

**Ermittlung des Einflusses einer ambienten
Innenraumbeleuchtung auf das
Kontrastsehen des Fahrzeugführers**

Diplomarbeit

vorgelegt von

Steffen Michenfelder

am 26.02.2010

Referent: Prof. Dr. rer. nat. C. Neumann

Betreuer: Dipl.-Ing. C. Jebas

Autorreferat

Im nächtlichen Straßenverkehr werden durch häufige, oftmals rasche Wechsel des Beleuchtungsniveaus hohe Anforderungen an den Führer eines Fahrzeuges gestellt. Dessen Augen sind an die geringe Helligkeit der nächtlichen Umgebung adaptiert und werden durch abrupte Helligkeitswechsel in ihrer Sehfunktion beeinträchtigt. Die zeitweilige Blendung kann das Erkennen von Objekten im Straßenverkehr deutlich erschweren, was gravierende Folgen mit sich bringen kann.

Die Firma *Uwe Braun GmbH* hat die adaptive ambiente Innenraumbeleuchtung *ABL*[®] entworfen, die durch eine Voradaptation des Auges die Dauer und die negativen Folgen der physiologischen Blendung verringern soll. Gegenstand dieser Arbeit ist es, die Auswirkungen zu bestimmen, die sich aufgrund des Einsatzes des *ABL*[®] auf das Kontrastsehen des Fahrzeugführers ergeben. Darüber hinaus beschäftigt sich diese Arbeit mit den subjektiven Eindrücken, die das auf den Fahrzeugführer macht.

In einem Feldversuch wird an 32 Probanden im Alter zwischen 40 und 60 Jahren der Einfluss des *ABL*[®] auf den Schwellenkontrast bestimmt. Dazu wird anhand von drei Szenarien (ohne Blendung, Blendung in 15 m und in 50 m Entfernung) der Paarvergleich „mit und ohne *ABL*[®]“ durchgeführt. Die Probanden müssen dabei nachts ein auf einem Bildschirm dargebotenes Sehobjekt detektieren. Der Schwellenkontrast lässt sich dabei aus der Zeit berechnen, die ein Proband zur Detektion benötigt.

Die Untersuchungen ergeben, dass durch die Verwendung des *ABL*[®] kein signifikanter Unterschied hinsichtlich des Schwellenkontrastes entsteht. Somit ist weder ein positiver noch ein negativer Effekt der adaptiven ambienten Innenraumbeleuchtung auf das Kontrastsehen des Fahrzeugführers verifizierbar. Die subjektiven Einschätzungen der Probanden ergeben eine geringfügige Verringerung der psychologischen Blendung durch die Verwendung des *ABL*[®].

Anzahl der Seiten: 149

Anzahl der Abbildungen: 104

Anzahl der Tabellen: 26

Inhaltsverzeichnis

I

1.	Einleitung	1
2.	Gegenstand der Untersuchung	4
2.1.	Motivation	4
2.2.	Zielsetzung	4
2.3.	Eingrenzung des Untersuchungsgegenstandes	5
3.	Wissenschaftlicher Hintergrund	6
3.1.	Physiologische Optik	6
3.1.1.	Grundbegriffe	6
3.1.1.1.	Detektion	6
3.1.1.2.	Identifikation	6
3.1.1.3.	Landoltring	6
3.1.1.4.	Kontrast	6
3.1.1.5.	Schwellenkontrast	7
3.1.1.6.	Unterschiedsempfindlichkeit	7
3.1.1.7.	Photopisches Sehen	8
3.1.1.8.	Skotopisches Sehen	8
3.1.1.9.	Mesopisches Sehen	8
3.1.2.	Aufbau des Auges	8
3.1.2.1.	Stäbchen und Zapfen	10
3.1.3.	Sehschärfe	12
3.1.4.	Gesichtsfeld	13
3.1.5.	Helligkeitsempfinden	13
3.1.6.	Adaptation	16
3.1.7.	Blendung	19
3.1.7.1.	Psychologische Blendung	19
3.1.7.2.	Physiologische Blendung	20
3.1.8.	Ambiente Innenraumbeleuchtung	22
3.2.	Lichttechnische Größen	23
3.2.1.	Raumwinkel	23
3.2.2.	Spektrale Hellempfindlichkeit	24
3.2.3.	Lichtstrom	25
3.2.4.	Lichtstärke	25
3.2.5.	Beleuchtungsstärke	25
3.2.6.	Leuchtdichte	26
3.2.7.	Photometrisches Entfernungsgesetz	26
3.2.8.	Reflexion	27

3.2.9.	Scheinwerfertypen.....	28
4.	Untersuchungsmethode.....	30
5.	Materialien	31
5.1.	<i>ABL</i> [®]	31
5.1.1.	Gefahrenpotential einer Blendung im Straßenverkehr.....	31
5.1.2.	Aufbau des <i>ABL</i> [®]	32
5.1.3.	Regelverhalten	33
5.2.	Leuchtdichtekamera	34
5.3.	Beleuchtungsstärkemessgerät.....	34
5.4.	Spektrometer	35
5.5.	Scheinwerfermodule	35
5.6.	Visualisierungsplattform.....	36
5.7.	Tonaufnahme.....	36
5.8.	Versuchsfahrzeug.....	36
5.9.	Optometrische Vermessung	37
6.	Vorversuche	38
6.1.	Durchführung.....	38
6.1.1.	Durchschnittliche Straßenbreite einer Landstraße	38
6.1.2.	Blendbeleuchtungsstärke eines entgegenkommenden Fahrzeuges ...	38
6.1.3.	Charakterisierung des <i>ABL</i> [®]	39
6.1.3.1.	Ermittlung des Regelverhaltens	39
6.1.3.2.	Spektrale Vermessung	40
6.1.3.3.	Abhängigkeit der Photosensoren vom Anleuchtungswinkel	41
6.1.4.	Charakterisierung der Visualisierungsplattform	42
6.1.5.	Entwicklung der Software <i>Schweko</i>	43
6.2.	Ergebnisse.....	45
6.2.1.	Durchschnittliche Straßenbreite	45
6.2.2.	Verlauf der Blendbeleuchtungsstärke.....	45
6.2.3.	Labortechnische Vermessung des <i>Antiblendlichtes</i>	48
6.2.3.1.	Regelverhalten	48
6.2.3.2.	Spektrale Parameter	49
6.2.3.3.	Winkelabhängigkeit der Bewertung der Beleuchtungsstärke	50
6.2.3.4.	Relative Position zum Fahrerauge und Neigungswinkel zur Fahrbahn	51
6.2.4.	Vermessung der Kontrast-Kennlinie des LCD-TV	52
7.	Hauptversuch	54
7.1.	Durchführung.....	54
7.1.1.	Auswahl des Versuchsgeländes.....	54
7.1.2.	Auswahl der Probanden	54

7.1.3.	Gesamtkonzept	55
7.1.4.	Versuchsablauf.....	59
7.1.5.	Erstellung des Fragebogens.....	59
7.2.	Ergebnisse.....	61
7.2.1.	Schwellenkontrast	61
7.2.2.	Test auf Normalverteilung	Fehler! Textmarke nicht definiert.
7.2.3.	Wilcoxon-Test.....	63
7.2.4.	Auswertung des Fragebogens.....	65
8.	Diskussion	76
8.1.	Vorversuch	76
8.1.1.	Verlauf der Blendbeleuchtungsstärke.....	76
8.1.2.	Charakterisierung des <i>Antiblendlichtes</i>	77
8.1.3.	Regelverhalten	77
8.1.4.	Spektrale Parameter	77
8.2.	Hauptversuch.....	78
8.2.1.	Schwellenkontrast.....	78
8.2.2.	Auswertung des Fragebogens.....	79
9.	Fehlerbetrachtung	82
9.1.	Systematische Fehler	82
9.1.1.	Beleuchtungsstärke an den vorderen Sensoren des <i>Antiblendlichtes</i>	82
9.1.2.	Diskretisierung des Schwellenkontrastes im Hauptversuch	82
9.1.3.	Fehler des Beleuchtungsstärkemessgerätes.....	83
9.2.	Zufällige Fehler.....	83
9.2.1.	Probanden.....	83
9.2.2.	Positionierung der Versuchsgegenstände	83
9.2.3.	Umwelteinflüsse im Hauptversuch.....	84
9.2.4.	Beleuchtungsstärkemessung an der Stelle des Fahrerauges	84
9.2.5.	Vorfeldausleuchtung.....	84
10.	Zusammenfassung und Ausblick	85
	Literaturverzeichnis	86
	Internetquellen.....	88
	Abbildungsverzeichnis.....	92
	Tabellenverzeichnis.....	99
	Selbstständigkeitserklärung.....	101
	Danksagung	102
	Thesen	103
	Abstract Deutsch	104
	Abstract English.....	105
	Anhang	106

A Bedienungsanleitung der Software <i>Schweko</i>	106
B Prüfbögen zur optometrischen Vermessung der Probanden.....	108
C Aufnahmen der Leuchtdichteverteilung im Fahrzeug-Vorfeld	111
D Fragebogen.....	114
E Bestimmung der durchschnittlichen Breite einer Landstraße	119
F Beleuchtungsstärke bei Blendung durch den Gegenverkehr.....	123
G.1 Regelverhalten des <i>Antiblendlichtes</i>	124
G.2 Spektrale Strahldichte.....	125
G.3 Winkelabhängigkeit der Bewertung einer Beleuchtungsstärke	127
G.4 Relative Lage des <i>Antiblendlichtes</i> zum Fahrerauge.....	128
H Umrechnungstabelle Graustufe-Weberkontrast	129
I.1 Ermittelte Graustufen.....	130
I.2 Ermittelte Schwellenkontraste	132
I.3 Deskriptive Statistik	134
J Rohdaten der Ergebnisse des Fragebogens	135
K Daten der optometrischen Vermessung.....	141

1. Einleitung

Im nächtlichen Straßenverkehr werden durch häufige, oftmals rasche Wechsel des Beleuchtungsniveaus hohe Anforderungen an den Führer eines Fahrzeuges gestellt. Dessen Augen sind an die geringe Helligkeit der nächtlichen Umgebung adaptiert und werden durch abrupte Helligkeitswechsel in ihrer Sehfunktion beeinträchtigt. Die zeitweilige Blendung kann das Erkennen von Objekten im Straßenverkehr deutlich erschweren, was gravierende Folgen mit sich bringen kann.

Gerade Fußgänger tragen oftmals dunkle Kleidung und können bei einer Blendung des Fahrzeugführers von diesem im schlimmsten Fall nicht mehr gesehen werden. Wenn man in Betracht zieht, dass eine Blendung von gerade einmal 2 s bei einer Geschwindigkeit von 100 km/h bereits zu einer ca. 55 m dauernden „Blindfahrt“ führt, kann man sich die möglichen katastrophalen Folgen einer Blendung des Fahrzeugführers leicht vorstellen.

Die Situation ist dabei auf einer Landstraße am kritischsten. Die Straße ist verhältnismäßig schmal, wodurch die Belastung des Fahrers ohnehin ein hohes Ausmaß annimmt. Der Umstand, dass entgegenkommende Fahrzeuge hier am dichtesten aneinander vorbei fahren und die Blendung dadurch verstärkt wird, führt in Kombination mit der Straßengeometrie zu einem hohen Gefahrenpotential.

In der Fahrzeugbeleuchtung sind deshalb verstärkt Bemühungen zu beobachten, die Blendung durch den Gegenverkehr zu verringern. Dazu wird beispielsweise gezielt der Bereich des entgegenkommenden Fahrzeuges in der Lichtverteilung des Abblendlichtes durch die Generierung einer scharfen Hell-Dunkel-Grenze ausgespart. Ein weiteres Beispiel ist die Entwicklung eines blendfreien Fernlichtes, das dauerhaft eingeschaltet werden kann, was die Sichtweite im nächtlichen Straßenverkehr deutlich erhöht. Ein entgegenkommendes Fahrzeug wird dabei mittels einer Kamera detektiert und die Lichtverteilung entsprechend angepasst.

Einen anderen Ansatz verfolgt die Firma *Uwe Braun GmbH* mit ihrem Produkt *ABL*[®]. Hierbei handelt es sich um eine adaptive Innenraumbelichtung, die an der Sonnenblende des Fahrzeuges befestigt wird und somit problemlos nachgerüstet werden kann. Durch eine geeignete Voradaptation des Auges des Fahrzeugführers soll nach entsprechenden Angaben des Herstellers die Anpassungszeit des Auges an den Helligkeitswechsel verringert werden. Das *ABL*[®] besitzt hierzu Sensoren, die die Beleuchtungsstärke des Umgebungslichtes messen. Dabei erfassen diese sowohl das Licht, das von Straßenbeleuchtungen und dem Gegenverkehr kommt als auch das von hinterher fahrenden Fahrzeugen. Erfahrungsgemäß kann auch Scheinwerferlicht, das an den Rückspiegeln reflektiert wird, zu einer Blendung führen. Ein interner Regelalgorithmus passt die Helligkeit des *ABL*[®] entsprechend an.

Zusätzlich zur Blendung soll nach Angaben des Herstellers durch die Verwendung des *ABL*[®] die Produktion des Schlafhormons Melatonin und damit die Müdigkeit des Fahrzeugführers verringert werden. Ob dies tatsächlich der Fall ist, wird jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht thematisiert.

In dieser Arbeit wird der Einfluss des *ABL*[®] auf die Erkennung von Objekten außerhalb des Autos anhand von Versuchen mit Probanden ermittelt und die sich daraus ergebenden Folgen für den Führer eines Fahrzeuges diskutiert.



Abbildung 1.1

Darstellung der Verringerung der Blendung durch entgegenkommende Scheinwerfer durch das *ABL*[®]; im oberen Bild ist der herkömmliche Zustand dargestellt, im unteren Bild erkennt man die leuchtende Fläche des *ABL*[®] an der Sonnenblende des Fahrzeuges; weiterhin ist die verringerte Blendung durch das entgegenkommende Fahrzeug qualitativ visualisiert [IQm10]

Im zweiten Kapitel werden sowohl die Motivation erläutert, die dieser Arbeit zugrunde liegt, als auch die Zielstellungen formuliert und der Untersuchungsgegenstand eingegrenzt. Daran anschließend werden die notwendigen wissenschaftlichen Grundlagen erörtert. Das vierte Kapitel legt das Konzept des Versuches zur Bestimmung des Einflusses des *ABL*[®] auf den Schwellenkontrast dar, während im fünften Kapitel die eingesetzten Materialien und Untersuchungsmethoden erläutert werden. Wie die einzelnen Vorversuche dieser Diplomarbeit im Detail ablaufen, wird in Kapitel sechs beschrieben. Daran schließen sich im siebten Kapitel die Messdaten

und Ergebnisse des Hauptversuches an. Die Resultate werden im siebten Kapitel diskutiert. In Kapitel neun werden mögliche Fehlerquellen behandelt, während im zehnten Kapitel schließlich die gesamte Arbeit zusammenfassend umrissen und ein Ausblick auf mögliche Folgeuntersuchungen gegeben wird.

2. Gegenstand der Untersuchung

2.1. Motivation

Erfahrungsgemäß darf die Helligkeit der Innenraumbeleuchtung eines Fahrzeuges nicht beliebig hoch sein, ohne dass es zu einer verminderten Erkennung von Objekten außerhalb des Fahrzeuges kommt. Dieser Effekt rührt aus wissenschaftlicher Sicht daher, dass das Auge auf das mittlere Leuchtdichteniveau im Gesichtsfeld adaptiert, welches maßgeblich durch die Lichtquellen im Fahrzeuginneren bestimmt wird. Eine Erhöhung des Leuchtdichteniveaus kann der Theorie nach [HEN06] zu einer verringerten Kontrasterkennung von Objekten außerhalb des Fahrzeuges führen. Genauer hierzu ist in **Abs. 3.1.7.2** nachzulesen. Ob sich diese theoretischen Annahmen in der praktischen Anwendung der adaptiven Innenraumbeleuchtung *ABL*[®] bewahrheiten, soll im Verlauf dieser Diplomarbeit verifiziert werden.

2.2. Zielsetzung

Gegenstand dieser Diplomarbeit ist es, einen eventuellen negativen Einfluss des *ABL*[®] auf das Kontrastsehen durch Versuche mit Probanden zu ermitteln. Teilweise im Labor, teilweise aber auch im Feldversuch werden folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Labortechnische Bestimmung der für diesen Versuch relevanten Parameter des *ABL*[®] (*Charakterisierung des ABL*[®])
- Erfassung des Verlaufes der Blendbeleuchtungsstärke, die durch ein entgegenkommendes Fahrzeug am Auge des Fahrers anliegt (*Feldversuch*)
- Ermittlung des Einflusses des *ABL*[®] auf den Schwellenkontrast des Fahrzeugführers mittels einer Studie an Probanden (*Feldversuch*)
- Die Auswirkungen der adaptiven Innenraumbeleuchtung *ABL*[®] auf die subjektiv empfundene Blendung und andere relevante Faktoren (*Feldversuch*)

2.3. Eingrenzung des Untersuchungsgegenstandes

Um die Datenmenge zu begrenzen, wird der Untersuchungsgegenstand wie folgt festgelegt:

- Die Versuche finden nur für den statischen Fall statt, d.h. das Versuchsfahrzeug und die Blendungsscheinwerfer des Gegenverkehrs sind stationär.
- Das Alter der Probanden darf zwischen 34 und 60 Jahren liegen, um die kritische Zielgruppe bezüglich der Blendung abzudecken. Das Durchschnittsalter liegt in den Versuchen bei 48,9 Jahren.
- Die Zahl der Probanden wird auf 32 festgelegt.
- Der Visus der Probanden muss 1,0 oder besser sein, damit die notwendige Sehleistung erbracht werden kann und die Sehleistung der Probanden untereinander vergleichbar ist. Weiterhin muss ein ausreichend gutes Kontrastsehen von <10 % vorhanden sein.
- Die Feldversuche finden auf trockenem Straßenbelag statt, um die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse gewährleisten zu können.
- Die Vorfeldausleuchtung des Versuchsfahrzeugs sorgt dafür, dass der Adaptationszustand des Fahrzeugführers im mesopischen Bereich liegt, weswegen sich sämtliche theoretische Hintergründe auf diesen Bereich beziehen.

3. Wissenschaftlicher Hintergrund

3.1. Physiologische Optik

3.1.1. Grundbegriffe

3.1.1.1. Detektion

Als Detektion bezeichnet man in diesem Zusammenhang die Erkennung eines Objektes, das sich aufgrund eines Leuchtdichteunterschiedes von der Umgebung abhebt.

3.1.1.2. Identifikation

Werden Details des Sehobjektes erkannt (z.B. die Öffnung des Landoltrings, vgl. **Abs. 3.1.1.4**), so spricht man von einer Identifikation des Objektes.

3.1.1.3. Landoltring

Der Landoltring ist ein Sehzeichen, das z.B. bei der Ermittlung der Sehschärfe verwendet wird. Den Aufbau des Ringes zeigt **Abb. 3.1**. Der Durchmesser des Ringes ist nach [KOK93] fünfmal so groß wie die Höhe der Öffnung.

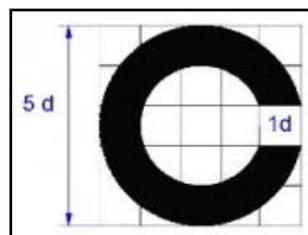


Abbildung 3.1

Landoltring [IQ09]

3.1.1.4. Kontrast

In der Literatur findet man drei gebräuchliche Definitionen für den Kontrast. Die erste Definition des Kontrastes K_W umfasst nach Weber den Unterschied der Leuchtdichte L_O eines einzelnen homogenen Objektes zu der der Umgebung L_U . Wie aus **Gln. 3.1** ersichtlich ist, nimmt der Kontrast für helle Objekte einen positiven Wert

zwischen 0 und ∞ ein. Objekte, die im Vergleich zur Umgebung dunkler sind, haben dagegen einen negativen Kontrast.

$$K_W = \frac{L_O - L_U}{L_U} \quad (\text{Gln. 3.1})$$

Eine zweite Definition nach Michelson bezieht sich auf Sehobjekte mit periodisch wechselnder Leuchtdichte (gitterförmig). Hier wird der Kontrast K_M nach **Gln. 3.2** mit der minimalen und maximalen Leuchtdichte L_{min} und L_{max} berechnet.

$$K_M = \frac{L_{max} - L_{min}}{L_{max} + L_{min}} \quad (\text{Gln. 3.2})$$

Bei Anzeigegeräten wie Bildschirmen verwendet man folgende Definition:

$$K = \frac{L_{max}}{L_{min}} \quad (\text{Gln. 3.3})$$

3.1.1.5. Schwellenkontrast

Der Schwellenkontrast K_S wird nach **Gln. 3.1** mit der gerade noch wahrnehmbaren Leuchtdichtedifferenz $\Delta L_S = L_O - L_U$, die auch als *Unterschiedsschwelle* bezeichnet wird, berechnet. Dabei liegt die Detektionswahrscheinlichkeit des Sehobjektes nach [KOK03] bei $p = 50\%$. Der Schwellenkontrast ist von einer Vielzahl von Faktoren abhängig. Dazu zählen neben der Größe und Form des Sehobjektes u.a. die Umgebungsleuchtdichte und die Darbietungsdauer. Weiterhin nehmen auch persönliche Faktoren Einfluss auf den Schwellenkontrast.

$$K_S = \frac{\Delta L_S}{L_U} \quad (\text{Gln. 3.4})$$

3.1.1.6. Unterschiedsempfindlichkeit

Die Unterschiedsempfindlichkeit (kurz: UE) ist der Kehrwert des Schwellenkontrastes. Sie ist nach [HEN02] abhängig von der Größe des Testobjektes sowie der Umfeldleuchtdichte.

$$UE = \frac{L_U}{\Delta L_U} \quad (\text{Gln. 3.5})$$

3.1.1.7. Photopisches Sehen

Unter photopischem Sehen (Tagsehen) versteht man den Sehvorgang bei Umgebungsleuchtdichten, die größer als 10 cd/m^2 sind [KOK03].

3.1.1.8. Skotopisches Sehen

Das skotopische Sehen (Nachtsehen) bezeichnet das Sehen bei Umgebungsleuchtdichten, die weniger als 10^{-3} cd/m^2 betragen [KOK03].

3.1.1.9. Mesopisches Sehen

Das mesopische Sehen nimmt den Bereich zwischen photopischem und skotopischem Sehen ein, die Umgebungsleuchtdichten liegen hier zwischen 10^{-3} cd/m^2 und 10 cd/m^2 . Es wird in der Literatur auch als *Dämmerungssehen* bezeichnet. Im Gebiet der automobilen Lichttechnik befindet man sich fast ausschließlich im mesopischen Bereich.

3.1.2. Aufbau des Auges

Nach [ECK93] besitzt das Auge sechs Regelmechanismen, um sich an die Bedingungen des Umfeldes anzupassen:

- Veränderbare Pupillenweite zur Regelung der Beleuchtungsstärke, die auf die Netzhaut trifft
- Krümmung der Linse, um Objekte scharf auf der Netzhaut abbilden zu können (Akkommodation)
- Bewegung der Augen, um ein Objekt in der Fovea fixieren zu können
- Änderung der Empfindlichkeit der Netzhaut gemäß der Umgebungsleuchtdichte
- Einstellung der Augen, sodass sich deren Blickgeraden im Sehobjekt schneiden
- Überlagerung der beiden Bilder im Gehirn und Erzeugung eines einzelnen Gesamtbildes

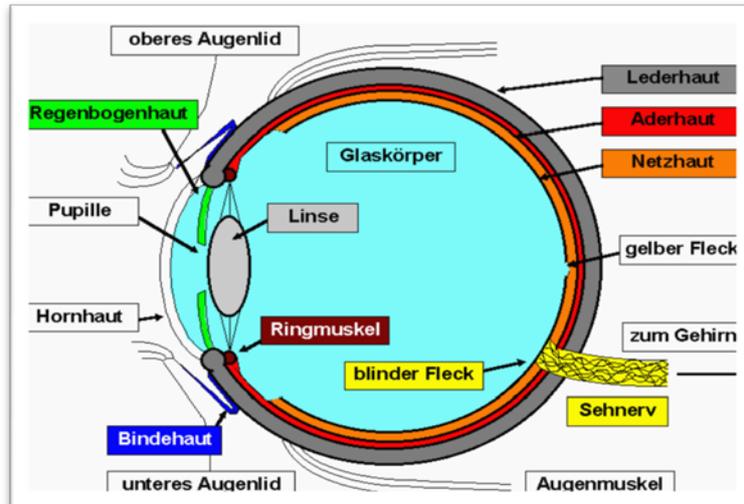


Abbildung 3.2

Aufbau des menschlichen Auges [IQa09]

Den optisch wirksamen Teil des Auges bilden Hornhaut und Linse. Die Hornhaut ist der durchsichtige vordere Teil der ansonsten weißen Lederhaut, die das Auge umschließt. Sie ist asphärisch, in ihrer Form unveränderlich und trägt einen großen Teil zur Brechkraft bei (ca. 60-70 % nach [HEN02]). Die Linse hingegen lässt sich in ihrer Form verändern, um die Brechkraft bzw. die Brennweite der Objektweite entsprechend anpassen zu können. Diesen Vorgang des Scharfstellens bezeichnet man als Akkommodation.

Eine vom Normal abweichende Form des Augapfels kann sich je nach Richtung der Abweichung in einer Kurzsichtigkeit (Bildlage vor der Netzhaut) oder in einer Weitsichtigkeit (Bildlage hinter der Netzhaut) äußern.

Unter der Hornhaut befindet sich die Aderhaut, durch die die zur Versorgung des Auges notwendigen Blutgefäße verlaufen. Auf der Vorderseite geht die Aderhaut in den Ziliarkörper (Ringmuskel) über, der die Veränderung der Linsenform durch verschiedene Spannungen ermöglicht. Daran schließt sich im vorderen Bereich des Auges die farbige Regenbogenhaut an. Die in ihrer Größe variable Öffnung in der Mitte der Regenbogenhaut wird Pupille genannt.

Auf der Aderhaut befindet sich die für das eigentliche Sehen zuständige Netzhaut, welche mit den lichtempfindlichen Rezeptoren versehen ist. Das menschliche Auge besitzt zwei unterschiedliche Arten von Rezeptoren, Stäbchen und Zapfen (vgl. **Abb. 3.3a**). Durch Absorption der eintreffenden Lichtquanten werden dort elektrophysiologische Prozesse ausgelöst, die den Sehnerv erregen und schließlich zur Entstehung einer Hellempfindung im Gehirn führen.

3.1.2.1. Stäbchen und Zapfen

Die etwa 120 Millionen Stäbchen befinden sich im peripheren Bereich der Netzhaut und besitzen keine spektrale Selektivität, d.h. mit ihnen ist nur monochromatisches Sehen möglich. Sie verfügen jedoch über eine hohe Lichtempfindlichkeit und sind daher für den Sehvorgang im skotopischen Bereich zuständig. Die Stäbchen sind in komplexere Strukturen (Bipolar- und Ganglienzellen) eingebunden, um ihre Empfindlichkeit erhöhen zu können (**vgl. Abs. 3.1.3**). Im Übergangsbereich, dem mesopischen Sehen, arbeiten sowohl die Stäbchen als auch die Zapfen.

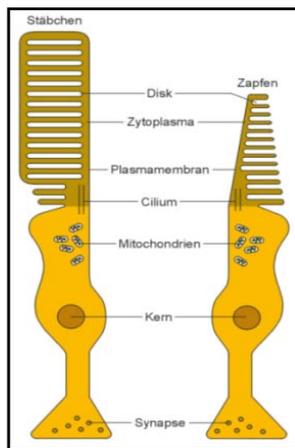


Abbildung 3.3a

Gegenüberstellung von Stäbchen (links) und Zapfen (rechts) [IQb09]

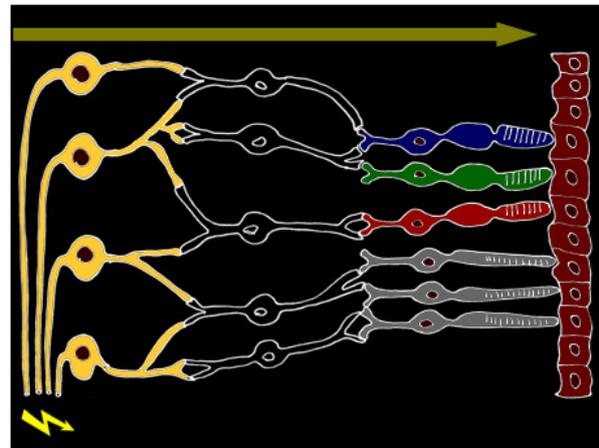


Abbildung 3.3b

Querschnitt der Netzhaut [IQc09]

Die etwa 6 Millionen Zapfen befinden sich vorwiegend in der Mitte der Netzhaut, dem sog. *Gelben Fleck*, der einen Durchmesser von ca. 5 mm hat. In der Mitte des gelben Flecks befindet sich mit der Netzhautgrube (*fovea centralis*) die Stelle des schärfsten Sehens. Es gibt drei verschiedene Arten von Zapfen, die S-, M- und L-Zapfen.

S-Zapfen (**S**hort Wavelength Receptor) sind aufgrund ihres Empfindlichkeitsmaximums bei $\lambda = 420$ nm für das Wahrnehmen von bläulichen Farben verantwortlich.

M-Zapfen (**M**edium Wavelength Receptor) haben ihr Maximum bei $\lambda = 534$ nm (grüner Bereich) und L-Zapfen (**L**ong Wavelength Receptor) ihres bei $\lambda = 563$ nm (gelb-grün).

Die Überlagerung der Informationen der drei Zapfentypen ergibt gemäß der additiven Farbsynthese den resultierenden Gesamt-Farbeindruck.

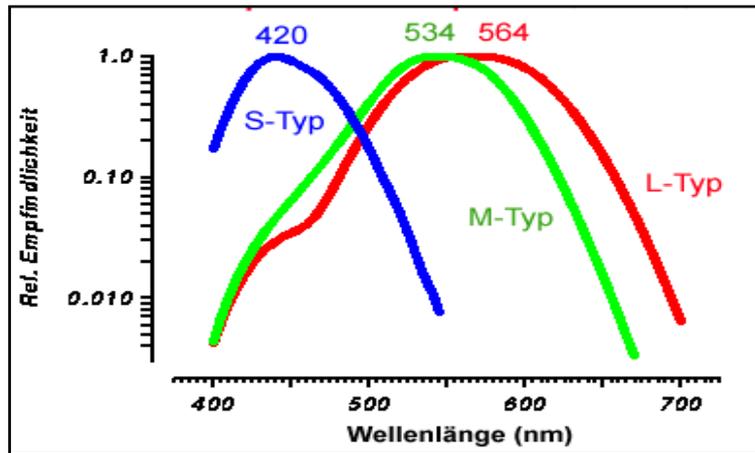


Abbildung 3.4

Spektrale Absorptionskurven der S-Zapfen (blau), M-Zapfen (grün) und L-Zapfen (rot); die Überlagerung der drei Farbreize rechnet das Gehirn in den Gesamt-Farbeindruck um [IQd09]

Zapfen sind nur im mesopischen und photopischen Bereich aktiv, weswegen nachts, also im Bereich des skotopischen Sehens, keine Farben wahrgenommen werden können. Weiterhin befinden sich im Bereich der Netzhautmitte keine Stäbchen, sondern nur Zapfen. Daher ist eine Fixierung eines Objektes im Bereich des skotopischen Sehens nicht möglich. Hier orientiert sich der Mensch ausschließlich über die periphere Wahrnehmung.

Im Bereich des Austritts des Sehnervs, des so genannten „Blinden Flecks“, befinden sich keine Rezeptoren. Die blinden Flecken der beiden Augen sind an der Normalen zur Augenebene gespiegelt und befinden sich deshalb nicht am selben Ort des wahrgenommenen Bildes. Sonach ist es dem Gehirn möglich, die fehlenden Informationen an den beiden Stellen zu ergänzen.

Abb. 3.5 zeigt die Verteilung der Zapfen und Stäbchen über die Netzhaut.

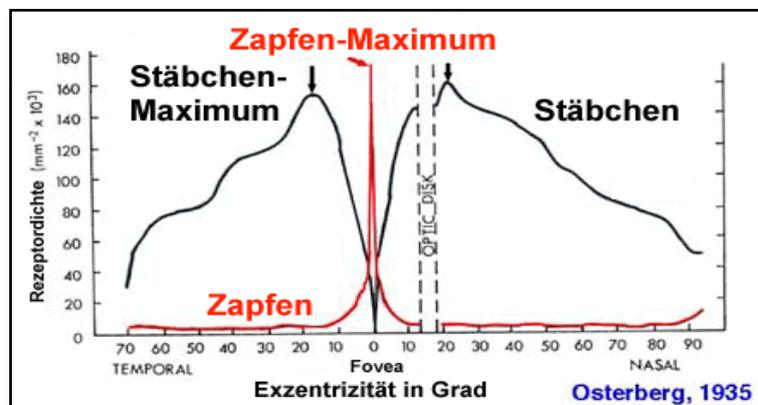


Abbildung 3.5

Verteilung der Rezeptoren auf der Netzhaut [IQe09]

3.1.3. Sehschärfe

Die Sehschärfe s ist der Reziprokwert des Winkels ε in Bogenminuten zwischen zwei gerade noch unterscheidbaren Punkten. Dabei liegt die Identifikationswahrscheinlichkeit nach [KOK93] bei 50%. Die Sehschärfe wird in wissenschaftlichen Untersuchungen meist mithilfe eines Landoltrings bestimmt.

$$s = \frac{1}{\varepsilon} \quad (\text{Gln. 3.6})$$

Das begrenzende Element der Sehschärfe ist nach [HEN02] die Empfängerichte in der Fovea. Korrespondierend zur Abnahme der Rezeptordichte mit zunehmendem Abstand zum Fixierpunkt nimmt die Sehschärfe zu größeren Winkeln hin ebenfalls ab. Allerdings kommt zum Abfall der Rezeptordichte noch das Phänomen hinzu, dass mehrere Stäbchen zu einem Empfängerelement verschaltet werden. Dadurch sinkt die Dichte der Empfängerelemente schneller als die der Rezeptoren. Dies führt zu einem schnelleren Abfall der Sehschärfe als man es gemäß dem Verlauf der Rezeptordichte in **Abb. 3.5** erwarten würde. In **Abb. 3.6** ist der Zusammenhang zwischen relativer Sehschärfe und Exzentrizität dargestellt. Nasal bezeichnet in diesem Zusammenhang den Teil des Gesichtsfelds zur Nase hin, temporal hingegen den Teil von der Nase weg.

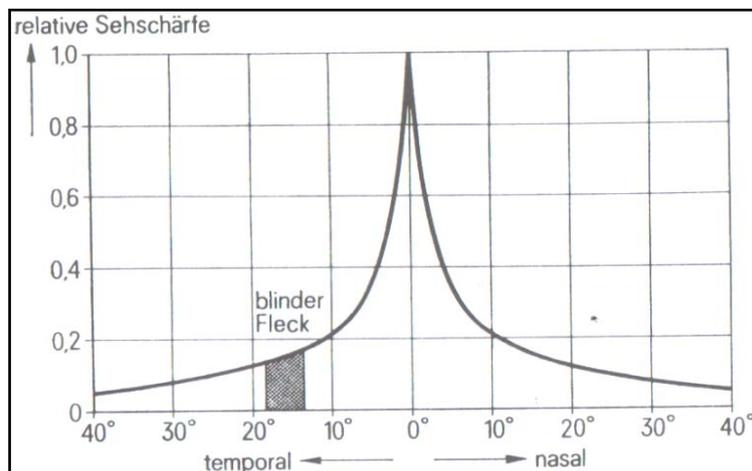


Abbildung 3.6

Sehschärfe in Abhängigkeit des Netzhautortes; im Bereich des blinden Fleckes wurde die Kurve interpoliert [HEN02]

Ist die Pupillenöffnung stark schwankend - ein Phänomen, das bei Messungen während einer variablen Umgebungsleuchtdichte auftritt (vgl. **Abs. 3.1.4**) -, so wird als maßgebende Größe der Erregung das Produkt $L * A_p$ mit der Einheit Troland [Trol] verwendet.

Bei annähernd konstanter Pupillenfläche ist die Leuchtdichte allein das Maß für die empfundene Helligkeit. Eine Ausnahme bilden Punktlichtquellen, bei denen der auf ein Empfängerelement auftreffende Lichtstrom maßgeblich ist. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit kann dieser Spezialfall jedoch außer Acht gelassen werden, da sämtliche auftretenden Lichtflächen eine ausreichend große Winkelausdehnung im Auge einnehmen.

Bei der Helligkeitsempfindung muss man zwischen beleuchteten und selbstleuchtenden Sehobjekten unterscheiden. Die Helligkeitsempfindung von beleuchteten Flächen hängt von ihrem Reflexionsgrad und der darauf fallenden Beleuchtungsstärke ab. Die Helligkeitsempfindung von selbstleuchtenden Objekten wird vor allem von deren eigenen Leuchtdichte und der Leuchtdichte der Umgebung bestimmt. Eine Messung der Helligkeitsempfindung von selbstleuchtenden Objekten ist nur für einfache Situationen möglich. Die Grundidee ist dabei ein einfaches, beispielsweise kreisförmiges Objekt, das auf einem Hintergrund homogener Leuchtdichte präsentiert wird.

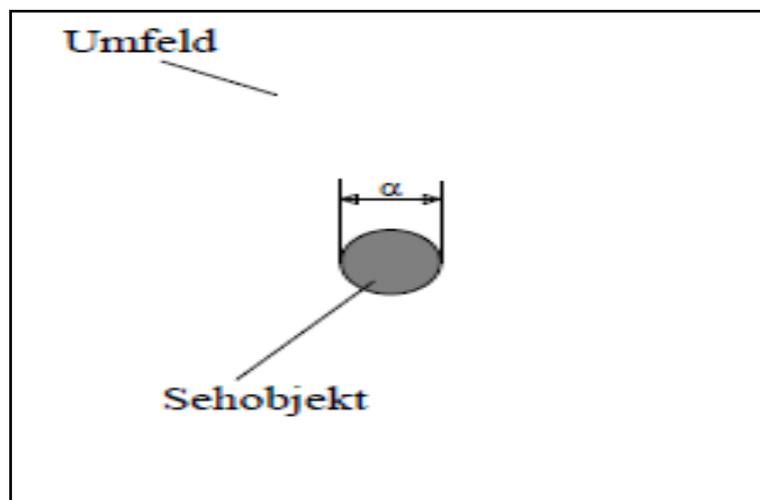


Abbildung 3.8

Grundidee zur Ermittlung des Helligkeitsempfindens [KOK03]

Der Nullpunkt der Helligkeitsempfindung ist „schwarz“, was aber nicht gleichbedeutend mit lichtlos ist. Die Helligkeitsempfindung „schwarz“ bedeutet, dass die Leuchtdichte des Objektes so gering im Vergleich zur Umfeldleuchtdichte ist, dass das Objekt als „schwarz“ wahrgenommen wird. [HEN06] gibt im Nullpunkt ein Verhältnis der Leuchtdichte des Objektes zur Umgebungsleuchtdichte von ca. 1:100

an. Der Maximalwert der Helligkeitsempfindung ist schwer zu quantifizieren. *Kokoschka* [KOK03] fordert hier nur, dass keine Blendung vorliegen darf.

Zur quantitativen Beschreibung der Helligkeit existieren verschiedene Ansätze. Die Größe Helligkeit ist dabei einheitenlos.

Weber und Fechner postulierten 1866, dass sich die Helligkeit H logarithmisch mit der Leuchtdichte des Sehobjektes verändert. Dabei haben sie angenommen, dass der Schwellenkontrast einen konstanten Wert hat. a und b sind Konstanten.

$$H = a \log(L_o) + b \quad (\text{Gln. 3.8})$$

Dieses Gesetz gilt nach [KOK03] jedoch nur für hohe Objektleuchtdichten ($>100 \text{ cd/m}^2$) und für Objekte, die größer als 1° sind.

Andere Ansätze gehen von einer Abhängigkeit in Form einer Potenzfunktion (Steven) oder von einem reziproken Verhältnis zwischen der Schwellenleuchtdichte und dem Quadrat des Objektwinkels (*Ricco*) aus.

In **Abb. 3.9** und **Abb. 3.10** wird der Haubner'sche Ansatz gezeigt, der verschiedene Theorien in einem Modell vereinbart. Die Adaptationsleuchtdichte ist in dem verwendeten einfachen Modell gleich der Umgebungsleuchtdichte. In komplexeren Situationen, wie inhomogene oder zeitlich veränderliche Lichtbedingungen der Umgebung, ist unter der Adaptationsleuchtdichte eine Art äquivalente homogene Umgebungsleuchtdichte zu verstehen.

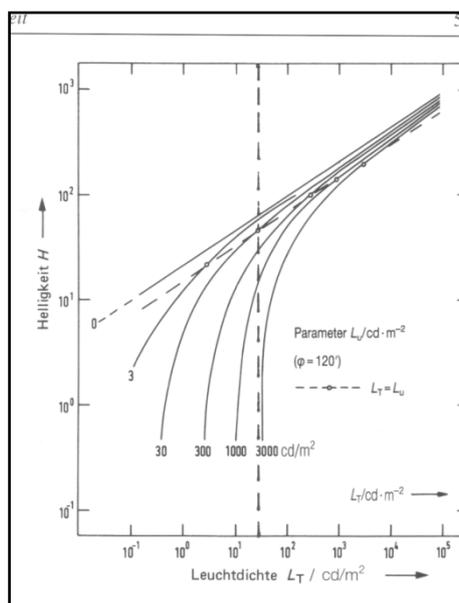


Abbildung 3.9

Helligkeit in Abhängigkeit der Objektleuchtdichte L_T mit der Umgebungsleuchtdichte L_U als Parameter [HEN06]

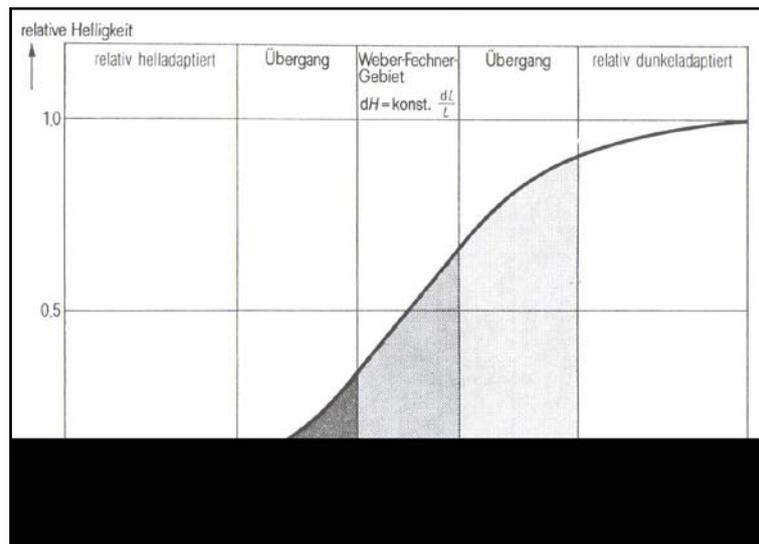


Abbildung 3.10

Relative Helligkeit in Abhängigkeit des Quotienten $\frac{L_T}{L_U}$

In der Mitte der Abbildung ist das *Weber-Fechner-Gebiet* mit dem linearen Anstieg der relativen Helligkeit zu erkennen [HEN06]

3.1.6. Adaptation

Unter Adaptation versteht man die Fähigkeit des Auges, sich an die mittleren Leuchtdichten im Gesichtsfeld anzupassen. Der abgedeckte Leuchtdichtebereich erstreckt sich dabei nach [LIC07] von der absoluten Dunkelschwelle bei $10^{-6} \frac{cd}{m^2}$ bis hin zur absoluten Blendung. Die Grenzwerte für den Übergang zur absoluten Blendung werden in der Literatur unterschiedlich angegeben. *Hentschel* [HEN06] nennt „einige $10^4 \frac{cd}{m^2}$ “ als Schwelle zur Blendung an, in [LIC07] werden $10^8 \frac{cd}{m^2}$ angeführt, in [RIC09] sind es $10^5 \frac{cd}{m^2}$, ebenso in [ECK93].

