegungen des Fahrzeuges) können Abweichungen vom realen Bezugsort bei der Darstellung kontaktanaloger Inhalte im Head-up-Display auftreten (Bengler, Götze, Pfannmüller & Zaindl, 2015). Derartige Abweichungen werden in der Augmented Reality (dt.: Erweiterte Realität) als Registrierungsfehler bezeichnet (Holloway, 1995).

Erste Untersuchungen zu den Auswirkungen von auftretenden Registrierungsfehlern haben sowohl im Fahrsimulator (Pfannmüller, Walter & Bengler, 2015) als auch der Realfahrt (Jansen, 2013) eine Beeinträchtigung der subjektiven Systemakzeptanz und der Fahrleistung aufgezeigt. In den Studien wurde jedoch nicht zwischen verschiedenen Fehlerarten differenziert, obwohl sich unpräzise Sensordaten anders auf die virtuelle Anzeige auswirken als andere Störeinflüsse wie zum Beispiel Fahrzeugaufbaubewegungen. Ferner ermöglichen die Forschungsarbeiten auch keine Ableitung differenzierter Genauigkeitsanforderungen für ein Augmented Reality Head-up-Display.

Vor diesem Hintergrund erfolgt im ersten Teil dieser Dissertation eine Analyse diverser Einflussfaktoren und Fehlerarten. Hierzu wird nach der Einführung theoretischer Grundlagen (vgl. Kapitel 2), auf die sich die Überlegungen dieser Arbeit stützen, in Kapitel 4 eine Taxonomie zur Kategorisierung von Registrierungsfehlern für ein Augmented Reality Head-up-Display hergeleitet. Darauf aufbauend erfolgt eine objektive Betrachtung der Auswirkungen einzelner Fehlerquellen, ehe in Kapitel 5 eine empirische Untersuchung zur subjektiven Fehlerbewertung beschrieben wird. Ziel dieser Untersuchung ist es, Genauigkeitsanforderungen für ein AR-HUD hinsichtlich verschiedener Dimensionen zu ermitteln.

Durch Optimierung der Fahrzeuglokalisierung und Bildgenerierung lassen sich die Genauigkeit und Aktualität der Augmented Reality Anzeige verbessern. Neben diesen technischen Ansätzen zur Reduktion von Registrierungsfehlern wird im zweiten Teil dieser Arbeit ein gestalterischer Ansatz zur Kompensation von Registrierungsfehlern betrachtet. Der Ansatz basiert auf einer fehlertoleranten Anzeigengestaltung, die zur Erhöhung der subjektiv wahrgenommenen Registrierungsgüte beitragen soll, ohne dass die Registrierung virtueller Inhalte in der realen Umgebung objektiv verbessert wird. In Kapitel 6 werden mithilfe von explorativen Vorstudien in einem Versuchsfahrzeug und konzeptuellen Expertenworkshops fehlertolerante Gestaltungsmerkmale entwickelt.

Das Kapitel 1 beschreibt zur Evaluation der konzipierten, fehlertoleranten Gestaltungsmerkmale eine Simulatorstudie. Ziel dieser empirischen Untersuchung ist die Überprüfung der fehlerkompensierenden Wirkung der entwickelten Anzeigen. Neben der Fehlertoleranz sollen dabei auch weitere pragmatische und hedonische Merkmale der Anzeigevarianten evaluiert werden, um Rückschlüsse auf weitere Vor- und / oder Nachteile der Gestaltungsmerkmale ziehen zu können.

In Kapitel 8 werden abschließend die Ergebnisse aller Untersuchungen hinsichtlich der beiden zentralen Fragestellungen dieser Dissertation diskutiert:

- *Inwiefern wird die subjektive Akzeptanz eines Augmented Reality Head-up-Displays durch unterschiedliche Arten von Registrierungsfehlern beeinflusst?*
- *Inwiefern lassen sich unterschiedliche Arten von Registrierungsfehlern in einem Augmented Reality Head-up-Display durch eine fehlertolerante Anzeigengestaltung kompensieren?*

