



# Auslegung der Kraftfahrzeugbeleuchtung hinsichtlich Sicht und Signalisation

Zur Erlangung des akademischen Grades eines  
DOKTOR-INGENIEURS  
von der Fakultät für  
Elektrotechnik und Informationstechnik  
der Universität Karlsruhe (TH)  
genehmigte  
DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. Karsten Köth  
geboren in Weinheim

Karlsruhe

11. Februar 2009

Tag der mündlichen Prüfung

17. Juli 2008

**Hauptreferent**  
Prof. Dr. Uli Lemmer

**Korreferent**  
Prof. Dr.-Ing. Stephan Völker



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung und Überblick</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Stand der Erkenntnisse</b>	<b>9</b>
2.1	Motivation . . . . .	9
2.2	Aufgaben der Fahrzeugleuchten . . . . .	9
2.2.1	Aufgabe der Signale bei Tag . . . . .	10
2.2.2	Aufgabe der Signale bei Nacht . . . . .	10
2.3	Wahrnehmung der Fahrzeugleuchten . . . . .	11
2.3.1	Fernbereich . . . . .	11
2.3.2	Nahbereich . . . . .	11
2.4	Signalisation von Fahrzeugzuständen . . . . .	11
2.4.1	Kodierung von Lichtsignalen . . . . .	12
2.4.2	Überlappung, Ineinanderbau und Zusammenbau von Lichtsignalen . . . . .	21
2.5	Notwendige Faktoren zur Berechnung des Anhalteweges . . . . .	24
2.5.1	Bremsweg . . . . .	24
2.5.2	Bremszeit . . . . .	25
2.5.3	Reaktionsweg . . . . .	26
2.5.4	Anhalteweg . . . . .	26
2.6	Die Wahrnehmung beschreibende Größen . . . . .	26
2.6.1	Perzeption und Apperzeption . . . . .	26
2.6.2	Sehschärfe . . . . .	27
2.6.3	Reaktionszeit . . . . .	37
2.7	Gesetzliche Rahmenbedingungen bezüglich ambierter Innenraumbeleuchtung in Fahrzeugen . . . . .	46
2.8	Überblick über bisherige Untersuchungen bezüglich Überlappung . . . . .	47
2.8.1	Untersuchungen von Mortimer . . . . .	47
2.8.2	Untersuchungen der SAE . . . . .	47
2.9	Überblick über bisherige Arbeiten bezüglich Phantomlicht . . . . .	49

2.9.1	Definitionen verschiedener Phantomlichtarten . . . . .	49
2.9.2	Definitionen der Fremdlichtempfindlichkeit einer Leuchte . . . . .	51
2.9.3	Überblick über bisherige Untersuchungen hinsichtlich der Fremdlichtempfindlichkeit von Leuchten . . . . .	53
2.9.4	Gesetzliche Regelungen zur Vermeidung von Phantomlicht . . . . .	54
2.9.5	Simulation von Fremdlicht . . . . .	56
2.9.6	Bekannte Vorschläge zur Reduzierung der Fremdlichtempfindlichkeit . . . . .	56
<b>3</b>	<b>Ambiente Innenraumbeleuchtung</b>	<b>59</b>
3.1	Übersicht über die ambiente Innenraumbeleuchtung . . . . .	59
3.1.1	Definition ambierter Beleuchtung . . . . .	59
3.1.2	Steigende Marktdurchdringung ambierter Beleuchtung . . . . .	59
3.2	Motivation für den Einsatz ambierter Beleuchtung . . . . .	59
3.2.1	Verbesserung der Orientierung im Fahrzeuginnenraum . . . . .	59
3.2.2	Unterstützung des Interior-Designs bei Dunkelheit . . . . .	60
3.3	Betrachtung möglicher Einflüsse ambierter Beleuchtung auf die Fahraufgabe . . . . .	61
3.4	Untersuchungen ambierter Beleuchtungen . . . . .	61
3.4.1	Versuchsaufbau . . . . .	61
3.4.2	Versuchsablauf . . . . .	63
3.4.3	Einordnung der Versuchsbedingungen gegenüber anderen Beleuchtungssituationen . . . . .	63
3.5	Untersuchungsergebnisse . . . . .	65
3.5.1	Übersicht über die Ergebnisse der Einzelversuche . . . . .	65
3.5.2	Gegenüberstellung der Ergebnisse bei positivem und negativem Kontrast . . . . .	65
3.6	Diskussion der Ergebnisse zur ambienten Innenraumbeleuchtung . . . . .	66
<b>4</b>	<b>Überlappung und Ineinanderbau von Leuchten</b>	<b>69</b>
4.1	Anwendung der Untersuchungen von Mortimer auf die Überlappung . . . . .	69
4.1.1	Diskussion der Ergebnisse von Mortimer . . . . .	69
4.1.2	Folgerung bezüglich Überlappung . . . . .	71
4.2	Beschreibung der eigenen experimentellen Untersuchungen . . . . .	72
4.2.1	Versuchsaufbau . . . . .	72
4.2.2	Genauere Betrachtungen der verwendeten Leuchteneinheiten . . . . .	74
4.2.3	Spezielle Ansteuerelektronik des Versuchsaufbaus mit integriertem Messgerät . . . . .	76
4.2.4	Versuchsablauf . . . . .	77
4.3	Auswertung der Ergebnisse . . . . .	79
4.3.1	Reaktionszeit . . . . .	79

4.3.2	Funktionaler Zusammenhang zwischen dem Leuchtdichteverhältnis und der Reaktionszeitverlängerung . . . . .	80
4.3.3	Fehlerrate . . . . .	82
4.3.4	Funktionaler Zusammenhang zwischen dem Leuchtdichteverhältnis und der Fehlerrate . . . . .	86
4.4	Diskussion überlappender Signale . . . . .	88
4.4.1	Einfluss auf die Reaktionszeit . . . . .	88
4.4.2	Einfluss auf die Fehlerrate . . . . .	89
4.4.3	Einfluss auf die Verkehrssicherheit . . . . .	89
4.4.4	Diskussion der gesetzlichen Regelungen . . . . .	89
<b>5</b>	<b>Phantomlicht und Color Washout</b>	<b>91</b>
5.1	Übersicht über Phantomlicht . . . . .	91
5.1.1	Auftreten von Phantomlichteffekten . . . . .	91
5.1.2	Quellen des Fremdlichtes . . . . .	92
5.1.3	Zusammenhang zwischen Phantomlichteffekten und Überlappung von Lichtsignalen . . . . .	92
5.2	Beschreibung der Fremdlichtempfindlichkeit durch Definition der Störanfälligkeit . . .	95
5.2.1	Definition der Störanfälligkeit für den Fernbereich . . . . .	95
5.2.2	Definition der Störanfälligkeit für den Nahbereich . . . . .	95
5.3	Messtechnische Erfassung der Phantomlichteffekte . . . . .	96
5.3.1	Messtechnisches Vorgehen für eine möglichst exakte Bestimmung der Störanfälligkeit über die Lichtstärke . . . . .	96
5.3.2	Messtechnisches Vorgehen zur Bestimmung der Störanfälligkeit über die Leuchtdichte . . . . .	96
5.3.3	Festlegung einer zweckdienlichen Messauflösung . . . . .	97
5.3.4	Berechnung eines abschattungsfreien Messabstandes . . . . .	98
5.3.5	Reduzierung der Spot-Leuchtdichten durch Mittelwertbildung . . . . .	99
5.3.6	Messung mit einer Leuchtdichtekamera . . . . .	100
5.3.7	Vorschlag für eine messtechnische Erfassung . . . . .	104
5.4	Untersuchung der Phantomlichteffekte anhand psychophysikalischer Untersuchungen . . . . .	106
5.4.1	Untersuchungen unter realem Sonnenlicht . . . . .	106
5.4.2	Versuchsaufbau im Labor bei festem Bestrahlungswinkel . . . . .	108
5.4.3	Versuchsablauf der Untersuchungen im Labor . . . . .	108
5.4.4	Ergebnisse der Laborversuche . . . . .	108
5.5	Diskussion von Phantomlichteffekten . . . . .	109
5.6	Ausblick . . . . .	110

<b>6 Zusammenfassende Diskussion</b>	<b>111</b>
6.1 Intension der Gesetze . . . . .	111
6.2 Ambiente Innenraumbeleuchtung . . . . .	112
6.3 Überlappung . . . . .	113
6.4 Phantomlicht . . . . .	113
6.5 Leuchtdichte . . . . .	114
<b>7 Ausblick</b>	<b>115</b>
<b>A Anhang</b>	<b>117</b>
A.1 Literaturangaben . . . . .	117
A.2 Abbildungsverzeichnis . . . . .	129
A.3 Veröffentlichungen . . . . .	132
A.4 Betreute Arbeiten . . . . .	134
A.5 Weitere Aktivitäten . . . . .	136
A.6 Lebenslauf . . . . .	137

# Vorwort

Die vorliegende Promotionsschrift entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am lichttechnischen Institut der Universität Karlsruhe (TH) in den Jahren 2002 bis 2008.

Während dieser Zeit war ich teilweise an der Prüfstelle für lichttechnische Einrichtungen an Fahrzeugen, geleitet von Dr. Manz, und direkt am Lehrstuhl von Prof. Lemmer angestellt. Dadurch konnte ich lichttechnische Prüftätigkeiten und internationale Gremienarbeit genauso kennenlernen wie mich in der Lehre durch Betreuen von Studenten und Doktoranden sowie dem Halten von Vorlesungen einbringen. Dabei war für mich sehr hilfreich, noch als Student die Vorlesungen Grundlagen der Lichttechnik, Photometrie und Farbmeterik, Psychophysik sowie Beleuchtungstechnik bei Prof. Kokoschka gehört zu haben. Jedoch trotz sehr guter Bewertungen meiner Lehre durch Externe wird es noch ein weiter Weg für mich sein, auch nur annähernd die hohe fachliche und didaktische Qualität seiner Vorlesungen zu erreichen.

Prof. Lemmer gab mir darüber hinaus die Gelegenheit, aktiv bei der Vergrößerung des lichttechnischen Instituts der Universität Karlsruhe mitzuwirken. So übernahm ich 2003 den Fachbereich Angewandte Lichttechnik und konnte dabei etliche Großanschaffungen übernehmen, betreuen und ausbauen, begann jedoch ohne Mitarbeiter. Daher erweiterte ich in den folgenden Jahren die Aktivitäten der angewandten Lichttechnik von dem Bereich Allgemeinbeleuchtung hin zu Optischen Technologien im Automobil. Dies gestattete es, durch Drittmittel finanzierte Mitarbeiter einzustellen, so dass sich der Fachbereich zu einer eigenen Abteilung innerhalb des Instituts entwickelte mit nun weiteren fünf wissenschaftlichen Mitarbeitern.

Die vorliegende Arbeit dokumentiert einen Teil der von mir in dieser Zeit durchgeführten wissenschaftlichen Projekte. Einige Teilaspekte der Arbeit [Kli07d, HK07] sind im letzten Jahr im Handbuch für Beleuchtung veröffentlicht worden beziehungsweise werden in einer der nächsten Ausgaben erscheinen [Kli08]. Weitere Ergebnisse meines wissenschaftlichen Arbeitens, die in Zusammenarbeit mit den Wissenschaftlern des Instituts entstanden, sind in den Forschungsberichten F65 [MKKS07] und F66 [JSK<sup>+</sup>08] der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) veröffentlicht. Die in Zusammenarbeit mit Prof. Völker und einer internationalen Gruppe von Fachleuten im Bereich der Kraftfahrzeugbeleuchtung durchgeführten Untersuchungen bezüglich der Bewertung von Scheinwerfern werden nach Fertigstellung des Schlussberichtes von der CIE veröffentlicht werden [CT].



# Kapitel 1

## Einleitung und Überblick

Die Fahrzeugbeleuchtung dient der Sicht – Scheinwerfer beleuchten die Straße – und sie dient der Signalisation von Fahrzeugzuständen – Leuchten übermitteln Informationen.

Die Qualität der Sicht des Fahrers im nächtlichen Straßenverkehr hängt im Wesentlichen ab von der Performanz der Fahrzeugscheinwerfer und seiner visuellen Leistungsfähigkeit, die wiederum maßgeblich von der Grundhelligkeit im Verkehrsraum, der Vorfeldausleuchtung und des Lichtniveaus im Fahrzeuginneren bestimmt wird. Dieses Niveau kann mit modernen Innenbeleuchtungen, die während der Fahrt betrieben werden, um ein hochwertiges Ambiente zu erzeugen, in einem weiten Bereich festgelegt werden.

Zur Klärung, bei welchen Parametern diese ambienten Beleuchtungen die Sicht verbessern oder verschlechtern, werden anhand statischer Versuche im Labor diverse Lichtszenen in unterschiedlichsten Fahrzeugen untersucht. Wichtige Untersuchungsvariablen dabei sind Alter der Fahrzeugführer, Helligkeitsniveau und Lichtfarbe der ambienten Beleuchtung. Diese Experimente sind in Kapitel 3 dokumentiert. Die Ergebnisse zeigen, dass ambiente Fahrzeuginnenraumbeleuchtungen das Potential bieten, die Sicht, spezifiziert anhand des Kontrastsehvermögens, sowohl positiv als auch negativ zu beeinflussen. So verbessert sich bei jüngeren Personen das Kontrastsehvermögen bei ausgewählten ambienten Beleuchtungen besonders bei roter Beleuchtung. Bei älteren Personen hingegen wird das Kontrastsehvermögen, insbesondere bei blauem Licht teilweise verschlechtert. Durch Befragen der Versuchspersonen wird gezeigt, dass keine Verschlechterungen des Kontrastsehvermögens zu erwarten sind, falls der Fahrer die Helligkeit der ambienten Beleuchtung selbst einstellen kann. Daher kann die ambiente Innenraumbeleuchtung mit geeigneten Parametern die Qualität der Sicht bei Nacht verbessern.

Die Signalisation von Fahrzeugzuständen sollte sowohl bei Tag als auch bei Nacht mit gleich hoher Qualität erfolgen. Eine funktionierende Signalisation durch Leuchten erfordert eine möglichst fehlerfreie Informationsübertragung zu anderen Verkehrsteilnehmern. Diese wird nicht nur durch die Übertragungswege, die durch Staub, Regen, Nebel oder Schnee gemindert sein können, sondern auch durch die Leistungsfähigkeit der Empfänger geprägt. Daher soll die Wahrnehmung von Lichtsignalen schnell und fehlerfrei erfolgen. Dazu müssen die Signale mit angepasster Lichtstärke und Leuchtdichte abgestrahlt werden und eindeutig unterscheidbar sein.

Bei überlappenden Signalen, bei denen auf einer einzigen Fläche zwei verschiedene Signale parallel dargestellt werden, kann die Unterscheidbarkeit eingeschränkt werden. Daher muss untersucht werden, wie stark die Erkennbarkeit der einzelnen Signale beeinträchtigt wird, falls statt deutlich getrennter Signale überlappende eingesetzt werden. Anhand theoretischer Überlegungen und experimenteller Versuche wird erforscht, in wie weit die Reaktionszeit verlängert und die Fehlerrate erhöht wird. Die in Kapitel 4 erläuterten Untersuchungen zeigen, dass bei homogenen,

gleich hell leuchtenden, überlappenden Signalfächern die Reaktionszeit im Vergleich zu deutlich getrennten Flächen um eine Drittel Sekunde verlängert wird. Bei deutlichen Leuchtdichteunterschieden können sogar Signale übersehen werden. Wenn jedoch das Leuchtdichteverhältnis in Abhängigkeit der Wichtigkeit der einzelnen Signale korrekt gestaltet wird, stellen überlappende Flächen eine gute Möglichkeit dar, Signalleuchten kompakter zu gestalten und dadurch Raum am Fahrzeug für moderne Signalsysteme wie *Brake Force Displays* zu geben.

Die Signalisation funktioniert bei konventionellen Leuchtendesigns bei verschiedensten Wetterbedingungen. Bei modernen Designs, bei denen große, verspiegelte Flächen gezeigt werden, kann bei starkem Sonnenschein die Signalerkennung durch Phantomlicht eingeschränkt werden. Da hierbei mehrere Lichter von einer Fläche abgestrahlt werden, handelt es sich von Seiten der Wahrnehmung um einen der Überlappung ähnlichen Sachverhalt. Bei Anwendung der Erkenntnisse aus den Untersuchungen bezüglich Überlappung auf diese Phantomlichtproblematik wird jedoch festgestellt, dass die funktionalen Ergebnisse nicht genutzt werden können, da stark inhomogene Leuchtdichtestrukturen vorliegen. Diese verhindern, mit den herkömmlichen Methoden zur Bestimmung der Leuchtdichte einen aussagekräftigen Wert zu erhalten. Um dennoch Angaben über die Größe des Einflusses von Fremdlicht auf die Wahrnehmbarkeit von Signalleuchten geben zu können, werden die in Kapitel 5 erläuterten psychophysikalischen Untersuchungen durchgeführt. Diese sollten die Frage klären, um wie viel die Reaktionszeit auf das Aufleuchten von durch Sonnenlicht beschienenen Signalleuchten verlängert wird im Vergleich zur nicht beschienenen Darbietung. Dabei wird festgestellt, dass ebenso wie bei Überlappung manche Darbietungsarten die Wahrnehmbarkeit deutlich verringern. Im Falle von Phantomlichteffekten bedeutet dies, dass manche Leuchten sehr unempfindlich gegenüber Fremdlicht sind, die Funktionalität anderer hingegen stark eingeschränkt wird. So kann bei marktgängigen Leuchten die Reaktionszeit um einen Faktor von 2,5 verlängert werden.

Die erhaltenen Ergebnisse bezüglich Sicht und Signalisation werden in Kapitel 6 zusammenfassend präsentiert. Dabei werden die in den Fachkapiteln erarbeiteten Formeln zur Bewertung ausgesuchter Komponenten der Fahrzeugbeleuchtung angegeben. Insgesamt zeigt diese Arbeit, dass die ambiente Beleuchtung das Potential aufweist, die Sicht des Fahrers zu verbessern. In der Signalisation können überlappende Signale eingesetzt werden, um Notbremssignale dem Signalfeld hinzuzufügen. Diese Erweiterung der Signalfunktionen kann ebenso wie die Unterdrückung von Phantomsignalen dazu beitragen, die Schwere und Häufigkeit von Auffahrunfällen weiter zu reduzieren.

# Kapitel 2

## Stand der Erkenntnisse

### 2.1 Motivation

Fast 55 Millionen Kraftfahrzeuge [KBA08] sind in Deutschland zugelassen. Diese werden ausschließlich von Menschen gesteuert, da am öffentlichen Straßenverkehr keine autonom fahrenden Maschinen beteiligt sind. Der Mensch nimmt über 90 Prozent [Eck93] seiner Informationen visuell wahr. Daher sind gute visuelle Voraussetzungen zu schaffen und zu sichern, damit Fahrzeuge fehlerfrei gesteuert werden können. Ein wichtiges Werkzeug visueller Informationsübertragung stellen Signalleuchten dar, welche so zu gestalten sind, dass der Mensch ihre Informationen schnell erfassen und verarbeiten kann.

Für eine an den Menschen angepasste Leuchtenkonstruktion ist es notwendig, die Eigenschaften der Informationsübertragung und -verarbeitung des Menschen, wie Auflösungsvermögen, Dynamik und Verarbeitungszeiten, möglichst exakt charakterisieren zu können. Speziell die Problematik von überlappenden Flächen ist abhängig von der Sehschärfe, anhand der berechnet werden kann, außerhalb welcher Entfernung getrennte Flächen überlappend erscheinen.

### 2.2 Aufgaben der Fahrzeugleuchten

Die am Fahrzeug befindlichen Leuchten dienen der Informationsübertragung der Fahrzeugzustände, der Geschwindigkeitsänderungen sowie der geplanten und in Durchführung befindlichen Richtungsänderungen an andere Verkehrsteilnehmer. Vor allem sollen Fahrer der nachfolgenden Fahrzeuge über Geschwindigkeits- und Richtungsänderungen des vorausfahrenden Fahrzeuges informiert werden. Laut einer Studie des Battelle-Institutes [BD71] ist dies besonders bei dichtem Straßenverkehr mit Kolonnenbildung wichtig.

Im Straßenverkehr erkennen Fahrzeugführer Geschwindigkeits- und Richtungsänderungen anderer Fahrzeuge unter anderem über eine Änderung des Seh winkels<sup>1</sup>, unter dem Teile anderer Fahrzeuge oder die Fahrzeuge selbst gesehen werden. So wird zum Beispiel der Sehwinkel, unter dem die beiden Außenspiegel des Fahrzeuges gesehen werden, kleiner, wenn sich das Fahrzeug entfernt. Auch das Erfassen der Änderung der Entfernung von Hintergrundobjekten, zum Beispiel Bäumen, Straßenmarkierungen, Leitpfosten, zu Fahrzeugen erlaubt das Erkennen der Geschwindigkeiten vorausfahrender Fahrzeuge. Solche Informationen werden als *primäre Merkmale* bezeichnet. Diese Informationsgewinnung muss nicht erst für das Teilnehmen am Straßenverkehr erlernt werden; sie entspricht unseren natürlichen Gewohnheiten.

---

<sup>1</sup> Siehe Abschnitt 2.6.2

Da das Fortbewegen im Straßenverkehr jedoch wesentlich schneller stattfindet, als uns naturgegebener Weise möglich ist, sollte diese erhöhte Informationsaufnahme durch Hilfsmittel unterstützt werden. Dazu stehen im Straßenverkehr *sekundäre Merkmale* zur Verfügung. Die Bedeutung dieser *zusätzlichen Merkmale* muss für die Teilnahme am Straßenverkehr erlernt werden. Zu diesen Hilfsmitteln zählt das *vordere, seitliche und rückwärtige Signalbild* von Fahrzeugen. Ein Teil des Bildes sind die am Fahrzeug angebrachten Leuchten, die Informationen durch Abstrahlen von Licht übermitteln. Als ein bedeutender Teil des Signalbildes übermitteln die am Fahrzeug angebrachten Leuchten Informationen durch das Abstrahlen kodierter Lichtsignale. Verschiedene Kodierungsmöglichkeiten werden in Abschnitt 2.4.1 vorgestellt.

Dreidimensionales Sehen ist für das Erhalten von Tiefeninformation und daher für Abstandsschätzungen notwendig. In [BB07] wird gezeigt, dass die Sichtbarkeit der Textur der Straße für eine Abstandsschätzung wichtig ist. Daher können bei Regen und spiegelnder Straße ohne gut sichtbare Struktur die Entfernungen schlechter abgeschätzt werden.

### 2.2.1 Aufgabe der Signale bei Tag

Die Signalleuchten helfen den Fahrzeugführern, Bewegungsänderungen schneller zu erfassen. Dadurch wird die Zeit verlängert, in der der Fahrer auf die Aktionen anderer Fahrer reagieren kann und die Verkehrssicherheit erhöht. So hat schon Rosemann [Ros75b] anhand von Experimenten in einem Fahrsimulator zeigen können, dass bei Ausfall der Bremsleuchten die Reaktionszeit um 25 Prozent verlängert wird.

Licht am Fahrzeug kann von dem Fahrzeugführer auch bewusst eingesetzt werden, um die Aufmerksamkeit anderer Verkehrsteilnehmer frühzeitig auf sich zu lenken, damit sie ihn nicht unnötig behindern. Dies kann auf Autobahnen beobachtet werden. So fällt zum Beispiel die Einschätzung von sehr hohen Geschwindigkeiten, deutlich über 200 km/h, einfacher, wenn schnell fahrende Fahrzeuge sich deutlich durch ihr Signalbild von anderen Fahrzeugen abheben, in dem sie auch bei Tag mit eingeschaltetem Abblend- oder Fernlicht fahren<sup>2</sup>.

Als Teil des vorderen Signalbildes unterstützen Tagfahrleuchten das Erkennen von Fahrzeugen auch noch bei widrigen Sichtverhältnissen am Tage. Als typische Situation ist hier das Befahren von Strecken mit abrupten Übergängen schattiger Bereiche zu sonnigen zu nennen, wie es häufig in Alleen auftritt [SEG<sup>+</sup>05]. Als Signalleuchten des rückwärtigen Signalbildes zeigen die Bremsleuchten eine Verzögerung des Fahrzeuges an. Die Fahrtrichtungsanzeiger zeigen die Richtungsänderungen sowohl nach vorne seitlich und hinten an.

### 2.2.2 Aufgabe der Signale bei Nacht

Bei Tag unterstützen die Signalleuchten das visuelle System. Bei Nacht ermöglichen erst diese Signalleuchten die Detektion von Fahrzeugen aus großer Entfernung. Daher sind die Signalleuchten nachts grundlegend notwendig.

In dem Fernbereich<sup>3</sup>, bei einem Abstand von einem Sehobjekt zu dem Beobachter, der deutlich mehr als 100 m beträgt, ist es nicht kritisch, wenn einzelne Signale fehlinterpretiert werden. Wichtig ist in erster Linie, dass ein Fahrzeug durch die Signale detektierbar ist. Erst im Nahbereich<sup>4</sup>, in dem Sehobjekte deutlich näher als 100 m sind, müssen die einzelnen Signale deutlich voneinander unterschieden werden können.

---

<sup>2</sup>Diese Signalbenutzung wird oft sowohl missbräuchlich benutzt als auch missverstanden.

<sup>3</sup>Siehe Abschnitt 2.3.1

<sup>4</sup>Siehe Abschnitt 2.3.2

### 2.3 Wahrnehmung der Fahrzeugleuchten

#### 2.3.1 Fernbereich

Bei der Fragestellung der Wahrnehmung von Signalleuchten muss zwischen dem Nahbereich und Fernbereich unterschieden werden. Diese beiden Bereiche beschreiben die Wirkungsbereiche von Signalleuchten.

Befindet sich der Fahrer eines Kraftfahrzeuges in geringem Abstand zu einem vorausfahrenden Fahrzeug, so wird sein Lichteindruck durch die lichttechnische Größe Leuchtdichte bestimmt. In großem Abstand, in dem Fernbereich der Leuchte, ist jedoch die Lichtstärke maßgeblich.

Unter anderem aus diesem Grund sind als lichttechnische Angaben für die Wirksamkeit von Leuchten in den ECE Regelungen Lichtstärken definiert, so dass die Detektion eines Fahrzeuges aus großer Entfernung sichergestellt wird.

#### 2.3.2 Nahbereich

Nach den Untersuchungen von Armbruster [Arm01] erstreckt sich der Nahbereich einer Leuchte bis zu einer Entfernung von ca. 100 m. Ripperger [Rip01b] erkannte durch seine Untersuchungen einen Bereich von 0 bis 63 m als gültigen Nahbereich bei Signalen mit einer leuchtenden Fläche von 100 cm<sup>2</sup> an. Auch andere Autoren, unter anderem Olson [Ols96], gehen davon aus, dass sich der Nahbereich bis mindestens 50 m erstreckt. Gemessen wurde bei Olson in Entfernungen von 15,2 m und 42,6 m, um Ergebnisse über das Verhalten im Nahbereich zu erhalten. In der vorliegenden Arbeit wird als Messentfernung für Untersuchungen im Nahbereich eine Entfernung zwischen Untersuchungsobjekt und Versuchsperson von 25 m gewählt.

Diem [Die04] erkannte bei seinen Untersuchungen mit einem Eye-Tracking System, dass Autofahrer sich bis zu einem Abstand von 75 m auf Landstraßen überwiegend an dem vorausfahrenden Fahrzeug orientieren. Dieser Sachverhalt gilt sowohl tagsüber als auch des Nachts. Daraus kann abgeleitet werden, dass Fahrer das vorausfahrende Fahrzeug bis zu diesem Abstand als nah genug zu ihrem eigenen Fahrzeug betrachten, um Informationen über den Straßenverlauf zu erhalten.

Die heute vorherrschende Verkehrsdichte legt nahe, statt ausschließlich der Lichtstärke auch die Leuchtdichte als lichttechnische Größe der Gesetzesgrundlage zu benutzen. In [Arm01] liegen zu diesem Thema ausführliche Untersuchungen vor, die belegen, dass im Nahbereich die Leuchtdichte die maßgebende Größe darstellt. Auch in [Rip01a] wird durch Versuche nachgewiesen, dass die Leuchtdichte als Kerngröße bei der Definition der lichttechnischen Anforderungen an Schluss- und Bremsleuchten zu verwenden ist.

### 2.4 Signalisation von Fahrzeugzuständen

Das Wort *Signalisation* stellt die Substantivierung des Verbs *signalisieren* dar. Es wird vornehmlich im offiziellen schweizerischen Sprachgebrauch benutzt. Da es jedoch trefflich beschreibt, wozu Signallichter benutzt werden, findet es auch in dieser nicht eidgenössischen Arbeit Verwendung. Die Signalisation erfolgt durch die Leuchten des vorderen, seitlichen und hinteren Signalbildes.

Das vordere Signalbild dient der Erkennung der

- Anwesenheit<sup>5</sup> eines Fahrzeuges
- Breite und damit des Abstandes zu dem Fahrzeug
- Richtungsänderung des Fahrzeuges
- Unterscheidung zwischen ein- und zweispurigen Fahrzeugen

Das seitliche Signalbild dient der Erkennung der

- Anwesenheit eines Fahrzeuges
- Länge und damit des Abstandes zu dem Fahrzeug
- Richtungsänderung des Fahrzeuges

Das hintere Signalbild dient der Erkennung der

- Anwesenheit eines Fahrzeuges
- Breite und damit des Abstandes zu dem Fahrzeug
- Richtungsänderung des Fahrzeuges
- Abbremsung des Fahrzeuges

Mögliche weitere Signalisationen können das Anzeigen einer Vorfahrtberechtigung durch Blaulicht oder einer Gefahrensituation durch gelbes Blinklicht sein. Diese Signale verhalten sich additiv zu dem vorderen, seitlichen und hinteren Signalbild.

### 2.4.1 Kodierung von Lichtsignalen

Fahrzeugführer erkennen Geschwindigkeits- und Richtungsänderungen anderer Fahrzeuge unter anderem anhand des Vergleichs der Fahrzeugsilhouette mit anderen Gegenständen im Verkehrsraum. Die Signalleuchten an Fahrzeugen unterstützen die Erkennbarkeit dieser Änderungen. Sie stellen die erste Redundanzstufe für das Erkennen der Geschwindigkeits- und Richtungsänderungen dar.

Die Fahrzeugsignale selbst sind wiederum redundant ausgelegt. So kann zum Beispiel der Fahrtrichtungsanzeiger von der Bremsleuchte durch Farbe und Blinkfrequenz unterschieden werden. Durch verschiedene Kodierungen der unterschiedlichen Lichtsignale wird die Redundanz dieser erhöht.

So kann zum Beispiel ein *helles, gelbes, blinkendes* Licht, der Fahrtrichtungsanzeiger, einfacher und somit schneller von einem *dunklen, roten, permanenten* Licht, dem Schlusslicht, unterschieden werden als ein *helles, rotes, permanentes* Licht, das Bremslicht von dem Schlusslicht unterschieden werden kann. Denn Schlusslicht und Bremslicht unterscheiden sich in nur einer Kodierungsart, der Fahrtrichtungsanzeiger und das Schlusslicht jedoch in drei Kodierungsarten.

---

<sup>5</sup>Die Anwesenheit eines Fahrzeuges wird erkannt, in dem ein oder mehrere Lichter wahrgenommen werden. Dies können, im Falle des vorderen Signalbildes, sowohl gelbe als auch weiße Signale sein.

## 2. Stand der Erkenntnisse

---

Doch für die Kodierung von Lichtsignalen durch Fahrzeugleuchten stehen nicht nur die drei Kodierungsarten *Helligkeit*, *Farbe* und *Frequenz* zur Verfügung. So ergibt sich mit den in [BD71] und [Fin70] genannten folgende Auswahl an Kodierungsarten:

- Helligkeit
- Farbe
- Form
- Größe
- Position
- Anzahl
- Anordnung
- Blinkfrequenz
- Textur

Durch bestimmte Leuchtenkonstruktionen kann jedoch auch ein Teil der Redundanz innerhalb der Signalleuchten verloren gehen. So verliert das Signalbild zum Beispiel durch die Überlappung an Redundanz. Eigene Untersuchungen hierzu werden in Kapitel 4 vorgestellt.

### 2.4.1.1 Helligkeit

Die Helligkeit beschreibt den visuellen Eindruck, der bei Menschen von der Leuchtdichte betrachteter Objekte hervorgerufen wird.

Enders [End95] beschreibt in seiner Arbeit über das Hellempfinden des menschlichen Auges verschiedene Untersuchungsmethoden, um das Empfinden tabellarisch festzuhalten. Er stellt fest, dass das Hellempfinden je nach Untersuchungsmethode deutlich unterschiedlich bewertet wird. Daher empfiehlt Enders zum Beispiel bei Fragestellungen betreffend der Erkennbarkeitsentfernung, die mit der Messmethode *Achromatische Schwelle* ermittelte Empfindlichkeitsfunktion zu benutzen. Bei Verhältnissen, wie sie bei der Untersuchung von Phantomlicht vorherrschen, farbige Signallichter vor hellem Hintergrund, empfiehlt er, die Anwendung der Daten von dem *heterochromatischen Direktvergleich* oder der *chromatischen Schwelle - Farbumschlag* zu verwenden.

Auch weist Enders [End95] darauf hin, dass die Hellempfindung von dem Adaptationsniveau, der Umfeldleuchtdichte, dem Kontrast, der Darbietungszeit und anderen Größen abhängig ist. Dies beeinflusst auch die Wahrnehmungszeit, wie Plainis [PMCC02] zeigen konnte.

Für die Erkennbarkeit von Lichtsignalen müssen diese eine Mindestleuchtdichte, abhängig von der Adaptationsleuchtdichte des Betrachters, aufweisen. Diese Mindestleuchtdichte, auch Schwellenleuchtdichte  $L_S$  genannt, beträgt bei einem Sehwinkel von einer Minute<sup>6</sup> und einer Umfeldleuchtdichte von  $2 \text{ cd/m}^2$  bis zu  $10 \text{ cd/m}^2$ , je nach Farbe des Lichtsignales [Hof75]. Kann das Objekt unter einem größeren Sehwinkel gesehen werden, nimmt die Abbildung des Objekts also einen prozentual größeren Bereich der Netzhaut ein, so können auch dunklere Objekte erkannt werden. Bei einem Sehwinkel von zehn Minuten<sup>7</sup> beträgt die Schwellenleuchtdichte nur noch  $0,2 \text{ cd/m}^2$ . Daher müssen kleinere Signale höhere Leuchtdichten als große Signale aufweisen. Dies wird in den ECE Regelungen sichergestellt, in dem die Lichtstärke für die verschiedenen Signalfunktionen festgelegt wird. Denn bei gleicher Lichtstärke  $I$  wird die Leuchtdichte  $L$  erhöht, wenn die Fläche  $A$  verkleinert wird. Formel 2.1 zeigt den Zusammenhang zwischen den drei Größen.

$$LA = I \quad (2.1)$$

---

<sup>6</sup>Dies entspricht zum Beispiel einer Signalgröße von 7 mm in 25 m Entfernung.

<sup>7</sup>Dies entspricht zum Beispiel einer Signalgröße von 7 cm in 25 m Entfernung.

In den ECE Regelungen wird die Helligkeit von Fahrzeugleuchten über die Minimal- und Maximalwerte der Lichtstärke angegeben. Bei einigen Leuchten, Nebelschlussleuchte und Tagfahrleuchte, wird zusätzlich noch die leuchtende Fläche festgelegt, wodurch indirekt ein Leuchtdichtebereich definiert wird.

Da die Leuchtdichte nicht direkt festgelegt wird, kann durch eine ungeschickt gewählte Leuchtenkonstruktion die Kodierung der Helligkeit im Nahbereich umgekehrt zu der im Fernbereich sein. Eine Kodierung über die Lichtstärke oder die Größe der Fläche führt nicht zwangsläufig zu einer redundanten Kodierung. Man kann sogar sehen, dass die Leuchtdichte einer Schlussleuchte höher, als die einer Bremsleuchte sein kann. Dies kann zu erheblichen Fehlinterpretationen der Lichtsignale führen.

Der Lichteindruck des Fahrers eines Kraftfahrzeuges wird bei geringem Abstand zu einem anderen Fahrzeug durch die lichttechnische Größe Leuchtdichte bestimmt. Befindet sich der Fahrer in einem großem Abstand zu der zu erkennenden Leuchte, so ist jedoch die Lichtstärke die maßgebliche Größe. Bei der Überlegungen bezüglich der Kodierung von Signalen sind daher beide lichttechnische Größen zu berücksichtigen, so dass die Kodierung sowohl im Nahbereich als auch im Fernbereich funktioniert.

Die benötigte Leuchtdichte eines Signals für dessen sichere Erkennbarkeit ist von der Umfeldleuchtdichte abhängig. Auch die empfundene Helligkeit eines Signals wird durch die Umfeldleuchtdichte beeinflusst. Nach Fechner besteht ein logarithmischer Zusammenhang zwischen Leuchtdichte und Hellempfinden [Hof75].

Wird nicht nur die achromatische Helligkeit, sondern auch die Helligkeit von Farben betrachtet, so kann festgestellt werden, dass man bei dunklen Farben feinere Helligkeitsunterschiede wahrnehmen kann, als bei hellen [HK03]. Jedoch ist derzeit keine absolute Leuchtdichte publiziert, bei der von hellen oder dunklen Farben zu sprechen ist.

Nicht vergessen werden sollte bei der Betrachtung der Helligkeit ausgedehnter Flächen, die Verteilung der Leuchtdichte auf diesen Flächen. Bei einigen Betrachtungen reicht die Angabe einer mittleren Leuchtdichte, um sichere Aussagen treffen zu können. Oft jedoch ist auch die Leuchtdichteverteilung zu berücksichtigen. Dies wird bei der Betrachtung der Phantomlichteffekte in Kapitel 5 näher diskutiert. Festzustellen ist, dass die Leuchtdichte von Signalleuchten nicht zu ungleichmäßig sein sollte, da sonst störende Strukturen entstehen können.

Für Signalleuchten ist als minimal geforderte Gleichmäßigkeit der Leuchtdichte ein Verhältnis von 1:10 nach DIN EN 12368, Absatz 6.5, [DIfN06b] oder gar 1:6 nach DIN 67527 Teil 2, Absatz 5.3.3, [DIfN88] zwischen minimaler  $L_{min}$  und maximaler  $L_{max}$  Leuchtdichte angegeben.

Meist, zum Beispiel in DIN EN 12368, wird als Maßzahl für die Gleichmäßigkeit einer Fläche, auch als Homogenität bezeichnet, das Verhältnis der maximalen Beleuchtungsstärke  $E_{max}$  zu der minimalen Beleuchtungsstärke  $E_{min}$ , gemessen auf dieser Fläche, benutzt. Bei Flächen mit lokal kleinen, aber betragsmäßig großen Abweichungen beeinflussen nur diese Extremwerte den Wert der Gleichmäßigkeit.

Eine modernere Maßzahl der Gleichmäßigkeit wird in DIN 5035, Teil 8, Abschnitt 3.7, Abschnitt 4.2.4 und Abschnitt 6.2.2 [DIfN06a] angegeben. Dabei wird die Gleichmäßigkeit  $g_3$  aus dem Verhältnis der Standardabweichung  $s$  aller Einzelwerte der Beleuchtungsstärke  $E_i$  zur mittleren Beleuchtungsstärke  $\bar{E}$  auf einer Fläche berechnet (Formel 2.2).

$$g_3 = \frac{s}{\bar{E}} \quad (2.2)$$

## 2. Stand der Erkenntnisse

Die Standardabweichung  $s$  wird nach Formel 2.3 berechnet.

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2} \quad (2.3)$$

Für die Ermittlung der einzelnen Beleuchtungsstärken  $E_i$  wird die zu bewertende Fläche in zehn auf zehn gleich große Flächen, insgesamt  $n = 100$ , unterteilt. In der Mitte jeder Einzelfläche  $i$  wird die Beleuchtungsstärke  $E_i$  gemessen. Aus allen Beleuchtungsstärken  $E_i$  wird die mittlere Beleuchtungsstärke  $\bar{E}$ , das arithmetische Mittel, ermittelt, wie in Formel 2.4 angegeben.

$$\bar{E} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i \quad (2.4)$$

Die Maßzahl  $g_3$  der zu bewertenden Fläche darf für eine gute Gleichmäßigkeit maximal 1 betragen.

### 2.4.1.2 Farbe

Menschen in unterschiedlichsten Kulturen und Regionen der Erde verfügen in ihrem Sprachschatz über Worte für Farbe. Grundlegende Untersuchungen dazu sind von Berlin und Kay im Jahr 1969 durchgeführt worden [KB69]. Sie analysierten insgesamt 98 Sprachen auf deren Gehalt an Worten zur Beschreibung von Farbe. Den Großteil der Untersuchungen konnten sie anhand von Literaturstudien durchführen. Bei zwanzig Sprachen vertieften sie die Arbeit durch experimentelle Versuche. Dabei zeigten sie den Versuchspersonen ein Set von Munsell-Farben (Bild 2.1) und fragten nach den Namen der einzelnen Farben.



**Bild 2.1:** Farbpalette zur Bestimmung der Farbnamen durch Berlin, Kay und weitere Forscher. Die WCS Koordinaten sind an den Munsell Farbtafeln angegeben. (Quelle: [CKR06])

Als Ergebnis fanden sie, dass wenige Worte den Hauptfarbenraum innerhalb der Sprache aufspannen. Ein paar Sprachen, ungarisch und russisch, besitzen zwölf Hauptfarbworte, typisch sind jedoch elf Worte. Dies ist der Fall in englisch, deutsch, libanesisch, bulgarisch, hebräisch, japanisch, koreanisch, spanisch und weiteren Sprachen. Besitzen Sprachen weniger Worte für Farben, so gilt weltweit die gleiche Wichtigkeit und Reihenfolge der Farbbegriffe [KM99].

Bei nur zwei vorhandenen Worten<sup>8</sup> wird zwischen hell und dunkel beziehungsweise weiß und

<sup>8</sup>Zum Beispiel besitzt das Volk der Dani auf New Guinea nur zwei Begriffe: *mola* für eine weiß-warme Farbstimmung einschließlich den Farben weiß, rot, gelb und *mili* für eine dunkel-kalte Farbstimmung mit den Farben schwarz, grün, blau.

schwarz unterschieden. [KM99] trennt die Unterscheidung des Volkes der Dani als zwei allgemein gültige Unterscheidungen auf, die beide nebeneinander existieren. Zum Einen die Unterscheidung zwischen schwarz und weiß und zum Anderen zwischen kalt und warm.

Existieren drei Farbworte so kommt zusätzlich noch rot hinzu. Die Reihe wird in der Folge [KM99, Blu03] *schwarz, weiß, rot, grün, gelb, blau, braun, lila, rosa, orange, grau* fortgesetzt.

Durch neuere Untersuchungen [KM99] konnte dieser Hauptfarbenraum für die Farben *black, white, red, yellow, green, blue* (weiß, schwarz, rot, gelb, grün, blau) bestätigt werden.

Die Wichtigkeit der Benutzung von Farbe zur Kodierung von Signalen kann unter anderem bei Kay [KM99] erkannt werden. Er zeigt auf, dass Menschen in hoch technologischen Gemeinschaften zur Unterscheidung von Gegenständen gleicher Kategorie diese meist nur durch ihre Farbe unterscheiden. So wird „die Frau im roten Kleid“ hervorgehoben unter den anderen Frauen, die gelbe Mülltonne von der grünen unterschieden und der roten Ampel die entgegengesetzte Funktion zugeordnet, welche die grüne hat.

In der Signaltechnik muss schnell und sicher zwischen verschiedenen Zuständen unterschieden werden. Die für Signale genutzten Farben beschränken sich auf die Farben des Hauptfarbenraumes. So wird in dem CIE Standard S 004 [CIE01] vorgegeben, keine anderen Farben für Lichtsignale zu benutzen als rot, gelb, weiß, grün und blau. Die Farbe schwarz zeigt an, dass *kein* Signal vorhanden ist. Allerdings empfiehlt der Standard auch, die Anzahl der Farben pro Signalsysteme auf vier zu begrenzen.

Bei Signalen am Fahrzeug wird dies realisiert. Es werden die Farben rot, gelb und weiß für normale Fahrzeuge genutzt. Bei Einsatzfahrzeugen kommt noch die Farbe blau hinzu. So bleibt die Anzahl der Farben auf vier beschränkt.

Die Zuordnung der Farbe einer Signalleuchte zu ihrer Funktion hat der Fahrer erlernt.

So steht die Farbe *rot* für Halt, langsam fahren. Dies ist zu sehen bei Lichtsignalanlagen (Ampeln, Bahnübergängen), Verkehrsschildern (Stop-Zeichen, Vorfahrt gewähren, Verbotsschildern) und Bremsleuchten.