Das mittlere Leuchtdichteniveau der Umgebung lässt sich nach [HEN06] in drei verschiedene Adaptationsbereiche untergliedern:

Adaptationsbereich	Umgebungsleuchtdichte	Aktives Empfängerelement
Photopisch	$> 3 \text{ cd/m}^2$	Zapfen
Mesopisch	$0,01 \text{ cd/m}^2 - 3 \text{ cd/m}^2$	Zapfen und Stäbchen
Skotopisch	$< 0,01 \text{ cd/m}^2$	Stäbchen

Tabelle 3.1

Adaptationsbereiche des Auges und dabei aktives Empfängerelement [HEN06]

Für den Bereich des photopischen Sehens zeichnen die Zapfen für die Sehempfindung verantwortlich. Im skotopischen Bereich übernehmen diese Funktion die Stäbchen, während im Übergangsbereich des mesopischen Sehens beide Empfängertypen aktiv sind.

Liegt im gesamten Gesichtsfeld eine homogene Leuchtdichte vor, so ist die Netzhaut komplett auf diese Leuchtdichte adaptiert und man spricht von Totaladaptation. Ist die Leuchtdichte im Gesichtsfeld inhomogen, so müssen sich Teile der Netzhaut an verschiedene Leuchtdichteniveaus anpassen und man spricht von einer so genannten Lokaladaptation. Das Auge befindet sich selten in einem komplett adaptierten Zustand, da sich die Leuchtdichten im Gesichtsfeld häufig ändern, wie es beispielsweise bei einer nächtlichen Autofahrt der Fall ist. Je nach Richtung der Leuchtdichtenänderung unterscheidet man zwischen einer Dunkel- und Helladaptation des Auges.

Für den Prozess der Dunkeladaptation, d.h. die Anpassung an eine niedrigere Leuchtdichte, sind im menschlichen Auge vier Mechanismen verantwortlich:

- Um die Eintrittsfläche des Lichtes zu vergrößern und damit den auf die Netzhaut treffenden Lichtstrom zu erhöhen, kann sich der Durchmesser der Pupille von etwa 2 mm auf maximal 8 mm weiten. Dies entspricht einer potentiellen Regulierung des einfallenden Lichtstromes um den Faktor 16. Aufgrund des *Stiles-Crawford-Effektes* verringert sich der Einfluss der Pupillenweitung, da Lichtstrahlen am Rand der Netzhaut weniger zur Lichtempfindung beitragen als diejenigen in der Mitte.

Die Pupillenweite hängt nach [HEN06] logarithmisch von der Adaptationsleuchtdichte ab. Für Personen mittleren Alters und für ein gleichmäßig ausgeleuchtetes Gesichtsfeld ergibt sich der in **Abb. 3.11** dargestellte Verlauf der Pupillenweite in Abhängigkeit der Adaptationsleuchtdichte.

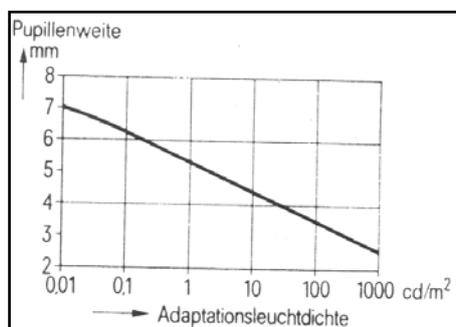


Abbildung 3.11

Pupillenweite in Abhängigkeit der Adaptationsleuchtdichte für ein homogen ausgeleuchtetes Gesichtsfeld [HEN06]

Weitere Faktoren wie Schreck, Schock oder andere vegetative Einflüsse können die Pupillenweite ebenfalls verändern.

- Der zweite Adaptationsmechanismus ist der Übergang vom Zapfen- auf das Stäbchensehen. Gerade im nächtlichen Straßenverkehr befindet sich die Umgebungsleuchtdichte häufig im mesopischen oder skotopischen Bereich, also im Bereich von Leuchtdichten unterhalb von 3 cd/m^2 . Die Zapfen sind bis etwa $0,01 \text{ cd/m}^2$ für Licht empfindlich, für niedrigere Leuchtdichte muss das Auge sich der Stäbchenempfänger bedienen.
- Der Sehstoff Rhodopsin (Sehpurpur) wird zur Erzeugung des Lichtreizes benötigt. Durch Verschiebungen dessen Reaktionsgleichgewichtes kann die Empfindlichkeit der Stäbchen und Zapfen variiert werden. Rhodopsin besteht aus Vitamin A und einem Protein und erzeugt durch Absorption eines Lichtquants einen elektrischen Impuls.
- Zur Erhöhung der Empfindlichkeit können sich insbesondere einzelne Stäbchen zu komplexeren Empfängerelementen zusammenschalten. Dies geschieht dabei auf Kosten des Auflösungsvermögens (vgl. **Abs. 3.1.2.2**).

Der zeitliche Verlauf der Dunkeladaptation ist in **Abb. 3.12** dargestellt.

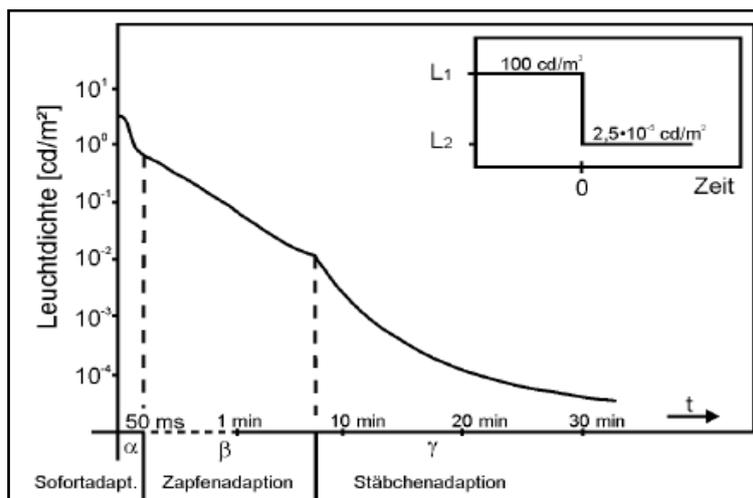


Abbildung 3.12

Zeitliche Adaptation des Auges bei Sprung der mittleren Leuchtdichte von L_1 auf L_2 , erkennbar sind die drei Phasen der Sofort-, Zapfen- und Stäbchenadaptation [GRE93]

Die Änderung der Empfindlichkeit, die unmittelbar auf den Leuchtdichtesprung folgt, wird als Sofortadaptation (oder α -Adaptation) bezeichnet. Diese ist eine nervöse Hemmung, die die Empfindlichkeit der Netzhaut innerhalb von ca. 50 ms um den Faktor 5 ändern kann. Darauf folgt innerhalb von wenigen Minuten die Empfindlichkeitsänderung der Zapfen, die so genannte β -Adaptation. Der Knick in der Kurve wird als *Kohlrausch-Knick* bezeichnet und kennzeichnet den Übergang vom Zapfen- auf das Stäbchensehen. Die sich daran anschließende Adaptation der Stäbchen (γ -Adaptation) erreicht erst nach bis zu 30 min ihr Endniveau.

Die Helladaptation wird entsprechend als die Anpassung des Auges an ein höheres Leuchtdichteniveau im Gesichtsfeld definiert. Die Zeitkonstanten für die Empfindlichkeitsänderungen der Zapfen und Stäbchen sind deutlich kleiner als bei der Dunkeladaptation, weshalb die Helladaptation schneller abläuft.

3.1.7. Blendung

Der Begriff Blendung umfasst im Kontext der visuellen Physiologie zum einen den Sehzustand, der als unangenehm oder störend empfunden wird, und zum anderen eine tatsächliche Herabsetzung der Sehfunktionen. Man spricht im ersten Fall von der psychologischen, im zweiten von der physiologischen Blendung. Beide Formen der Blendung haben als Ursache entweder eine inhomogene Verteilung der Leuchtdichten oder einen zu großen Betrag der Leuchtdichte im Gesichtsfeld.

3.1.7.1. Psychologische Blendung

Von einer psychologischen Blendung spricht man, wenn eine Beeinträchtigung der Sehfunktionen nicht physikalisch messbar ist, eine Person die Beleuchtungssituation jedoch als unangenehm oder störend empfindet. Eine Erfassung des Ausmaßes der empfundenen psychologischen Blendung wird mithilfe der DeBoer-Skala realisiert. Hierbei geben Versuchspersonen den Grad ihrer empfundenen Blendung mithilfe der in **Tab. 3.2** vorliegenden Bewertungsskala nach DeBoer an. Dabei reicht die Skala von (9 – merklich) bis (1 – unerträglich).

1	unerträglich
3	störend
5	gerade zulässig
7	akzeptabel
9	merklich

Tabelle 3.2
DeBoer-Skala

Die psychologische Blendung hängt in erster Linie von der Leuchtdichte der Blendlichtquelle ab. Weitere Einflussfaktoren sind die mittlere Leuchtdichte im Gesichtsfeld, an die sich das Auge adaptiert hat (Adaptationsleuchtdichte), und die Größe des Testobjektes. Die Sehfunktionen müssen dabei nicht zwangsläufig herabgesetzt sein.

Ob eine bestimmte Beleuchtungssituation eine psychologische Blendung hervorruft, kann nicht mit hundert prozentiger Sicherheit vorhergesagt werden, da es sich bei den ermittelten Werten nur um statistische Mittelwerte handelt, die nicht auf jede Versuchsperson zutreffen müssen.

3.1.7.2. Physiologische Blendung

Die physiologische Blendung hat ihre Ursache in Streulicht, das durch die Blendlichtquelle im Auge entsteht. Entstehungsorte für das Streulicht sind dabei die Grenzflächen Hornhaut-Lederhaut, Linse-Kammerwasser oder sonstige Inhomogenitäten des Brechungsindex. In **Abb. 3.13** sind die Streulichtentstehung und die daraus resultierenden Folgen dargestellt.

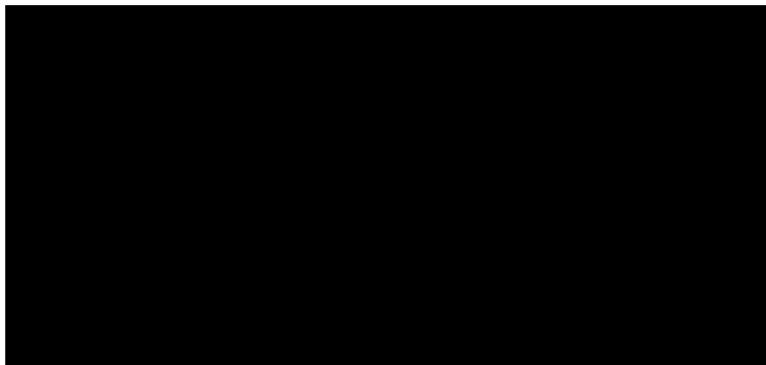


Abbildung 3.13

Streulichtentstehung im Auge [HEN06]

Das Streulicht der Blendlichtquelle überlagert das eigentliche Bild des Gegenstandes und führt zu einer Erhöhung des Adaptationsniveaus. Die zur ursprünglichen Adaptationsleuchtdichte L_A hinzukommende Leuchtdichte durch das Streulicht wird als äquivalente Schleierleuchtdichte $L_{S\ddot{a}q}$ bezeichnet. Nach [HEN06] ergibt sich damit für die Gesamtleuchtdichte L_{Ges} , an die sich das Auge adaptieren muss:

$$L_{Ges} = L_A + L_{S\ddot{a}q} = L_A + c \frac{E_{Bl}}{\theta^2} \quad (\text{Gln. 3.9})$$

Dabei kennzeichnet E_{Bl} die Beleuchtungsstärke, die auf der Pupillenebene durch die Blendlichtquelle erzeugt wird, C eine vom Beobachter abhängige Konstante und θ den Winkel zwischen der Mitte des Gesichtsfeldes und der Blendlichtquelle. Sind mehrere Blendlichtquellen vorhanden, so addieren sich deren Schleierleuchtdichten. Die Blendwirkung verstärkt sich mit zunehmendem Alter, da die Trübung der Linse zunimmt und die Entstehung von Streulicht damit begünstigt.

Die Erhöhung des Adaptationsniveaus des gesamten Auges führt gemäß **Gln 3.1** zu einer Verringerung des Kontrastes bzw. zu einer Erhöhung der Unterschiedsschwelle.

$$K_{W,neu} = \frac{L_O + L_{S\ddot{a}q} - (L_U + L_{S\ddot{a}q})}{L_U + L_{S\ddot{a}q}} = \frac{L_O - L_U}{L_U + L_{S\ddot{a}q}} \quad (\text{Gln. 3.10})$$

War ein Objekt ohne die Blendlichtquelle gerade noch wahrnehmbar, so kann es durch die hinzukommende Schleierleuchtdichte unsichtbar werden. Dieser Sachverhalt wird in **Abb. 3.14** dargestellt. $L_{S\ddot{a}q}$ bezeichnet dabei die äquivalente Schleierleuchtdichte, die durch die Blendlichtquelle zur vorherigen Adaptationsleuchtdichte L_A hinzugekommen ist. Das Objekt mit der Leuchtdichtedifferenz L_O im Vergleich zur Umgebungsleuchtdichte L fällt durch die Blendlichtquelle in den schwarz markierten Bereich, d.h. es wird unsichtbar.

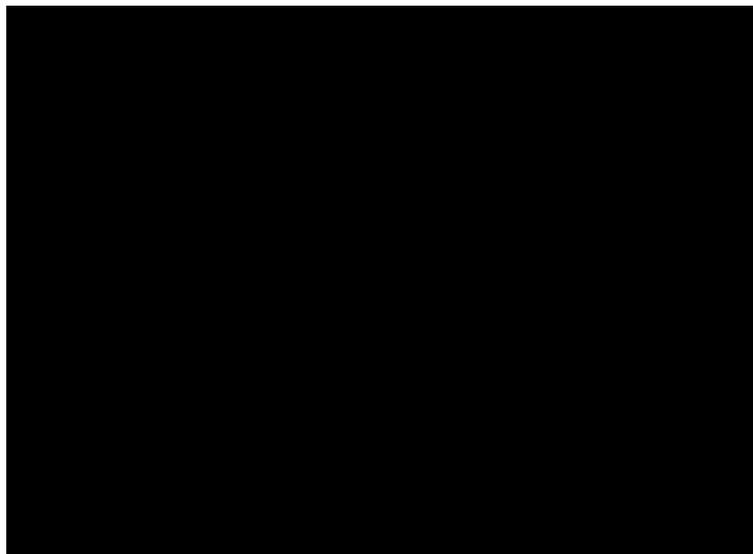


Abbildung 3.14

Erhöhung der Leuchtdichte-Unterschiedsschwelle durch die äquivalente Schleierleuchtdichte [HEN06]

3.1.8. Ambiente Innenraumbeleuchtung

Innenraumbeleuchtungen in Fahrzeugen lassen sich grob in vier Kategorien unterteilen:

- Funktionsbeleuchtung von Schaltern oder Instrumententafeln
- Leseleuchten für Mitfahrer
- Orientierungsbeleuchtung, z.B. im Fußraum, an den Türen oder den Gurten
- Ambiente Innenraumbeleuchtung

Dabei verfolgen die Hersteller der Fahrzeuge verschiedene Ziele.

Ein Aspekt stellt die verbesserte Orientierung innerhalb des Fahrzeuges durch die gezielte Erhöhung der Kontraste einzelner Bedienelemente durch deren Beleuchtung dar (entweder selbstleuchtend oder angestrahlt). Ein weiterer Punkt ist die Herabsetzung des Leuchtdichteunterschiedes zwischen der Umgebung außerhalb und den Bedienelementen innerhalb des Fahrzeuges. Dies geschieht mit dem Ziel, die Adaptationszeit aufgrund des geringeren Unterschiedes in der Leuchtdichte zu verringern. Andere Gründe sind eine angenehmere Atmosphäre und ein ansprechenderes Design. Oft wird hier seitens der Hersteller mit verschiedenen Lichtfarben gearbeitet, die eine bestimmte Wirkung auf die Fahrzeuginsassen haben.

Farbe	Temperaturwirkung	Distanzwirkung	Psychische Wirkung
Gelb	warm	nah	wohltuend, heiter
Rot	sehr warm	sehr nah	wärmend, anregend
Grün	kalt bis neutral	entfernt	beruhigend, sichernd
Blau	sehr kalt	entfernt	rational, frisch
Weiß	kühl		neutral

Tabelle 3.3

Wirkung von Farben [RIC09]

Einen weiteren Ansatz verfolgt das bereits am Markt erhältliche Produkt *ABL*[®] der Firma *Uwe Braun GmbH*. Dabei handelt es sich um eine adaptive ambiente Innenraumbeleuchtung, die mithilfe von Sensoren ihre Leuchtdichte den Umgebungsbedingungen anpasst. Zweck dieser Beleuchtung ist dabei die Voradaptation des Auges, um eine Blendung im Straßenverkehr zu verringern. Die Funktionsweise und die Auswirkungen des *ABL*[®] bilden das zentrale Thema dieser Arbeit. Zur Funktionsweise sei auf **Abs. 5.1.1** verwiesen.

Bei allen Vorteilen einer Innenraumbeleuchtung darf man jedoch auch die möglichen Gefahren nicht vergessen. Die Konstrukteure der Fahrzeuge stehen vor der Herausforderung, eine Innenraumbeleuchtung zu schaffen, die den obigen Ansprüchen genügt, aber aus physiologischer oder psychologischer Sicht keine Nachteile für den Fahrzeugführer mit sich bringt.

Jede Lichtquelle im Autoinnern erzeugt je nach Lage im Gesichtsfeld ein bestimmtes Maß an Streulicht im Auge und kann so zu einer Erhöhung der Unterschiedsschwelle führen. Es existieren nach [RIC09] aber noch keine eindeutigen gesetzlichen Regelungen für ambiante Innenraumbeleuchtungen.



Abbildung 3.15

Beispiele für ambiante Innenraumbeleuchtungen, links eine Türbeleuchtung im 3er BMW, rechts Fußraum-, Instrumenten- und Schalterbeleuchtung im Audi A8 [IQi10] [IQj10]

3.2. Lichttechnische Größen

3.2.1. Raumwinkel

Ein wichtiges Werkzeug zur Beschreibung der Ausstrahlung in den Raum um die Lichtquelle stellt der Raumwinkel dar. Zum Vergleich folgt zunächst die Definition des geläufigen ebenen Winkels. Zwischen zwei von einem Punkt ausgehenden Strahlen ist dieser durch den Quotient aus der Länge des Kreisbogens b und des Radius r definiert. Der ebene Winkel β wird in der Einheit Radiant (rad) angegeben.

$$\beta = \frac{b}{r} \text{ rad} \quad (\text{Gln 3.11})$$

Analog hierzu definiert man den Raumwinkel als Quotient der Kugelkalotte A_K und des Quadrates des Radiuses r^2 eines Strahlenbündels, das kegelförmig von einem Punkt ausgeht. **Gln. 3.10** beschreibt diesen Zusammenhang:

$$\Omega = \frac{A_K}{r^2} \text{ sr} \quad (\text{Gln. 3.12})$$

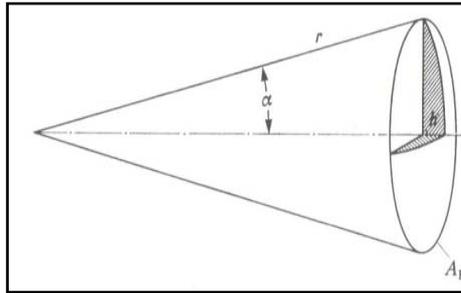


Abbildung 3.16
Definition des Raumwinkels [HEN02]

3.2.2. Spektrale Hellempfindlichkeit

Das menschliche Auge bewertet auftreffendes Licht gemäß einer selektiven Empfindlichkeit, die durch die $V(\lambda)$ -Kurve ausgedrückt wird. Das Maximum der Empfindlichkeitskurve befindet sich bei $\lambda=555$ nm. Dies bedeutet, dass grünes Licht bei gleicher physikalischer Strahlungsintensität als heller gegenüber blauem oder rotem Licht empfunden wird.

Die Kurve verschiebt sich bei abnehmender Umgebungshelligkeit zu kürzeren Wellenlängen hin (*Purkinje-Effekt*). Das Maximum liegt dann bei $\lambda=507$ nm. Ursache hierfür ist der Übergang vom Zapfen- zum Stäbchensehen und die damit einhergehende Änderung der spektralen Hellempfindlichkeit. Diese wird durch die $V'(\lambda)$ -Kurve beschrieben. Die Kurven wurden durch Versuche an normalsichtigen Personen ermittelt und 1924 von der CIE¹ vereinbart. Dabei wurden jeweils zwei Objekte verschiedener Wellenlänge nebeneinander dargeboten und auf die subjektive Empfindung „gleich hell“ abgeglichen. In **Abb. 3.17** sind die beiden verschiedenen Hellempfindlichkeitskurven zu erkennen.

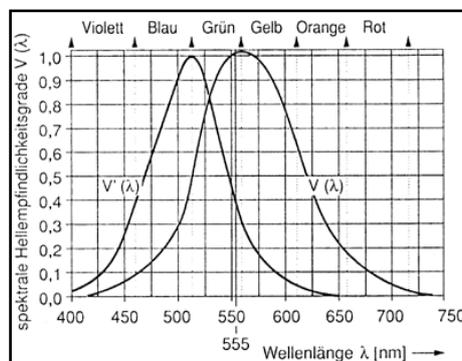


Abbildung 3.17
Spektrale Hellempfindlichkeit ($V(\lambda)$ links, $V'(\lambda)$ rechts) [IQf10]

¹CIE = Commission International l'Eclairage (Internationale Kommission für Beleuchtung)

3.2.3. Lichtstrom

Der Lichtstrom ϕ ist die mit $V(\lambda)$ bewertete physikalische Strahlungsleistung ϕ_e . Für das Nachtsehen ergibt sich ein entsprechend der Kurve $V(\lambda)$ modifizierter Lichtstrom. Die Einheit des Lichtstromes ist das Lumen [lm]. Den Lichtstrom erhält man aus der Summation aller Strahlungsanteile $\phi_e(\lambda)$, deren Wellenlängen im Bereich des sichtbaren Spektrums von 380 nm bis 780 nm liegen – gewichtet mit $V(\lambda)$. K_m wird als das photometrische Strahlungsäquivalent bezeichnet, das für Tagsehen einen Wert von 683 lm/W, für Nachtsehen einen Wert von 1699 lm/W hat.

$$\phi = K_m \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \phi_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad (\text{Gln. 3.13})$$

3.2.4. Lichtstärke

Für die Beschreibung des Lichtstromes, der in einer bestimmten Raumrichtung abgestrahlt wird, wurde die Lichtstärke I eingeführt. Sie ergibt sich aus der Differentiation des Lichtstromes Φ nach dem Raumwinkel Ω . Die Integration der Lichtstärke über den gesamten Kugelraum ergibt demnach den Lichtstrom.

Die Lichtstärke dient der Beschreibung der Abstrahleigenschaften punktförmiger Lichtquellen, für ausgedehnte Lichtquellen greift man auf die in **Abs. 3.2.6** definierte Leuchtdichte zurück. Eine Lichtquelle wird dabei als punktförmig behandelt, wenn sie aus Sicht des Empfängers einen ausreichend kleinen Raumwinkel einnimmt (vgl. **Abs. 3.2.7**). Die Einheit der Lichtstärke ist das Candela [cd]. Es gehört als einzige lichttechnische Einheit zur Gruppe der SI¹-Basiseinheiten, d.h. alle anderen lichttechnischen Einheiten werden aus dem Candela abgeleitet.

$$I(\Omega) = \frac{\Phi}{\Omega} \quad (\text{Gln. 3.14})$$

3.2.5. Beleuchtungsstärke

Die Beleuchtungsstärke E ist ein Maß dafür, welcher Lichtstrom Φ pro Fläche A auf den Empfänger trifft. Die Beleuchtungsstärke nimmt quadratisch mit dem Abstand des Empfängers zur punktförmigen Lichtquelle ab, woraus sich die Ableitung der Beleuchtungsstärke aus der Lichtstärke ergibt. Die Einheit der Beleuchtungsstärke ist das Lux [lx].

$$E = \frac{\Phi}{A} \quad (\text{Gln. 3.15})$$

¹SI = Système International d'unités

3.2.6. Leuchtdichte

Die Leuchtdichte L ist die Lichtstärke einer Lichtquelle pro strahlender Fläche A_S . Sie dient der Beschreibung von ausgedehnten Lichtquellen, so genannten Flächenstrahlern. Für punktförmige Lichtquellen hingegen verwendet man die Lichtstärke (siehe **Abs. 3.2.4**). Die Leuchtdichte ist die einzige vom visuellen System des Menschen wahrnehmbare lichttechnische Größe. Sie hat keine eigene Einheit und wird in $[\text{cd}/\text{m}^2]$ angegeben.

$$L = \frac{I}{A_S} \quad (\text{Gln. 3.16})$$

3.2.7. Photometrisches Entfernungsgesetz

Für Lichtquellen, die aus Sicht des Empfängers einen kleinen Raumwinkel einnehmen, gilt näherungsweise die folgende Beziehung zwischen Lichtstärke I und Beleuchtungsstärke E :

$$E = \frac{I}{r^2} \cos(\varepsilon) \quad (\text{Gln. 3.17})$$

Dabei ist r der Abstand zwischen Quelle und Empfänger, ε ist der Winkel zwischen der Normalen der Quelle und der des Empfängers (siehe **Abb. 3.18**).

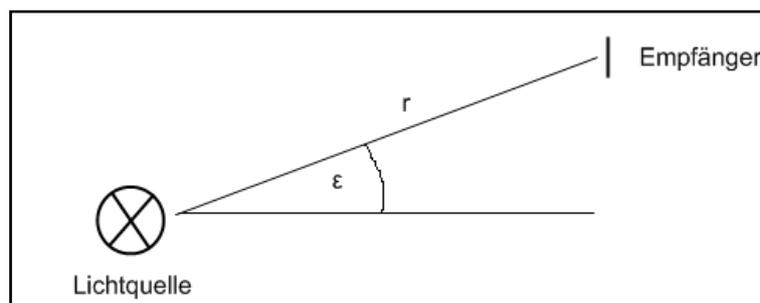


Abbildung 3.18

Zum photometrischen Entfernungsgesetz [MIC09]

Den Fehler δ , den man durch die Verwendung von (**Gln 3.15**) macht, kann man wie folgt abschätzen. Ist h die maximale Ausdehnung der Lichtquelle und r der Abstand zwischen Quelle und Empfänger, so lässt sich δ nach [**HEN02**] folgendermaßen bestimmen:

$$\delta = \frac{h^2}{h^2 + r^2} \quad (\text{Gln. 3.18})$$

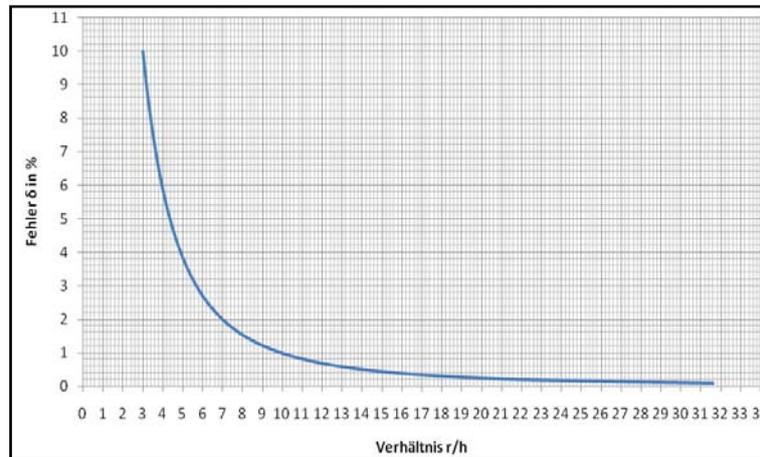


Abbildung 3.19

Fehler δ , dargestellt in Abhängigkeit des Verhältnisses von Radius r (Quelle-Empfänger) und maximaler Abmessung h der Lichtquelle [MIC09]

Bei einer Messung der Beleuchtungsstärke und einer nachfolgenden Umrechnung in die Lichtstärke ist demnach darauf zu achten, dass der Empfänger sich außerhalb der photometrischen Grenzentfernung befindet. Ist dies nicht möglich, so muss der Fehler bei der Auswertung der Daten berücksichtigt werden. Für lichttechnische Messungen schreibt das Deutsche Institut für Normung (DIN) in [DIN04] einen minimalen Wert des Verhältnisses r/h von 5 vor, dies entspricht einem Fehler von 4,36 %. Empfohlen wird jedoch ein Mindestwert von 10, der Fehler liegt hier bei 1%.

3.2.8. Reflexion

Am Übergang zwischen zwei Medien verschiedener Brechzahl wird auftreffendes Licht teilweise zurückgeworfen. Diesen Vorgang bezeichnet man als Reflexion. Im Gegensatz zur Absorption ist die Reflexion kein Verlustprozess, da keine Lichtenergie in Wärme oder eine andere Energieform umgewandelt wird. Den Anteil des reflektierten Lichtstromes Φ_R im Verhältnis zum gesamten Lichtstrom Φ_G drückt der Reflexionsgrad ρ aus.

$$\rho = \frac{\Phi_R}{\Phi_G} \quad (\text{Gln 3.19})$$

3.2.9. Scheinwerfertypen

Scheinwerfer dienen primär der optimalen Ausleuchtung der Fahrbahn vor dem Fahrzeug, um eine ausreichende Objekterkennung auch bei niedrigen Umgebungsleuchtdichten zu garantieren. Sekundär stellen sie Signalbilder dar, die zur Identifikation des Fahrzeugtyps benötigt werden (PKW, LKW, Lokomotive, etc.). Die zwei etablierten Scheinwerfertypen sind heutzutage Projektions- und Reflexionsscheinwerfer. Dabei haben alle Scheinwerfer eine Lichtquelle, eine reflektierende Schicht und eine Abschlusscheibe gemeinsam.

Bei Reflexionssystemen befindet sich die Lichtquelle im Fokus eines Paraboloids. Dadurch ist es möglich, ein Abbild der Lichtquelle auf der Straße vor dem Fahrzeug zu erzeugen. Durch gezielte Abschattungen der Lichtquelle und als Abschlusscheibe eingesetzte Streuscheiben lassen sich die benötigten Lichtverteilungen realisieren. In **Abb. 3.20** ist das Prinzip eines Reflexionsscheinwerfers skizziert.

Eine Weiterentwicklung dieser Reflexionssysteme bedient sich so genannter Freiformreflektoren. Diese entsprechen keiner mathematischen Form mehr, sondern werden mithilfe von Simulationsprogrammen für die benötigte Lichtverteilung maßgeschneidert. In Reflexionsscheinwerfern werden überwiegend Halogenlampen eingesetzt.

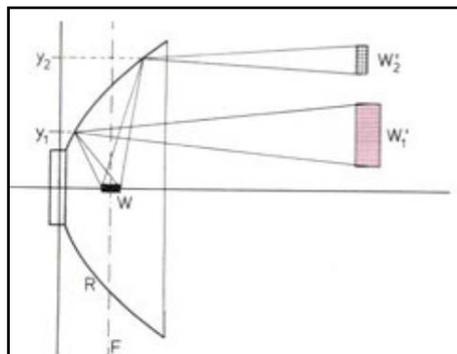


Abbildung 3.20

Prinzipskizze eines Reflexionsscheinwerfers, der Paraboloid erzeugt die Bilder W der Lichtquelle vor dem Fahrzeug [MAN08]

Projektionsscheinwerfer verfügen zusätzlich zur Lichtquelle und dem Reflektor über eine Linse im Strahlengang der Lichtquelle. Mithilfe dieser optischen Komponente und einem Abschatter an der zweiten Bildebene lassen sich sehr genaue optische Abbildungen auf der Straße erzeugen.

In Projektionssystemen werden hauptsächlich Gasentladungslampen, die unter dem Namen Xenon-Scheinwerfer bekannt sind, zur Lichterzeugung eingesetzt. Auch in

diesem Scheinwerfertyp werden vermehrt Freiformreflektoren zur Optimierung der Lichtausbeute und der Lichtverteilung auf der Straße eingesetzt.

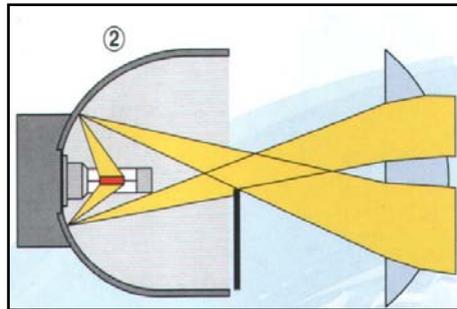


Abbildung 3.21

Prinzip eines Projektionssystems; die Lichtstrahlen verlaufen durch den Reflektor und die anschließende Linse nahezu parallel außerhalb des Scheinwerfers (im Bild rechts); die Blende (im Bild der schwarze Strich in der Mitte unten) wird zur Erzeugung der Hell-Dunkel-Grenze benötigt. [IQk10]



Abbildung 3.22

Beispiel eines Projektionsscheinwerfers; erkennbar ist die leuchtende Linse [IQI10]

4. Untersuchungsmethode

Ziel dieser Arbeit ist es, einen potentiellen Einfluss der ambienten Innenraumbeleuchtung *ABL*[®] auf den Schwellenkontrast eines Fahrzeugführers zu ermitteln. Dieser wird in einem statischen Feldversuch auf einem abgetrennten Gelände bestimmt, wodurch eine gute Reproduzierbarkeit der Versuchsbedingungen gewährleistet werden kann.

In **Abb. 4.1** ist eine Prinzipskizze des gesamten Feldversuches dargestellt. Im Vordergrund steht bei der Untersuchung die Gegenüberstellung des Schwellenkontrastes mit und ohne Verwendung des *ABL*[®].

Für den Versuch werden nach bestimmten Kriterien Versuchspersonen ausgewählt, die mit drei verschiedenen Blendszenarien konfrontiert werden. Im ersten Szenario findet keine Blendung durch den Gegenverkehr statt. Im zweiten wird ein Blendungsscheinwerfer in 15 m und im dritten in 50 m Entfernung auf der Gegenfahrbahn positioniert. Insgesamt ergeben sich somit sechs verschiedene Szenarien, die jeder Proband durchläuft.

Im Kapitel 5 „**Materialien und Versuchsdurchführung**“ wird der Versuchsaufbau genauer erläutert, die benötigten Materialien beschrieben und auf die notwendigen Voruntersuchungen eingegangen.

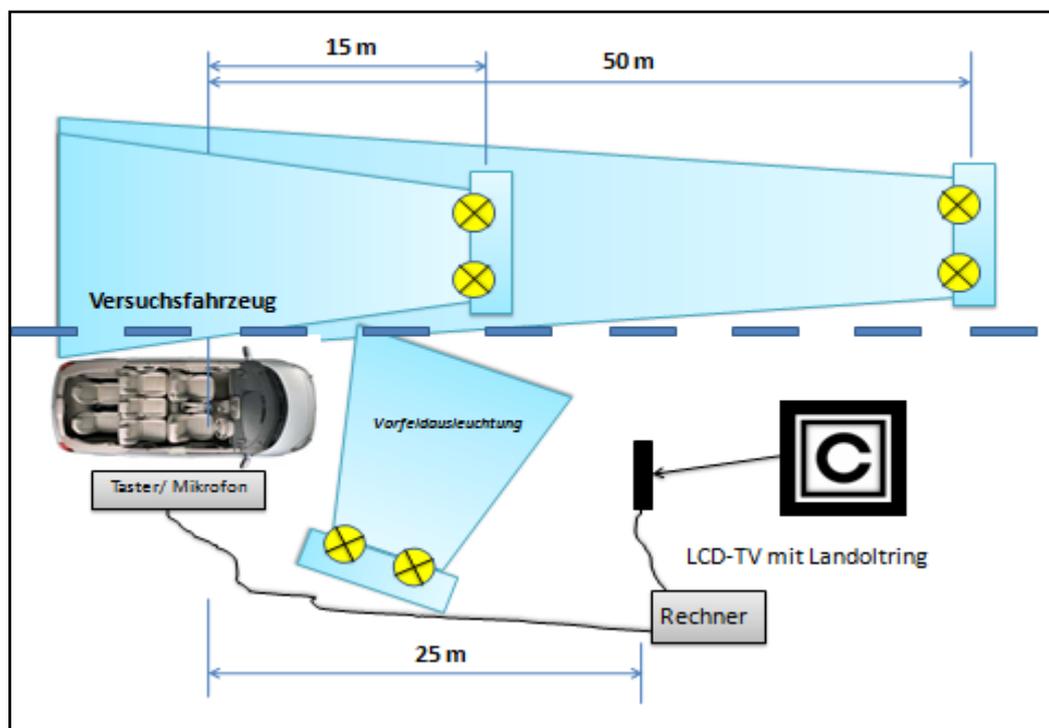


Abbildung 4.1

Prinzipische Skizze des Hauptversuches zur Bestimmung des Einflusses des *ABL*[®] auf das Kontrastsehvermögen des Fahrzeugführers

5. Materialien

5.1. ABL®

5.1.1. Gefahrenpotential einer Blendung im Straßenverkehr

Das ABL® ist ein im Handel erhältliches Produkt, das zur Verringerung der Blendung eines Fahrzeugführers durch den Gegenverkehr oder die Straßenbeleuchtung führen soll. Der Hersteller wirbt damit, dass das Produkt ein optisches System ist, das zu einer „blendungsarmen Sicht bei Nachtfahrten führt“. Die Abkürzung *ABL* steht sinngemäß für *Antiblendlicht*. Diese Bezeichnung wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit verwendet. Das *Antiblendlicht* soll nach [IQm10] folgende Vorteile mit sich bringen:

- Es passt die Pupille an wechselnde Lichtverhältnisse an
- Es optimiert die Reaktionszeit
- Es sorgt für eine entspanntere und angenehmere Nachtfahrt
- Es senkt die Produktion des Schlafhormons Melatonin und reduziert damit die Müdigkeit bei Nachtfahrten
- Es vermindert das Blendempfinden durch den Gegenverkehr oder die Straßenbeleuchtung (vgl. hierzu **Abb. 5.1**)



Abbildung 5.1

Darstellung der Verringerung der Blendung durch entgegenkommende Scheinwerfer durch das *Antiblendlicht* [IQm10]

Das *Antiblendlicht* soll nach Aussagen des Herstellers dazu dienen, die Adaptation des Auges an das höhere Niveau zu optimieren und somit die Folgen einer physiologischen Blendung des Fahrzeugführers zu vermindern. Wie hoch deren

Gefahrenpotential im Straßenverkehr ist, lässt sich anhand der folgenden simplen Rechnung bereits erkennen.

Im Zustand der Blendung ist die Kontrasterkennung stark verringert, was dazu führen kann, dass Objekte im Straßenverkehr nicht erkannt werden. Dies können zum einen wichtige Hinweisschilder oder zum anderen schwächere Verkehrsteilnehmer wie Fußgänger sein. Nimmt man eine Dauer des Blendungszustandes von 1 s an, so legt das Fahrzeug bei einer Fahrgeschwindigkeit von 80 km/h in dieser Zeit 22,22 m zurück. Bei einer Geschwindigkeit von 150 km/h sind es sogar bereits 41,67 m.

5.1.2. Aufbau des *Antiblendlichtes*

Das *Antiblendlicht* wird an der Sonnenblende des Fahrzeuges befestigt und über das 12V-Bordnetz versorgt. Es besteht im Kern aus einer Steuereinheit, die das auf die Photosensoren treffende Licht bewertet und dementsprechend die Helligkeit einer Lichtaustrittsfläche regelt. Dafür bedient es sich LEDs, deren Licht auf eine Streuscheibe eingekoppelt wird, um eine möglichst homogen leuchtende Fläche zu generieren. Die Photosensoren messen die Beleuchtungsstärke, die sowohl durch den Gegenverkehr als auch den rückwärtigen Verkehr erzeugt wird. Dafür sind zwei Sensoren an der Vorderseite des *Antiblendlichtes* sowie einer auf der entgegengesetzten Seite angebracht. Dies ist insofern sinnvoll, dass nicht nur das Licht entgegenkommender, sondern über die Rückspiegel auch das der nachfolgenden Fahrzeuge zur Blendung des Fahrzeugführers führen kann.

In **Abb. 5.2** sind das *Antiblendlicht* sowie die dazugehörigen Steuer- und Funktionselemente dargestellt.

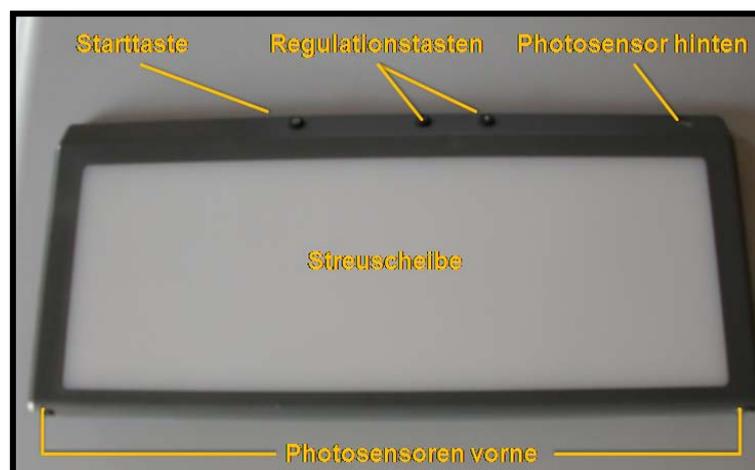


Abbildung 5.2

Antiblendlicht mit Steuer- und Funktionselementen

5.1.3. Regelverhalten

Durch eine interne Regelung ändert das *Antiblendlicht* die Helligkeit der Streuscheibe. Steigt die gemessene Beleuchtungsstärke aufgrund eines entgegenkommenden Fahrzeuges an, so erhöht sich die Leuchtdichte der Streuscheibe und das Auge wird frühzeitig an ein höheres Leuchtdichteniveau adaptiert. Sinkt die Beleuchtungsstärke wieder ab, so reduziert sich die Leuchtdichte der Streuscheibe bis auf das Grundniveau bei der Beleuchtungsstärke 0.

Das Grundniveau der Leuchtdichte ist einer von zwei Parametern, die sich vom Benutzer des *Antiblendlichtes* manuell einstellen lassen (vgl. **Abb. 5.3**). Der zweite verkörpert das Endniveau, welches das *Antiblendlicht* ab einer bestimmten Beleuchtungsstärke erreicht (vgl. **Abb. 5.4**). Über die Einstellung dieser beiden Parameter lässt sich somit die Steilheit der Regelkurve bestimmen.

Die manuellen Einstellmöglichkeiten sollen garantieren, dass das *Antiblendlicht* den individuellen Bedürfnissen des Fahrzeugführers angepasst werden kann.

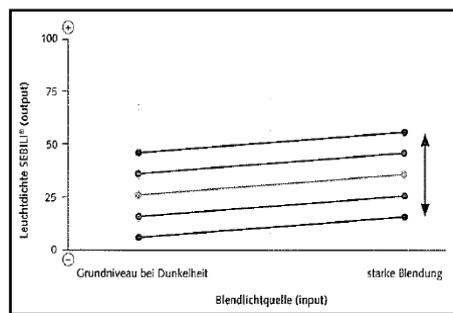


Abbildung 5.3

Einstellung des Grundniveaus in der Leuchtdichte des *Antiblendlichtes* [BRA09]

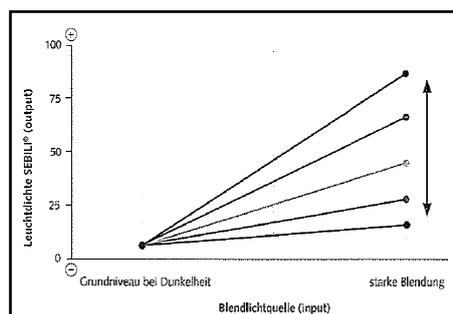


Abbildung 5.4

Einstellung des Endniveaus in der Leuchtdichte des *Antiblendlichtes*; aus dessen Wahl und der des Grundniveaus ergibt sich die Steilheit der Regelkurve [BRA09]

Bei den obigen Schaubildern handelt es sich nur um Prinzipskizzen. Eine Labormessung zur Bestimmung der Regelkurve und anderer für diese Untersuchung essentieller Parameter wird in **Abs. 6.1.3** beschrieben.