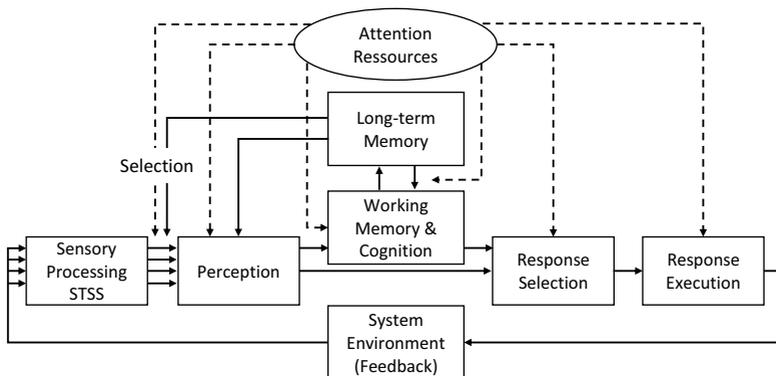
## 2 Theoretischer Hintergrund

In diesem Kapitel werden theoretische Grundlagen erörtert, auf denen die Überlegungen dieser Dissertation basieren. Als Ausgangspunkt für eine kognitionswissenschaftliche Betrachtung der Mensch-Maschine-Interaktion bei der Führung eines Personenkraftwagens wird zunächst die menschliche Informationsverarbeitung grundlegend beschrieben. Für ein tiefergehendes Verständnis der Aufnahme und Verarbeitung von Informationen werden ferner die Mechanismen der visuellen Wahrnehmung und die kognitiven Konstrukte *Aufmerksamkeit* sowie *Situationsbewusstsein* erläutert. Basierend auf diesen Grundlagen werden die Komplexität der Fahraufgabe erörtert und die Möglichkeiten einer Fahrerunterstützung durch informative Anzeigen vorgestellt. Der Schwerpunkt in dieser Arbeit liegt dabei auf dem Augmented Reality Head-up-Display. Dieses wird zunächst begrifflich und technologisch vor dem Hintergrund allgemeiner Augmented Reality Technologien und Anwendungen vorgestellt, ehe abschließend die konkrete Funktionsweise sowie die Potenziale und Herausforderungen eines AR-HUD erklärt werden.

### 2.1 Kognitionswissenschaftliche Grundlagen

#### 2.1.1 Informationsverarbeitung

In der Kognitionspsychologie wird angenommen, dass die menschliche Informationsverarbeitung hochdynamisch und teils parallel in mehreren Verarbeitungsstufen abläuft (Wickens, Hollands, Banbury & Parasuraman, 2012). In Abbildung 2.1 ist ein allgemeines Modell dargestellt, das im Folgenden näher erläutert wird.



**Abbildung 2.1:** Informationsverarbeitungsmodell (eigene Darstellung nach Wickens et al., 2012).

Im ersten Schritt werden Umgebungsreize mittels der Sinneskanäle (u.a. visuell, akustisch, haptisch) sensorisch verarbeitet. Dazu verweilen die Informationen maximal eine Sekunde lang in dem sensorischen Kurzzeitspeicher (engl.: Short-term Sensory Store, STSS), ehe

einem Bruchteil davon in Abhängigkeit vorliegender Informationen des Langzeitgedächtnisses (engl.: Long-term Memory) und vorhandener Aufmerksamkeitsressourcen (engl.: Attention Resources) eine Bedeutung zugeschrieben wird. Diese selektierten Informationen werden wahrgenommen und anschließend in einem komplexen Kognitionsprozess interpretiert, indem sie im Kurzzeitgedächtnis (engl.: Working Memory) mit Informationen aus dem Langzeitgedächtnis abgeglichen werden. Einige Informationen werden auch ohne tiefere kognitive Verarbeitung reflexartig interpretiert. Die sensorisch und kognitiv verarbeiteten Informationen beeinflussen maßgeblich die Handlungsauswahl (engl.: Response Selection). Die im Anschluss motorisch ausgeführte Handlung (engl.: Response Execution) wirkt sich auf die Systemumgebung (engl.: System Environment) aus und generiert damit ein Feedback, das den Kreislauf der Informationsverarbeitung erneut anstößt (Wickens et al., 2012). Handlungen lassen sich dabei nach Rasmussen (1983) in drei Verhaltensebenen unterteilen:

- *Fertigkeitsbasiertes Verhalten*: Ausführung automatisierter Gewohnheitshandlungen nach einem sensomotorischen Muster, ohne willentliche Zuwendung von Aufmerksamkeit.
- *Regelbasiertes Verhalten*: Handlungsausführung in vertrauten Situationen durch Anwendung erlernter Wenn-Dann-Regeln. Diese Regeln können sowohl auf eigenen Erfahrungen als auch auf Gelesenem oder Kommuniziertem basieren.
- *Wissensbasiertes Verhalten*: Bewusst gesteuerte Verhaltensausführung auf Basis analytischer Prozesse in unbekanntnen Situationen, zu denen keine Regeln vorliegen.