Die Farbe *grün* steht für freie Fahrt, zu sehen bei Lichtsignalanlagen. Auch für Schlussleuchten wurde diese Farbe diskutiert [BD71], jedoch nicht übernommen, obwohl Untersuchungen [Ros75b, Mor70] gezeigt haben, dass dadurch die Verkehrssicherheit erhöht wird. So verkürzt sich die Reaktionszeit bei Aufleuchten eines roten Bremslichtes um 16 Prozent, wenn die Schlussleuchten grün statt rot sind. Auch subjektive Befragungen [Ros75a] haben ergeben, dass bei einem rückwärtigen Signalbild mit grünen Schlusslichtern die Bremsleuchten intuitiver erkannt werden. Einige Autoren [All64, Har71] fordern darum die Einführung grüner Schlussleuchten. Etliche Systeme, die grüne Leuchten nutzen, sind patentiert (zum Beispiel [Bar97]). Andere Autoren [PC72] lehnen den Einsatz aufgrund möglicher Verwirrung der Fahrer im Straßenverkehr ab. Soll die oben erwähnte Beschränkung auf vier Farben (rot, gelb, weiß und blau) beibehalten werden, so kann die Farbe grün nicht als Signalfarbe für Schlussleuchten benutzt werden. Auch wird von Farbfehlsichtigen laut [CIE01] grün mit weiß verwechselt. Bei der Nutzung von grün als Schlussleuchte verwechseln diese Personen bei einem Fahrzeug hinten mit vorne, was als hoch sicherheitskritisch einzustufen ist und einen weiteren Grund für die Ablehnung grüner Schlussleuchten darstellt.

Die Farbe *gelb* steht in Europa einerseits bei Lichtsignalanlagen und am Fahrzeug als Warnblinklicht für Achtung. Andererseits werden mit dem gelben Fahrtrichtungsanzeiger Richtungsänderungen angezeigt. In USA werden diese oft mit rot signalisiert. Dadurch wird die Wahrnehmung des Fahrtrichtungsanzeigers bei Aufenthalt in einem anderen Kulturumfeld erschwert, wie in Abschnitt 2.6.1 ausgeführt.

## 2. Stand der Erkenntnisse

---

Die Farbe von Signalleuchten sollte sich während der Lebensdauer des Fahrzeuges nicht verändern, oder zumindest während des gesamten Zeitraums innerhalb der vorgegebenen Grenzen bleiben. Jedoch ist bei einigen Leuchten festzustellen, dass die geforderten Farbwerte nur im Neuzustand der Leuchte erreicht werden. Die Farbe des abgestrahlten Lichtes entsättigt sich im Laufe der Zeit. Dieses Problem tritt besonders bei Leuchten mit farbigen Glühlampen auf. Bei Lampen, bei denen die Farbwirkung durch einen aufgetragenen Lack erzielt wird, kann dieser Lack im Laufe der Zeit abplatzen. Die Farbe des abgestrahlten Lichtes wird entsättigt. Im Gegensatz hierzu sind bei durchgefärbten Lampen oder mit LEDs bestückten Leuchten bisher keine Veränderungen der Lichtfarbe während der Nutzungsdauer bekannt.

Diese Problematik wird bei stationären Signalleuchten dadurch gelöst, dass schon in den technischen Beschreibungen DIN EN 12368, Absatz 4.1, [DifN06b] gefordert wird, dass die Farbe während der gesamten Lebensdauer innerhalb der Farbbereiche liegen muss.

### 2.4.1.3 Form

Mortimer [Mor67, Mor69] fand heraus, dass der Nutzen der Flächenform als Kodierung für die Unterscheidung verschiedener Signalarten zweifelhaft ist.

In der Literatur wird aufgeführt, dass die geometrische Form der leuchtenden Flächen (im Beispiel die rote Abschlusscheibe) keinen Einfluss auf die Erkennbarkeit des Signalbildes hat. Dies wird bei [BD71] und [Ols96] behauptet, wobei bei Olson die Aussage durch Experimente erhärtet wird.

### 2.4.1.4 Größe

Eine ähnliche Aussage wie zur Flächenform erhielt Mortimer [Mor67, Mor69] bezüglich der Größe. Er fand heraus, dass der Nutzen der Flächengröße als Kodierung für die Unterscheidung verschiedener Signalarten zweifelhaft ist.

### 2.4.1.5 Position

Die Position beschreibt, wo die Leuchte am Fahrzeug angebracht ist. So werden mittlere Bremsleuchten<sup>9</sup> in der Mitte des Fahrzeug und nicht an dessen Rand angebracht. Fahrtrichtungsanzeiger im Gegensatz werden am Besten direkt am Rand des Fahrzeug montiert, um so weit wie möglich in der Richtung angebracht zu sein, deren Richtungsänderung sie anzeigen.

Mögliche Positionen von Leuchten sind oben, unten, rechts, links und mittig auf einer Fläche des Fahrzeug. Diese Positionen gelten für vordere, seitliche und hintere Leuchten.

Die Positionierung der Leuchten trägt wesentlich zur schnelleren Erfassung des Signalbildes bei. Dies geht aus den Untersuchungen zur mittleren Bremsleuchte von Chang [CLL01] hervor. Die mittlere Bremsleuchte ist eindeutig durch ihre Position am Fahrzeug kodiert. Keine andere Leuchte<sup>10</sup> ist an dieser Position angebracht. Hat der nachfolgende Fahrer den Autoumriß vor sich erkannt, erkennt er somit auch die Mitte des Fahrzeuges, und kann, wenn in der Mitte ein Licht aufleuchtet, daraus schließen, dass das Fahrzeug vor ihm bremst. Er muss für diese Entscheidung

---

<sup>9</sup>Mittlere Bremsleuchten sind Leuchten gemäß ECE Regelung Nummer 7, Typ S3.

<sup>10</sup>Es kann auch die Nebelschlussleuchte oder der Rückfahrcheinwerfer in der Mitte des Fahrzeuges angebracht sein. Der Rückfahrcheinwerfer wird jedoch nicht während der Fahrt, sondern nur im Stand eingeschaltet. Die NSL kann zwar während der Fahrt eingeschaltet werden, weist auch die gleiche Kodierung bezüglich Helligkeit und Farbe wie die mittlere Bremsleuchte auf, aber die Wahrscheinlichkeit, gerade diesen Einschaltzeitpunkt zu sehen, ist so gering, dass damit nicht gerechnet werden muss.

keine andere Kodierungen, wie zum Beispiel die Helligkeit oder Farbe, berücksichtigen. Helligkeit, Farbe, Form, Größe und eventuell Blinkfrequenz sind zweitrangig, wenn das Signal in der Fahrzeugmitte leuchtet.

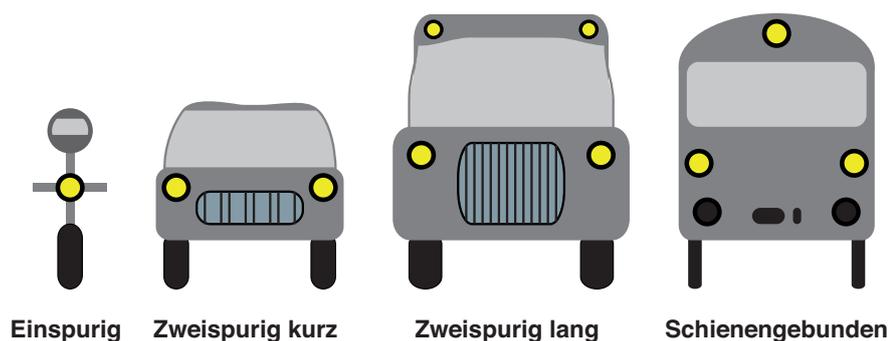
Bei der Positionierung der verschiedenen Leuchten ist darauf zu achten, dass sie sich nicht gegenseitig in ihrer Wirksamkeit behindern [BD71]. So kann ein Fahrer, der bei Dunkelheit an einem vor sich fahrenden, teilweise verdeckten Fahrzeug nur eine rote Leuchte sieht, nicht erkennen, ob dies eine helle Schlussleuchte oder eine dunkle Bremsleuchte ist. Sind die Positionen der Schlussleuchten und Bremsleuchten jedoch so gewählt<sup>11</sup>, dass noch aus größerer Entfernung diese beiden Funktionen eindeutig unterscheidbar sind, so kann ein nachfolgender Fahrer auch bei teilweise verdeckten Leuchten auf die richtige Funktion schließen.

### 2.4.1.6 Anzahl

Mortimer [Mor69] hat gezeigt, dass die Anzahl der insgesamt angebrachten Signalleuchten einen Einfluss auf die Reaktionszeit und die Fehlerrate für das Erkennen von Fahrzuständen hat. Je höher die Anzahl der getrennten Signalleuchten ist, das heißt je weniger Leuchten ineinander gebaut sind, desto geringer sind die Reaktionszeiten und die Fehlerraten. Er untersuchte dabei Kombinationen von Schlussleuchte, Fahrtrichtungsanzeiger und Bremsleuchte. Alle drei Signale hatten die Farbe rot und waren in Blinkfrequenz oder Lichtstärke voneinander unterschiedlich. Die Gesamtanzahl der hinteren Leuchten variierte von zwei bis sechs mit mehr oder weniger ineinander gebauten Leuchten.

### 2.4.1.7 Anordnung

Im Gegensatz zu der Position einer Leuchte, die den Platz des Signals absolut zu Fahrzeugkanten angibt, zeigt die Anordnung die relative Zuordnung einzelner Leuchten zueinander. Leuchten gleicher Funktion können als Linie, Dreieck oder Viereck angeordnet sein. Dies ist in Bild 2.2 und Bild 2.3 symbolisch dargestellt.



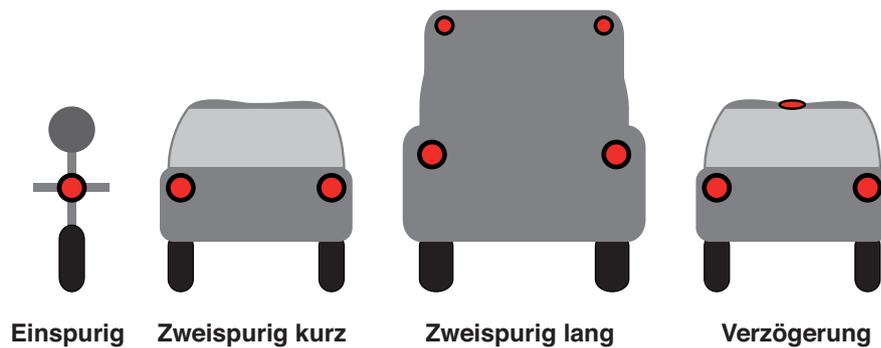
**Bild 2.2:** Vordere Signalbilder verschiedener Fahrzeuge  
Einzelne Leuchten formen mit ihrer Anordnung einfache geometrische Formen.

Leuchten unterschiedlicher Funktion sollten mit ausreichendem Abstand untereinander angeordnet werden. Sieht ein Beobachter eine rote Leuchte, kann er schlecht unterscheiden, ob dies eine Schlussleuchte oder ein Bremslicht ist. Sind Bremsleuchte und Schlussleuchte mit ausreichend

<sup>11</sup>Als intuitive Position für Schlussleuchten bietet sich an, diese an allen vier Ecken des Fahrzeugumrisses zu positionieren.

## 2. Stand der Erkenntnisse

---



**Bild 2.3:** Hintere Signalbilder verschiedener Fahrzeuge und Fahrzeugzustände  
Einzelne Leuchten formen mit ihrer Anordnung einfache geometrische Formen.

Abstand voneinander angeordnet, so kann der Fahrer durch Vergleich der Helligkeiten beider Signale sehen, dass die Bremsleuchte eingeschaltet ist. Erst recht im Fall vollständiger Überlappung kann nur sehr schwer zwischen Bremsleuchte und Schlussleuchte unterschieden werden. Auch bei teilweiser Überlappung sind Einbußen bei der Erkennbarkeit des Signalbildes zu erwarten. Bereits bei [Mor70] wird ein Abstand von Bremsleuchten zu anderen Leuchten von mindestens 5 inch ( $\approx 12,7$  cm) gefordert. Auf diesen von Mortimer vorgeschlagenen Wert nimmt auch Owen [Owe70] Bezug. Im Battelle-Bericht [BD71], einer Zusammenfassung und Auswertung verschiedenster Untersuchungen, wird ein Mindestabstand zwischen zwei Leuchten von 15 cm als ideal bezeichnet.

Der Battelle-Bericht [BD71] erwähnt, dass Einigkeit über die Notwendigkeit darüber herrscht, Fahrtrichtungsanzeiger und Bremsleuchten voneinander räumlich zu trennen. Es besteht jedoch keine Übereinstimmung darüber, ob dies auch für die Kombination von Fahrtrichtungsanzeiger zu Schlussleuchte notwendig ist. Als Quellen für diese Aussage werden [Fin70], [Owe70] und [Mor70] angegeben. Sowohl Finch [Fin70] als auch Owen [Owe70] stellen wiederum eine Zusammenfassung von Forschungsergebnissen dar. Alle drei Zusammenfassungen verweisen auf die Ergebnisse der Untersuchungen von Mortimer, die dieser unter anderem in [Mor70] veröffentlichte. Viele Aussagen in der Literatur bezüglich des notwendigen Abstandes zwischen Lichtsignalen sind letztendlich auf einen Experimentator rückführbar. Die Ergebnisse eigener Untersuchungen sind in Kapitel 4 aufgezeigt.

Bei Schlussleuchten ist bei der Anordnung auf einen ausreichenden Abstand zwischen rechter und linker Leuchte zu achten, damit der Schinkel zum Erkennen der zwei Leuchten groß genug ist. Laut [BD71] ist ein Abstand von einem Meter ein akzeptabler Wert für das Erkennen bei Geschwindigkeiten bis zu 160 km/h.

Weitaus besser für die Erkennbarkeit wäre eine Verdoppelung der Anzahl der Schlussleuchten. Bei [Mor70] wird vorgeschlagen, im oberen Bereich des Fahrzeughecks zusätzliche Schlussleuchten anzubringen. Die insgesamt vier Leuchten spannen ein Trapez auf, durch welches das Fahrzeug besser erkannt wird, da die diagonal entfernten Leuchten einen noch größeren Abstand erreichen können, als dies mit nur zwei Leuchten möglich wäre.

Rosemann [Ros75a] hat jedoch gezeigt, dass bei Ausfall aller Bremsleuchten zwischen einer Anordnung von zwei oder vier Schlussleuchten kein Unterschied in der Reaktionszeit auf die Verzögerung festgestellt werden kann. Die Anordnung von vier Schlussleuchten im Viereck verbessert demnach nicht die Abstandsschätzung.

### 2.4.1.8 Blinkfrequenz

Blinkende Signale sind auffälliger als Dauerlichter [Sch00]. Dies gilt im Besonderen, wenn sich die Signale nicht im Blickfeld befinden [Pos78]. Daher sollten blinkende Lichter für Warnsignale (Bremsen, Abbiegen) genutzt werden. Für die Anzeige der Präsenz (Positionsleuchten, Schlussleuchten) eines Fahrzeuges reichen Dauerlichter. Durch diese Unterteilung kann über die Frequenz eine Kodierung für dringende und weniger dringende Signale erreicht werden. Aktuell wird der Fahrtrichtungsanzeiger blinkend dargestellt, die Bremsleuchten jedoch nicht.

Auf blinkende Bremsleuchten wird derzeit meist verzichtet, da pro Anbauplatz nur eine Leuchte vorhanden ist und bei blinkendem Betrieb diese während des kritischen Bremsvorgangs phasenweise (jeweils bis zu 500 ms lang) dunkel wäre. Dieses Problem kann jedoch gelöst werden, in dem pro Anbauplatz zwei abwechselnd blinkende Leuchten angebaut sind, so dass während des Bremsvorgangs pro Anbauplatz stets ein eingeschaltetes Bremslicht zu sehen ist.

Bei dem Fahrtrichtungsanzeiger ist die Nichtsichtbarkeit in den stromlosen Phasen in der Praxis nicht als kritisch anzusehen, da dieses Signal vom Fahrer dezidiert eingeschaltet werden muss. Dieser Vorgang ist je nach Fahrer mit großen Latenzzeiten behaftet und kann daher eine Verzögerung von etlichen Sekunden aufweisen.

Die Auffälligkeit von Lichtsignalen ist nicht nur von der Eigenschaft blinkend oder nicht blinkend, sondern auch von der Blinkfrequenz des Signals abhängig [Pos78]. Deshalb schlägt Gail [GLG<sup>+</sup>02] vor, zur Anzeige von Notbremsvorgängen eine Blinkfrequenz der Bremsleuchten von 3–5 Hz zu benutzen. Auch etliche weitere Autoren (aufgeführt in [BBSB07]) schlagen eine Blinkfrequenz von 4 Hz für das Erreichen größter Aufmerksamkeit vor.

Zu beachten ist dabei die technische Realisierung. Bei gleich langen Hell- und Dunkelphasen beträgt eine Hellphase bei einer Blinkfrequenz von 4 Hz nur 125 ms. Die Ansprechzeiten von Glühlampen sind jedoch wesentlich länger (Tabelle 2.5). Daher dürfen für schnellere Blinksignale nur schnelle Lichtquellen (zum Beispiel LEDs oder Entladungslampen) eingesetzt werden, damit das Lichtsignal während seiner Hellphase die maximale Lichtstärke erreicht.

Da während der Dunkelphase das Signal nicht zu sehen ist, schlagen manche Autoren vor, eine Blinkfrequenz nahe der Flimmerverschmelzungsfrequenz zu wählen, um die Totzeit des Signals auch ohne den Einsatz von abwechselnd blinkenden Doppelleuchten zu minimieren. Deshalb hat Berg [BBSB07] bei seinen Versuchen eine Blinkfrequenz von 20 Hz gewählt, die jedoch aufgrund des hohen Betrags als Flimmer- und nicht als Blinkfrequenz bezeichnet werden sollte. Um bei dieser hohen Frequenz eine ausreichend hohe Lichtstärke darstellen zu können, benutzte er LED-Leuchten mit einem Tastverhältnis<sup>12</sup> von 25 Prozent.

Er führte zwei Experimente mit unterschiedlich starker Beanspruchung der Versuchspersonen durch Nebenaufgaben durch. Dabei erhielt er bei schwacher Beanspruchung eine Verbesserung der Reaktionszeit um 14 ms (4 Prozent) von 340 ms bei Dauerlicht zu 326 ms bei einer Flimmerfrequenz von 20 Hz. Bei starker Beanspruchung betrug die Verbesserung 29 ms (7 Prozent) bei einer Reaktionszeitverkürzung von 426 ms auf 397 ms. Anhand seiner Experimente wird deutlich, dass die Erhöhung der Aufmerksamkeit des Signallichtes bei zunehmender Beanspruchung oder Ablenkung zunehmend effektiver wird. Andererseits kann man sehen, dass bei zunehmender Beanspruchung die Reaktionszeit auf wichtige Fahrzeugsignale von 340 ms auf 426 ms deutlich (20 Prozent) zunimmt.

Bei allen blinkenden oder blitzenden Lichtsignalen ist zu beachten, dass der Frequenzbereich von 9 bis 12 Hz für Lichtsignale vermieden wird, da durch solche Signale bei einigen Personen epileptische Anfälle durch *photopic driving* hervorgerufen werden können [Pos78].

---

<sup>12</sup>Englisch: *duty cycle*

## 2. Stand der Erkenntnisse

---

### 2.4.1.9 Textur

Gorbach [Gor02] führt Textur als charakteristischen Punkt für Gestaltung auf. Die Textur beschreibt die Struktur, das Muster, die Transparenz, Dichte und Räumlichkeit von Gegenständen, messtechnisch erfassbar unter anderem durch Leuchtdichten, die Helligkeitsunterschiede, Kontraste und Graustufen beschreiben.

Die Textur hilft, die Räumlichkeit einer Fläche rascher zu erfassen. Über die ständig entstehenden kleinen Veränderungen vieler kleiner Schatten und Reflexe auf einer texturierten Fläche wird bei dem Vorgang der Apperzeption die Lage einer Fläche zu den sie beleuchtenden Lichtquellen in Relation gesetzt. Die vielen kleinen Reflexe werden von den kleinen Objekten verursacht, aus denen eine Fläche besteht.

So setzt sich bei Leuchten mit Toruslinsen die Abschlusscheibe aus vielen kleinen Toruslinsen zusammen, die bei entsprechender Beleuchtung ein sich ständig veränderndes Aussehen aufweisen. Bei einigen LED-Leuchten besteht die Reflektorfläche aus vielen Einzelreflektoren, so dass diese Leuchten eine spezifische Textur aufweisen.

Eine Textur kann glatt oder rauh, unruhig oder gleichförmig, grob oder fein, matt oder glänzend, abgeschlossen oder offen sein. Die verschiedenen Texturen rufen im Beobachter Assoziationen wie hochwertig oder billig, festlich, elegant, rauhbeinig, schmeichlerisch, massiv hervor.

Nicht nur Gestalter wie Gorbach beschäftigen sich mit der Textur. Auch Lichttechniker wie zum Beispiel Schanda zollen ihr Beachtung. So erweitert Schanda [RS05] die Formel von Munsell um die Textur, denn er stellt fest, dass diese bei Vergleichsexperimenten einen nicht unerheblichen Einfluss hat.

### 2.4.2 Überlappung, Ineinanderbau und Zusammenbau von Lichtsignalen

Die Begriffe *Ineinanderbau* und *Überlappung* beschreiben den gleichen Sachverhalt aus unterschiedlichen Blickpunkten.

#### 2.4.2.1 Ineinanderbau von Leuchten

*Ineinanderbau* ist die technische Beschreibung einer bestimmten Konstruktionsart von Kraftfahrzeugleuchten. Nach ECE Regelung Nummer 48 [ERR07a] sind ineinander gebaute Leuchten Einrichtungen mit eigenen Lichtquellen oder einer einzigen Lichtquelle, die unter unterschiedlichen Bedingungen (zum Beispiel unterschiedliche optische, mechanische oder elektrische Merkmale) Licht abgibt, mit gemeinsamen oder teilweise gemeinsamen leuchtenden Flächen und einem gemeinsamen Gehäuse. Bei allen bekannten Konstruktionen dieser Art nimmt ein Betrachter auf der selben Fläche verschiedene Lichtsignale wahr. Die unterschiedlichen Signalfächen überlappen teilweise oder vollständig. Für überlappende Signale, zum Beispiel bei Phantomlichteffekten, ist jedoch ein gemeinsames Gehäuse nicht zwingend notwendig.

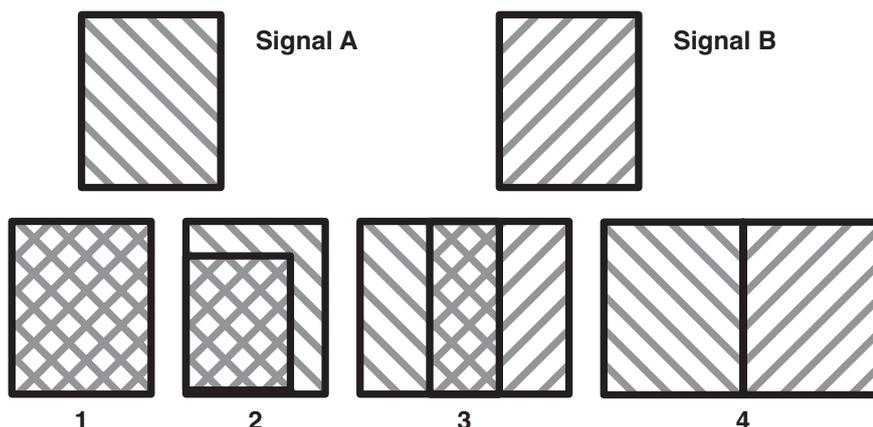
Als klassisches Beispiel gilt der Ineinanderbau von Schluss- und Bremsleuchten. Die gesetzlichen Vorgaben legen das Verhältnis der Lichtstärke von Schlussleuchte zu Bremsleuchte bei ineinandergebauten Leuchten fest [ERR]. Es wird von den Regelungen ein Verhältnis von mindestens 1:5 in der Lichtstärke vorgeschrieben, da bei kleinerem Verhältnis die Unterscheidung des Bremslichtes von der Schlussleuchte beeinträchtigt ist. Einigen Untersuchungen [BD71] zufolge wäre jedoch ein wesentlich höheres Verhältnis von bis zu 1:20 angemessen.

Werden hierbei LEDs als Leuchtmittel benutzt, so wird einzig durch eine Änderung deren Taktverhältnisses zwischen den beiden Signalfunktionen unterschieden. Die leuchtende Fläche, Farbe, Anzahl der Lichtquellen, Betriebsfrequenz deren Pulsweitenmodulation, Versorgungsspannung und weitere Parameter bleiben bei einem Wechsel der Signalfunktion unverändert. Die Flächen der wahrgenommenen Signale überlappen hierbei.

### 2.4.2.2 Überlappung von leuchtenden Flächen

*Überlappung* beschreibt den Zusammenhang zwischen den wahrgenommenen Flächen einzelner Signale. Werden diese Flächen als eine gemeinsame wahrgenommen, so überlappen sie. Diese Wahrnehmung ist nicht zwingend auf ineinandergebaute Leuchten beschränkt. Auch sehr nahe beieinander platzierte Leuchten<sup>13</sup> erscheinen ab einer bestimmten Beobachterentfernung überlappend.

Der Begriff *Überlappung* beschreibt im Gegensatz zu dem Begriff *Ineinanderbau* keine konstruktiven, sondern die Wahrnehmung beschreibende Eigenschaften von Leuchten. Es ist zu unterscheiden zwischen vollständiger und teilweiser Überlappung. Eine Übersicht über die verschiedenen Arten von Überlappung liefert Bild 2.4.



**Bild 2.4:** Verschiedene Überlappungsarten der leuchtenden Flächen A und B

- 1) Signal A wird vollständig überlappt. Signal B wird vollständig überlappt.
- 2) Signal A wird teilweise überlappt. Signal B wird vollständig überlappt.
- 3) Signal A wird teilweise überlappt. Signal B wird teilweise überlappt.
- 4) Signal A wird nicht überlappt. Signal B wird nicht überlappt.

### 2.4.2.3 Vollständige Überlappung

Weisen bei zusammengebauten, kombinierten oder ineinander gebauten Leuchten mindestens zwei Lichtfunktionen gemeinsame leuchtende Flächen auf, so liegt Überlappung vor.

Wenn die Fläche einer Signalfunktion vollständig innerhalb der Fläche einer anderen Funktion liegt oder mit dieser identisch ist, so wird dies mit *Vollständige Überlappung* bezeichnet.

<sup>13</sup>So bestehen zum Beispiel die Rückleuchten des BMW Z8 aus einer sehr langen und dünnen Schluss- beziehungsweise Bremsleuchte, die direkt neben einem ebenso dünnen Fahrtrichtungsanzeiger platziert ist. Schon bei Abständen von einigen zehn Metern nimmt ein Beobachter die gelben und roten Lichtsignale als überlappend wahr.

## 2. Stand der Erkenntnisse

---

### 2.4.2.4 Teilweise Überlappung

Falls Teile der Fläche einer Signalfunktion, aber nicht die gesamte Fläche, innerhalb der Fläche einer anderen Funktion liegt, so wird dies mit *Teilweiser Überlappung* bezeichnet.

### 2.4.2.5 Überlappungsgrad

Der Grad  $G$  der Überlappung wird als Verhältnis zwischen den überlappten Flächenanteilen  $A_U$  der Signalfunktion zu deren gesamter leuchtender Fläche  $A$  angegeben. Dies wird mit Formel 2.5 ausgedrückt.

$$G = \frac{A_U}{A} \quad (2.5)$$

Eng verbunden mit dem Überlappungsgrad von Lichtsignalen ist der Abstand zwischen ihnen. Hier hat sich bisher keine einheitliche Definition des Abstands etabliert, weshalb im Folgenden verschiedene Messmethoden angegeben werden.

### 2.4.2.6 Verschiedene Definitionen des Abstandes zwischen Lichtfunktionen

Der Abstand zwischen Fahrtrichtungsanzeiger und Abblendlicht ist für den amerikanischen Markt in Federal Motor Vehicle Safety Standard 108, Abschnitt 5.3.1.7, [FMV06] definiert als Strecke von dem Leuchtenmittelpunkt des Fahrtrichtungsanzeigers bis an die Grenze der leuchtenden Fläche des Abblendscheinwerfers.

Nach ECE Regelung Nummer 48, Abschnitt 2.17, [ERR07a] ist der Abstand derzeit<sup>14</sup> definiert als *der kürzeste Abstand zwischen den beiden sichtbaren leuchtenden Flächen in Richtung der Bezugsachse*. Eine Änderung der ECE Regelung wird diskutiert, niedergeschrieben in den Dokumenten [gfl04a, gfl04b], um die reduzierte Wahrnehmbarkeit des Fahrtrichtungsanzeigers bei gleichzeitig eingeschalteten Scheinwerfern zu verbessern.

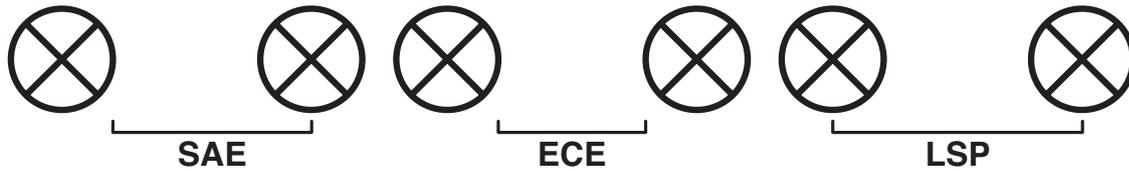
Für die Festlegung der Überlappung nach wahrnehmungspsychologischen Aspekten wird derzeit der Abstand zwischen den leuchtenden Flächen benutzt, falls die Flächen nicht überlappen. Dies entspricht der Festlegung nach ECE. Bei überlappenden Flächen wird angegeben, wie viel Prozent die überlappenden Flächenanteile in Bezug auf die Gesamtfläche der jeweiligen Funktion betragen. Diese Festlegung ist noch nicht durch psychophysikalische Experimente über die Wahrnehmung von Flächenabständen bestätigt.

Eine weitere mögliche Definition legt den Abstand zwischen Lichtfunktionen als die kürzeste Strecke zwischen den einzelnen Lichtschwerpunkten (LSP) fest. Diese Definition sollte jedoch nur für eine Beschreibung der Abstände bei Fragestellungen im Fernbereich verwendet werden. Dabei können die Lichtquellen als Punktlichtquellen betrachtet werden. Für Betrachtungen im Nahbereich scheinen die Flächenanteile und deren Abstände geeigneter zu sein.

---

<sup>14</sup>Aktuell wird über eine neue Ermittlung der leuchtenden Fläche diskutiert. Damit verbunden könnte auch der Abstand zwischen Lichtsignalen neu definiert werden.

In Bild 2.5 sind die verschiedenen Abstandsdefinitionen gegenübergestellt.



**Bild 2.5:** Verschiedene Abstandsdefinitionen zwischen zwei Lichtfunktionen

### 2.4.2.7 Zusammenbau von Signalfunktionen

Mit Zusammenbau von Signalfunktionen<sup>15</sup> bezeichnet die ECE Regelung Nummer 48, Abschnitt 5.7.1.1, [ERR07a] Signalfunktionen, die überlappend wahrgenommen werden. Auf Grund erster Überlegungen ausgehend von einem bestimmten Leuchtentyp ist eine überlappende Anordnung der Signalflächen als negativ für die Wahrnehmung bei gleichzeitig leuchtenden Signalfunktionen angesehen worden. Um diese Bauart zu verhindern ist Abschnitt 5.7.1.1 formuliert zu:

*Sind jedoch Bremsleuchten und Fahrtrichtungsanzeiger zusammengebaut, darf jede horizontale oder vertikale Linie, die durch die Projektion der sichtbaren leuchtenden Fläche dieser Funktionen auf eine Ebene senkrecht zur Bezugsachse verläuft, nicht mehr als zwei Grenzlinien, die die angrenzenden Flächen verschiedener Farben trennen, schneiden.*

Dieser Regelungsteil verhindert die Zulassung eines bestimmten Leuchtentyps mit überlappenden Elementen. Er verhindert jedoch keinesfalls die Zulassung überlappender Leuchten. So ist eine Leuchte, die eine einzige leuchtende Fläche für Fahrtrichtungsanzeiger, Schluss- und Bremsleuchte aufweist und diese Fläche bei allen Funktionen ausreichend homogen ausleuchtet, zulassungsfähig. Die Untersuchungen, die in diesem Kapitel vorgestellt werden, haben gezeigt, dass ein generelles Verbot überlappender Leuchten nicht notwendig ist.

## 2.5 Notwendige Faktoren zur Berechnung des Anhalteweges

Die Wirksamkeit der Signale muss mindestens so gut sein, dass sie dem Fahrer bei typischen Fahrzeuggeschwindigkeiten genug Zeit verschaffen, um die Signale zu interpretieren und die entsprechend der Fahrsituation angemessenen Aktionen auszuführen. Daher werden in diesem Abschnitt Fahr- und Bremsstrecken ermittelt, die bei typischen Reaktionszeiten auftreten.

### 2.5.1 Bremsweg

Mit Bremsweg  $s_b$  wird die Strecke bezeichnet, die ein Fahrzeug benötigt, um von der aktuellen Geschwindigkeit  $v$  bis zum Stillstand abzubremsen.

Als Faustformel für die Berechnung wird derzeit Formel 2.6 empfohlen.

$$s_b = \frac{1}{2} \left( \frac{v}{10} \right)^2 \quad \text{mit } v: \text{aktuelle Geschwindigkeit in km/h} \quad (2.6)$$

<sup>15</sup>Zusammengebaute Leuchten werden im Englischen mit *Grouped Lamps* bezeichnet.

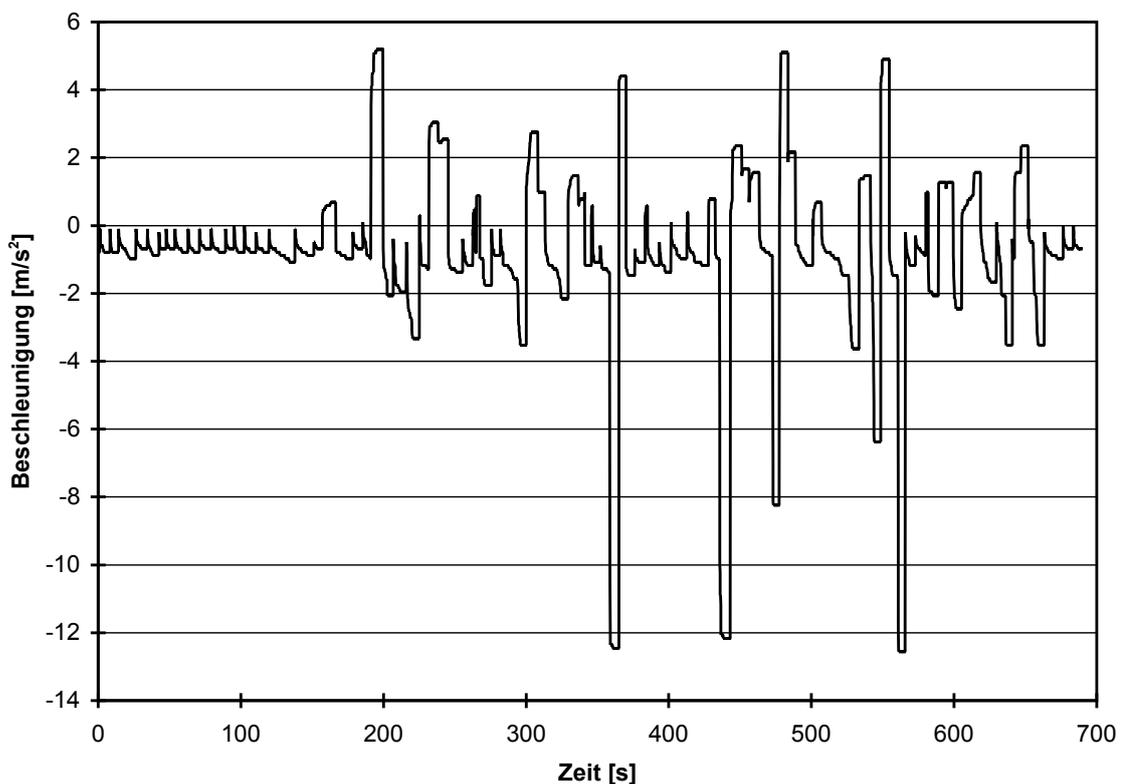
## 2. Stand der Erkenntnisse

---

Die Strecke  $s_b$ , angegeben in Metern, entspricht annähernd der Strecke, die heutige Fahrzeuge unter Idealbedingungen für eine Vollbremsung benötigen. Dabei wird davon ausgegangen, dass der Fahrer das Bremspedal fest genug betätigt oder das Fahrzeug über einen entsprechenden Bremsassistenten verfügt.

Die Formel stellt die aktuelle Empfehlung für eine zeitgemäße Faustformel der Bremswegberechnung für trockene Fahrbahn bei Fahrsicherheitstrainings dar. Sie spiegelt den heutigen Technikstand der Fahrzeuge besser wieder, als die alte, in der Fahrausbildung noch gebräuchliche Faustformel, bei der der Faktor  $\frac{1}{2}$  fehlt. Die mittlere Verzögerung ist bei der alten Faustformel mit  $3,86 \text{ m/s}^2$  angesetzt [Ple03] im Gegensatz zu der aktuellen, bei der von einer mittleren Verzögerung von  $7,72 \text{ m/s}^2$  ausgegangen wird.

Eigene Messungen, exemplarisch mit einem Fahrzeug durchgeführt, zeigen eine reproduzierbare kontinuierliche Verzögerung von über  $12 \text{ m/s}^2$ . Die aufgenommenen Messwerte sind in Bild 2.6 dargestellt. Die positiven Beschleunigungswerte bei voller Beschleunigung betragen  $+5,20 \text{ m/s}^2$  und die negativen Beschleunigungswerte bei Vollbremsungen  $-12,56 \text{ m/s}^2$ . Die Vollbremsungen finden auf trockener Straße mit einer Anfangsgeschwindigkeit von  $80 \text{ km/h}$  bis zum Stand statt.



**Bild 2.6:** Beschleunigungswerte bei Vollgas und Vollbremsung

### 2.5.2 Bremszeit

Die Bremszeit  $t_b$  gibt die Zeit an, die ein Fahrzeug mit einer Anfangsgeschwindigkeit  $v_0$ , angegeben in  $\text{m/s}$ , benötigt, um bei einer gegebenen mittleren Verzögerung  $a$ , angegeben in  $\text{m/s}^2$ , bis zum Stillstand ( $v(t) = 0$ ) abzubremsen.

Für praktische Überlegungen ist die in Abschnitt 2.5.1 angegebene Verzögerung zu wählen. Die Momentangeschwindigkeit eines Fahrzeugs ist in Formel 2.7 angegeben.

$$v(t) = v_0 - a \cdot t \quad (2.7)$$

Unter der Startbedingung  $v(t = 0) = v_0$ , der Nebenbedingung einer konstanten Verzögerung  $a$  und der Endbedingung  $v(t = t_b) = 0$  lässt sich Formel 2.7 zu Formel 2.8 umformen und die Bremszeit  $t_b$  berechnen.

$$t_b = \frac{v_0}{a} \quad (2.8)$$

### 2.5.3 Reaktionsweg

Der Reaktionsweg bezeichnet die Strecke  $s_r$  (Formel 2.9) in Meter, die ein Fahrzeug mit einer bestimmten Geschwindigkeit  $v$  in km/h in der Zeit  $t_r = 1$  s (typische Reaktionszeit nach Abschnitt 2.6.3.11) zurücklegt.

$$s_r = \frac{v}{3,6} t_r \quad (2.9)$$

### 2.5.4 Anhalteweg

Der Anhalteweg  $s_a$  (Formel 2.10) ist die Summe aus Reaktions-<sup>16</sup> und Bremsweg<sup>17</sup>.

$$s_a = s_r + s_b \quad (2.10)$$

## 2.6 Die Wahrnehmung beschreibende Größen

### 2.6.1 Perzeption und Apperzeption

Löblich [Löb76] unterteilt den Begriff Wahrnehmung in zwei Unterbegriffe: Perzeption und Apperzeption

Mit Perzeption wird das Wahrnehmen durch die Sinnesorgane bezeichnet [Dud01]. Hinsichtlich der Problematik in der automobilen Lichttechnik wird als Sinnesorgan nur das Auge berücksichtigt. Die Perzeption ist abhängig von der Beschaffenheit der Lichtquelle oder des Gegenstandes, dem Umfeld des Gegenstandes, der Übertragungsstrecke und des Auges. Die Übertragungsstrecke ist meist freier Luftweg, der jedoch manchmal getrübt sein kann, zum Beispiel durch Gischt, Rauch oder Nebel. Auch Fahrzeugscheiben und Sehhilfen beeinflussen diese Übertragungsstrecke.

Es existieren zwei leicht unterschiedliche Definitionen der Perzeption.

#### Philosophisch

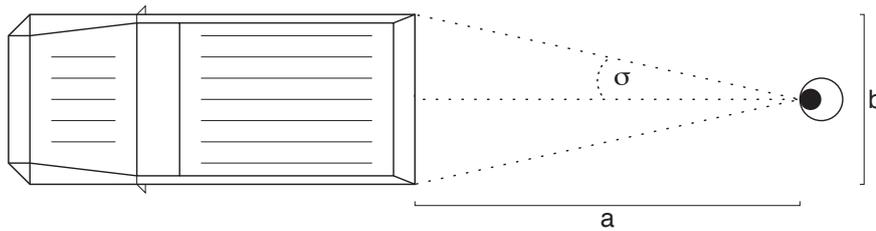
Sinnliches Wahrnehmen als erste Stufe der Erkenntnis im Unterschied zur Apperzeption.

---

<sup>16</sup>Siehe Abschnitt 2.5.3

<sup>17</sup>Siehe Abschnitt 2.5.1





**Bild 2.8:** Sehwinkel  $\sigma$

Entsprechend bezeichnet der Sehwinkel die Größe, unter der ein Gegenstand dem Betrachter erscheint [GV93]. Er hängt vom Abstand des Auges zum Gegenstand ab. In Bild 2.8 sind die beiden Grenzstrahlen von dem Auge des Betrachters zum Fahrzeug eingezeichnet, die den Winkel  $\varepsilon = 2 \cdot \sigma$  bilden. Bei gegebener Sehschärfe von  $s = 1$  beträgt der minimale Sehwinkel eine Bogenminute. Der allgemeine Zusammenhang zwischen minimalem Sehwinkel und Sehschärfe ist in Formel 2.12 angegeben, wobei der Sehwinkel  $\sigma$  in Bogenminuten zu verstehen ist.

$$\sigma = \frac{1}{s} \quad (2.12)$$

Wenn der Abstand  $a$  und die Sehschärfe  $s$  bekannt ist, kann das kleinste zu erkennende Detail  $b$  berechnet werden. Dazu wird Formel 2.11 nach dem Detailabstand  $a$  aufgelöst zu Formel 2.13.

$$b = 2 \cdot a \cdot \tan \frac{1}{2 \cdot 60 \cdot s} \quad (2.13)$$

Die Sehschärfe ist von diversen Faktoren abhängig, die in den folgenden Abschnitten genauer erläutert werden. Dies sind:

- Fehlsichtigkeit oder sonstige Krankheiten
- Monokulare oder binokulare Sicht
- Alter der Person
- Umgebungshelligkeit
- Kontrast
- Extrafovealer Winkel
- Form des Sehzeichens

Je nach vorliegenden Faktoren werden Werte von  $s = 0,0$  bis  $s = 2,0$  für die Sehschärfe ermittelt. Eine Sehschärfe von  $s = 1,0$  bedeutet, dass die Person normalsichtig ist.

### 2.6.2.1 Fehlsichtigkeit oder sonstige Krankheiten

Fehlsichtigkeit oder sonstige Erkrankungen des Auges können die Sehschärfe jedes einzelnen Auges bis auf  $s = 0,0$  reduzieren. Falls eines der beiden Augen gesund ist, kann je nach Schwere trotzdem noch eine gemeinsame Sehschärfe von  $s = 1,0$  erreicht werden. Mit einer Sehhilfe (Brille, Kontaktlinsen) kann die Sehschwäche für jedes Auge getrennt verringert oder gar aufgehoben werden, so dass bei korrekt angepassten Sehhilfen eine Sehschärfe von  $s = 1,0$  erreicht wird.

Für das Erlangen einer Fahrerlaubnis ist ein Sehtest, bei dem die Sehschärfe beider Augen geprüft wird, erforderlich. Für die meisten Berufskraftfahrer muss dieser Test regelmäßig wiederholt werden. Ab einer Sehschärfe von  $s = 0,7$  wird die Fahrerlaubnis erteilt.