5.2. Leuchtdichtekamera

Für die Aufnahme von Leuchtdichtebildern wird die Leuchtdichtekamera *LMK98-3* der Firma *Technoteam* verwendet. Sie verfügt über mehrere Objektive, die in ihrer Brennweite einen Bereich von 8mm – 1000mm abdecken. Damit lassen sich Aufnahmen sowohl im Nah- als auch im Fernbereich machen. Die Leuchtdichtekamera lässt sich mittels einer speziellen Software bedienen. In dieser können unter anderem Parameter wie die Integrationszeit oder der Aufnahmemodus eingestellt werden (Näheres hierzu in **Abs. 6.1**)



Abbildung 5.5

Leuchtdichtemesskamera LM98-3 [IQn10]

5.3. Beleuchtungsstärkemessgerät

Für die Labormessungen am *Antiblendlicht* und die Messungen in den Feldversuchen wurde das *Pocket Lux 2* der Firma *LMT Berlin* verwendet. Es verfügt über einen frei montierbaren Beleuchtungsstärkemesskopf und ist durch seine geringen Abmessungen äußerst flexibel einsetzbar. Weiterhin ist es batteriebetrieben und damit unabhängig von einer externen Spannungsquelle. Daher eignet es sich besonders für den Gebrauch außerhalb des Labors oder bei komplexeren Versuchsaufbauten wie bei der Vermessung des *Antiblendlichtes*.



Abbildung 5.6

Pocket Lux 2 der Firma LMT Berlin [IQo10]

5.4. Spektrometer

Die spektrale Vermessung des *Antiblendlichtes* erfolgt mit dem Spektrometer *Specbos 1200* der Firma *Jeti*. Mit einem Spektrometer können charakteristische Werte einer Lichtquelle wie die Farbtemperatur, die spektrale Strahlungsstärke oder der Farbort bestimmt werden.



Abbildung 5.7

Spektrometer der Firma Jeti [IQo10]

5.5. Scheinwerfermodule

Zur Simulation der Autoscheinwerfer des Gegenverkehrs werden im Hauptversuch Scheinwerfermodule eingesetzt. Diese basieren auf dem Projektionssystem und nutzen H7-Halogenglühlampen als Lichtquellen. Betrieben werden sie an Spannungsquellen, die eine konstante 12V-Gleichspannung bereitstellen. Diese werden ihrerseits an der 230V Netzspannung angeschlossen.

Die Module werden an Racks auf einer Höhe von 0,65 m angebracht, was der typischen Anbauhöhe eines Autoscheinwerfers entspricht. Der horizontale Abstand der zwei Scheinwerfermodule beträgt 1,56 m.



Abbildung 5.8

Scheinwerfermodule, die auf einem Rack montiert sind; ebenfalls erkennbar sind die Spannungsquelle und die Stromversorgung der selbigen

5.6. Visualisierungsplattform

Zur Darbietung des Sehzeichens „Landoltring“ wird ein LCD-TV Monitor der Marke *Philips* verwendet (47PFL5604H/12). Der Rahmen hat die Farbe Schwarz und ist zusätzlich mit einem schwarzen Filzstoff beklebt worden, um unerwünschte Reflexionen zu vermeiden. Die Bildschirmdiagonale beläuft sich auf 119,0 cm, das Verhältnis von Breite zu Höhe des Bildes ist 16:9. Daraus ergeben sich eine Breite von 103,7 cm und eine Höhe von 58,3 cm. Der Durchmesser eines darauf dargestellten Landoltrings beträgt 51,0 cm. Die Öffnung des Ringes beträgt nach **Abs. 3.1.1.4** $1/5$ des Durchmessers und damit 10,2 cm. Der Bildschirm verfügt nach Angaben des Herstellers über eine maximale Helligkeit von 500 cd/m² und ein Kontrastverhältnis von 50.000:1.



Abbildung 5.9

LCD-TV Monitor der Marke *Philips*; der Rand wurde zur Vermeidung von Reflexionen mit Filz beklebt

5.7. Tonaufnahme

Als Aufnahmegerät wird ein dynamisches Mikrofon verwendet, da dieses eine ausreichende Aufnahmequalität über die erforderlichen 25 m Kabellänge zwischen Mikrofon und Rechner hinweg garantiert, ohne dass eine externe Stromversorgung benötigt wird.

5.8. Versuchsfahrzeug

Für den statischen Feldversuch wird ein Fahrzeug der Marke *Mercedes*, Modell *S-Klasse*, eingesetzt. Es verfügt über Projektionsscheinwerfer, die mithilfe von Xenon-Gasentladungslampen das Abblendlicht generieren. Diese können jedoch aufgrund

der auf dem LCD-TV entstehenden Reflexionen (vgl. **Abb. 7.5**) nicht zur Erzeugung der Vorfeldausleuchtung verwendet werden.



Abbildung 5.10

Versuchsfahrzeug S500 der Marke Mercedes

5.9. Optometrische Vermessung

Für die optometrische Vermessung der Probanden wird das Gerät *Rodatest* der Firma *Vistec* verwendet. Für diesen Versuch werden die beiden vorinstallierten Programme *Kontrast Screening* und *G25/LKW* benötigt. Ersteres überprüft das Kontrastsehen, letzteres unter anderem die Sehschärfe (Visus) der Probanden.



Abbildung 5.11

Gerät Rodatest für die optometrische Vermessung der Probanden

6. Vorversuche

6.1. Durchführung

6.1.1. Durchschnittliche Straßenbreite einer Landstraße

Die Bedingungen auf einer Landstraße werden als die kritischsten betrachtet, da hier der seitliche Abstand entgegenkommender Fahrzeuge am geringsten ist. Ein geringer Abstand bedingt kleine horizontale Winkel, was nach **Gln. 3.7** zu einer höheren Schleierleuchtdichte führt. Für diesen Versuch wird die Fahrbahnbreite von insgesamt zehn Landstraßen bestimmt. Bundesstraßen werden aufgrund der deutlich breiteren Fahrbahnen und der damit einhergehenden verminderten Blendung nicht in die Untersuchung miteinbezogen.

6.1.2. Blendbeleuchtungsstärke eines entgegenkommenden Fahrzeuges

Zur Ermittlung kritischer Blendsituationen ist es notwendig, den typischen Verlauf der Beleuchtungsstärke zu kennen, die abhängig vom Abstand zum entgegenkommenden Fahrzeug am Auge des Fahrzeugführers anliegt. Daraus lassen sich dann die für diesen Versuch relevanten Positionen der Scheinwerferracks bestimmen. Für die Messung wird das Versuchsfahrzeug (*Mercedes S500*) auf einer Seite einer Fahrbahn positioniert. Zur Erfassung der Beleuchtungsstärke wird das Pocket Lux 2 in einer typischen Höhe des Fahrerauges von 1,50m montiert. Damit wird der Verlauf der Beleuchtungsstärke in einem Bereich von 5 m bis 75 m mit einer Schrittweite von 2 m aufgenommen. Aus der Entfernung d zwischen Fahrzeug und Messkopf des Pocket Lux 2 lässt sich nach **Gln 6.1** der horizontale Winkel α (in Grad) bestimmen. Dabei ist b die mittlere Straßenbreite.

$$\alpha = \arctan\left(\frac{b}{d}\right) \frac{360^\circ}{2\pi} \quad (\text{Gln. 6.1})$$

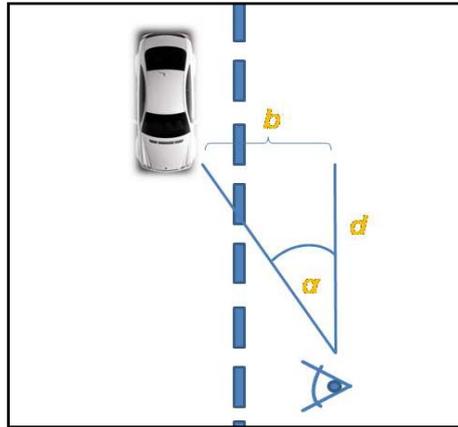


Abbildung 6.1

Der Messempfänger des Pocket Lux 2 befindet sich am Ort des Fahrerauges, das symbolisch dargestellt ist; die Position des Fahrzeuges ist fest, die des Empfängers variabel

6.1.3. Charakterisierung des *Antiblendlichtes*

6.1.3.1. Ermittlung des Regelverhaltens

Das *Antiblendlicht* misst die Beleuchtungsstärke über drei Photosensoren, von denen sich zwei auf der vorderen und einer auf der hinteren Seite befinden. Zur Bestimmung des Zusammenhanges zwischen der Leuchtdichte der Streuscheibe des *Antiblendlichtes* und der an den Sensoren anliegenden Beleuchtungsstärke wird der in **Abb. 6.2** skizzierte Versuchsaufbau verwendet. Für die Messungen werden folgende Geräte verwendet:

- Leuchtdichtekamera *LMK98-3* zur Aufnahme von Leuchtdichtebildern des *Antiblendlichtes*
- *Pocket Lux 2* zur Messung der Beleuchtungsstärke, die an den Sensoren anliegt
- Glühlampe als Lichtquelle (*Osram 60 W*) zur Erzeugung der benötigten Beleuchtungsstärke
- Netzteil zur Regelung der Spannung, die an der Glühlampe anliegt
- Netzteil zur Versorgung des *Antiblendlichtes* mit einer Gleichspannung von 12 V
- Rechner zur Ansteuerung der Leuchtdichtekamera und zur anschließenden Auswertung der Bilder

Der Versuchsaufbau erfolgt auf einer optischen Bank, um die erforderlichen Geräte präzise montieren und ausrichten zu können. Das Objektiv der Leuchtdichtekamera wird auf die Streuscheibe des *Antiblendlichtes* fokussiert. Die Aufnahmen erfolgen im

sogenannten High Dynamic Modus, d.h. es werden mehrere Bilder verschiedener Integrationszeiten aufgenommen und durch die Kamerasoftware zu einem Gesamtbild zusammengefügt. Der Vorteil dieses Aufnahmemodus liegt darin, dass Leuchtdichteunterschiede aufgrund der hohen Dynamik der aufgenommenen Bilder genauer aufgelöst werden können. Der Sensor an der Hinterseite wird abgeklebt, um eventuellen Störeinflüssen vorzubeugen.

Die Beleuchtungsstärke wird mittels *Pocket Lux 2* an einem der beiden vorderen Sensoren gemessen. Die Beleuchtung beider Sensoren ist aufgrund des symmetrischen Aufbaus auf der optischen Bank als identisch anzusehen. Die Spannung über der Glühlampe wird mittels des regelbaren Netzteils schrittweise erhöht, wodurch der abgegebene Lichtstrom und folglich auch die Beleuchtungsstärke an den Sensoren ansteigen. Zu jedem Beleuchtungsstärkewert wird dann ein Leuchtdichtebild aufgenommen und die zugehörige Leuchtdichte der Streuscheibe durch Mittelung über die gesamte leuchtende Fläche ermittelt.

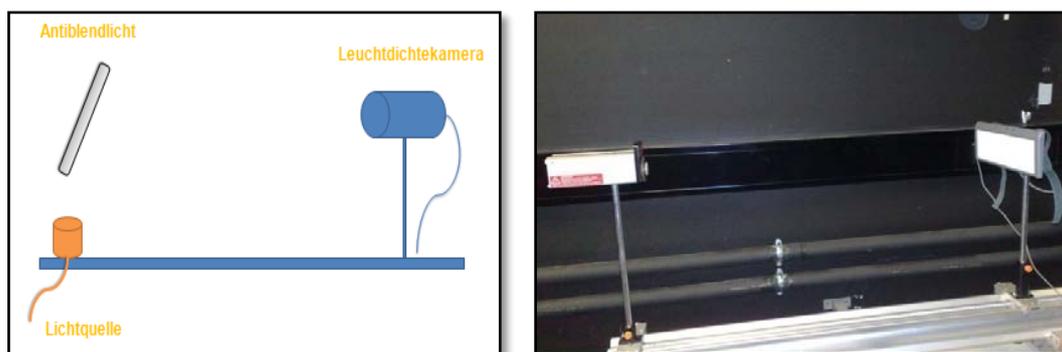


Abbildung 6.2

Das linke Bild zeigt die prinzipielle Versuchsanordnung zur Bestimmung des Regelverhaltens, auf der rechten Seite ist (um 180° gedreht) der reale Aufbau im Labor zu erkennen

6.1.3.2. Spektrale Vermessung

Wie beim Versuchsaufbau zur Bestimmung des Regelverhaltens wird das *Antiblendlicht* längs der optischen Bank ausgerichtet. Das Spektrometer *Specbos 1200* wird äquivalent zur Leuchtdichtekamera in **Abb. 6.2** positioniert. In diesem Versuch werden der Farbort, die Farbtemperatur und die spektrale Abstrahlcharakteristik des *Antiblendlichtes* bestimmt. Das *Antiblendlicht* wird in den Modus der höchsten Grundhelligkeit versetzt, um eventuelle Einflüsse einer Dimmung auszuschließen. Die Messungen werden sowohl ohne als auch mit Bestrahlung der Photosensoren durch die Glühlampe durchgeführt.

6.1.3.3. Abhängigkeit der Photosensoren vom Anleuchtungswinkel

Das Licht der Scheinwerfer eines entgegenkommenden Fahrzeuges trifft unter horizontalen Winkeln von 0° bis 70° auf die Photosensoren des *Antiblendlichtes*. Für die Berechnung des bezüglich der Blendung kritischsten Abstandes zum Gegenverkehr muss die Winkelabhängigkeit der Bewertung der Beleuchtungsstärke durch die Photosensoren ermittelt werden. Aus dem resultierenden funktionellen Zusammenhang und dem rechnerisch ermittelten Verlauf der Schwellenleuchtdichte wird dann der kritische Abstand berechnet (vgl. **Abs. 6.2.3.3**). Dieser wird zur Positionierung der Blendscheinwerfer im Hauptversuch benötigt.

Unter dem Anleuchtungswinkel versteht man in diesem Zusammenhang den horizontalen Winkel α zwischen der Normalen der Photosensor-Ebene und der Lichtquelle.

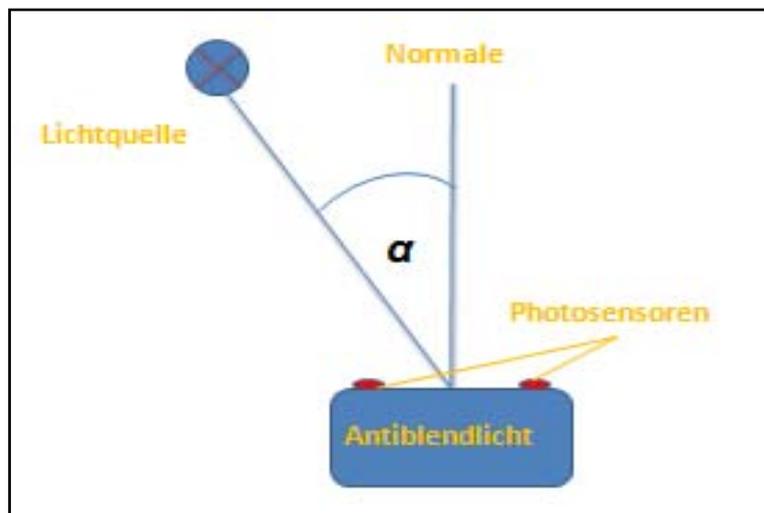


Abbildung 6.3

Zusammenhang zwischen der Lichtquelle, der Normalen zur Ebene der Photosensoren und dem Anleuchtungswinkel α

Für die Messung werden sowohl die Leuchtdichtekamera als auch das *Antiblendlicht* auf einem Goniometer befestigt. Dadurch wird ermöglicht, dass die Kamera immer dieselbe Orientierung zur Lichtaustrittsfläche des *Antiblendlichtes* hat. Das Goniometer ist in der horizontalen Ebene von 0 bis 360° drehbar.

Das *Antiblendlicht* wird durch einen konstanten Lichtstrom bestrahlt und im Bereich von 0° bis 70° horizontal gedreht. Die Winkelschrittweite beträgt dabei 1° . Für jeden Winkelschritt wird ein Leuchtdichtebild aufgenommen und die mittlere Leuchtdichte bestimmt.

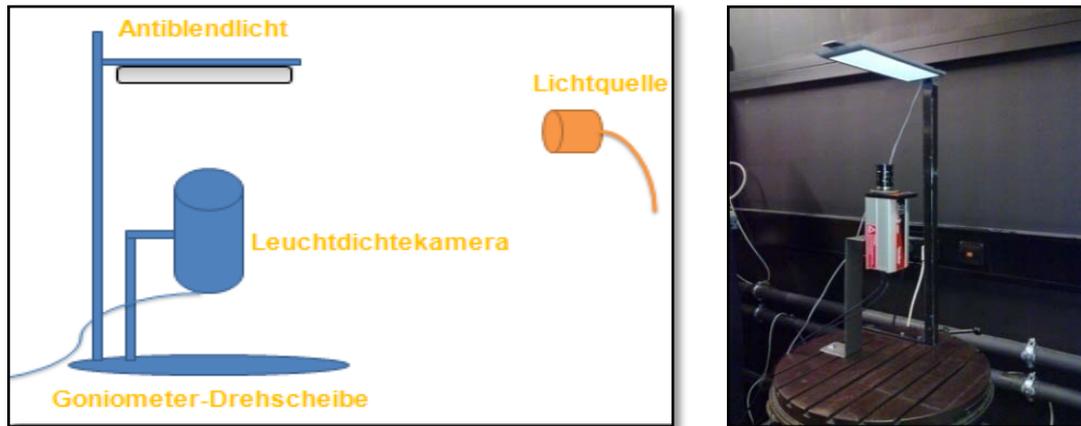


Abbildung 6.4

Versuchsanordnung zur Bestimmung der Winkelabhängigkeit der Photosensoren; im Bild unten ist die Drehscheibe des Goniometers zu erkennen; sowohl die Leuchtdichtekamera als auch das *Antiblendlicht* sind fest damit verbunden

6.1.4. Charakterisierung der Visualisierungsplattform

Zur Darstellung der Landoltringe im Hauptversuch wird der in **Abs. 5.6** beschriebene LCD-TV der Marke *Philips* verwendet. Die benötigten Landoltringe werden mit der Software *Powerpoint* der Firma *Microsoft* erstellt. Dabei werden insgesamt 2048 Bilder generiert. Diese setzen sich aus 256 Graustufen und 8 verschiedenen Orientierungen der Öffnung des Ringes je Graustufe zusammen.

Der Einfluss des *Antiblendlichtes* auf die visuelle Leistung des Fahrzeugführers wird anhand des Schwellenkontrastes verifiziert. Zur Ermittlung des Schwellenkontrastes muss der Kontrastwert des Sehobjektes „Landoltring“ für jede Graustufe bekannt sein, da eine Regelung der für den Kontrast maßgeblichen Leuchtdichten auf dem LCD-TV nur über die 256 Graustufen erfolgen kann.

Die Abhängigkeit der Leuchtdichte von den Graustufen ist bekanntlich nicht linear, weshalb eine Messung des Anfangs- und Endwertes nicht genügt. Vielmehr ist es notwendig, die korrespondierende Leuchtdichte zu jeder einzelnen Graustufe zu bestimmen.

Dazu werden die Bilder, deren Öffnung nach rechts weist, ausgewählt und auf dem LCD-TV dargestellt. Der Kontrast wird im Menü „Einstellungen“ des Fernsehers zu 0 gewählt. Die Leuchtdichtekamera wird auf die Bildschirmfläche ausgerichtet. Für jede Graustufe wird ein Leuchtdichtebild aufgenommen. Der Aufnahmemodus ist wie bei der Vermessung des *Antiblendlichtes* der High Dynamic Modus, der Kontrastnuancen besser auflösen kann. Aufgrund der zu erwartenden Inhomogenität in der Ausleuchtung des Fernschirms wird nach dem Muster in **Abb. 6.5** das Aufnahmebild der Kamera in einzelne Bereiche aufgeteilt. Sechs Bereiche messen

die Leuchtdichtewerte des schwarzen Hintergrundes, fünf die des Landoltrings. Daraus werden durch Mittelung ein Wert für den Hintergrund und einer für den Landoltring errechnet. Die so gewonnenen Kontrastwerte werden für die Analyse der Ergebnisse des Hauptversuches verwendet.

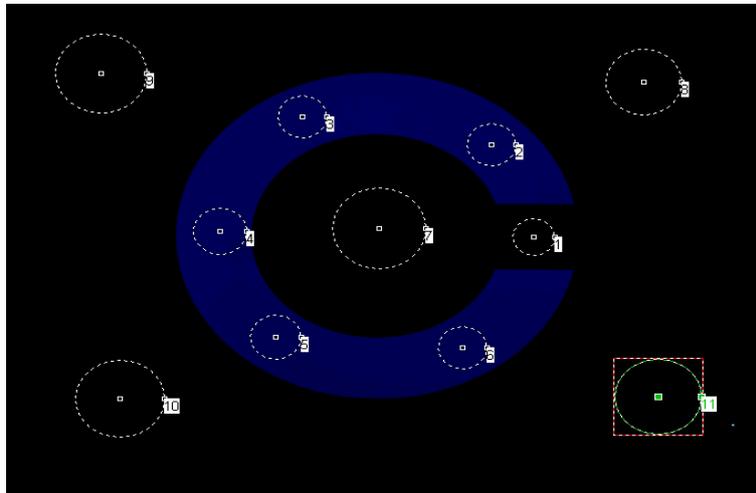


Abbildung 6.5

Aufnahmepattern der Leuchtdichtekamera zur Bestimmung der Kontrastwerte jeder einzelnen Graustufe; die Darstellung der Leuchtdichte erfolgt durch die Software in Falschfarben, weshalb der Landoltring in diesem Bild eine blaue Farbe und nicht den tatsächlichen Grauton aufweist

6.1.5. Entwicklung der Software *Schweko*

Um die Landoltringe auf dem LCD-TV in einer definierten Abfolge darstellen zu können, wird die Software *Schweko* entwickelt. Es handelt sich hierbei um eine Applikation, die nur unter dem Betriebssystem Windows lauffähig ist und mit der Programmiersprache C++ geschrieben wird. Der Name *Schweko* leitet sich sinngemäß aus dem Wort Schwellenkontrast ab. Die Software verfügt über folgende Einstellmöglichkeiten:

- Name des Probanden, um eine spätere Zuordnung der Ergebnisse zu ermöglichen
- Speicherort der Ausgabedateien
- Darstellungszeit der einzelnen Bilder
- Zeit, die jedem Probanden jeweils zur mündlichen Validierung seines zuvor per Taster gewählten Kontrastes zur Verfügung steht
- Anzahl der Testdurchläufe

Die zuvor erstellten Bilder der Landoltringe werden in die Quellverzeichnisse von *Schweko* eingefügt. Dabei besteht auch die Möglichkeit, für den Ablauf des Programmes nur einen bestimmten Teil der Bilder zu verwenden. Dies wird sich im Laufe des Hauptversuches als ein wesentlicher Beitrag zur Verkürzung der einzelnen Versuchsdurchgänge herausstellen.

Schweko stellt auf dem LCD-TV die Landoltringe unterschwellig dar. Die Orientierung der Öffnung des Ringes wird dabei für jedes Bild einzeln nach dem Zufallsprinzip ausgewählt. Über den Taster, den der Proband bedient, lässt sich der Bildlauf auf dem LCD-TV anhalten. Der Proband hat nun für die zuvor gewählte Zeit die Möglichkeit, die von ihm erkannte Orientierung der Ringöffnung über ein im Versuchsfahrzeug angebrachtes Mikrofon zu bestätigen. Die Audioaufnahme wird im Ausgabeordner von *Schweko* als *.wav-Datei gespeichert. Die Bezeichnung dieser Datei besteht zum einen aus dem Namen der Bilddatei, die zu diesem Zeitpunkt auf dem Bildschirm gezeigt wird, und zum anderen aus dem Namen des Probanden. Falls die Anzahl der Versuchsdurchgänge noch nicht beendet ist, beginnt der Bildlauf wieder von vorne.

Der ermittelte Schwellenkontrast lässt sich anhand des Namens der Bilddatei dem jeweiligen Probanden zuordnen. Durch die mehrmalige Wiederholung der Durchläufe wird zudem die statistische Sicherheit der Ergebnisse erhöht.

Die Bedienungsanleitung von *Schweko* ist im **Anhang A** zu finden.



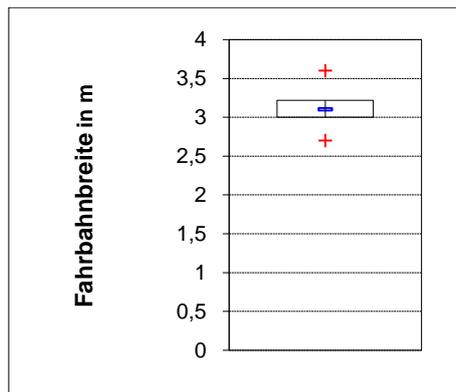
Abbildung 6.6

Parametereingabefeld der Software *Schweko*; Eingabe des Namens des Probanden, des Speicherortes der Ausgabedateien, der Bild-Intervalldauer, der Aufnahmedauer und der Anzahl der Durchläufe

6.2. Ergebnisse

6.2.1. Durchschnittliche Straßenbreite

Die Ergebnisse der Vermessung von zehn typischen Landstraßen sind in **Tab. 6.1** dargestellt. Es ergibt sich für die durchschnittliche Breite einer Landstraße ein arithmetischer Mittelwert von 3,12 m. In **Anhang E** sind die Aufnahmen der einzelnen Straßenabschnitte zu finden.



Straße	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Breite [in m]	3,60	2,70	3,20	3,05	3,15	3,28	3,11	3,00	3,10	3,00

Tabelle 6.1

Bestimmung der durchschnittlichen Breite einer Landstraße; die obere Darstellung zeigt die ermittelten Werte als Box-Plot

6.2.2. Verlauf der Blendbeleuchtungsstärke

Die Beleuchtungsstärke, die durch die Scheinwerfer eines entgegenkommenden Fahrzeuges am Fahrerauge anliegt, zeigt den in **Abb. 6.7** und **Abb. 6.8** dargestellten Verlauf. Dabei ist sowohl die Abhängigkeit der Beleuchtungsstärke von der Entfernung zwischen entgegenkommendem Fahrzeug und Fahrerauge wie auch von dem entsprechenden horizontalen Winkel dargestellt (vgl. **Abs. 6.1.2**). Die Messdaten befinden sich in **Anhang F**. Der Verlauf der Kurve zeigt ein Maximum der Beleuchtungsstärke in einer Entfernung von ca. 15 m und einen annähernd quadratischen Abfall hin zu größeren Entfernungen. Der Verlauf lässt sich anhand von **Gln. 3.19** erläutern. Das Quadrat des Abstands ist umgekehrt proportional zur Beleuchtungsstärke, was den parabelförmigen Verlauf für Entfernungen ab ca. 25 m bedingt. Der horizontale Winkel, in der Gleichung mit ε bezeichnet, geht kosinusförmig in die Berechnung der Beleuchtungsstärke ein, weshalb die Kurve bei

geringen Abständen (<25 m) abfällt. Mithilfe der gemessenen Werte der Beleuchtungsstärke lässt sich die Schleierleuchtdichte nach **Gln. 3.9** berechnen. Sie wird nach gängiger Lehrmeinung als Maß für die physiologische Blendung betrachtet. Der Verlauf der Schleierleuchtdichte in Abhängigkeit des horizontalen Winkels und der Entfernung zwischen den Scheinwerfern des Gegenverkehrs und dem Fahrerauge ist in **Abb. 6.9** und **Abb. 6.10** dargestellt. Gemäß des Verlaufes der Schleierleuchtdichte ist bis zu einem gewissen Punkt für größere Entfernungen zwischen den Blendungsscheinwerfern und dem Versuchsfahrzeug ein Ansteigen des Schwellenkontrastes zu erwarten, was durch die Ergebnisse des Hauptversuches bestätigt wurde (vgl. **Abs. 7.2**).

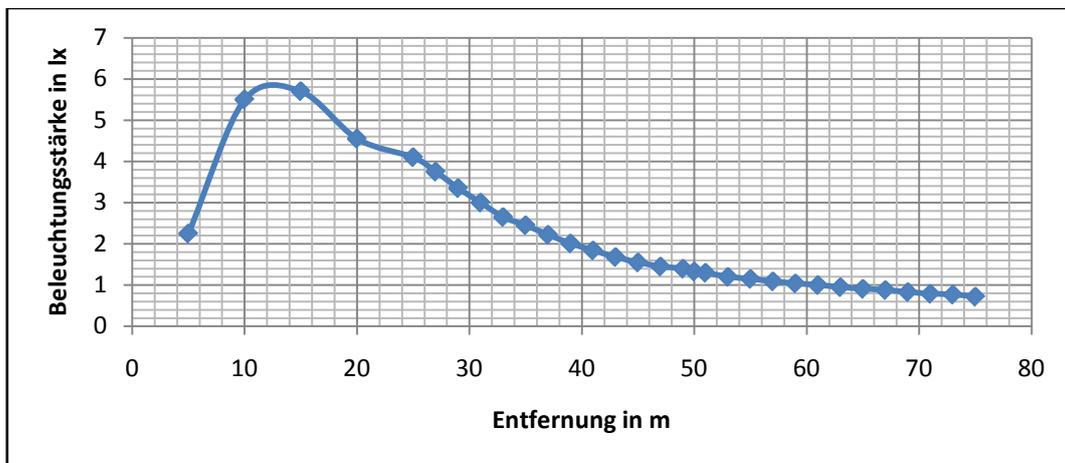


Abbildung 6.7

Beleuchtungsstärke am Auge des Fahrzeugführers in Abhängigkeit des Abstandes zum entgegenkommenden Fahrzeug

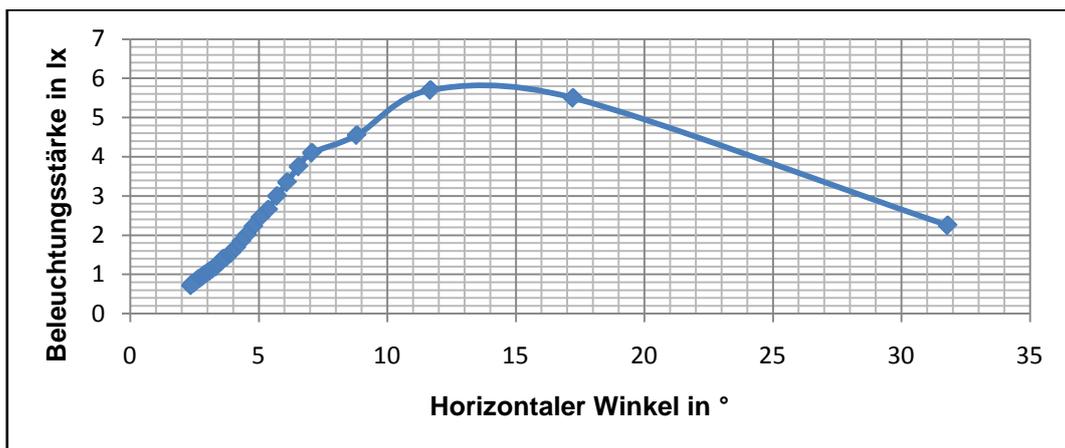


Abbildung 6.8

Beleuchtungsstärke am Auge des Fahrzeugführers in Abhängigkeit des horizontalen Winkels; dieser wird zwischen der Normalen zur Ebene des Auges und der Gerade durch das Auge und das entgegenkommende Fahrzeug gemessen

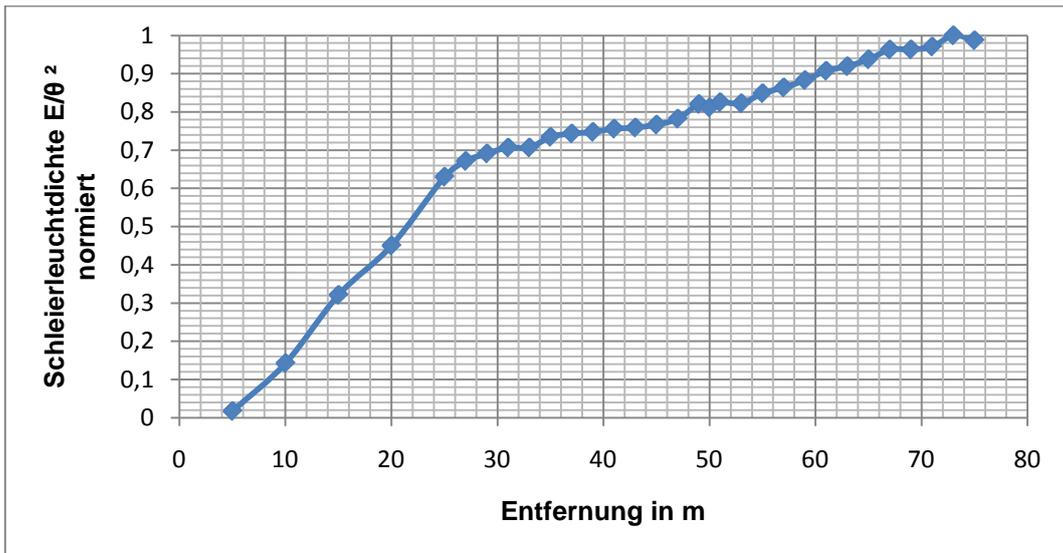


Abbildung 6.9

Schleierleuchtdichte am Auge des Fahrzeugführers, die sich aus den gemessenen Beleuchtungsstärkewerten und dem korrespondierenden Abstand zum Fahrzeug des Gegenverkehrs ergibt; die Kurve ist auf das Maximum normiert

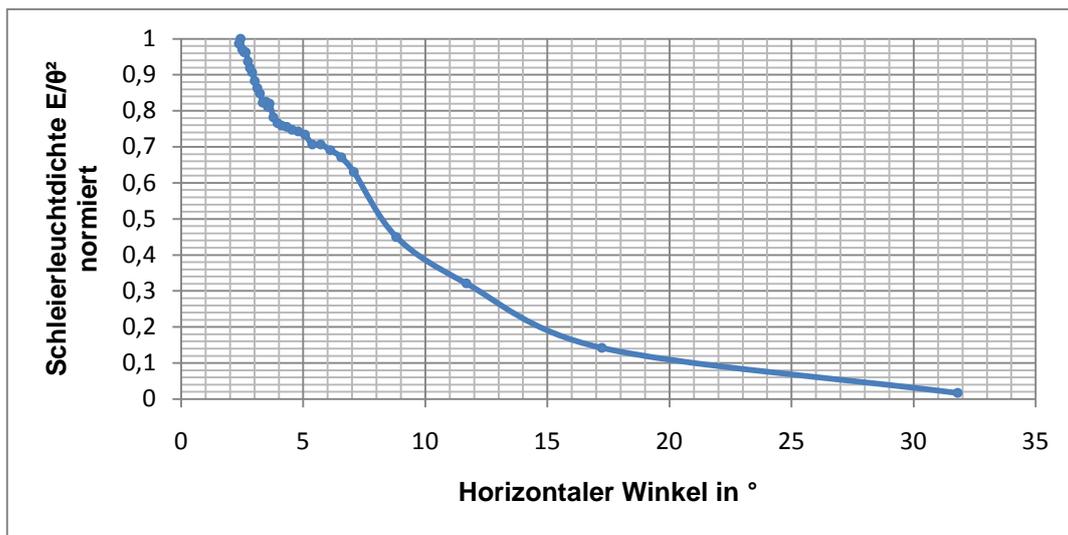


Abbildung 6.10

Schleierleuchtdichte am Auge des Fahrzeugführers in Abhängigkeit zum jeweiligen Abstand des korrespondierenden horizontalen Winkels; die Kurve ist auf das Maximum normiert

6.2.3. Labortechnische Vermessung des *Antiblendlichtes*

6.2.3.1. Regelverhalten

Die Bestimmung der Abhängigkeit der Leuchtdichte der Streuscheibe des *Antiblendlichtes* von der Beleuchtungsstärke an den Sensoren ist in **Abb. 6.11** dargestellt. Die Abbildung zeigt die Regelkurve für vier verschiedene Einstellungen des maximalen Helligkeitsniveaus. Dabei stellt die untere Kurve das niedrigste und die obere Kurve das höchste einstellbare Niveau dar. Die Grundhelligkeit lässt sich auf Werte von $1,37 \frac{cd}{m^2}$ bis $31,03 \frac{cd}{m^2}$ einstellen. Für die Bestimmung der Regelkurve wird sie konstant auf dem höchsten einstellbaren Wert von $31,03 \frac{cd}{m^2}$ gehalten. Die Kurve zeigt einen steilen Anstieg der Leuchtdichte im Bereich von 0...20 lx. Die Steilheit der Kurve nimmt in diesem Bereich durchschnittlich Werte von 0,1 bis maximal $1,32 \frac{cd}{m^2 lx}$ an. Für höhere Beleuchtungsstärkewerte ist die Steigung der Kurven geringer. Wie aus den Werten der Blendbeleuchtungsstärke in **Anhang F** ersichtlich ist, wird das *Antiblendlicht* in seinem primären Einsatzgebiet, dem nächtlichen Straßenverkehr, im Bereich der größten Steilheit betrieben (der Bereich ist in **Abb. 6.11** unten links markiert). Dies ermöglicht eine effiziente Adaptation der Streuscheibenleuchtdichte an die Umfeldleuchtdichte. Die Messdaten sind in **Anhang G** zu finden.

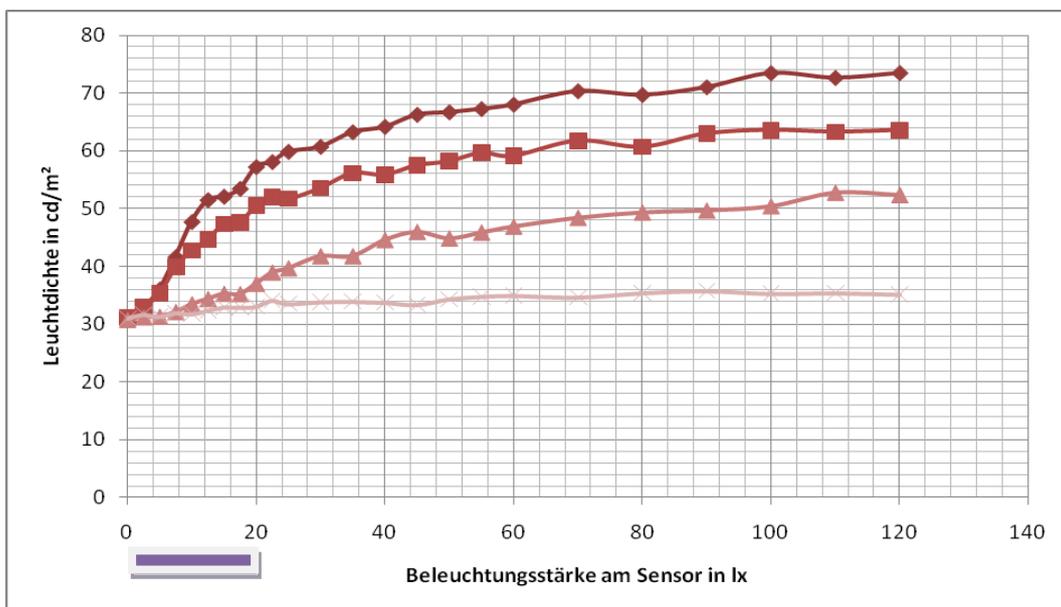


Abbildung 6.11

Regelverhalten des *Antiblendlichtes*; Darstellung der Leuchtdichte der Streuscheibe in Abhängigkeit der Beleuchtungsstärke an den Sensoren für mehrere maximale Helligkeitsniveaus des *Antiblendlichtes*

6.2.3.2. Spektrale Parameter

Mithilfe des Spektrometers *Specbos* werden spektrale Parameter des *Antiblendlichtes* bestimmt. Dazu zählen der Farbort, die Farbtemperatur, die spektrale Strahldichte und die dominante Wellenlänge. Der Farbort gibt hier die Lage der vom menschlichen Auge empfundenen Farbe im CIE-Farbdreieck in xy -Koordinaten an. Das *Antiblendlicht* hat die Farbkoordinaten $x = 0,2724$ und $y = 0,267$ und wird daher, wie in **Abb. 6.12** erkennbar ist, als ein bläuliches Weiß empfunden.

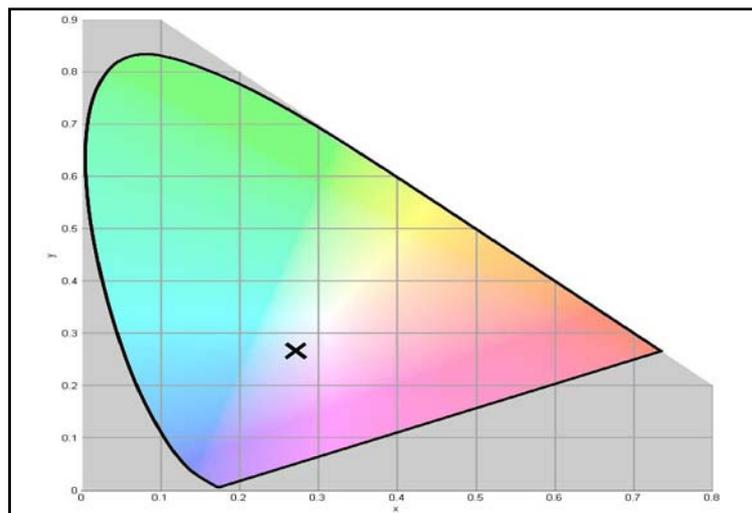


Abbildung 6.12

Oben ist eine Farbaufnahme des *Antiblendlichtes* zu erkennen, die logarithmisch aufgehellt wurde; am oberen Rand sind die einzelnen LEDs als Lichtquellen erkennbar; das untere Bild zeigt das CIE-Farbdreieck; der farbige Bereich stellt die vom menschlichen Auge wahrnehmbaren Farbnuancen dar; die Markierung stellt den Farbort des *Antiblendlichtes* dar

Die Farbtemperatur ist die Temperatur eines schwarzen Strahlers, dessen Farbeindruck der Farbe am ähnlichsten ist. Sie wird in Kelvin [K] angegeben und beträgt beim *Antiblendlicht* 13248 K.

Die dominante Wellenlänge ist definiert als die farbtongleiche Wellenlänge, die das menschliche Auge empfindet. Sie beträgt beim *Antiblendlicht* 475 nm, was die bläuliche Farbwirkung des Lichtes erklärt.

Die spektrale Strahldichte beschreibt den Betrag der Abstrahlung in Abhängigkeit der Wellenlänge. An der Kurve in **Abb. 6.13** ist die Art und Weise zu erkennen, wie die Farbe Weiß im *Antiblendlicht* erzeugt wird. Eine relativ schmalbandige Spitze in der Strahldichte im Bereich von 440 – 470 nm weist auf blaue LEDs als Strahlungsquelle hin. Ein zweites, deutlich breitbandigeres Maximum im Bereich zwischen 500 – 600 nm weist darauf hin, dass ein Phosphor verwendet wird, dessen Emissionsspektrum

im gelben Farbbereich liegt. Der Phosphor wird von den blauen LEDs zur Emission angeregt und dessen gelbe Farbe ergibt in Kombination mit der blauen Farbe den resultierenden Farbeindruck eines bläulichen Weiß. Die gemessenen Werte der spektralen Strahldichte sind in **Anhang G.2** zu finden.