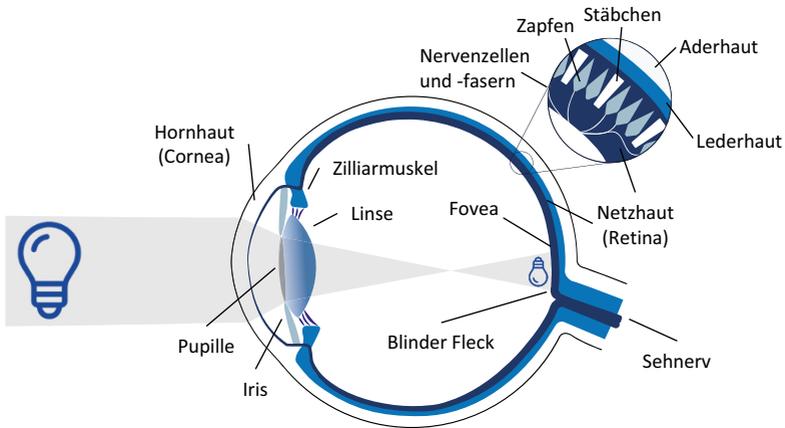
Die Aufmerksamkeit hat im Modell der Informationsverarbeitung eine besondere Rolle. Sie ist als eine begrenzte Ressource zu verstehen, die jedoch in allen Verarbeitungsstufen benötigt wird (Wickens et al., 2012). So dient die Aufmerksamkeit bei der Wahrnehmung von Informationen als Filter und beeinflusst gleichzeitig die Möglichkeiten der Auswahl und Ausführung regelbasierter und wissensbasierter Handlungen. Aufgrund der gegebenen Relevanz wird das Konstrukt der Aufmerksamkeit daher in Abschnitt 2.1.3 detailliert erörtert.

### 2.1.2 Visuelle Wahrnehmung

In Ergänzung zum allgemeinen Modell der Informationsverarbeitung wird in diesem Abschnitt die sensorische Informationsaufnahme für die visuelle Wahrnehmung ausführlicher erläutert. Diese stellt beim Autofahren die wichtigste Modalität dar, weil mehr als 90% der fahrrelevanten Informationen visuell aufgenommen werden (Hills, 1980).

#### *Funktionsweise des Auges*

Das menschliche Sehen basiert auf einer Transformation von Licht, das von der Umgebung in das Auge reflektiert wird und dort in elektrische Signale der visuellen Rezeptoren übersetzt wird. Sichtbares Licht ist nur ein kleiner Teil des elektromagnetischen Spektrums der Energien in der Umwelt, das abhängig von der Wellenlänge (390 nm bis 700 nm) farblich wahrgenommen wird (Bruce et al., 2003). In Abbildung 2.2 ist der Aufbau des menschlichen Auges schematisch dargestellt.



**Abbildung 2.2:** Aufbau des menschlichen Auges (eigene Darstellung in Anlehnung an Goldstein, 2008).

Das reflektierte Licht gelangt über die transparente Hornhaut (Cornea) in das Auge. Dabei steuert ein ringförmiger Muskel – die Iris – über Adaption seiner Größe die Menge an Licht, das durch die Pupille einfällt, um z.B. bei hellem Umgebungslicht das Auge vor Blendung zu schützen. Die Lichtwellen werden anschließend von einer Linse gebündelt und in Form eines verkleinerten und auf dem Kopf stehenden Bildes auf die Netzhaut (Retina) projiziert. Dazu muss das Licht zunächst gebrochen werden. 80% der Brechung findet bereits in der Hornhaut statt, die jedoch starr ist und somit die Brechkraft nicht an verschiedene Entfernungen anpassen kann. Lichtstrahlen aus großen Entfernungen treten nahezu parallel ein und werden auf der Retina fokussiert. Nicht parallele Lichtstrahlen von Objekten aus kürzeren Entfernungen würden erst hinter der Retina zusammentreffen und somit unscharf auf der Netzhaut dargestellt werden. Daher wird in einem solchen Fall mithilfe der Ziliarmuskeln die Krümmung der Linse und somit die Brechkraft erhöht. Dieser automatische Vorgang zur Fokussierung nahegelegener Objekte wird als *Akkommodation* bezeichnet (Goldstein, 2008; Kebeck, 1994).