## 2. Stand der Erkenntnisse

### 2.6.2.2 Monokulare oder binokulare Sicht

Wenn beide Augen gleichzeitig benutzt werden, liegt die binokulare Sehschärfe ungefähr 15 Prozent höher als die monokulare [Boc87]. An Probanden der vorgestellten Experimente wurde bei Sehschärfeuntersuchungen die beidäugige Sehschärfe ermittelt. Dabei ergab sich ein Median von  $s = 1,2$ . Dies entspricht ungefähr dem erwarteten Wert von  $s = 1,15$  für normalsichtige Personen.

Bei augenärztlichen Untersuchungen wird mit Hilfe von Landoltringen die Sehschärfe jedes Auges getrennt ermittelt. Zusätzlich wird die binokulare Sehschärfe gemessen [Köt08]. Für die Angabe der Führerscheintauglichkeit wird die höchste gemessene Sehschärfe angegeben.

Die für den Straßenverkehr interessante Sehschärfe ist die binokulare, da der Fahrer meist beidäugig, bei extrafovealen Objekten nach Blickzuwendung beidäugig, sieht.

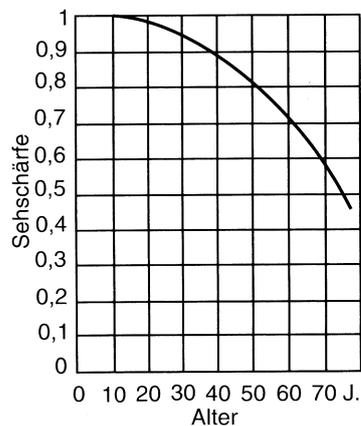
Funktional kann der Zusammenhang der monokularen  $s_{mon}$  und binokularen  $s_{bin}$  Sehschärfe durch Formel 2.14 ausgedrückt werden.

$$s = s_{bin} = 1,15s_{mon} \quad (2.14)$$

Für Überlegungen im Bereich der automobilen Lichttechnik ist meist mit der binokularen Sehschärfe zu rechnen. Daher ist in Formel 2.14  $s$  mit  $s_{bin}$  gleichgesetzt.

### 2.6.2.3 Alter der Person

Die Sehschärfe des Menschen ist abhängig von dessen Alter. Durch verschiedene Alterungsprozesse wird die Sehschärfe kontinuierlich reduziert. Im Alter von  $A = 75$  Jahren erreicht sie nur noch 50 Prozent des Anfangswertes. Dies ist in Bild 2.9 gezeigt.



**Bild 2.9:** Abhängigkeit der Sehschärfe vom Alter (Quelle: [Tro95])

Die in Bild 2.9 gezeigte Abhängigkeit der Sehschärfe  $s$  vom Alter  $A$  kann nach Formel 2.15 parametrisiert werden.

$$s(A) = s_0 \cdot \left(1 + \frac{1}{1000}A - \frac{1}{10000}A^2\right) \quad (2.15)$$

Nicht nur die Sehschärfe ist vom Alter abhängig, sondern auch der minimal benötigte Kontrast. In Bild 2.15 ist der Einfluss des Alters auf das Kontrastsehen gezeigt. Mit einem Alter von  $A = 25$

kann im Durchschnitt ab einem Kontrast von  $K = 0,4$  ein Objekt (bei einer Umfeldhelligkeit von  $L_U = 4,6 \text{ cd/m}^2$ ) erkannt werden. Mit einem Alter von  $A = 65$  Jahren ist im Durchschnitt schon ein Kontrast von  $K = 0,6$  notwendig.

### 2.6.2.4 Umfeldleuchtdichte

Die Adaptation des menschlichen Auges wird in Abhängigkeit von der Umfeldleuchtdichte in drei Bereiche (Tabelle 2.1) eingeteilt [Eck93].

Helligkeitsbereich	Leuchtdichtebereich [ $\text{cd/m}^2$ ]
Skotopisches Sehen	$< 0,001 \text{ cd/m}^2$
Mesopisches Sehen	$0,001 \dots 3 \text{ cd/m}^2$
Photopisches Sehen	$> 3 \text{ cd/m}^2$

**Tabelle 2.1:** Drei Helligkeitsbereiche des Sehens

Die normale Straßenbeleuchtung erzeugt mittlere Fahrbahnleuchtdichten von  $0,3$  bis  $2 \text{ cd/m}^2$ , abhängig von der Straßenart und Verkehrsdichte [DlfN98, DlfN04]. Auch die durch die Fahrzeugscheinwerfer erzeugte Leuchtdichte liegt in diesem Bereich. So ist eine Leuchtdichte von ca.  $1 \text{ cd/m}^2$  im Sichtfeld des Fahrers in dem Modell bei [KG01] als mittlere Leuchtdichte<sup>18</sup> für nächtliche Situationen sowohl bei klarer Sicht als auch bei verschiedensten Trübungen durch Nebel ermittelt worden. Völker [Völ04] präsentierte über 120 Leuten im Lichtkanal 21 verschiedene Scheinwerfer. Dabei erhielt er eine minimal notwendige mittlere Leuchtdichte der Straße von  $1,1 \text{ cd/m}^2$  für eine akzeptable Ausleuchtung der Straße. Dies bedeutet, dass der Fahrzeugführer mesopisch adaptiert ist.

Die Leuchtdichte von Signalen ist jedoch deutlich höher. Sie kann bei Bremsleuchten und Fahrtrichtungsanzeigern im Bereich von  $100.000 \text{ cd/m}^2$  liegen. Es sind die Eigenschaften des menschlichen Auges im photopischen Bereich zu betrachten.

Bei der Berechnung der Wahrnehmung von Lichtsignalen wird häufig das Ricco'sche Gesetz benutzt. Dies zeigt den Zusammenhang zwischen der Umfeldleuchtdichte und der Größe von Lichtsignalen auf. Die vorliegenden Untersuchungen finden im Nahbereich<sup>19</sup> statt. Dort ist die Ausdehnung von Signalen so groß, dass sie nicht mehr mit dem Ricco'schen Gesetz berechnet werden.

Bei seinen Untersuchungen der Komfortbeleuchtung von Fahrzeugen legt Löbig [Löb00] einen Schwerpunkt auf die Erforschung des Einflusses der ambienten Innenraumbeleuchtung auf die Readaptationszeit  $t_{RE}$  bei Blickwechseln zwischen Fahrzeuginstrumenten und der Straße.

Bei seinen Laboruntersuchungen stellt er fest, dass eine Beleuchtung des Fahrzeuginnenraums, speziell der Mittelkonsole, eine positive Auswirkung auf die Readaptationszeit hat. Sie wird verkürzt. Diese Ergebnisse erhält er für simulierte Straßenleuchtdichten von  $0,1$  und  $0,01 \text{ cd/m}^2$ . Dies entspricht der Leuchtdichte der Straße in Bereichen, die nicht im unmittelbaren Lichtkegel des Scheinwerfers liegen.

Mit den Ergebnissen seiner Fahrversuche zieht er den Schluss, dass, bei den von ihm untersuchten Helligkeiten im Innenraum von weniger als  $0,1 \text{ cd/m}^2$ , keine Gefährdung des Straßenverkehrs gegeben ist.

<sup>18</sup>Bei [KG01] wird als Bezugsleuchtdichte die Umfeldleuchtdichte genutzt.

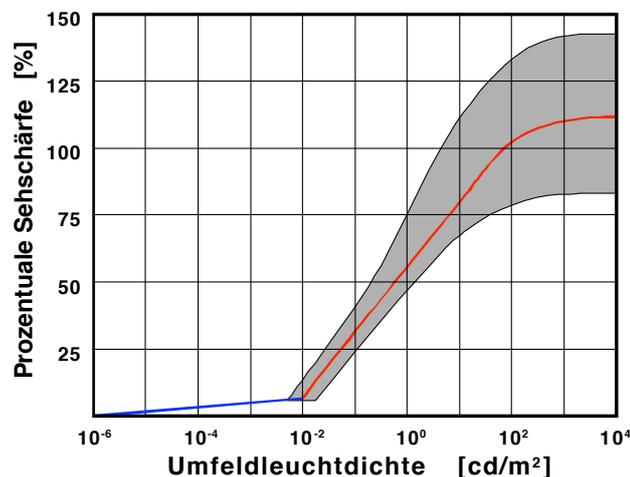
<sup>19</sup>Siehe Abschnitt 2.3.2

## 2. Stand der Erkenntnisse

Bei geringen Umfeldleuchtdichten nimmt die Sehschärfe deutlich ab. Denn bei der Adaptation von helleren zu dunkleren Umgebungen werden immer mehr Rezeptoren zu einem virtuellen Rezeptor zusammengeschaltet. Dadurch wird die Empfindlichkeit erhöht und die Auflösung, sprich die Sehschärfe, reduziert. Bei nächtlichen Fahrten sinkt die Sehleistung daher nach [Die04] auf die Hälfte beziehungsweise<sup>20</sup> nach [Boc87] auf ein Zwanzigstel der Tagessehschärfe ab.

Dadurch kann es zum Beispiel passieren, dass nachts einzelne Signalleuchten nicht mehr voneinander unterschieden werden können, obwohl dies bei Tag der Fall ist und die Leuchten sowohl bei Tag als auch bei Nacht die gleiche Leuchtdichten aufweisen. Lediglich die Umfeldleuchtdichte variiert deutlich.

Die Abhängigkeit der Sehschärfe von der Umfeld- beziehungsweise Adaptationsleuchtdichte ist in den Bildern 2.10, 2.11 und 2.12 zu sehen. Alle drei Diagramme zeigen den gleichen Sachverhalt auf. Die relative Abhängigkeit ist bei allen Autoren gleich. Jedoch klaffen die absoluten Werte deutlich auseinander. Dies liegt an der Wahl unterschiedlichen Sehobjekte (Landoltringe, Snellen-sche Haken, ...) und Erkennbarkeitskriterien (50 Prozent oder 95 Prozent) bei den verschiedenen Untersuchungen.



**Bild 2.10:** Zusammenhang zwischen Umfeldleuchtdichte und Sehschärfe  
(Quelle: [WLS01] nach Hentschel, 1982 und Hartmann, 1970)  
Kontrast  $K = 0,95$   
Alter der Versuchspersonen:  $A = 25$  bis  $A = 50$  Jahre  
Sehschärfe  $s = 0,6$  bei  $L_U = 3 \text{ cd/m}^2$

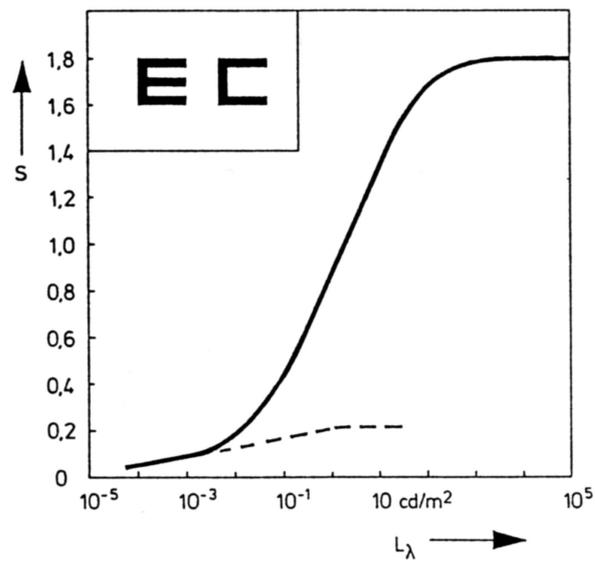
Festzuhalten ist, dass die Sehschärfe bei hohen Leuchtdichten einem Maximalwert entgegenstrebt. Das maximale Auflösungsvermögen, bedingt durch die im Auge vorhandenen Rezeptoren pro Fläche, kann bei optimaler Beleuchtung voll ausgenutzt werden.

Weiterhin festzuhalten ist, dass im mesopischen Bereich der Zusammenhang zwischen dem Logarithmus der Umfeldleuchtdichte und der Sehschärfe nahezu linear ist. Dieser funktionale Zusammenhang zwischen Sehschärfe  $s$  und Umfeldleuchtdichte  $L_U$  ist in Formel 2.16 angegeben.

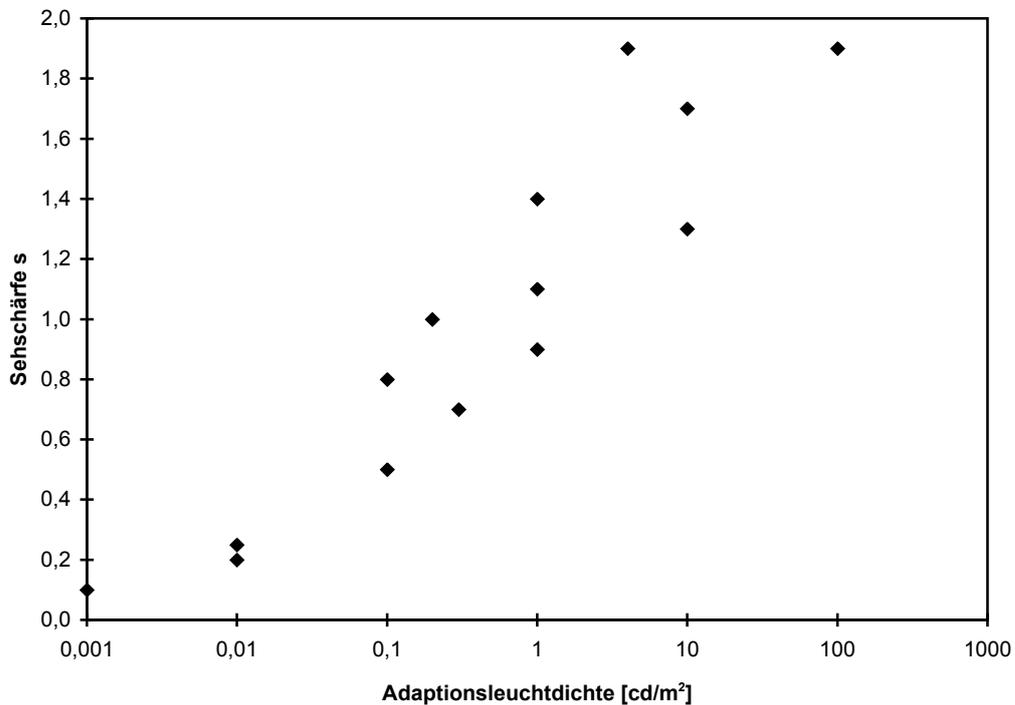
$$s = f(L_U) \quad (2.16)$$

Zur genauen Spezifizierung dieses Zusammenhangs sind in Bild 2.13 die einzelnen Daten für den mesopischen Bereich aus Bild 2.12 und Bild 2.11 gruppiert nach unterschiedlicher Steigung der

<sup>20</sup>Der deutliche Unterschied des Absinkens liegt wahrscheinlich in der jeweils verschiedenen angenommenen Umgebungshelligkeit begründet.



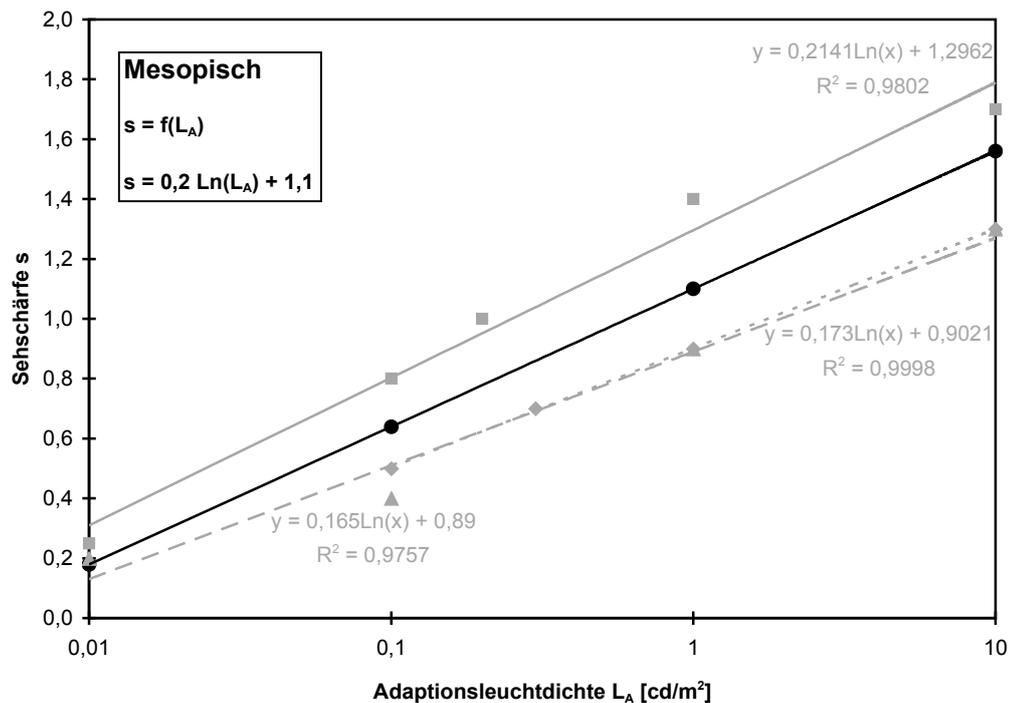
**Bild 2.11:** Zusammenhang zwischen Adaptationsleuchtdichte und Sehschärfe. Die Sehschärfe bei reinem Stäbchensehen, ermittelt mit farbenblinden Probanden, ist gestrichelt gekennzeichnet. Grundlage sind Daten von König, 1897 und Riggs, 1965, dargestellt von Hauske [Hau94]



**Bild 2.12:** Zusammenhang zwischen Adaptationsleuchtdichte und Sehschärfe. Grundlage sind Daten von Shlaer, 1937, Schober, 1938, Fortuin, 1951, Pirenne, 1957 und Jainski, 1960, ursprünglich doppelt logarithmisch dargestellt von Hentschel [Hen94]

## 2. Stand der Erkenntnisse

Funktion  $s$  zusammengefasst. Es existieren einige Messwertgruppen mit geringer und andere mit großer Steigung, die in Bild 2.13 grau dargestellt sind. Für diese beiden Messwertgruppen sind die jeweiligen Formeln der halblogarithmischen Näherungsgeraden und das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  in Bild 2.13 angegeben. Durch Mitteln und praxisgerechtes Runden der beiden Formeln ergibt sich als funktionaler Zusammenhang zwischen Sehschärfe  $s$  und Umfeldleuchtdichte  $L_U$  Formel 2.17. Diese Funktion ist in Bild 2.13 schwarz dargestellt.



**Bild 2.13:** Zusammenhang zwischen Adaptionsleuchtdichte und Sehschärfe im Mesopischen

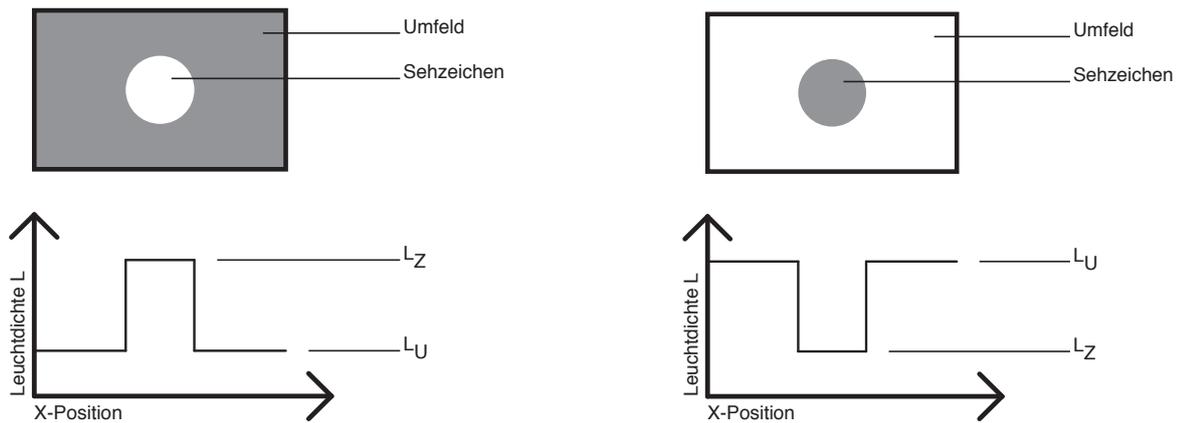
$$s(L_U) = s_0 \cdot \left(0,2 \ln\left(\frac{L_U}{\text{cd/m}^2}\right) + 1,1\right) \quad (2.17)$$

Die Sehschärfe variiert im mesopischen Bereich von  $s = 0,2$  bis  $s = 1,6$ . Sie hängt entsprechend Formel 2.17 logarithmisch von der Adaptionsleuchtdichte ab. In der Praxis kann davon ausgegangen werden, dass die Adaptionsleuchtdichte durch die vorherrschende Umfeldleuchtdichte  $L_U$  bestimmt wird.

### 2.6.2.5 Kontrast

Der Kontrast gibt das Verhältnis zwischen Zeichen und Zeichenhintergrund, dem Umfeld, an. Bei negativem Kontrast [Kok99] befindet sich ein helles Zeichen mit der Leuchtdichte  $L_Z$  auf dunklem Grund, einem Umfeld mit der Leuchtdichte  $L_U$ . Dies ist in Bild 2.14 zu sehen. Bei positivem Kontrast befindet sich ein dunkles Zeichen auf hellem Grund.

In der Physiologie wird häufig als Formel für den örtlichen Kontrast Formel 2.18 benutzt und als Weber-Kontrast bezeichnet. Als Formelzeichen für Kontrast ist  $C$  (englisch: *contrast*) oder  $K_W$  (Kontrast nach Weber) gebräuchlich.



**Bild 2.14:** Negativkontrast (links) und Positivkontrast (rechts) (nach [Kok99])

$$C = \left| \frac{L_Z - L_U}{L_U} \right| \quad (2.18)$$

Dabei ist  $L_Z$  die Leuchtdichte des Zeichens und  $L_U$  die des Umfeldes.

Bei vergleichbarer Umfeldleuchtdichte ( $L_U = 3 \text{ cd/m}^2$  und  $L_U = 4,6 \text{ cd/m}^2$ ) wird der Einfluss des Kontrastes auf die Sehschärfe deutlich. Bei einem Kontrast von  $K = 0,95$  (Bild 2.10) liegt eine Sehschärfe von  $s = 0,6$  vor, wobei bei einem Kontrast von  $K = 0,45$  (Bild 2.15) nur noch eine Sehschärfe von  $s = 0,25$  vorliegt.

Der minimal benötigte Kontrast  $K$  für die Wahrnehmung von Objekten ist vom Alter abhängig. In Bild 2.15 wird der Einfluss des Alters auf das Kontrastsehen gezeigt. Mit einem Alter von  $A = 25$  kann im Durchschnitt ab einem Kontrast von  $K = 0,4$  ein Objekt (bei einer Umfeldhelligkeit von  $L_U = 4,6 \text{ cd/m}^2$ ) erkannt werden. Mit einem Alter von  $A = 65$  Jahren ist im Durchschnitt schon ein Kontrast von  $K = 0,6$  notwendig.

Der funktionale Zusammenhang zwischen dem Kontrast  $K$  und der Sehschärfe  $s$  kann anhand der vorliegenden Messwerte nur qualitativ wiedergegeben werden. Die Sehschärfe  $s$  steigt bei steigendem Kontrast  $K$ . Bei gleichbleibender Sehschärfe  $s$  steigt der minimal benötigte Kontrast  $K$  bei steigendem Alter  $A$  an.

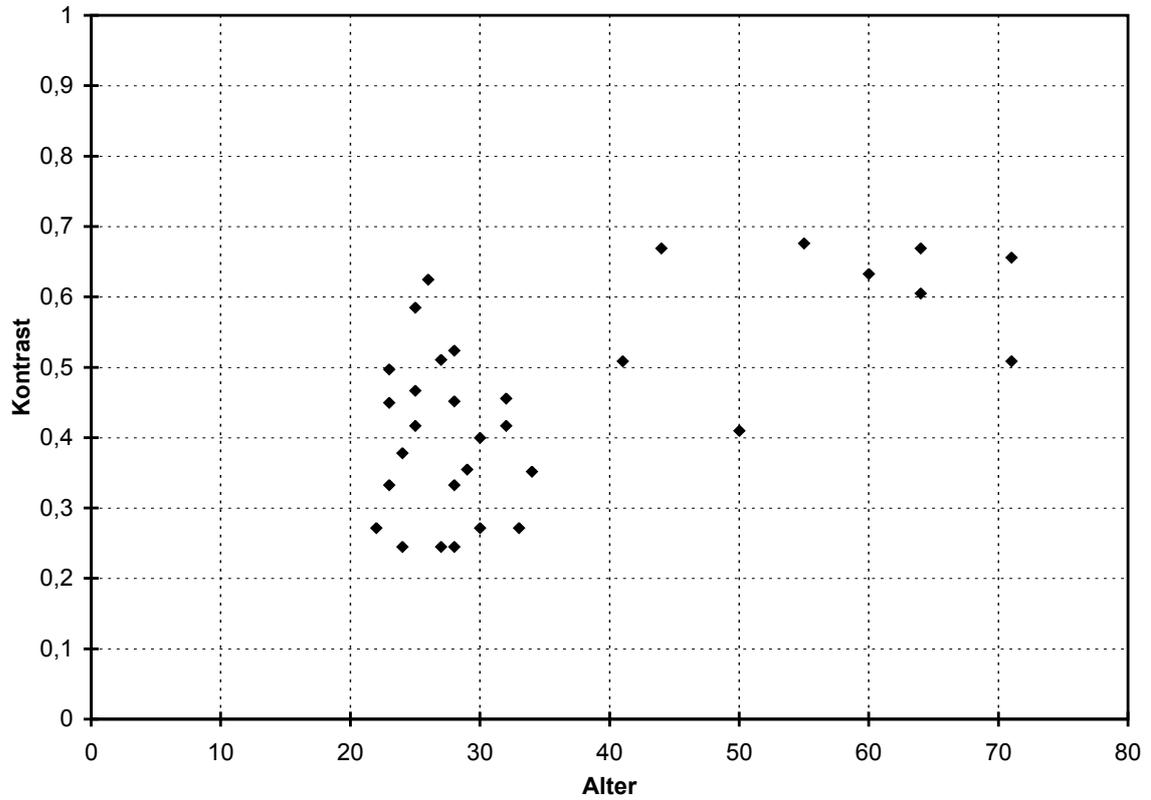
### 2.6.2.6 Extrafovealer Winkel

Bei Bewegung der betrachteten Objekte reduziert sich die Sehschärfe. Die zu erkennenden Gegenstände bewegen sich aus dem Bereich schärfsten Sehens (foveale Betrachtung) heraus. Die Anzahl der Rezeptoren und damit die maximal mögliche Sehschärfe nimmt rapide ab. Dies ist in Bild 2.16 dargestellt.

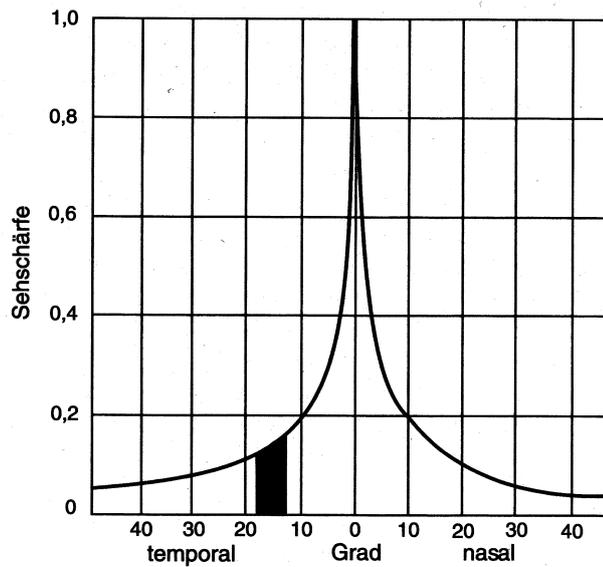
In Formel 2.19 ist der funktionale Zusammenhang zwischen dem Winkel  $\alpha$  des Bildortes auf der Netzhaut und der Sehschärfe  $s$  angegeben. Die Formel ist aus dem Graphen in Bild 2.16 entwickelt worden.

$$s(\alpha) = s_0 \cdot (0,05 + e^{-0,3\alpha}) \quad (2.19)$$

## 2. Stand der Erkenntnisse



**Bild 2.15:** Kontrast  $K = 0,45$  mit einem Schwellwert von 50 Prozent (Daten aus [Fra06])  
 Alter der Versuchspersonen:  $A = 22$  bis  $A = 71$  Jahre  
 Sehschärfe  $s = 0,25$  bei  $L_U = 4,6 \text{ cd/m}^2$



**Bild 2.16:** Abhängigkeit der Sehschärfe  $s$  vom Winkel  $\alpha$  des Bildortes auf der Netzhaut (Quelle: [Tro95])

2.6.2.7 Form des Sehzeichens

Die Form des Sehzeichens weist einen Einfluss auf die minimal notwendige Sehschärfe auf, die notwendig ist, um das Sehzeichen erkennen zu können. Trotter [Tro95] gibt für vier Sehzeichen die unterste Grenze der Auflösung an. Diese Aufstellung ist in Tabelle 2.2 wiedergegeben.

Sehzeichen	Größe [Winkelsekunden]
Landolt-Ring	24
Foucault-Strichmuster	35
Zwei Fäden	40
Zwei Punkte	78

**Tabelle 2.2:** Minimal notwendige Größe verschiedener Sehzeichen für die Erkennbarkeit (Quelle: [Tro95] nach Le Grand)

Aus Tabelle 2.2 wird ersichtlich, dass der Abstand zweier Punkte um einen Faktor von drei größer sein muss, als die Größe der Öffnung des Landoltringes, um beide Sehzeichen jeweils erkennen zu können. Bei allen psychophysikalischen Untersuchungen, bei denen Landoltringe als Sehzeichen eingesetzt werden, muss deren einfache Erkennbarkeit im Vergleich zu anderen Sehzeichen bei der Bewertung der Sehleistung beachtet werden. Soll anhand von Untersuchungen mit Landoltringen auf die Erkennbarkeit von Punkten<sup>21</sup> geschlossen werden, so sind, in erster Näherung und unter Annahme vorliegender Linearität, die erhaltenen Mindestsehschärfen um den Faktor drei hochzusetzen oder die erhaltenen maximal erreichbaren Entfernungen um den Faktor drei zu verkürzen.

2.6.2.8 Zusammenfassung der Einflussfaktoren der Sehschärfe

In Tabelle 2.3 sind die in den vorherigen Abschnitten erarbeiteten Zusammenhänge zwischen der Sehschärfe und den sie beeinflussenden Faktoren zusammenfassend aufgeführt.

Faktor	Funktionaler Zusammenhang
Fehlsichtigkeit oder sonstige Krankheiten	$s > 0,7$ bei Führerscheinerwerb, $A = 20$
Monokulare oder binokulare Sicht	$s_{bin} = 1,15s_{mon}$
Alter der Person	$s(A) = s_0 \cdot (1 + \frac{1}{1000}A - \frac{1}{10000}A^2)$
UmgebungsHELLigkeit	$s(L_U) = s_0 \cdot (0,2 \ln(\frac{L_U}{cd/m^2}) + 1,1)$
Kontrast	$s(K) = f(K)$ mit positiver Steigung
Extrafovealer Winkel	$s(\alpha) = s_0 \cdot (0,05 + e^{-0,3\alpha})$
Form des Sehzeichens	$s(Form) = f(Form)$

**Tabelle 2.3:** Die Sehschärfe  $s$  beeinflussende Faktoren und deren funktionaler Zusammenhang

Ausgehend von der schlechtesten Sehschärfe von  $s = 0,7$ , die für den Erwerb eines Führerscheins notwendig ist, werden die einzelnen, diese Sehschärfe beeinflussenden, Faktoren hinzumultipliziert.

<sup>21</sup>Zwei Punkte können zum Beispiel durch die beiden eingeschalteten Scheinwerfer eines entgegenkommenden Autos dargestellt werden.

## 2. Stand der Erkenntnisse

---

Entsprechend Abschnitt 2.6.2.2 bleibt die Sehschärfe unverändert bei Unterscheidung zwischen monokular und binokular, da im Straßenverkehr von binokularer Sicht ausgegangen werden kann und für den Erwerb des Führerscheins binokular gemessen wird.

Mit zunehmendem Alter sinkt die Sehschärfe. Für normale Kraftfahrer existieren keine Kontrollmechanismen, die eine Mindestsehschärfe garantieren. Daher wird mit dem natürlichen Verlust der Sehschärfe gerechnet. Es wird davon ausgegangen, dass bis zu einem Alter von 75 Jahren am Straßenverkehr teilgenommen wird. Nach Formel 2.15 reduziert sich die Sehschärfe von  $s = 0,7$  auf  $s = 0,36$ , wie in Formel 2.20 berechnet wird.

$$s(A = 75) = 0,7 \cdot \left(1 + \frac{1}{1000}A - \frac{1}{10000}A^2\right) \approx 0,36 \quad (2.20)$$

Die Umgebungshelligkeit wird entsprechend Tabelle 2.1 klassifiziert in skotopische, mesopische und photopische Helligkeiten. Der nächtliche Straßenverkehr findet bei mesopischen Bedingungen statt. Entsprechend Formel 2.17 wird mit Formel 2.21 der Einfluss der typischen Umgebungshelligkeit im nächtlichen Straßenverkehr nach Abschnitt 2.6.2.4 von  $L_U = 1 \text{ cd/m}^2$  berechnet. Die Sehschärfe beträgt  $s = 0,4$ .

$$s(L_U = 1 \text{ cd/m}^2, A = 75) = 0,36 \cdot (0,2 \ln(1) + 1,1) \approx 0,4 \quad (2.21)$$

Da der funktionale Zusammenhang zwischen dem Kontrast und der Sehschärfe anhand der vorliegenden Messwerte nur qualitativ wiedergegeben werden kann, wird der Einfluss des Kontrastes nicht mit einberechnet.

Der Einfluss des extrafovealen Winkels auf die Sehschärfe wird nicht berücksichtigt, da von einer Blickzuwendung des Fahrers zu den Objekten ausgegangen wird. Nach der Blickzuwendung sind die Objekte mit voller Sehschärfe sichtbar.

Zusammenfassend kann für die Auslegung der Kraftfahrzeugbeleuchtung mit einer Sehschärfe von  $s = 0,4$  geplant werden.

Bei diesen Überlegungen muss jedoch beachtet werden, dass für den normalen PKW-Fahrer derzeit keine regelmäßigen Kontrollen der Sehschärfe vorgeschrieben sind, sich diese daher in der Praxis beliebig verschlechtern kann.

### 2.6.3 Reaktionszeit

Die Ursache von 50 Prozent aller Verkehrsunfälle ist das verspätete oder sogar vollkommene Übersehen der Gefahrensituation [Nag78][VDK<sup>+</sup>02]. Diem [Die04] gibt an, dass 50 Prozent weniger Unfälle auftreten, wenn 0,5 bis 1,0 Sekunden früher reagiert wird. Eine zu große Reaktionszeit bei der Erkennung von Signalen führt daher zu einer deutlich höheren Unfallwahrscheinlichkeit. Durch den Vergleich von Reaktionszeiten bei unterschiedlichen Situationen kann daher auf die Erhöhung oder Verringerung der Verkehrssicherheit geschlossen werden.

Die Reaktionszeit ist dabei die Zeit  $t_r$ , die verstreicht, bis der Fahrer auf ein erkanntes Ereignis reagiert. Teichner [Tei54] definiert die Reaktionszeit genauer als das Intervall, zwischen dem Anfang des Stimulus und der Antwort des Subjekts unter der Bedingung, dass dieses vor Beginn instruiert wurde, so schnell wie möglich zu reagieren.

Für Bremsvorgänge wird als Reaktionszeit die Summe aus Wahrnehmungszeit und Bewegungszeit<sup>22</sup> betrachtet [PMCC02][LHW78]. Dies ist in Formel 2.22 wiedergegeben.

---

<sup>22</sup>Die Bewegungszeit wird in Abschnitt 2.6.3.9 näher erläutert.

$$t_{\text{Reaktionszeit}} = t_{\text{Wahrnehmungszeit}} + t_{\text{Bewegungszeit}} \quad (2.22)$$

Diese Bezeichnung wird nicht von allen Autoren einheitlich benutzt. So bezeichnet Warshawsky-Livine [WLS02] die Reaktionszeit als Bremszeit (englisch *brake time*) und die Wahrnehmungszeit als Reaktionszeit (englisch *reaction time*). Seine Rechnung lautet (Formel 2.23):

$$t_{\text{braketime}} = t_{\text{reactiontime}} + t_{\text{motiontime}} \quad (2.23)$$

Rosemann [Ros75a] bezeichnet die Wahrnehmungszeit als physiologische Erkennungszeit. Die Bewegungszeit beinhaltet bei ihm die Umsetz- und Druckaufbauzeit. Seine Rechnung lautet (Formel 2.24):

$$t_{\text{Reaktionszeit}} = t_{\text{PhysiologischeErkennungszeit}} + t_{\text{Umsetz-undDruckaufbauzeit}} \quad (2.24)$$

Im Folgenden wird die Definition nach Formel 2.22 benutzt.

Die Reaktionszeit bei Bremsvorgängen ist das Intervall zwischen dem Aufleuchten der Bremsleuchten des vorausfahrenden Fahrzeugs und dem Bestätigen der Erkennung des Bremssignals. Je nach vorliegender Fahrsituation muss dazu von dem Gaspedal auf das Bremspedal gewechselt werden. Da durch die Wechselzeit von einem Pedal auf das andere weitere Streuungen bei der Messung der Reaktionszeiten hinzukommen, wird oft als Endzeitpunkt des Intervalls das Loslassen des Gaspedals, also der Beginn der Bewegung gewertet. Dieses Vorgehen wird unter anderem bei den in der vorliegenden Arbeit vorgestellten Untersuchungen gewählt. Die Bewegungszeit wird dabei auf das Anheben des Fußes vom Gaspedal reduziert.

Allgemein wird für die Reaktionszeit nach Formel 2.22 die Dauer von einer Sekunde angenommen [MKKS07]. Im Folgenden wird die Zusammensetzung der Reaktionszeit näher betrachtet.

Rosemann [Ros75a] gibt in seiner Arbeit einen Überblick über verschiedene mittlere Reaktionszeiten in Laborversuchen und Straßenversuchen. Diese Übersicht wird hier übernommen und erweitert (Tabelle 2.4). Die Spanne der jeweiligen Reaktionszeiten in einem Versuch ist durch die verschiedenen Parameter des Versuchs bestimmt. So variiert zum Beispiel Mortimer die Anordnung der Leuchten und erreicht dadurch Reaktionszeiten von 0,8 (Bremsleuchte räumlich getrennt von Schlussleuchte) bis 0,9 Sekunden (Bremsleuchte und Schlussleuchte ineinandergelagert).

Autor	Mittlere Reaktionszeit [ms]	Versuchsart
Mortimer [Mor69]	841 ... 903	Straßenversuch
Mace [MR69] <sup>A</sup>	1.050 ... 1.200	Straßenversuch
Fink [Fin68]	740	Straßenversuch
Rosemann [Ros75a]	934	Fahrsimulator mit Modellstraße
Moser [Mos69]	780	Laborfahrstand
Klinger [Kli02b]	554 ... 600	Laborfahrstand
Tabisova [Tab04]	600 ... 900	Laborfahrstand
Hahn [Hah07b]	530 ... 650	Laborfahrstand

A: Zu beachten ist, dass [MR69] als Startpunkt der Reaktionszeit nicht das Aufleuchten einer Lampe, sondern das Berühren des Bremspedals des vorausfahrenden Fahrzeugs gewählt hat.

**Tabelle 2.4:** Mittlere Reaktionszeiten diverser Versuche

## 2. Stand der Erkenntnisse

---

Die Reaktionszeit auf das Aufleuchten einer Signalleuchte besteht aus einzelnen Phasen:

- Signallaufzeit der Fahrzeugelektronik
- Ansprechzeit der Leuchtmittel
- Übertragungszeit von Leuchte zu Auge
- Ansprechzeit der Rezeptoren
- Signallaufzeit von Auge zu Gehirn
- Blickzuwendung
- Verarbeitungszeit des Hirns
- Signallaufzeit von Hirn zu den Extremitäten
- Motorische Ansprechzeit der Extremitäten
- Ansprechzeit der Fahrzeugaktoren

### 2.6.3.1 Signallaufzeit der Fahrzeugelektronik

Die Signallaufzeiten innerhalb des Fahrzeugs, das ein Lichtsignal ausstrahlt, sind von den Signallaufzeiten der elektrischen Signale innerhalb der Kabel und den Verarbeitungszeiten der involvierten Steuergeräte abhängig. Die theoretisch kürzeste Signallaufzeit in elektrischen Leitungen beträgt 3,3 ns pro Meter. Bei den im Fahrzeug üblichen Leitungslängen kann daher von Laufzeiten unter 100 ns ausgegangen werden. Die Laufzeiten bei Bussystemen können entsprechend den jeweiligen Übertragungsraten des Systems abgeschätzt werden.

Bei dem CAN-Bus beträgt die maximale Übertragungsrate 1 MBit/s. Daher beträgt die theoretisch kürzeste Signallaufzeit 1  $\mu$ s. In der Praxis wird die Laufzeit aufgrund des Protokollaufwandes jedoch etliche zehn  $\mu$ s betragen. Laut [Thi04] vergehen maximal 300  $\mu$ s, bis eine Nachricht empfangen wird.

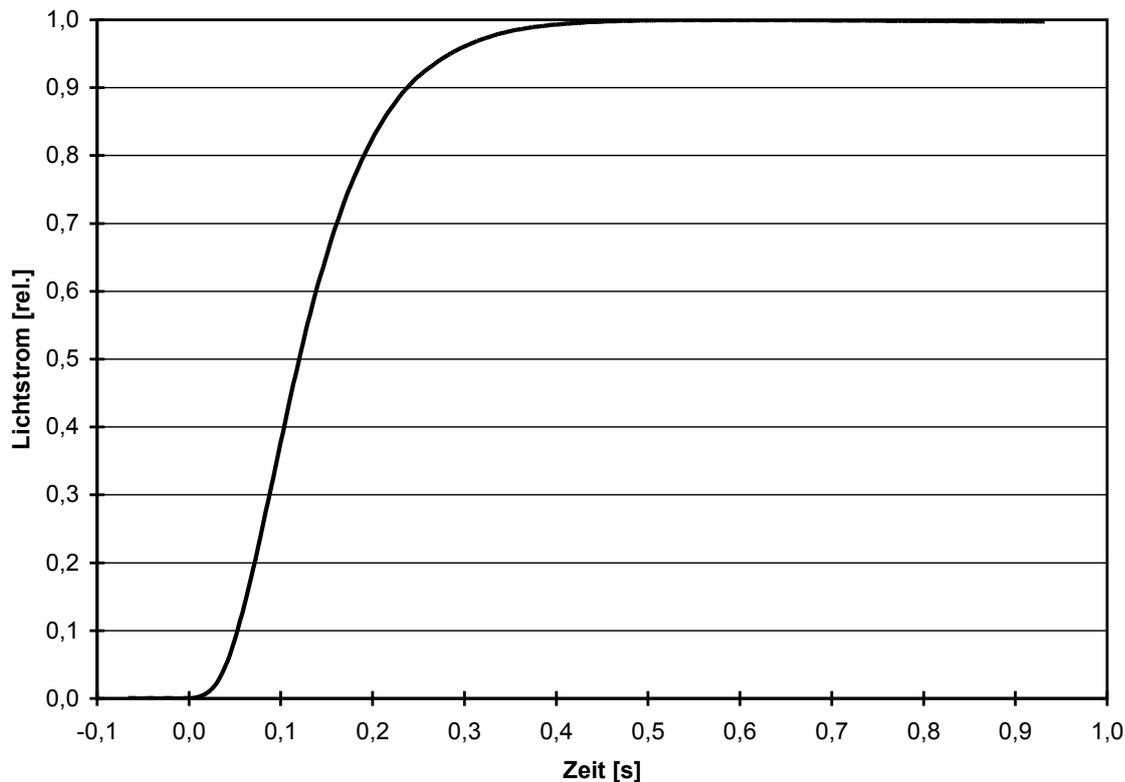
Die maximale Übertragungsrate des Flexray-Busses beträgt 10 MBit/s. Dieses Bussystem ist für X-by-wire geeignet. Es wird unter anderem für die adaptiven Stoßdämpfer diverser Fahrzeuge der Marke BMW eingesetzt. Entsprechend den Überlegungen über den CAN-Bus kann bei dem Flexray-Bus von einer Laufzeit von maximal 30  $\mu$ s ausgegangen werden.

Zusammenfassend muss je nach eingesetztem Bussystem von einer maximalen Signallaufzeit der Fahrzeugelektronik von bis zu 300  $\mu$ s ausgegangen werden.