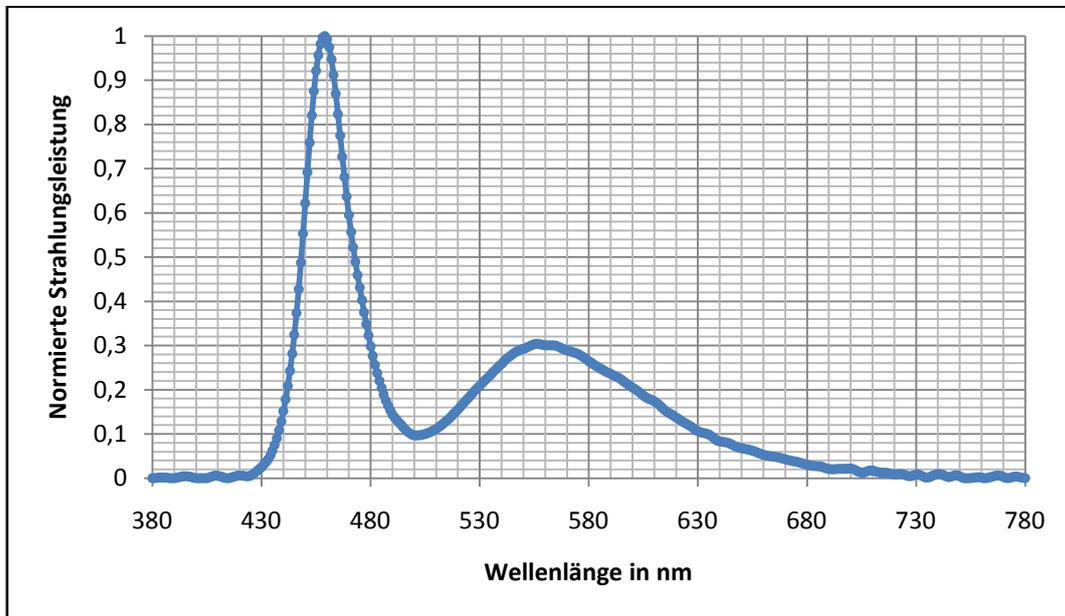


Abbildung 6.13

Spektrale Strahldichte des *Antiblendlichtes*; erkennbar ist ein Hauptmaximum im blauen und ein Nebenmaximum im gelben Farbbereich

6.2.3.3. Winkelabhängigkeit der Bewertung der Beleuchtungsstärke

Eine konstante Beleuchtungsstärke von 5 lx wird den Sensoren des *Antiblendlichtes* in einem horizontalen Winkel von 0 bis 70° dargeboten und die resultierende Leuchtdichte der Streuscheibe gemessen. Auf eine Messung im Bereich von 0 bis 70° kann verzichtet werden, da man hier aufgrund der Achsensymmetrie zur Normalen der Sensorebene von einem vergleichbaren Muster der Messwerte ausgehen kann. Der Winkelbereich von 70° bis 90° spielt im Straßenverkehr nur eine vernachlässigbare Rolle, da dieser bei der Begegnung zweier Autos sehr schnell durchfahren wird. **Abb. 6.14** zeigt ein Maximum in der Bewertung bei kleinen Winkeln (<5°) und einen Abfall hin zu größeren Winkeln. Unter einem Winkel von 70° beispielweise reagiert der Regelmechanismus des *Antiblendlichtes* nur noch mit einer Leuchtdichte von 10% des Maximalwertes. Die gemessenen Leuchtdichtewerte in Abhängigkeit des horizontalen Winkels zur Lichtquelle zeigt **Anhang G.3**.

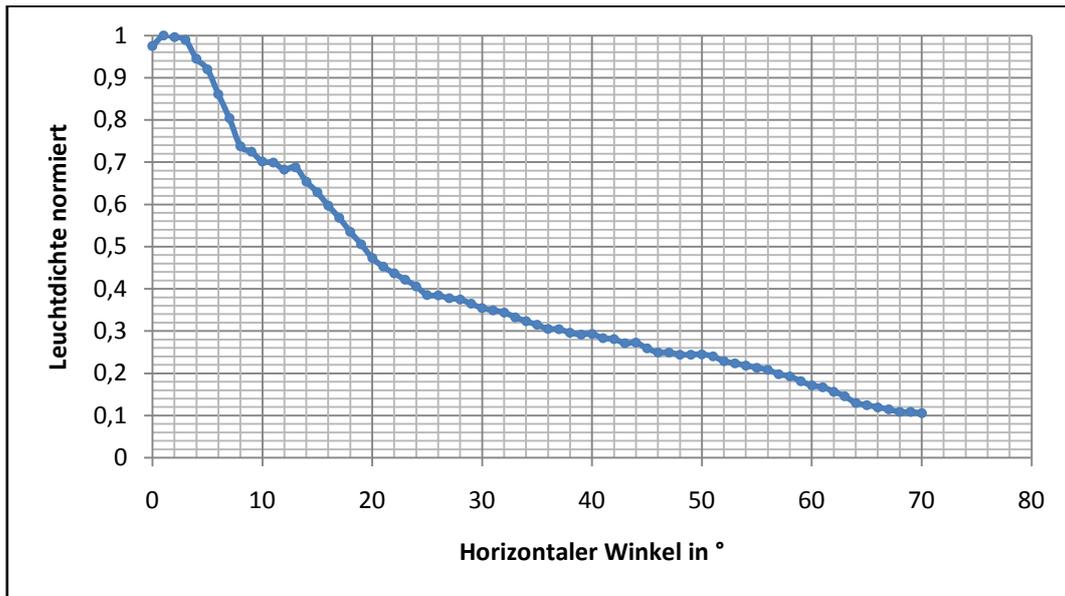


Abbildung 6.14

Abhängigkeit der Leuchtdichte vom horizontalen Winkel zur Lichtquelle; das *Antiblendlicht* befindet sich für diesen Versuch auf dem niedrigsten Grundniveau

Vergleicht man die beiden Kurven in **Abb. 6.9** und **Abb. 6.10**, so erkennt man, dass die Schleierleuchtdichte zu den kleineren horizontalen Winkeln hin abnimmt. Einen ähnlichen Verlauf zeigt die Kurve der Leuchtdichte des *Antiblendlichtes* in Abhängigkeit des horizontalen Winkels.

In **Abb. 6.15** ist das Produkt der beiden Kurven normiert dargestellt. Dieses wird als Kriterium zur Bestimmung der kritischen Entfernung bezüglich der Blendung des Fahrzeugführers herangezogen. Das Maximum liegt bei einem horizontalen Winkel von 12° , was einem Abstand zum entgegenkommenden Fahrzeug von 15 m entspricht. Es wird angenommen, dass das *Antiblendlicht* in diesem Punkt auf eine hohe Leuchtdichte regelt, obwohl die Schleierleuchtdichte hier nicht maximal ist. Hier wird eine verstärkte Blendung durch das *Antiblendlicht* angenommen, weshalb in Hauptversuch zusätzlich zum Punkt in 50 m Entfernung das Szenario „mit Blendung in 15 m“ aufgenommen wird.

6.2.3.4. Relative Position zum Fahrerauge und Neigungswinkel zur Fahrbahn

Für die Reproduzierbarkeit des Versuches ist die Kenntnis der relativen Lage des *Antiblendlichtes* zur Fahrbahn und zum Auge des Fahrzeugführers unabdingbar. Der Winkel zwischen der Horizontalen und der Verbindungsstrecke Auge-*Antiblendlicht* wird mit α bezeichnet. Er wird exemplarisch für zehn Probanden im Versuch bestimmt und beträgt näherungsweise $23,0^\circ$. Der Neigungswinkel des *Antiblendlichtes* gegen die Horizontale wird mit β bezeichnet und beträgt näherungsweise $18,4^\circ$. In **Abb. 6.16** werden die Zusammenhänge zwischen den

Winkeln veranschaulicht. Die Ergebnisse der Messungen sind im **Anhang G.4** zu finden.

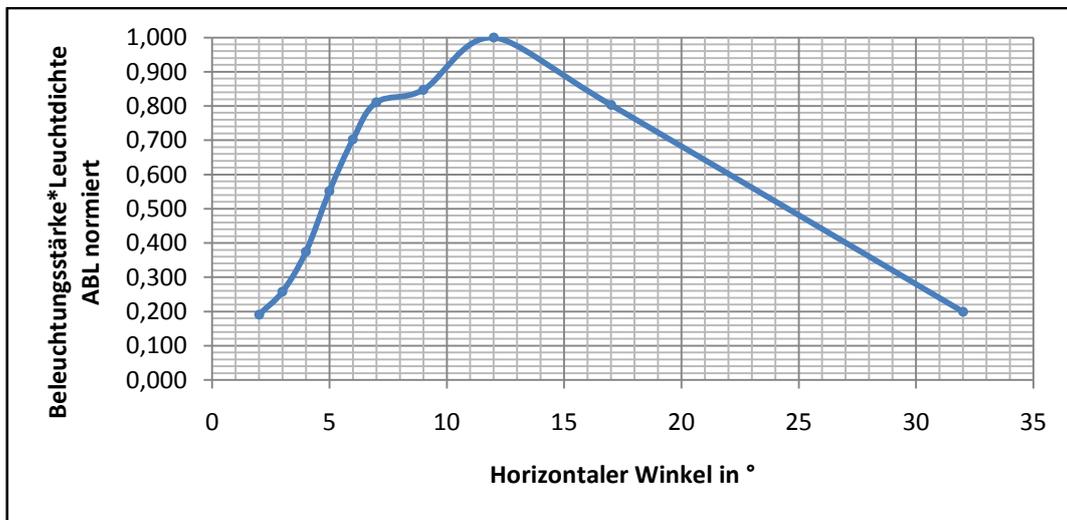


Abbildung 6.15

Produkt aus gemessener Beleuchtungsstärke und Leuchtdichte des Antiblendlichtes; das Maximum wird als kritisch bezüglich der Blendung des Fahrers angenommen und im Hauptversuch als Szenario verwendet

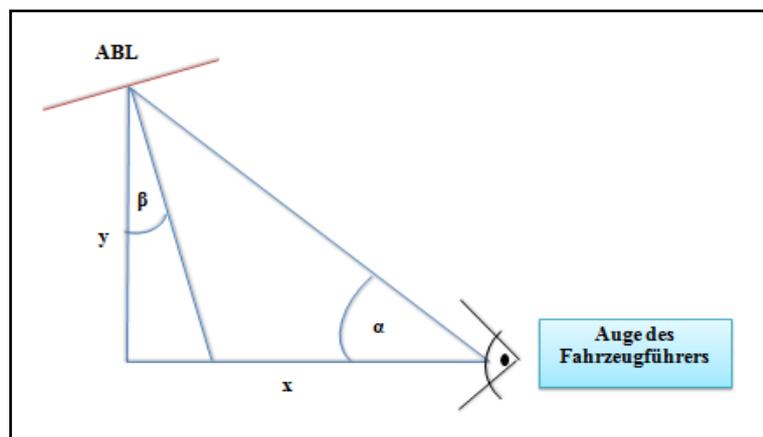


Abbildung 6.16

Zusammenhang zwischen den Winkeln α und β ; $\alpha = 23^\circ$, $\beta = 18,4^\circ$

6.2.4. Vermessung der Kontrast-Kennlinie des LCD-TV

Für den Hauptversuch ist es unabdinglich zu wissen, welche Graustufe auf dem Bildschirm des LCD-TV welchen Kontrast nach Weber erzeugt. **Abb. 6.17** zeigt die Kennlinie des Kontrastes über 256 Graustufen von 0 bis 255. Der darstellbare Kontrast bewegt sich im Bereich zwischen 0 und 25. Die Kurve deutet auf einen nichtlinearen Zusammenhang zwischen gewählter Graustufe und dem Kontrast des

Landoltrings auf dem Bildschirm hin. Zur Auswertung des Schwellenkontrastes im Hauptversuch ist daher die im **Anhang H** abgebildete Umrechnungstabelle notwendig.

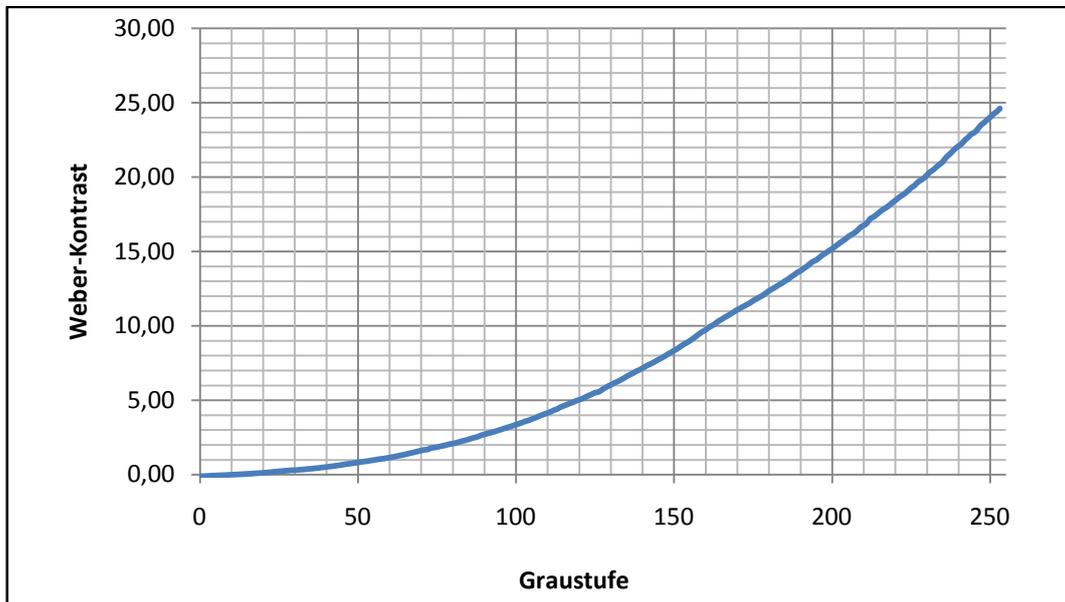


Abbildung 6.17

Kennlinie des Weber-Kontrastes in Abhängigkeit der Graustufe

7. Hauptversuch

7.1. Durchführung

7.1.1. Auswahl des Versuchsgeländes

Der Hauptversuch bestimmt den Einfluss des *Antiblendlichtes* auf das Kontrastsehen im nächtlichen Straßenverkehr. Die Situation auf einer Landstraße wird aufgrund der geringen Spurbreite als das kritische Szenario bezüglich der Blendung durch den Gegenverkehr erachtet. Für den Versuch wird sonach ein Gelände benötigt, das den Bedingungen auf einer Landstraße möglichst gleicht. Ein Beschickungshof der Neuen Messe in Karlsruhe kann diese Bedingungen aus den folgenden Gründen gut erfüllen. Zum einen entspricht der Belag des Hofes dem Asphalt normaler Verkehrsstraßen und zum anderen ist der Hof nach allen Seiten hin vom Umfeld durch Gebäude von störendem Streulicht abgeschirmt. Ein dritter Punkt, der für dieses Versuchsgelände spricht, ist die Abwesenheit von Verkehr jeglicher Art, wodurch die Versuche ungestört und zügig durchgeführt werden können.



Abbildung 7.1

Beschickungshof der Neuen Messe in Karlsruhe

7.1.2. Auswahl der Probanden

Die Sehschärfe und das Kontrastsehen nehmen mit zunehmendem Alter ab, da aufgrund der Trübung der Augenlinse vermehrt Streulicht im Augeninneren auftritt. Hier ist die Gefahr, die aus einer Blendung durch den Gegenverkehr resultiert, am größten. Das *Antiblendlicht* wurde aus diesem Grund speziell für Fahrzeugführer mittleren und höheren Alters entwickelt.

Für diesen Versuch werden Probanden zwischen 40-60 Jahren ausgewählt. Das Blickverhalten eines Fahrers, speziell die Fixation eines Objektes im Vorfeld des Fahrzeuges, ist von seiner Fahrerfahrung abhängig. Deshalb müssen die Probanden bereits über mehrere Jahre Fahrerfahrung verfügen. Im Vorfeld des Hauptversuches

werden die Probanden einer optometrischen Untersuchung mittels des optometrischen Vermessungsgerätes *Rodatest* unterzogen. Hierbei werden folgende Parameter überprüft:

- Das Kontrastsehen bei den Stufen 40%, 10% und 5% bei einem festen Visus von 0,16
- Den Einfluss einer Blendlichtquelle im Gesichtsfeld auf das Kontrastsehen bei gleichen Stufen und Visus
- Die Sehschärfe sowohl monokular links und rechts als auch binokular
- Vorhandensein von Stereosehen
- Die Phorie, d.h. die Stellung der beiden Augen zueinander
- Eventuelle Farbsinnstörungen wie Rot-Grün-Blindheit (Dyschromatopsie)

Die verwendeten Prüfbögen sind im **Anhang B** zu finden, die Ergebnisse der Voruntersuchungen im **Anhang K**.

Der für diesen Versuch nötige Visus ergibt sich aus den folgenden geometrischen Überlegungen. Die Höhe der Öffnung des Ringes beträgt 10,2 cm, der Abstand zwischen dem Auge des Fahrzeugführers und dem Bildschirm ca. 27 m. Damit ergibt sich der Winkel, den die Öffnung des Landoltrings im Auge einnimmt, zu $0,216^\circ$. Durch die Multiplikation mit 60 erfolgt die Umrechnung in Winkelminuten und nach **Abs. 3.1.1.3** beträgt der minimal notwendige Visus unter photopischen Bedingungen damit 0,08. Die Versuche finden unter mesopischen Bedingungen statt, wodurch sich die Anforderungen an die Sehschärfe verändern können. Zur Gewährleistung einer sicheren Erkennung und um die visuelle Leistungsfähigkeit der Probanden vergleichen zu können, wird ein Visus in Höhe von $\geq 1,0$ vorausgesetzt.

7.1.3. Gesamtkonzept

Die Intention des Hauptversuches ist der Paarvergleich „ohne *Antiblendlicht* – mit *Antiblendlicht*“ hinsichtlich des Schwellenkontrastes des Fahrzeugführers. Dieser wird anhand einer Abfolge von Landoltringen auf einem LCD-TV bestimmt. Die Messungen werden in drei verschiedenen Situationen durchgeführt – jeweils mit und ohne das *Antiblendlicht*. Zwei Situationen kennzeichnen sich durch eine Blendung durch den Gegenverkehr in einer Entfernung von 15 m und 50 m (vgl. **Abs. 6.2**), während in der dritten auf eine Blendung verzichtet wird. In **Abb. 7.2** ist der prinzipielle Aufbau des Versuches skizziert.

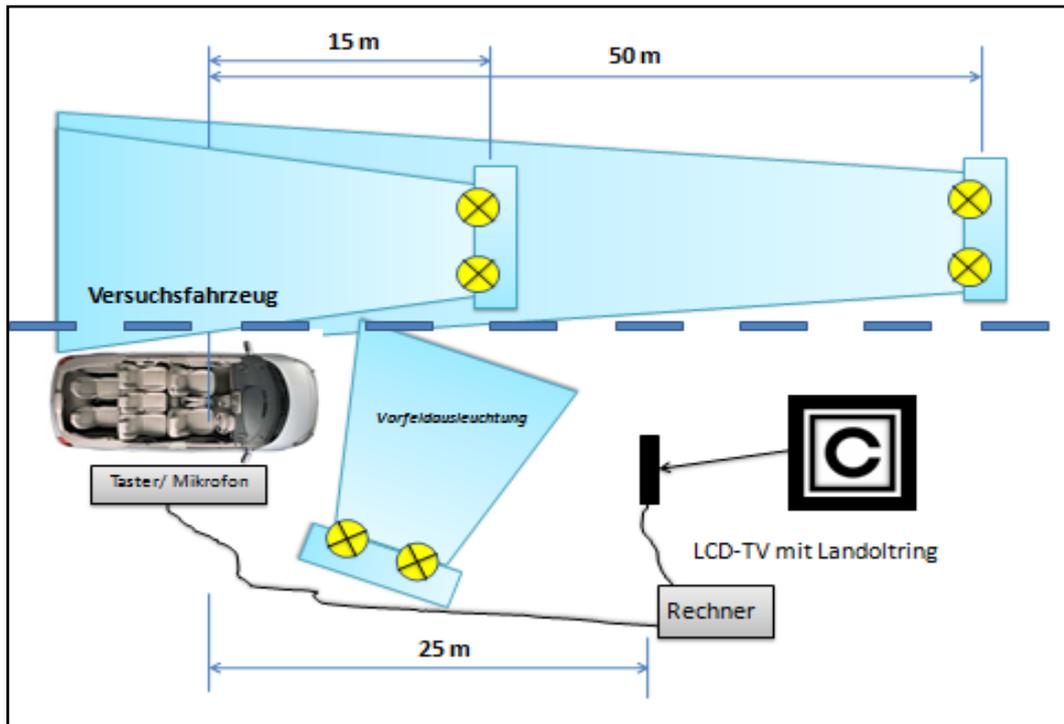


Abbildung 7.2

Prinzipische Skizze des Hauptversuches

Das Versuchsfahrzeug dient als Ausgangspunkt für die Anordnung der übrigen Aufbauten. Der LCD-TV wird in einer Entfernung von 27 m, gemessen ab dem Fahrersitz, in Sichthöhe des Fahrers auf einem Tisch aufgestellt. An derselben Position befindet sich auch der Messrechner.

Im Inneren des Fahrzeuges ist an der Decke das Mikrofon installiert, das die Aussagen der Probanden aufnimmt. Es ist über ein Mikrofonkabel direkt mit dem Rechner verbunden.

Die Software Schweko, die sich auf dem Rechner befindet, lässt sich nur per Mausclick bedienen. Zu diesem Zweck bekommt der Proband einen Taster, mit dem er die Erkennung der Öffnung bestätigt und die Bildfolge unterbricht.



Abbildung 7.3

Bild des Fahrzeuginneren mit dem an der Sonnenblende angebrachten *Antiblendlicht* und dem an der Fahrzeugdecke befestigten Mikrophon; die Halterung des Mikrofons verfügt über ein Kugelgelenk, das eine Anpassung an den jeweiligen Probanden erlaubt.



Abbildung 7.4

Metallbox, in deren Inneren sich die Platine einer herkömmlichen Computermouse befindet; der Taster in der Mitte des Bildes fungiert als linke Maustaste und wird von den Probanden zur Steuerung der Software Schweko verwendet

Die Ausleuchtung des Bereiches vor dem Fahrzeug (Vorfeld) bestimmt maßgeblich das Adaptationsniveau des Fahrzeugführers. Hierfür können die Xenon-Scheinwerfer des Versuchsfahrzeuges genutzt werden, da diese inakzeptable Reflexionen auf dem LCD-TV hervorrufen. In **Abb. 7.5** ist gut zu erkennen, dass der Bildschirm inhomogen von den Scheinwerfern des Autos angestrahlt wird. Der Gradient in der Leuchtdichte des LCD-TV beeinflusst aber die Erkennungswahrscheinlichkeit der Öffnungen der Landoltringe, da die Öffnung in den Bereichen mit einer höheren Leuchtdichte später erkannt wird als in den Bereichen einer niedrigeren Leuchtdichte. Durch die Simulierung der Vorfeldausleuchtung mittels eines

Scheinwerferracks können die negativen Auswirkungen auf das Messergebnis beseitigt werden.

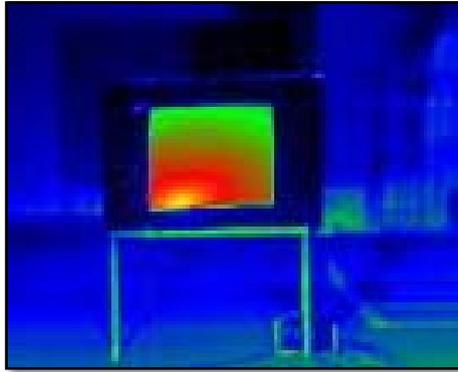


Abbildung 7.5

Leuchtdichtebild des LCD-TV bei eingeschalteten Fahrzeugscheinwerfern; die Inhomogenitäten in der Bestrahlung sind deutlich am Leuchtdichtegradienten zu erkennen.

Zur Erzeugung der Vorfeldausleuchtung werden separate Scheinwerfermodule eingesetzt. Hierfür werden vier Module derselben Art wie die Blendungsscheinwerfer verwendet. Um die Fahrzeugscheinwerfer übertragbar zu simulieren, wird deren Leuchtdichteverteilung mit der Leuchtdichtekamera aufgenommen. Anhand der Verteilung werden anschließend die Module des Racks ausgerichtet. Die Aufnahmen zu dieser Justierung sind im **Anhang C** zu finden. Um zu vermeiden, dass der Proband durch das Licht der Scheinwerfermodule irritiert oder abgelenkt wird, wird ein schwarzer Shutter direkt daneben platziert.



Abbildung 7.6

Scheinwerferrack mit vier Halogen-Projektionssystemen zur Erzeugung der Vorfeldausleuchtung; erkennbar ist auch die schwarze Trennwand zur Abschirmung des Lichtes zum Fahrzeug hin

7.1.4. Versuchsablauf

Ein Versuch beginnt mit der Überprüfung des Probanden auf seine optometrische Eignung (vgl. **Abs. 7.1.2**). Dies geschieht in einem abgetrennten Raum, um Störeinflüsse durch das Licht der Versuchsscheinwerfer oder sonstiger Lichtquellen zu reduzieren. Ist der Proband geeignet, wird der eigentliche Versuch durchgeführt. Der Proband befindet sich auf dem Fahrersitz des Versuchsfahrzeuges. Das Programm *Schweko* wird gestartet und auf dem LCD-TV werden die Landoltringe mit zunehmendem Kontrast dargeboten. Jede Kontraststufe ist 1,75 Sekunden auf dem Bildschirm zu sehen. Der Proband stoppt den Ablauf der Software, indem er einmal den Taster der Box drückt. Im Anschluss hat er fünf Sekunden Zeit, die Orientierung der Öffnung des Ringes anzugeben, indem er in das Mikrofon spricht. Auf dem Rechner speichert die Software diese Audioaufnahme zusammen mit der Bezeichnung des aktuellen Bildes und dem Namen des Probanden im Ausgabeordner. Es finden zuerst drei Durchgänge ohne und anschließend drei mit eingeschaltetem *Antiblendlicht* statt. Im zweiten und dritten Szenario werden zwei Blendsituationen durch die Scheinwerferracks realisiert. Hierbei finden ebenfalls jeweils sechs Durchgänge statt. Um mögliche Auswirkungen der Reihenfolge auszuschließen, wird die Abfolge der Szenarien von Versuch zu Versuch variiert. Im Anschluss an die Messungen im Versuchsfahrzeug füllt der Proband einen Fragebogen aus.

7.1.5. Erstellung des Fragebogens

Die Erstellung des Fragebogens hat die Intention, die Akzeptanz des *Antiblendlichtes* durch die Probanden zu bestimmen und eine subjektive Bewertung dessen Einsatz im Fahrzeug zu erhalten. Weiterhin werden Informationen gesammelt, die zur Erstellung eines Fahrprofils der Probanden genutzt werden können.

Nach [MOO08] sind bei der Erstellung von Fragebögen folgende Kriterien zu beachten.

- Der Testleiter soll keinen Einfluss auf die Bearbeitung des Fragebogens durch den Probanden nehmen.
- Der Fragebogen darf nicht zu zeitaufwendig oder zu anspruchsvoll sein.
- Die Sprache muss klar und deutlich sein und kein allzu hohes Sprachniveau voraussetzen.
- Es sind möglichst keine Fachbegriffe und Abkürzungen verwenden.
- Die Eindeutigkeit der Fragestellung muss gegeben sein, d.h. es darf kein Spielraum zu verschiedenen Interpretationen bestehen.

- Es sollen mehrere Fragen gestellt werden, die dieselbe Intention haben, um die Redundanz der Ergebnisse zu erhöhen.

Für diesen Fragebogen werden Stufenantworten-Typen ähnlich der DeBoer-Skala verwendet. [MOO08] postuliert, dass mehr als sieben Stufen unnötig sind, da der Proband seine Antworten nicht so fein unterteilen kann. Aus diesem Grund stehen für jede Frage sieben Antwortstufen zur Verfügung, die mit Zahlen und mit Sprachelementen versehen sind. Die Verwendung von Zahlen erweckt bei den Probanden einen Eindruck von höherer Präzision und erleichtert die anschließende Auswertung der Ergebnisse. Weiterhin erleichtert die doppelte Kennzeichnung dem Probanden die Auswahl seiner Antwort. In **Abb. 7.7** wird exemplarisch eine solche Antwortabstufung gezeigt.

Fühlten Sie sich durch das Antiblendlicht geblendet?							
<i>nein</i>		<i>etwas</i>		<i>deutlich</i>		<i>stark</i>	<i>unerträglich</i>
1	2	3	4	5	6	7	
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Abbildung 7.7

Einteilung der Antworten in Stufen von 1-7, die zusätzlich noch mit Sprachelementen gekennzeichnet sind

Auf eine neutrale Mittelkategorie wird verzichtet, da diese von Probanden häufig ausgefüllt wird, um eine Tendenz zu vermeiden oder um die Bearbeitungszeit abzukürzen. Bei ausgewählten Fragen wird stattdessen die Antwortmöglichkeit „*keine Aussage möglich*“ verwendet.

Im ersten Teil des Fragebogens macht der Proband persönliche Angaben wie das Alter, sein Geschlecht und seine Fahrerfahrung.

Der zweite Teil behandelt die Situation im Hauptversuch „ohne Blendung durch den Gegenverkehr“. Die Fragen zielen hier auf die Wirkung des *Antiblendlichtes* auf den Probanden ab, speziell hinsichtlich einer möglichen Ablenkung von der eigentlichen Sehaufgabe.

Im dritten Teil werden dem Probanden Fragen zu den beiden Situationen „mit Blendung in 15m und 50m Entfernung“ gestellt. Die Intention dieser Fragen ist es, den subjektiv wahrgenommenen Einfluss des *Antiblendlichtes* in einer Blendsituation zu bestimmen.

Der vierte Teil beinhaltet einige allgemeine Fragen zum *Antiblendlicht* und im letzten Teil wird nach dem Eindruck gefragt, den der Ablauf des gesamten Versuches auf den Probanden gemacht hat. Der komplette Fragebogen ist im **Anhang D** zu finden.

7.2. Ergebnisse

7.2.1. Schwellenkontrast

Die im Hauptversuch für jeden Probanden ermittelten Werte für den Schwellenkontrast befinden sich in **Anhang I**. Die Daten sind in die sechs verschiedenen Szenarien aufgeteilt:

- Ohne Blendung, ohne *Antiblendlicht*
- Ohne Blendung, mit *Antiblendlicht*

- Mit Blendung in 15 m, ohne *Antiblendlicht*
- Mit Blendung in 15 m, mit *Antiblendlicht*

- Mit Blendung in 50 m, ohne *Antiblendlicht*
- Mit Blendung in 50 m, mit *Antiblendlicht*

In **Abb. 7.8** sind die arithmetischen Mittelwerte der sechs Szenarien dargestellt. Der arithmetische Mittelwert genügt nicht, um eine verlässliche Aussage darüber zu machen, ob sich der Einsatz des *Antiblendlichtes* den Schwellenkontrast des Fahrzeugführers signifikant beeinflusst. Hierzu werden die im weiteren Verlauf des Kapitels beschriebenen statistischen Tests benötigt.

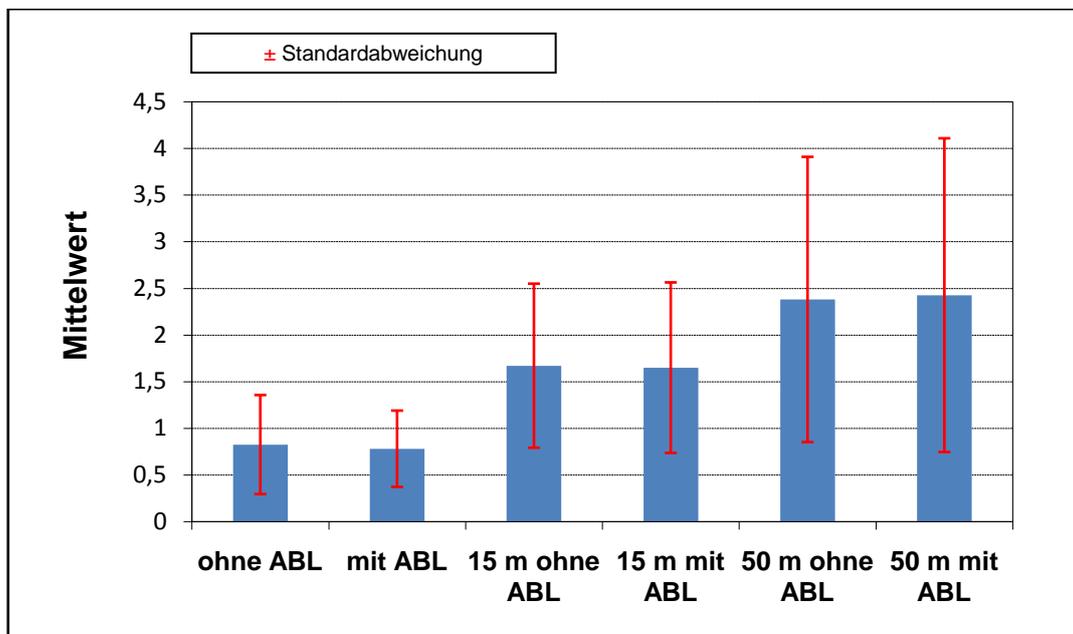


Abbildung 7.8

Schwellenkontraste und der jeweilige Standardfehler für die sechs verschiedenen Szenarien: ohne Blendung, Blendung in 15 m und Blendung in 50 m Entfernung – jeweils mit und ohne *Antiblendlicht*

Eine andere Art der Darstellung der Kontrastergebnisse sind die *Box-Whisker-Plots*. Die arithmetischen Mittelwerte werden durch die kurzen Striche innerhalb des Rechteckes repräsentiert, während der obere und untere Rand den 75- bzw. 25-Perzentilen entsprechen. *75-Perzentil* bedeutet, dass sich 75 % der Messwerte unterhalb dieser Niveaulinie befinden. Innerhalb des Rechteckes, der sogenannten *Box*, sind demnach 50 % der Messwerte. Die nach oben und unten über die Box hinausgehenden Strecken sind die sogenannten *Whiskers*, deren oberes Ende das *95-Perzentil* und das untere Ende das *5-Perzentil* ist. Die beiden Plus-Zeichen markieren den größten und den kleinsten Messwert. In **Anhang I.3** sind weitere Ergebnisse zur deskriptiven Statistik dargestellt.

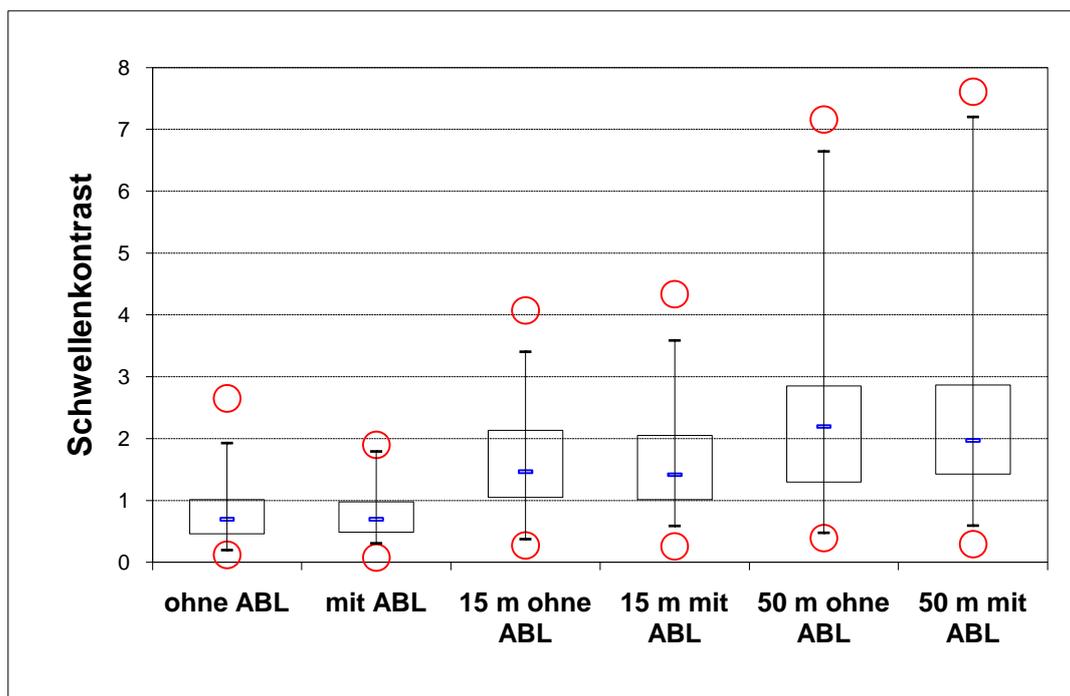


Abbildung 7.9

Box-Whisker Plot der Schwellenkontraste für die sechs Szenarien

7.2.2. Test auf Normalverteilung

Im vorliegenden Fall handelt es sich bei den Schwellenkontrastwerten um paarweise verbundene Stichproben. Dies rührt daher, dass derselbe Proband jedes Szenario unter zwei verschiedenen Bedingungen durchführt, nämlich einmal ohne und einmal mit *Antiblenlicht*. Die Hypothese, die für diesen Versuch überprüft werden muss, lautet: „Es besteht ein signifikanter Unterschied zwischen den Werten ohne und mit *Antiblenlicht*“. Zur statistischen Überprüfung dieser Hypothese steht die Software *Winstat*, ein Add-on für *Microsoft Excel*, zur Verfügung.

Voraussetzung für die Anwendung von statistischen Tests, die nicht parameterfrei sind, ist die Normalverteilung der Messwerte.

Die Zufallsvariable, der Schwellenkontrast, kann 256 verschiedene Werte annehmen, weshalb sie als kontinuierliche Variable angesehen werden kann. Zur Überprüfung, ob eine Normalverteilung angenommen werden kann, wird der *Kolmogorov-Smirnov-Test* verwendet. Die Nullhypothese lautet dabei: „*Es liegt keine signifikante Abweichung von der Normalverteilung vor.*“ Der Test gibt einen D-Wert und einen P-Wert als Ergebnis aus. Der D-Wert beschreibt die maximale Distanz der tatsächlichen Einheiten zu den Werten einer Normalverteilung. Je geringer die Distanz ist, desto näher ist die Verteilung der Zufallsvariablen an der Normalverteilung. Der P-Wert gibt die Wahrscheinlichkeit an, mit der die Verteilung der Zufallsvariable als normalverteilt angesehen werden kann. Für einen Wert von $P > 0,05$ wird die Nullhypothese angenommen. **Tab. 7.1** zeigt die Ergebnisse des *Kolmogorov-Smirnov-Tests* für die sechs verschiedenen Szenarien. Alle P-Werte außer der Szenarien „mit“ und „15m ohne“ sind kleiner als 0.05, sodass nicht von normalverteilten Zufallsvariablen ausgegangen werden kann. Aus diesem Grund kann muss zur Verifikation der Hypothese der parameterfreie *Wilcoxon-Test* verwendet werden.

Szenario	N	D	P
Ohne ABL	95	0,153510021	0,02272553
Mit ABL	95	0,13814179	0,053254606
15 m ohne ABL	95	0,10884867	0,210315461
15 m mit ABL	95	0,168408238	0,009136239
50 m ohne ABL	92	0,171101002	0,009154089
50 m mit ABL	92	0,178587954	0,005654601

Tabelle 7.1

Ergebnisse des *Kolmogorov-Smirnov-Tests* zur Prüfung der Zufallsvariablen Schwellenkontrast auf das Vorliegen einer Normalverteilung; N ist die Anzahl der Messwerte, D die maximale Distanz der Zufallsvariablen zur Normalverteilung und P die Wahrscheinlichkeit, mit der die Nullhypothese angenommen werden kann

7.2.3. Wilcoxon-Test

Der Wilcoxon-Test vergleicht paarweise die Differenzen der Schwellenkontraste und weist ihnen nach ihrem Betrag einen Rang zu. Stichproben, die denselben Wert haben, werden dabei vernachlässigt. Mittels der Rangsummen für die positiven und die negativen Differenzen lässt sich ein normalverteilter z-Wert aus Standardtabellen bestimmen. Aus diesem ergibt sich schließlich die Wahrscheinlichkeit p, dass der Unterschied zwischen den beiden Messreihen „ohne und mit *Antiblendlicht*“ nur durch Zufall entstanden ist. Für einen Wert von $p > 0,05$ wird angenommen, dass

kein signifikanter Unterschied zwischen der Verwendung des *Antiblendlichtes* und ohne besteht. Die Ergebnisse des *Wilcoxon-Testes* zeigen die folgenden Tabellen.

Variable:	Ohne <i>ABL</i>	Mit <i>ABL</i>
Unterschiede	N	Rangsumme
Negativ	47	1967,5
Positiv	42	2037,5
Null	6	
	Z	P
	-0,143196002	0,886135388

Tabelle 7.2

Ergebnisse des *Wilcoxon-Testes* für das Szenario „ohne Blendung durch den Gegenverkehr“

Variable:	15 m ohne <i>ABL</i>	15 m mit <i>ABL</i>
Unterschiede	N	Rangsumme
Negativ	42	1856
Positiv	48	2239
Null	5	
	Z	P
	-0,770536402	0,44098177

Tabelle 7.3

Ergebnisse des *Wilcoxon-Testes* für das Szenario „mit Blendung durch den Gegenverkehr in 15 m Entfernung“

Variable:	50 m ohne <i>ABL</i>	50 m mit <i>ABL</i>
Unterschiede	N	Rangsumme
Negativ	43	1989,5
Positiv	45	1926,5
Null	4	
	Z	P
	-0,131066953	0,895722344

Tabelle 7.4

Ergebnisse des *Wilcoxon-Testes* für das Szenario „mit Blendung durch den Gegenverkehr in 50 m Entfernung“

Für das erste Szenario „ohne Blendung durch den Gegenverkehr“ ergibt sich ein p-Wert von 0,886. Das zweite Szenario „mit Blendung durch den Gegenverkehr in 15 m“ hat einen p-Wert von 0,441 und das dritte kommt auf einen p-Wert von 0,896. Bei allen drei Szenarien liegt der p-Wert also deutlich über der Grenze von 0,05, sodass die Hypothese, dass sich die Messwerte „mit und ohne *Antiblendlicht*“ signifikant unterscheiden, abgelehnt werden muss. Differenzen in den Messwerten sind damit zufällig bedingt.

7.2.4. Auswertung des Fragebogens

Der komplette Fragebogen ist in **Anhang D** dargestellt. Die im ersten Teil erfragten persönlichen Angaben des Probanden sind in den folgenden Schaubildern dargestellt.