In der Retina wird nun das abgebildete Licht mithilfe von zwei verschiedenen Rezeptortypen – Stäbchen und Zapfen – in elektrische Signale transformiert. Während Zapfen eine hohe Farbempfindlichkeit aufweisen, sind Stäbchen sehr lichtempfindlich. In dem etwa  $2^\circ$  großen Bereich des schärfsten Sehens (Fovea) existieren ausschließlich Zapfen. Mit zunehmender Winkeldifferenz zur Fovea ändert sich die Verteilung hin zu weniger Zapfen und mehr Stäbchen. Da die Bereiche des parafovealen ( $2^\circ - 10^\circ$ ) und peripheren Sehens ( $> 10^\circ$ ) deutlich größer sind als der des fovealen Sehens, gibt es insgesamt erheblich mehr Stäbchen als Zapfen (etwa 120 Mio. Stäbchen und 6 Mio. Zapfen). Diese Verteilung führt dazu, dass im Bereich der Fovea eine höhere Schärfe- und Farbauflösung vorliegt als in der Peripherie. Bewegungen werden hingegen auch im peripheren Sichtbereich gut wahrgenommen. Lediglich in dem Bereich, in dem der Sehnerv aus dem Auge austritt, existieren weder Zapfen noch Stäbchen, sodass keine visuelle Informationsaufnahme möglich ist. Daher wird

dieser Bereich auch als blinder Fleck bezeichnet. Das menschliche Gehirn ist jedoch in der Lage diesen Bereich sinnvoll aufzufüllen, sodass der blinde Fleck in der Regel nicht als solcher wahrgenommen wird (Goldstein, 2008).

### *Form- und Bewegungswahrnehmung*

Als Grundelement der Formwahrnehmung ermöglichen Konturen eine Strukturierung der beleuchteten Umgebung durch die Unterscheidung von Objekten. Konturen sind Grenzlinien im retinalen Abbild, die Bereiche mit unterschiedlichen Lichtintensitäten voneinander trennen. Ein Objekt wird dabei vom Menschen als Figur wahrgenommen, die sich vor einem Hintergrund befindet. Eine Unterscheidung von Figur und Grund erfolgt auf Basis der folgenden Merkmale (Kebeck, 1994):

- Die Figur ist begrenzt und scheint daher geformt, während der Grund eher form- und konturlos ist.
- Die Figur erscheint fest und weist einen Gegenstandcharakter auf, während der Grund sich kontinuierlich dahinter fortsetzt.
- Die Figur ist hervortretend und auffallend.

Je salienter eine Figur sich vom Hintergrund und anderen Figuren abhebt, desto mehr Aufmerksamkeit zieht diese auf sich. So lässt sich selbst bei Neugeborenen beobachten, dass sie den Blick verstärkt auf kontrastreiche Bereiche ihres Umfeldes werfen. Neben dem statischen Aspekt der Figur-Grund-Wahrnehmung heben sich Figuren auch besonders durch Bewegung vom Hintergrund ab. Das menschliche Auge ist sehr sensibel für Bewegungen im peripheren aber auch im fokalen Sichtfeld, sodass Bewegungen eine Orientierungsreaktion hervorrufen. Dabei verschieben sich der Fokus sowie die Aufmerksamkeit auf die sich bewegende Figur (Schönhammer, 2009).

Bewegt sich nicht die Figur in der Umgebung, sondern der Mensch selbst, gelingt es dem Wahrnehmungsapparat trotz Eigenbewegung eine ruhende Umgebung abzubilden. Dafür ist ein Zusammenspiel von vestibulären, kinästhetischen und visuellen Eindrücken notwendig, das reflexive Augenbewegungen auslöst, die der Bildstabilisierung auf der Retina dienen (Lich, 2010).

### *Tiefenwahrnehmung*

Das dreidimensionale Sehen wird über verschiedene Mechanismen des visuellen Systems ermöglicht. Goldstein (2008) unterscheidet zwischen drei Hauptgruppen von Tiefenreizen: *Monokulare*, *binokulare (stereoskopische)* und *okulomotorische Tiefenreize*. In der Regel werden mehrere Tiefenreize parallel zur Interpretation des dreidimensionalen Raums herangezogen, wobei redundante und in sich konsistente Tiefenreize eine korrekte Interpretation fördern. Monokulare Tiefenreize zeigen ihre Wirksamkeit schon bei der Betrachtung mit nur einem Auge, während binokulare Tiefenreize erst bei einer beidäugigen Betrachtung wirksam sind. Okulomotorische Tiefenkriterien können sowohl monokular als auch binokular sein und basieren auf Muskelaktivitäten des visuellen Apparates (Goldstein, 2008).

Im Folgenden werden die beiden okulomotorischen Tiefenreize erläutert (Goldstein, 2008):