### 2.6.3.2 Ansprechzeit der verschiedenen Leuchtmittel

Lampen verschiedener Technologien weisen deutlich unterschiedliche Ansprechzeiten auf (Tabelle 2.5). Dies liegt zum Einen an den unterschiedlichen physikalischen Wirkungsprinzipien der Lichterzeugung. Zum Anderen benötigen bis auf die Glühlampe alle Lampen spezielle Vorschaltgeräte für ihren Betrieb.

Die Lichterzeugung bei der Glühlampe geschieht durch das Erhitzen der Wolframwendel [Wei06]. Bei der Erwärmung des Glühfadens ändert sich der elektrische Widerstand deutlich. Verursacht durch den geringen elektrischen Widerstand einer kalten Glühwendel ist während der Aufheizphase ein deutlich größerer elektrischer Strom notwendig, als im heißen Zustand der Wendel zum Betrieb der Lampe benötigt wird. Wenn die Glühlampe über verlustarme Zuleitungen an einer ausreichend leistungsstarken Spannungsquelle angeschlossen ist, verändert sich die Lampenspannung während den verschiedenen Betriebsphasen nur sehr gering.



**Bild 2.17:** Einschaltvorgang einer H1-Halogenglühlampe

Der Einschaltvorgang einer typischen Glühlampe ist in Bild 2.17 dargestellt. Exemplarisch ist die Ansprechzeit einer H1-Glühlampe gezeigt.

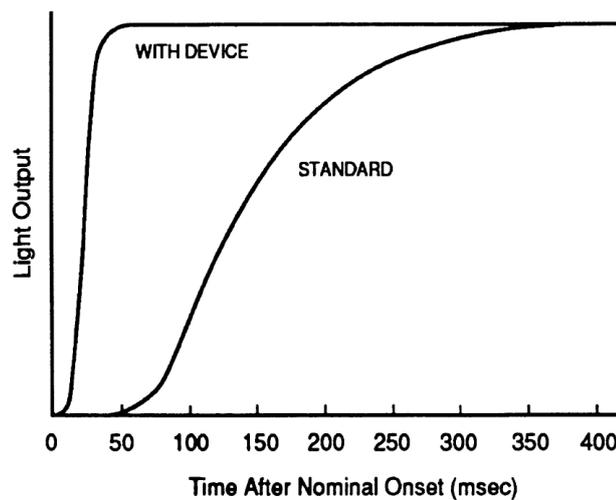
Die Ansprechzeit<sup>23</sup> von Glühlampen ist durch den Aufheizvorgang bestimmt. Daher kann die Ansprechzeit durch Vorheizen der Lampen deutlich reduziert werden. Dies haben Sivak und Flanagan [SF93a, SF93b] untersucht. Sie betrieben eine Glühlampe mit einer Dauerspannung von 2 V und legten für den Einschaltvorgang des Signals eine Überspannung an die Lampe an. Damit erreichten sie eine Verkürzung der Ansprechzeit von 200 ms. Ohne Vorheizen betrug die Ansprechzeit ihrer Lampe 250 ms<sup>24</sup>, mit Vorheizen nur noch 50 ms (Bild 2.18). Den Einfluss der Verkürzung der Ansprechzeit auf die Verkürzung der Reaktionszeit von Fahrern bei Benutzung der Lampe als Bremssignal untersuchten sie und ermittelten eine Reduktion von 115 ms.

Im Gegensatz zu Glühlampen sind LEDs an Stromquellen zu betreiben. Die im Fahrzeug vorhandene Batterie stellt jedoch eine Spannungsquelle dar. Daher muss die LED durch entsprechende Elektronik mit dem Bordnetz verbunden werden. Als einfachste Anpassung wird ein entsprechend dimensionierter Widerstand in Reihe zur LED angeschlossen. Die grundlegend sehr kurze Ansprechzeit der LED wird dadurch nicht beeinflusst. Der Gesamtwirkungsgrad ist jedoch gering. Soll dieser deutlich erhöht werden, so ist die LED an einer Stromquelle, meist als Schaltnetzteil realisiert, angeschlossen. Die Ansprechzeit der Leuchte im Gegensatz zu der Ansprechzeit der

<sup>23</sup>Mit Ansprechzeit wird normalerweise der Zeitraum bezeichnet, in dem der Lichtstrom der Lampe von 0 auf 90 Prozent des nominellen Lichtstroms ansteigt.

<sup>24</sup>Auch in ihrer Veröffentlichung [SSF03] erwähnen sie, dass eine Glühlampe eine Anstiegszeit von 250 ms für das Erreichen von 90 Prozent ihrer maximalen Lichtstärke benötigt.

## 2. Stand der Erkenntnisse



**Bild 2.18:** Ansprechzeit einer Glühlampe mit (with device) und ohne (standard) Vorheizen der Wendel (Quelle: [SF93b])

reinen LED kann je nach Schaltungsaufbau deutlich verlängert werden.

Ähnlich den LEDs sind Entladungslampen an Stromquellen zu betreiben, damit die Lampen nicht durch einen zu hohen Strom zerstört werden. Für Zündung und Betrieb sind deutlich unterschiedliche Spannungen notwendig. So muss zum Beispiel bei HID-Lampen<sup>25</sup> die Entladung mit einer Spannung von einigen 10 kV [Fle06] gezündet und die Lampe im Betrieb mit 85 V und 0,4 A versorgt werden [FN04].

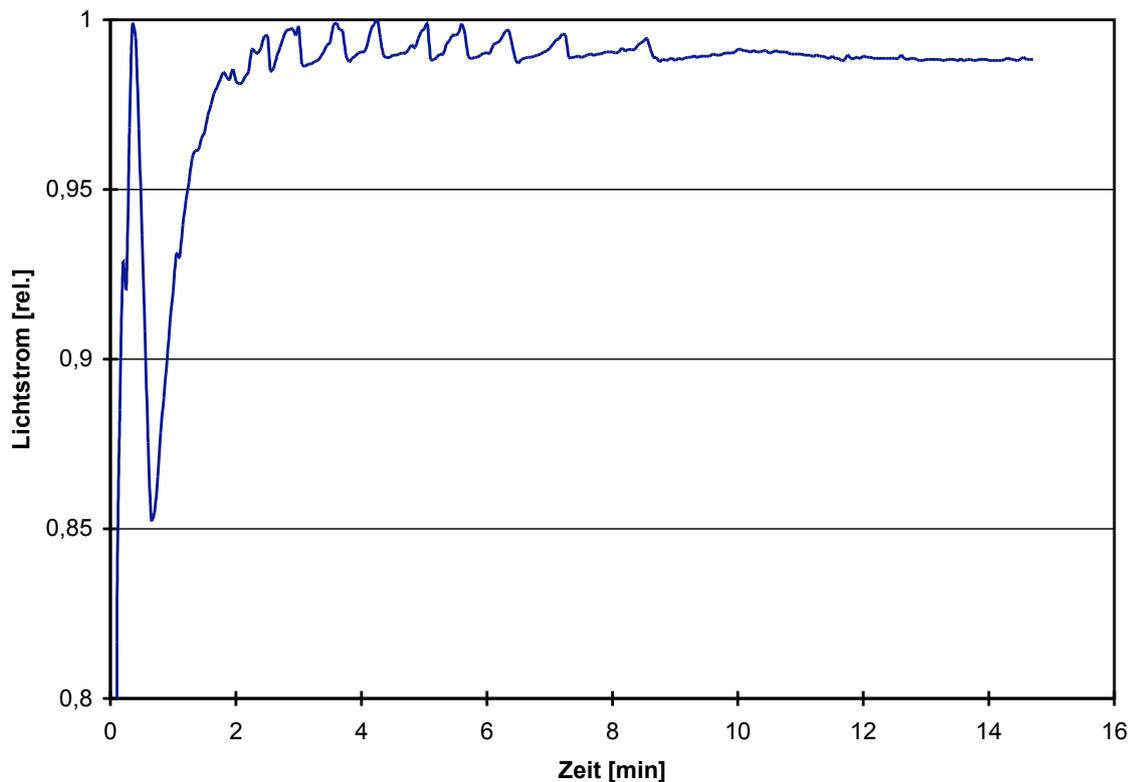
Bis eine Gasentladung mit voller Helligkeit leuchtet, können einige Minuten verstreichen. Daher befindet sich bei den im deutschen Sprachgebrauch als Xenon-Lampen bekannten HID-Lampen als Startgas Xenon in dem Entladungsgefäß. Die Xenon-Entladung liefert in der ersten Minute nach dem Einschalten einen Lichtstrom von 800 lm und überbrückt die Zeitspanne, bis die Hochdruck-Quecksilberentladung vollständig aufgebaut ist und die Lampe ihren vollen Lichtstrom von 3.200 lm abstrahlt. Der Einschaltvorgang einer HID-Lampe vom Typ D2S ist in Bild 2.19 dargestellt.

Lichtquelle	Beispiel	Ansprechzeit
Glühlampe	[Ols96]	140 ms
Glühlampe	[Man04]	180 ms
Glühlampe	[KKN02]	200 ms
Glühlampe H1	Einschaltvorgang in Bild 2.17 dargestellt	236 ms
Glühlampe	Bild 2.18 [SF93b]	250 ms
Glühlampe vorgeheizt	Bild 2.18 [SF93b]	50 ms
LED ohne Elektronik	konventionelle Leuchte in Abschnitt 4.2.2	9 $\mu$ s
LED mit Elektronik	LED-Matrix Leuchte in Abschnitt 4.2.2	80 ms
Entladungslampen	Neonlampe, erwähnt bei [SHJ96]	18 $\mu$ s
HID-Lampe	Einschaltvorgang in Bild 2.19 dargestellt	einige Sekunden

**Tabelle 2.5:** Ansprechzeiten verschiedener Leuchtmittel

Die rein technischen Unterschiede der Ansprechzeiten verschiedener Lichtquellen, dargestellt in Tabelle 2.5, weisen einen direkten Einfluss auf die tatsächlichen Reaktionszeiten von Leuchten,

<sup>25</sup>High Intensity Discharge Lamps - Hochdruckgasentladungslampen



**Bild 2.19:** Einschaltvorgang einer D2S-Lampe

bestückt mit diesen Lampen, auf. So hat Olson [Ols96] anhand psychophysikalischer Untersuchungen bewiesen, dass Bremsleuchten, die mit LEDs statt Glühlampen bestückt sind, die Reaktionszeit des nachfolgenden Fahrers um 200 bis 300 ms verkürzen.

Die Ansprechzeiten von Entladungslampen sind so kurz, dass der Einsatz als Lichtquellen für Bremsleuchten wünschenswert ist. Jedoch verursacht die Zündung und der Betrieb dieser Lampen enorme EMV-Probleme, weshalb von dem Einsatz im Automobil Abstand genommen wird. Es muss jedoch kritisch hinterfragt werden, warum die EMV-Problematik bei den Vorschaltgeräten von HID-Lampen gemeistert werden konnte und deren Eliminierung bei den Vorschaltgeräten von Niederdrucklampen angeblich finanziell untragbare Kosten verursachen würde. Im Bereich der allgemeinen Innen- und Außenbeleuchtung sind beide Vorschaltgerätektechnologien seit Jahren Stand der Technik. Vielleicht liegt die unzureichende Motivation für die Entwicklung EMV-fester EVGs für Niederdrucklampen an dem geringen Vorteil dieser gegenüber LEDs. Die Wirkungsgrade und Ansprechzeiten sind fast gleich. Bei dem Umstieg von Halogen- zu HID-Lampen war ein deutlich höherer Benefit hinsichtlich des Lampenlichtstroms gegeben, so dass die Entwicklung der entsprechenden Vorschaltgeräte lukrativ war. Dass die Entwicklung von Leuchten mit Niederdrucklampen nicht unmöglich ist, zeigt der Einsatz von Neonröhren als Bremsleuchte und, mit Filter, als Fahrtrichtungsanzeiger im BMW Z8. Auch in einigen dritten, hochgesetzten Bremsleuchten für den Zubehörhandel werden Neonröhren als Lichtquellen eingesetzt.

Entsprechend Tabelle 2.5 wird eine maximale Ansprechzeit der Leuchtmittel von Signalleuchten von 250 ms angenommen.

## 2. Stand der Erkenntnisse

---

### 2.6.3.3 Übertragungszeit von Leuchte zu Auge

Die Übertragungszeit des Signallichtes von der Leuchte zu dem Auge des Beobachters wird durch die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Photonen im Medium Luft bestimmt. Diese Geschwindigkeit entspricht ungefähr der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum, die 299.792.458 m/s [Stö94] beträgt. Die typische Signallaufzeit bei einem durchschnittlichen Abstand von 100 m zwischen Leuchte und Auge berechnet sich damit zu ca. 0,3  $\mu$ s.

### 2.6.3.4 Ansprechzeit der Rezeptoren

Die Ansprechzeiten der Rezeptoren im Auge bei unterschiedlich hellen Signallichtern und unterschiedlicher Adaptation, skotopisch, mesopisch und photopisch, wird nicht näher betrachtet.

Allgemein [Wic05] kann von einer Ansprechzeit der Retina von 20 bis 40 ms ausgegangen werden.

### 2.6.3.5 Signallaufzeit von Auge zu Gehirn

Die Informationskapazität des Auges beträgt 65 MBit/s [Eck93].

Bockelmann [Boc87] zeigt die Laufzeiten der Signalimpulse in den Nervenbahnen vom Auge in das Gehirn auf. Er gibt an, dass die Geschwindigkeit der Datenübertragung von Auge zu Gehirn weniger als 100 m/s beträgt. Dadurch verursacht kann der Mensch technisch bedingt nicht schneller als 1 ms auf visuelle Reize reagieren.

Die Signallaufzeit von Auge zu Hirn wird mit 1 ms abgeschätzt.

### 2.6.3.6 Blickzuwendung

Das Auge muss bei peripheren Signalen diese zuerst foveal betrachten. Dies hat unter anderem Diem [Die04] nachgewiesen. Er zeichnete die Blickrichtung von Fahrern im Kolonnenverkehr auf und vermaß die Zeit vom ersten Aufleuchten der Bremsleuchten bis zu der Blickzuwendung des Fahrers zu den Bremsleuchten. Dabei erhielt er eine Blickzuwendungszeit von ca. 240 ms<sup>26</sup>.

Entsprechend Abschnitt 2.4.1.8 kann die Blickzuwendungszeit durch das Darbieten flimmernder Signale (als Optimum werden 20 Hz angesehen) deutlich verkürzt werden. So erreichte Berg [BBSB07] in seinen Untersuchungen eine Verkürzung der Reaktionszeit um bis zu sieben Prozent je nach Beanspruchung der Versuchsperson.

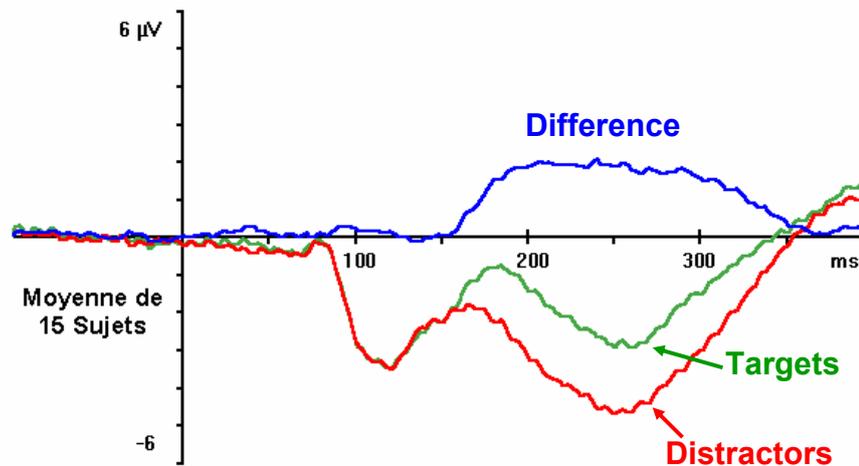
### 2.6.3.7 Verarbeitungszeit des Gehirns

Wahrnehmungsprozesse laufen im Gehirn sehr schnell ab. So werden Kanten ca. 50 bis 80 ms nachdem das Licht ins Auge gelangt ist extrahiert. Nach insgesamt 150 ms hat das Gehirn nicht nur Kanten, sondern auch komplexe Formen<sup>27</sup> erkannt [TFM96]. Die Ergebnisse einer Messung der Verarbeitungszeiten sind in Bild 2.20 zu sehen.

---

<sup>26</sup>Die Anzahl der ausgewerteten Versuche bei Diem ist zu gering, so dass die angegebene Dauer der Blickzuwendungszeit statistisch nicht abgesichert ist.

<sup>27</sup>In den von Thorpe, Fize und Marlot durchgeführten Experimenten wurden Tiere als komplexe Formen dargeboten.



**Bild 2.20:** Verarbeitungszeit bei Betrachtung von Bildern  
Darstellung der Mittelwerte von 15 Probanden (Quelle: [Wic05])

Die Verarbeitungszeiten sind jedoch auch von der Farbe abhängig. So konnte Haines [HGND74] zeigen, dass die Reaktionszeiten auf Lichtsignale für verschiedene Farben unterschiedlich sind. Dazu untersuchte er farbige Lichtsignale sowohl vor dunklen als auch vor hellen Hintergründen. Lichtsignale in der Farbe gelb werden am Schnellsten erkannt. Darauf folgen grüne, blaue, rote Signale, wobei die roten am Langsamsten erkannt werden.

### 2.6.3.8 Laufzeiten der Signalimpulse vom Hirn zu den Extremitäten

Die Laufzeiten der Signalimpulse vom Gehirn zu den Extremitäten können anhand der Nervenleitgeschwindigkeiten abgeschätzt werden. In [Ner08] werden 1 bis 100 m/s für Säugernerven angegeben. Heinz [Hei94] spezifiziert die Zeiten genauer und gibt für die motorische Versorgung zu Muskelspindeln 15 bis 30 m/s an.

Bei einer maximalen Lauflänge von 2 m entspricht dies einer Laufzeit von maximal 133 ms.

### 2.6.3.9 Motorische Ansprechzeit der Extremitäten

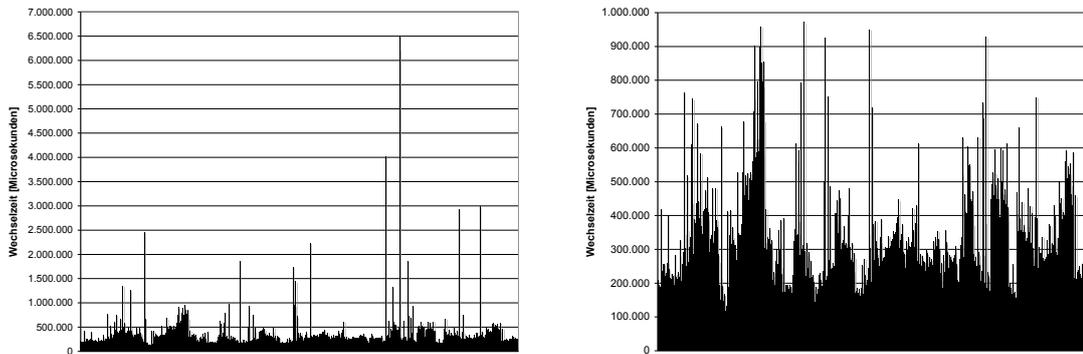
Für eine lückenlose Berechnung der Reaktionszeit im Straßenverkehr ist die Ermittlung der motorischen Ansprechzeit der Hände oder Füße notwendig. In der Literatur, die Reaktionszeiten im Straßenverkehr behandelt, finden sich je nach gewählter Untersuchungsmethode deutlich unterschiedliche Ansprechzeiten. Da eine kurze Ansprechzeit besonders bei der Reaktion auf das Bremslicht von Interesse ist, wird die motorische Ansprechzeit der Füße in Verbindung mit typischen Pedalen näher beleuchtet. Dabei wird als Bewegungszeit die Zeit bezeichnet, die nach dem Wahrnehmen eines Lichtsignals vergeht, bis die wahrnehmende Person die entsprechende Aktion ausgeführt hat. Meist wird der Begriff im Zusammenhang mit Bremsleuchten verwendet. Die Bewegungs- oder auch Wechselzeit ist dabei die Zeit, die benötigt wird, um den Fuß vom Gaspedal auf das Bremspedal umzusetzen. Manchmal wird sie auch *Umsetz- und Druckaufbauzeit* genannt.

Bei diversen eigenen Versuchen zur Ermittlung des Einflusses des hinteren Signalbildes auf die Reaktionszeit werden unter anderem die Betätigungszeiten von Bremspedal und Gaspedal gemessen. Bei diesen Experimenten wissen die Probanden nicht, dass Gaspedal- und Bremspedalbetätigungszeiten ermittelt werden. Daher können praxisnahe Zeiten aufgenommen werden.

## 2. Stand der Erkenntnisse

---

Dabei ergibt sich eine durchschnittliche Wechselzeit von 300 ms. Die Mittelwerte variieren je nach Höhe des Schwellwertes von 275 bis 328 ms. Alle Messwerte größer einem bestimmten Schwellwert werden als untypische Unkonzentriertheit der Versuchspersonen gewertet und von der Mittelwertbildung ausgeschlossen. Bei einem Schwellwert von 1.000 ms wird ein Mittelwert von 302 ms ermittelt. In Bild 2.21 links sind alle erhaltenen Messwerte aufgetragen, wobei in Bild 2.21 rechts nur die Messwerte kleiner 1.000 ms zu sehen sind.



**Bild 2.21:** Typische Wechselzeiten für das Umsetzen des Fußes vom Gaspedal auf das Bremspedal (rechts alle Messwerte, links die bereinigten Werte)

In [GG06] kann den Messprotokollen eine Betätigungszeit des Bremspedals vom ersten Berühren bis zum vollständigen Niedertreten in Notbremssituationen von 75 ms entnommen werden. Warshawsky-Livine [WLS02] führte im Labor verschiedene Untersuchungen über die Bewegungszeit durch und stellte dabei fest, dass Männer eine signifikant kürzere Bewegungszeit (160 ms) aufweisen, als Frauen (190 ms). Dieser Unterschied beträgt ca. 15 Prozent. Als durchschnittliche Bewegungszeit kann ein Wert von 175 ms angenommen werden [WLS02]. Bei den Messungen von Damasky [DFF<sup>+</sup>94] ergab sich im Mittel ein Wert von 166 ms. Hersteller von Advanced Brake Light Devices geben eine *Gas zu Bremse Wechselzeiten* von ca. 300 ms an. Rosemann [Ros75a] ermittelte in seinem Versuch mit insgesamt fünf Versuchspersonen eine Umsetz- und Druckaufbauzeit von insgesamt 237 ms. Schreiner [Sch00] ermittelte bei ihren Versuchen eine mittlere Wechselzeit von 210 ms.

Als praktikable Merkgröße kann zusammenfassend von einer motorischen Ansprechzeit der Extremitäten von ca. 200 ms ausgegangen werden.

### 2.6.3.10 Ansprechzeit der Fahrzeugaktoren

Hat der Fahrer eine Gefahrensituation richtig erkannt und betätigt die Schaltelemente seines Fahrzeuges, so sind die Ansprechzeiten der Fahrzeugaktoren zu berücksichtigen.

Bei modernen Bremssystemen betragen diese etliche Millisekunden. So vergehen bei der elektronischen Keilbremse 30 ms von deren Aktivierung in Notbremssituationen bis zum Aufbau der Bremskraft [GG06]. Die volle Fahrzeugverzögerung von über 1 g wird nach weniger als 100 ms erreicht.

Anhand der vorliegenden Ergebnisse kann von einer Ansprechzeit der Fahrzeugaktoren inklusive Erreichen der gewünschten Verzögerung von ca. 100 ms ausgegangen werden.

### 2.6.3.11 Zusammenfassende Betrachtung der einzelnen Phasen der Reaktionszeit

Zusammenfassend aus den obigen Abschnitten 2.6.3.1 bis 2.6.3.10 kann die Summe aus den einzelnen Phasen der Reaktionszeit auf das Aufleuchten einer Signalleuchte berechnet (Tabelle 2.6) werden.

Phase	Zeitdauer [ms]
Signallaufzeit der Fahrzeugelektronik	< 1
Ansprechzeit der Leuchtmittel	250
Übertragungszeit von Leuchte zu Auge	< 1
Ansprechzeit der Rezeptoren	40
Signallaufzeit von Auge zu Gehirn	1
Blickzuwendung	240
Verarbeitungszeit des Hirns	150
Signallaufzeit von Hirn zu den Extremitäten	133
Motorische Ansprechzeit der Extremitäten	200
Ansprechzeit der Fahrzeugaktoren	100
<b>Summe</b>	<b>1.116</b>

**Tabelle 2.6:** Einzelne Phasen der Reaktionszeit auf das Aufleuchten einer Signalleuchte

Es zeigt sich, dass auch bei genauer Betrachtung der einzelnen Phasen der Reaktionszeit von einer Sekunde als Gesamtdauer ausgegangen werden kann. Wird die Blickzuwendungszeit hinzugezählt, so dauert die Reaktionszeit etwas länger als eine Sekunde, wobei sie ohne Berücksichtigung der Blickzuwendungszeit etwas weniger, knapp 900 Millisekunden, lang dauert.

## 2.7 Gesetzliche Rahmenbedingungen bezüglich ambienter Innenraumbeleuchtung in Fahrzeugen

Die ECE Regelungen beschreiben ausführlich diverse Eigenschaften aller sicherheitsrelevanter Teile von Fahrzeugen. Speziell die Beleuchtung ist sehr strikt reglementiert. Die bestehenden Regelungen betreffen jedoch nur die Beleuchtungseinrichtungen an der Außenhaut des Fahrzeugs. Über die Innenraumbeleuchtung, speziell über ambiente Beleuchtung, existieren keine Regelungen, die für den ganzen ECE Raum gelten. Nur einige nationale Regeln behandeln diese Art von Beleuchtung.

In Deutschland sind zusätzlich zu den ECE Regelungen noch weitere Gesetze zu befolgen. Relevant für die ambiente Beleuchtung sind zwei Paragraphen, § 30 und § 49a, der Straßenverkehrszulassungsordnung [BK02], die im Folgenden wiedergegeben sind.

### § 30 StVZO

Fahrzeuge müssen so gebaut und ausgerüstet sein, dass ihr verkehrsbüblicher Betrieb niemanden schädigt oder mehr als unvermeidbar gefährdet, behindert oder belästigt.

### § 49a StVZO, Abs 1 Satz 1

An Kraftfahrzeugen und ihren Anhängern dürfen nur die vorgeschriebenen und die für zulässig erklärten lichttechnischen Einrichtungen angebracht sein.

### § 49a StVZO, Abs 3

Lichttechnische Einrichtungen müssen so beschaffen und angebracht sein, dass sie sich gegen-

## 2. Stand der Erkenntnisse

---

seitig in ihrer Wirkung nicht mehr als unvermeidbar beeinträchtigen, auch wenn sie in einem Gerät vereinigt sind.

### **§ 49a StVZO, Erläuterung 9**

Lichttechnische Einrichtungen „in“ Kraftfahrzeugen und „an“ Kraftfahrzeugen. Aus BMV/StV 7 - 4005 A/56 vom 17.2.1956, Einzelentscheid: Wie § 53a Abs 1 beweist, bedeutet „an Kraftfahrzeugen“ nicht dasselbe wie „in Kraftfahrzeugen“. Nach seinem Wortlaut gilt § 49a Abs 1 Satz 1 nicht für die Innenbeleuchtung von Fahrzeugen. Damit stimmt überein, dass Abs 1 Satz 1 und Abs 4 des § 49a zwar für alle zulässigen lichttechnischen Einrichtungen „an“ Kraftfahrzeugen und Anhängern gelten, auf die Innenbeleuchtung aber ebenso wenig passen wie § 49a Abs 5. Für die Innenbeleuchtung gilt § 30. Dringt sie nach außen und beeinträchtigt sie die Wirkung der vorgeschriebenen lichttechnischen Einrichtungen, so ist dies nach § 30 unzulässig, weil andere Verkehrsteilnehmer dadurch behindert werden können.

Zusammenfassend kann § 49a inklusive der Erläuterung 9 bezüglich der Innenbeleuchtung wiedergegeben mit:

### **§ 49a StVZO, Zusammenfassung**

Eine Innenbeleuchtung ist dann unzulässig, wenn sie nach außen dringt und dadurch die Wirkung der vorgeschriebenen lichttechnischen Einrichtungen beeinträchtigt.

In der Praxis schränken die existierenden Gesetzesstellen die Entwicklung ambienter Beleuchtung nicht ein.

## 2.8 Überblick über bisherige Untersuchungen bezüglich Überlappung

### 2.8.1 Untersuchungen von Mortimer

In den Siebzigern hat R. G. Mortimer mehrere Versuche zur psychologischen Untersuchung von Rückleuchten an Fahrzeugen durchgeführt. Da in den Experimenten von Mortimer unter anderem der Einfluss der Überlappung von Bremsleuchte und Fahrtrichtungsanzeiger auf die Reaktionszeit Gegenstand seiner Untersuchungen ist, werden diese hier vorgestellt. Zu finden sind die Beschreibungen seiner Versuche und deren Ergebnisse unter anderem in [Mor69] und [Mor70].

Die Versuche fanden in den siebziger Jahren in Amerika statt. Daher waren es die teilnehmenden Versuchspersonen gewohnt, dass der Fahrtrichtungsanzeiger ein rotes Blinklicht sein kann und manchmal mit der Bremsleuchte ineinander gebaut wurde. Dies muss bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden. In den Versuchen wurden acht verschiedene Kombinationen von Rückleuchten untersucht. In seinen ersten beiden Versuchen beträgt das Verhältnis der Lichtstärken von Schlussleuchte zu Bremsleuchte und Fahrtrichtungsanzeiger 1:5. Für den dritten Versuch wird in [Mor70] ein Verhältnis von 1:13 angegeben.

Mortimer kommt zu dem Schluss [Mor69], dass die von ihm untersuchten Signalkombinationen in allen Fällen eine bessere Performanz aufweisen, als die zu seiner Zeit marktüblichen Kombinationen, bei denen pro Fahrzeugseite eine rote Leuchte sowohl Schlussleuchte, Bremsleuchte als auch Fahrtrichtungsanzeiger in sich vereinte. Die effektivsten Systeme sind jene, bei denen alle drei Funktionen voneinander getrennt und verschieden kodiert sind.

### 2.8.2 Untersuchungen der SAE

Im November 1977 wurden von der SAE Untersuchungen [HEA84] durchgeführt, um geeignete Lichtstärken für vordere Fahrtrichtungsanzeiger in Abhängigkeit deren Abstandes zu den Abblend-

lichtscheinwerfern festlegen zu können.

In einem ersten Teil des Tests wurde ein Messvorgehen zur Bestimmung des Abstandes zwischen zwei ausgedehnten Lichtquellen entwickelt und verifiziert. Da dieses Vorgehen mit den heute üblichen Leuchten- und Scheinwerferkonstruktionen nicht mehr kompatibel ist, wird nicht näher darauf eingegangen. Moderne Messvorgehen können zum Beispiel an die Bestimmung der leuchtenden Fläche, beschrieben in Abschnitt 5.3.6.3, angelehnt werden.

In einem zweiten Teil des Experimentes wurde die Erkennbarkeitsentfernung eines Fahrtrichtungsanzeigers in Abhängigkeit von seiner Lichtstärke und seinem Abstand zu einem eingeschalteten Abblendlichtscheinwerfer<sup>28</sup> untersucht. Die leuchtende Fläche des Fahrtrichtungsanzeigers beträgt drei auf vier Inch. Dies entspricht  $0,0075 \text{ m}^2$ . Er blinkt mit einer Frequenz von 1,5 Hz bei einem Blinkverhältnis von 1:1.

An dem Experiment nehmen 34 Versuchspersonen teil. Diese befinden sich in stehenden Fahrzeugen auf die das blinkende Testfahrzeug mit konstanter Geschwindigkeit zufährt. Die Erkennbarkeitsentfernung wird ermittelt, in dem die Zeit zwischen Erkennen und Vorbeifahrt gemessen wird. In Tabelle 2.7 sind die Ergebnisse, umgerechnet von Inch in Meter, angegeben.

Abstand $d$ [m]	Lichtstärke $I$ [cd]	Erkennbarkeitsentfernung $a$ [m]
0,10160	200	138
0,08890	300	142
0,07620	300	138
0,06350	300	132
0,07620	400	152
0,06985	400	142
0,06350	400	141

**Tabelle 2.7:** Erkennbarkeitsentfernung von Fahrtrichtungsanzeigern bei verschiedenen Lichtstärken und Abständen zu dem Abblendlichtscheinwerfer

Als mittlere Erkennbarkeitsentfernung ergibt sich 140 m. In dieser Entfernung erscheint der Fahrtrichtungsanzeiger unter einem Winkel von 2,5 Bogenminuten. Auch der Abstand zwischen den beiden Lichtquellen beträgt bei  $d = 0,1 \text{ m}$  2,5 Bogenminuten.

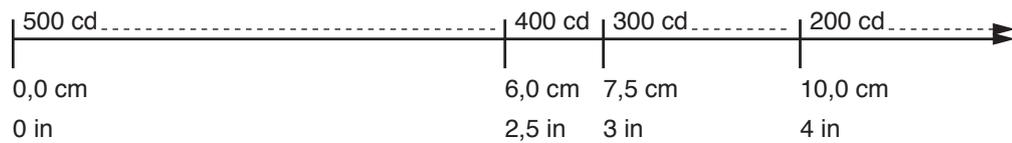
Anhand der Messdaten wird in [HEA84] die Mindestlichtstärke von vorderen Fahrtrichtungsanzeigern in Abhängigkeit ihres Abstandes festgelegt, um die Erkennbarkeit in ausreichender Entfernung zu gewährleisten. Diese Mindestlichtstärken sind in Bild 2.22 angegeben.

Es wird ein Faktor eingeführt, mit dem die minimale Lichtstärke bei ausreichendem Abstand in Abhängigkeit des tatsächlichen Abstandes zu multiplizieren ist, um gleiche Wahrnehmbarkeit zu garantieren. So muss ab einem Abstand von weniger als 60 mm mindestens die 2,5 fache Lichtstärke erreicht werden. Diese Daten basieren auf Experimenten, die am 1. November 1977 durchgeführt wurden.

Die in den amerikanischen Standard übernommenen Werte fordern schon bei größerem Abstand die 2,5 fache Lichtstärke. So wird die Reduzierung der Sichtbarkeit des Fahrtrichtungsanzeigers bei einem zu nahen Abstand zu dem Abblendlicht verhindert durch eine Erhöhung der geforderten Mindestlichtstärke um den Faktor 2,5, falls der Abstand kleiner 100 mm ist. Dies ist in Federal Motor Vehicle Safety Standard 108, Abschnitt 5.3.1.7, [FMV06] festgelegt.

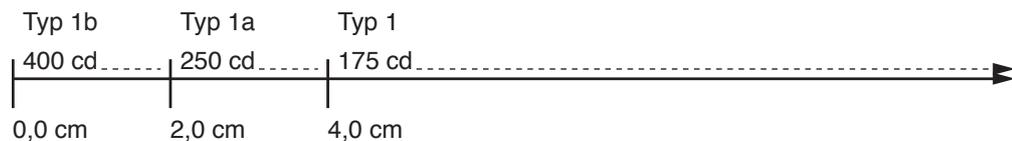
<sup>28</sup>Leider liegen keine Angaben über die Lichtstärke des Scheinwerfers vor. Es ist lediglich bekannt, dass er vom Typ 2A ist.

## 2. Stand der Erkenntnisse



**Bild 2.22:** Mindestlichtstärken des vorderen Fahrtrichtungsanzeigers in Abhängigkeit des Abstandes zu Abblendlichtscheinwerfern

Als Vergleich sind in Bild 2.23 die Mindestlichtstärken der vorderen Fahrtrichtungsanzeiger nach ECE, Stand Februar 2008, entsprechend ECE Regelung Nummer 6, Abschnitt 6.1[ERR01] angegeben.



**Bild 2.23:** Mindestlichtstärken des vorderen Fahrtrichtungsanzeigers in Abhängigkeit des Abstandes zu Abblendlichtscheinwerfern entsprechend ECE

Die aus psychophysikalischen Experimenten abgeleiteten Lichtstärken in Bild 2.22 fordern wesentlich höhere Werte, als die in aktuellen ECE Regelungen beschlossenen. Dies könnte an unterschiedlichen Lichtstärkewerten der Scheinwerfer liegen. Jedoch sind diese bei heutigen Xenon-Scheinwerfern sicherlich nicht geringer als die bei 30 Jahre alten Sealed Beam Scheinwerfern.

Auch Sivak [SSF03] erwähnt die Unterschiede zwischen SAE und ECE in seinen Untersuchungen. Er geht aber nicht näher darauf ein und stellt in seinen Versuchen keinen Vergleich zwischen der Wirksamkeit der einen oder anderen Anforderung an. Rumar erwähnt in seinem Kommentar zu [SSF03], dass ein Vergleich der Wirksamkeit beider Regelungen untersucht werden sollte.

## 2.9 Überblick über bisherige Arbeiten bezüglich Phantomlicht

### 2.9.1 Definitionen verschiedener Phantomlichtarten

#### 2.9.1.1 Phantomsignal

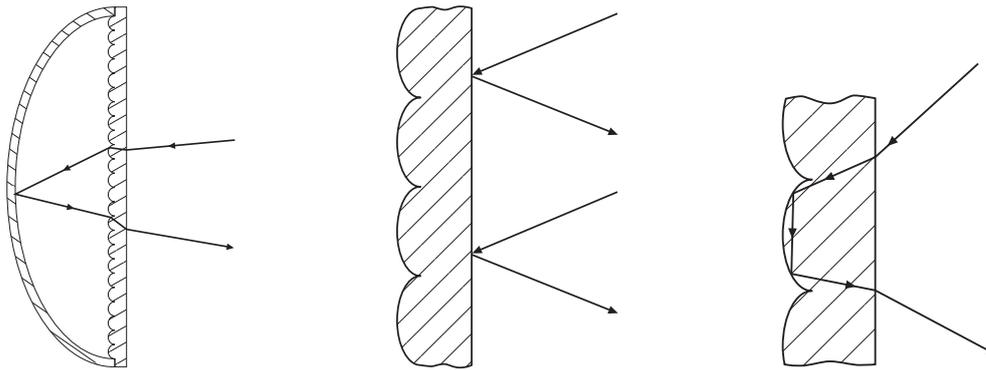
Das Phantomsignal ist laut Norm [DIfN06b] *ein falsches Signal, das durch in den Signalgeber einfallende Sonnenstrahlung hervorgerufen wird.*

Klassisch wird das Phantomsignal nach Haar [Haa80] in drei Arten unterteilt:

- Spiegel-Phantomlicht
- Reflex-Phantomlicht
- Echtes Phantomlicht

Bild 2.24 illustriert diese drei Arten von Phantomlicht schematisch. Zu sehen ist in allen drei Teilbildern die innen mit Toruslinsen versehene Abschluss-scheibe, der Strahlengang des Fremdlichtes und im linken Teilbild zusätzlich der Reflektor oder *Spiegel* der Leuchte.

Da in der Vergangenheit die Farbe von Signallichtern meist durch das Einfärben deren Abschluss-scheiben festgelegt wurde, unterschied man farbiges und farbloses Phantomlicht. Diese Differenzierung ist heute nicht mehr allgemein gültig, da die Farbe von Signallichtern oft durch die



**Bild 2.24:** Drei Arten Phantomlicht: Spiegel-Phantomlicht (links), Reflex-Phantomlicht (mittig) und echtes Phantomlicht (rechts) (Quelle: [HK07])

Lichtquelle selbst, zum Beispiel die Art der benutzten LED, festgelegt wird und daher bei etlichen Leuchten vollkommen auf gefärbte Optikkomponenten verzichtet wird. So können heute *Spiegel-Phantomlicht*, *Reflex-Phantomlicht* und *Echtes Phantomlicht* die gleiche Farbe wie das störende Fremdlicht aufweisen, falls die Leuchte eine farblose Abschlusscheibe besitzt.

### 2.9.1.2 Spiegel-Phantomlicht

Spiegel-Phantomlicht ist nach Definition von Haar [Haa80] buntes Licht mit der Farbe des Signallichtes. Dies gilt, falls die Abschlusscheibe der Leuchte gefärbt ist oder falls die Lichtquelle selbst eine gefärbte Optik, zum Beispiel bei Lampen der Art PY21W, aufweist. Sind weder die Abschlusscheibe noch die Lichtquelle gefärbt, so besitzt das Spiegel-Phantomlicht die Farbe des ursprünglichen Fremdlichtes.

Spiegel-Phantomlicht entsteht, in dem das Fremdlicht durch die Abschlusscheibe in die Leuchte eindringt, dort vom Reflektor zurückgespiegelt wird und wieder durch die Scheibe austritt. Dabei kann die Farbe des Lichtes durch gefärbte Optikteile wie eine Abschlusscheibe der Leuchte oder eine gefärbte Glühlampe verändert werden.

Das Signal der Leuchte scheint eingeschaltet zu sein. Lichtstärke, Verteilung und teilweise Farbe sind ähnlich den Eigenschaften des Signals der Leuchte.

### 2.9.1.3 Reflex-Phantomlicht und Color Washout

Bei Reflex-Phantomlicht dringen die Lichtstrahlen des Fremdlichtes nicht in die Leuchte ein, sondern werden auf der äußeren Oberfläche der Abschlusscheibe einer Leuchte reflektiert und farblich unverändert zurückgeworfen. Dieses Phantomlicht wird daher auch *Weißreflex* genannt, da die Farbe des meist weißen Fremdlichtes bei keiner Leuchtenkonstruktion verändert wird. Die Lichtstärke des Phantomlichteffektes kann mit den Eigenschaften des Signals übereinstimmen, steht jedoch in keinem direkten Zusammenhang mit dessen Lichtstärke. Auch die Lichtstärkeverteilung steht in keinem direkten Zusammenhang mit der der Leuchte. Die Farbe jedoch entspricht immer der des Fremdlichtes.

Dieses Phantomlicht erschwert die Erkennbarkeit des Signals. Die Signalfarbe wird überblendet oder *ausgewaschen*. Daher spricht man auch von *Color Washout*, der englischen Bezeichnung für *Reflex-Phantomlicht*.

## 2. Stand der Erkenntnisse

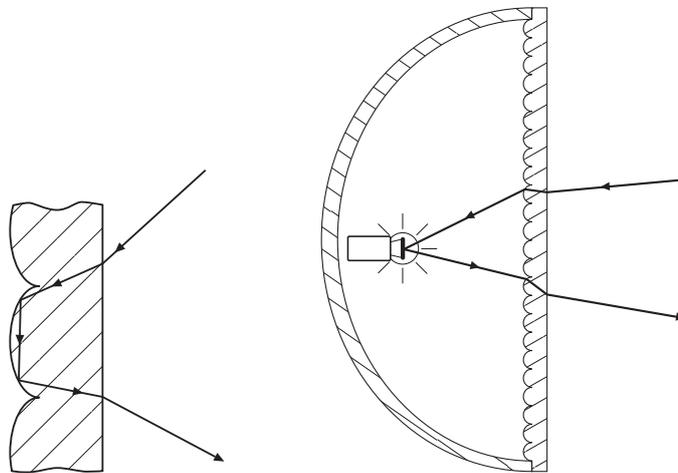
---

### 2.9.1.4 Echtes Phantomlicht

Im Gegensatz zu dem Oberflächenreflex bei Reflex-Phantomlicht dringt bei echtem Phantomlicht das Fremdlicht in die Abschluss Scheibe ein und wird, nach Haar [Haa80] in dieser oder an ihrer inneren Oberfläche, die oft als Toruslinsen ausgebildet ist, reflektiert. Bei dem Durchdringen der Scheibe wird die Farbe des Lichtes verändert, falls die Scheibe gefärbt ist.

Laut CIE [CIE80] kann echtes Phantomlicht nur bei Leuchten auftreten, bei denen die (gefärbten) Linsen das Licht auf die Glühwendel bündeln. Das Phantomlicht ist dabei das von der Glühwendel reflektierte Fremdlicht. Diese Definition entspricht eher der des Spiegel-Phantomlichtes, bei der das Fremdlicht nicht an transparenten, sondern opaken, spiegelnden Oberflächen reflektiert wird.

In Bild 2.25 sind die Strahlengänge dieser beiden unterschiedlichen Definitionen von echtem Phantomlicht gegenüber gestellt.



**Bild 2.25:** Zwei Arten von echtem Phantomlicht: links nach Haar [Haa80], rechts nach CIE [CIE80]

Bei beiden Sachverhalten wird die Farbe des Phantomlichtes durch gefärbte Optiken beeinflusst und stimmt mit der des Signals überein. Weiterhin scheint in beiden Fällen das Signal der Leuchte eingeschaltet zu sein.