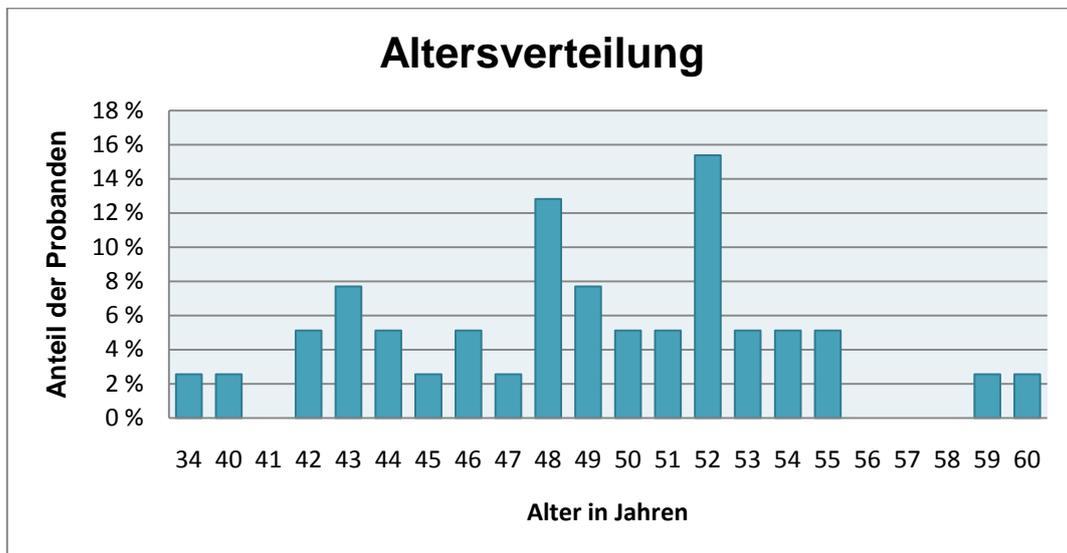


Abbildung 7.10

Altersverteilung der Probanden; der Mittelwert liegt bei 48,9 Jahren

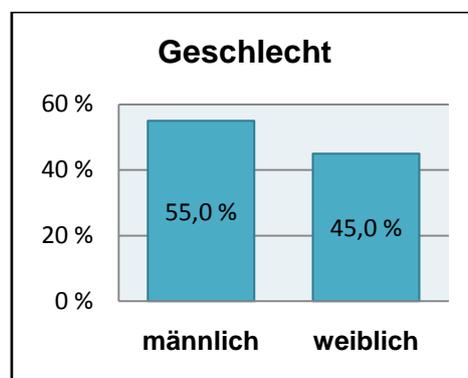


Abbildung 7.11

Anteile der männlichen und weiblichen Probanden

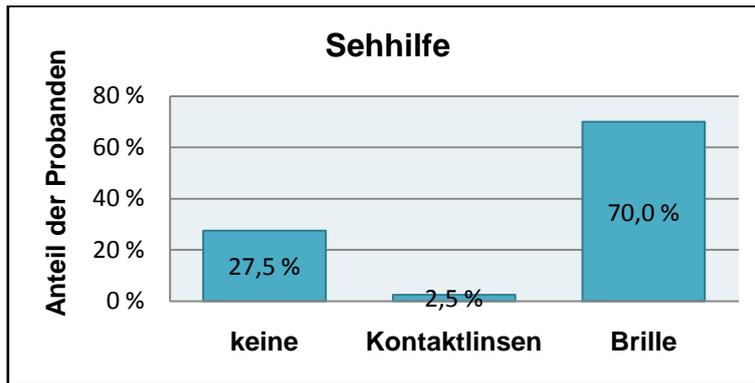


Abbildung 7.12

Sehhilfe

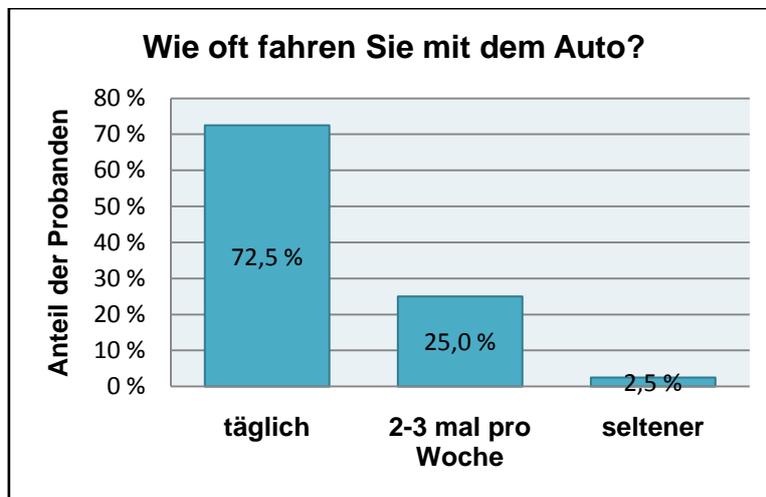


Abbildung 7.13

Fahrhäufigkeit der Probanden

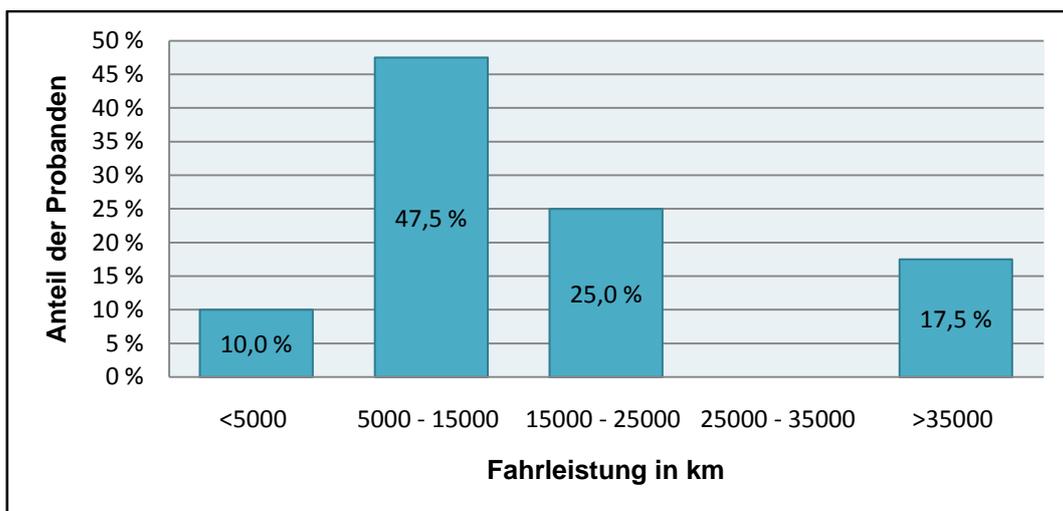


Abbildung 7.14

Jährliche Fahrleistung der Probanden

Die Frage nach einem eigenen Fahrzeug ergab, dass bis auf eine Ausnahme jeder Proband über einen eigenen PKW verfügt.

Die durchschnittliche Fahrerfahrung der Probanden liegt bei knapp 30 Jahren (29,8), was auf eine für diesen Versuch hinreichende Erfahrung im Straßenverkehr schließen lässt.

Welchen Anteil ihrer Fahrten die Probanden auf Autobahnen, Landstraßen oder innerhalb einer Ortschaft verbringen, zeigt **Abb. 7.15**. Schließlich sind in **Abb. 7.16** und **Abb. 7.17** die Anteile der Nachtfahrten im Sommer und im Winter dargestellt.

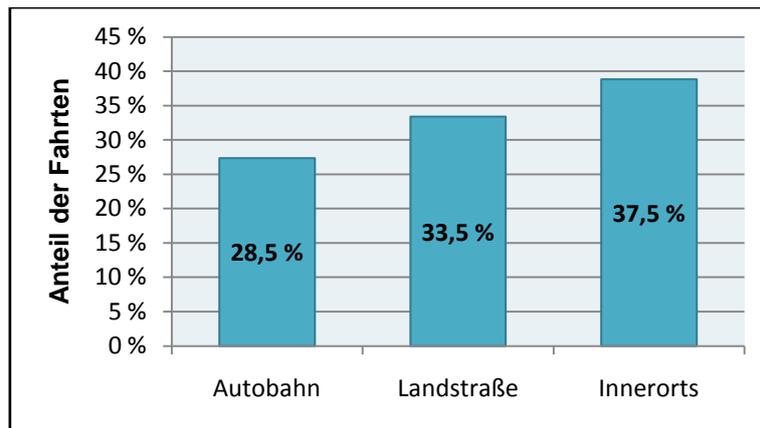


Abbildung 7.15

Verteilung der Fahrten der Probanden auf Autobahnen, Landstraßen und Innerorts

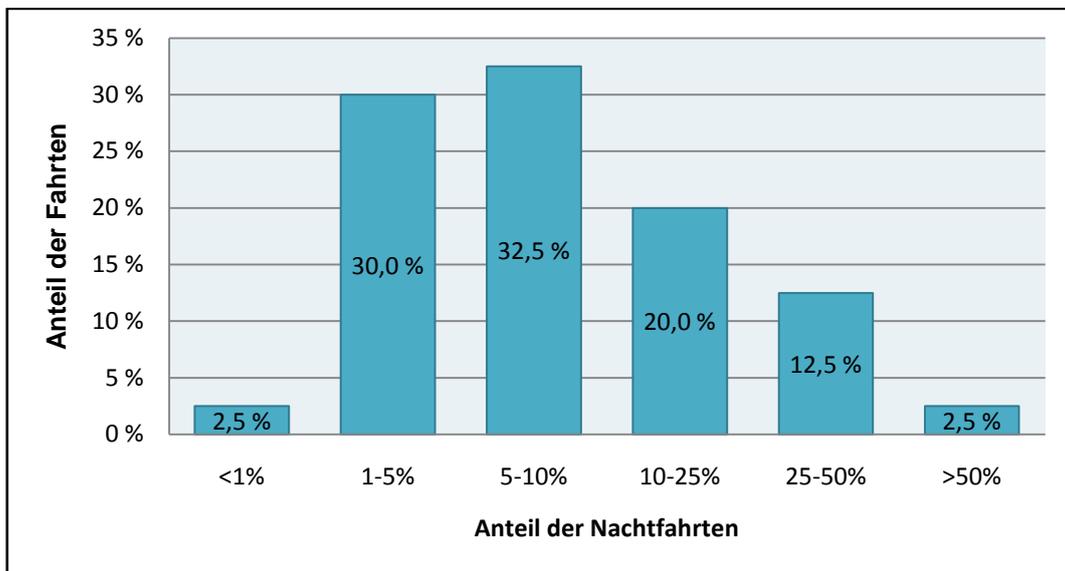
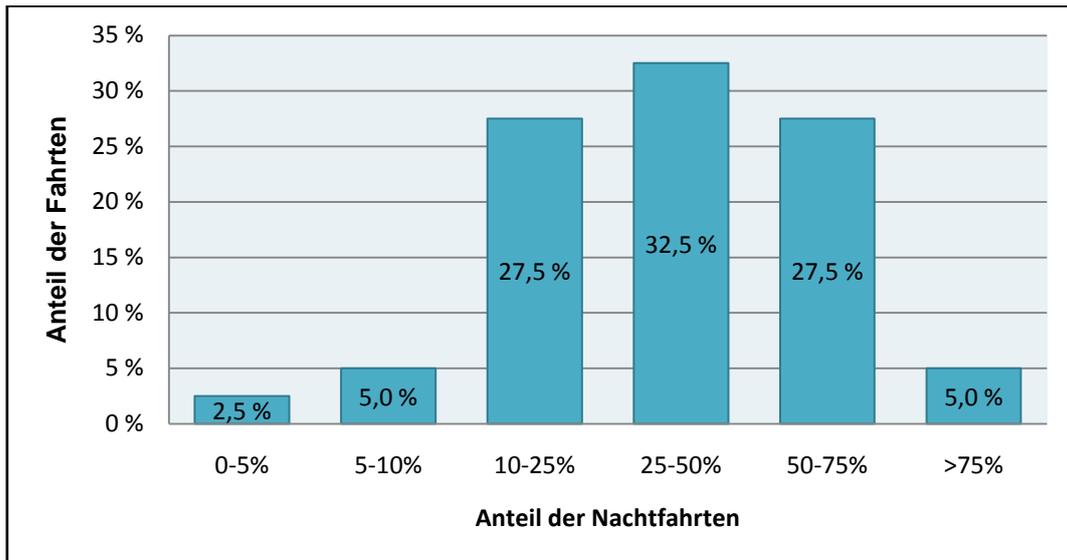


Abbildung 7.16

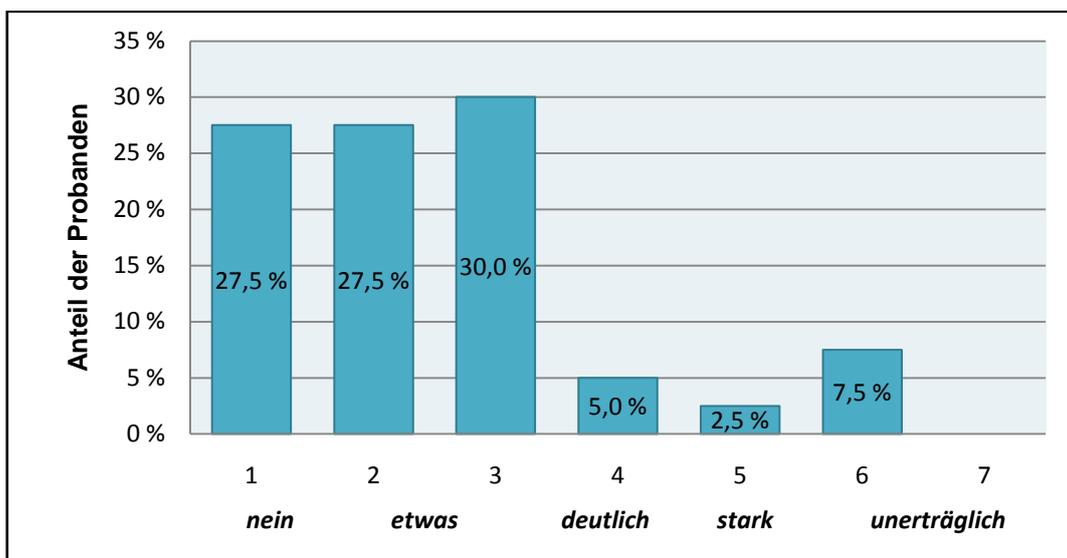
Anteil der Nachtfahrten im Sommer

**Abbildung 7.17**

Anteil der Nachtfahrten im Winter

Im Folgenden sind jeweils die Frage, die dazugehörige grafische Auswertung der Antworten und die Erläuterungen der Antwortmöglichkeiten aufgeführt. Der zweite Teil des Fragebogens thematisiert das Szenario „ohne Blendung durch den Gegenverkehr“.

➤ **Fühlten Sie sich durch das *Antiblendlicht* geblendet?**

**Abbildung 7.18**Fühlten Sie sich durch das *Antiblendlicht* geblendet? **Mittelwert: 2,5**

- Hatten Sie das Gefühl, dass sie mit dem *Antiblendlicht* mehr oder weniger von dem Sehzeichen auf dem Fernsehbildschirm wahrgenommen haben?

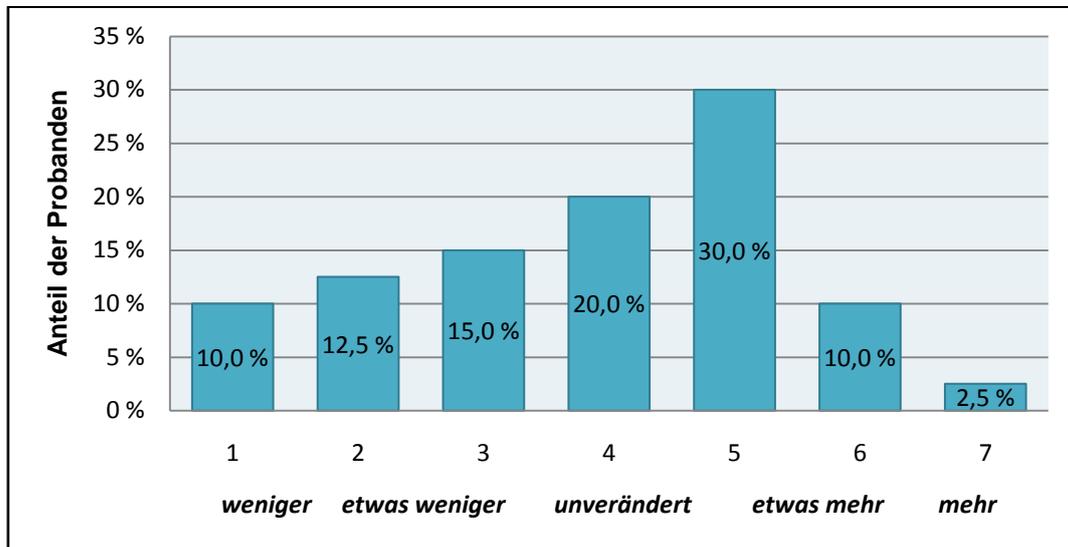


Abbildung 7.19

Hatten Sie das Gefühl, dass sie mit dem *Antiblendlicht* mehr oder weniger von dem Sehzeichen auf dem Fernsehbildschirm wahrgenommen haben? **Mittelwert: 3,9**

- Hat Sie das *Antiblendlicht* während des Versuches von Ihrer Aufgabe, das Sehzeichen auf dem Fernseher zu erkennen, abgelenkt?

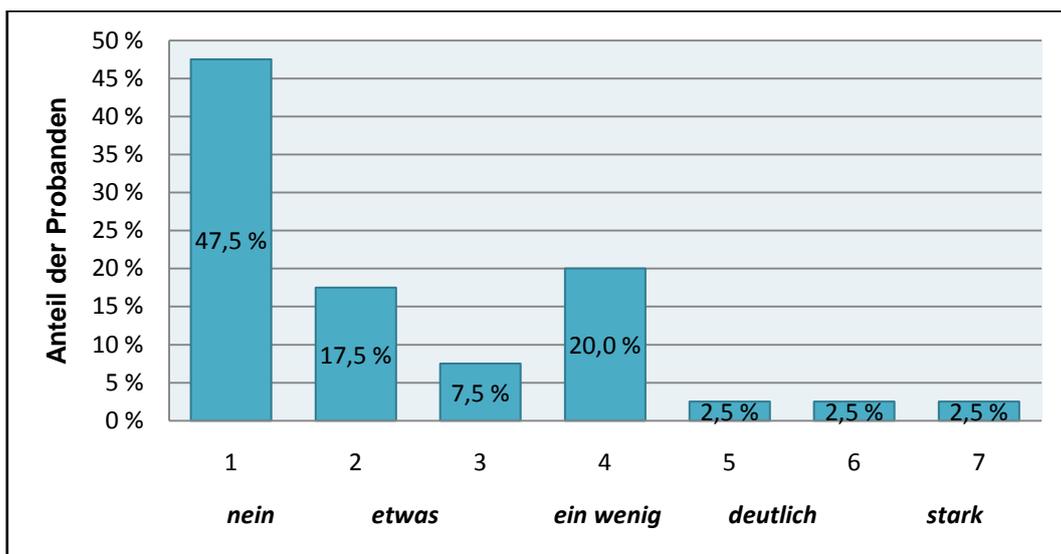


Abbildung 7.20

Hat Sie das *Antiblendlicht* während des Versuches von Ihrer Aufgabe, das Sehzeichen auf dem Fernseher zu erkennen, abgelenkt? **Mittelwert: 2,3**

- **Hatten Sie das Gefühl, dass Sie mit dem *Antiblendlicht* mehr oder weniger von der Umgebung außerhalb des Autos wahrgenommen haben?**

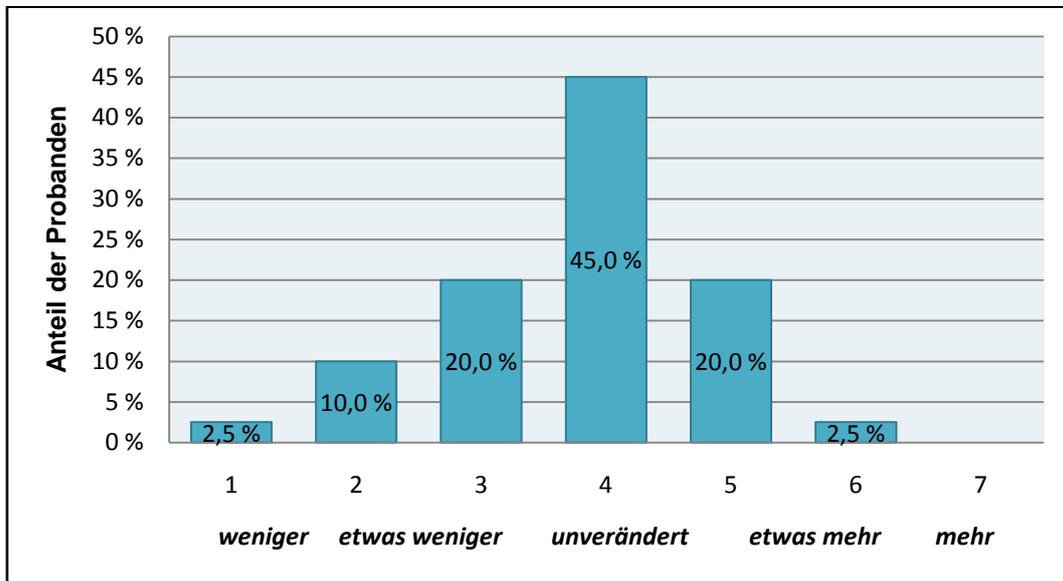


Abbildung 7.21

Hatten Sie das Gefühl, dass Sie mit dem *Antiblendlicht* mehr oder weniger von der Umgebung außerhalb des Autos wahrgenommen haben? **Mittelwert: 3,8**

- **Wie empfanden Sie das *Antiblendlicht* insgesamt?**

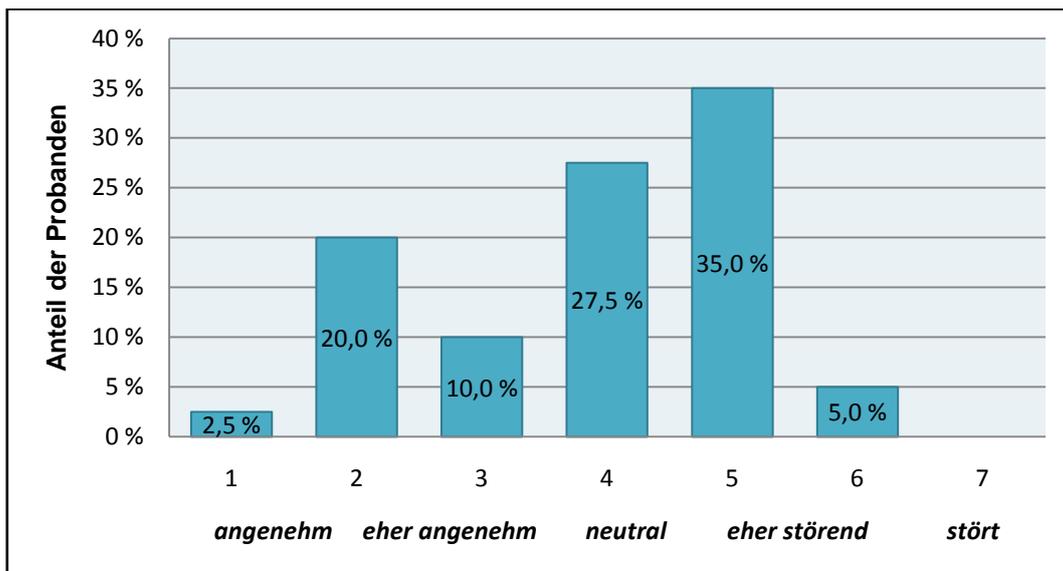


Abbildung 7.22

Wie empfanden Sie das *Antiblendlicht* insgesamt? **Mittelwert: 3,9**

Unter der Annahme, dass der Proband nach dem Versuch nicht zwischen den beiden Blendungsszenarien differenzieren kann, bezieht sich der dritte Teil des Fragebogens auf die Blendungssituation insgesamt.

- **Haben Sie sich durch das *Antiblendlicht* weniger oder stärker durch den Gegenverkehr geblendet gefühlt?**

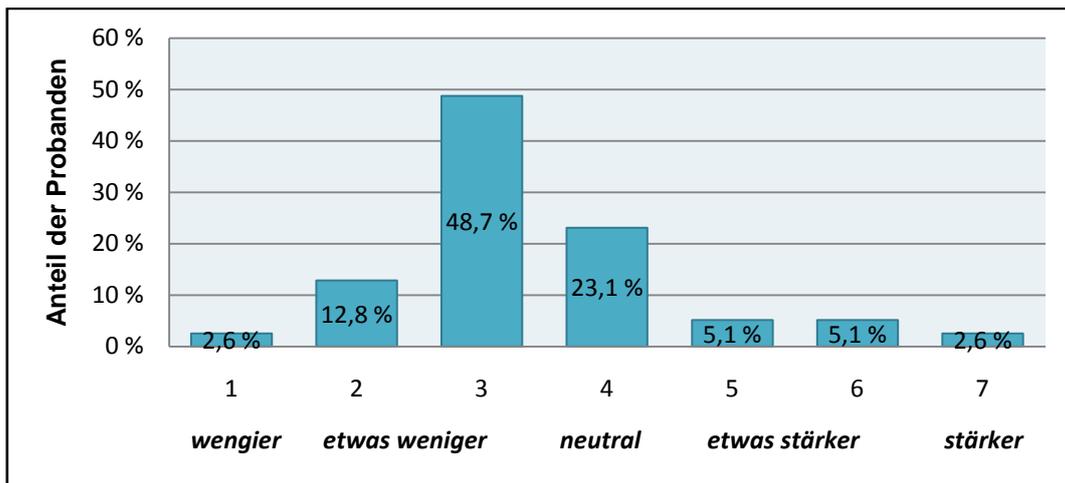


Abbildung 7.23

Haben Sie sich durch das *Antiblendlicht* weniger oder stärker durch den Gegenverkehr geblendet gefühlt? **Mittelwert: 3,4**

- **Fühlten Sie sich durch das *Antiblendlicht* geblendet?**

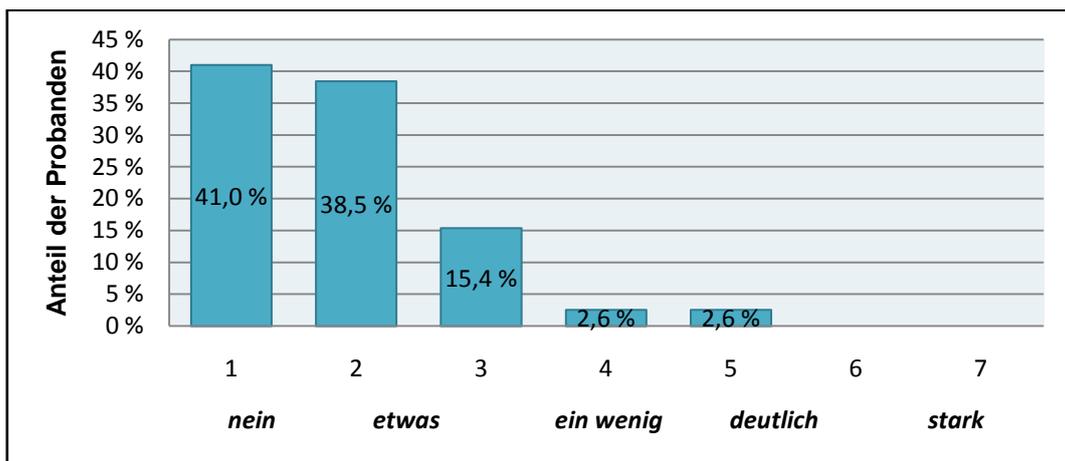


Abbildung 7.24

Fühlten Sie sich durch das *Antiblendlicht* geblendet? **Mittelwert: 1,9**

- **Hat Sie das *Antiblendlicht* während des Versuches von Ihrer Aufgabe, das Sehzeichen auf dem Fernseher zu erkennen, abgelenkt?**

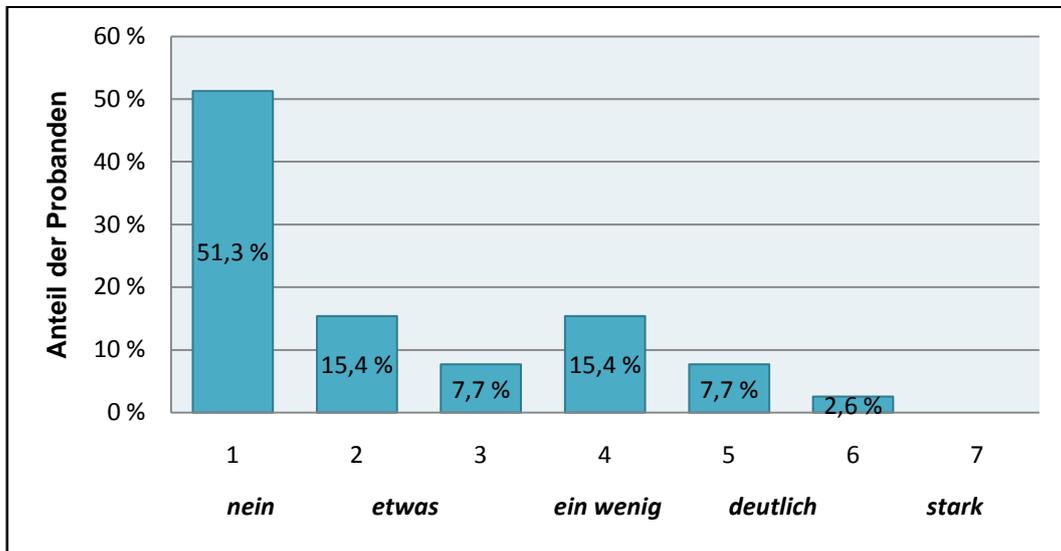


Abbildung 7.25

Hat Sie das *Antiblendlicht* während des Versuches von Ihrer Aufgabe, das Sehzeichen auf dem Fernseher zu erkennen, abgelenkt? **Mittelwert: 2,2**

- **Haben Sie sich durch den Gegenverkehr (ohne Verwendung des *Antiblendlichtes*) geblendet gefühlt?**

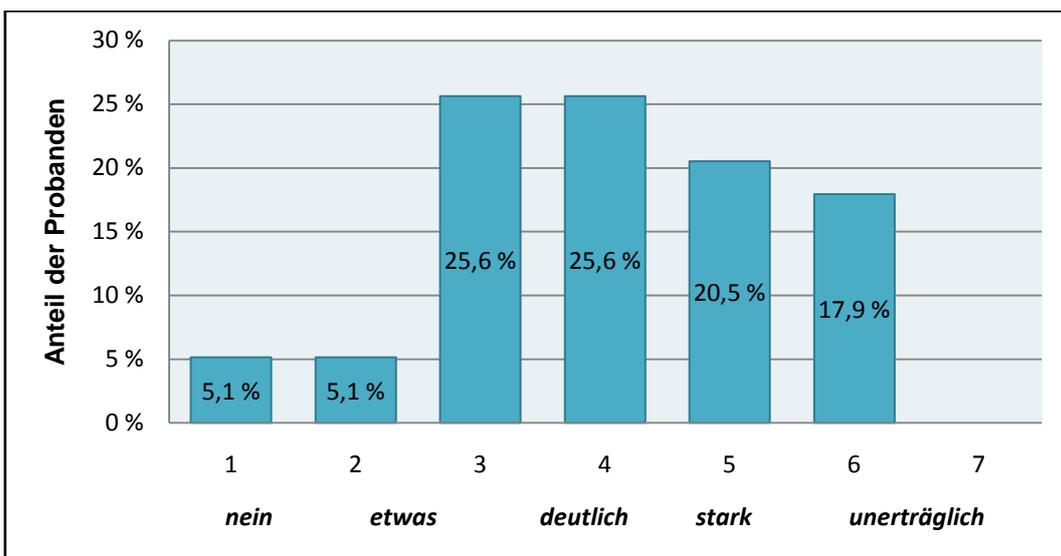


Abbildung 7.26

Haben Sie sich durch den Gegenverkehr (ohne Verwendung des *Antiblendlichtes*) geblendet gefühlt? **Mittelwert: 4,1**

➤ **Haben Sie sich bei Verwendung des *Antiblendlichtes* geblendet gefühlt?**

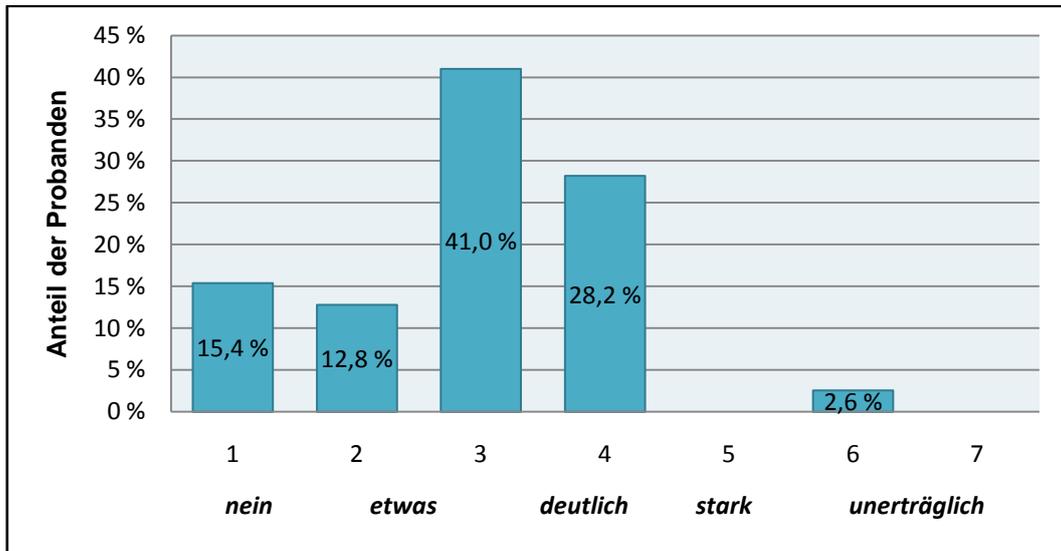


Abbildung 7.27

Haben Sie sich bei Verwendung des *Antiblendlichtes* geblendet gefühlt? **Mittelwert: 2,9**

➤ **Wie empfanden Sie das *Antiblendlicht* insgesamt?**

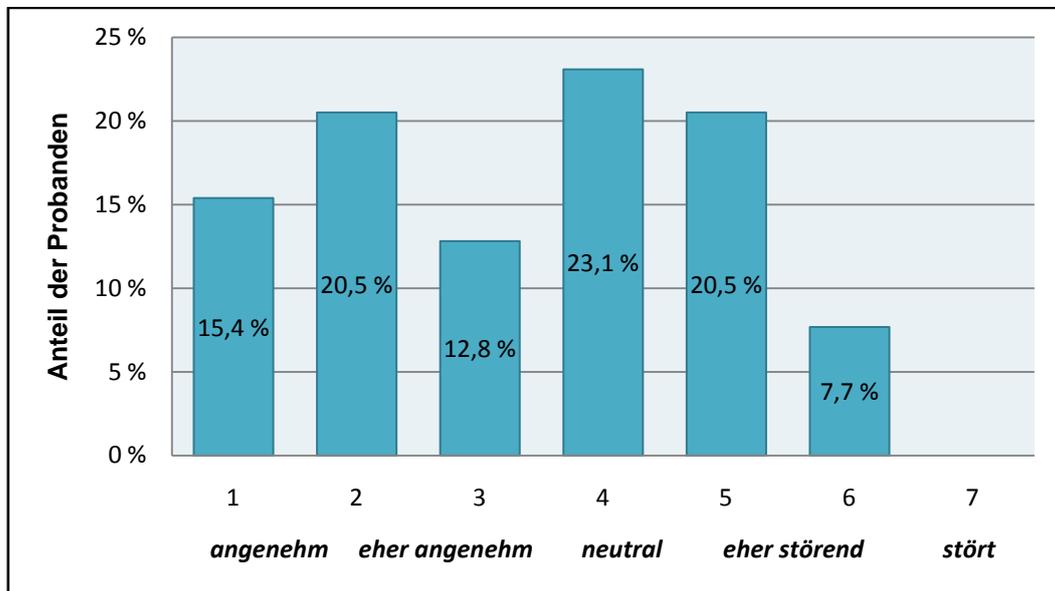


Abbildung 7.28

Wie empfanden Sie das *Antiblendlicht* insgesamt? **Mittelwert: 3,4**

Im vierten Teil des Fragebogens werden allgemeine Aussagen über das *Antiblendlicht* bewertet.

➤ **Was hat Sie bei Einsatz des *Antiblendlichtes* gestört (Mehrfachnennungen möglich)?**

- 1: Ungewohnte Fläche an der Decke des Fahrzeuges
- 2: Helligkeitsänderung der leuchtenden Fläche
- 3: Man kann weniger von der Umgebung wahrnehmen
- 4: Man fühlt sich stärker geblendet
- 5: Andere Gründe
- 6: Nichts

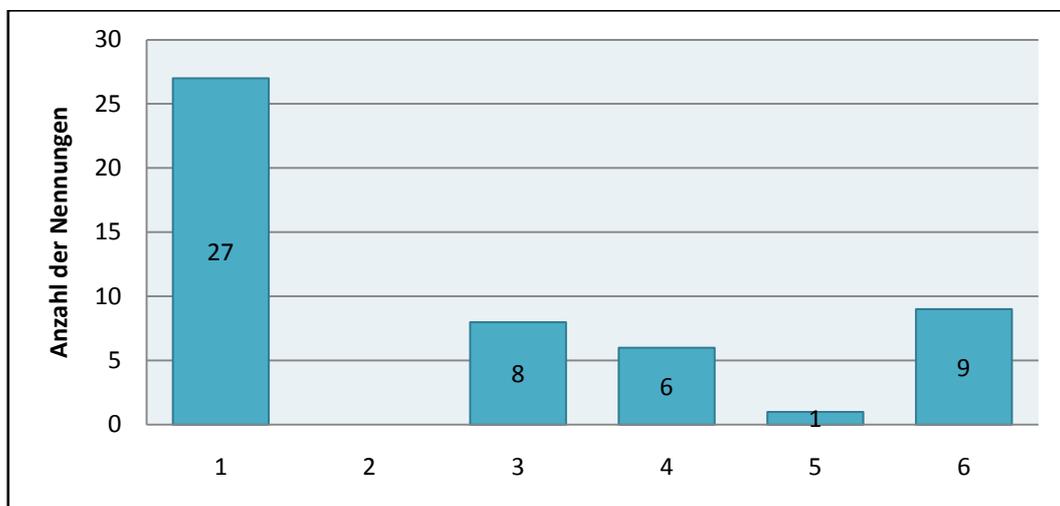


Abbildung 7.29

Was hat Sie bei Einsatz des *Antiblendlichtes* gestört (Mehrfachnennungen möglich)?

➤ **Können Sie sich vorstellen, dass man mit dem *Antiblendlicht* mehr von der Umgebung wahrnimmt (mit Gegenverkehr)?**

- 1: nein
- 2: ja
- 3: keine Aussage möglich

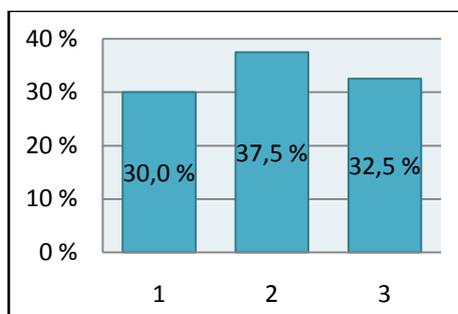


Abbildung 7.30

Können Sie sich vorstellen, dass man mit dem *Antiblendlicht* mehr von der Umgebung wahrnimmt (mit Gegenverkehr)?

- **Können Sie sich vorstellen, dass das *Antiblendlicht* zu einer erhöhten Aufmerksamkeit beziehungsweise zu einer verminderten Müdigkeit führen kann?**

1: nein

2: ja

3: keine Aussage möglich

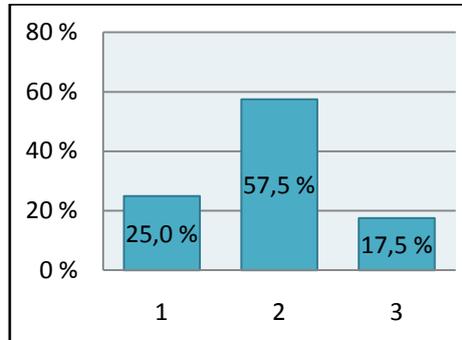


Abbildung 7.31

Können Sie sich vorstellen, dass das *Antiblendlicht* zu einer erhöhten Aufmerksamkeit beziehungsweise zu einer verminderten Müdigkeit führen kann?

- **Können Sie sich vorstellen, das *Antiblendlicht* in Ihrem Fahrzeug anzubringen? Wenn nein, weshalb nicht?**

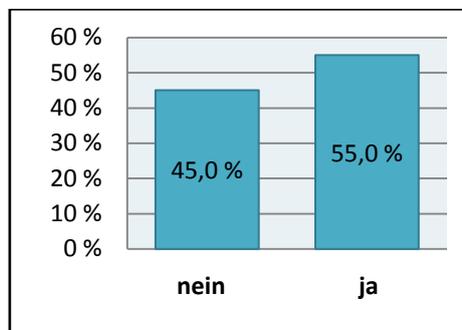


Abbildung 7.32

Können Sie sich vorstellen, das *Antiblendlicht* in Ihrem Fahrzeug anzubringen? Wenn nein, weshalb nicht?

Folgende Gründe gegen eine Anbringung des *Antiblendlichtes* wurden genannt:

- Die Lichtfläche wirkt störend
- Die Verkabelung würde mich stören
- Weil es ablenkt

8. Diskussion

8.1. Vorversuch

8.1.1. Durchschnittliche Straßenbreite

Während die Fahrspurbreiten bei Autobahnen und Bundesstraßen im Bereich von 4m – 7,5 m liegen [HUE56], ergibt die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Vermessung von Landstraßen eine durchschnittliche Fahrspurbreite von 3,12 m. Der Gesetzgeber schreibt eine Mindestbreite von nur 2,1 m bei Begegnungen von PKWs vor. Aufgrund des geringen horizontalen Abstandes der Fahrzeuge zueinander ist der Winkel, den die Scheinwerfer des Gegenverkehrs im Auge des Fahrzeugführers einnehmen, geringer als auf breiten Bundesstraßen. Da die überwiegende Zahl der Straßen als Landstraßen einzustufen ist, wird im Versuch zur Bestimmung der Schwellenkontraste eine Fahrbahnbreite von 3,12 m als gängiges kritisches Szenario verwendet.

8.1.2. Verlauf der Blendbeleuchtungsstärke

Die durch die Scheinwerfer eines entgegenkommenden Fahrzeuges erzeugten Beleuchtungsstärkewerte, welche am Fahrerauge gemessen wurden, sind als hoch einzustufen. Kratzer und Verunreinigungen der Abschlusscheibe führen dazu, dass der Beleuchtungsstärkewert den in der ECE-Norm 98 festgelegten Grenzwert von 0,5 lx überschreitet. Um realistische Bedingungen zu garantieren, werden in diesem Versuch Scheinwerfer verwendet, deren Alter in etwa dem Durchschnittswert der in Deutschland verwendeten Scheinwerfer (ca. 9 Jahre) entspricht.

Der Verlauf der Kurve ist gemäß dem photometrischen Entfernungsgesetz so zu erwarten. Die Werte in einer Entfernung von 15 m und 50 m wurden durch die Scheinwerferracks im Hauptversuch nachgebildet, um das im Straßenverkehr häufig auftretende Phänomen eines schlecht justierten Scheinwerfers in den Versuch mit einzubeziehen.

In den ECE-Normen wird der Punkt in 50 m Entfernung links aus der Sicht des Fahrers (B50L) als kritischer Punkt bezüglich der Blendung angenommen. Weiterhin gilt die Schleierleuchtdichte als das Maß für die physiologische Blendung. Wie aus **Abb. 6.9** ersichtlich wird, ist das Maximum der Schleierleuchtdichte nicht in einer Entfernung von 50 m. Vielmehr steigt die Kurve zu höheren Entfernungen hin an. Dies lässt nun zwei Schlüsse zu. Zum einen kann die Annahme, dass die Blendung in 50 m am stärksten ist, auf falschen Tatsachen beruhen und zum anderen kann es Abweichungen von der Formel **Gln. 3.7** geben, die zur Berechnung der

Schleierleuchtdichte gemäß den Ergebnissen von *Holladay* herangezogen wird. *Hentschel* [HEN06] und *Eckert* [ECK93] bemerken hierzu, dass es nach neueren Untersuchungen zu einer Abweichung des Exponenten des horizontalen Winkels vom Faktor 2 kommt. *Adrian* [ADR61] gibt beispielsweise in seinen Studien einen Faktor von 1,71 an.

Für diese Arbeit wird aufgrund der unklaren Angaben in der Literatur der gebräuchliche Punkt B50L als das für die Blendung kritischste Szenario verwendet. Zusätzlich wird ein zweiter Blendungsscheinwerfer in 15 m Entfernung (entspricht einem horizontalen Winkel von 12°) auf der linken Seite platziert. Hier ist das Produkt aus Blendbeleuchtungsstärke und der Bewertung der Beleuchtungsstärke durch das *Antiblendlicht* maximal (dargestellt in **Abb. 6.15**). Es wurde im Vorfeld des Versuches vermutet, dass dies ein weiterer kritischer Punkt ist, da das *Antiblendlicht* hier eine hohe Leuchtdichte hat und damit die Blendung des Fahrers in einem stärkeren Maß beeinflusst als der Blendscheinwerfer. Die ermittelten Schwellenkontraste konnten diese Theorie jedoch nicht bestätigen, da die Schwellenkontrastwerte für den Blendungsscheinwerfer in 15 m keinen signifikanten Unterschied bezüglich der Verwendung des *Antiblendlichtes* aufweisen.