## 2.9.2 Definitionen der Fremdlichtempfindlichkeit einer Leuchte

### 2.9.2.1 Beschreibung der Fremdlichtempfindlichkeit anhand der Phantom-Lichtstärke

Zur Quantifizierung der Fremdlichtempfindlichkeit wird das einfallende Fremdlicht in Beziehung zu dem in Nutzrichtung ausfallenden Fremdlicht einer Signalleuchte gesetzt. Dazu wird von Haar [Haa80] die Fremdlichtempfindlichkeit als Quotient von einfallendem zu ausgestrahltem Fremdlicht definiert. Dabei gibt die Beleuchtungsstärke  $E_{Fr}$  das auf die Leuchte auffallende Fremdlicht an. Das von der Leuchte zurückgestrahlte Phantomlicht in Richtung deren Hauptausstrahlrichtung wird mit der Phantom-Lichtstärke  $I_{Ph}$  bezeichnet (Formel 2.25).

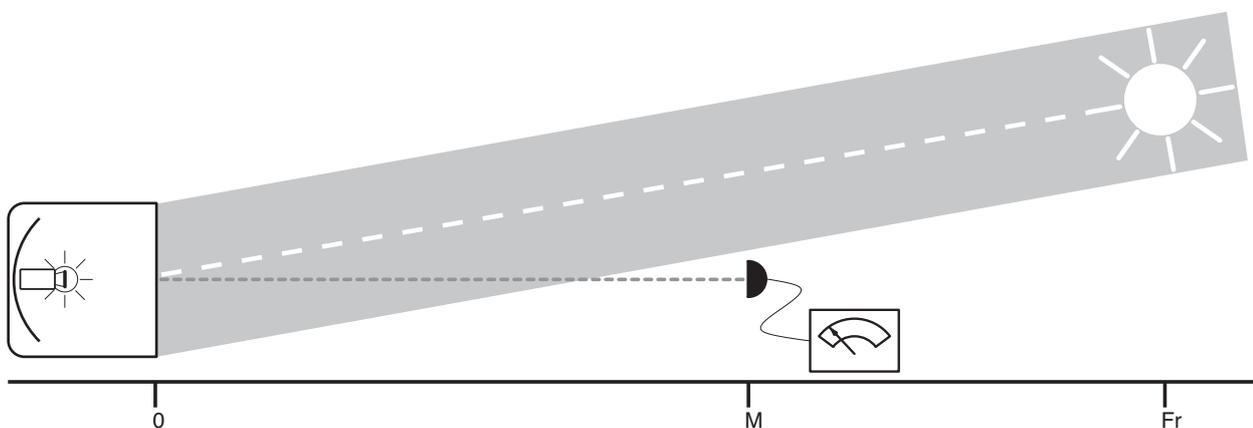
$$F = \frac{I_{Ph}}{E_{Fr}} \quad (2.25)$$

### 2.9.2.2 Beschreibung der Fremdlichtempfindlichkeit durch Kategorisierung der Farbkoordinaten unter alleiniger Berücksichtigung von Color Washout

In [Man05] stellt Manz einen Vorschlag für die Messung von Phantomlicht bei Kraftfahrzeug-Rückleuchten vor.

Da Verkehrssituationen, bei denen fälschlicherweise Signale erkannt werden, obwohl sie nicht gegeben werden, nicht als sicherheitskritisch eingestuft werden, wird in diesem Vorschlag auf die Untersuchung einiger Phantomlichtarten verzichtet. Die Verkehrssituationen werden als nicht kritisch eingestuft, da ein Fahrzeug kein Signal mit dem Inhalt *Fahrspur ist frei* gibt<sup>29</sup>.

Es wird nur der Fall des Überblendens eines Signals durch Fremdlicht untersucht, in dem der Einfluss des Color Washouts quantitativ bewertet wird. Dazu wird mit einer tageslichtähnlichen Fremdlichtquelle ohne Abschattung des Hauptlichtreflexes angelehnt an DIN EN 12368 [DifN06b] die Leuchte bestrahlt. Der Fremdlichteinfluss wird dabei mit einem Dreibereichsfarbmessgerät in einer Entfernung von 2 m gemessen. Diese Messanordnung ist in Bild 2.26 dargestellt.



**Bild 2.26:** Messanordnung zur Bestimmung des Einflusses von Color Washout

Die Beleuchtungsstärke auf der Leuchte soll  $E_{Fr} = 40.000 \text{ lx}$  mit Abweichungen von maximal zehn Prozent und mit einer Farbtemperatur von 5.000 bis 6.500 K betragen. Das Fremdlicht soll von  $10^\circ$  oberhalb des Horizontes auf die Leuchte mit einer Strahldivergenz von maximal  $0,5^\circ$  auftreffen.

Weiterhin fordert Manz, dass der Abstand Fremdlicht zu Leuchte 10 m betragen muss, um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten. In seinen Untersuchungen konnte die geforderte Gleichmäßigkeit der Beleuchtung jedoch erst bei einem Abstand von 20 m erreicht werden. Im Vergleich dazu kommt Kaltenbach [Kal07a] hingegen mit 10 m aus<sup>30</sup>.

Der Abstand zwischen Fremdlicht und Leuchte legt nur indirekt die Ausleuchtung der Leuchte fest. Die Intension von Manz ist mit ziemlicher Sicherheit das Sicherstellen eines möglichst quasi-parallel Strahlenbündels, um direktes Sonnenlicht zu simulieren. Dies kann bei fast beliebigen Abständen erreicht werden, wenn die Optik der Fremdlichtquelle entsprechend konstruiert ist. Daher sollte nicht der Abstand, sondern die Strahldivergenz, der Durchmesser der Ausleuchtung<sup>31</sup>, die Beleuchtungsstärke und deren Gleichmäßigkeit als Festlegung ausreichen.

<sup>29</sup>Es kann darüber diskutiert werden, ob solch ein Signal jedoch implizit erkannt wird. Wenn zum Beispiel auf zweispurigen Straßen ein Fahrzeug das Signal *Bremsen* oder *Abbiegen* zeigt, wird von manchen Fahrern nachfolgender Fahrzeuge eventuell daraus geschlossen, dass es nun schneller überholt werden kann.

<sup>30</sup>Wenn er dabei eine Gleichmäßigkeit mit Abweichungen kleiner zehn Prozent erreicht, ist die von ihm benutzte Optik seiner Fremdlichtquelle deutlich besser an den Anwendungsfall angepasst als die von Manz.

<sup>31</sup>Die Größe und die Form der ausgeleuchteten Fläche muss auch nicht explizit festgelegt werden. Es ist nur sicherzustellen, dass die komplette Leuchte ausgeleuchtet wird.

## 2. Stand der Erkenntnisse

---

Zur Bewertung des Fremdlichteinflusses wird der mit Color Washout gemessene Farbort der Leuchte mit den geforderten Farbortgrenzen der ECE Regelungen verglichen. Dadurch wird nur die farbliche Veränderung des Signalbildes berücksichtigt, nicht die Änderung der Leuchtdichte.

Eine zu bewertende Leuchte wird als unempfindlich gegenüber Fremdlicht eingestuft, wenn der Farbort, gemessen unter den in Tabelle 2.8 angegebenen Bedingungen, die Farbgrenzen nach ECE erfüllt. Liegt der Farbort außerhalb dieser Grenzen, erfüllt die Leuchte bei Bestrahlung mit Fremdlicht nicht die ECE Bedingungen. Die Leuchte wird als empfindlich gegenüber Fremdlicht eingestuft.

Messwert	Leuchte	Fremdlicht
$x,y$	ein	ein

**Tabelle 2.8:** Messungen und Zustände der Lichtquellen für die Messung des Color Washouts

### 2.9.2.3 Beschreibung der Fremdlichtempfindlichkeit durch Definition eines Kontrastes

Als eine Möglichkeit zur Beschreibung der Fremdlichtempfindlichkeit erwähnt Manz in [Man05] die Bestimmung des Kontrastes  $C_{Ph}$  zwischen Nutzlicht  $L$  und Störlicht  $L_{Ph}$ . Entsprechend Formel 2.18 definiert er das Nutzlicht als zu erkennendes Sehdetail und das Störlicht als Umgebung und gibt dazu Formel 2.26 an.

$$C_{Ph} = \frac{L - L_{Ph}}{L_{Ph}} \quad (2.26)$$

Durch diese mathematische Beziehung zwischen den beiden Leuchtdichten ist  $C_{Ph}$  positiv, falls das Nutzlicht größer als das Störlicht ist. Bei gleichen Leuchtdichten beträgt der Kontrast null. In diesem Fall sollte entsprechend den Erkenntnissen bei überlappenden Signalen die Wahrnehmung des Signallichtes noch akzeptabel sein. Die Reaktionszeit wird dabei um 300 Millisekunden verlängert. Die Werte schlechterer Erkennbarkeit liegen bei Benutzung der Formel 2.26 alle im Bereich von 0 bis -1.

In Tabelle 2.9 sind die Zustände der Leuchte und des Fremdlichtes für die nach Manz notwendigen Messungen angegeben, um Formel 2.26 berechnen zu können.

Messwert	Leuchte	Fremdlicht
$L$	ein	aus
$L_{Ph}$	aus	ein

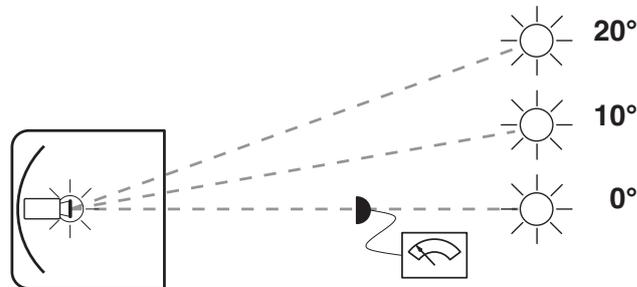
**Tabelle 2.9:** Messungen und Zustände der Lichtquellen für die Berechnung des Kontrastes nach Formel 2.26

### 2.9.3 Überblick über bisherige Untersuchungen hinsichtlich der Fremdlichtempfindlichkeit von Leuchten

#### 2.9.3.1 Untersuchungen von Haar

Für die Untersuchung der Fremdlichtempfindlichkeit bei verschiedenen Sonnenständen variiert Haar [Haa80] den Bestrahlungswinkel der Leuchte im Labor. Dadurch kann der Einfluss von

Fremdlicht auf Leuchten messtechnisch erfasst werden. Es zeigt sich, dass bei Bestrahlungswinkeln von 10 bis 20° oberhalb der Horizontalen<sup>32</sup> bei Leuchten mit farbigen Abschluss­scheiben Phantomlicht in Signalfarbe vorhanden ist. Bei Winkeln im Bereich von 0 bis 10° tritt Reflex-Phantomlicht beziehungsweise Color Washout auf. Diese beiden Winkelbereiche, ausgehend von einer Signalleuchte und deren horizontalen Hauptausstrahlrichtung gemessen, sind in Bild 2.27 dargestellt.



**Bild 2.27:** Messaufbau zur Quantifizierung der Phantomlichteffekte – Auf der linken Seite ist die Signalleuchte, auf der rechten Seite der Empfänger und verschiedene Positionen des Fremddichtes dargestellt. Innerhalb der eingezeichneten Winkelbereiche tritt vornehmlich Reflex-Phantomlicht (unterer Bereich von 0 bis 10°) beziehungsweise Spiegel- und echtes Phantomlicht (oberer Bereich von 10 bis 20°) auf.

### 2.9.3.2 Untersuchungen von Sivak

Schon 1998 untersuchte Sivak [SFKT98] den Einfluss der Farbe von Abschluss­scheiben auf die Sichtbarkeit der Lichtsignale. Bei Untersuchungen mit heller Umgebungsleuchtdichte stellte er fest, dass der Leuchtdichteunterschied zwischen ein- und ausgeschaltetem Signallicht bei gelben Abschluss­scheiben größer ist als bei farblosen. Der Unterschied in der Farbe der Signalleuchte ist bei farblosen Scheiben größer. Einen Einfluss auf die Erkennbarkeit im realen Verkehrsgeschehen konnte er aber nicht nachweisen.

Aufbauend auf diesen Untersuchungen befasste sich Sivak mit dem vorderen Signalbild. Veröffentlicht in [SSF05] untersuchte er Color Washout bei vorderen Fahrtrichtungsanzeigern. Er stellte fest, dass Fahrtrichtungsanzeiger höherer Lichtstärke weniger empfindlich auf Fremdlicht reagieren.

### 2.9.3.3 Feldversuch mit Lichtsignalanlagen

In einem Feldversuch des Landkreises Waldeck-Frankenberg [ZVS07] wurde eine Signalanlage in Hochvolttechnik auf LED-Technik umgerüstet. Es wurde festgestellt, dass durch diese Umrüstung die Problematik von Phantomlicht weitgehend gelöst wurde.

## 2.9.4 Gesetzliche Regelungen zur Vermeidung von Phantomlicht

### 2.9.4.1 ECE Regelungen

Derzeit wird die Phantomlichtproblematik nicht in den ECE Regelungen, weder in ECE Regelung Nummer 6 [ERR07b] noch in ECE Regelung Nummer 7 [ERR], berücksichtigt. Jedoch ist die

<sup>32</sup>Niedrig stehende Sonne

## 2. Stand der Erkenntnisse

---

Problematik bekannt und wird schon seit Jahren in den entsprechenden Gremien behandelt. Einen Überblick über die Diskussionen liefert Manz in [Man05].

Eng in Zusammenhang mit den Fragen bezüglich Phantomlicht steht die Festlegung der leuchtenden Fläche nach [ERR07a]. Für die Anbauvorschriften ist eine exakt festgelegte Fläche für die Messung der Abstände zwischen den einzelnen Lichtfunktionen wichtig. Für die Phantomlichtproblematik benötigt man zur Berechnung der Störanfälligkeit die Leuchtenflächen, welche nicht durch Fremdlicht überblendet werden dürfen. Daher sind die Diskussionen über die leuchtende Fläche wie zum Beispiel in [MKK07] zu verfolgen.

### 2.9.4.2 Vorschriften zur Messung des Phantomlichtes an Lichtsignalanlagen

Seit einiger Zeit werden Lichtsignalanlagen hinsichtlich des Phantomlichteinflusses bewertet. Dabei wird die mittlere Leuchtdichte  $L$  des Signallichtes ohne Phantomlicht und die mittlere Leuchtdichte  $L_{Ph}$  des Phantomlichtes gemessen, die entsteht, wenn die Signalleuchte ausgeschaltet, der Sonnensimulator jedoch eingeschaltet ist. Nach DIN EN 12368:2006, Absatz 8.4, [DIfN06b] ist das Sonnenlicht durch einen Projektor mit Normlichtart A zu simulieren. Dieser Projektor muss eine Beleuchtungsstärke von 40.000 lx auf der Signalleuchte erzeugen. Realistischer wären Projektoren mit der Normlichtart D65 (Tageslicht). Da diese Projektoren jedoch teurer in der Anschaffung sind, werden mit Glühlampen bestückte benutzt, die ein Spektrum ähnlich der Normlichtart A aufweisen. Das Messergebnis sollte bei sonst gleichem Messaufbau keine deutlichen Unterschiede aufweisen.

Der Projektor ist nach nach DIN EN 12368 10° oberhalb der Leuchte so zu montieren, dass seine Hauptausstrahlrichtung in Richtung der Leuchte gerichtet ist. Der Abstand von Projektor zu Leuchte sollte 10 m betragen. Das Leuchtdichtemessgerät ist in der Hauptausstrahlrichtung der Leuchte zu montieren und auf die Leuchte auszurichten.

Bei der Messung des Phantomlichtes von Lichtsignalanlagen ist auf der Abschlusscheibe der Leuchte eine Maske aufzubringen, die das Bild des Projektors ausblendet. Diese Maßnahme verhindert, dass das Reflex-Phantomlicht<sup>33</sup> gemessen wird. Für die Untersuchung von Phantomlichteffekten bei Fahrzeugleuchten ist diese Unterdrückung nicht gewünscht.

In [DIfN01] wird für nach Osten, Süden oder Westen abstrahlende Signallichter empfohlen, das Phantomlicht auf Werte der Klasse 4 nach DIN EN 12368:2006, Absatz 6.6, [DIfN06b] zu begrenzen. Dies bedeutet, dass die Leuchte so gestaltet sein muss, dass eine achtfach<sup>34</sup> größere mittlere Leuchtdichte  $L$  des Signallichtes im Vergleich zu der Leuchtdichte  $L_{Ph}$  des durch die Leuchte erzeugten Phantomlichtes erreicht wird.

Für Leuchten der Klasse 5 wird ein Faktor von mindestens 16 gefordert. Fakt ist, dass die Signallichtstärke deutlich größer als die Phantomlichtstärke sein muss. Eckert [Eck93] fordert daher sogar einen Faktor von 18.

In Formel 2.27 wird der Zusammenhang zwischen der mittleren Signal-Leuchtdichte  $L$  und der Phantomlicht-Leuchtdichte  $L_{Ph}$  gezeigt. Der Faktor  $F_{Ph}$  gibt dabei den Mindestwert der Überhöhung der Signal-Leuchtdichte gegenüber der Phantomlicht-Leuchtdichte an.

$$F_{Ph} = \frac{L}{L_{Ph}} \quad (2.27)$$

---

<sup>33</sup>Das Reflex-Phantomlicht ist nach der Definition in Abschnitt 2.9.1.3 das durch Oberflächenreflexe auf der Abschlusscheibe entstehende Phantomlicht.

<sup>34</sup>Der Faktor acht gilt nur für rote und gelbe Signallichter. Da die relevanten Signallichter am Fahrzeug die gleichen Farben abstrahlen, können die Anforderungen übernommen werden. (Für grüne Lichter wird in der Norm ein Faktor von sechzehn gefordert.)

### 2.9.5 Simulation von Fremdlicht

#### 2.9.5.1 Simulation von Fremdlicht direkter Strahlung

Als fest definierte Fremdlichtbedingung wird ein Fremdlichteinfall in die Leuchte von  $10^\circ$  oberhalb der Waagrechten mit einer Beleuchtungsstärke von 40.000 lx definiert. Es ist die vertikale Beleuchtungsstärke zu messen wobei der Beleuchtungsstärkemesskopf dazu nicht zu der Fremdlichtquelle auszurichten, sondern die Flächennormale seiner Empfängerfläche mit der Hauptausstrahlrichtung der Leuchte in Übereinstimmung zu bringen ist. In der Literatur finden sich bei Nutzung von Sonnensimulatoren Werte der Beleuchtungsstärke  $E$  des auf die Leuchte auffallenden Fremdlichtes von 30.000 lx [Haa80], 40.000 lx [DIfN06b] (DIN EN 12368, Abschnitt 8.4) mit Normlichtart A, 56.000 lx [Hah07b] mit einer Lichtart ähnlich Normlichtart D65 oder 88.500 lx [Kal07a] mit einer Lichtart ähnlich Normlichtart D65.

Entgegen den Vorgaben in der Norm DIN EN 12368 [DIfN06b] ist nicht mit Normlichtart A, sondern mit einer Lichtquelle ähnlich Normlichtart D65 zu arbeiten. Dies entspricht wesentlich mehr dem typischen Fremdlicht, welches bei Bestrahlung durch die Sonne am Tag vorliegt. Dieser Argumentation schließt sich auch Manz [Man05] an.

Kaltenbach [Kal07a] erreichte sogar einen Leuchtfelddurchmesser von 1,05 m bei einer Beleuchtungsstärke von 88.500 lx mit einem Abstand zwischen Fremdlichtquelle und Leuchte von nur 10 m. Seine Fremdlichtquelle kann gedimmt werden, so dass auch die geforderten 40.000 lx einstellbar sind.

#### 2.9.5.2 Simulation von Fremdlicht mit diffuser Bestrahlung

Zusätzlich hat Kaltenbach [Kal07b] eine weitere Fremdlichtsituation realisiert. Die bisher beschriebene Bedingung simuliert durch ein einziges quasiparalleles Strahlenbündel sowohl direktes Sonnenlicht bei einem unbedeckten Himmel als auch die Anstrahlung durch Fahrzeugscheinwerfer. Ein bedeckter Himmel ohne ausgebildete Hauptlichtquelle hingegen beleuchtet eine Leuchte aus vielen Richtungen gleichzeitig. Je nach Optik bildet die Leuchte das Bild des Himmels mit dessen Lichtfarbe und Leuchtdichte ab.

Kaltenbach simuliert diesen bedeckten, diffusen Himmel durch eine Lichtwand mit 10 m Breite und 5 m Höhe. Einzelne Elemente der Wand können unabhängig voneinander angesteuert werden, so dass nicht nur eine homogene Situation, sondern verschiedene Lichtszenarien abgebildet werden können. Er erreicht mit diesem Simulator homogene Leuchtdichten von  $10.000 \text{ cd/m}^2$  bei einer Farbtemperatur von 4.400 K.

### 2.9.6 Bekannte Vorschläge zur Reduzierung der Fremdlichtempfindlichkeit

#### 2.9.6.1 Redundante Signalleuchten

Einen pragmatischen, aber nicht besonders kostengünstigen Umgang mit Phantomlichteffekten schlägt die CIE Publikation 48 [CIE80] vor. Da das Phantomlicht stark von den geometrischen Beziehungen zwischen Fremdlichtquelle, Signalleuchte und Beobachter abhängt, ist es sehr unwahrscheinlich, dass bei gleicher Fremdlicht- und Beobachterposition zwei Signalleuchten mit unterschiedlicher Position gleichzeitig Phantomlichteffekte aufweisen. Daher schlägt die CIE vor, für ein Signal zwei Signalleuchten zu benutzen, die an unterschiedlichen Positionen angebracht sind.

## 2. Stand der Erkenntnisse

---

Bei Lichtsignalanlagen bedeutet das Aufstellen zweier Signalanlagen doppelte Kosten. Bei mehrspurigen Fahrzeugen ist dies verpflichtend, da eine Signalleuchte pro Seite anzubringen ist. Jedoch kann das Signal *Fahrtrichtung ändern* nicht von dieser Umgehung der Phantomlichteffekte profitieren. Zu überlegen ist, ob allgemein zwei Fahrtrichtungsanzeiger pro Fahrzeugseite anzubringen sind, wie dies zum Beispiel schon bei etlichen Kleinbussen (Multivan) praktiziert wird.

### 2.9.6.2 Reduktion von Spiegel-Phantomlicht durch Einsatz farbiger Abschluss­scheiben

Als Lösung für die Reduzierung von Phantomlicht kann unter anderem das Spiegel-Phantomlicht durch den Einsatz farbiger Abschluss­scheiben, wie in [Mar05] beschrieben, minimiert werden. So schlägt Marcori vor, rotorange farbige Abschluss­scheiben einzusetzen. Bei richtiger Wahl dieser kann das von dem Reflektor der Leuchte zurückgespiegelte Licht<sup>35</sup> um 75 Prozent reduziert werden, da von dem weißen Sonnenlicht nur noch der rotorange Anteil in die Lampe dringen und wieder reflektiert werden kann. Nur noch dieser Anteil kann als Phantomsignal wahrgenommen werden.

### 2.9.6.3 Optimierung der Neigung der Abschluss­scheiben zur Reduktion von Reflex-Phantomlicht

Eine deutliche Reduktion des Color Washout beziehungsweise des Reflex-Phantomlichtes kann laut [Haa80] erreicht werden, in dem die Abschluss­scheibe der Leuchte um 14° nach unten geneigt wird. Dadurch können die Oberflächenreflexe in für den Beobachter nicht sichtbare Bereiche gelenkt werden.

Dabei ist es vorteilhaft, die Abschluss­scheibe möglichst glatt auszuführen, um keine Streuungen in ungewünschte Winkelbereiche zu erzeugen und für eine möglichst gute Selbstreinigung der Leuchte zu sorgen, denn eine in diesem Winkel angebrachte Abschluss­scheibe wird schlecht durch Regen sauber gewaschen.

### 2.9.6.4 Reduktion von Spiegel-Phantomlicht durch Gitterstrukturen innerhalb der Leuchte

Für die Reduktion des farbigen Phantomlichtes, dessen Ursprung laut [Haa80] im Spiegel-Phantomlicht begründet ist, wird der Einbau einer Gitterstruktur zwischen Reflektor und Abschluss­scheibe empfohlen.

### 2.9.6.5 Reduktion von echtem Phantomlicht durch horizontale Linienstrukturen auf der Abschluss­scheibe

Zur Reduktion des echten Phantomlichtes sind horizontale Linienstrukturen aus undurchsichtigem Material auf der Abschluss­scheibe aufzubringen. Diese schatten einen Großteil des Fremdlichtes ab, so dass dies innerhalb der Leuchte kein Phantomlicht erzeugen kann.

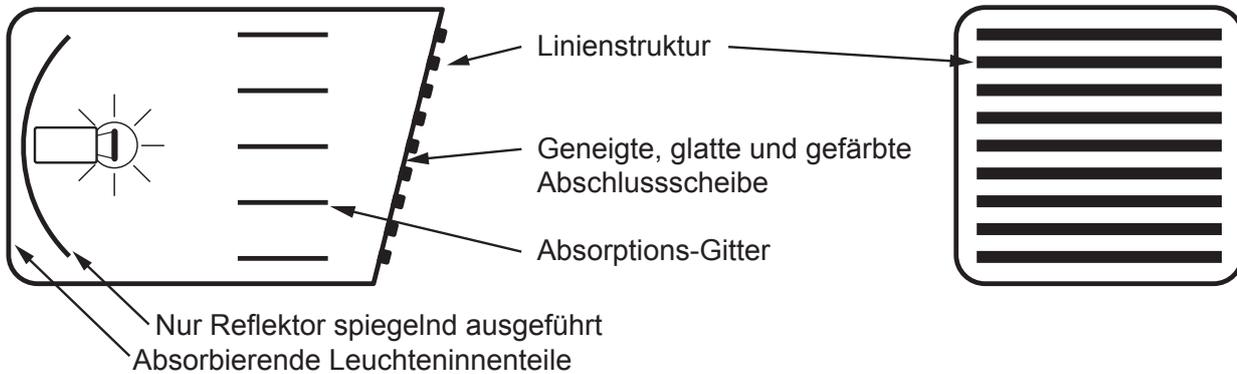
Diese konstruktiven Änderungen zur Unterdrückung von echtem Phantomlicht durch das Hinzufügen absorbierender Materialien an den reflektierenden Bauteilen, die für das Entstehen der jeweiligen Phantomlichtart verantwortlich sind, entsprechen denen von Hahn [HKML07b] für Spiegel-Phantomlicht beschriebenen Massnahmen, durch die er den Fremdlichtanteil um den Faktor sechs reduzieren konnte.

---

<sup>35</sup>Dies ist das Spiegel-Phantomlicht, beschrieben in Abschnitt 2.9.1.2.

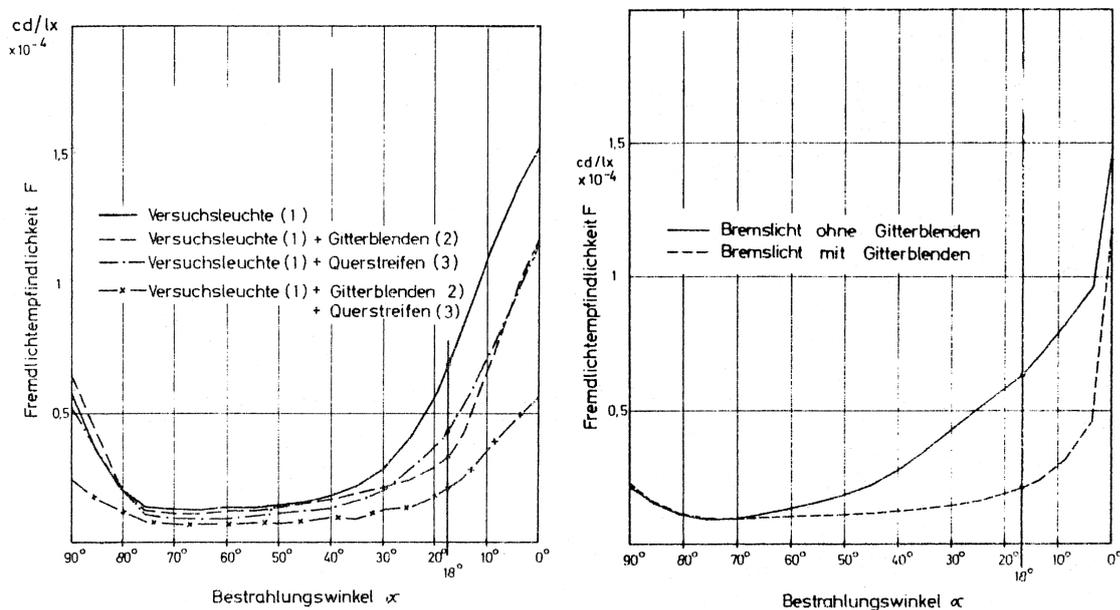
2.9.6.6 Realisierung der konstruktiven Änderungen zur Unterdrückung von Phantomlichteffekten

Ein Schema einer Leuchte mit den genannten Optimierungen hinsichtlich der Unterdrückung von Phantomlichteffekten ist in Bild 2.28 dargestellt.



**Bild 2.28:** Schematischer Aufbau einer Leuchte mit Elementen zur Unterdrückung von Phantomlichteffekten, Seitenansicht (links) und Frontalansicht (rechts)

Durch den Einbau eines Gitters und das Aufbringen einer Linienstruktur kann die Fremdlichtempfindlichkeit auf ein Drittel reduziert werden. Die Verbesserungen sind in Bild 2.29 über den Bestrahlungswinkel aufgetragen.



**Bild 2.29:** Fremdlichtempfindlichkeit einer Versuchslampe mit verschiedenen Optimierungen hinsichtlich Phantomlichteffekten (links) und einer Serienlampe mit Optimierung durch ein Gitter (rechts) (Quelle: [Haa80])

## Kapitel 3

# Ambiente Innenraumbeleuchtung

### 3.1 Übersicht über die ambiente Innenraumbeleuchtung

#### 3.1.1 Definition ambierter Beleuchtung

Die ambiente Beleuchtung ist ein Lichtsystem im Fahrzeuginnenraum, das während der Fahrt betrieben wird. Sie unterstreicht die Gestaltung des Innenraumes bei Nacht, erzeugt ein hochwertiges Ambiente und erleichtert die Orientierung im Innenraum. Dabei kann sie markenspezifische Elemente gezielt hervorheben.

Aus physiologischer Sicht kann die ambiente Beleuchtung bei entsprechend gewählter Auslegung die Readaptationszeit bei Blickwechseln zwischen Fahrbahn und Fahrzeuginnenraum verkürzen und das Kontrastsehvermögen des Fahrers für das Erkennen dunkler Objekte im Verkehrsraum verbessern.

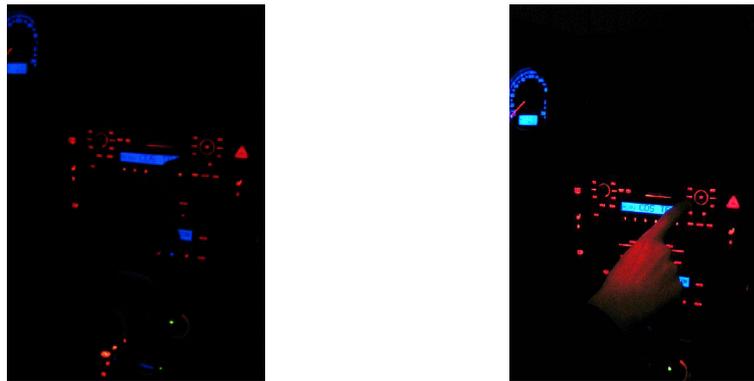
#### 3.1.2 Steigende Marktdurchdringung ambierter Beleuchtung

In zunehmendem Maße werden Fahrzeuge am Markt angeboten, die mit einer Innenraumbeleuchtung ausgestattet sind, welche während der gesamten Fahrt eingeschaltet bleibt. Verbreitet ist diese Beleuchtung schon seit Jahren zum Beispiel bei der Mercedes S-Klasse, der BMW 7er-Serie und dem Maybach. Spätestens seit dem Jahr 2006 ist diese Art der Beleuchtung auch in Fahrzeugen der Mittelklasse ab Werk erhältlich. So verfügt zum Beispiel der neue Mini über beleuchtete, farblich einstellbare Zierelemente. Der Citroen Picasso wird sogar mit einer komplexen ambienten Beleuchtung, bestehend aus 32 Lichtquellen, angeboten.

### 3.2 Motivation für den Einsatz ambierter Beleuchtung

#### 3.2.1 Verbesserung der Orientierung im Fahrzeuginnenraum

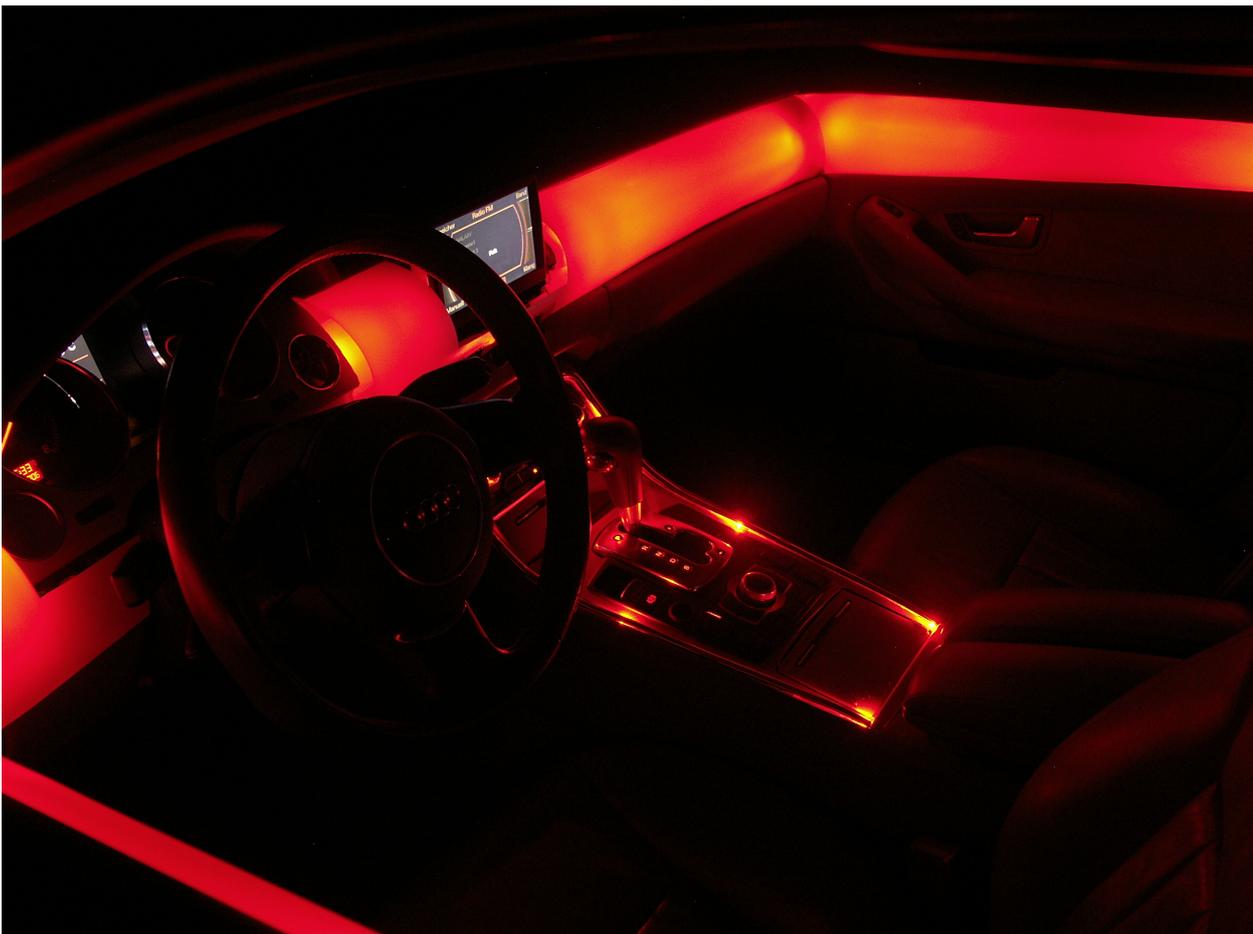
Die ambiente Innenraumbeleuchtung kann die Orientierung im Fahrzeug verbessern. Dies ist beispielhaft in Bild 3.1 zu sehen. Das Auflicht des ambienten Lichtes beleuchtet die Hand des Bedieners. Dies erleichtert die Bedienung der Taster, da nicht nur die Bedienelemente, sondern auch die bedienende Hand sichtbar ist.



**Bild 3.1:** Bedienelemente der Mittelkonsole ohne (links) und mit (rechts) ambierter Beleuchtung

#### 3.2.2 Unterstützung des Interior-Designs bei Dunkelheit

Die ambiete Beleuchtung bietet jedoch nicht nur funktional ein Orientierungslicht, sondern sie unterstreicht bei Dunkelheit in großem Maße das Interior-Design. Dies ist beispielhaft in Bild 3.2 zu sehen. Sie bietet viele Varianten bei der Individualisierung des Fahrzeugs.



**Bild 3.2:** Ambiente Beleuchtung unterstreicht bei Dunkelheit das Interior-Design

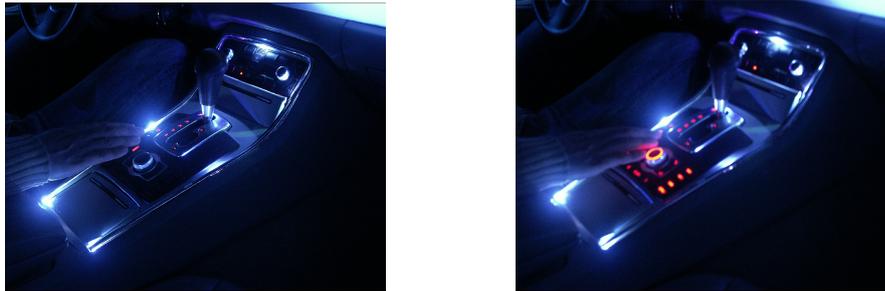
Dabei muss sie nicht in einem statischen Zustand verharren, sondern kann dynamisch auf die Fahrzeugumgebung (zum Beispiel helle Stadt, dunkle Ortschaft, Landstraße, ...) und Fahrsitua-

### 3. Ambiente Innenraumbelichtung

---

tionen (zum Beispiel kurzes Aufleuchten der ambienten Beleuchtung statt eines Warntons als Hinweis für zu beachtende Meldungen des Fahrzeug-Diagnosesystems) eingehen.

Auch kann sie den Fahrer gezielt bei der Bedienung unterstützen. So wurde im Rahmen dieser Arbeit eine ambiente Funktionsbeleuchtung für die Bedienelemente der Mittelkonsole entwickelt, die nur eingeschaltet wird, falls sich die bedienende Hand der Mittelkonsole nähert. Die Veränderung der Mittelkonsole ist in Bild 3.3 dargestellt. Im Normalzustand sind einige wenige charakteristische Elemente zur Orientierung beleuchtet. Diese ständig leuchtenden Elemente führen zu den Bedienelementen hin. Nähert sich die Hand, werden auch die weiteren Elemente beleuchtet.



**Bild 3.3:** Bedienelemente der Mittelkonsole im Normalzustand (links) und bei nahender Hand (rechts) zur Anzeige aller Elemente

### 3.3 Betrachtung möglicher Einflüsse ambienter Beleuchtung auf die Fahraufgabe

Gegenüber allen Vorteilen, die eine ambiente Beleuchtung bietet, sind auch deren mögliche negative Aspekte zu betrachten. So erhöht die ambiente Beleuchtung das Lichtniveau im Fahrzeug und somit das Lichtniveau im Sehfeld des Fahrers. Dadurch adaptieren dessen Augen auf eine höhere Umfeldleuchtdichte. Daher wird von manchen Fachleuten vorgebracht, dass aufgrund der geänderten Adaptation sehr dunkle Objekte außerhalb des Fahrzeugs, die ohne ambiente Beleuchtung noch wahrnehmbar wären, nicht mehr wahrgenommen werden.

Um diesen eventuell existierenden negativen Einfluss der Beleuchtung auf den Fahrer zu untersuchen, wurden im Rahmen dieser Arbeit diverse Untersuchungen durchgeführt. Unterschiedliche Fahrzeuge wurden mit ambienten Beleuchtungen ausgerüstet und im Labor mit Probanden getestet. Diese mussten bei verschiedenen hellen Innenraumbelichtungen dunkle Objekte im Nahfeld des Fahrzeugs erkennen. Dabei sind die Leuchtdichten der Objekte so gewählt worden, dass sie denen dunkler Objekte im durch die Scheinwerfer beleuchteten Verkehrsraum entsprechen.

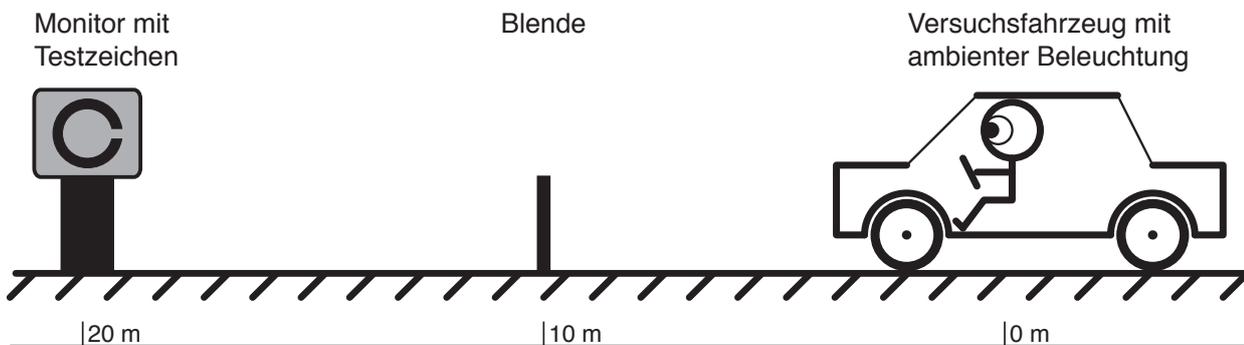
### 3.4 Untersuchungen ambienter Beleuchtungen

#### 3.4.1 Versuchsaufbau

Zur Untersuchung des Einflusses ambienter Beleuchtung auf die Wahrnehmbarkeit dunkler Objekte im Verkehrsraum werden statische Experimente im Lichtkanal durchgeführt. Im Gegensatz zu realitätsnäheren dynamischen Untersuchungen mit Versuchsfahrten sind die Störgrößen im Labor deutlich geringer. Somit sind auch geringe Einflüsse besser erkennbar, da die Streuung der Messergebnisse, bedingt durch Störgrößen, durch den Laboraufbau minimiert werden.

### 3. Ambiente Innenraumbeleuchtung

Der Versuchsaufbau wird so gewählt, dass die Fahrt auf einer dunklen Landstraße simuliert wird. Die einzige Beleuchtung des Umfeldes erfolgt durch die Fahrzeugscheinwerfer. Es wird angenommen, dass die Himmelsleuchtdichte deutlich niedriger<sup>1</sup> als die Leuchtdichte der beleuchteten Fahrbahn ist. Bei dieser Situation sollte ein möglicher negativer Einfluss der ambienten Beleuchtung auf das Erkennen dunkler Objekte am Deutlichsten hervortreten.



**Bild 3.4:** Versuchsaufbau zur Untersuchung des Kontrastsehvermögens bei ambienter Beleuchtung (Zeichnung nicht maßstabsgetreu)

Die nähere Umgebung des Fahrzeugs, das Vorfeld, wird bei den Untersuchungen durch die Abblendscheinwerfer des untersuchten Fahrzeuges oder durch entsprechend angebrachte Zusatzscheinwerfer so ausgeleuchtet, dass die Leuchtdichte auf der Straße ca.  $2 \text{ cd/m}^2$  beträgt. Dadurch wird die Situation nächtlichen Straßenverkehrs simuliert.

In 20 m Entfernung in Blickrichtung der Versuchsperson befindet sich in ca. 1,1 m Höhe über der Fahrbahn ein Monitor, auf dem die Testzeichen dargestellt werden. Das vom Fahrzeugscheinwerfer abgestrahlte und von Boden und Wänden reflektierte Licht wird durch Blenden so weit minimiert, dass das auf dem Monitor auftreffende Streulicht nur noch eine Leuchtdichte kleiner  $20 \text{ mcd/m}^2$  aufweist.

Auf dem Monitor wird ein Testzeichen angezeigt, mit dem der Einfluss der ambienten Beleuchtung auf das Erkennen dunkler Objekte gemessen wird. Als Parameter für das Erfassen des Einflusses wird das Kontrastsehvermögen bei unterschiedlichen ambienten Beleuchtungen gewählt.

Als Testzeichen wird bei den meisten durchgeführten Versuchen ein schwarzer Landoltring mit variabler Öffnungsrichtung gewählt, der als dunkles Sehobjekt auf einem etwas helleren Hintergrund dargestellt wird (Positivkontrast, siehe Abschnitt 2.6.2.5). Dies simuliert ein schlecht beleuchtetes Hindernis auf der durch die Fahrzeugscheinwerfer beleuchteten Straße.

Als Vergleichstest wird bei einer Untersuchungsreihe sowohl mit negativem als auch positivem Kontrast des Sehobjekts gearbeitet, wobei der Versuchsaufbau und die untersuchte ambiente Beleuchtung gleich belassen werden. So kann der Einfluss der Kontrastart auf die Erkennbarkeit bei ansonsten gleichen Versuchsbedingungen bestimmt werden.

Die Lücke des Landoltrings erscheint aus 20 Meter Entfernung unter einem Sehwinkel von vier Winkelminuten. Die Höhe des Sehzeichens über der Fahrbahn entspricht in etwa der Augenhöhe des Fahrers. Die Versuchsperson blickt bei den Untersuchungen geradeaus.

<sup>1</sup>Eine sehr niedrige Himmelsleuchtdichte liegt unter anderem bei Neumond fernab von größeren Ansiedlungen vor.

### 3. Ambiente Innenraumbelichtung

---

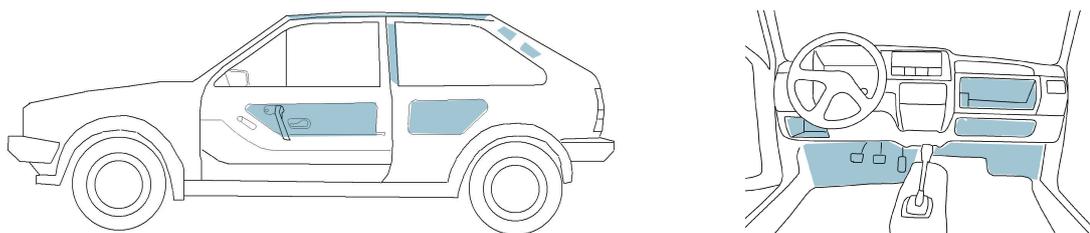
#### 3.4.2 Versuchsablauf

Bei jedem Versuch wird die jeweilige Versuchsperson zuerst mit dem Versuchsaufbau vertraut gemacht. Nachdem sie auf dem Fahrersitz des jeweiligen Versuchsfahrzeuges Platz genommen hat, wird sowohl die Beleuchtung des Versuchslabors als auch die Innenraumbelichtung des Versuchsfahrzeugs ausgeschaltet. Nur die die Straße beleuchtenden Scheinwerfer sind eingeschaltet. In dieser Umfeldsituation wird zehn Minuten gewartet, so dass die Augen der Versuchsperson fast vollständig adaptieren.

Der Versuch startet mit dem Test der Referenzsituation, bei der keine ambiente Lichtfunktion eingeschaltet ist. Darauf folgen weitere Tests mit den zu untersuchenden Kombinationen ambienter Beleuchtung. Die Versuchsdauer beträgt pro Versuchsperson weniger als eine Stunde, damit keine Ermüdungserscheinungen die Ergebnisse verfälschen. Dadurch können jedoch nicht alle zu untersuchenden Kombinationen fortlaufend dargestellt werden, so dass mehrere Versuche pro Versuchsperson erfolgen.

Bei jedem Test wird der Versuchsperson ein schwarzer Bildschirm ( $3 \text{ cd/m}^2$ ) gezeigt auf dem sich ein schwarzes Sehzeichen befindet. Der Kontrast des Sehzeichens zum Bildschirmhintergrund wird nun so lange erhöht, bis die Versuchsperson dem Versuchsleiter die korrekte Öffnungsrichtung des Landoltringes angeben kann. Pro Test, also für jede Kombination ambienter Beleuchtung, werden der Versuchsperson auf diese Weise mehrmals Sehzeichen gezeigt. Das Kontrastsehvermögen für die jeweilige Kombination wird aus den Mittelwerten der ermittelten Kontraste berechnet.

Bei den verschiedenen Tests werden ambiente Beleuchtungen untersucht, die in Farbe, Form, Positionierung und Helligkeit unterschiedlich sind. Dies ist in Bild 3.5 exemplarisch schematisch gezeigt. Für die Vergleichbarkeit diverser ambienter Beleuchtungssituationen untereinander soll eine einzige Maßzahl eine Aussage über die jeweilige Beleuchtung treffen. Da eine ambiente Beleuchtung von fast allen Richtungen Licht in Richtung des Fahrers abstrahlen kann und der Fahrer im Straßenverkehr in fast alle Bereiche blickt<sup>2</sup>, wird als Maßzahl die sphärische Beleuchtungsstärke in Augenposition gemessen. Aus praktischen Gründen wird hierzu ein photopisch gewichtetes Messgerät benutzt.



**Bild 3.5:** Positionen und Flächen ambienter Beleuchtung

#### 3.4.3 Einordnung der Versuchsbedingungen gegenüber anderen Beleuchtungssituationen

Die sphärische Beleuchtungsstärke ist eine geeignete Maßzahl, um verschiedenste Situationen ambienter Beleuchtung untereinander in ihrer Wirkung auf den Fahrer vergleichen zu können. Jedoch ist diese Zahl nur ein gutes Maß dafür, wie stark der Fahrer potentiell durch die Beleuchtung

---

<sup>2</sup>So blickt der Fahrer zum Beispiel bei Überhol- und Einschervorgängen auf die B-Säule, bei rückwärtigen Einparkvorgängen auf die C-Säulen und den hinteren Fahrzeuginnenbereich.

gestört werden kann. Sie gibt nicht direkt Auskunft über die bauliche Art der Beleuchtung, sondern gibt nur indirekt über die summierte Helligkeit an einem speziellen Ort den Einfluss der ambienten Beleuchtung an.

Die Leuchtdichte hingegen stellt eine direkte Maßzahl der baulichen Art der ambienten Innenraumbeleuchtung dar. Sie gibt direkt an, wie hell die leuchtenden Flächen sind. Einen direkten Zusammenhang zu der möglichen Störung des Fahrers durch diese Beleuchtung gibt sie jedoch nicht, da dazu Größe, Position und Ausrichtung der Fläche in Bezug auf den Fahrer noch anzugeben wären.

Beide Maßzahlen haben so ihre Berechtigung bei der Beschreibung der Wirkung oder der Ausführung der ambienten Beleuchtung. Da in diesem Kapitel die Wirkung ambients Beleuchtung auf den Fahrer untersucht wird, sind alle Innenraumhelligkeiten als sphärische Beleuchtungsstärken angegeben.

Für die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf weitere ambiente Beleuchtungen ist die zusätzliche Angabe der Leuchtdichte wünschenswert. Jedoch kann nicht direkt zwischen den Zahlen der sphärischen Beleuchtungsstärke und der Leuchtdichte umgerechnet werden, solange die Eigenschaften der leuchtenden Flächen unterschiedlich sind. Diese sind jedoch je nach Beleuchtungssituation verschieden und unterscheiden sich deutlich bei unterschiedlichen Fahrzeugen. Für eine exakte Umrechnung der Zahlen müssten Größe, Position, Ausrichtung, Spektrum, die Leuchtdichte- und die Lichtstärkeverteilungsfunktion der leuchtenden Flächen vorliegen. Dazu müsste ein kompletter 3D-Datensatz der Innenraumgeometrie inklusive aller Reflexionseigenschaften der Materialien mit den entsprechenden LVKs aller selbst leuchtenden Flächen zur Verfügung stehen.

Da dies nicht praktikabel ist, sollte zumindest eine annähernd korrekte Umrechnung möglich sein. Exemplarisch wird in Tabelle 3.1 der Zusammenhang zwischen sphärischer Beleuchtungsstärke und Leuchtdichte aufgezeigt. In diesen Beispielen wird die sphärische Beleuchtungsstärke wie weiter oben erwähnt ermittelt. Die angegebene Leuchtdichte stellt die maximale Leuchtdichte von großflächigen, möglichst homogen leuchtenden Flächen der ambienten Beleuchtung dar, die nach Analyse der jeweiligen Situation als die dominierenden Flächen erkannt wurden.

Farbe	Innenraumhelligkeit	Leuchtdichte	Verhältnis [mlx:cd/m <sup>2</sup> ]
S kaltweiß 1	0,48 lx	107 cd/m <sup>2</sup>	4,5
S warmweiß 1	0,47 lx	109 cd/m <sup>2</sup>	4,4
S kaltweiß 2	0,94 lx	232 cd/m <sup>2</sup>	4,0
S warmweiß 2	0,94 lx	236 cd/m <sup>2</sup>	4,0
A warmweiß 1	0,042 lx	16 cd/m <sup>2</sup>	2,6
A kaltweiß 1	0,042 lx	20 cd/m <sup>2</sup>	2,1
A warmweiß 2	0,047 lx	48 cd/m <sup>2</sup>	1,0
A kaltweiß 2	0,047 lx	60 cd/m <sup>2</sup>	0,8

**Tabelle 3.1:** Exemplarischer Zusammenhang zwischen der Innenraumhelligkeit, angegeben als sphärische Beleuchtungsstärke, und der maximalen Leuchtdichte der die ambiente Beleuchtung dominierenden Fläche

Ein allgemein übertragbarer Faktor zur Umrechnung von sphärischer Beleuchtungsstärke in Leuchtdichte wird hiermit zwar nicht geliefert, jedoch kann die Größenordnung des Umrechnungsfaktors mit diesen Beispielen abgeschätzt werden. Wenn als Verhältnis der Quotient der sphärischen Beleuchtungsstärke  $B$ , angegeben in mlx, durch die Leuchtdichte  $L$ , angegeben in cd/m<sup>2</sup>, gewählt wird, so zeigt sich, dass dieser ca. im Bereich von 1 bis 5 liegt.

### 3. Ambiente Innenraumbeleuchtung

---

Zur Umrechnung von sphärischer Beleuchtungsstärke zu Leuchtdichte kann näherungsweise Formel 3.1 benutzt werden.

$$L_{[cd/m^2]} = \frac{B_{[mlx]} \text{ cd/m}^2}{5 \text{ mlx}} \quad (3.1)$$

## 3.5 Untersuchungsergebnisse

### 3.5.1 Übersicht über die Ergebnisse der Einzelversuche

In Tabelle 3.2 werden die Parameter und Ergebnisse der durchgeführten statischen Versuche mit ambierter Beleuchtung angegeben.

Die angegebene Umfeldhelligkeit ist die auf der Straßenoberfläche vor dem Fahrzeug gemessene Leuchtdichte.

Mit Farbe wird die vorherrschende Farbe der ambienten Beleuchtung angegeben. Die exakten Farbkoordinaten und Spektren sind den jeweiligen Einzelarbeiten zu entnehmen.

Die Innenraumhelligkeit entspricht der durch Instrumentenbeleuchtung und ambiente Beleuchtung hervorgerufenen sphärischen Beleuchtungsstärke am Ort des Fahrerauges. Da bei einigen Arbeiten etliche Szenarien untersucht wurden, ist bei diesen ein Helligkeitsbereich angegeben. Dabei entspricht der dunkelste Wert der Referenzsituation, bei der die ambiente Beleuchtung ausgeschaltet ist. Das von der Straße in den Innenraum eindringende Streulicht addiert sich mit dem Licht der Instrumentenbeleuchtung zu der angegebenen Innenraumhelligkeit.

Als Ergebnis ist das Verhältnis des mittleren minimal notwendigen Kontrastes ohne ambiente Beleuchtung zu dem mit ambierter Beleuchtung.

Umfeldhelligkeit	Farbe	Innenraumhelligkeit	Ergebnis
0,3 ... 3 cd/m <sup>2</sup>	rot, grün, blau, weiß <sup>A</sup>	0,002 ... 1,3 lx	0,45 : 0,32
0,3 ... 3 cd/m <sup>2</sup>	rot, grün, blau, weiß <sup>B</sup>	0,002 ... 1,3 lx	0,54 : 0,60
2 cd/m <sup>2</sup>	rot, blau, warmweiß, kaltweiß	0,004 ... 0,94 lx	0,59 : 0,55
2 cd/m <sup>2</sup>	kaltweiß, 1 Situation	0,015 lx	0,59 : 0,61
2 cd/m <sup>2</sup>	türkisblau, negativer Kontrast	1,6 lx	0,43 : 0,40
2 cd/m <sup>2</sup>	türkisblau, positiver Kontrast	1,6 lx	0,46 : 0,43
0,5 ... 3 cd/m <sup>2</sup>	weiß	1 lx	0,32 : 0,28

A: Ergebnisse der mittleren Versuchspersonengruppe im Alter von 30 bis 39 Jahre.

B: Ergebnisse der älteren Versuchspersonengruppe im Alter von 40 bis 71 Jahre.

**Tabelle 3.2:** Parameter der vorgestellten Versuche über ambiente Innenraumbeleuchtung

Über das in Formel 3.1 angegebene Verhältnis können die Angaben der Innenraumhelligkeiten von Tabelle 3.2 in Leuchtdichten übertragen werden. Der Bereich der untersuchten Leuchtdichten erstreckt sich demnach von 1 bis 320 cd/m<sup>2</sup>.

### 3.5.2 Gegenüberstellung der Ergebnisse bei positivem und negativem Kontrast

Die Art des untersuchten Kontrastes, positiv oder negativ, hat einen Einfluss auf die absolute Schwelle des Kontrastsehvermögens. Bei positiver Kontrastart muss der Kontrast bei sonst gleichen Umgebungsbedingungen größer sein, um das Sehzeichen sicher erkennen zu können.

Die Aussage der Untersuchung beziehungsweise die relative Kontrastschwelle bleibt jedoch gleich. Mit eingeschalteter ambienter Beleuchtung wird das Sehobjekt schon bei geringeren Kontrasten erkannt. Die Zusammenfassung der beiden Untersuchungen mit unterschiedlicher Kontrastart aber sonst gleichen Umgebungsbedingungen ist in Tabelle 3.3 zu sehen. Unabhängig von der Untersuchungsmethode mit positivem oder negativem Kontrast ist gezeigt worden, dass durch die ambiente Beleuchtung das Kontrastsehvermögen verbessert wird.

Situation	Positiver Kontrast	Negativer Kontrast
Ohne ambiente Beleuchtung	0,46	0,43
Mit ambienter Beleuchtung	0,43	0,40

**Tabelle 3.3:** Ergebnisse bei positivem und negativem Kontrast, angegeben als mittlere Kontrastschwelle

## 3.6 Diskussion der Ergebnisse zur ambienten Innenraumbeleuchtung

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass die ambiente Beleuchtung das Potential hat, das Kontrastsehvermögen signifikant zu beeinflussen.

In vielen untersuchten Szenarien verbessert die ambiente Beleuchtung signifikant das Kontrastsehvermögen. Bei jüngeren Personen verbessert sich das Kontrastsehvermögen bei ausgewählten ambienten Beleuchtungen. Im Besonderen hat sich gezeigt, dass bei roter Beleuchtung der Schwellenkontrast erniedrigt wird. Bei älteren Personen verschlechtert sich das Kontrastsehvermögen bei ausgewählten ambienten Beleuchtungen. Dies hängt vermutlich von dem vermehrten Streulicht im Auge ab, denn besonders bei Beleuchtung mit blauem Licht, das stärker als alle anderen Farben gebrochen wird, erhöht sich der notwendige Kontrast. Bei jüngeren Personen verschlechtert sich das Kontrastsehvermögen nicht gegenüber der Referenzsituation. Sie empfinden eine blaue Beleuchtung interessant aber nicht komfortabel.

Hinsichtlich der Helligkeit ergab sich bei den Untersuchungen, dass, bei gleicher Position und Farbe der ambienten Beleuchtung, eine Variation allein der sphärischen Beleuchtungsstärke am Auge im Bereich von 0,002 bis 1,3 lx zu keiner signifikanten Veränderung des Kontrastsehvermögens führt. Dies gilt für alle untersuchten Altersklassen, wobei zu beachten ist, dass die angegebenen Werte photopisch und nicht mesopisch gemessen wurden.

Eine weitere Erhöhung der Helligkeit im Fahrzeuginnenraum deutlich über 1,3 lx ist, zumindest für die untersuchte Umfeldsituation einer dunklen Landstraße, nicht sinnvoll, da alle Versuchsteilnehmer die untersuchte Obergrenze schon als zu hell empfanden und bei eigener Wahl der Innenraumhelligkeit diese nicht so hell eingestellt hätten. Dies legt nahe, dass die Helligkeit ambienter Beleuchtung durch den Fahrer einstellbar sein sollte, um eine hohe Akzeptanz zu gewährleisten.

Ein Unterschied zwischen den verschiedenen Farben ambienter Beleuchtung besteht nicht nur bei objektiver Messung der Sehleistung, sondern auch bei der subjektiven Bewertung durch die Versuchsperson. So zeigt sich, dass allgemein warmweiße ambiente Beleuchtung angenehmer als kaltweiße empfunden wird. Auch rote Beleuchtung wird blauer vorgezogen.

Mit den Ergebnissen seiner Fahrversuche über die Sichtbarkeit in dem nicht durch die Scheinwerfer ausgeleuchteten Verkehrsraum zieht Löbig [Löb00] den Schluss, dass, bei den von ihm untersuchten Helligkeiten im Innenraum von weniger als 0,1 cd/m<sup>2</sup>, keine Gefährdung des Straßenverkehrs gegeben ist.

### **3. Ambiente Innenraumbeleuchtung**

---

Anhand der hier vorgestellten eigenen Laborversuche über die Sichtbarkeit in dem durch die Scheinwerfer ausgeleuchtetem Verkehrsraum ist gezeigt worden, dass auch in diesem Bereich bei sinnvoll eingestellter ambienter Beleuchtung keine Gefährdung des Straßenverkehrs gegeben ist.



# Kapitel 4

# Überlappung und Ineinanderbau von Leuchten

Die Überlappung beschreibt das gleichzeitige Wahrnehmen zweier Lichtsignale auf der selben Fläche. So überlappen bei nach Abschnitt 2.4.2.1 ineinander gebauten Leuchten die unterschiedlichen Signalflächen teilweise oder vollständig. Auch bei verschiedenen Phantomlichteffekten entstehen überlappende Signalflächen, in dem das eigentliche Nutzsignal von dem Phantomlicht überlagert wird. Durch Überlappung kann die Erkennbarkeit und Zuordenbarkeit der einzelnen Signale erschwert werden. Dies wird anhand psychophysikalischer Untersuchungen qualitativ erforscht, in dem als Merkmale der Beeinträchtigung die Veränderungen der Reaktionszeit und der Fehlerrate herangezogen werden.

In Abschnitt 4.1 wird auf bestehende Untersuchungen zurückgegriffen, die Reaktionszeiten für das hintere Signalbild ermittelten. Durch eigene theoretische Überlegungen werden Ergebnisse bezüglich Überlappung aus diesen Untersuchungen gewonnen. Darauf aufbauend werden eigene experimentelle Versuche durchgeführt, die nicht nur die Reaktionszeit, sondern auch die Fehler-rate untersuchen. Diese Versuche werden in Abschnitt 4.2 und den folgenden vorgestellt.

## 4.1 Anwendung der Untersuchungen von Mortimer auf die Überlappung

### 4.1.1 Diskussion der Ergebnisse von Mortimer

In Abschnitt 2.8.1 sind die Ergebnisse von Mortimer vorgestellt worden. Diese Ergebnisse werden nun hinsichtlich überlappender Signale diskutiert. Es werden die Reaktionen der Versuchspersonen in allen vier Fällen der zeitlichen Abfolge studiert:

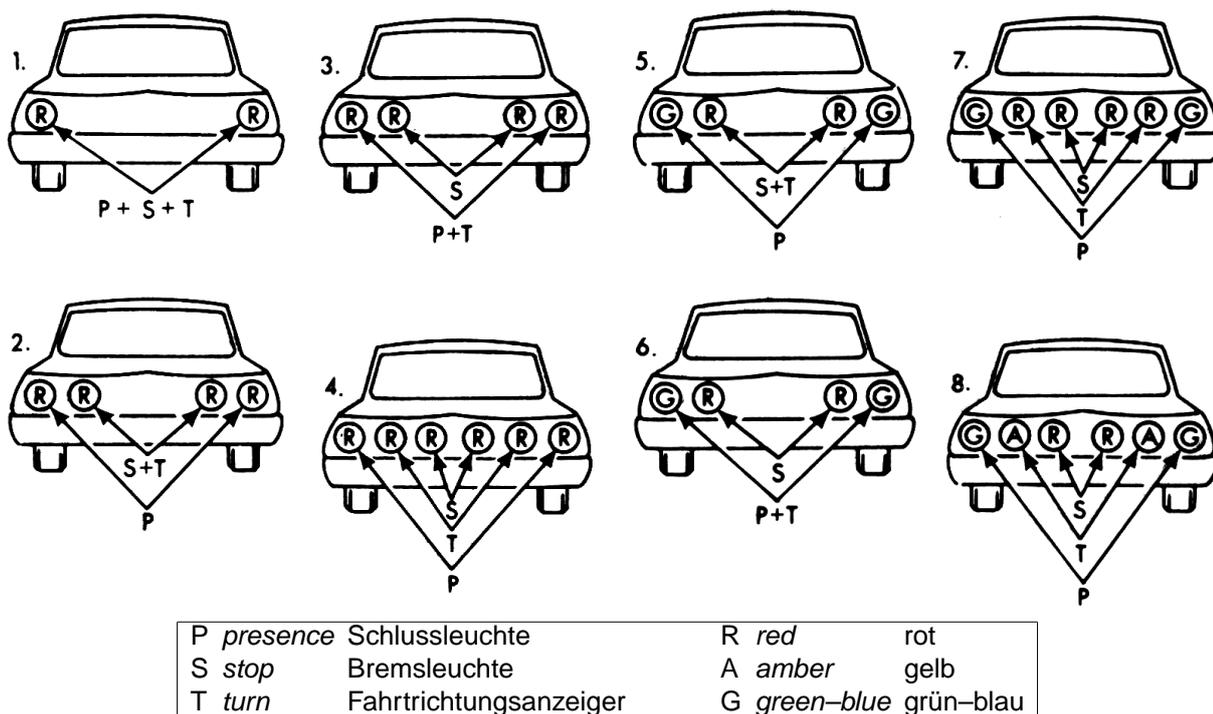
T *Turn* Das Schlusslicht leuchtet, der Fahrtrichtungsanzeiger kommt hinzu.

S *Stop* Das Schlusslicht leuchtet, die Bremsleuchte kommt hinzu.

T-S *Turn-Stop* Schlusslicht und Fahrtrichtungsanzeiger leuchten, die Bremsleuchte kommt hinzu.

S-T *Stop-Turn* Schluss- und Bremslicht leuchten, der Fahrtrichtungsanzeiger kommt hinzu.

#### 4. Überlappung und Ineinanderbau von Leuchten



**Bild 4.1:** Kombinationen von Rückleuchten (Quelle: [Mor70])

Als Signalbilder werden die Kombinationen mit zwei Leuchten pro Fahrzeugseite betrachtet, das heißt die Kombinationen 2, 3, 5 und 6 der in Bild 4.1 dargestellten Signalbilder.

Bei den Kombinationen 2 und 5 überlappen Bremsleuchte und Fahrtrichtungsanzeiger vollständig, wohingegen sie bei den Kombinationen 3 und 6 nicht miteinander überlappen. (Dafür überlappt der Fahrtrichtungsanzeiger jedoch mit der Schlussleuchte.) Die Kombinationen mit drei getrennten Leuchten werden nicht diskutiert, da die Kodierung mit drei Farben vorgenommen wird. Diese Farbzahl steht bei den derzeitigen gesetzlichen Rahmenbedingungen nicht zur Verfügung.

2 — 5 Diese beiden Signalbilder benutzen für das Bremslicht und den Fahrtrichtungsanzeiger eine ineinandergebaute Leuchte mit roter Abschlussleuchte. Es liegt vollständige Überlappung vor. Der Unterschied zwischen den beiden Kombinationen stellt die Farbe der Schlussleuchte dar. Für das Aufleuchten der Schlussleuchte wurde in diesem Versuch keine Reaktionszeit ermittelt. Daher kann auch kein signifikanter Unterschied zwischen diesen beiden Kombinationen festgestellt werden.

3 — 6 Diese Signalbilder besitzen die gleiche Bremsleuchte, aber Fahrtrichtungsanzeiger mit unterschiedlicher Farbe. Bremsleuchte und Fahrtrichtungsanzeiger überlappen nicht.

T Kombination 3 ist besser als 6. Dies liegt sicherlich daran, dass die amerikanischen Probanden auf einen roten Fahrtrichtungsanzeiger schneller reagieren, als auf einen grün-blauen, da sie es so gewohnt sind.

T-S Kombination 6 ist besser, da ein Licht schon leuchtet und nun eine neue Farbe hinzukommt.

S-T Auch hier ist Kombination 6 besser, da ein rotes Licht schon leuchtet und nun eine neue Farbe hinzukommt.

Daraus kann geschlossen werden, dass unterschiedliche Farbgebung für Bremsleuchte und Fahrtrichtungsanzeiger zu einer Verkürzung der Reaktionszeit beiträgt.

## 4. Überlappung und Ineinanderbau von Leuchten

2,5 — 3 Bei den Kombinationen 2 und 5 liegt Überlappung vor. Bei 3 sind Bremsleuchte und Fahrtrichtungsanzeiger räumlich getrennt, besitzen aber die gleiche Farbe.

T Die Kombinationen 2 und 5 sind besser, da bei 3 der Fahrtrichtungsanzeiger mit der Schlussleuchte überlappt.

T-S Kombination 3 ist besser, da keine Überlappung vorliegt.

S-T Auch hier ist 3 besser, da keine Überlappung vorliegt.

Aus diesen Ergebnissen kann geschlossen werden, dass sich die Reaktionszeiten bei Überlappung verschlechtern, wenn keine unterschiedliche Farbkodierung der überlappenden Signale vorliegt.

2,5 — 6 Wiederum liegt bei den Kombinationen 2 und 5 Überlappung des Fahrtrichtungsanzeigers mit dem Bremslicht vor. Bei Kombination 6 sind beide Signale voneinander getrennt und besitzen eine unterschiedliche Farbkodierung.

T Die Kombinationen 2 und 5 sind besser, da bei 6 der Fahrtrichtungsanzeiger mit der Schlussleuchte überlappt und der Fahrtrichtungsanzeiger nicht rot kodiert ist, wie es die Testpersonen gewohnt waren.

T-S Kombination 6 ist besser, da keine Überlappung vorliegt.

S-T Auch hier ist 6 besser, da keine Überlappung vorliegt.

Daraus kann geschlossen werden, dass sich die Reaktionszeiten bei Überlappung verschlechtern, wenn im überlappenden Fall keine unterschiedliche Farbkodierung der Signale vorliegt.

### 4.1.2 Folgerung bezüglich Überlappung

Aus den Untersuchungen von Mortimer wird geschlossen, dass die vollständige Überlappung von Signalen, die mit gleicher Farbe kodiert sind, eine signifikante Verlängerung der Reaktionszeit zur Folge hat. Diese Verlängerung beträgt ca. eine halbe Sekunde (Kombinationen 2,5 — 3 und 2,5 — 6).

Die Ergebnisse zeigen aber auch, dass eine unterschiedliche Farbgebung zwischen Bremslicht und Fahrtrichtungsanzeiger die Reaktionszeit signifikant verkürzt. Die Verkürzung beträgt ca. eine halbe Sekunde (Kombination 3 — 6).

Beide Arten der Anordnung sind in Bild 4.2 inklusive der Änderung der Reaktionszeit gegenüber einer Vergleichskombination gezeigt.



**Bild 4.2:** Änderungen der Reaktionszeit in Abhängigkeit der Signalkodierung

Diese beiden Beeinflussungen der Reaktionszeit könnten sich bei einer Überlappung von Signalen unterschiedlicher Farbkodierung aufheben. Dann würde sich die Überlappung zweier Lichtsignale unterschiedlicher Farbe nicht signifikant auf die Reaktionszeit auswirken.

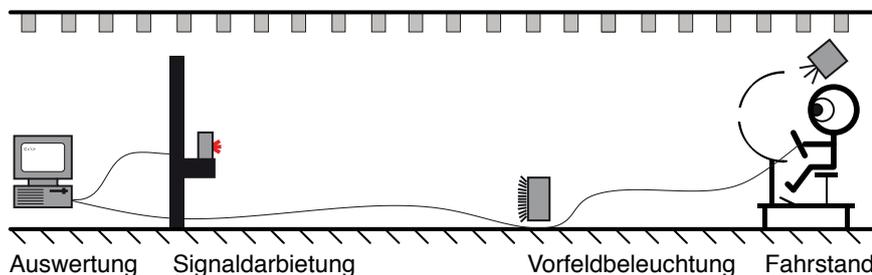
Dieser Zusammenhang wird in der vorliegenden Arbeit untersucht. Die eigenen Experimente, die in den folgenden Abschnitten vorgestellt werden, zeigen, dass sich die beiden Effekte nicht vollständig aufheben, sondern dass durch eine farbliche Kodierung bei vollständig überlappenden Signalen (gleicher Helligkeit) die Verlängerung der Reaktionszeit von 0,5 Sekunden auf 0,3 Sekunden verkürzt wird.

### 4.2 Beschreibung der eigenen experimentellen Untersuchungen

Ziel dieser experimentellen Untersuchungen ist es, zu ermitteln, in wie weit eine Mischung verschiedenfarbiger Signale beziehungsweise die vollständige Überlappung der Flächen von zwei Signallichtern im Vergleich zu einer konventionellen Anordnung mit klar getrennten leuchtenden Flächen zu einer signifikanten Verlängerung der Reaktionszeit und einer Erhöhung der Fehlerrate bei der Zuordnung der wahrgenommenen Signale zu den ausgesandten Signalen führt. Es werden dabei die Signale von Schlussleuchten, Bremsleuchten und Fahrtrichtungsanzeigern untersucht.

#### 4.2.1 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau im Labor, dargestellt in Bild 4.3, bildet einen Fahrzeugumriß nach, an dem zwei Rückleuchten angebracht sind. Er besteht weiterhin aus einem Fahrstand, in dem die Versuchsperson auf dem Fahrersitz Platz nimmt. Das direkte Umfeld in diesem Fahrstand wird ebenso durch Scheinwerfer erhellt, wie die Vorfeldbeleuchtung die unmittelbare Umgebung des Fahrzeugumrisses ausleuchtet. Ein Messcomputer und eine speziell entwickelte Steuerung dienen zum Betrieb des Versuchstandes, der Leuchten und der Protokollierung der Messwerte.



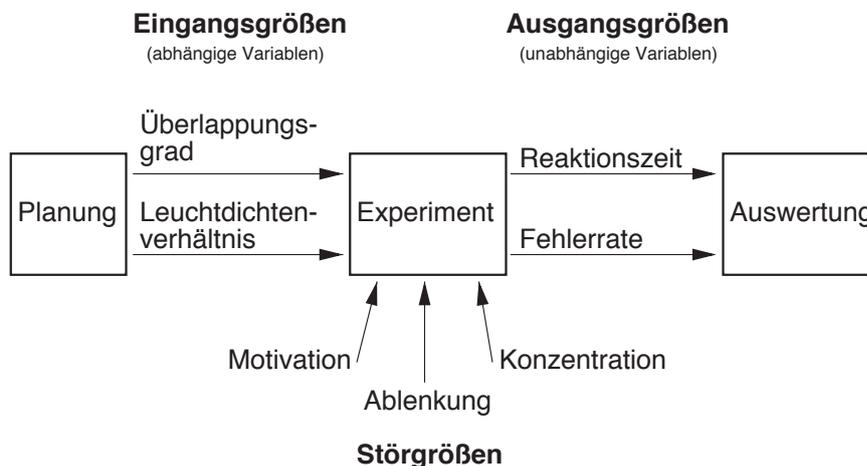
**Bild 4.3:** Versuchsanordnung für psychophysikalische Untersuchungen der Überlappung

Die Untersuchungen liegen mit einer Beobachterentfernung von 25 m in Relation zu verkehrsüblichen Beobachtungsdistanzen im Nahbereich. Die Planung der Experimente orientiert sich daher an der Leuchtdichte, anstatt an der in den gesetzlichen Regelungen und Richtlinien [ER04] festgelegten Lichtstärke. Dieses Vorgehen geht konform mit anderen aktuellen Untersuchungen über das rückwärtige Signalbild von Kraftfahrzeugen [Arm01, Rip01a].

Die Untersuchungen behandeln den Tagfall, da Signalleuchten in der Nacht wesentlich besser erkannt werden. Es ist davon auszugehen, dass im Tagesfall ermittelte Wahrnehmbarkeiten im Nachtfall nicht schlechter werden. So wird in anderen Untersuchungen [CLL01] festgestellt, dass die Reaktionszeiten bei Nacht kürzer, als bei Tag sind. Dies ist unter anderem aufgrund des günstigeren Verhältnisses von Umgebungsleuchtdichte zu der Leuchtdichte der Signalleuchte zu erwarten. Die Tragweite einer Schlussleuchte ist laut [Eck93] bei Nacht zehnmal weiter, als bei Tag. Durch eine genügend hohe Umfeldleuchtdichte wird gewährleistet, dass die Augen der Versuchsperson im photopischen Bereich, Tagfall, adaptiert sind. Daher wird eine Umfeldleuchtdichte in der Nähe der Versuchsperson mit  $200 \text{ cd/m}^2$  gewählt.

## 4. Überlappung und Ineinanderbau von Leuchten

Die Durchführung der Experimente im Labor gewährleistet, dass bei jeder Testperson gleichbleibende Bedingungen vorliegen und mögliche Störgrößen minimiert werden. Dennoch muss die Versuchsumgebung weitgehend realitätsnah gestaltet sein, um die realen Bedingungen im Straßenverkehr wiederzugeben. Somit kann der Schwerpunkt des Experimentes auf die Eingangs- und Ausgangsgrößen nach Bild 4.4 gelegt werden.



**Bild 4.4:** Psychophysikalisches Experiment

Die abhängigen Variablen Umfeldleuchtdichte, Abstand der Versuchsperson zu den Leuchten, Blendlichtquellen, Umgebungstemperatur, Publikumsverkehr und Lärm werden durch die Wahl des Versuchsortes weitgehend konstant gehalten. Die Konzentration und Motivation der jeweiligen Versuchsperson geht jedoch in das Experiment als Störgröße ein. Dieser Einfluss auf die Messwerte wird kontrolliert, indem jede Versuchsperson das gleiche Experiment zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten absolviert. Die einzigen unabhängigen Variablen in den Versuchen sind die Reaktionszeit und die Fehlerrate, deren Abhängigkeit von dem Überlappungsgrad und dem Leuchtdichteverhältnis untersucht wird.

Die unabhängige Variable Reaktionszeit ist eine psychophysikalische Größe. Um die Abhängigkeit der Reaktionszeit vom Überlappungsgrad und dem Leuchtdichteverhältnis zu bestimmen, müssen daher psychophysikalische Experimente durchgeführt werden. Bei diesen Experimenten wird das Verhalten einer einzelnen Person auf externe Reize getestet. Die Messwerte, die dabei ermittelt werden, sind subjektiv. Um allgemeine Aussagen aus diesen Werten ableiten zu können, werden die Versuche mit einer repräsentativen Personengruppe durchgeführt.

Auch die Fehlerrate ist eine psychophysikalische Größe. Sie gibt an, wie häufig die Versuchsperson falsch auf das Aufleuchten der verschiedenen Signale reagiert hat. Sowohl die Reaktionszeit als auch die Fehlerrate können in den gleichen Experimenten bestimmt werden.

Als Fehlerrate  $f$  wird der Quotient aus der Anzahl  $i_F$  der absolut aufgetretenen Fehler und der Anzahl  $i_G$  aller Darbietungen der Situation, der Summe aus der Anzahl  $i_R$  der richtig absolvierten Reaktionen und der Anzahl  $i_F$  der aufgetretenen Fehler, bezeichnet. Die Berechnung der Fehler-rate ist in Formel 4.1 angegeben.

$$f = \frac{i_F}{i_G} = \frac{i_F}{i_R + i_F} \quad (4.1)$$

### 4.2.2 Genauere Betrachtungen der verwendeten Leuchteneinheiten

Als Lichtquellen der Signallichter werden einfarbige Hochleistungs-Leuchtdioden mit den Farben rot und gelb benutzt, die direkt aneinander gebaut sind. Durch die Baugröße der LED-Gehäuse inklusive der integrierten Optik beträgt die Entfernung zwischen zwei verschiedenfarbigen Lichtpunkten 7,5 mm. In der gewählten Beobachterentfernung von 25 m können diese beiden Lichtquellen von normalsichtigen Beobachtern (Sehschärfe  $s = 1$ ) nicht mehr einzeln detektiert werden. Die beiden Lichtsignale überlappen daher vollständig.

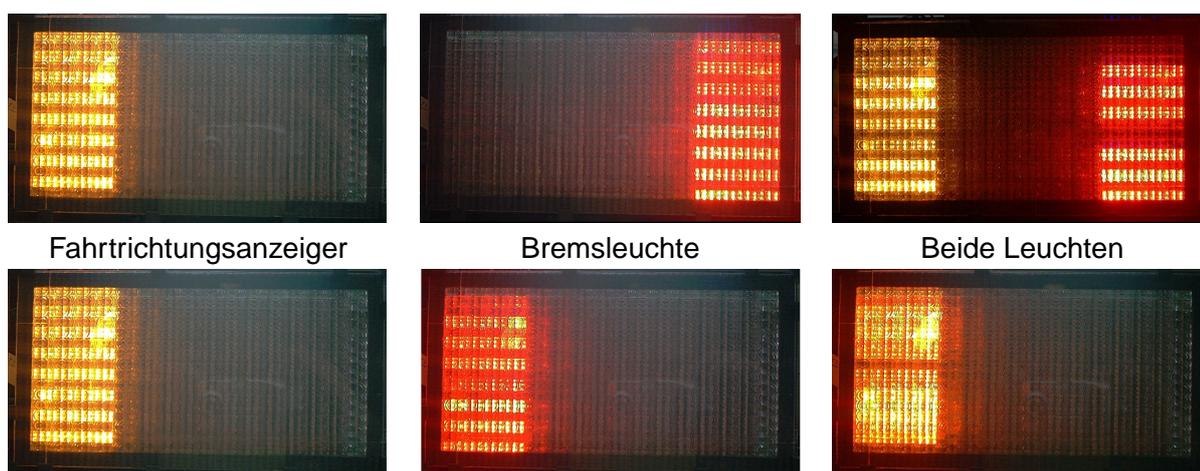
Für eine vollständige Signalleuchte werden 32 gleichfarbige Leuchtdioden zusammengeschaltet. Dies ergibt eine Fläche von 60 auf 120 mm pro Signalmuster. Die verwendete Leuchte besteht aus insgesamt 256 Leuchtdioden, die einzeln in ihrer Leuchtdichte über eine Computersteuerung verändert werden können [GP01]. So können verschiedenste Signalmuster simuliert werden. Die Ansprechzeit der Leuchte ist kleiner 80 ms.

Die Leuchtdichten der einzelnen Signalmuster, im Folgenden „Signalleuchten“ genannt, sind in der Tabelle 4.1 aufgelistet.

Leuchte	Leuchtdichte [ $\text{cd/m}^2$ ]
Schlussleuchte	1.400
Fahrtrichtungsanzeiger	4.000 bis 13.000
Bremsleuchte	13.000 bis 43.000

**Tabelle 4.1:** Leuchtdichten der einzelnen Signalmuster

In den dargestellten Fotos in Bild 4.5 ist in jeder Reihe eine Bremsleuchte, ein Fahrtrichtungsanzeiger und beide Signale gleichzeitig zu sehen. Die einzelnen Signalleuchten sind in der oberen Reihe örtlich getrennt angeordnet und überlappen daher nicht bei gleichzeitigem Betrieb. In der unteren Bildreihe hingegen überlappen die beiden Leuchten bei gleichzeitigem Betrieb vollständig, da sie nicht örtlich getrennt sind.



**Bild 4.5:** In der oberen Zeile ist eine nicht überlappende, in der unteren Zeile eine überlappende Anordnung von Fahrtrichtungsanzeiger und Bremsleuchte gezeigt.

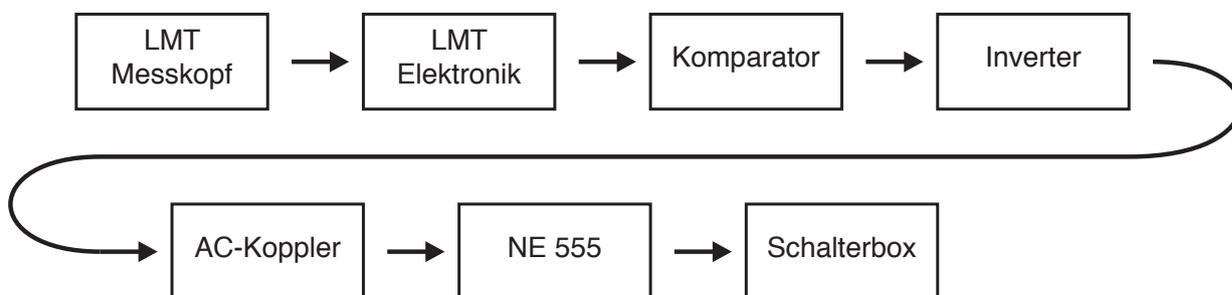
Zum Vergleich der untersuchten Lichtmuster mit einer konventionellen Anordnung der Signalfunktionen wird eine weitere Leuchte in die Untersuchungen mit einbezogen. Da die Ansprechzeiten von LEDs wesentlich geringer sind, als die von Glühlampen mit typischen Werten von ca. 180 ms im Gegensatz zu weniger als 1 ms für LEDs, müssen für alle Untersuchungen gleichartige Lichtquellen benutzt werden. Daher ist für die Vergleichsleuchte ein Modell gewählt, das nur mit LEDs

#### 4. Überlappung und Ineinanderbau von Leuchten

bestückt ist. Schlussleuchte, Bremsleuchte und Fahrtrichtungsanzeiger überlappen bei diesem Modell nicht.

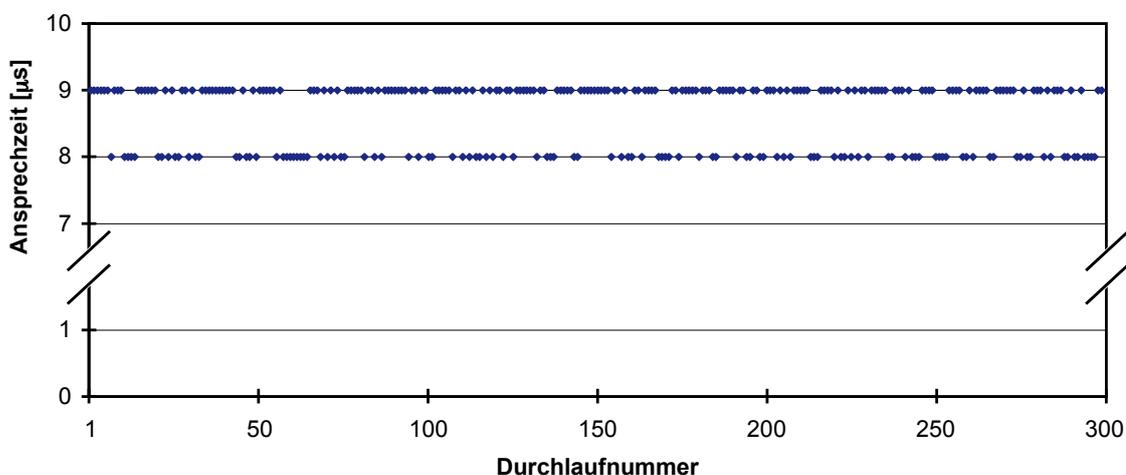
Die Ansprechzeiten der beiden verwendeten Leuchten unterscheiden sich deutlich. Daher wird der Unterschied der Ansprechzeiten durch Laborexperimente mit Versuchspersonen ermittelt. Der Mittelwert aus über 400 Messwerten beträgt 78,6 ms. Um diesen Wert reagiert die LED-Matrix Leuchte langsamer, als die konventionelle Leuchte. Die so ermittelte Ansprechzeit ist indirekt über Versuchspersonen ermittelt und gibt nur relativ den Unterschied der Ansprechzeiten zwischen beiden Leuchten an. Daher wird ein Messaufbau erstellt, mit dem beide Ansprechzeiten absolut und direkt gemessen werden können.

Bei diesem Aufbau wird parallel zum Lichtschalter des Fahrstandes ein Lichtsensor mit Elektronik angeschlossen. Wenn das Schlusslicht aufleuchtet, schließt der Sensor den Lichtschalter kurz, der im normalen Experiment von der Versuchsperson betätigt wird. Die Software wartet für diese Messreihe nicht darauf, dass der Schalter wieder freigegeben wird, sondern schaltet die Leuchte auch bei betätigtem Schalter wieder aus. Der Mittelwert und die Streuung der gemessenen Werte wird direkt im Programm ermittelt. Die Signalkette ist in Bild 4.6 dargestellt.