8.1.3. Charakterisierung des *Antiblendlichtes*

8.1.3.1. Regelverhalten

Die Regelkurve weist eine hohe Steilheit im Bereich von 0-20 lx auf. Hier liegen die Werte zwischen 0,1 und $1,32 \frac{cd}{m^2lx}$. Die Aussage des Herstellers, dass die Regelkurve linear verlaufe, kann somit widerlegt werden.

8.1.3.2. Spektrale Parameter

Die bläulich-weiße Farbe des *Antiblendlichtes*, die sich auch aus der Bestimmung des Farbortes und der Farbtemperatur ergeben, wird von den Probanden als angenehm empfunden. Weiterhin wird die Fläche als homogen leuchtend bewertet, was auch die Leuchtdichtebilder bestätigen. Hier scheint eine optisch ansprechende Lösung gefunden worden zu sein. In **Abb. 8.1** ist eine Leuchtdichteaufnahme der Streuscheibe zu sehen. Am oberen Rand der Abbildung sind die zur Erzeugung des Lichtes verwendeten LEDs zu erkennen, die aber im Betrieb kaum auffallen und nicht als störend empfunden werden.

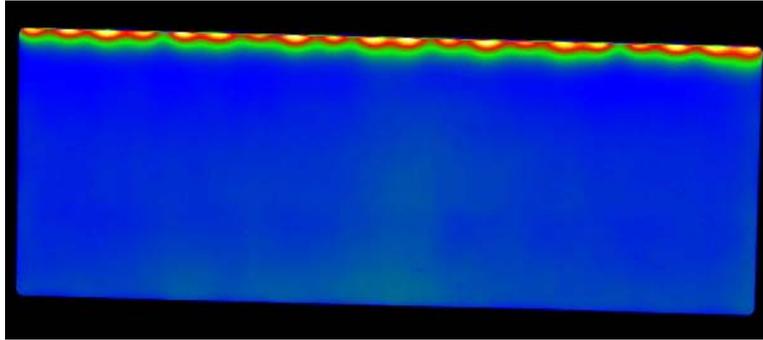


Abbildung 8.1

Leuchtdichtebild des *Antiblendlichtes*, am oberen Bildrand sind die einzelnen LEDs zu erkennen die zur Lichterzeugung verwendet werden

8.2. Hauptversuch

8.2.1. Schwellenkontrast

Die Schwellenkontraste, die im Szenario „*ohne Blendung durch den Gegenverkehr*“ ermittelt wurden, sind erwartungsgemäß die niedrigsten der drei Szenarien. Hier überlagert sich keine Schleierleuchtdichte der Umgebungsleuchtdichte, was zu einer Herabsetzung des Kontrastsehens führen würde. Nach dem Wilcoxon-Test ergibt sich der p-Wert zu 0,89, weshalb kein signifikanter Unterschied mit bzw. ohne Verwendung des *Antiblendlichtes* festgestellt werden kann. Der p-Wert ist sehr hoch, was die statistische Sicherheit dieser Aussage bekräftigt. Die Absolutwerte des Schwellenkontrastes nach Weber sind etwas höher als beim vergleichbaren Versuch von *Franzke* [FRA06]. Der minimal notwendige Visus unter photopischen Bedingungen wird dort mit 0,25 beziffert, wodurch die Anforderungen an die visuelle Leistung der Probanden dort höher als in dieser Arbeit ist. Dass die Schwellenkontrastwerte in diesem Versuch dennoch höher sind, ist zum einen mit dem höheren Alter der Probanden zu begründen. In den Versuchen von *Franzke* liegt der Altersbereich zwischen 19 und 24 Jahren, in der hier vorliegenden Arbeit hingegen zwischen 40 und 60 Jahren. Ein weiterer Grund sind die unterschiedlichen Umgebungshelligkeiten. Der Versuch von *Franzke* fand im Labor statt, während in dieser Arbeit im freien Gelände gearbeitet wurde.

Im Szenario „*Blendung durch den Gegenverkehr in 15 m Entfernung*“ ergeben sich durch die auftretende Schleierleuchtdichte höhere Kontrastwerte. Ein Vergleich der Mittelwerte der beiden Szenarien ergibt für die Blendung einen um den Faktor 2 größeren Schwellenkontrast. Wenn man in Betracht zieht, dass im nächtlichen Straßenverkehr viele Objekte wie Fußgänger, Tiere oder Hindernisse ohne Blendung durch den Gegenverkehr gerade noch erkannt werden können, dann kann man die

möglichen katastrophalen Folgen einer derartigen Erhöhung des Schwellenkontrastes gut nachvollziehen.

Der Einsatz des *Antiblendlichtes* ergibt nach dem Wilcoxon-Test auch in diesem Szenario keine signifikante Erhöhung des Schwellenkontrastes. Der p-Wert liegt mit 0,44 ebenfalls deutlich über der Grenze von 0,05.

Die höchsten Werte werden für das Szenario „*Blendung durch den Gegenverkehr in 50 m Entfernung*“ gemessen. Damit rechtfertigt sich die in der Forschung gebräuchliche Annahme, dass die Blendung im Punkt B50L am kritischsten ist. Die Mittelwerte des Schwellenkontrastes sind etwa um den Faktor 1,5 höher als die Werte der Blendung in 15 m Entfernung und um den Faktor 3 höher als die Werte ohne Blendung durch den Gegenverkehr. Das Gefahrenpotential, das durch die Schwellenkontrasterhöhung im nächtlichen Straßenverkehr entsteht, zeichnet sich dadurch deutlich ab.

Der p-Wert des Wilcoxon-Testes liegt in diesem Szenario bei 0,90 und ist wiederum deutlich größer als 0,05. Damit kann hier ebenfalls mit hoher statistischer Sicherheit kein signifikanter Unterschied in der Verwendung des *Antiblendlichtes* festgestellt werden.

Im Box-Plot erkennt man, dass die Box, also der Bereich, in dem 50% der Messwerte liegen, bei den beiden Szenarien mit Blendung deutlich größer ist als im Szenario ohne Blendung. Auch weisen die Whiskers in den Blendszenarien eine erheblich größere Spannweite auf. Dies legt den Schluss nahe, dass die Inhomogenitäten in den Augenmedien und damit die Schleierleuchtdichte von Proband zu Proband variieren, was sich in der Streuung der Schwellenkontraste ausdrückt.

Insgesamt zeigt sich, dass durch die Blendscheinwerfer und die damit einhergehende physiologische Blendung eine Erhöhung des Schwellenkontrastes um maximal das Dreifache einhergeht. Eine Verwendung des *Antiblendlichtes* führt in allen drei untersuchten Szenarien nicht zu einer signifikanten Erhöhung des Schwellenkontrastes und kann damit ohne Sicherheitsbedenken im Fahrzeug eingesetzt werden.

Die Effekte des *Antiblendlichtes* im realen Straßenverkehr, d.h. im dynamischen Versuch, sollen in einer anschließenden Arbeit untersucht werden.

8.2.2. Auswertung des Fragebogens

Die persönlichen Angaben der Probanden zeigen eine homogene Verteilung des Alters zwischen 40 und 60 Jahren sowie einen nahezu gleich hohen Anteil an Männern und Frauen. Brillenträger sind deutlich häufiger vorhanden als Probanden, die Kontaktlinsen oder keine Sehhilfe tragen. Es handelt sich bei allen Probanden um erfahrene Autofahrer, die im Schnitt seit 30 Jahren ein Fahrzeug steuern und dies

überwiegend regelmäßig mehrmals pro Woche tun. Die jährliche Fahrleistung liegt mit 10000-20000 km im erwarteten durchschnittlichen Bereich. Der Anteil der Nachtfahrten ist im Winter erwartungsgemäß größer als im Sommer und liegt überwiegend im Bereich zwischen 20-70 % im Winter und 5-25% im Sommer. Nachtfahrten nehmen demnach einen großen Teil der täglichen Fahrten ein.

Aufschluss über die subjektive Bewertung des *Antiblendlichtes* im Szenario „Ohne Blendung durch den Gegenverkehr“ ergeben sich aus den Fragen im zweiten Teil des Fragebogens.

Das Ergebnis der Frage nach einer Blendung durch das *Antiblendlicht* ergab einen durchschnittlichen Wert von 2,5 (**Abb. 7.18**). Dies entspricht der Antwortmöglichkeit „etwas“.

In **Abb. 7.24** erkennt man dieselbe Tendenz. Die Antworten ergaben eine „vernachlässigbare“ Ablenkung von der Sehaufgabe durch das *Antiblendlicht*. Die Streuung ist hier nur gering, die Antworten konzentrieren sich auf eine Verneinung der Frage.

Die Probanden gaben im Durchschnitt an, dass sie durch die Verwendung des *Antiblendlichtes* sowohl im Szenario ohne Blendung als auch in den beiden Szenarien mit Blendung nicht mehr oder weniger von der Umgebung oder dem Sehzeichen erkennen konnten (**Abb. 7.20, 7.21 und 7.25**). Interessant ist die auffällig große Streuung der Antworten in Bezug auf die Erkennung des Sehzeichens, während sich die Antworten bezüglich der Umgebung eng um den Mittelwert gruppieren. Eine mögliche Erklärung hierfür ist, dass sich die Probanden während des Versuches (gemäß den Anweisungen des Versuchsleiters) auf den Bildschirm des LCD-TV konzentriert und das übrige Umfeld nicht beachtet haben.

Die Frage, ob das *Antiblendlicht* als angenehm oder störend empfunden wird, ergab im Mittel einen neutralen Eindruck. Das *Antiblendlicht* wurde dabei weder als sehr störend noch als sehr angenehm bezeichnet.

Insgesamt ergaben die gegebenen Antworten, dass das *Antiblendlicht* subjektiv weder einen negativen noch einen positiven Einfluss auf das Blendungs- und Wohlempfinden des Probanden im Szenario „Ohne Blendung durch den Gegenverkehr“ hat.

Im dritten Teil des Fragebogens werden die Szenarien „Mit Blendung durch den Gegenverkehr in 15 m und 50 m Entfernung“ behandelt.

Die Probanden fühlten sich durch die Blendungsscheinwerfer „deutlich“ geblendet, was durch den Mittelwert von 4,1 in **Abb. 7.26** zum Ausdruck gebracht wird.

In **Abb. 7.23** ist das Ergebnis der Frage zu sehen, ob das *Antiblendlicht* subjektiv eine Veränderung des Blendungsempfindens bewirkt. Der Mittelwert von 3,4 zeigt eine leichte Tendenz zu einer verringerten Blendung. Die Verwendung des *Antiblendlichtes* scheint demnach zu einer, wenn auch nur leichten, Verringerung der psychologischen Blendung zu führen.

In dieselbe Richtung weist das Ergebnis in **Abb. 7.24**. Der Mittelwert der Antworten liegt mit 2,9 unter dem Wert von 4,1 in **Abb. 7.23**, womit die Probanden wie in **Abb. 7.21** zum Ausdruck bringen, dass die Verwendung des *Antiblendlichtes* zu einer geringeren psychologischen Blendung führt.

Durch das *Antiblendlicht* selbst haben sich die Probanden nur „etwas“ geblendet gefühlt (**Abb. 7.22**). Hier scheint auch der Effekt einer neuen, ungewohnten leuchtenden Fläche eine Rolle zu spielen, was auch aus **Abb. 7.27** hervorgeht.

Das *Antiblendlicht* wird in Kombination mit einer Blendung durch den Gegenverkehr mit einem Mittelwert von 3,4 als „eher angenehm“ empfunden (**Abb. 7.26**).

Insgesamt ergaben die gegebenen Antworten, dass das *Antiblendlicht* subjektiv einen leicht positiven Einfluss auf das Blendungs- und Wohlempfinden des Probanden in den beiden Szenarien „Mit Blendung durch den Gegenverkehr in 15 m und 50 m Entfernung“ hat.

Die Probanden empfanden das *Antiblendlicht* überwiegend als nur leicht störend. Als Grund für die Störung wurde vor allem die „ungewohnte Fläche an der Decke des Fahrzeuges“ genannt.

Auch gaben viele Probanden an, dass sie das *Antiblendlicht* ablenken würde, sie sich aber vorstellen könnten, dass dieser Effekt nach einer Gewöhnungsphase nachlassen würde.

9. Fehlerbetrachtung

Jedes Messergebnis wird durch Unvollkommenheiten des Messgegenstandes, der Messgeräte und des Messverfahrens verfälscht. Die Abweichung eines Messwertes setzt sich dabei aus systematischen und zufälligen Messfehlern zusammen. Systematische Fehler beruhen auf einer Abweichung des gemessenen Wertes vom eigentlichen Wert, die in Betrag und Vorzeichen konstant ist. Ursachen hierfür sind häufig ein unangebrachtes Messverfahren, ein falsch eingestellter Messbereich oder Unvollkommenheiten der Messgeräte. Systematische Fehler können durch Maßnahmen wie die Eichung der Messgeräte oder statistische Ausgleichsrechnungen bis zu einem gewissen Grad eliminiert werden.

Zufällige Fehler lassen sich in Betrag und Vorzeichen nicht bestimmen und beruhen unter anderem auf persönlichen Einflüssen, Verschleiß der Messgeräte oder Umwelteinflüssen. Zufällige Fehler können durch sorgfältige Durchführung des Versuches in einer exakt definierten Messumgebung (z.B. klimakontrolliertes Labor) verringert, aber nicht gänzlich ausgeschlossen werden.

9.1. Systematische Fehler

9.1.1. Beleuchtungsstärke an den vorderen Sensoren des *Antiblendlichtes*

Zur Bestimmung der Beleuchtungsstärke an den beiden Sensoren an der Vorderseite des *Antiblendlichtes* wird der Messkopf des Pocket Lux 2 direkt neben einem der Sensoren montiert. Der Versatz zwischen den Mittelpunkten beträgt ca. 4 cm. Bei einem Abstand von 50 cm zur Lichtquelle ergibt sich damit eine Winkelabweichung von etwa $4,57^\circ$. Der dabei entstehende Messfehler lässt sich mit **Gln. 3.17** berechnen. Der vom Sensor gemessene Beleuchtungsstärkewert ist demnach um 0,3% zu niedrig, was aber als vernachlässigbar erachtet wird.

9.1.2. Diskretisierung des Schwellenkontrastes im Hauptversuch

Zur Generierung der Kontrastwerte der Landoltringe im Hauptversuch stehen nur 256 Graustufen zur Verfügung. Dadurch kann der Schwellenkontrast nicht in einer kontinuierlichen Skala, sondern nur als diskreter Wert bestimmt werden. Den Fehler F_{diskr} der Diskretisierung kann man nach folgender Gleichung abschätzen, wobei K_i der Kontrastwert der i -ten Graustufe ist.

$$F_{diskr} = K_i - K_{i-1} \quad (\text{Gln. 8.1})$$

Der absolute Fehlerwert des Schwellenkontrastes liegt bei dieser Messung gemäß dem ermittelten Zusammenhang zwischen Graustufen und auf dem Bildschirm angezeigtem Kontrast bei minimal 0,01 und maximal 0,29. Der höchste im Versuch ermittelte Wert für die Graustufe liegt bei 176, was einem maximalen absoluten Fehler von 0,116 oder einem prozentualen Fehler von 0,98% entspricht.

9.1.3. Fehler des Beleuchtungsstärkemessgerätes

Das Beleuchtungsstärkemessgerät Pocket Lux gibt laut Kalibrierprotokoll einen Wert aus, der um 1,4 % (bezogen auf den Anzeigewert) zu niedrig ist. Die Messdaten müssen dementsprechend korrigiert werden.

9.2. Zufällige Fehler

9.2.1. Probanden

Nicht abschätzbare Fehler können dadurch entstehen, dass ein Proband während des Versuches unkonzentriert ist und beispielsweise kurzzeitig den Blick vom LCD-TV abwendet. Ein Fehler, der einige Male in den Versuchen auftritt, entsteht durch die Verzögerungszeit zwischen Erkennen der Öffnung des Landoltringes und dem Betätigen des Tasters. So kann es passieren, dass der Proband die Öffnung am richtigen Ort erkennt, das Programm aber bereits ein Bild weiter gesprungen ist bis der Proband den Knopf drückt. Die Öffnung ist dann unter Umständen an einer anderen Stelle, was der Proband innerhalb der fünf Sekunden, die für die Audioaufnahme zur Verfügung stehen, erkennen muss. Geht man davon aus, dass der Proband die darauffolgende Öffnung richtig erkennt, so lässt sich der maximale Fehler im Kontrastwert durch die Differenz der beiden Graustufen abschätzen.

9.2.2. Positionierung der Versuchsgegenstände

Die Ausrichtung der Blendungsscheinwerfer, des LCD-TV, des Versuchsfahrzeuges und der Scheinwerfer zur Erzeugung der Vorfeldausleuchtung wird durch Markierungen auf dem Boden möglichst reproduzierbar gestaltet. Dennoch sind leichte Schwankungen hinsichtlich des Winkels der Gegenstände zueinander möglich, welche das Messergebnis beeinflussen können. Aufgrund widriger Wetterbedingungen ist es zudem notwendig, die Bodenmarkierungen neu zu vermessen, was die Unsicherheit in der Justierung der Messgeräte zusätzlich erhöht.

9.2.3. Umwelteinflüsse im Hauptversuch

Die Lichtbedingungen des Umfeldes schwanken während der Versuchsreihen durch wechselnde Bewölkungsverhältnisse. Auch kann eine hundertprozentig trockene Fahrbahn aufgrund der jahreszeitlichen feuchten Witterung nicht gewährleistet werden. Hier kann eine höhere Schwankungsbreite dazu führen, dass kleinere Differenzen des Schwellenkontrastes schlechter aufgelöst werden können, weil sie relativ gesehen schwächer in die statistische Auswertung mit einfließen.

9.2.4. Beleuchtungsstärkemessung an der Stelle des Fahrerauges

Der Messkopf kann nicht exakt an die Position des Fahrerauges gebracht werden, da diese natürlichen Schwankungen unterworfen ist. Hier wird eine Durchschnittshöhe verwendet. Aufgrund einer Verdrehung des Messkopfes kann es weiterhin zu Abweichungen in der gemessenen Blendbeleuchtungsstärke kommen, die im einstelligen Prozentbereich liegen dürften. Für eine zehnpromtente Abweichung müsste der Messkopf beispielsweise bereits um 25° gegen die Normalachse verdreht sein.

9.2.5. Vorfeldausleuchtung

Die Vorfeldausleuchtung konnte aus den in **Kapitel 5** genannten Gründen nicht durch das Versuchsfahrzeug selbst erzeugt werden, sondern musste mithilfe eines Scheinwerferracks simuliert werden. Die Scheinwerfer wurden darauf ausgerichtet, im Mittel dieselbe Leuchtdichte auf dem Fahrbahnbelag vor dem Fahrzeug zu erzeugen wie die normalen Scheinwerfer des Versuchswagens. Größere Abweichungen in der Homogenität der Ausleuchtung ließen sich mit dieser Methode nicht vermeiden. Speziell im seitlichen Bereich sowie im Fernfeld ließ sich keine vergleichbare Lichtverteilung generieren, wodurch es zumindest zu einer ungewohnten Beleuchtungssituation für den Probanden kam. Die Untersuchungen von Jebas [JEB06] legen den Schluss nahe, dass die Vorfeldausleuchtung maßgeblich für den Adaptionszustand des Fahrzeugführers verantwortlich ist. Der Adaptionszustand ist durch dieselbe mittlere Leuchtdichte bei der normalen und künstlichen Erzeugung der Vorfeldausleuchtung als identisch anzusehen. Somit kann man in diesem Fall von keiner gravierenden Beeinflussung des Versuchsergebnisses durch die künstliche Vorfeldausleuchtung ausgehen.

10. Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wird das *Antiblendlicht ABL*[®] der Firma *Uwe Braun GmbH* hinsichtlich möglicher Auswirkungen auf den Schwellenkontrast eines Fahrzeugführers untersucht.

Im Feldversuch wird der Einfluss des *Antiblendlichtes* auf den Schwellenkontrast anhand 32 Probanden im Alter zwischen 40 und 60 Jahren ermittelt. Dazu wird ein Paarvergleich „Mit und ohne *Antiblendlicht*“ für drei verschiedene Szenarien durchgeführt.

Die statistischen Auswertungen ergeben für keines der drei Szenarien eine signifikante Abweichung zwischen der Verwendung des *Antiblendlichtes* und ohne die Verwendung desselben. Damit wird gezeigt, dass das *Antiblendlicht* weder einen positiven noch einen negativen signifikanten Einfluss auf das Kontrastsehen im nächtlichen Straßenverkehr hat.

Eine sich an den Hauptversuch anschließende schriftliche Befragung der Probanden ergibt, dass die Verwendung des *Antiblendlichtes* zu einer leicht verringerten psychologischen Blendung führt.

Das *Antiblendlicht* wird insgesamt als neutral erachtet und hat weder eine angenehme noch eine störende Wirkung auf die Probanden. Viele Probanden geben allerdings an, dass die leuchtende Fläche an der Decke des Fahrzeuges für sie ungewohnt sei. Nach einer Eingewöhnungsphase könnten sie sich aber vorstellen, dass ihnen dieser Umstand nicht mehr auffällt.

Dass das *Antiblendlicht* zu einer verringerten Müdigkeit bei nächtlichen Fahrten führt, können sich ca. 60% der Probanden vorstellen. Diese Thematik wird im Rahmen dieser Arbeit allerdings nicht weiter verfolgt.

Einen Einsatz des *Antiblendlichtes* im eigenen Fahrzeug können sich, unabhängig vom Anschaffungspreis, 55 % der Probanden vorstellen.

Aufgrund des aufwendigen Versuches können nur 32 Probanden an dieser Studie teilnehmen. Eine Erhöhung dieser Zahl würde zu einer höheren statistischen Sicherheit der gewonnenen Ergebnisse führen. Weiterhin ist es denkbar, dass zusätzliche Blendszenarien in die Feldversuche eingebunden werden, um ein umfassenderes Bild der Auswirkungen des *Antiblendlichtes* im nächtlichen Straßenverkehr zu erhalten.

Diese Arbeit beschäftigt sich nur mit den Einflüssen des *ABL*[®] auf das Kontrastsehen des Fahrzeugführers. Wie die Auswirkungen auf den realen, dynamischen Straßenverkehr aussehen, muss in einer anschließenden Arbeit noch geklärt werden.

Literaturverzeichnis

- [AKO05] Akashi, Derlofske, Bullough, Cheng: "The effect of glare on visual performance under reduced headlamp illumination"; SAE International 2005
- [BOL04] Bol: "Deskriptive Statistik"; Oldenbourg Verlag; München 2004
- [BOS92] Bosch: „Statistik-Taschenbuch“; Oldenbourg Verlag; München 1992
- [BRA09] Uwe Braun GmbH: „Montage- und Bedienungsanleitung Sebili®“; 2009
- [BUL05] Bullough, Derlofske: "Methods for assessing the impact of oncoming glare on driving behavior", SAE International 2005
- [CAB09] Caberletti, Kümmel: "Results of an experimental study on driver's perception of ambient vehicle lighting"; ISAL 2009, Darmstadt
- [DER05] Derlofske, Cheng, Bullough, Akashi: „Headlight glare exposure and recovery“; SAE International 2005
- [DIN04] DIN EN 13032-1: „Licht und Beleuchtung – Messung und Darstellung photometrischer Daten von Lampen und Leuchten“, Berlin 2004
- [ECK93] Eckert: „Lichttechnik und optische Wahrnehmungssicherheit im Verkehr“; Verlag Technik GmbH; Berlin München 1993
- [ELP92] Elpelt, Hartung: „Grundkurs Statistik“; Oldenbourg Verlag; München 1992
- [FRA06] Franzke: „Einfluss ambierter Beleuchtung auf das Kontrastsehvermögen“; Diplomarbeit; Karlsruhe 2006
- [GRA80] Grand, Hage: „Physiological Optics“; Springer-Verlag; Berlin Heidelberg 1980
- [GRE93] Greule.: „Kontrastschwellen bei transienter Adaptation“; Dissertation, Karlsruhe 1993

-
- [HAR61] Hartmann: „Untersuchungen zur physiologischen Blendung“; Dissertation, München 1961
- [HAR68] Hartmann: „Untersuchungen zur Frage der Lichtfarbe bei KFZ-Scheinwerfern“; VDI-Verlag; Düsseldorf 1968
- [HEN02] Hentschel: „Licht und Beleuchtung“; Hüthig Verlag; Heidelberg 2002
- [HUE56] „Hütte III – Bautechnik“, 28. Auflage 1956
- [JEB08] Jebas, Schellinger, Manz, Kooß: „Optimierung der Beleuchtung von Personenwagen und Nutzfahrzeugen“; bast Heft F66; Bergisch-Gladbach 2008
- [KHA08] Khanh: “Seminar KFZ-Lichttechnik und Verkehrslichttechnik”; Darmstadt 2008
- [KLE08] Klein: “Messtechnische Erfassung der Lichtverteilung eines LED-Scheinwerfers und Bestimmung der Eigenschaften der von ihm auf der Fahrbahnoberfläche erzeugten Reflexionen“; Diplomarbeit; Karlsruhe 2008
- [KOK03] Kokoschka: „Grundlagen der Lichttechnik“; Vorlesungsskript, Universität Karlsruhe 2003
- [LIC07] Lemmer, Manz, Klinger: “Licht- und Displaytechnik”; Vorlesungsmaterialien, Universität Karlsruhe 2007
- [LOC09] Locher, Kley: „Disability and discomfort glare of headlamps“; ISAL 2009, Darmstadt
- [MAN08] Manz: „Optische Technologien im Automobil“; Vorlesungsmaterialien, Universität Karlsruhe 2008
- [MOO08] Moosbrugger: „Testtheorie und Fragebogenkonstruktion“; Springer Medizin Verlag, Heidelberg 2008

- [MIC09] Michenfelder: „Aufbau eines Goniometer-gestützten Messplatzes für Leuchten mittlerer Abmessung“; Studienarbeit; Karlsruhe 2009
- [RIC09] Richter: „Analyse des Einflusses einer ambienten Innenraumbelichtung auf visuelle Parameter des Fahrzeugführers“; Diplomarbeit; Karlsruhe 2009
- [SCHKH] Schiller, Khanh: „Photometrical and physiological aspects of the today LED-headlamp cars“; Universität Darmstadt
- [SPR09] Sprute, Söllner, Haferkemper, Schiller, Zydek, Khanh: “Investigations on glare impact at long distances”; ISAL 2009, Darmstadt
- [WÖR07] Wördenweber, Wallaschek, Boyce, Hoffmann: „Automotive Lighting and Human Vision“; Springer-Verlag; Heidelberg 2007
- [WEH85] Wehmeyer: „Objektive Messungen zur physiologischen Blendung“; Dissertation, München 1985

Internetquellen

- [IQ09] Landoltring
<http://www.kliniken.de/images/thumb/2/27/Landoltring.jpg/180px-Landoltring.jpg>
verfügbar am 25.08.2009
- [IQa09] Aufbau des menschlichen Auges
<http://www.seilnacht.com/Lexikon/Auge.gif>
verfügbar am 25.08.2009
- [IQb09] Gegenüberstellung von Stäbchen und Zapfen
URL: <http://www.sinnesphysiologie.de/photor/pho01bh.jpg>
verfügbar am 03.09.2009
- [IQc09] Querschnitt der Netzhaut
URL: <http://lammlabs.de/auge/img/Retina/4.jpg>
verfügbar am 03.09.2009
- [IQd09] Spektrale Absorptionskurven der Zapfen

- URL: <http://www.zum.de/Faecher/Materialien/beck/bilder/!cones.gif>
verfügbar am 14.12.2009
- [IQe09] Verteilung der Rezeptoren auf der Netzhaut
URL: <http://www.biokurs.de/skripten/bilder/Ostergr.GIF>
verfügbar am 14.12.2009
- [IQf10] Hellempfindlichkeitskurven des menschlichen Auges
URL: http://www.leds-com.de/Media/Shop/ShopTextMedia/Augenempfindlichkeit_LED.gif
verfügbar am 11.01.2010
- [IQg10] Gesichtsfeld des menschlichen Auges
URL: http://eco.psy.ruhr-uni-bochum.de/download/Guski-Lehrbuch/Abbildungen/Abb_4-10a.jpg
verfügbar am 12.01.2010
- [IQh10] Dunkeladaptation
URL: http://eco.psy.ruhr-uni-bochum.de/download/Guski-Lehrbuch/Abbildungen/Abb_4-7a.jpg
verfügbar am 12.01.2010
- [IQi10] Innenraumbelichtung 3er BMW
http://www.7forum.com/news/2006/3er_cabrio/innenbeleuchtung_p0032233-d.jpg
verfügbar am 17.01.2010
- [IQj10] Innenraumbelichtung Audi A8
URL: <http://www.mykarre.com/file/pic/gallery/5306.jpg>
verfügbar am 17.01.2010
- [IQk10] Prinzip Projektionssystem
URL: <http://www.kfztech.de/images/kfztechnik/elo/xenon.jpg>
verfügbar am 18.01.2010
- [IQl10] Projektionsscheinwerfer
URL: <http://img3.auto-motor-und-sport.de/Suzuki-Kizashi-r900x600-C-2e07da98-253884.jpg>
verfügbar am 18.01.2010

-
- [IQm10] Vorteile des *ABL*®
URL: http://www.Antiblendlicht.com/wie_funktioniert_abl.html
verfügbar am 21.01.2010
- [IQn10] LMK Technoteam
URL: http://www.opteema.com/upload/menu/2004_01_22-16_46_22_LMK98-3Color.jpg
verfügbar am 22.01.2010
- [IQo10] Pocket Lux 2
URL: <http://www.lmt-berlin.de/ico/tn/plux2.png>
verfügbar am 22.01.2010
- [IQp10] Spektrometer Jeti
URL: http://www.jeti.com/images/sys/scb1201_k.jpg
verfügbar am 22.01.2010

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1	Darstellung der Verringerung der Blendung durch entgegenkommende Scheinwerfer durch das ABL [®] ; im oberen Bild ist der herkömmliche Zustand dargestellt, im unteren Bild erkennt man die leuchtende Fläche des ABL an der Sonnenblende des Fahrzeuges; weiterhin ist die verringerte Blendung durch das entgegenkommende Fahrzeug qualitativ visualisiert [IQm10].....	2
Abb. 3.1	Landoltring [IQ09].....	5
Abb. 3.2	Aufbau des menschlichen Auges [IQa09].....	8
Abb. 3.3a	Gegenüberstellung von Stäbchen (links) und Zapfen (rechts) [IQb09].....	9
Abb. 3.3b	Querschnitt der Netzhaut [IQc09].....	9
Abb. 3.4	Spektrale Absorptionskurven der S- Zapfen (blau), M- Zapfen (grün) und L-Zapfen (rot). Die Überlagerung der drei Farbreize rechnet das Gehirn in den Gesamt-Farbeindruck um.....	10
Abb. 3.5	Verteilung der Rezeptoren auf der Netzhaut [IQe09].....	11
Abb. 3.6	Sehschärfe in Abhängigkeit des Netzhautortes; im Bereich des blinden Fleckes wurde die Kurve interpoliert. [HEN02].....	11
Abb. 3.7	Gesichtsfeld des menschlichen Auges [IQg10].....	12
Abb. 3.8	Grundidee zur Ermittlung des Helligkeitsempfinden [KOK03].....	13
Abb. 3.9	Helligkeit in Abhängigkeit der Objektleuchtdichte L_T mit der Umgebungsleuchtdichte L_U als Parameter [HEN06].....	14
Abb. 3.10	Relative Helligkeit in Abhängigkeit des Quotienten $\frac{L_T}{L_U}$; In der Mitte der Abbildung ist das Weber-Fechner-Gebiet mit dem linearen Anstieg der relativen Helligkeit zu erkennen [HEN06].....	15
Abb. 3.11	Pupillenweite in Abhängigkeit der Adaptionsleuchtdichte für ein homogen ausgeleuchtetes Gesichtsfeld [HEN06].....	16
Abb. 3.12	Zeitliche Adaption des Auges bei Sprung der mittleren Leuchtdichte von L_1 auf L_2 , erkennbar sind die drei Phasen der Sofort-, Zapfen- und Stäbchenadaption [GRE93].....	17
Abb. 3.13	Streulichtentstehung im Auge [HEN06].....	19

Abb. 3.14 Erhöhung der Leuchtdichte-Unterschiedsschwelle durch die äquivalente Schleierleuchtdichte [HEN06].....	20
Abb. 3.15 Beispiele für ambiante Innenraumbeleuchtungen, links eine Türbeleuchtung im 3er BMW, rechts Fußraum-, Instrumenten- und Schalterbeleuchtung im Audi A8 [IQi10] [IQj10].....	22
Abb. 3.16 Definition des Raumwinkels [HEN02].....	23
Abb. 3.17 Spektrale Hellempfindlichkeit ($V(\lambda)$ links, $V'(\lambda)$ rechts) [IQf10].....	23
Abb. 3.18 Zum photometrischen Entfernungsgesetz [MIC09].....	25
Abb. 3.19 Fehler δ dargestellt in Abhängigkeit des Verhältnisses von Radius r (Quelle-Empf.) und maximaler Abmessung h der Lichtquelle [MIC09]....	26
Abb. 3.20 Prinzipskizze eines Reflexionsscheinwerfers, der Paraboloid erzeugt die Bilder W der Lichtquelle vor dem Fahrzeug [MAN08].....	28
Abb. 3.21 Prinzip eines Projektionssystemes; die Lichtstrahlen verlaufen durch den Reflektor und die anschließende Linse nahezu parallel außerhalb des Scheinwerfers (im Bild rechts); die Blende (im Bild der schwarze Strich in der Mitte unten) wird zur Erzeugung der Hell-Dunkel-Grenze benötigt [IQk10].....	28
Abb. 3.22 Beispiel eines Projektionsscheinwerfers; erkennbar ist die leuchtende Linse [IQl10].....	28
Abb. 4.1 Prinzipskizze des Hauptversuches zur Bestimmung des Einflusses des ABL auf das Kontrastsehvermögen des Fahrzeugführers.....	29
Abb. 5.1 Darstellung der Verringerung der Blendung durch entgegenkommende Scheinwerfer durch das <i>Antiblendlicht</i> [IQm10].....	30
Abb. 5.2 Antiblendlicht ABL [®] mit Steuer- und Funktionselementen.....	31
Abb. 5.3 Einstellung des Grundniveaus in der Leuchtdichte des Antiblendlichtes [BRA09].....	32
Abb. 5.4 Einstellung des Endniveaus in der Leuchtdichte des Antiblendlichtes, aus dessen Wahl und der des Grundniveaus ergibt sich die Steilheit der Regelkurve [BRA09].....	32
Abb. 5.5 Leuchtdichtemesskamera LM98-3 [IQn10].....	33
Abb. 5.6 Pocket Lux 2 der Firma LMT Berlin [IQo10].....	33
Abb. 5.7 Spektrometer der Firma Jeti [IQo10].....	34

Abb. 5.7	Spektrometer der Firma Jeti [IQo10].....	34
Abb. 5.8	Scheinwerfermodule, die auf einem Rack montiert sind; ebenfalls erkennbar sind die Spannungsquelle und die Stromversorgung derselbigen.....	34
Abb. 5.9	LCD-Monitor der Marke Philips, der Rand wurde zur Vermeidung von Reflexionen mit Filz beklebt.....	35
Abb. 5.10	Versuchsfahrzeug S500 der Marke Mercedes.....	36
Abb. 5.11	Gerät Rodatest für die optometrische Vermessung der Probanden.....	36
Abb. 6.1	Der Messempfänger des Pocket Lux 2 befindet sich am Ort des Fahrerauges, das symbolisch dargestellt ist; die Position des Fahrzeuges ist fest, die des Empfängers variabel.....	38
Abb. 6.2	Das linke Bild zeigt die prinzipielle Versuchsanordnung zur Bestimmung des Regelverhaltens, auf der rechten Seite ist (um 180° gedreht) der reale Aufbau im Labor zu erkennen.....	39
Abb. 6.3	Zusammenhang zwischen Lichtquelle, Normaler zur Ebene der Photosensoren und dem Anleuchtungswinkel α	40
Abb. 6.4	Versuchsanordnung zur Bestimmung der Winkelabhängigkeit der Photosensoren, im Bild unten ist die Drehscheibe des Goniometers zu erkennen; sowohl die Leuchtdichtekamera als auch das Antiblendlicht sind fest damit verbunden.....	40
Abb. 6.5	Aufnahmemuster der Leuchtdichtekamera zur Bestimmung der Kontrastwerte jeder einzelnen Graustufe; die Darstellung der Leuchtdichte erfolgt durch die Software in Falschfarben, weshalb der Landolt-ring in diesem Bild eine blaue Farbe und nicht den tatsächlichen Grauton aufweist.....	41
Abb. 6.6	Parametereingabefeld der Software <i>Schweko</i>	43
Abb. 6.7	Beleuchtungsstärke am Auge des Fahrzeugführers in Abhängigkeit des Abstandes zum entgegenkommenden Fahrzeug.....	46
Abb. 6.8	Beleuchtungsstärke am Auge des Fahrzeugführers in Abhängigkeit des horizontalen Winkels; dieser wird zwischen der Normalen zur Ebene des Auges und der Gerade durch das Auge und das entgegenkommende Fahrzeug gemessen.....	46

Abb. 6.9	Schleierleuchtdichte am Auge des Fahrzeugführers, die sich aus den gemessenen Beleuchtungsstärkewerten und dem korrespondierenden Abstand zum Fahrzeug des Gegenverkehrs ergibt; die Kurve ist auf das Maximum normiert.....	47
Abb. 6.10	Schleierleuchtdichte am Auge des Fahrzeugführers in Abhängigkeit zum jeweiligen Abstand korrespondierenden horizontalen Winkels; die Kurve ist auf das Maximum normiert.....	47
Abb. 6.11	Regelverhalten des Antiblendlichtes; Darstellung der Leuchtdichte der Streuscheibe in Abhängigkeit der Beleuchtungsstärke an den Sensoren für mehrere maximale Helligkeitsniveaus des Antiblendlichtes.....	48
Abb. 6.12	Oben ist eine Farbaufnahme des Antiblendlichtes zu erkennen, die logarithmisch aufgehellt wurde; am oberen Rand sind die einzelnen LEDs als Lichtquellen erkennbar; das untere Bild zeigt das CIE-Farbdreieck; der farbige Bereich stellt die vom menschlichen Auge wahrnehmbaren Farbnuancen dar; die Markierung stellt den Farbort des Antiblendlichtes dar.....	49
Abb. 6.13	Spektrale Strahldichte erkennbar ein Hauptmaximum im blauen und ein Nebenmaximum im gelben Farbbereich.....	50
Abb. 6.14	Abhängigkeit der Leuchtdichte vom horizontalen Winkel zur Lichtquelle; das Antiblendlicht befindet sich für diesen Versuch auf dem niedrigsten Grundniveau.....	51
Abb. 6.15	Produkt aus gemessener Beleuchtungsstärke und Leuchtdichte des Antiblendlichtes; das Maximum wird als kritisch bezüglich der Blendung des Fahrers angenommen und im Hauptversuch als Szenario verwendet.....	52
Abb. 6.16	Zusammenhang zwischen den Winkeln α und β ; $\alpha = 23^\circ$, $\beta = 18,4^\circ$	52
Abb. 6.17	Kennlinie des Weber-Kontrastes in Abhängigkeit der Graustufe.....	53
Abb. 7.1	Beschickungshof der Neuen Messe in Karlsruhe.....	54
Abb. 7.2	Prinzipskizze des Hauptversuches.....	56

Abb. 7.3	Bild des Fahrzeuginneren mit dem an der Sonnenblende angebrachten Antiblendlicht und dem an der Fahrzeugdecke befestigten Mikrofon; die Halterung des Mikrofons verfügt über eine Kugelgelenk, das eine Anpassung an den jeweiligen Probanden erlaubt.....	57
Abb. 7.5	Leuchtdichtebild des LCD-TV bei eingeschalteten Fahrzeugscheinwerfern; die Inhomogenitäten in der Bestrahlung sind deutlich am Leuchtdichtegradienten zu erkennen.....	58
Abb. 7.6	Scheinwerferrack mit vier Halogen-Projektionssystemen zur Erzeugung der Vorfeldausleuchtung; erkennbar ist auch die schwarze Trennwand zur Abschirmung des Lichtes zum Fahrzeug hin.....	58
Abb. 7.7	Einteilung der Antworten in Stufen von 1-7, die zusätzlich noch mit Sprachelementen gekennzeichnet sind.....	60
Abb. 7.8	Schwellenkontraste für die sechs verschiedenen Szenarien: ohne Blendung, Blendung in 15 m und Blendung in 50 m Entfernung – jeweils mit und ohne Antiblendlicht.....	61
Abb. 7.9	Box-Whisker Plot der Schwellenkontraste für die sechs Szenarien.....	62
Abb. 7.10	Altersverteilung der Probanden, der Mittelwert liegt bei 48,9 Jahren.....	65
Abb. 7.11	Anteile der männlichen und weiblichen Probanden.....	65
Abb. 7.12	Sehhilfe.....	66
Abb. 7.13	Häufigkeit einer Fahrt des Probanden.....	66
Abb. 7.14	Jährliche Fahrleistung des Probanden.....	66
Abb. 7.15	Verteilung der Fahrten der Probanden auf Autobahnen, Landstraßen und innerorts.....	67
Abb. 7.16	Anteil der Nachtfahrten im Sommer.....	67
Abb. 7.17	Anteil der Nachtfahrten im Winter.....	68
Abb. 7.18	Fühlten Sie sich durch das Antiblendlicht geblendet?.....	68
Abb. 7.19	Hatten Sie das Gefühl, dass sie mit dem ABL mehr oder weniger von dem Sehzeichen auf dem Fernseh Bildschirm wahrgenommen haben?.....	69
Abb. 7.20	Hat Sie das Antiblendlicht während des Versuches von Ihrer Aufgabe, das Sehzeichen auf dem Fernseher zu erkennen, abgelenkt?	69
Abb. 7.21	Hatten Sie das Gefühl, dass Sie mit dem Antiblendlicht mehr oder weniger von der Umgebung außerhalb des Autos wahrgenommen haben?.....	70

Abb. 7.22 Wie empfanden Sie das Antiblendlicht insgesamt?.....	70
Abb. 7.23 Haben Sie sich durch das Antiblendlicht weniger oder stärker durch den Gegenverkehr geblendet gefühlt?	71
Abb. 7.24 Fühlten Sie sich durch das Antiblendlicht geblendet?.....	71
Abb. 7.25 Hat Sie das Antiblendlicht während des Versuches von Ihrer Aufgabe, das Sehzeichen auf dem Fernseher zu erkennen, abgelenkt?.....	72
Abb. 7.26 Haben Sie sich durch den Gegenverkehr (ohne Verwendung des Antiblendlichtes) geblendet gefühlt?	72
Abb. 7.27 Haben Sie sich - bei Verwendung des Antiblendlichtes - geblendet gefühlt?	73
Abb. 7.28 Wie empfanden Sie das Antiblendlicht insgesamt?.....	73
Abb. 7.29 Was hat Sie bei Einsatz des Antiblendlichtes gestört (Mehrfachnennungen möglich)?.....	74
Abb. 7.30 Können Sie sich vorstellen, dass man mit dem Antiblendlicht mehr von der Umgebung wahrnimmt (<i>mit Gegenverkehr</i>)?.....	74
Abb. 7.31 Können Sie sich vorstellen, dass das <i>Antiblendlicht</i> zu einer erhöhten Aufmerksamkeit beziehungsweise zu einer verminderten Müdigkeit führen kann?.....	75
Abb. 7.32 Können Sie sich vorstellen, das <i>Antiblendlicht</i> in Ihrem Fahrzeug anzubringen? Wenn nein, weshalb nicht?.....	75
Abb. 8.1 Verlauf der Blendbeleuchtungsstärke.....	76
Abb. 8.2 Schleierleuchtdichte, die sich nach (Gln. 3.7) aus den gemessenen Beleuchtungsstärkewerten und den korrespondierenden Winkeln ergibt.....	77
Abb. 8.3 Produkt aus Blendbeleuchtungsstärke und Leuchtdichte des <i>Antiblendlichtes</i> zur Ermittlung der kritischen Entfernung bezüglich der Blendung; in den Versuchen hat sich herausgestellt, dass dies nicht der relevante Faktor für den Schwellenkontrast des Fahrzeugführers ist.....	78
Abb. 8.4 Regelkurve des <i>Antiblendlichtes</i> bei verschiedenen Endniveaus der Leuchtdichte.....	78
Abb. 8.5 Leuchtdichtebild des <i>Antiblendlichtes</i> , am oberen Bildrand sind die einzelnen LEDs zu erkennen die zur Lichterzeugung verwendet werden.....	79