**Bild 4.6:** Messaufbau zur Ermittlung der Ansprechzeiten der verwendeten Leuchten

Für die konventionelle Leuchte wird eine Ansprechzeit von 9  $\mu\text{s}$  ermittelt (Bild 4.7). Da diese Leuchte keine Elektronik beinhaltet, die eine Verzögerung verursachen könnte, ist davon auszugehen, dass die gemessene Zeit die Ansprechzeit des Lichtmesskopfes mit integrierter Elektronik ist. Die Ansprechzeit von Leuchtdioden beträgt laut Olson [Ols96] nur 60 ns. Ein Messwert von 0  $\mu\text{s}$  wurde daher für diese Versuchsdurchführung erwartet. Demnach ist der Wert von 9  $\mu\text{s}$  bei der Auswertung zu berücksichtigen.



**Bild 4.7:** Ansprechzeit der konventionellen Leuchte

## 4. Überlappung und Ineinanderbau von Leuchten

Die Ansprechzeit der LED-Matrix Leuchte beträgt 80 ms, jedoch schwanken die Messwerte um 8 ms. Zu sehen in Bild 4.8. Diese Ungenauigkeit stört die Aussagen der Experimente jedoch nicht, da die Streuung bei den Reaktionszeiten der Versuchspersonen wesentlich größer sind.

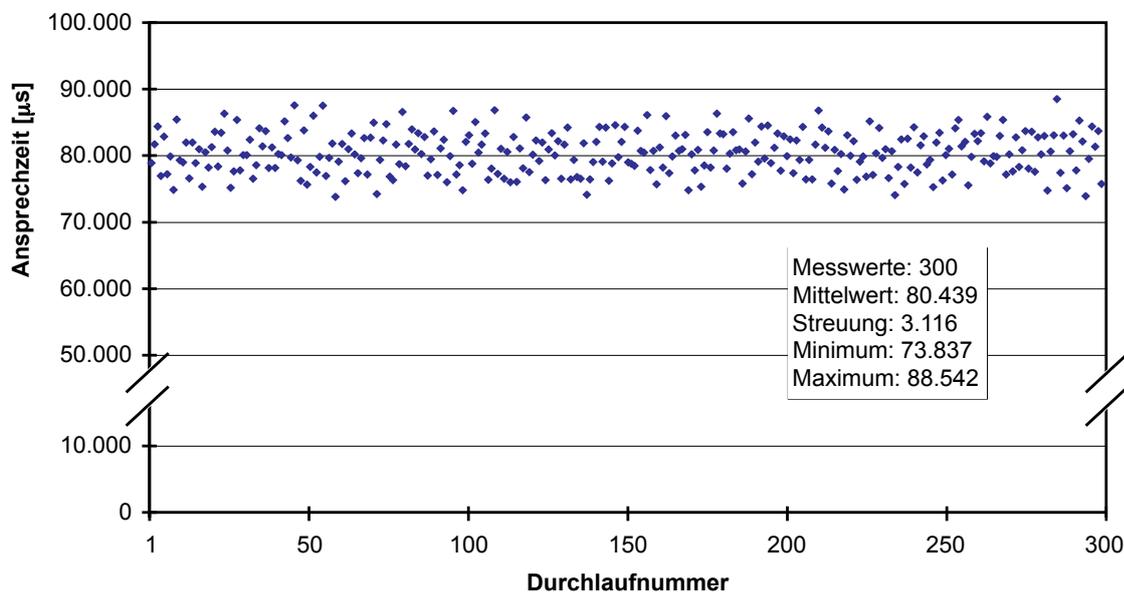


Bild 4.8: Ansprechzeiten der LED-Matrix Leuchte

### 4.2.3 Spezielle Ansteuerelektronik des Versuchsaufbaus mit integriertem Messgerät

Zur Reduzierung weiterer Messunsicherheiten wird eine Ansteuerelektronik entwickelt, die von einer speziell dafür erstellten Software von einem PC aus die jeweilige Signalfunktion der Leuchte einschalten und gleichzeitig einen quarzbasierten Zähler startet. Bei Betätigung eines Schalters durch die Versuchsperson wird der Zähler gestoppt. Der Zählerstand wird darauf an den PC übermittelt. So erfolgt die Messung der Reaktionszeit in Echtzeit und weitere Messtoleranzen werden vermieden. Eine schematische Skizze der Ansteuerelektronik ist in Bild 4.9 dargestellt.

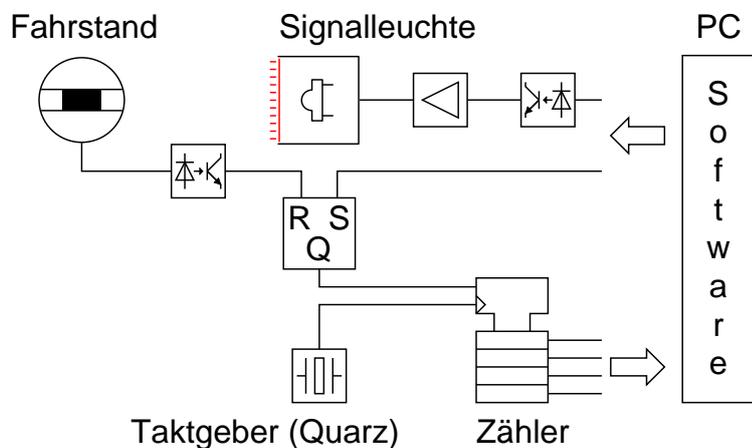


Bild 4.9: Schema der Ansteuerelektronik mit Zeiterfassung

## 4. Überlappung und Ineinanderbau von Leuchten

---

### 4.2.4 Versuchsablauf

Zur Untersuchung der Überlappung wird eine Signalleuchte eingeschaltet. Während das Signal dargeboten wird, wird eine zweite Signalleuchte hinzugeschaltet. Die Reaktion der Versuchsperson auf das Aufleuchten der zweiten Signalfunktion wird gemessen. Dabei muss die Versuchsperson unterscheiden, welcher Art das zweite Lichtsignal ist (Bremsleuchte, Fahrtrichtungsanzeiger, Schlussleuchte) und den entsprechenden Schalter, der dieser Signalfunktion zugeordnet ist, betätigen. Mit dieser Versuchsanordnung wird nicht nur die Reaktionszeit, sondern die Summe aus Reaktionszeit und Entscheidungszeit gemessen.

Die dargebotenen Signalleuchten können unterteilt werden in Fahrtrichtungsanzeiger, ein gelbes Signal unterschiedlicher Helligkeit, Schlussleuchte, ein rotes Signal, das dunkler als das gelbe Signal ist, und Bremsleuchte, ein rotes Signal, das heller als das gelbe Signal ist.

Bei den Untersuchungen wird wie folgt variiert:

- Die Reihenfolge der Darbietung
- Das Leuchtdichteverhältnis der beiden Leuchten zueinander
- Der Grad der flächenmäßigen Überlappung der beiden Leuchten

Es werden drei verschiedene Signale untersucht:

- Der Fahrtrichtungsanzeiger, eine gelb blinkende Leuchte
- Die Schlussleuchte, eine dunkle rote Leuchte
- Die Bremsleuchte, eine helle rote Leuchte

Die Blinkfrequenz des Fahrtrichtungsanzeigers befindet sich mit 1 Hz im gesetzlich festgelegten Rahmen. Alle Signalfarben der jeweiligen Leuchten liegen innerhalb der ECE Farbgrößen des jeweiligen Signals.

In einem Experiment werden vier verschiedene Fälle der Überlappung untersucht. Es werden Experimente mit vollständiger Überlappung und Leuchtdichteverhältnissen von 1:1 bis 1:9 durchgeführt. Jedes Experiment wird von etlichen Versuchspersonen absolviert. Insgesamt nehmen über 40 Personen im Alter von 20 bis 62 Jahren an den Versuchen teil. Dabei dauert eine Versuchsdurchführung, das heißt ein von einer Versuchsperson einmal absolviertes Experiment, ca. 30 Minuten.

#### 4.2.4.1 Protokoll einer Versuchsdurchführung

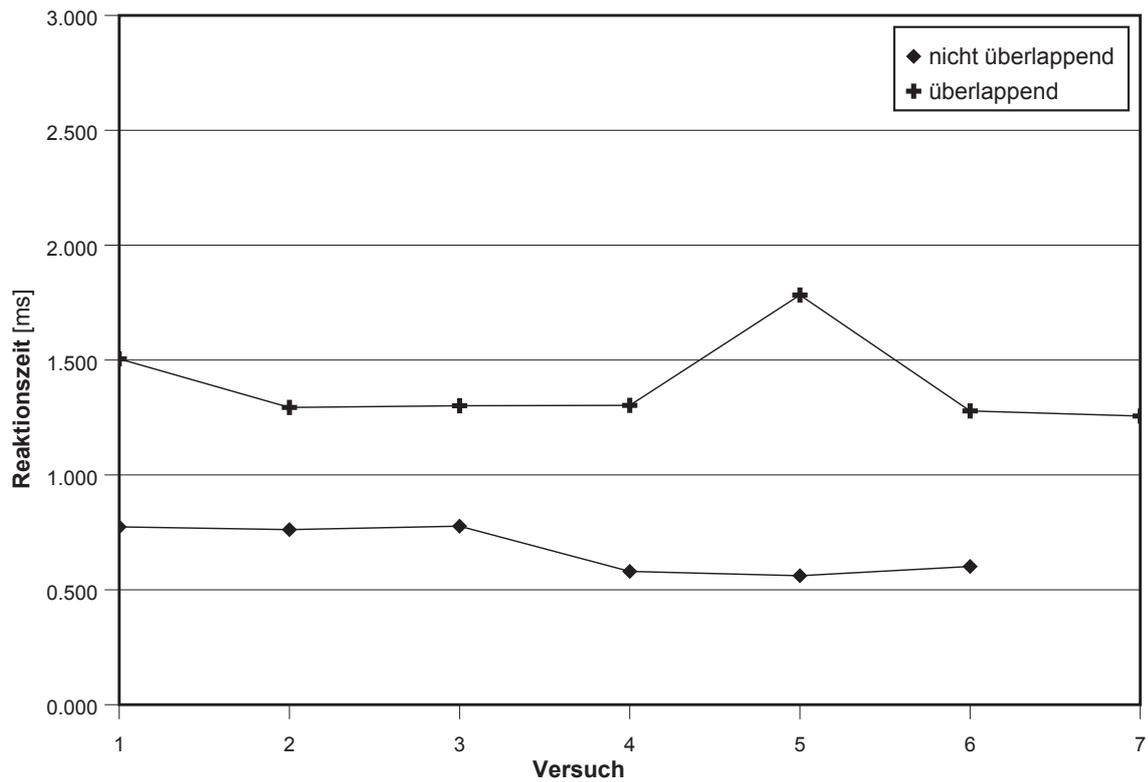
Für jede Versuchsdurchführung wird eine Protokolldatei angelegt. Diese Datei wird nach Versuchsende ausgewertet, indem die einzelnen Messwerte automatisch sortiert und klassifiziert werden. So entstehen Messwertgruppen für jeden Fall der Überlappung, die in jeweils einem Schaubild visualisiert werden. Als Beispiel sind in Bild 4.10 und 4.11 zwei Schaubilder abgebildet.

In Bild 4.10 ist eindeutig ein Unterschied der Reaktionszeiten im überlappenden und nicht überlappenden Betrieb der Leuchten festzustellen. Die ermittelte mittlere Differenz der Reaktionszeiten beträgt 713 ms mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit kleiner ein Promille.

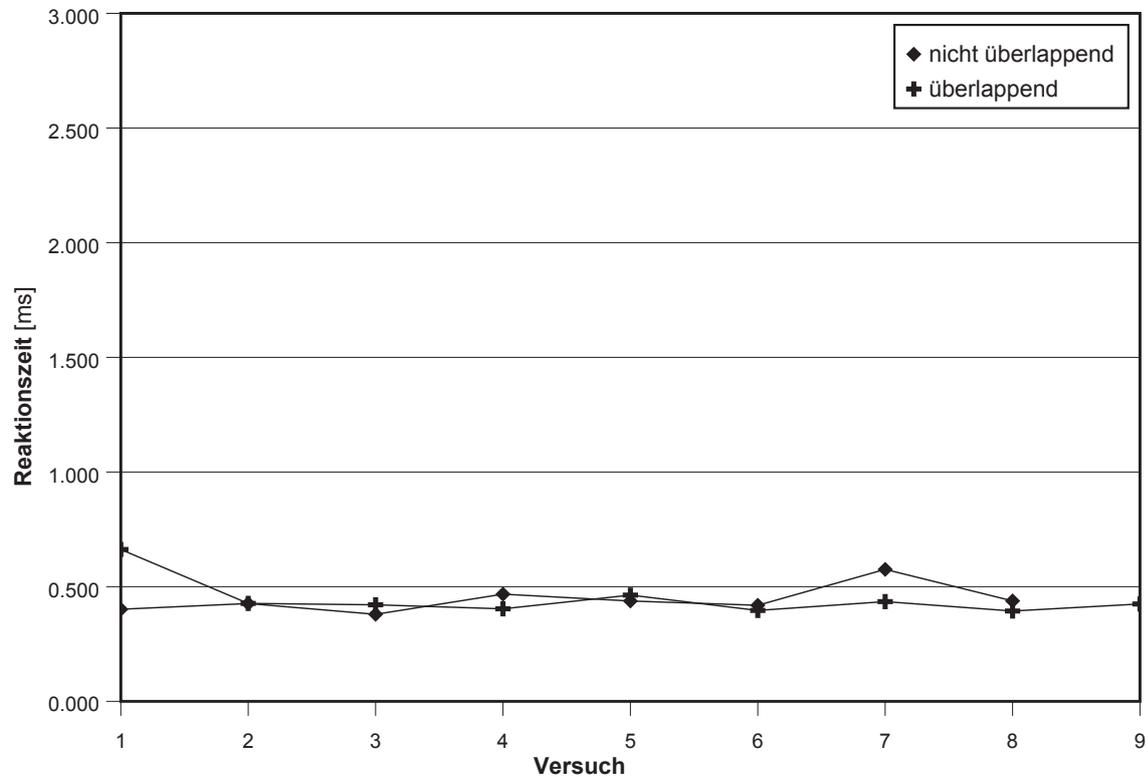
In Bild 4.11 ist kein eindeutiger Unterschied der Reaktionszeiten festzustellen. Bei diesem Beispiel beträgt die ermittelte mittlere Differenz der Reaktionszeiten 4 ms mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit größer 90 Prozent. Dies bedeutet: Mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit kleiner 10 Prozent existiert kein Unterschied der Reaktionszeiten von überlappendem und nicht überlappendem Betrieb.

Für jede Messwertgruppe werden die Mittelwerte für den überlappenden und den nicht überlappenden Teil ermittelt. Die Differenz der Mittelwerte wird gebildet. Daraufhin wird mit Hilfe des t-Testes die Irrtumswahrscheinlichkeit errechnet, die angibt, ob der Unterschied signifikant ist. Bei jeder Versuchsdurchführung wird ein Wertepaar von Reaktionszeitunterschied und Signifikanz erzeugt.

#### 4. Überlappung und Ineinanderbau von Leuchten



**Bild 4.10:** Reaktionszeiten einer Versuchsperson auf das Aufleuchten einer dunklen Leuchte während eine helle Leuchte blinkt

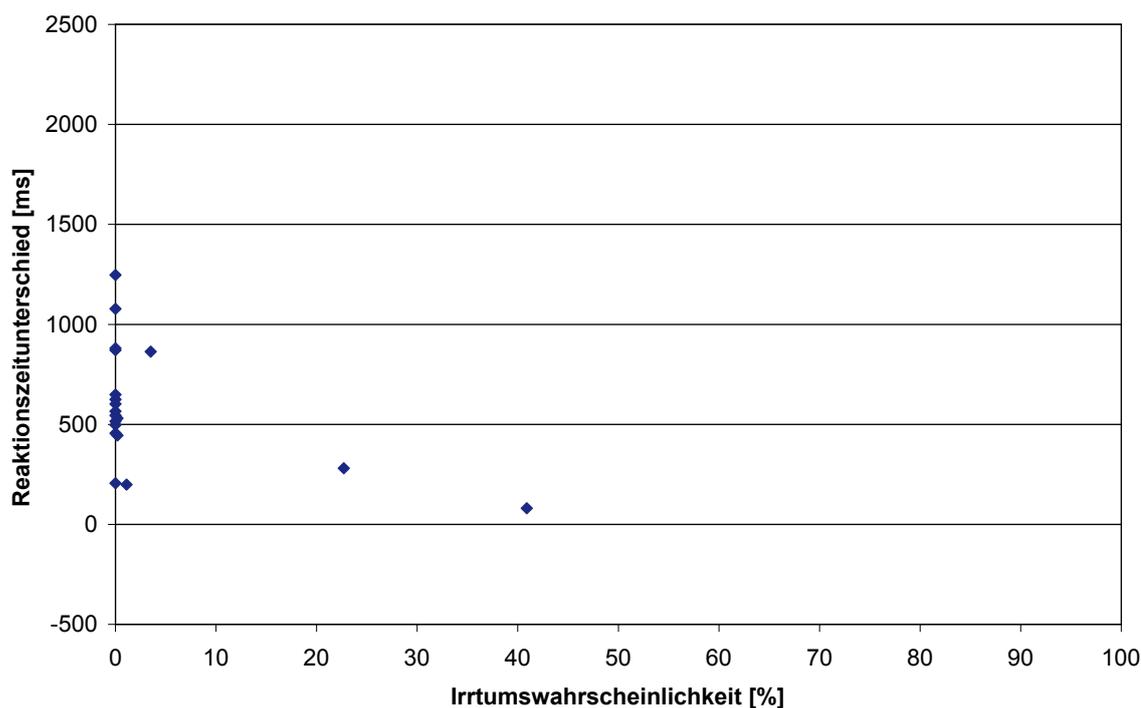


**Bild 4.11:** Reaktionszeiten einer Versuchsperson auf das Aufleuchten einer hellen Leuchte während eine dunkle Leuchte blinkt

## 4. Überlappung und Ineinanderbau von Leuchten

### 4.2.4.2 Übersicht über einen Fall der Überlappung

Aus allen Wertepaaren aus allen Versuchsdurchführungen, die einen Fall der Überlappung untersuchen, wird ein Schaubild erstellt. Als Beispiel ist in Bild 4.12 ein Fall der Überlappung gezeigt, bei dem zuerst der Fahrtrichtungsanzeiger aufleuchtet und nach einiger Zeit, jedoch genau zur steigenden Flanke des Blinksignals, eine Schlussleuchte hinzugeschaltet wird. Als Beispiel eines solchen Falles mit den Werten einer einzigen Versuchsperson ist Bild 4.10 gezeigt. Bei der Übersicht über alle Wertepaare ist deutlich zu erkennen, dass die meisten Versuchspersonen erst auf die Schlussleuchte reagieren, wenn der Fahrtrichtungsanzeiger wieder dunkel ist. Dies geschieht nach 500 ms, da die Blinkfrequenz 1 Hertz beträgt.



**Bild 4.12:** Überlappung von Fahrtrichtungsanzeiger und Schlussleuchte

## 4.3 Auswertung der Ergebnisse

Insgesamt sind über 100 Versuche durchgeführt worden. Diese Versuche untersuchen die vollständige und teilweise Überlappung von Signalleuchten. In den folgenden beiden Abschnitten werden die Ergebnisse dieser Experimente, getrennt ausgewertet für die Reaktionszeit und die Fehlerrate, vorgestellt.

### 4.3.1 Reaktionszeit

#### 4.3.1.1 Reaktionszeitverlängerung des roten Dauerlichtes bei vollständiger Überlappung

Als erstes Signallicht wird der Fahrtrichtungsanzeiger (blinkend mit 1 Hz) eingeschaltet. Nach einer zufälligen Zeitspanne wird ein rotes Signallicht dazugeschaltet. Es wird untersucht, um wieviel sich

## 4. Überlappung und Ineinanderbau von Leuchten

die Erkennungszeit des roten Signallichtes im Vergleich zu einer nicht überlappenden Anordnung verlängert. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Tabelle 4.2 zu sehen.

Rote Signalleuchte	Leuchtdichteverhältnis [ gelb : rot ]	Reaktionszeitverlängerung
Schlussleuchte	9:1 ( = 9 )	650 ms
Schlussleuchte	5:1 ( = 5 )	550 ms
Schlussleuchte	3:1 ( = 3 )	450 ms
Bremsleuchte	1:1 ( = 1 )	300 ms
Bremsleuchte	1:3 ( = 0,3 )	< 100 ms
Bremsleuchte	1:5 ( = 0,2 )	< 100 ms
Bremsleuchte	1:9 ( = 0,1 )	< 100 ms

**Tabelle 4.2:** Reaktionszeit auf das Erscheinen des roten Signallichtes

Die Zahlen in runden Klammern geben die Zahlen an, die in Bild 4.13 bei der Achse *Lichtstärkeverhältnis* angegeben sind. Die Messwerte sind mit der Kurve *zuerst gelb, dann rot* in Bild 4.13 aufgetragen.

### 4.3.1.2 Reaktionszeitverlängerung des gelben Blinklichtes bei vollständiger Überlappung

Als erstes Signallicht wird ein rotes Signallicht eingeschaltet. Nach einer zufälligen Zeitspanne wird der Fahrtrichtungsanzeiger (blinkend mit 1 Hz) dazugeschaltet. Es wird untersucht, um wieviel sich die Erkennungszeit des gelben, blinkenden Signallichtes im Vergleich zu einer nicht überlappenden Anordnung verlängert. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Tabelle 4.3 zu sehen.

Rote Signalleuchte	Leuchtdichteverhältnis [ rot : gelb ]	Reaktionszeitverlängerung
Bremsleuchte	9:1 ( = 9 )	2.000 ms
Bremsleuchte	5:1 ( = 5 )	850 ms
Bremsleuchte	3:1 ( = 3 )	500 ms
Bremsleuchte	1:1 ( = 1 )	250 ms
Schlussleuchte	1:3 ( = 0,3 )	< 100 ms
Schlussleuchte	1:5 ( = 0,2 )	< 100 ms
Schlussleuchte	1:9 ( = 0,1 )	< 100 ms

**Tabelle 4.3:** Reaktionszeit auf das Erscheinen des gelben Signallichtes

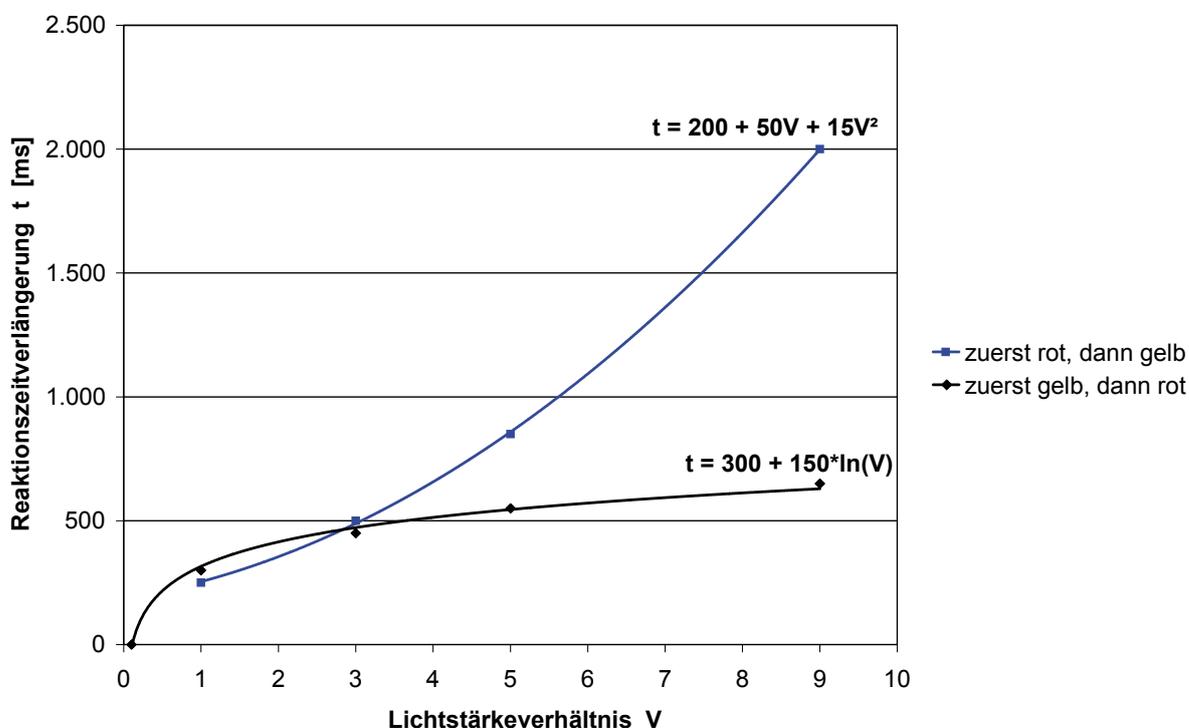
Zu beachten ist, dass die Leuchtdichteverhältnisse bei Tabelle 4.2 und Tabelle 4.3 der zeitlichen Reihenfolge der Darbietung entsprechen. Dadurch ist das Leuchtdichteverhältnis hinsichtlich der Farbe vertauscht (*gelb : rot* und *rot : gelb*). Die Messwerte von Tabelle 4.3 sind mit der Kurve *zuerst rot, dann gelb* in Bild 4.13 aufgetragen.

### 4.3.2 Funktionaler Zusammenhang zwischen dem Leuchtdichteverhältnis und der Reaktionszeitverlängerung

Den Messwerten bei den Leuchtdichteunterschieden von 9:1 bis 1:1 wird jeweils für den Fall *zuerst rot, dann gelb* und *zuerst gelb, dann rot* eine Funktion angenähert. Diese beiden Funktionen sind in Bild 4.13 dargestellt. Sie fassen die Ergebnisse bezüglich der Reaktionszeit zusammen, die durch die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen entstanden sind und geben

## 4. Überlappung und Ineinanderbau von Leuchten

dem Lichttechniker ein Werkzeug in Form einer mathematischen Funktion in die Hand, mit dem er den Einfluss vollständig überlappender Signale auf die Reaktionszeit einfach ermitteln kann.



**Bild 4.13:** Reaktionszeitunterschiede bei 100 Prozent Überlappung

### 4.3.2.1 Reaktionszeitverlängerung des gelben Blinklichtes

Die Abhängigkeit der Reaktionszeit von dem Leuchtdichteverhältnis bei Erkennung des gelben Blinklichtes kann mit einem Polynom zweiter Ordnung, angegeben in Formel 4.2, beschrieben werden.

$$t = 200 + 50V + 15V^2 \quad \text{gültig für } V \geq 1 \quad (4.2)$$

Dabei ist  $t$  die Reaktionszeitverlängerung und  $V$  das Leuchtdichteverhältnis von Bremsleuchte zu Fahrtrichtungsanzeiger.

Diese Formel ist für Leuchtdichteverhältnisse von 1 bis 5 hinreichend genau. Bei größeren Verhältnissen ist die Streuung der Messwerte so groß, unter anderem durch völliges Übersehen der Signale, dass die Formel die Abhängigkeit nur grob wiedergeben kann. Bei Verhältnissen unter 1 ist diese Formel nicht anzuwenden, da die Reaktionszeitverlängerung gegen 0 Millisekunden strebt und dies die Formel nicht beschreibt.

### 4.3.2 Reaktionszeitverlängerung des roten Dauerlichtes

Die Abhängigkeit der Reaktionszeit von dem Leuchtdichteverhältnis bei Erkennung der Bremsleuchte kann mit einer logarithmischen Funktion, angegeben in Formel 4.3, beschrieben werden.

$$t = 300 + 150 \ln(V) \quad (4.3)$$

Dabei ist  $t$  die Reaktionszeitverlängerung und  $V$  das Leuchtdichteverhältnis von Fahrtrichtungsanzeiger zu den roten Signalleuchten.

Das rote Dauerlicht ist in den Auszeiten des blinkenden Fahrtrichtungsanzeiger nichtüberlappend zu sehen. Die erste Auszeit beginnt nach 500 ms. Diesen Wert überschreitet die Reaktionszeitverlängerung für größer werdende Leuchtdichteverhältnisse nur sehr langsam. Bei Verhältnissen kleiner 1 strebt die Reaktionszeitverlängerung gegen 0 ms.

### 4.3.3 Fehlerrate

Untersucht werden soll, ob die Missinterpretation von Signalen bei überlappenden Signalen größer ist als bei nicht überlappenden. Dazu werden gleiche Situationen untersucht und die Anzahl der Fehler im überlappenden und nicht überlappenden Fall verglichen.

Die im Folgenden behandelten Situationen konzentrieren sich auf das Erscheinen des Fahrtrichtungsanzeigers und lassen sich beschreiben als: *Eine Leuchte leuchtet. Eine weitere, der Fahrtrichtungsanzeiger, kommt hinzu.* Wenn die Überlappung einen negativen Einfluss auf die Verkehrssicherheit hat, ist zu erwarten, dass die Fehlerrate am Geringsten ist, wenn keine weitere Leuchte aufleuchtet, das heißt, nur der linke Fahrtrichtungsanzeiger zu sehen ist. Diese Situation ist in den folgenden Tabellen immer in der letzten Zeile angegeben.

Bei dem gleichzeitigen Leuchten einer weiteren, örtlich getrennten Signalleuchte, sollte die Fehlerrate nicht viel größer sein. Bei einem Aufleuchten zweier Signalleuchten an derselben Stelle (überlappend) ist davon auszugehen, dass die Fehlerrate in Abhängigkeit der Leuchtdichteverhältnisse zunimmt.

Für eine ausreichend hohe Aussagefähigkeit der Fehlerrate wird festgelegt, dass mindestens 50 Messwerte der gleichen Situation zu betrachten sind. Die entsprechenden Fehlerraten sind in den folgenden Tabellen besonders gekennzeichnet<sup>1</sup>.

Als Beispiel wird eine Fehlerrate von Tabelle 4.8 berechnet:

Die Fehlerrate der Situation *der linke Fahrtrichtungsanzeiger leuchtet auf während die überlappende Bremsleuchte leuchtet* wird berechnet aus den  $i_F = 25$  aufgetretenen Fehlreaktionen, beobachtet bei dem Aufleuchten des linken Fahrtrichtungsanzeigers, die sich unterteilen in *Bremsen, Licht einschalten, rechts blinken, Fahrt verlangsamten* (Fuß von dem Gaspedal heben), und den  $i_R = 369$  richtigen Reaktionen, *links blinken*. Die Summe aller Reaktionen dieser Situation beträgt  $i_G = 394$ . Nach Formel 4.1 beträgt die Fehlerrate demnach  $f = 6,3$  Prozent.

---

<sup>1</sup>Die Kennzeichnung erfolgt durch graue Schrift wie zum Beispiel: 5,2 statt 5,2

## 4. Überlappung und Ineinanderbau von Leuchten

---

### 4.3.3.1 Leuchtdichteverhältnis von 1 zu 5

#### Linker Fahrtrichtungsanzeiger leuchtet auf

Leuchte	Fehlerrate $f$ [%]
Schlussleuchte rechts	8,3
Schlussleuchte links überlappend	6,5
Schlussleuchte links nicht überlappend	2,4
Bremsleuchte rechts	9,8
Bremsleuchte links überlappend	17,2
Bremsleuchte links nicht überlappend	2,1
Keine weitere Leuchte	7,1

**Tabelle 4.4:** Fehlerraten bei Erkennen des linken Fahrtrichtungsanzeigers

In diesem Experiment ist die Bremsleuchte fünfmal so hell, wie der Fahrtrichtungsanzeiger und dieser fünfmal so hell, wie die Schlussleuchte. In Tabelle 4.4 ist deutlich zu sehen, dass der Fahrtrichtungsanzeiger schlecht erkannt wird, wenn er von der hellen Bremsleuchte überlappt wird. Die Fehlerrate steigt von 2,1 auf 17,2 Prozent an. Hauptsächlich wird diese hohe Fehlerrate dadurch verursacht, dass die Versuchspersonen innerhalb einer bestimmten Zeitspanne nicht das Signal des gelben überlappenden Fahrtrichtungsanzeigers erkennen.

Wird der Fahrtrichtungsanzeiger nicht von der helleren Bremsleuchte überlappt, sondern überlappt selbst die dunklere Schlussleuchte, so steigt zwar auch die Fehlerrate im Vergleich zu dem nicht überlappenden Fall an, von 2,4 auf 6,5 Prozent. Jedoch ist der Anstieg längst nicht so stark ausgeprägt.

Der Vergleich der Fehlerraten in diesem Experiment zeigt allgemein, dass die Fehlerraten sehr gering sind, 2,1 und 2,4 Prozent, wenn an der Fahrzeugseite, an der der Fahrtrichtungsanzeiger aufleuchtet schon andere Leuchten eingeschaltet sind.

Wenn an der gegenüberliegenden Fahrzeugseite Leuchten eingeschaltet sind, oder anders ausgedrückt, an der gleichen Fahrzeugseite keine Leuchten eingeschaltet sind, so beträgt die Fehlerrate 9,8 beziehungsweise 7,1 Prozent.

Die Fehlerrate erhöht sich vom nicht überlappenden Fall zum überlappenden.

#### Rechter Fahrtrichtungsanzeiger leuchtet auf

Leuchte	Fehlerrate $f$ [%]
Schlussleuchte rechts	6,7
Schlussleuchte links überlappend	6,8
Schlussleuchte links nicht überlappend	10,3
Bremsleuchte rechts	19,4
Bremsleuchte links überlappend	2,7
Bremsleuchte links nicht überlappend	2,4
Keine weitere Leuchte	8,9

**Tabelle 4.5:** Fehlerraten bei Erkennen des rechten Fahrtrichtungsanzeigers

Bei den Ergebnissen in Tabelle 4.5 kann gesehen werden, dass die Fehlerrate im gleichen Bereich liegt (8,9 Prozent zu 7,1 Prozent) wie in Tabelle 4.4, falls der Fahrtrichtungsanzeiger das einzige

leuchtende Signallicht darstellt. Interessant ist, dass dunklere Leuchten an der anderen Fahrzeugseite durchgängig höhere Fehlerraten, 6,8 und 10,3 Prozent, hervorrufen, wie hellere Leuchten, 2,4 und 2,7 Prozent.

Tatsächlich überlappende Situationen liegen in Tabelle 4.5 nicht vor, da die linken Leuchten nicht mit dem rechten Fahrtrichtungsanzeiger überlappen.

### 4.3.3.2 Leuchtdichteverhältnis von 1 zu 1

Bei diesem Experiment werden der Versuchsperson fast ausschließlich Bremsleuchten angeboten, da unterschiedlich große Bremsleuchtenflächen untersucht werden. Die einzig gezeigte Schlussleuchte ist die an der rechten Fahrzeugseite angeordnete der konventionellen Leuchte. In Bezug auf die Ermittlung der Fehlerrate werden nur die Bremsleuchten betrachtet, die die gleiche Fläche, wie die der anderen Experimente aufweisen.

Das Leuchtdichteverhältnis zwischen Bremsleuchte und Fahrtrichtungsanzeiger beträgt 1:1.

#### Linker Fahrtrichtungsanzeiger leuchtet auf

Leuchte	Fehlerrate $f$ [%]
Bremsleuchte links überlappend	10,2
Bremsleuchte links nicht überlappend	6,3

**Tabelle 4.6:** Fehlerraten bei Erkennen des linken Fahrtrichtungsanzeigers

Die Ergebnisse in Tabelle 4.6 zeigen, dass die Fehlerrate bei diesem Leuchtdichteverhältnis längst nicht so groß ist, wie bei dem Verhältnis von 5:1 in Tabelle 4.4.

#### Rechter Fahrtrichtungsanzeiger leuchtet auf

Leuchte	Fehlerrate $f$ [%]
Bremsleuchte links überlappend	0,0
Bremsleuchte links nicht überlappend	5,3

**Tabelle 4.7:** Fehlerraten bei Erkennen des rechten Fahrtrichtungsanzeigers

Anhand der Ergebnisse in Tabelle 4.7 können keine Entscheidungen getroffen werden, da die Anzahl aller Messwerte dieser Situationen zu gering sind.

### 4.3.3.3 Leuchtdichteverhältnis von rot zu gelb mit 1 zu 9 und 3 zu 1

Das Leuchtdichteverhältnis von Schlussleuchte zu Fahrtrichtungsanzeiger beträgt 1:9, das von Fahrtrichtungsanzeiger zu Bremsleuchte 1:3.

#### Linker Fahrtrichtungsanzeiger leuchtet auf

Die Fehlerrate von 7,1 Prozent, angegeben in Tabelle 4.8, in Kombination mit der rechten Schlussleuchte wird in über 70 Prozent<sup>2</sup> der falschen Reaktionen dadurch verursacht, dass diese Schlussleuchte mit einer Bremsleuchte verwechselt wird.

---

<sup>2</sup>Die 70 Prozent berechnen sich aus 5 Reaktionen von  $i_F = 7$  falschen Reaktionen bei insgesamt  $i_G = 99$  Reaktionen.

## 4. Überlappung und Ineinanderbau von Leuchten

---

Leuchte	Fehlerrate $f$ [%]
Schlussleuchte rechts	7,1
Schlussleuchte links überlappend	3,4
Schlussleuchte links nicht überlappend	2,9
Bremsleuchte rechts	2,3
Bremsleuchte links überlappend	6,3
Bremsleuchte links nicht überlappend	3,0
Keine weitere Leuchte	3,4

**Tabelle 4.8:** Fehlerraten bei Erkennen des linken Fahrtrichtungsanzeigers

Wie in den weiter oben ausgewerteten Experimenten ist die Fehlerrate im überlappenden Fall größer, als im nicht überlappenden. Bei einer schwach leuchtenden roten Leuchte, die von dem Fahrtrichtungsanzeiger überlappt wird, ändert sich die Fehlerrate etwas von 2,9 auf 3,4 Prozent. Bei einem geringen Leuchtdichteverhältnis und einer helleren roten Leuchte wächst der Unterschied von 3,0 auf 6,3 Prozent an. Die Fehlerrate von über sechs Prozent bei der Situation *überlappende Bremsleuchte* wird hervorgerufen durch die Verwechslung des Signalbildes *Richtungsänderung* mit dem Signalbild *Abbremsen*. Die meisten fehlreagierenden Versuchspersonen sehen nur eine Erhöhung der Leuchtdichte des Signales und übersehen die Farbänderung. Daher reagierten sie auf ein helles rotes Signal, ein Bremssignal, und nicht auf das gelbe Signal Fahrtrichtungsanzeiger.

### Rechter Fahrtrichtungsanzeiger leuchtet auf

Der rechte Fahrtrichtungsanzeiger ist nicht überlappend. Daher wird davon ausgegangen, dass deutlich weniger Fehler, wie bei dem linken Fahrtrichtungsanzeiger, auftreten.

Leuchte	Fehlerrate $f$ [%]
Schlussleuchte rechts	2,3
Schlussleuchte links überlappend	1,7
Schlussleuchte links nicht überlappend	2,0
Bremsleuchte rechts	7,7
Bremsleuchte links überlappend	2,6
Bremsleuchte links nicht überlappend	3,5
Keine weitere Leuchte	2,4

**Tabelle 4.9:** Fehlerraten bei Erkennen des rechten Fahrtrichtungsanzeigers

Die in Tabelle 4.9 gezeigte Fehlerrate bei *Schlussleuchte rechts* und *Bremsleuchte rechts* basiert auf zu wenigen Messwerten und ist daher nicht verlässlich.

#### 4.3.3.4 Leuchtdichteverhältnis von rot zu gelb mit 1 zu 3 und 9 zu 1

Das Leuchtdichteverhältnis von Schlussleuchte zu Fahrtrichtungsanzeiger beträgt 1:3, das von Fahrtrichtungsanzeiger zu Bremsleuchte 1:9.

### Linker Fahrtrichtungsanzeiger leuchtet auf

In der Situation *Fahrtrichtungsanzeiger leuchtet auf*, während *Bremsleuchte an der gleichen Stelle leuchtet* ist die Bremsleuchte neunmal so hell, wie der Fahrtrichtungsanzeiger. Die meisten

Leuchte	Fehlerrate $f$ [%]
Schlussleuchte rechts	0,0
Schlussleuchte links überlappend	2,5
Schlussleuchte links nicht überlappend	1,8
Bremsleuchte rechts	1,2
Bremsleuchte links überlappend	47,6
Bremsleuchte links nicht überlappend	3,2
Keine weitere Leuchte	3,4

**Tabelle 4.10:** Fehlerraten bei Erkennen des linken Fahrtrichtungsanzeigers

Fehlreaktionen der Versuchspersonen auf das Aufleuchten des gelben Signallichtes, dargestellt in Tabelle 4.10, bestehen darin, dass sie die Bremse betätigen. Dies beruht auf der Tatsache, dass die meisten Versuchspersonen nur eine Erhöhung der Leuchtdichte des roten Signales wahrnehmen und nicht die, zugegebenermaßen schwache, Farbänderung Richtung gelb.

### Rechter Fahrtrichtungsanzeiger leuchtet auf

Leuchte	Fehlerrate $f$ [%]
Schlussleuchte rechts	0,0
Schlussleuchte links überlappend	1,0
Schlussleuchte links nicht überlappend	0,8
Bremsleuchte rechts	6,4
Bremsleuchte links überlappend	1,2
Bremsleuchte links nicht überlappend	2,4
Keine weitere Leuchte	1,3

**Tabelle 4.11:** Fehlerraten bei Erkennen des rechts Fahrtrichtungsanzeigers

Die Fehlerrate in Tabelle 4.11 bei *Schlussleuchte rechts* und *Bremsleuchte rechts* basiert auf wenigen Messwerten und ist daher nicht verlässlich.

### 4.3.4 Funktionaler Zusammenhang zwischen dem Leuchtdichteverhältnis und der Fehlerrate

Die in den vorhergehenden Abschnitten angegebenen Fehlerraten bei der Erkennung des linken Fahrtrichtungsanzeigers in Kombination mit den überlappenden und nicht überlappenden roten Leuchten sind in Tabelle 4.12 zusammengefasst. Angegeben ist in dieser Tabelle weiterhin die Gesamtanzahl  $i_G$  der untersuchten Situationen bei überlappender und nicht überlappender Darstellung.

In Kombination mit dieser Angabe fällt auf, dass im nicht überlappenden Fall die einzige deutlich erhöhte Fehlerrate bei der Situation mit der niedrigsten Anzahl untersuchter Situationen zusammenfällt. Wird diese Fehlerrate nicht berücksichtigt, so beträgt der Mittelwert aller Fehlerraten im nicht überlappenden Fall  $f = 2,6$  Prozent mit einer Standardabweichung von 0,6. Mathematisch kann der Zusammenhang durch Formel 4.4 ausgedrückt werden.

$$f = 2,6 \tag{4.4}$$

#### 4. Überlappung und Ineinanderbau von Leuchten

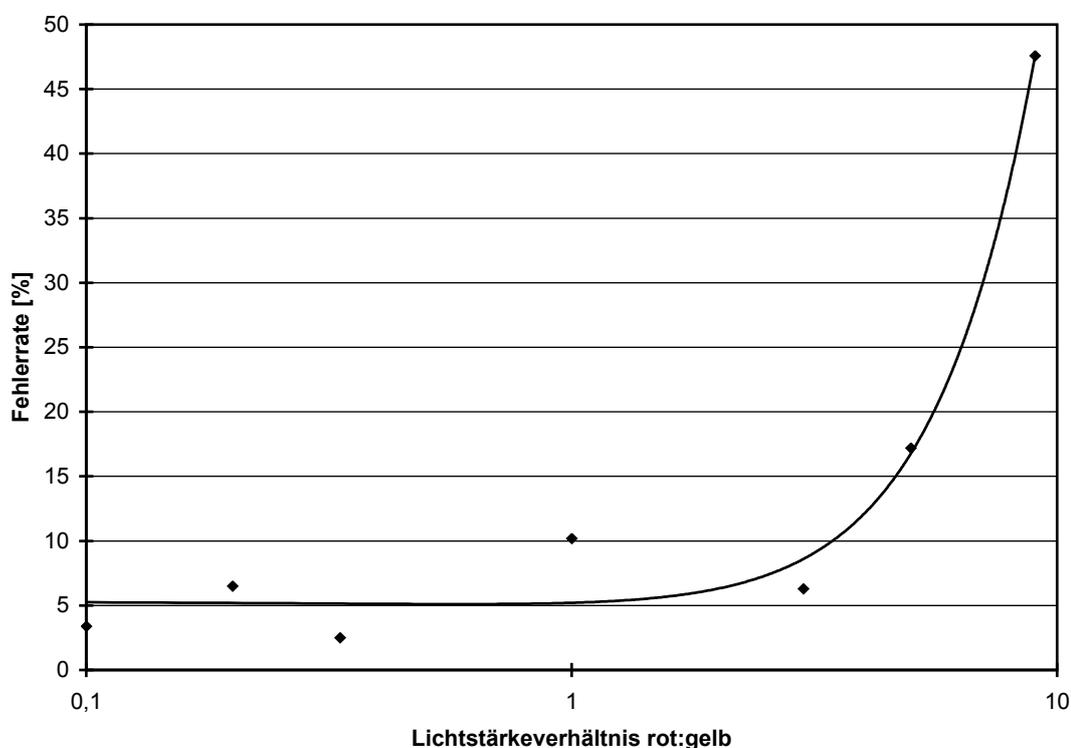
<b>Leuchtdichteverhältnis <math>V</math></b>	0,1	0,2	0,3	1,0	3,0	5,0	9,0
<b>Fehlerrate <math>f</math> überlappend</b>	3,4	6,5	2,5	10,2	6,3	17,2	47,6
<b>Anzahl <math>i_G</math> der untersuchten Situationen</b>	351	245	320	118	394	238	439
<b>Fehlerrate <math>f</math> nicht überlappend</b>	2,9	2,4	1,8	6,3	3,0	2,1	3,2
<b>Anzahl <math>i_G</math> der untersuchten Situationen</b>	308	206	331	111	338	241	341

**Tabelle 4.12:** Fehlerraten  $f$  bei verschiedenen Leuchtdichteverhältnissen  $V$  (rot:gelb) zwischen roten Leuchten und dem gelben Fahrtrichtungsanzeiger. Angegeben ist weiterhin die Gesamtanzahl  $i_G$  der untersuchten Situationen bei überlappender und nicht überlappender Darstellung.