Abb. B.1	Prüfbogen für das Kontrast Screening.....	108
Abb. B.2	Erster Teil des Prüfbogens G25/LKW zur Bestimmung des Visus im Fernbereich, der Phorie, der Stereopsie und des Farbsehens...	109
Abb. B.3	Zweiter Teil des Prüfbogens G25/LKW zur Bestimmung des Visus im Nahbereich.....	110
Abb. C.1	Vorfeldausleuchtung durch die Fahrzeugscheinwerfer; die Skala im rechten Bild zeigt die farbige Einteilung von Bereichen derselben Leuchtdichte, gemessen in cd/m^2 ; für die durch das gestrichelte Rechteck gekennzeichnete Region ergibt sich ein Mittelwert in der Leuchtdichte von $1,994 \text{ cd}/\text{m}^2$; Referenzmessung vom 18.11.2009.....	111
Abb. C.2	Vorfeldausleuchtung durch das Scheinwerferrack; der Mittelwert des Rechteckes liegt bei $2,123 \text{ cd}/\text{m}^2$; gut erkennbar ist die fehlende, das Messergebnis verfälschende Beleuchtung des LCD-TV; aufgenommen am 18.11.2009.....	111
Abb. C.3	Leuchtdichtebild des Scheinwerferracks vom 25.11.2009.....	112
Abb. C.4	Leuchtdichtebild des Scheinwerferracks vom 01.12.2009.....	112
Abb. C.5	Leuchtdichtebild des Scheinwerferracks vom 17.12.2009.....	113
Abb. D.1	Erster Teil des Fragebogens: Fragen zur Person des Probanden.....	114
Abb. D.2	Zweiter Teil des Fragebogens: Situation im Versuch ohne Blendung.....	115
Abb. D.3	Dritter Teil des Fragebogens: Fragen zu den beiden Blendsituationen.....	116
Abb. D.4	Vierter Teil des Fragebogens: Allgemeine Fragen bezüglich des <i>Antiblendlichtes</i>	117
Abb. D.5	Fünfter Teil des Fragebogens: Feedback über die Durchführung des Versuches.....	118
Abb. E.1	Aufnahmen der zur Bestimmung der durchschnittlichen Breite einer Landstraße hinzugezogenen Straßen; weiterhin kann den Bildern die Lage der Straße und die jeweilige Breite entnommen werden.....	122

Tabellenverzeichnis

Tab. 3.1	Adaptionsbereiche des Auges und dabei aktives Empfängerelement [HEN06].....	15
Tab. 3.2	DeBoer Skala.....	18
Tab. 3.3	Wirkung von Farben [RIC09].....	21
Tab. 6.1	Bestimmung der durchschnittlichen Breite einer Landstraße.....	45
Tab. 7.1	Ergebnisse des Kolmogorov-Smirnov Tests zur Prüfung der Zufallsvariablen Schwellenkontrast auf das Vorliegen einer Normalverteilung; N ist die Anzahl der Messwerte, D die maximale Distanz der Zufallsvariablen zur Normalverteilung und P die Wahrscheinlichkeit, mit der die Nullhypothese angenommen werden kann....	63
Tab. 7.2	Ergebnisse des Wilcoxon-Testes für das Szenario ohne Blendung durch den Gegenverkehr.....	64
Tab. 7.3	Ergebnisse des Wilcoxon-Testes für das Szenario mit Blendung durch den Gegenverkehr in 15 m Entfernung.....	64
Tab. 7.4	Ergebnisse des Wilcoxon-Testes für das Szenario mit Blendung durch den Gegenverkehr in 50 m Entfernung.....	64
Tab. F.1	Gemessene Blendbeleuchtungsstärke; Abstand zwischen Fahrerauge und entgegenkommendem Auto; Horizontaler Winkel, der zwischen der Normalen zur Ebene des Auges und der Gerade durch das Auge und das entgegenkommende Fahrzeug gemessen wird.....	121
Tab. G.1	Messwerte der Leuchtdichte in Abhängigkeit der Beleuchtungsstärke an den Sensoren des <i>Antiblendlichtes</i> für vier verschiedene Endniveaus der Helligkeitseinstellung.....	122
Tab. G.2	Strahldichte des <i>Antiblendlichtes</i> in Abhängigkeit der Wellenlänge.....	125
Tab. G.3	Leuchtdichte der Streuscheibe des <i>Antiblendlichtes</i> in Abhängigkeit des horizontalen Winkels zur Lichtquelle.....	126
Tab. G.4	Bestimmung des Winkels α zwischen der Horizontalen und der Verbindungsstrecke Auge- <i>Antiblendlicht</i> ; in der letzten Zeile sind die Mittelwerte des Winkels sowie der Strecken x und y aufgelistet.....	127
Tab. H.1	Graustufen von 0 bis 255 und die ermittelten zugehörigen Kontrastwerte nach Weber.....	128
Tab. I.1	Im Hauptversuch ermittelte Graustufen-Schwellwerte.....	130

Tab. I.2	Schwellenkontrastwerte, die mittels der Umrechnungstabelle in (Anhang H.1) aus den Graustufen errechnet werden.....	132
Tab. I.3	Deskriptive Statistik der einzelnen Szenarien; die Perzentile bezeichnen den Anteil der Messwerte, der kleiner als der entsprechende Perzentil-Wert ist; die Kurtosis ist die „Spitzigkeit“ der Verteilungsfunktion; die Schiefe zeigt die Neigung der Verteilung nach links oder rechts im Vergleich zur Normalverteilung auf.....	133
Tab. J.1	Rohdaten des Fragebogens: Geschlecht, Alter, Sehhilfe, Fahrerfahrung, Eigenes Fahrzeug.....	134
Tab. J.2	Rohdaten des Fragebogens: Fahrleistung, Verteilung der Fahrten auf Autobahnen, Landstraßen und innerorts.....	135
Tab. J.3	Rohdaten des Fragebogens: F3-F9 (siehe Anhang D).....	136
Tab. J.4	Rohdaten des Fragebogens: Fragen 10-15 (siehe Anhang D).....	137
Tab. J.5	Rohdaten des Fragebogens: Fragen 16-20 (siehe Anhang D).....	138
Tab. J.6	Rohdaten des Fragebogens: Fragen 21-25 (siehe Anhang D).....	139
Tab. K.1	Ergebnisse der optometrischen Vermessung; 1: nein, 2: ja.....	140
Tab. K.2	Ergebnisse der optometrischen Vermessung; 1: nein, 2: ja.....	141
Tab. K.3	Ergebnisse der optometrischen Vermessung; 1: nein, 2: ja.....	142

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbstständig und nur unter Verwendung der zulässigen Hilfsmittel verfasst habe. Die verwendeten Quellen sind vollständig im Literaturverzeichnis angegeben.

Karlsruhe, den 26.02.2010

Steffen Michenfelder

Danksagung

Ich möchte mich an dieser Stelle ganz besonders bei meinem Betreuer Christian Jebas für die fachkundige und tatkräftige Unterstützung bedanken, die maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat.

Weiterhin danke ich Prof. Dr-Ing. Cornelius Neumann dafür, dass ich diese Arbeit an seinem Lehrstuhl durchführen konnte und natürlich für seine wertvollen fachlichen Beiträge. Ein ganz besonderes Dankeschön gilt auch Herrn Dr.-Ing. Klaus Trampert.

Ich möchte außerdem meinen Lektoren für ihre unermüdliche Beharrlichkeit bei der Korrektur sowie meinen Eltern für ihre wertvolle Unterstützung während meines Studiums danken.

Thesen

- (1) Die Scheinwerfer eines entgegenkommenden Autos führen zu einer subjektiv empfundenen psychologischen Blendung.
- (2) Durch die Verwendung der adaptiven ambienten Innenraumbeleuchtung *ABL*[®] verringert sich die psychologische Blendung.
- (3) Die Erkennbarkeit von Objekten außerhalb des Fahrzeuges wird subjektiv durch die adaptive ambiente Innenraumbeleuchtung *ABL*[®] nicht verändert.
- (4) Der Schwellenkontrast steigt bei Blendung durch den Gegenverkehr an.
- (5) Eine Verwendung der adaptiven ambienten Innenraumbeleuchtung führt ohne und mit Blendung durch den Gegenverkehr zu keiner signifikanten Veränderung des Schwellenkontrastes.
- (6) Der Schwellenkontrast wird durch die Blendung aufgrund eines entgegenkommenden Fahrzeuges deutlich erhöht.

Abstract Deutsch

Ziel

Im nächtlichen Straßenverkehr kommt es durch abrupte Wechsel des Leuchtdichteniveaus im Gesichtsfeld zur physiologischen Blendung. Diese senkt die Erkennungsrate von Objekten wie Fußgängern oder Hindernissen und stellt damit eine ernst zu nehmende Gefahr dar. Die Firma *Uwe Braun GmbH* hat die adaptive ambiente Innenraumbeleuchtung *ABL*[®] entwickelt, die durch eine Voradaptation des Auges die Dauer und die negativen Folgen der physiologischen Blendung verringern soll. Gegenstand dieser Arbeit ist es, die Auswirkungen zu bestimmen, die sich aufgrund des Einsatzes des *ABL*[®] auf das Kontrastsehen des Fahrzeugführers ergeben.

Material und Methode

In einem Feldversuch wird an 32 Probanden im Alter zwischen 34 und 60 Jahren der Einfluss des *ABL*[®] auf den Schwellenkontrast bestimmt. Dazu wird anhand von drei Szenarien (ohne Blendung, Blendung in 15 m und in 50 m Entfernung) der Paarvergleich „mit und ohne *ABL*[®]“ durchgeführt. Die Probanden müssen dabei nachts ein auf einem Bildschirm dargebotenes Sehobjekt detektieren. Damit wird der zum jeweiligen Szenario korrespondierende Schwellenkontrastwert ermittelt. Die optometrische Eignung der Probanden wird vorab in einem Screening Test überprüft. Die subjektiven Eindrücke werden in einem Fragebogen aufgenommen.

Ergebnisse

Ein signifikanter Unterschied des Schwellenkontrastes durch die Verwendung der adaptiven ambienten Innenraumbeleuchtung *ABL*[®] kann bei allen drei Szenarien widerlegt werden. Die Absolutwerte des Schwellenkontrastes sind dabei erwartungsgemäß höher, wenn eine Blendung durch den Gegenverkehr vorliegt. Die subjektiv wahrgenommene psychologische Blendung ist tendenziell geringer, wenn das *ABL*[®] verwendet wird.

Schlussfolgerung

Die Verwendung der adaptiven ambienten Innenraumbeleuchtung *ABL*[®] führt nicht zu einem verringerten Kontrastsehen des Fahrzeugführers. Die psychologische Blendung wird durch das *ABL*[®] tendenziell leicht verringert.

Schlüsselwörter

Adaptive ambiente Innenraumbeleuchtung *ABL*[®], physiologische Blendung, psychologische Blendung, Schwellenkontrast

Abstract English

Purpose

While driving at night, physiological glare occurs due to rapid changes of the luminance level in the field of view. Due to that the detection rate of objects like pedestrians or obstacles is downsized and the accident hazard is enhanced. The company *Uwe Braun GmbH* has developed the adaptive ambient interior lighting *ABL*[®] that shall reduce the duration and the negative consequences of the physiological glare by adapting earlier the eye of the driver. The topic of this study is to determine the effects regarding contrast vision caused by the using of the *ABL*[®].

Materials and Methods

With the help of 32 test persons that are between 34 and 60 years old the influence of the *ABL*[®] on the contrast vision is determined in a field test. Therefore the pair comparison “with and without *ABL*[®]” is made in three scenarios (without glare, glare in a distance of 15 m and 50 m). The test persons have to detect a visual object that is shown on a TV screen at night. The contrast vision is calculated from the time a test person needs for detection. In advance the optometric appropriateness is proved in a screening test. The subjective impressions are recorded in a questionnaire.

Results

A significant difference by using the adaptive ambient interior lighting *ABL*[®] can be disproved in all three scenarios. The absolute values of the contrast vision are, as expected, higher if there's a glare by the opposing traffic. The subjective appreciated psychological glare is slightly diminished by trend if the *ABL*[®] is used.

Conclusion

The use of the adaptive ambient interior lighting *ABL*[®] does not cause a diminished contrast vision of the driver. The psychological glare is slightly diminished by trend by using the *ABL*[®].

Key words

adaptive ambient interior lighting, psychological glare, physiological glare, contrast vision

Anhang

A Bedienungsanleitung der Software *Schweko*

1) Schweko Einstellungen

i. *Name des Probanden:*

- Hier kann man den Namen des Probanden bzw. den Bezeichner eingeben.
- Der in diesem Textfeld eingegebene Name wird an die einzelnen (*.wav)-Ausgabedateien vorne angehängt.
- Achtung, es sollten keine Leerzeichen und Sonderzeichen benutzt werden, da sonst keine Speicherung erfolgt. Die Software gibt eine entsprechende Warnmeldung aus.

ii. *Speicherort der Auswertung:*

- Hier wird der Ordner gewählt, in dem die Ausgabedateien abgelegt werden.
- Mithilfe des Buttons *Ordner wählen* kann der entsprechende Ordner gewählt und/oder ein neuer Ordner erstellt werden.
- Achtung, es sollten keine Leerzeichen und Sonderzeichen im Pfad benutzt werden, sonst erfolgt keine Speicherung (Warnmeldung im Programm).

iii. *Bild-Intervalldauer:*

- Hiermit kann die Darbietungszeit der einzelnen Bilder (in Sekunden) eingestellt werden.

iv. *Aufnahmedauer:*

- Hier kann eingestellt werden, wie lange (in Millisekunden) eine Tonaufnahme sein soll. Die Aufnahme erfolgt über den Mikrofoneingang des Rechners.

v. *Anzahl der Testdurchläufe:*

- Hiermit bestimmt man, wie oft der Test hintereinander ausgeführt werden soll, ohne dass das Einstellungsmenü im Ablauf wieder erscheint.

- Die entsprechende Durchlaufnummer bzw. Durchlaufzahl wird der entsprechenden Ausgabedatei angehängt.
- Durch die Anwahl des Buttons *START* wird die Testumgebung eingeblendet und der Test kann mit den entsprechenden Einstellungen beginnen.

2) Anleitung zum Testumgebung

- Nach der Wahl des Buttons *START* wird die Testumgebung mit dem *Startscreen* eingeblendet.
- Sobald der Proband die Leertaste oder die linke Maustaste drückt, werden die Bilder aus den *Playlists* auf dem Bildschirm ausgegeben.
- Dabei wird aus jeder *Playlist* ein einzelnes Bild per Zufall ausgewählt. Die Abfolge der einzelnen Playlists wird in der *Mainlist* festgelegt, welche im *Data-Ordner* zu finden ist.
- Im *Data-Ordner* findet man außerdem die einzelnen Playlists mit den zugehörigen Bildern und die Bilder für den *Startscreen* und den *Endscreen*.
- Sobald der Proband das aktuelle Bild erkannt hat, muss er wieder die Leertaste oder die linke Maustaste drücken.
- Die Audioaufnahme wird aktiv und der Proband hat gemäß der Einstellung im *Einstellungsmenü* eine gewisse Zeit, in das Mikrofon zu sprechen.
- Anschließend wird das *Endscreen*-Bild eingeblendet.
- Je nachdem, wie viele Testdurchläufe eingestellt wurden, wiederholt sich dieser Test entsprechend oft.
- Ist die Anzahl der Testdurchläufe erreicht, erscheint wieder das *Einstellungsmenü*.

3) Anleitung für die Einbindung von Bildern

- Es können beliebige Bilder im *.jpg Format eingebunden werden.
- Dazu müssen die gewünschten Bilder in den *Data-Ordner* des Programmverzeichnisses abgelegt werden und der exakte Name der Bilddateien ohne *.jpg Endung in eine Textdatei (*.txt) eingetragen werden.
- Es können beliebig viele Textdateien (*Playlists*) mit beliebig vielen Bildeinträgen in den *Data-Ordner* abgelegt werden.
- Die einzelnen Textdateien (*Playlists*) müssen anschließend noch in der gewünschten Reihenfolge (die Dateien werden zeilenweise von oben nach unten abgearbeitet) ohne *.txt Endung in die *Mainlist.txt* eingetragen werden.

B Prüfbögen zur optometrischen Vermessung der Probanden

Sehtest Kontrast Screening (Rodatest 300/302)

Name		Datum	
Vorname		Prüfer/ Stempel	
Straße/ Nr.			
PLZ/ Ort			
Geburtsdatum	Geschlecht		
Sehhilfe <input type="checkbox"/> keine <input type="checkbox"/> Nahbrille <input type="checkbox"/> Fernbrille <input type="checkbox"/> Mehrstärkenbrille		<input type="checkbox"/> Gleitsichtbrille <input type="checkbox"/> Spez. Bildschirmbrille <input type="checkbox"/> Kontaktlinsen <input type="checkbox"/> Sehhilfe getönt	

Kontrasttest (ohne Blendung)		Blendempfindlichkeit (mit Blendung)	
1	Kontrast 40% Mindestanf. >50 Jahre	31 Visus 0.16	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
2	Kontrast 10% Mindestanf. >50 Jahre	29 Visus 0.16	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
3	Kontrast 5% Mindestanf. >50 Jahre	20 Visus 0.16	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
4	Kontrast 40% Mindestanf. >50 Jahre	31 Visus 0.16	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
5	Kontrast 10% Mindestanf. >50 Jahre	29 Visus 0.16	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
6	Kontrast 5% Mindestanf. >50 Jahre	20 Visus 0.16	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

Abbildung B.1

Prüfbogen für das Kontrast Screening



Sehtest G25/ FeV Gruppe 2 (Rodatest 300/302)

<p>Name <input type="text"/></p> <p>Vorname <input type="text"/></p> <p>Straße/ Nr. <input type="text"/></p> <p>PLZ/ Ort <input type="text"/></p> <p>Geburtsdatum <input type="text"/></p> <p style="text-align: center;">Geschlecht <input type="checkbox"/> m <input type="checkbox"/> w</p>	<p><input type="checkbox"/> Erstuntersuchung</p> <p><input type="checkbox"/> Nachuntersuchung</p> <p>Sehhilfe</p> <p><input type="checkbox"/> keine <input type="checkbox"/> Gleitsichtbrille</p> <p><input type="checkbox"/> Nahbrille <input type="checkbox"/> Spez. Bildschirmbrille</p> <p><input type="checkbox"/> Fernbrille <input type="checkbox"/> Kontaktlinsen</p> <p><input type="checkbox"/> Mehrstärkenbrille <input type="checkbox"/> Sehhilfe getönt</p>	<p>Datum <input type="text"/></p> <p style="text-align: center; height: 100px;">Prüfer/ Stempel</p>
--	--	---

<p>1 Sehschärfe</p> <table style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 10%;">0.5</td> <td style="width: 10%;">1</td> <td style="width: 10%;"><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>0.63</td> <td>2</td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>0.8</td> <td>3</td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>1.0</td> <td>4</td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>1.25</td> <td>5</td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> </table> <p style="text-align: center;">Rechtes Auge</p>	0.5	1	<input type="checkbox"/>	0.63	2	<input type="checkbox"/>	0.8	3	<input type="checkbox"/>	1.0	4	<input type="checkbox"/>	1.25	5	<input type="checkbox"/>	<p>1A Sehschärfe</p> <table style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 10%;">0.2</td> <td style="width: 10%;">1</td> <td style="width: 10%;"><input type="checkbox"/></td> <td style="width: 10%;"><input type="checkbox"/></td> <td style="width: 10%;"><input type="checkbox"/></td> <td style="width: 10%;"><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>0.2</td> <td>2</td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>0.32</td> <td>3</td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>0.32</td> <td>4</td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> </table> <p style="text-align: center;">Rechtes Auge</p>	0.2	1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0.2	2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0.32	3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0.32	4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																																			
0.5	1	<input type="checkbox"/>																																																																									
0.63	2	<input type="checkbox"/>																																																																									
0.8	3	<input type="checkbox"/>																																																																									
1.0	4	<input type="checkbox"/>																																																																									
1.25	5	<input type="checkbox"/>																																																																									
0.2	1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																																																																						
0.2	2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																																																																						
0.32	3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																																																																						
0.32	4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																																																																						
<p>2 Sehschärfe</p> <table style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 10%;">0.5</td> <td style="width: 10%;">1</td> <td style="width: 10%;"><input type="checkbox"/></td> <td style="width: 10%;"><input type="checkbox"/></td> <td style="width: 10%;"><input type="checkbox"/></td> <td style="width: 10%;"><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>0.63</td> <td>2</td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>0.8</td> <td>3</td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>1.0</td> <td>4</td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>1.25</td> <td>5</td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> </table> <p style="text-align: center;">Linkes Auge</p>	0.5	1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0.63	2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0.8	3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	1.0	4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	1.25	5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<p>2A Sehschärfe</p> <table style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 10%;">0.2</td> <td style="width: 10%;">1</td> <td style="width: 10%;"><input type="checkbox"/></td> <td style="width: 10%;"><input type="checkbox"/></td> <td style="width: 10%;"><input type="checkbox"/></td> <td style="width: 10%;"><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>0.2</td> <td>2</td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>0.32</td> <td>3</td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>0.32</td> <td>4</td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> </table> <p style="text-align: center;">Linkes Auge</p>	0.2	1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0.2	2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0.32	3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0.32	4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																				
0.5	1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																																																																						
0.63	2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																																																																						
0.8	3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																																																																						
1.0	4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																																																																						
1.25	5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																																																																						
0.2	1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																																																																						
0.2	2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																																																																						
0.32	3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																																																																						
0.32	4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																																																																						
<p>3 Sehschärfe</p> <table style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 10%;">0.5</td> <td style="width: 10%;">1</td> <td style="width: 10%;"><input type="checkbox"/></td> <td style="width: 10%;"><input type="checkbox"/></td> <td style="width: 10%;"><input type="checkbox"/></td> <td style="width: 10%;"><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>0.63</td> <td>2</td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>0.8</td> <td>3</td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>1.0</td> <td>4</td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>1.25</td> <td>5</td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> </table> <p style="text-align: center;">Binokular</p>	0.5	1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0.63	2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0.8	3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	1.0	4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	1.25	5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<p>3A Sehschärfe</p> <table style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 10%;">0.2</td> <td style="width: 10%;">1</td> <td style="width: 10%;"><input type="checkbox"/></td> <td style="width: 10%;"><input type="checkbox"/></td> <td style="width: 10%;"><input type="checkbox"/></td> <td style="width: 10%;"><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>0.2</td> <td>2</td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>0.32</td> <td>3</td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>0.32</td> <td>4</td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> </table> <p style="text-align: center;">Binokular</p>	0.2	1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0.2	2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0.32	3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0.32	4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																				
0.5	1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																																																																						
0.63	2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																																																																						
0.8	3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																																																																						
1.0	4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																																																																						
1.25	5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																																																																						
0.2	1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																																																																						
0.2	2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																																																																						
0.32	3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																																																																						
0.32	4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																																																																						

<p>4 Phorie</p> <p style="text-align: center;">Punkt innerhalb des Rahmens?</p> <p style="text-align: center;">nein <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/></p>	<p>Gesichtsfeld normal?</p> <p>Die Grundsätze G25 und G41 sowie die Fahrerlaubnisverordnung sehen eine Untersuchung des Gesichtsfeldes vor.</p> <p>Für diese Untersuchungen bietet die Vistec AG die automatischen Perimeter, Perivist FeV und Perivist Compact an. Falls Sie die Geräte gerne kennen lernen möchten oder Informationen zu den Untersuchungsvorschriften benötigen, nehmen Sie ganz einfach Kontakt auf unter:</p> <p>Telefon: 0 81 42/4 48 57-60 Fax: 0 81 42/4 48 57-70 Email: info@vistec-ag.de</p>
---	---

<p>5 Stereopsis</p> <table style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 30%;">35"</td> <td style="width: 30%;">5 unten vor 3 unten</td> <td style="width: 40%;"><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>100"</td> <td>3 unten vor 4 oben</td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>200"</td> <td>4 oben vor 2 oben</td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>600"</td> <td>Stereosehen vorhanden</td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> </table>	35"	5 unten vor 3 unten	<input type="checkbox"/>	100"	3 unten vor 4 oben	<input type="checkbox"/>	200"	4 oben vor 2 oben	<input type="checkbox"/>	600"	Stereosehen vorhanden	<input type="checkbox"/>	<p>6 Farbensinn</p> <table style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 30%;">Farbsinnstörung</td> <td style="width: 40%;">Farbnormal</td> <td style="width: 30%;"></td> </tr> <tr> <td>6.1 ~21" oder nicht lesbar</td> <td>~74"</td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>6.2 nicht oder falsch lesbar</td> <td>~16"</td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>6.3 nicht oder falsch lesbar</td> <td>~6"</td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>6.4 ~3" oder nicht lesbar</td> <td>~8"</td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> </table>	Farbsinnstörung	Farbnormal		6.1 ~21" oder nicht lesbar	~74"	<input type="checkbox"/>	6.2 nicht oder falsch lesbar	~16"	<input type="checkbox"/>	6.3 nicht oder falsch lesbar	~6"	<input type="checkbox"/>	6.4 ~3" oder nicht lesbar	~8"	<input type="checkbox"/>
35"	5 unten vor 3 unten	<input type="checkbox"/>																										
100"	3 unten vor 4 oben	<input type="checkbox"/>																										
200"	4 oben vor 2 oben	<input type="checkbox"/>																										
600"	Stereosehen vorhanden	<input type="checkbox"/>																										
Farbsinnstörung	Farbnormal																											
6.1 ~21" oder nicht lesbar	~74"	<input type="checkbox"/>																										
6.2 nicht oder falsch lesbar	~16"	<input type="checkbox"/>																										
6.3 nicht oder falsch lesbar	~6"	<input type="checkbox"/>																										
6.4 ~3" oder nicht lesbar	~8"	<input type="checkbox"/>																										

Abbildung B.2

Erster Teil des Prüfbogens G25/LKW zur Bestimmung des Visus im Fernbereich, der Phorie, der Stereopsie und des Farbensehens

C Aufnahmen der Leuchtdichteverteilung im Fahrzeug-Vorfeld

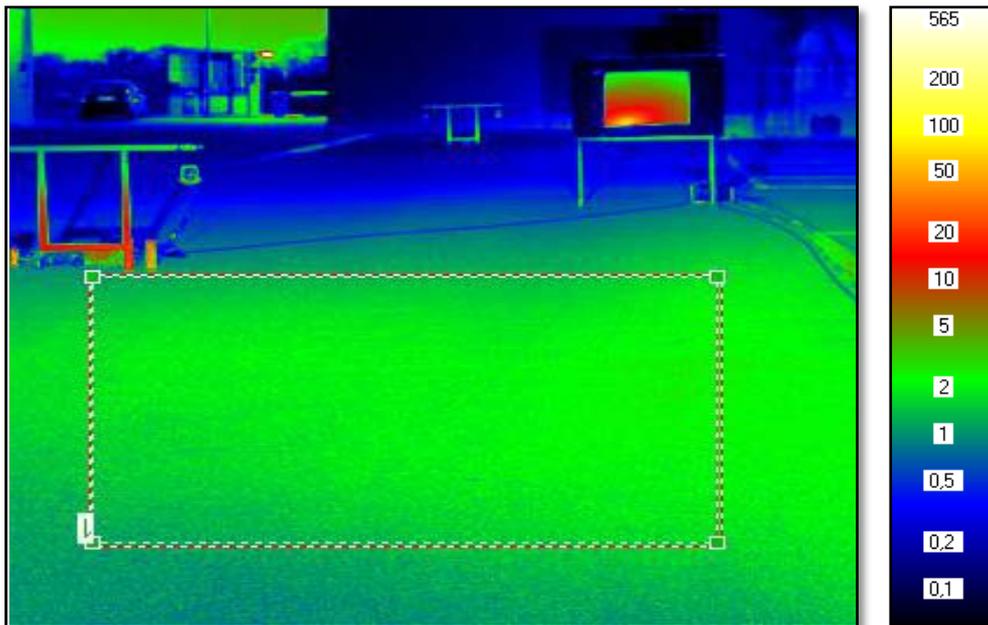


Abbildung C.1

Vorfeldausleuchtung durch die Fahrzeugscheinwerfer; die Skala im rechten Bild zeigt die farbige Einteilung von Bereichen derselben Leuchtdichte, gemessen in cd/m^2 ; für die durch das gestrichelte Rechteck gekennzeichnete Region ergibt sich ein Mittelwert in der Leuchtdichte von $1,994 \text{ cd/m}^2$; Referenzmessung vom 18.11.2009

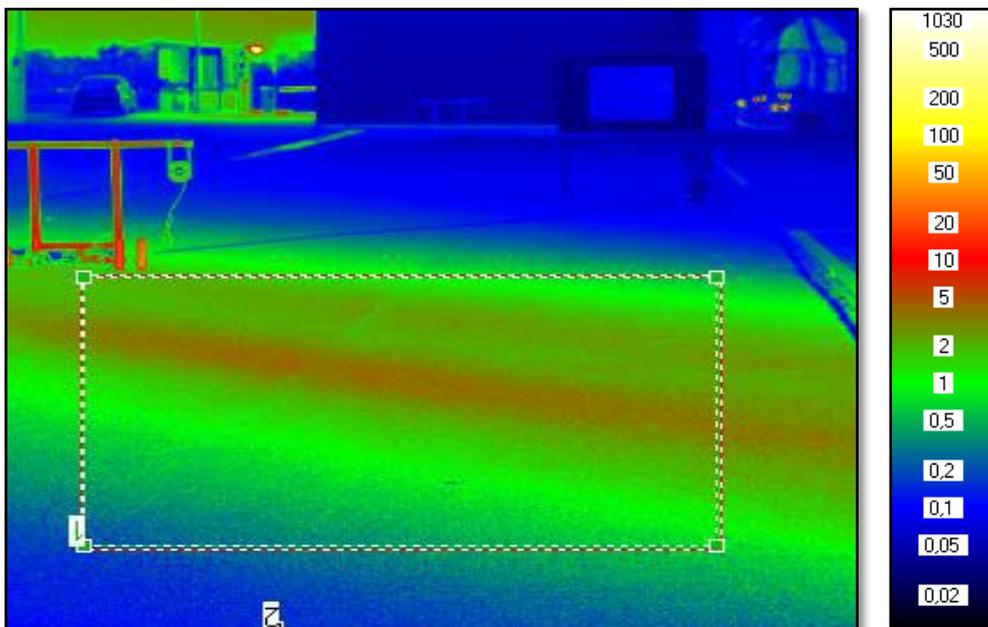
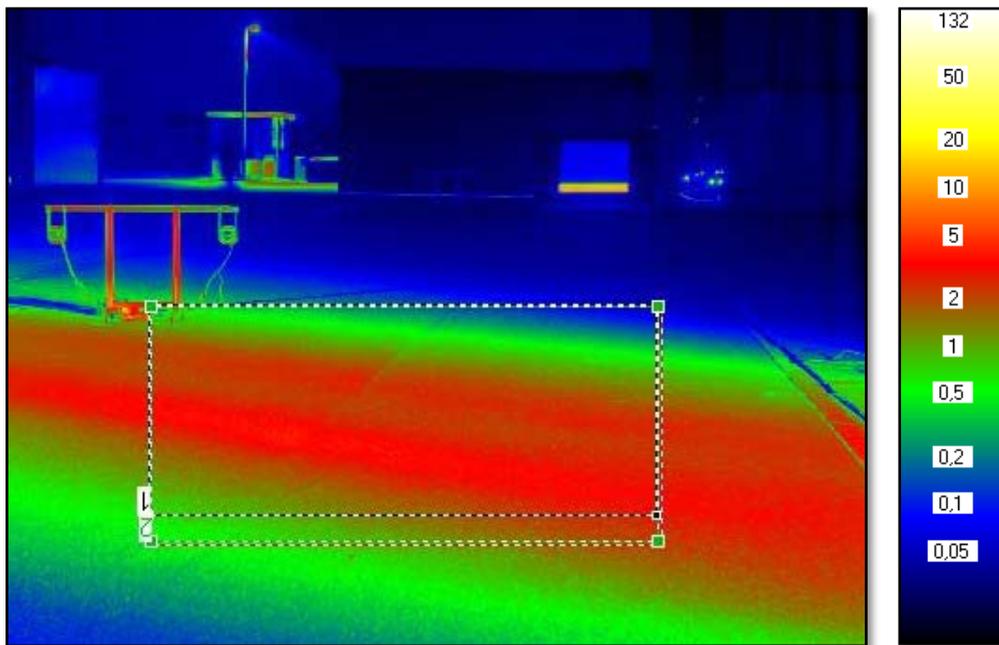
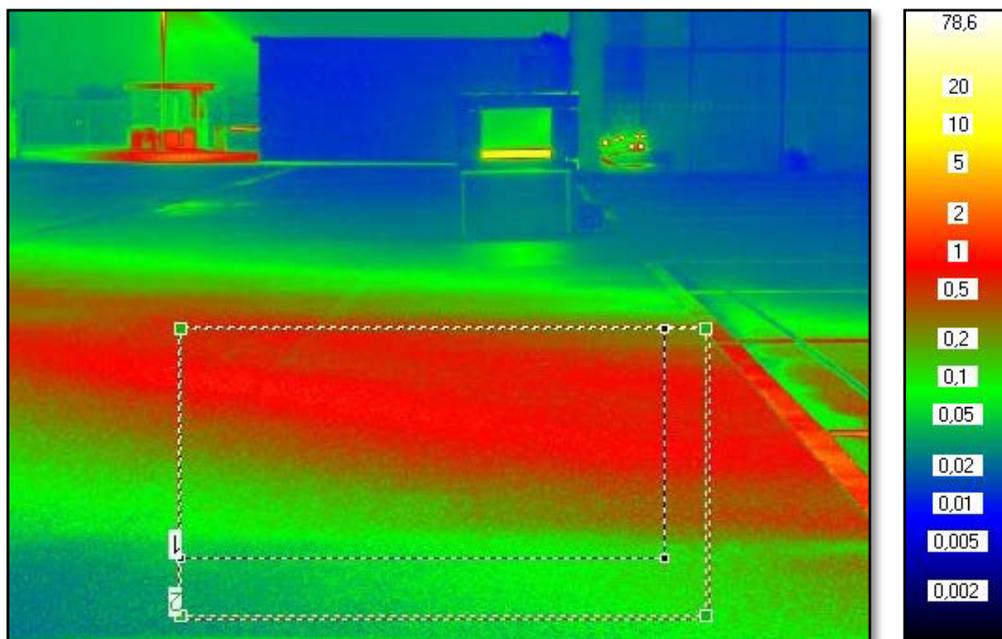


Abbildung C.2

Vorfeldausleuchtung durch das Scheinwerferrack; der Mittelwert des Rechteckes liegt bei $2,123 \text{ cd/m}^2$; gut erkennbar ist die fehlende, das Messergebnis verfälschende Beleuchtung des LCD-TV; aufgenommen am 18.11.2009

**Abbildung C.3**

Leuchtdichtebild des Scheinwerferracks vom 25.11.2009

**Abbildung C.4**

Leuchtdichtebild des Scheinwerferracks vom 01.12.2009

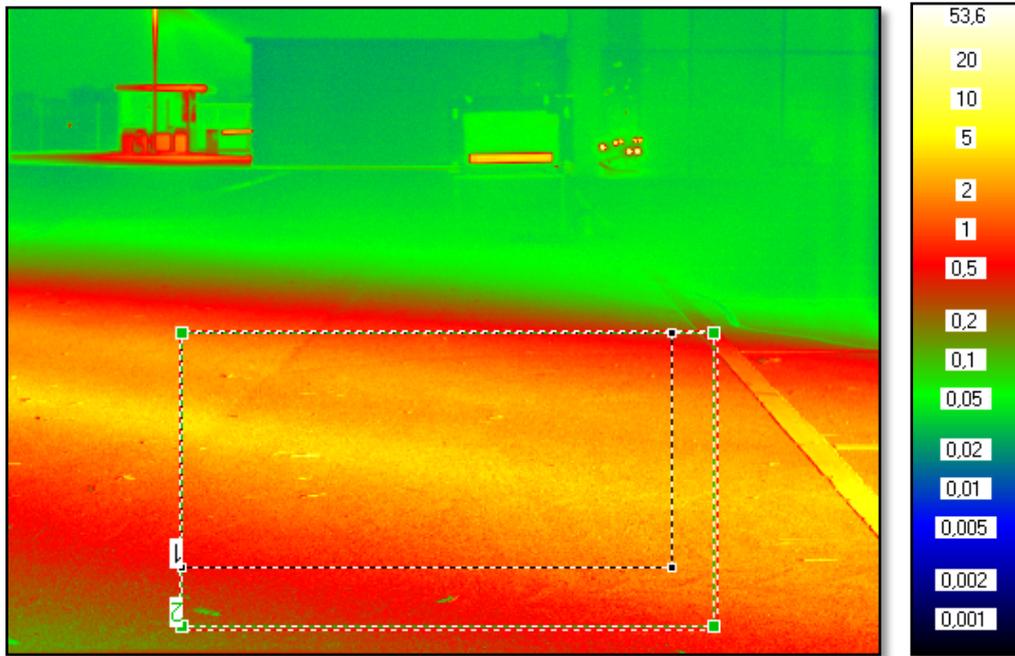


Abbildung C.5

Leuchtdichtebild des Scheinwerferracks vom 17.12.2009

D Fragebogen

Angaben zum Probanden		
Geschlecht:		
Alter:		
Sehhilfe (wenn ja, Kontaktlinsen oder Brille?):		
Fahrerfahrung (in Jahren):		
Besitzen Sie ein eigenes Fahrzeug? Wenn ja, welcher Art?		
Wie oft fahren Sie mit dem Auto? (Zutreffendes bitte ankreuzen)		
täglich <input type="checkbox"/>	2-3 Mal pro Woche <input type="checkbox"/>	seltener <input type="checkbox"/>
Wie hoch schätzen Sie Ihre jährliche Fahrleistung?		
< 5000 km <input type="checkbox"/>	5000-15000 km <input type="checkbox"/>	15000-25000 km <input type="checkbox"/>
25000-35000 km <input type="checkbox"/>	> 35000 km <input type="checkbox"/>	
Schätzen Sie bitte die Anteile Ihrer Fahrten auf Autobahnen, Landstraßen oder innerorts ab (in Prozent, Gesamtsumme soll 100% ergeben).		
Autobahn:	Landstraße:	Innerorts:
Wie hoch ist der Anteil Ihrer Nachtfahrten im Sommer (in Prozent)?		
< 1% <input type="checkbox"/>	1-5% <input type="checkbox"/>	5-10% <input type="checkbox"/>
10-25% <input type="checkbox"/>	25-50% <input type="checkbox"/>	>50% <input type="checkbox"/>
Wie hoch ist der Anteil Ihrer Nachtfahrten im Winter (in Prozent)?		
0-5% <input type="checkbox"/>	5-10% <input type="checkbox"/>	10-25% <input type="checkbox"/>
25-50% <input type="checkbox"/>	50-75% <input type="checkbox"/>	>75% <input type="checkbox"/>

Abbildung D.1

Erster Teil des Fragebogens: Fragen zur Person des Probanden

<u>Ohne Gegenverkehr</u>						
Fühlten Sie sich durch das Antiblendlicht geblendet?						
<i>nein</i>	<i>etwas</i>	<i>deutlich</i>	<i>stark</i>	<i>unerträglich</i>		
1	2	3	4	5	6	7
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Hatten Sie das Gefühl, dass sie mit dem ABL mehr oder weniger von dem Sehzeichen auf dem Fernseh Bildschirm wahrgenommen haben?						
<i>weniger</i>	<i>etwas weniger</i>	<i>unverändert</i>	<i>etwas mehr</i>	<i>mehr</i>		
1	2	3	4	5	6	7
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Hat Sie das Antiblendlicht während des Versuches von Ihrer Aufgabe, das Sehzeichen auf dem Fernseher zu erkennen, abgelenkt?						
<i>nein</i>	<i>vernachlässigbar</i>	<i>ein wenig</i>	<i>deutlich</i>	<i>stark</i>		
1	2	3	4	5	6	7
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Hatten Sie das Gefühl, dass sie mit dem Antiblendlicht mehr oder weniger von der Umgebung außerhalb des Autos wahrgenommen haben?						
<i>weniger</i>	<i>etwas weniger</i>	<i>unverändert</i>	<i>etwas mehr</i>	<i>mehr</i>		
1	2	3	4	5	6	7
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Wie empfanden Sie das Antiblendlicht insgesamt?						
<i>angenehm</i>	<i>eher angenehm</i>	<i>neutral</i>	<i>eher störend</i>	<i>stört</i>		
1	2	3	4	5	6	7
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Abbildung D.2

Zweiter Teil des Fragebogens: Situation im Versuch ohne Blendung

<u>Mit Gegenverkehr</u>						
Wie hat sich das Antiblendlicht ausgewirkt? Haben Sie sich dadurch weniger oder stärker durch den Gegenverkehr geblendet gefühlt?						
<i>deutlich weniger</i>	<i>etwas weniger</i>		<i>keine Auswirkung</i>		<i>etwas stärker</i>	<i>deutlich stärker</i>
1	2	3	4	5	6	7
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Fühlten Sie sich durch das Antiblendlicht geblendet?						
<i>nein</i>		<i>etwas</i>	<i>deutlich</i>		<i>stark</i>	<i>unerträglich</i>
1	2	3	4	5	6	7
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Empfanden Sie das Auf- und Ableuchten des Antiblendlichtes als störend?						
<i>nein</i>	<i>noch akzeptabel</i>		<i>etwas störend</i>		<i>sehr störend</i>	<i>inakzeptabel</i>
1	2	3	4	5	6	7
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Hat Sie das Antiblendlicht während des Versuches von Ihrer Aufgabe, das Sehzeichen auf dem Fernseher zu erkennen, abgelenkt?						
<i>nein</i>	<i>vernachlässigbar</i>		<i>ein wenig</i>		<i>deutlich</i>	<i>stark</i>
1	2	3	4	5	6	7
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Haben Sie sich durch den Gegenverkehr (ohne Verwendung des Antiblendlichtes) geblendet gefühlt?						
<i>nein</i>		<i>etwas</i>	<i>deutlich</i>		<i>stark</i>	<i>unerträglich</i>
1	2	3	4	5	6	7
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Haben Sie sich bei Verwendung des Antiblendlichtes geblendet gefühlt?						
<i>nein</i>		<i>etwas</i>	<i>deutlich</i>		<i>stark</i>	<i>unerträglich</i>
1	2	3	4	5	6	7
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Wie empfanden Sie das Antiblendlicht insgesamt?						
<i>angenehm</i>	<i>sehr angenehm</i>		<i>neutral</i>		<i>sehr störend</i>	<i>störend</i>
1	2	3	4	5	6	7
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Abbildung D.3

Dritter Teil des Fragebogens: Fragen zu den beiden Blendsituationen

Allgemeine Fragen zum Versuch

Was hat Sie bei Einsatz des Antiblendlichtes gestört (*Mehrfachnennungen möglich*)?

Dass man an der Decke eine ungewohnte leuchtende Fläche hat

Dass die Fläche ständig ihre Helligkeit geändert hat

Dass man weniger von der Umgebung erkennen konnte

Dass man sich stärker geblendet fühlte

Anderer Grund: _____

Können Sie sich vorstellen, dass man mit dem Antiblendlicht mehr von der Umgebung wahrnimmt (*mit Gegenverkehr*)?

nein ja keine Aussage möglich

Können Sie sich vorstellen, dass das Antiblendlicht zu einer erhöhten Aufmerksamkeit beziehungsweise zu einer verminderten Müdigkeit führen kann?

nein ja keine Aussage möglich

Können Sie sich vorstellen, das Antiblendlicht in Ihrem Fahrzeug anzubringen? Wenn nein, weshalb nicht?

nein, weil _____

ja

Abbildung D.4

Vierter Teil des Fragebogens: Allgemeine Fragen bezüglich des *Antibblendlichtes*

E Bestimmung der durchschnittlichen Breite einer Landstraße



Landstraße Zeutern-Östringen: 3,60 m



Landstraße Zeutern-Odenheim: 2,70 m



Landstraße Odenheim-Tiefenbach: 3,20 m



Landstraße Odenheim-Eichelberg: 3,00 m



Landstraße Schindelberg-Östringen: 3,05 m



Landstraße Mingolsheim-Östringen: 3,15 m



Landstraße Mingolsheim-Kronau: 3,28 m



Landstraße Weiher-Stettfeld: 3,11 m



Landstraße Langenbrücken: 3,00 m



Abbildung E.1

Aufnahmen der zur Bestimmung der durchschnittlichen Breite einer Landstraße hinzugezogenen Straßen; weiterhin kann den Bildern die Lage der Straße und die jeweilige Breite entnommen werden

F Beleuchtungsstärke bei Blendung durch den Gegenverkehr

Entfernung in m	Horizontaler Winkel in °	Beleuchtungsstärke in lx
5	31,80	2,25
10	17,22	5,50
15	11,68	5,70
20	8,81	4,55
25	7,07	4,10
27	6,55	3,75
29	6,10	3,35
31	5,71	3,00
33	5,37	2,65
35	5,06	2,45
37	4,79	2,22
39	4,54	2,01
41	4,32	1,84
43	4,12	1,68
45	3,94	1,55
47	3,77	1,45
49	3,62	1,40
50	3,55	1,33
51	3,48	1,30
53	3,35	1,20
55	3,23	1,15
57	3,11	1,09
59	3,01	1,04
61	2,91	1,00
63	2,82	0,95
65	2,73	0,91
67	2,65	0,88
69	2,57	0,83
71	2,50	0,79
73	2,43	0,77
75	2,37	0,72

Tabelle F.1

Gemessene Blendbeleuchtungsstärke; Abstand zwischen Fahrerauge und entgegenkommendem Auto; Horizontaler Winkel, der zwischen der Normalen zur Ebene des Auges und der Gerade durch das Auge und das entgegenkommende Fahrzeug gemessen wird

G.1 Regelverhalten des *Antiblendlichtes*

Beleuchtungsstärke in lx	Kurve			
	A in cd/m ²	B in cd/m ²	C in cd/m ²	D in cd/m ²
0	30,79	31,03	30,7	31,01
2,5	32,89	32,99	31,19	31,68
5	36,07	35,34	31,27	31,31
7,5	41,67	39,88	32,08	31,94
10	47,76	42,77	33,44	31,77
12,5	51,55	44,7	34,35	32,37
15	52,14	47,36	35,25	32,93
17,5	53,5	47,61	35,19	32,9
20	57,27	50,55	36,97	33,05
22,5	58,14	52,02	38,91	34,11
25	59,92	51,71	39,64	33,51
30	60,78	53,59	41,74	33,85
35	63,3	56,19	41,76	33,91
40	64,22	55,91	44,54	33,76
45	66,32	57,55	45,94	33,36
50	66,75	58,24	44,81	34,35
55	67,32	59,7	45,82	34,78
60	68,08	59,17	46,85	34,94
70	70,4	61,8	48,37	34,66
80	69,75	60,74	49,29	35,4
90	71,09	63,04	49,64	35,74
100	73,53	63,65	50,36	35,28
110	72,7	63,34	52,71	35,39
120	73,54	63,64	52,31	35,15

Tabelle G.1

Messwerte der Leuchtdichte in Abhängigkeit der Beleuchtungsstärke an den Sensoren des *Antiblendlichtes* für vier verschiedene Endniveaus der Helligkeitseinstellung

G.2 Spektrale Strahldichte

Wellenlänge in nm	Strahldichte in W/(sr*sqm*nm)	Wellenlänge in nm	Strahldichte in W/(sr*sqm*nm)	Wellenlänge in nm	Strahldichte in W/(sr*sqm*nm)
380	0	480	0,000192	633	6,548E-05
381	1,8042E-07	481	0,00017787	634	6,4727E-05
382	5,0145E-07	535	0,00015073	635	6,3465E-05
383	8,3552E-07	536	0,0001539	636	6,1427E-05
384	1,0695E-06	537	0,00015708	696	1,359E-05
385	1,0991E-06	538	0,00016023	697	1,3587E-05
386	8,5957E-07	539	0,00016333	698	1,3683E-05
387	4,6396E-07	540	0,00016635	699	1,3846E-05
388	8,1853E-08	541	0,00016955	700	1,3826E-05
389	0	542	0,00017259	701	1,3357E-05
390	0	543	0,00017544	702	1,2178E-05
391	4,9663E-07	544	0,00017806	703	1,0473E-05
392	1,2771E-06	545	0,00018036	704	8,8345E-06
393	2,1023E-06	546	0,00018269	705	7,873E-06
394	2,7658E-06	547	0,00018458	706	8,1078E-06
395	3,0718E-06	548	0,00018599	707	9,2219E-06
396	2,8976E-06	549	0,00018708	708	1,0526E-05
397	2,3399E-06	550	0,00018804	709	1,1322E-05
398	1,5612E-06	551	0,00018927	710	1,1139E-05
399	7,1784E-07	552	0,00019074	711	1,0296E-05
400	0	553	0,00019236	712	9,2459E-06
401	0	554	0,0001939	713	8,4593E-06
402	0	555	0,00019508	714	8,1189E-06
403	0	556	0,00019543	715	7,9892E-06
404	0	557	0,00019514	716	7,8161E-06
405	1,6015E-07	558	0,00019449	717	7,333E-06
406	1,1563E-06	559	0,00019376	718	6,6087E-06
407	2,2232E-06	560	0,00019327	719	5,9144E-06
408	3,1167E-06	561	0,00019313	720	5,5314E-06
409	3,6053E-06	562	0,00019323	721	5,6315E-06
410	3,4726E-06	563	0,00019334	722	5,934E-06
411	2,7254E-06	564	0,0001932	723	6,0495E-06
412	1,6831E-06	565	0,00019259	724	5,5864E-06
413	6,8897E-07	566	0,00019131	725	4,5387E-06
414	7,1961E-08	567	0,00018982	726	3,4259E-06
415	1,3568E-07	568	0,00018832	727	2,835E-06
416	8,7183E-07	569	0,000187	728	3,2524E-06
417	1,9535E-06	570	0,00018589	729	4,3382E-06
418	3,0445E-06	571	0,00018503	730	5,3427E-06
419	3,8147E-06	572	0,00018417	731	5,5028E-06
420	3,9719E-06	573	0,00018321	732	4,4517E-06
421	3,6096E-06	574	0,00018205	733	2,8179E-06
422	3,0841E-06	575	0,00018068	734	1,3913E-06
423	2,744E-06	576	0,00017905	735	9,3579E-07
424	2,9299E-06	577	0,00017716	736	1,5322E-06
425	3,9203E-06	578	0,00017502	737	2,7517E-06
426	5,6387E-06	579	0,00017269	738	4,1409E-06
427	7,8988E-06	580	0,00017024	739	5,292E-06
428	1,0513E-05	581	0,00016811	740	5,9665E-06
429	1,3301E-05	582	0,00016602	741	5,9543E-06
430	1,6177E-05	583	0,00016398	742	5,0695E-06
431	1,935E-05	584	0,00016197	743	3,5886E-06
432	2,3085E-05	585	0,00015997	744	2,1931E-06
433	2,7637E-05	586	0,00015818	745	1,5936E-06
434	3,3249E-05	587	0,0001564	746	2,1976E-06
435	4,0114E-05	588	0,00015469	747	3,3788E-06
436	4,8409E-05	589	0,00015311	748	4,2841E-06
437	5,8188E-05	590	0,00015171	749	4,0959E-06
438	6,9555E-05	591	0,0001502	750	2,8349E-06

439	8,2612E-05		592	0,00014874		751	1,1765E-06
440	9,7522E-05		593	0,00014718		752	0
441	0,00011468		594	0,00014539		753	0
442	0,00013416		595	0,00014327		754	0
443	0,00015617		596	0,00014091		755	0
444	0,00018095		597	0,0001385		756	4,9192E-07
445	0,00020873		598	0,00013618		757	1,0706E-06
446	0,00023999		599	0,00013407		758	1,3997E-06
447	0,00027486		600	0,00013208		759	1,2878E-06
448	0,00031359		601	0,00013006		760	7,6998E-07
449	0,00035589		602	0,00012788		761	2,1071E-07
450	0,0004001		603	0,00012542		762	8,3807E-09
451	0,0004449		604	0,0001228		763	4,503E-07
452	0,00048804		605	0,00012024		764	1,358E-06
453	0,00052773		606	0,00011797		765	2,4334E-06
454	0,00056275		607	0,00011618		766	3,3765E-06
455	0,00059243		608	0,00011478		767	3,9559E-06
456	0,0006154		609	0,00011344		768	3,9809E-06
457	0,00063176		610	0,00011183		769	3,2642E-06
458	0,00064101		611	0,00010982		770	1,9488E-06
459	0,00064321		612	0,0001072		771	6,41E-07
460	0,00063868		613	0,00010426		772	0
461	0,00062716		614	0,00010131		773	3,6702E-07
462	0,00060954		615	9,8653E-05		774	1,3047E-06
463	0,00058644		616	9,6289E-05		775	2,1476E-06
464	0,00055923		617	9,4229E-05		776	2,349E-06
465	0,00052936		618	9,2313E-05		777	1,9357E-06
466	0,00049854		619	9,038E-05		778	1,1944E-06
467	0,00046784		620	8,834E-05		779	4,3045E-07
468	0,00043807		621	8,6245E-05		780	0
469	0,0004096		622	8,4165E-05			
470	0,00038274		623	8,2173E-05			
471	0,00035812		624	8,0302E-05			
472	0,00033562		625	7,8484E-05			
473	0,00031492		626	7,6614E-05			
474	0,0002956		627	7,4629E-05			
475	0,00027721		628	7,2501E-05			
476	0,00025905		629	7,0399E-05			
477	0,00024125		630	6,8536E-05			
478	0,000224		631	6,7043E-05			
479	0,00020752		632	6,6121E-05			

Tabelle G.2Strahldichte des *Antiblendlichtes* in Abhängigkeit der Wellenlänge

G.3 Winkelabhängigkeit der Bewertung einer Beleuchtungsstärke

Horizontaler Winkel in °	Beleuchtungsstärke in cd/m ²	Horizontaler Winkel in °	Beleuchtungsstärke in cd/m ²
0	11,34	36	3,55
1	11,63	37	3,54
2	11,59	38	3,44
3	11,51	39	3,39
4	10,99	40	3,41
5	10,7	41	3,29
6	10,01	42	3,27
7	9,35	43	3,15
8	8,58	44	3,17
9	8,43	45	3,01
10	8,16	46	2,9
11	8,13	47	2,9
12	7,94	48	2,84
13	8	49	2,84
14	7,607	50	2,85
15	7,31	51	2,79
16	6,94	52	2,66
17	6,61	53	2,6
18	6,22	54	2,54
19	5,88	55	2,48
20	5,5	56	2,42
21	5,26	57	2,3
22	5,08	58	2,24
23	4,9	59	2,11
24	4,72	60	1,99
25	4,48	61	1,94
26	4,47	62	1,82
27	4,39	63	1,69
28	4,36	64	1,51
29	4,24	65	1,45
30	4,12	66	1,39
31	4,06	67	1,33
32	4	68	1,26
33	3,87	69	1,26
34	3,76	70	1,23
35	3,66		

Tabelle G.3

Leuchtdichte der Streuscheibe des *Antiblendlichtes* in Abhängigkeit des horizontalen Winkels zur Lichtquelle

G.4 Relative Lage des *Antiblendlichtes* zum Fahrerauge

Person	y in cm	x in cm	Winkel α in °
1	14	23	31,3
2	15	26	30,0
3	15	35	23,2
4	12	33	20,0
5	12	35	18,9
6	9	29	17,2
7	9	26	19,1
8	12	28	23,2
9	10	23	23,5
10	11	25	23,8
Mittelwert:	11,9	28,3	23,0

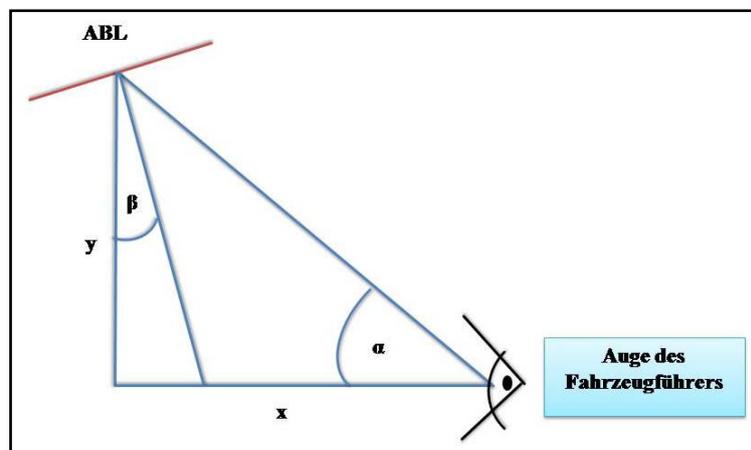


Tabelle G.4

Bestimmung des Winkels α zwischen der Horizontalen und der Verbindungsstrecke Auge-*Antiblendlicht*; in der letzten Zeile sind die Mittelwerte des Winkels sowie der Strecken x und y aufgelistet; im unteren Bild sind die geometrischen Zusammenhänge dargestellt

H Umrechnungstabelle Graustufe-Weberkontrast

Graustufe	255	254	253	252	251	250	249	248	247	246	245
Kontrast	25,148	24,851	24,623	24,405	24,256	24,039	23,870	23,671	23,503	23,243	23,015
Graustufe	244	243	242	241	240	239	238	237	236	235	234
Kontrast	22,908	22,687	22,506	22,270	22,105	21,946	21,736	21,525	21,335	21,053	20,875
Graustufe	233	232	231	230	229	228	227	226	225	224	223
Kontrast	20,703	20,507	20,365	20,162	19,945	19,798	19,661	19,442	19,299	19,103	18,915
Graustufe	222	221	220	219	218	217	216	215	214	213	212
Kontrast	18,774	18,625	18,449	18,290	18,110	17,950	17,818	17,661	17,488	17,320	17,210
Graustufe	211	210	209	208	207	206	205	204	203	202	201
Kontrast	16,930	16,765	16,646	16,435	16,258	16,129	15,996	15,815	15,675	15,518	15,357
Graustufe	200	199	198	197	196	195	194	193	192	191	190
Kontrast	15,195	15,061	14,909	14,777	14,612	14,436	14,336	14,192	14,010	13,866	13,712
Graustufe	189	188	187	186	185	184	183	182	181	180	179
Kontrast	13,601	13,437	13,304	13,132	13,014	12,863	12,744	12,607	12,486	12,357	12,208
Graustufe	178	177	176	175	174	173	172	171	170	169	168
Kontrast	12,052	11,933	11,817	11,698	11,552	11,434	11,319	11,205	11,090	10,958	10,827
Graustufe	167	166	165	164	163	162	161	160	159	158	157
Kontrast	10,694	10,576	10,440	10,322	10,162	10,021	9,902	9,741	9,620	9,482	9,317
Graustufe	156	155	154	153	152	151	150	149	148	147	146
Kontrast	9,160	9,005	8,873	8,759	8,621	8,466	8,346	8,225	8,102	7,965	7,845
Graustufe	145	144	143	142	141	140	139	138	137	136	135
Kontrast	7,731	7,610	7,490	7,395	7,286	7,158	7,045	6,946	6,828	6,718	6,606
Graustufe	134	133	132	131	130	129	128	127	126	125	124
Kontrast	6,474	6,359	6,249	6,154	6,042	5,933	5,827	5,681	5,549	5,515	5,413
Graustufe	123	122	121	120	119	118	117	116	115	114	113
Kontrast	5,321	5,219	5,115	5,031	4,960	4,865	4,790	4,700	4,618	4,536	4,413
Graustufe	112	111	110	109	108	107	106	105	104	103	102
Kontrast	4,335	4,235	4,148	4,073	3,994	3,909	3,812	3,741	3,651	3,591	3,508
Graustufe	101	100	99	98	97	96	95	94	93	92	91
Kontrast	3,434	3,359	3,292	3,217	3,157	3,088	3,015	2,951	2,882	2,823	2,766
Graustufe	90	89	88	87	86	85	84	83	82	81	80
Kontrast	2,700	2,649	2,559	2,497	2,440	2,372	2,306	2,262	2,196	2,134	2,086
Graustufe	79	78	77	76	75	74	73	72	71	70	69
Kontrast	2,050	1,994	1,946	1,898	1,847	1,813	1,780	1,686	1,662	1,613	1,566
Graustufe	68	67	66	65	64	63	62	61	60	59	58
Kontrast	1,513	1,465	1,416	1,363	1,317	1,272	1,227	1,182	1,145	1,107	1,070
Graustufe	57	56	55	54	53	52	51	50	49	48	47
Kontrast	1,047	1,013	0,978	0,942	0,906	0,880	0,853	0,818	0,789	0,752	0,723
Graustufe	46	45	44	43	42	41	40	39	38	37	36
Kontrast	0,696	0,659	0,624	0,595	0,564	0,538	0,511	0,486	0,462	0,434	0,412
Graustufe	35	34	33	32	31	30	29	28	27	26	25
Kontrast	0,391	0,375	0,350	0,331	0,312	0,292	0,292	0,272	0,257	0,238	0,216
Graustufe	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14
Kontrast	0,198	0,182	0,152	0,134	0,119	0,102	0,089	0,075	0,056	0,048	0,033
Graustufe	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3
Kontrast	0,021	0,010	0,000	-0,012	-0,021	-0,034	-0,044	-0,052	-0,061	-0,069	-0,082
Graustufe	2	1	0								
Kontrast	-0,102	-0,107	-0,114								

Tabelle H.1

Graustufen von 0 bis 255 und die ermittelten zugehörigen Kontrastwerte nach Weber

I.1 Ermittelte Graustufen

Ohne Blendung		Blendung in 15m		Blendung in 50m	
Ohne ABL	Mit ABL	Ohne ABL	Mit ABL	Ohne ABL	Mit ABL
20	17	28	27	35	29
23	24	31	30	38	32
24	26	30	34	40	33
56	56	62	67	53	65
57	56	70	70	58	60
64	62	73	71	61	60
71	73	71	59	74	76
86	76	76	72	71	73
76	75	86	76	76	75
37	44	60	61	91	88
43	47	64	66	96	94
44	50	68	70	104	100
47	47	60	58	79	77
53	53	64	59	82	81
54	54	70	59	82	82
40	34	59	56	84	86
45	41	63	64	87	87
		63	74	88	91
42	47	76	76	97	94
44	53	84	78	97	98
47	56	86	81	101	103
41	44	67	62	83	82
46	45	73	67	75	71
51	45	64	72	79	73
36	44	68	66	86	86
43	46	70	71	82	88
39	47	73	69	84	85
55	42	67	68	106	93
49	43	64	66	96	107
45	48	73	60	91	129
48	45	78	85	106	114
46	57	94	88	103	104
47	48	94	85	95	102
52	40	78	62	88	90
40	44	61	64	93	83
38	42	60	63	83	80
42	37	56	50	67	53
37	34	56	51	51	59
31	33	55	48	58	62
31	35	49	53	58	70
24	36	48	53	67	72
24	37	49	55	77	68
62	53	82	57	91	81
50	52	74	56	96	92
59	57	62	55	85	74
38	36	48	58	67	71
30	34	51	56	73	70

33	36	46	54	73	78
38	35	54	53	63	56
36	39	54	54	58	67
40	44	65	48	69	66
40	41	53	70	62	65
41	45	63	67	71	64
49	42	60	62	65	72
34	33	58	61	60	61
33	39	50	50	58	57
38	35	61	55	59	57
52	42	48	46	66	54
36	39	46	45	61	57
37	32	49	56	62	68
72	69			82	77
72	75	85	95	85	73
72	70	81	79	87	80
30	42	35	45	38	44
24	30	31	43	35	41
24	31	38	46	39	47
66	44	61	64	72	68
48	47	56	70	59	67
47	48	66	60	62	67
48	52	76	96	87	88
50	55	71	96	86	79
49	57	81	84	84	83
52	44	66	59	76	76
45	41	72	68	76	73
44	42	71	71	79	70
58	50	107	87	75	95
46	52	77	85	88	83
54	49	81	86	86	94
28	47	67	61	67	61
29	35	57	53	57	53
33	33	59	42		
65	48	80	77	86	89
70	51	97	72	96	82
52	60	97	90	91	98
45	48	80	107	98	95
45	49	103	93	174	94
43	43	97	95		
67	51	99	110	135	134
68	56	100	111	134	144
79	57	98	112	136	143
89	65	96	93	137	122
69	66	89	76	127	136
55	62	89	91	123	141
73	70	80	102	139	140
73	75	103	101	140	141
79	72	109	99		

Tabelle I.1

Im Hauptversuch ermittelte Graustufen-Schwellwerte

I.2 Ermittelte Schwellenkontraste

Ohne Blendung		Blendung in 15m		Blendung in 50m	
Ohne ABL	Mit ABL	Ohne ABL	Mit ABL	Ohne ABL	Mit ABL
0,119	0,075	0,272	0,257	0,391	0,292
0,182	0,198	0,312	0,292	0,462	0,331
0,198	0,238	0,292	0,375	0,511	0,35
1,013	1,013	1,227	1,465	0,906	1,363
1,047	1,013	1,613	1,613	1,07	1,145
1,317	1,227	1,78	1,662	1,182	1,145
1,662	1,78	1,662	1,107	1,813	1,898
2,44	1,898	1,898	1,686	1,662	1,78
1,898	1,847	2,44	1,898	1,898	1,847
0,434	0,624	1,145	1,182	2,766	2,559
0,595	0,723	1,317	1,416	3,088	2,951
0,624	0,818	1,513	1,613	3,651	3,359
0,723	0,723	1,145	1,070	2,05	1,946
0,906	0,906	1,317	1,107	2,196	2,134
0,942	0,942	1,613	1,107	2,196	2,196
0,511	0,375	1,107	1,013	2,306	2,44
0,659	0,538	1,272	1,317	2,497	2,497
		1,272	1,813	2,559	2,766
0,564	0,723	1,898	1,898	3,157	2,951
0,624	0,906	2,306	1,994	3,157	3,217
0,723	1,013	2,44	2,134	3,434	3,591
0,538	0,624	1,465	1,227	2,262	2,196
0,696	0,659	1,78	1,465	1,847	1,662
0,853	0,659	1,317	1,686	2,05	1,78
0,412	0,624	1,513	1,416	2,44	2,44
0,595	0,696	1,613	1,662	2,196	2,559
0,486	0,723	1,78	1,566	2,306	2,372
0,978	0,564	1,465	1,513	3,812	2,882
0,789	0,595	1,317	1,416	3,088	3,909
1,013	1,107	2,306	1,662	3,508	5,933
0,752	0,659	1,994	2,372	3,812	4,536
0,696	1,047	2,951	2,559	3,591	3,651
0,723	0,752	2,951	2,372	3,015	3,508
0,88	0,511	1,994	1,227	2,559	2,7
0,511	0,624	1,182	1,317	2,882	2,262
0,482	0,564	1,145	1,272	2,262	2,086
0,564	0,434	1,013	0,818	1,465	0,906
0,434	0,375	1,013	0,853	0,853	1,107
0,312	0,35	0,978	0,752	1,07	1,227
0,312	0,391	0,789	0,906	1,07	1,613
0,198	0,412	0,752	0,906	1,465	1,686
0,198	0,434	0,789	0,978	1,946	1,513
1,227	0,906	2,196	1,047	2,766	2,134
0,818	0,88	1,813	1,013	3,088	2,823
1,107	1,047	1,227	0,978	2,372	1,813
0,462	0,412	0,752	1,070	1,465	1,662
0,292	0,375	0,853	1,013	1,78	1,613
0,35	0,412	0,696	0,942	1,78	1,994

0,462	0,391	0,942	0,906	1,272	1,013
0,412	0,486	0,942	0,942	1,07	1,465
0,511	0,624	1,363	0,752	1,566	1,416
0,511	0,538	0,906	1,613	1,227	1,363
0,538	0,659	1,272	1,465	1,662	1,317
0,789	0,564	1,145	1,227	1,363	1,686
0,375	0,35	1,07	1,182	1,145	1,182
0,35	0,486	0,818	0,818	1,07	1,047
0,462	0,391	1,182	0,978	1,107	1,047
0,88	0,564	0,752	0,696	1,416	0,942
0,412	0,486	0,696	0,659	1,182	1,047
0,434	0,331	0,789	1,013	1,227	1,513
1,686	1,566			2,196	1,946
1,686	1,847	2,372	3,015	2,372	1,78
1,686	1,613	2,134	2,050	2,497	2,086
0,292	0,564	0,391	0,659	0,462	0,624
0,198	0,292	0,312	0,595	0,391	0,538
0,198	0,312	0,462	0,696	0,486	0,723
1,416	0,624	1,182	1,317	1,686	1,513
0,752	0,723	1,013	1,613	1,107	1,465
0,723	0,752	1,416	1,145	1,272	1,465
0,752	0,88	1,898	3,088	2,497	2,559
0,818	0,978	1,662	3,088	2,44	2,05
0,789	1,047	2,134	2,306	2,306	2,262
0,88	0,624	1,416	1,107	1,898	1,898
0,659	0,538	1,686	1,513	1,898	1,78
0,624	0,584	1,662	1,662	2,05	1,613
1,07	0,818	3,909	2,497	1,647	3,015
0,696	0,88	1,946	2,372	2,559	2,262
0,942	0,789	2,134	2,440	2,44	2,951
0,272	0,723	1,465	1,182	1,465	1,182
0,292	0,391	1,047	0,906	1,047	0,906
0,35	0,35	1,107	0,564		
1,363	0,752	2,086	1,946	2,44	2,649
1,613	0,853	3,157	1,686	3,088	2,196
0,88	1,145	3,157	2,700	2,766	3,217
0,659	0,752	2,86	3,909	3,217	3,015
0,659	0,789	3,591	2,882		
0,595	0,595	3,157	3,015		
1,465	0,853	3,292	4,148	6,606	6,474
1,513	1,013	3,359	4,235	6,474	7,61
2,05	1,047	3,217	4,335	6,718	7,49
2,649	1,363	3,088	2,882	6,828	5,219
1,566	1,416	2,649	1,898	5,681	6,718
0,978	1,227	2,649	2,766	5,321	7,286
1,78	1,613	2,086	3,508	7,045	7,158
1,78	1,847	3,591	3,434	7,158	7,286
2,05	1,686	4,073	3,292		

Tabelle I.2

Schwellenkontrastwerte, die mittels der Umrechnungstabelle in (Anhang H.1) aus den Graustufen errechnet werden

I.3 Deskriptive Statistik

	Ohne Blendung ohne ABL	Ohne Blendung mit ABL	Blendung in 15 m ohne ABL	Blendung in 15 m mit ABL	Blendung in 50 m ohne ABL	Blendung in 50 m mit ABL
gültige Fälle	95	95	95	95	92	92
Mittelwert	0,8250105	0,7803368	1,6707578	1,6497789	2,3811630	2,4271630
Std.Fehler des Mittelwertes	0,0544970	0,0419662	0,0902494	0,0937941	0,1594300	0,1753721
Varianz	0,2821429	0,1673106	0,7737723	0,8357474	2,3384498	2,8294975
Std.Abweichung	0,5311712	0,4090361	0,8796432	0,9141922	1,5291990	1,6821110
Variationskoeffizient	0,6438357	0,5241790	0,5264935	0,5541301	0,6422067	0,6930358
rel. V.koeffizient(%)	6,6056154	5,3779631	5,4017100	5,6852552	6,6954686	7,2253983
Schiefe	1,2666778	1,1291214	0,7742986	1,1125359	1,6135102	1,7475662
Kurtosis	1,2854067	0,8809449	0,0172035	0,7627183	2,5787295	2,6666302
Minimum	0,119	0,075	0,272	0,257	0,391	0,292
Maximum	2,649	1,898	4,073	4,335	7,158	7,61
Spannweite	2,53	1,823	3,801	4,078	6,767	7,318
Summe	78,376	74,132	158,722	156,729	219,067	223,299
1. Perzentil	----	----	----	----	----	----
5. Perzentil	0,198	0,308	0,3752	0,5888	0,4776	0,5939
10. Perzentil	0,292	0,365	0,752	0,7296	1,0539	0,9633
25. Perzentil	0,462	0,486	1,047	1,013	1,29475	1,42825
Median	0,696	0,696	1,465	1,416	2,196	1,97
75. Perzentil	1,013	0,978	2,134	2,05	2,853	2,86725
90. Perzentil	1,686	1,476	3,157	3,0442	3,812	5,0141
95. Perzentil	1,9284	1,7934	3,4054	3,5882	6,6452	7,2028
99. Perzentil	----	----	----	----	----	----
geom. Mittelwert	0,6771177 22	0,6823593 64	1,4364305 65	1,4226537 28	1,9754992 53	1,979394 693

Tabelle I.3

Deskriptive Statistik der einzelnen Szenarien; die Perzentile bezeichnen den Anteil der Messwerte, der kleiner als der entsprechende Perzentil-Wert ist; die Kurtosis ist die „Spitzigkeit“ der Verteilungsfunktion; die Schiefe zeigt die Neigung der Verteilung nach links oder rechts im Vergleich zur Normalverteilung auf

J Rohdaten der Ergebnisse des Fragebogens

Proband	Geschlecht	Alter	Sehhilfe	Fahrerfahrung	Fahrzeug
1	1	42	0	22	1
2	2	51	2	33	1
3	2	51	0	31	1
4	1	44	0	26	1
5	2	52	0	36	1
6	2	46	2	27	1
7	1	43	0	25	1
8	2	40	0	22	1
9	2	49	1	31	1
10	1	52	2	34	1
11	2	45	0	27	0
12	1	54	2	36	1
13	1	50	2	30	1
14	1	52	2	34	1
15	1	46	2	28	1
16	1	43	2	25	1
17	2	48	2	29	1
18	2	55	2	32	1
19	2	52	2	32	1
20	1	53	2	35	1
21	1	55	2	37	1
22	1	53	2	27	1
23	1	42	2	20	1
24	2	32	0	14	1
25	1	48	0	30	1
26	2	48	2	30	1
27	1	54	2	36	1
28	2	55	2	36	1
29	1	43	2	23	1
30	2	48	2	29	1
31	1	52	2	30	1,3
32	2	47	0	22	1
33	1	44	0	20	1
34	1	52	2	36	1
35	2	49	2	31	1
36	1	60	2	39	1
37	2	50	2	32	1
38	1	48	2	32	1
39	1	49	2	32	1
40	2	59	2	40	1
	1: männlich		0: keine		0: keines
	2: weiblich		1: Kontaktlinsen		1: Auto
			2: Brille		2: LKW
					3: Motorrad
					4: Sonstiges

Tabelle J.1

Rohdaten des Fragebogens: Geschlecht, Alter, Sehhilfe, Fahrerfahrung, Eigenes Fahrzeug

F1	F2	Autobahn	Landstraße	Innerorts
2	2	33	33	33
1	1	5	15	80
1	2	15	40	30
1	2	10	60	30
1	5	40	20	40
2	2	20	30	50
1	3	20	30	50
1	3	20	30	50
2	1	1	29	70
1	2	15	25	60
2	1	20	20	60
1	5	50	25	25
1	5	40	40	20
2	2	20	20	60
1	5	80	10	10
1	2	25	30	45
1	3	80	10	10
1	1	10	20	70
1	2	10	50	40
2	2	10	60	30
1	5	70	20	10
1	3	60	25	15
1	3	20	50	30
1	2	5	40	55
1	3	30	40	30
1	2	20	40	40
2	2	10	60	30
1	5	10	60	30
2	2	15	55	30
1	3	60	20	20
1	3	60	30	10
1	2	10	20	70
1	2	30	40	30
2	2	35	35	30
3	2	20	30	50
1	3	20	40	40
1	5	20	30	50
2	2	20	30	50
1	3	25	50	25
1	2	30	25	45
1: täglich	1: <5000 km			
2: 2-3 mal pro Woche	2: 5000-15000 km			
3: seltener	3: 15000-25000 km			
	4: 25000-35000 km			
	5: >35000 km			

Tabelle J.2

Rohdaten des Fragebogens: Fahrleistung, Verteilung der Fahrten auf Autobahnen, Landstraßen und innerorts

F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9
4	3	3	4	1	4	2
2	4	3	1	1	4	4
2	4	2	4	1	4	2
4	5	2	2	1	3	4
5	5	3	2	4	1	5
3	5	1	5	1	5	1
4	5	1	6	1	6	2
4	4	2	4	1	4	4
3	3	3	5	1	2	2
2	4	3	3	5	3	5
3	1	1	5	1	5	2
3	4	3	4	4	4	3
4	4	1	5	1	5	4
3	5	2	3	2	3	5
2	6	6	3	4	3	5
4	3	2	4	3	4	5
1	3	1	1	1	4	4
3	4	2	1	1	2	5
3	2	1	5	1	4	3
3	3	1	6	2	5	2
2	2	3	5	3	4	4
4	5	2	2	2	4	5
6	5	4	2	7	4	6
3	4	1	5	1	5	3
3	3	1	5	2	4	4
5	5	5	7	6	4	6
2	3	1	6	1	5	2
3	4	3	1	4	3	5
2	5	2	4	4	5	4
2	6	4	3	4	4	5
5	5	2	5	1	2	4
3	3	1	4	1	4	4
5	4	6	6	2	5	3
2	4	3	5	2	3	5
2	3	2	4	1	4	2
3	3	6	3	4	4	5
4	5	3	2	2	3	5
2	4	3	3	4	3	5
2	3	3	5	3	4	4
5	4	2	5	1	2	5
1: <1%	1: 0-5%	1: nein	1: weniger	1: nein	1: weniger	1: angenehm
2: 1-5%	2: 5-10%	7: unerträglich	2: mehr	7: stark	7: mehr	7: stört
3: 5-10%	4: 10-25%					
4: 10-25%	5:25-50%					
5:25-50%	6: 50-75%					
6:>50%	7: >75%					

Tabelle J.3Rohdaten des Fragebogens: F3-F9 (siehe **Anhang D**)

F10	F11	F12	F13	F14	F15
4	1	1	1	4	4
3	1	1	1	3	2
2	1	1	1	3	1
4	1	2	4	6	3
3	1	1	1	6	4
2	1	1	1	3	2
3	1	2	1	2	1
3	1	1	2	3	1
5	3	3	4	3	3
1	1	1	1	1	1
3	3	3	3	4	3
3	3	3	1	2	1
4	1	2	1	4	3
4	2	1	3	3	3
4	2	2	3	3	3
4	1	2	4	4	4
3	2	4	4	1	2
3	1	1	1	6	3
2	2	2	2	3	2
3	2	1	1	5	4
3	2	3	1	3	2
6	3	4	5	6	4
3	1	1	1	5	4
3	2	1	2	4	3
7	5	5	6	5	6
2	1	1	1	5	3
6	4	4	4	4	3
3	1	2	2	5	4
5	2	5	5	6	4
3	2	2	1	3	1
4	1	1	1	4	4
3	2	4	2	6	3
3	2	3	1	5	4
3	2	1	1	5	3
3	3	4	4	4	3
3	2	3	2	4	3
4	2	3	5	4	4
4	3	3	1	6	3
2	2	1	1	5	3
1: deutlich weniger	1: nein	1: nein	1: nein	1: nein	1: nein
7: deutlich stärker	7: unerträglich	7: inakzeptabel	7: stark	7: unerträglich	2: unerträglich

Tabelle J.4Rohdaten des Fragebogens: Fragen 10-15 (siehe **Anhang D**)

F16	F17	F18	F19	F20
	6	3	2	1
4	6	1	3	1
2	6	2	2	2
3	3	1	2	2
2	1	1	2	2
1	6	2	2	2
1	6	2	2	2
2	1	3	3	2
1	1	1	3	2
5	1,3,4	1	2	1
1	1	2	2	2
3	1	2	3	2
4	1	3	1	2
3	1	2	2	2
5	1,5	3	1	1
5	1	3	3	1
6	1,3	1	1	1
5	1	3	1	1
2	6	2	2	2
1	3	2	2	2
4	6	3	3	2
4	1	1	1	1
6	1,3,4	1	1	1
3	6	2	2	2
2	1	2	2	2
6	4	1	1	1
1	1	2	2	2
5	3,4	1	2	1
3	6	3	3	1
5	1,4	1	1	1
2	1,3	2	2	2
4	1	1	2	1
2	1	2	2	2
4	1	2	1	1
2	1	3	2	2
5	1	3	1	1
4	1	2	2	2
5	1,3	3	2	1
4	1	3	2	2
4	1,4	3	2	1
1: angenehm	1: ungewohnte Fläche	1: nein	1: nein	1: nein
7: störend	2: Helligkeitsänderung	2: ja	2: ja	2: ja
	3: Weniger von der Umgebung wahrgenommen	3: keine Aussage	3: keine Aussage	
	4: Blendung			
	5: Anderer Grund			
	6: nichts			

Tabelle J.5

Rohdaten des Fragebogens: Fragen 16-20 (siehe Anhang D)

F21	F22	F23	F24	F25
1	2	5	6	2
1	7	1	3	2
1	7	1	5	2
1	7	3	7	2
1	2	1	7	2
2	6	7	6	2
1	7	2	6	2
1	7	2	6	2
1	7	1	6	2
1	7	2	6	2
1	7	1	7	2
1	7	1	7	2
1	7	1	6	2
1	6	5	6	2
1	5	2	4	2
1	7	1	5	2
1	7	1	7	2
1	5	2	7	2
1	6	2	6	1
1	6	1	6	2
2	7	1	7	2
1	1	1	6	2
1	6	3	6	2
1	7	3	7	2
1	7	3	4	2
1	7	1	6	2
1	2	2	3	2
1	6	1	6	2
1	7	2	5	2
1	6	1	7	2
1	7	4	7	2
1	6	6	4	2
1	7	6	5	2
1	7	1	7	2
1	7	5	2	2
1	7	1	7	2
1	6	2	4	2
1	7	6	6	2
1	6	2	6	2
1: nein	1: verwirrend	1: einfach	1: verwirrend	1: nein
2: ja	7: verständlich	7: schwierig	7: verständlich	2: ja

Tabelle J.6

Rohdaten des Fragebogens: Fragen 21-25 (siehe Anhang D)

K Daten der optometrischen Vermessung

Proband	Ferne rechts	Ferne links	Ferne binokular	Phonie	Stereo
1	1,0	1,0	1,0	2	2
2	1,0	1,0	1,0	2	2
3	0,63	0,8	1,0	1	2
4	0,8	1,0	1,0	2	2
5	0,8	0,8	1,0	2	2
6	1,0	1,0	1,0	2	2
7	1,0	1,0	1,25	2	2
8	1,0	1,0	1,0	2	2
9	0,63	0,8	1,0	2	2
10	1,0	1	1,25	2	2
11	1,0	0,8	1,0	2	1
12	0,8	0,8	1,0	2	1
13	0,8	0,8	1,0	2	2
14	0,8	0,8	1,0	1	2
15	1,0	1,0	1,25	2	2
16	1,0	1,0	1,0	2	1
17	0,63	0,8	1,0	2	2
18	0,8	0,8	1,0	2	2
19	1,0	0,8	1,0	2	2
20	1,0	0,8	1,0	2	2
21	0,8	0,8	1,0	2	2
22	0,8	0	1,0	2	2
23	0,8	0,8	1,0	1	2
24	0,8	0,8	1,0	2	2
25	1,0	0,8	1,0	2	2
26	1,0	1,0	1,0	2	2
27	1,0	1,0	1,0	2	1
28	0,8	0,8	1,0	2	2
29	1,0	1,0	1,0	2	2
30	1,0	1,0	1,0	2	2
31	1,25	1,0	1,0	2	2
32	1,0	0,8	1,0	2	1
33	1,0	1,0	1,0	2	2
34	0,8	1,0	1,0	2	2
35	1,0	0,8	1,0	2	2
36	1,0	0,8	1,0	2	2
37	0,8	1,0	1,0	1	2
38	1,0	1,0	1,0	2	2
39	1,0	0,8	1,25	2	2
40	0,8	0,8	1,0	1	2

Tabelle K.1

Ergebnisse der optometrischen Vermessung; 1: nein, 2: ja

Proband	Farbensinn	Nähe rechts	Nähe links	Nähe binokular	Kontrast 40%
1	2	0,8	0,8	1,0	2
2	2				2
3	2	0,63	0,8	1,0	2
4	2	1,25	1,25	1,25	2
5	2	0,63	0,63	0,63	2
6	2	1,0	1,0	1,0	2
7	2	0,8	0,8	0,8	2
8	2	1,0	1,0	1,0	2
9	2	0,63	0,63	0,63	2
10	2	1,0	1,0	1,0	2
11	2				2
12	2				2
13	2				2
14	2	1,0	1,0	1,0	2
15	2	0,8	0,8	0,8	2
16	2	0,8	0,8	0,8	2
17	2	0,8	0,8	0,8	2
18	2	0,8	0,8	0,8	2
19	2	0,8	0,8	0,8	2
20	2	0,5	0,5	0,5	2
21	2				2
22	2				2
23	2	0,63	0,63	0,63	2
24	2	0,8	0,8	1	2
25	2	0,8	0,8	0,8	2
26	2				2
27	2	0,5	0,5	0,5	2
28	2	0,63	0,63	0,63	2
29	2	1,0	1,0	1,0	2
30	2	0,8	0,8	0,8	2
31	2	1,0	1,0	1,0	2
32	2	0,8	0,8	0,8	2
33	2	0,63	0,63	0,63	2
34	2	0,8	0,8	0,8	2
35	2	1,25	1,25	1,25	2
36	2				2
37	2	1	1	1,25	2
38	2	0,63	0,63	0,63	2
39	2	0,8	0,8	0,8	2
40	2	1,0	1,0	1,0	2

Tabelle K.2

Ergebnisse der optometrischen Vermessung; 1: nein, 2: ja

Proband	Kontr. 10%	Kontr. 5%	40% Blendung	10% Blendung	5% Blendung
1	2	2	2	2	2
2	2	2	2	2	2
3	2	2	2	2	2
4	2	2	2	2	2
5	2	2	2	2	2
6	2	2	2	2	2
7	2	2	2	2	2
8	2	2	2	2	2
9	2	2	2	2	1
10	2	2	2	2	2
11	2	1	2	2	1
12	2	2	2	2	1
13	2	2	2	2	1
14	2	2	2	2	1
15	2	2	2	2	2
16	2	1	2	2	2
17	2	2	2	2	2
18	2	2	2	2	2
19	2	2	2	2	2
20	2	1	2	2	1
21	2	2	2	2	2
22	2	2	2	2	2
23	2	2	2	2	2
24	2	2	2	2	2
25	2	2	2	2	2
26	2	1	2	2	1
27	2	1	2	2	2
28	2	1	2	2	2
29	2	2	2	2	2
30	2	2	2	2	2
31	2	2	2	2	2
32	2	1	2	2	1
33	2	1	2	2	2
34	2	2	2	2	2
35	2	2	2	2	2
36	2	1	2	2	1
37	2	2	2	2	2
38	2	2	2	2	2
39	2	2	2	2	2
40	2	2	2	2	2

Tabelle K.3

Ergebnisse der optometrischen Vermessung; 1: nein, 2: ja