Es wird festgelegt, dass Fehlerraten kleiner fünf Prozent als normal anzusehen sind. Gilt diese Festlegung, so sind räumlich stark getrennte Signale der gleichen Fehlerklasse zuzuordnen wie überlappende Signale mit einem Leuchtdichteverhältnis  $V$  kleiner eins.

Im überlappenden Fall kann entsprechend Abschnitt 4.3.2.1 der funktionale Zusammenhang zwischen dem Leuchtdichteverhältnis beziehungsweise dem Lichtstärkeverhältnis untersucht werden. Die Abhängigkeit der Fehlerrate  $f$  von dem Leuchtdichteverhältnis  $V$  von rot zu gelb bei Erkennung des Fahrtrichtungsanzeigers kann mit einem Polynom zweiter Ordnung, angegeben in Formel 4.5, beschrieben werden. Die Funktion ist mitsamt den Messwerten in Bild 4.14 in halblogarithmischer Auftragung dargestellt. Auf Grundlage der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen fasst diese Funktion die Ergebnisse bezüglich der Fehlerrate zusammen. Diese Funktion gibt dem Lichttechniker ein Werkzeug in Form einer mathematischen Funktion in die Hand, mit dem er den Einfluss vollständig überlappender Signale auf die Fehlerrate einfach ermitteln kann.

$$f = 5,3 - 0,7V + 0,6V^2 \quad (4.5)$$



**Bild 4.14:** Die Abhängigkeit der Fehlerrate  $f$  von dem Leuchtdichteverhältnis  $V$  bei Erkennung des gelben Blinklichtes

### 4.4 Diskussion überlappender Signale

Aufgrund der bisher verwendeten Technologien wurden Signale unterschiedlicher Farbe bisher fast immer durch voneinander getrennte Leuchtenteile realisiert. Unterschiedlich farbiges Licht tritt somit aus unterschiedlichen Flächen aus.

Mit aktuellen Technologien zur Lichterzeugung können Fahrzeugleuchten gestaltet werden, bei denen das Licht verschiedenfarbiger Signale aus derselben Fläche austritt. Die Flächen der einzelnen Signale überlappen.

Überlappung hilft, Platz für *Brake Force* und weitere zusätzliche Signale zu schaffen, sowie die Anzahl an notwendigen Leuchten zu minimieren, wie dies oft bei der Schlussleuchte und Bremsleuchte praktiziert wird, die mit einer Abschlusscheibe zusammengebaut werden.

Allerdings nimmt die Überlappung farbiger Lichtsignale Einfluss auf die Erkennbarkeit und Unterscheidbarkeit dieser Signale. So hat schon Mortimer [Mor69] gezeigt, dass die räumliche Trennung der verschiedenen Signallichter die beste Anordnung darstellt, um minimale Reaktionszeiten zu erhalten. Der Einfluss der Überlappung ist sowohl anhand der Fehlerrate als auch anhand der Verlängerung der Reaktionszeit feststellbar.

#### 4.4.1 Einfluss auf die Reaktionszeit

Die Überlappung hat Einfluss auf die Reaktionszeit. Die Reaktionszeit wird durch vollständig überlappende Signale verlängert. Bei entsprechender Anordnung und ausgewogenem Leuchtdichteverhältnis der Leuchten bleibt die Verlängerung in einem akzeptierbaren Bereich. Aufgrund der durchgeführten Untersuchungen ist festzustellen, dass sich bei gleicher Leuchtdichte von Bremsleuchte und Fahrtrichtungsanzeiger die Reaktionszeit bei vollständiger Überlappung um ca. 300 ms gegenüber nicht überlappenden Leuchten verlängert.

Bei großen Leuchtdichteunterschieden und vollständiger Überlappung wird die Verlängerung der Reaktionszeit unakzeptabel groß. Signale können übersehen werden. Die Verkehrssicherheit wird gefährdet. Die Verlängerung der Reaktionszeit nimmt mit größeren Leuchtdichteunterschieden quadratisch zu.

Mit Formel 4.6 wird die Abhängigkeit der Reaktionszeitverlängerung  $t$  von dem Leuchtdichteverhältnis  $V$  bei Erkennung des gelben Blinklichtes und bei vollständiger Überlappung berechnet.

$$t = 200 + 50V + 15V^2 \quad \text{gültig für } V \geq 1 \quad (4.6)$$

Mit Formel 4.7 wird die Abhängigkeit der Reaktionszeitverlängerung  $t$  von dem Leuchtdichteverhältnis  $V$  bei Erkennung der roten Bremsleuchte und bei vollständiger Überlappung berechnet.

$$t = 300 + 150 \ln(V) \quad (4.7)$$

Die Untersuchungen bei teilweiser Überlappung zeigen auf, dass die Reaktionszeit nicht oder nur minimal verlängert wird. Es ist zu erwarten, dass sich die Reaktionszeit nicht verlängert, wenn beide Signalfächen maximal zu 50 Prozent überlappend gestaltet sind.

## 4. Überlappung und Ineinanderbau von Leuchten

---

### 4.4.2 Einfluss auf die Fehlerrate

Die Überlappung erhöht die Fehlerrate bei der Zuordnung des sichtbaren Signals.

Bei einer Überlappung mit Leuchtdichteunterschieden kleiner fünf steigen die Fehlerraten um wenige Prozent. Bei Leuchtdichteunterschieden kleiner eins steigen die Fehlerraten typischerweise sogar um weniger als ein Prozent.

Die Fehlerrate nimmt mit größeren Leuchtdichteunterschieden quadratisch zu. Bei einem Leuchtdichteunterschied von 9 beträgt die Fehlerrate fast 50 Prozent. Fast jedes zweite Signal wird nicht richtig interpretiert.

Mit Formel 4.8 wird die Abhängigkeit der Fehlerrate  $f$  von dem Leuchtdichteunterschied  $V$  bei vollständiger Überlappung berechnet.

$$f = 5,3 - 0,7V + 0,6V^2 \quad (4.8)$$

### 4.4.3 Einfluss auf die Verkehrssicherheit

Die im Abschnitt 4.1.2 erwartete Aufhebung der Reaktionszeitunterschiede wird erreicht, ja sogar unterboten. Das heißt: Für den amerikanischen Markt verbessern Rückleuchten mit überlappenden Signalleuchten, einem Leuchtdichteunterschied von 1:1 und unterschiedlicher Farbgebung für Bremsleuchte und Fahrtrichtungsanzeiger die Reaktionszeit um 200 ms gegenüber den dort erlaubten Rückleuchten, bestehend aus einer roten Leuchte, die sowohl als Bremsleuchte als auch als Fahrtrichtungsanzeiger genutzt wird.

Für den europäischen Markt bedeuten überlappende Signalleuchten bei gleichbleibender Lampentechnologie eine Verlängerung der Reaktionszeit. So verlängert sich bei einem Leuchtdichteunterschied von 1:1 diese bei vollständiger Überlappung um 300 ms. Diese Verlängerung entspricht jedoch ungefähr dem Reaktionszeitunterschied zwischen Glühlampen und LEDs und kann durch einen gleichzeitigen Wechsel der Lampentechnologie ausgeglichen werden.

Ab einem bestimmten Überlappungsverhältnis – vorstellbar wäre 1:3 als Grenzwert – ist davon auszugehen, dass das dunklere Signallicht bei gleichzeitigem Betrieb der beiden Signalleuchten deutlich später, ca. 500 ms, erkannt wird als bei nicht überlappenden Leuchten.

Wenn die Schlussleuchte die dunklere Leuchte ist, stellt dies kein Problem dar, da die Funktion dieser Leuchte nur der Detektion des Fahrzeuges dient. Diese Funktion wird automatisch von jeder anderen, helleren Leuchte übernommen.

Wenn die Bremsleuchte die dunklere Leuchte ist, kann durch die Verlängerung der Reaktionszeit lebensnotwendiger Bremsweg verloren gehen. Eine Verlängerung von 500 ms entspricht bei 100 km/h einer Strecke von mehr als 13 m.

Ab einem bestimmten Verhältnis – vorstellbar wäre 1:5 als Grenzwert – ist davon auszugehen, dass das dunklere Signallicht übersehen wird. Wenn es sich bei der dunkleren Leuchte um eine Bremsleuchte oder einen Fahrtrichtungsanzeiger handelt, ist diese überlappende Darbietung nicht dazu geeignet, im Straßenverkehr eingesetzt zu werden. Eine so gestaltete Leuchte gefährdet die Verkehrssicherheit.

### 4.4.4 Diskussion der gesetzlichen Regelungen

Überlappung stellt eine Erhöhung der Komplexität von Signalleuchten dar, mit der der moderne Mensch prinzipiell zurechtkommt, da er stärker als seine Vorfahren darauf trainiert ist, parallel

## 4. Überlappung und Ineinanderbau von Leuchten

---

viele Informationen aufzunehmen und diese richtig zu filtern. Daher ist Überlappung nicht generell zu verbieten, sondern nur diejenigen Signalkombinationen, die die Verkehrssicherheit deutlich gefährden.

Die Intension der ECE Regelung Nummer 48, Abschnitt 5.7.1.1, [ERR07a], Überlappung generell zu verbieten, wird in der Praxis nicht erreicht und reglementiert zu viel. Dieser Teil der Regelung sollte, ausgehend von den vorliegenden Untersuchungen, neu formuliert werden. Überlappende Flächen sind nicht über die Kanten verschiedenfarbiger Flächen zu definieren, sondern über die Flächenanteile selbst. Eine Neuformulierung könnte lauten:

*Ist der Anteil der (sichtbaren) leuchtenden Fläche einer Signalfunktion, auf der auch bei gleichzeitigem Leuchten aller Funktionen von zusammengebauten, kombinierten und ineinander gebauten Leuchten nur die Farbe dieser Signalfunktion messbar ist, kleiner als 100 cm<sup>2</sup>, so muss die minimale/mittlere/maximale Leuchtdichte der Bremsleuchte, mit einer maximalen Abweichung von 10 Prozent, gleich hell der Leuchtdichten aller anderen Signalfunktionen auf der gleichen Fläche, ausgenommen der Schlussleuchte, sein.*

Dabei ist die minimal notwendige leuchtende Fläche einer Signalfunktion ohne Basis wissenschaftlicher Ergebnisse auf 100 cm<sup>2</sup> festgelegt. Die Festlegung der zu benutzenden Leuchtdichte, die minimale, mittlere oder maximale, ist von der Definition der Messvorschrift nach ECE für Leuchtdichten abhängig. Diese Definition durch die ECE steht noch aus.

Mit der vorgeschlagenen Neuformulierung wird die Reaktionszeit auf das Aufleuchten der Bremsleuchte gegenüber einer vollkommen getrennt angebrachten Bremsleuchte um durchschnittlich 300 Millisekunden verlängert. Wird gleichzeitig gefordert, dass Bremsleuchten eine maximale Ansprechzeit von 1 Millisekunde aufweisen müssen, so wird die Reaktionszeit gegenüber einer herkömmlichen Leuchte<sup>3</sup> nicht wesentlich verlängert. Denn es ist inkonsequent, überlappende Signale zu verbieten, die zu einer Reaktionszeitverlängerung von weniger als einer Drittel Sekunde führen, auf der anderen Seite Glühlampen als Lichtquellen für zeitkritische Signale weiterhin zuzulassen, die gegenüber LEDs zu einer Reaktionszeitverlängerung der gleichen Größenordnung führen.

---

<sup>3</sup>Eine herkömmliche Leuchte ist klar von anderen Leuchten getrennt und weist keine überlappenden Flächenanteile auf. Sie ist mit einer Glühlampe bestückt.

# Kapitel 5

# Phantomlicht und Color Washout

## 5.1 Übersicht über Phantomlicht

### 5.1.1 Auftreten von Phantomlichteffekten

Phantomlichteffekte sind von Fremdlicht verursachte Signale in Leuchten. Wenn diese Effekte an Signalleuchten auftreten, kann die Wahrnehmung des eigentlichen Signals beeinträchtigt werden. Ein Lichtsignal kann scheinbar leuchten, obwohl es tatsächlich aus ist oder ein Lichtsignal kann übersehen werden, da das Fremdlicht zu dominant ist. Dadurch kann es zu Missinterpretationen des ursprünglichen Lichtsignals kommen wodurch dessen Wirksamkeit stark reduziert wird.

Color Washout bezeichnet eine spezielle Art des Phantomlichtes, bei der weißes Fremdlicht das eigentliche farbige Signallicht überlagert und dadurch die Farbe des Lichtes auswäscht.

Die durch Phantomlicht hervorgerufenen Einflüsse auf Signalleuchten sind schon seit Jahrzehnten bekannt. Lichtsignalanlagen<sup>1</sup> werden daher so gestaltet, dass Phantomlichteffekte größtenteils minimiert werden. Dies wird einerseits durch Größe, Form und Ausrichtung der Schute oberhalb der Signalfäche erreicht. Andererseits wird auch durch einen speziellen Aufbau der inneren Optik eindringendes Fremdlicht möglichst stark absorbiert.

Bei Lichtsignalanlagen ist durch bauliche Maßnahmen die Fremdlichtempfindlichkeit dermaßen reduziert worden, dass Phantomlichteffekte im normalen Straßenverkehr praktisch nicht mehr auftreten. Anders verhält es sich bei an Fahrzeugen angebrachten Signalleuchten. So wird besonders bei Bremsleuchten und hinteren Fahrtrichtungsanzeigern vermehrt das Auftreten von Phantomlichteffekten festgestellt.

Dies ist zurückzuführen auf die Änderung des Rückleuchtendesigns der letzten Jahre. So zeigen aktuelle Designs immer öfter glänzende und klare Rückleuchten [Hah07a], getrieben von der Idee, Fahrzeuge zu gestalten, die reine, strahlende Augen besitzen [Tom06]. In Kombination mit klaren Abschlusscheiben können oft feinste Details innerhalb dieser Leuchte gesehen werden. Ein brillantes Erscheinungsbild ist das Resultat dieser Konstruktionsweise.

Parallel zu der Entwicklung bei den Optik-Komponenten der Leuchte werden zunehmend LEDs statt herkömmliche Glühlampen eingesetzt [Kal07c], so dass eine klare Abschlusscheibe den Blick auf moderne und hochtechnologische Leuchtdioden erlaubt, anstelle auf konventionelle, einfache Glühlampentechnik [Man05].

---

<sup>1</sup>Lichtsignalanlagen werden umgangssprachlich Verkehrsampeln genannt.

### 5.1.2 Quellen des Fremdlichtes

Die Lichtquellen des störenden Fremdlichtes sind entweder die Sonne oder die Scheinwerfer anderer Verkehrsteilnehmer.

Der Einfluss der Sonne auf fest montierte Lichtsignale wird reduziert, in dem Schuten, ohne die Sicht des Beobachters einzuschränken, oberhalb der Signalflächen montiert werden, die so ausgerichtet werden, dass möglichst wenig direktes Sonnenlicht auf den Flächen einfällt. Die Ausrichtung der Schuten kann leicht optimiert werden, da an jedem Standort die Einstrahlrichtung der Sonne bei tiefen Sonnenständen<sup>2</sup> errechnet werden kann.

Dieser Sonnenschutz kann bei Signalleuchten an Fahrzeugen nicht verwendet werden. Es kann weder berechnet werden, aus welcher Richtung die Sonne einstrahlen kann, da die Position des Fahrzeugs beliebig und die Neigung in einem nicht vernachlässigbaren Bereich variierbar ist, noch können ausreichend große Schuten montiert werden, da, vollkommen unabhängig von dem gestalterischen Aspekt schwarzer Rohrteile an hochwertigen Fahrzeugen, das Verletzungsrisiko an deren hervorstehenden Kanten zu groß wäre.

Der Einfluss der Scheinwerfer von Fahrzeugen auf fest montierte Signalanlagen ist bei den meisten Standorten sehr gering, da die Signalflächen deutlich oberhalb der Fahrbahnoberfläche angebracht sind und daher von den Scheinwerfern nur mit geringer Lichtstärke angestrahlt werden. Bei an Fahrzeugen montierten Signalleuchten kann der Einfluss der Scheinwerfer bei sehr geringen Abständen zwischen den Signalleuchten und den sie beleuchtenden Scheinwerfern wahrnehmbar sein, da die Leuchten teilweise auf gleicher Höhe<sup>3</sup> montiert sind wie die Scheinwerfer. Nach ECE Regelung Nummer 48, Abschnitt 6.1.9.1 [ERR07a] beträgt die maximale Lichtstärke der Scheinwerfer  $I_{max} = 225.000$  cd. Bei einer definierten Fremdlichtbedingung nach Abschnitt 2.9.5.1 beträgt die Fremdlicht-Beleuchtungsstärke an der Leuchte  $E_{Fr} = 40.000$  lx. Mit der Umformung des photometrischen Entfernungsgesetzes zu  $r = \sqrt{\frac{I_{max}}{E_{Fr}}}$  berechnet sich mit den angegebenen Werten der Grenzabstand  $r = 2,4$  m als die Entfernung, innerhalb derer eine Fremdlichtsituation auftreten kann. Bei dieser geringen Entfernung sind die Phantomlichteffekte jedoch nicht mehr relevant für die Signalgebung. Daher kann das durch Scheinwerfer erzeugte Phantomlicht unberücksichtigt bleiben.

Die Minimierung von Fremdlichteffekten an Fahrzeugleuchten, hervorgerufen durch Sonnenlicht, kann nur über eine Optimierung der leuchteninternen Optik geschehen.

### 5.1.3 Zusammenhang zwischen Phantomlichteffekten und Überlappung von Lichtsignalen

Wenn nicht nach der eigentlichen Quelle des jeweiligen Lichtes gefragt wird, sondern nach der Wahrnehmung der Leuchte in verschiedenen, statischen Zuständen, so sind Phantomsignale der Kategorie *überlappende Signale* zuzuordnen.

Bei einem vollständig überlappenden Signal wird die Fläche des überlappten Signals vollständig von der Fläche des überlappenden Signals überdeckt.

<sup>2</sup>Bei tiefen Sonnenständen müssen die Schuten besonders lang sein, um genügend Abschattung zu erzeugen.

<sup>3</sup>Etliche Bremsleuchten an Fahrzeughecks sind tiefer angebracht als die Scheinwerfer von Geländewagen. Sogar die Brems- und Blinkleuchten von einigen Geländewagen japanischer Bauart sind tiefer angebracht als deren Scheinwerfer. Dies liegt darin begründet, dass die für den japanischen und amerikanischen Markt entwickelten Fahrzeuge an europäische Regelungen angepasst werden, in dem die ursprünglichen hoch angebauten Heckleuchten außer Betrieb genommen und deren Funktionen durch in die Stoßstange integrierte ECE-konforme Heckleuchten ersetzt werden.

## 5. Phantomlicht und Color Washout

---

Bei Signalleuchten sind als Farben des eigentlichen Signals rot, gelb und weiß möglich. Durch die Überlappung können beliebige Mischungen aus rot, gelb und weiß auftreten.

Bei Phantomlicht kann das Fremdlicht die Farbe des eigentlichen Signals der Signalleuchte vollständig oder teilweise annehmen oder seine ursprüngliche Farbe behalten. Dabei kann in der Praxis als Farbe der Fremdlichtquelle weiß angenommen werden (siehe Abschnitt 5.1.2). Unter dieser Annahme sind, ähnlich den überlappenden Signalen, als Farben des Phantomlichtes verschiedene Mischungen aus rot, gelb und weiß möglich.

Je nachdem, welche Signalleuchten überlappen beziehungsweise welcher Art das Phantomlicht ist, überlappen Lichter gleicher oder unterschiedlicher Farben.

### 5.1.3.1 Überlappung mit gleicher Farbe

Im Falle zweier überlappender Signalleuchten gleicher Farbe kann dies nur die Kombination einer Schlussleuchte und einer Bremsleuchte sein. Sie überlappen, wenn sie ineinander gebaut<sup>4</sup> (siehe Abschnitt 2.4.2.1) sind. Bei dieser Kombination weisen die beiden überlappenden Signale die gleiche Farbe und meist auch die gleiche Lichtverteilung auf. Sie unterscheiden sich nur durch unterschiedliche Lichtstärken.

Dies trifft, bei gefärbten Abschlusscheiben, auch bei der Phantomlicht-Art *Spiegel-Phantomlicht* (siehe Abschnitt 2.9.1) zu. Dabei hat das Phantomlicht eine ähnliche Lichtstärke, Verteilung und Farbe wie das Signal der Leuchte. Das Phantomsignal überlappt mit dem eigentlichen Lichtsignal. Auch hier weisen beide Signale die gleiche Farbe und meist auch die gleiche Lichtverteilung auf.

Schon bei der, gesetzlich erlaubten und oft praktizierten, Überlappung von Schlusslicht und Bremslicht könnte bei einer räumlichen Trennung der Signale die Wahrnehmbarkeit des Signals *Bremsen* erhöht werden, da räumlich getrennte Signale besser zu unterscheiden sind. Mit Einführung der hochgesetzten Bremsleuchte wurde eine gute Wirkung des Signalbilds *Bremsen* erreicht. Jedoch ist nicht in allen Fahrsituationen der Blick auf die dritte Bremsleuchte gegeben.

Bei der Überlappung einer fahrzeugeigenen Signalleuchte mit Spiegel-Phantomlicht kann durch das Fremdlicht der Eindruck entstehen, die Signalleuchte sei eingeschaltet, so dass zum Beispiel eine Schlussleuchte mit Phantomlicht als ein Signal *Bremsen* erkannt wird.

Wird ein Signal erkannt aber nicht gegeben, ist dies so sicherheitskritisch<sup>5</sup> wie ein gegebenes aber nicht erkanntes Signal. Im Besonderen ist es nicht kritisch, wenn das Signal *Fahrzeug vorhanden*, welches von den Schlussleuchten signalisiert wird, durch ein anderes überlappt wird, da jedes Signal, auch das durch Phantomlicht gegebene, implizit anzeigt, dass ein Fahrzeug vorhanden ist.

### 5.1.3.2 Überlappung mit unterschiedlicher Farbe

Im Falle zweier überlappender Signalleuchten unterschiedlicher Farbe kann eine Überlappung durch eine der folgenden Kombinationen gegeben sein:

- Schlussleuchte und Fahrtrichtungsanzeiger

---

<sup>4</sup>Dies kann zum Beispiel durch eine P21/5W Lampe, eine bei Schlusslicht gedimmte P21W oder bei Schlusslicht gedimmte LEDs realisiert werden.

<sup>5</sup>Dies gilt nur für normale Fahrer. In Kombination mit einem aggressiven Fahrer, definiert durch Braess [BD06] anhand der Quer- und Längsbeschleunigungen während des Fahrens, der sich schon neben Fahrzeugen einzuordnen beginnt, wenn diese ihre Spurwechselabsicht per Fahrtrichtungsanzeiger anzeigen, ist ein erkanntes, aber nicht gegebenes Signal als sicherheitskritisch einzuordnen. Jedoch ist durch diese Art von Fahrer häufig eine Verkehrsgefährdung gegeben, so dass diese Situationen nicht gesondert betrachtet werden.

- Schlussleuchte und Rückfahrscheinwerfer
- Bremsleuchte und Fahrtrichtungsanzeiger
- Bremsleuchte und Rückfahrscheinwerfer
- Nebelschlussleuchte und Fahrtrichtungsanzeiger
- Nebelschlussleuchte und Rückfahrscheinwerfer
- Fahrtrichtungsanzeiger und Rückfahrscheinwerfer

Aufgelistet sind nur Zweier-Kombinationen, wobei Mehrfachkombinationen denkbar sind. Auch sind nicht alle aufgeführten Kombinationen derzeit gesetzlich zulässig<sup>6</sup>.

Im Falle der Überlappung von Phantomlicht und Signalleuchte mit unterschiedlicher Farbe sind folgende Kombinationen zu untersuchen:

- Phantomlicht und Fahrtrichtungsanzeiger
- Phantomlicht und Bremsleuchte

Eine Kombination von Phantomlicht mit einer Schlussleuchte oder einer Nebelschlussleuchte ist nicht zu untersuchen, da diese Leuchten nur das Signal *Fahrzeug vorhanden* anzeigen sollen und dies durch das Phantomlicht gleichwertig geschehen kann.

Bei einer Überlappung mit unterschiedlichen Farben kann ein Lichtsignal das andere derart überlappen, dass eines der beiden Signale gegeben, aber nicht erkannt wird. Dies ist insbesondere dann sicherheitskritisch, wenn das wichtigere Signal überblendet wird. Bei folgenden Kombinationen kann diese Situation vorliegen:

- Schluss- oder Nebelschlussleuchte heller als Fahrtrichtungsanzeiger
- Schluss- oder Nebelschlussleuchte heller als Rückfahrscheinwerfer
- Phantomlicht heller als Fahrtrichtungsanzeiger
- Phantomlicht heller als Bremsleuchte

Die Wichtigkeit des Signals *Bremsen* im Vergleich des Signals *Fahrtrichtung ändern* hängt von der jeweiligen Situation ab, in welcher das eine oder andere Signal wichtiger ist. Jedoch ist bei einem Vergleich dieser beiden Signale zu beachten, dass das Signal *Bremsen* fest verdrahtet ist und bei allen starken<sup>7</sup> Verzögerungen automatisch gegeben wird. Das Signal *Fahrtrichtung ändern* wird derzeit direkt von dem Fahrzeugführer ausgelöst. Wenn dies vernachlässigt wird, so kann auch eine wesentliche Richtungsänderung ohne vorheriges Signalgeben erfolgen. Das Signal ist nicht fest verdrahtet und daher in der Praxis nicht so zuverlässig, wie das Signal *Bremsen*.

Beide Signale, *Bremsen* und *Fahrtrichtung ändern*, sind wichtig, wenn auch nicht gleich zuverlässig. Daher kann bei einer Überlappung mit unterschiedlichen Farben ein Lichtsignal das andere derart überlappen, dass eines der beiden Signale gegeben, aber nicht erkannt wird. Dies liegt vor, wenn

- Bremsleuchte heller als Fahrtrichtungsanzeiger  
oder
- Fahrtrichtungsanzeiger heller als Bremsleuchte  
ist.

---

<sup>6</sup>Da die ECE Regelungen einen deutlichen Interpretationsraum lassen und jederzeit, wenn auch nicht mit vernachlässigbarem Aufwand und auch nicht mit garantiertem Erfolg, änderbar sind, sollen bei diesen grundsätzlichen Überlegungen die rechtlichen Rahmenbedingungen außer Acht gelassen werden.

<sup>7</sup>Je nach Fahrzeug ist schon bei der Nutzung der Motorbremse durch Retarder oder Gangwechsel eine deutliche Verzögerung erreichbar. Vom wissenschaftlichen Standpunkt aus sollte auch bei diesen Vorgängen die Bremsleuchte aufleuchten. Dies ist jedoch nicht bei allen Fahrzeugen umgesetzt.

### 5.2 Beschreibung der Fremdlichtempfindlichkeit durch Definition der Störanfälligkeit

Außer der in Abschnitt 2.9.2.1 definierten Fremdlichtempfindlichkeit  $F$  besteht eine weitere Möglichkeit, den Einfluss von Fremdlicht auf eine Leuchte zu definieren, darin, das Verhältnis des abgestrahlten Störlichtes und des abgestrahlten Nutzlichtes bei einer fest definierten Fremdlichtbedingung anzugeben.

Der Vorteil dieser Bewertung gegenüber  $F$  besteht darin, dass bei  $F$   $E_{Ff}$  angegeben wird, welches bei normierten Bedingungen immer gleich ist. Bei nicht normierten Bedingungen ist  $F$  jedoch sowohl von der Leuchte als auch den Messbedingungen abhängig, was die Nutzung von  $F$  zur vergleichenden Bewertung von Leuchten untereinander erschwert.

#### 5.2.1 Definition der Störanfälligkeit für den Fernbereich

Das von der Leuchte ohne Fremdlichteinfluss in Hauptausstrahlrichtung ausgestrahlte Nutzlicht wird über die Lichtstärke  $I$  angegeben, das bei ausgeschaltetem Signal durch Fremdlicht entsprechend der Festlegung in Abschnitt 2.9.5.1 erzeugte Störlicht mit der Phantom-Lichtstärke  $I_{Ph}$ . Die Störanfälligkeit  $S_F$  einer Leuchte wird als Quotient aus Störlicht und Nutzlicht angegeben (Formel 5.1).

$$S_F = \frac{I_{Ph}}{I} \quad (5.1)$$

Die in Formel 5.1 angegebene Störanfälligkeit  $S_F$  einer Leuchte ist zu benutzen, wenn die Störung im Fernbereich (siehe Abschnitt 2.3.1) bewertet werden soll.

#### 5.2.2 Definition der Störanfälligkeit für den Nahbereich

Für eine Bewertung der Störung im Nahbereich (siehe Abschnitt 2.3.2) sind Nutzlicht und Störlicht nicht anhand ihrer Lichtstärken, sondern anhand ihrer Leuchtdichten zu vergleichen.

Auch hier ist zur Erzeugung des Störlichtes die in Abschnitt 2.9.5.1 erläuterte Festlegung über die Fremdlichtquelle zu berücksichtigen.

Das auf der Leuchte ohne Fremdlichteinfluss aus Hauptausstrahlrichtung sichtbare Nutzlicht wird über die Leuchtdichte  $L$  angegeben, das bei ausgeschaltetem Signal durch Fremdlicht erzeugte Störlicht mit der Phantom-Leuchtdichte  $L_{Ph}$ . Die Störanfälligkeit  $S_N$  einer Leuchte wird als Quotient aus Störlicht und Nutzlicht angegeben (Formel 5.2).

$$S_N = \frac{L_{Ph}}{L} \quad (5.2)$$

Die Störanfälligkeit  $S_N$  entspricht dem Kehrwert des nach DIN EN 12368:2006 [DifN06b] in Formel 2.27 angegebenen Faktors  $F_{Ph}$ .

Die beiden Störanfälligkeiten  $S_F$  und  $S_N$  sollten bei gleichen Leuchten den gleichen Wert aufweisen. In der Praxis ist die Messung des Phantomlichtes jedoch mit etlichen Problemen verbunden.

### 5.3 Messtechnische Erfassung der Phantomlichteffekte

#### 5.3.1 Messtechnisches Vorgehen für eine möglichst exakte Bestimmung der Störanfälligkeit über die Lichtstärke

Für eine korrekte Messung der Lichtstärken darf kein Streulicht im Messraum vorhanden sein. Besonders der Hintergrund hinter der zu messenden Leuchte muss dunkel sein. Dies ist bei Beleuchtung mit einem sehr hellen Scheinwerfer, wie er als Sonnensimulator für das Erreichen der geforderten hohen Fremdlicht-Beleuchtungsstärken notwendig ist, nicht erreichbar.

Das Streulicht kann minimiert werden, in dem zwischen Leuchte und Scheinwerfer eine exakt an die Leuchte angepasste Blende gesetzt wird.

Eine weitere Möglichkeit, die Genauigkeit der Messung zu erhöhen, besteht darin, sowohl die Phantom-Lichtstärke  $I_{Ph}^*$  als auch das Hintergrundlicht  $I_0$  zu messen. Für die Messung des Hintergrundlichtes ist dabei das Fremdlicht in gleicher Weise wie bei der Phantommessung auf den Montageplatz zu richten. Jedoch muss die Leuchte bei der Hintergrundlichtmessung entfernt sein. Das Hintergrundlicht wird als Lichtstärke  $I_0$  gemessen. Es ist darauf zu achten, dass der Montageplatz und die Leuchtenhalterung möglichst wenig Licht reflektieren.

Die korrigierte Phantom-Lichtstärke  $I_{Ph}$  berechnet sich nach Formel 5.3.

$$I_{Ph} = I_{Ph}^* - I_0 \quad (5.3)$$

Damit kann die Störanfälligkeit  $S_F$  einer Leuchte im Fernbereich nicht nur wie in Formel 5.1 angegeben berechnet werden, sondern inklusive der Korrektur des Hintergrundlichtes wie in Formel 5.4 gezeigt. Tabelle 5.1 zeigt in einer Übersicht die notwendigen Messungen und Zustände der Lichtquellen für das Generieren der für Formel 5.4 notwendigen Messwerte.

$$S_F = \frac{I_{Ph}^* - I_0}{I} \quad (5.4)$$

Messwert	Leuchte	Fremdlicht
$I_{Ph}^*$	aus	ein
$I_0$	entfernt	ein
$I$	ein	aus

**Tabelle 5.1:** Messungen und Zustände der Lichtquellen für Formel 5.4

Zu beachten ist, dass auch die korrigierte Phantom-Lichtstärke  $I_{Ph}$  nicht immer korrekt angegeben werden kann. Befinden sich zum Beispiel Karosserieteile an der Leuchte, so kann auch an diesen das Fremdlicht reflektiert als Oberflächenreflex gespiegelt werden und den Messwert verfälschen.

#### 5.3.2 Messtechnisches Vorgehen zur Bestimmung der Störanfälligkeit über die Leuchtdichte

Für eine korrekte Messung der Leuchtdichten ist der Hintergrund der Leuchte nicht entscheidend, solange er deutlich dunkler als die Leuchte selbst ist.

## 5. Phantomlicht und Color Washout

---

Bei der Messung mit einem Leuchtdichtemesser ist festzulegen, welcher Bereich der Leuchte gemessen wird. Da das Messfeld dieser Messgeräte nur in der Größe, nicht aber in der Form, angepasst werden kann, kann nur eine mittlere Leuchtdichte meist eines Teils der Leuchte bestimmt werden.

Es sollte für eine maximale Reproduzierbarkeit der Messwerte über einen möglichst die ganze Leuchte erfassenden Bereich ein einziger Mittelwert gebildet werden. Um verschiedene Leuchten untereinander vergleichen zu können, muss dieser Bereich bei allen Leuchten gleich groß sein. Heutige Leuchten weisen jedoch vollkommen unterschiedliche geometrische Formen auf. So existieren unter anderem sehr schmale, teilweise zusätzlich dreidimensional gebogene, Leuchten neben sehr großflächigen, fast kreisförmigen. Es ist daher eine Mittelwertbildung nicht über einen Bereich fester Form, sondern nur fester Größe zu bilden, um eine reproduzierbare und auf alle Leuchtengeometrien anwendbare Vorschrift zur Bestimmung der Leuchtdichte zu erhalten.

Soll mit einem großen Messfeld eine Messung für Nutzlicht und eine für Störlicht durchgeführt werden, so ist bei der Messung des Störlichtes nach dem maximalen Wert  $L_{Ph,Max}$  bei festgelegtem Messfeld zu suchen. An gleicher Position ist bei gleichem Messfeld der Wert des Nutzlichtes  $L_j$  aufzunehmen. Formel 5.2 benötigt als Messwerte jeweils einen Wert für die Leuchtdichte der Leuchte und einen für die Leuchtdichte des Phantomlichteffektes. Dies ist bei dieser nicht abrasternden Messung mit einem Leuchtdichtemessgerät jeweils der direkte Messwert. Formel 5.2 kann dann umgeschrieben werden zu Formel 5.5.

$$S_N = \frac{L_{Ph,Max}}{L_j} \quad (5.5)$$

Wird eine abrasternde Messmethode eingesetzt, so wird aus der Vielzahl der Messwerte das Maximum gewählt und die Störanfälligkeit wieder mit Formel 5.5 beschrieben.

### 5.3.3 Festlegung einer zweckdienlichen Messauflösung

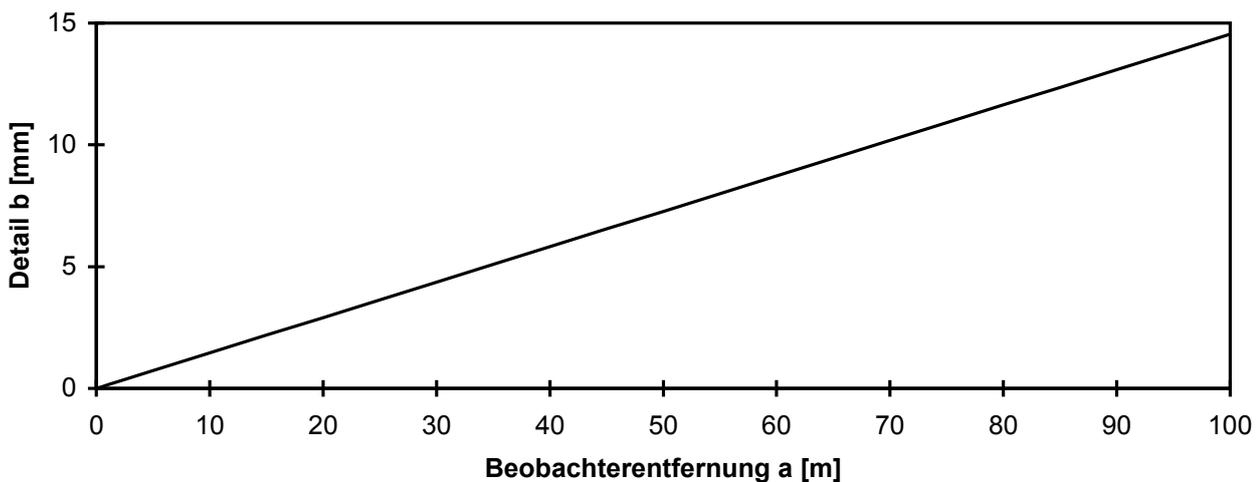
Bei einem sehr klein gewählten Messfeld kann die maximal auf der Leuchte vorkommende Leuchtdichte durch Abrastern der Leuchte ermittelt werden. Dies ist getrennt für die Nutzlicht- und die Störlichtmessung durchzuführen. Zur Ermittlung der Störanfälligkeit sind die beiden getrennt gemessenen Leuchtdichten in Beziehung zu setzen. Die ermittelten Leuchtdichten werden dabei deutlich vom gewählten Messfelddurchmesser abhängen, da Leuchtdichte-Spots durch die Mittelwertbildung rechnerisch in ihrer Leuchtdichte reduziert werden.

Jedoch ist es nicht zielführend, die Leuchte zu fein abzurastern, da kleinste Spots, sowohl bei der Phantom- als auch der Signal-Leuchtdichte, nicht relevant sind. Anhand der Sehschärfe  $s$  des Beobachters und dessen Abstand  $a$  zu der Leuchte kann nach Umformung von Formel 2.11 die kleinste noch auflösbare Spotgröße  $b$  berechnet werden (Formel 5.6).

$$b = 2 \cdot a \cdot \tan \frac{1}{2 \cdot 60 \cdot s} \quad (5.6)$$

Für eine allgemein gültige Betrachtung ist eine Sehschärfe von  $s = 2$  anzunehmen, um auch Beobachter mit sehr guter Sehschärfe zu berücksichtigen. In Bild 5.1 ist das kleinste noch erkennbare Detail  $b$  mit dieser Sehschärfe über der Beobachtungsentfernung  $a$  aufgetragen.

Ein Abstand kleiner 1 m ist nicht relevant, da dies innerhalb des Blindfeldes liegt. Mit Blindfeld wird der unmittelbar vor der Fahrzeugfront befindliche Straßenabschnitt bezeichnet, der von dem Fahrer aus durch die Verdeckung der Motorhaube nicht gesehen werden kann. Alles Licht, das



**Bild 5.1:** Kleinstes noch erkennbares Detail  $b$  eines Beobachters mit einer Sehschärfe von  $s = 2$  in Abhängigkeit von der Beobachterentfernung  $a$  innerhalb des Nahbereichs

in dieses Gebiet abgestrahlt wird, verschlechtert den Beleuchtungswirkungsgrad der Scheinwerfer. Bei dem minimalen Abstand von 1 m können unter günstigen Sehbedingungen jedoch noch Details einer Größe von  $b = 0,15$  mm unterschieden werden.

### 5.3.4 Berechnung eines abschattungsfreien Messabstandes

Für die Messung eines Details von 0,15 mm sind bei einer typischen Leuchtengröße von 0,3 m 2.000 auf 2.000 Messwerte aufzunehmen. Hochwertige Messgeräte wie zum Beispiel das Leuchtdichtemessgerät L 1009 der Firma LMT [LGB08], welches unter anderem bei den hier beschriebenen Untersuchungen benutzt wurde, weisen ein kleinstes Messfeld von zwei Minuten ( $\frac{2}{60}^\circ$ ) auf. Bei Einsatz normaler Objektive bedingt eine Messung mit einem Messfeld von 0,15 mm daher einen Messabstand von ca.  $M = 0,26$  m<sup>8</sup>.

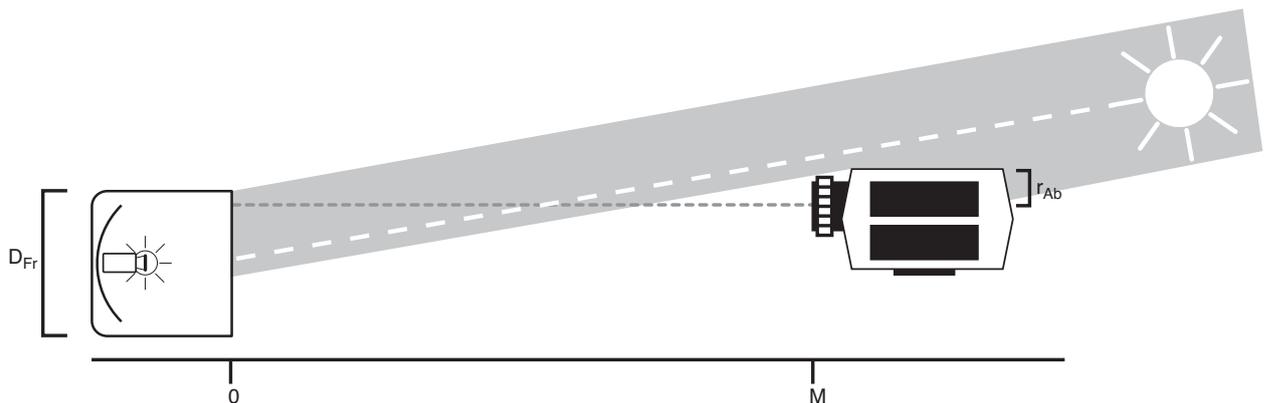
Dieser Messabstand ist bei einer direkten Messung nicht realisierbar, da das Messgerät den Messbereich abschattet. In Bild 5.2 sind die Details der Messung dargestellt. Gezeigt ist der Soll-Durchmesser des auf die Leuchte auffallenden Fremdlichtes  $D_{Fr}$ , wobei der Abfall der durch Fremdlicht auf der Leuchte hervorgerufenen Beleuchtungsstärke vom Zentrum zum Rand weniger als zehn Prozent beträgt. Die Variable  $r_{Ab}$  gibt die Größe des Messgerätes oberhalb seiner optischen Achse an und beträgt ca.  $r_{Ab} = 0,1$  m.  $M$  gibt den Abstand des Messgerätes von der Leuchte an.

Berechnet mit den Werten  $r_{Ab} = 0,1$  m und  $D_{Fr} = 0,3$  m und dem nach Abschnitt 2.9.5.1 definierten Fremdlichteinfall unter  $10^\circ$  ergibt sich nach Formel 5.7 ein Mindestabstand von  $M_G = 2,3$  m, wobei  $M_G$  die Messposition angibt, bei der das Messgerät in keiner Messposition eine Abschattung des Messobjektes verursacht.

$$M_G = \frac{D_{Fr} + r_{Ab}}{\tan 10^\circ} \quad (5.7)$$

Der Messabstand könnte deutlich verringert werden, wenn eine Abschattung der Leuchtenteile, die nicht direkt gemessen werden, zulässig wäre. Bei einer Leuchte, bei der nur Reflex-Phantomlicht entsteht, gäbe es hierbei keine Messfehler. Bei den anderen Phantomlichtarten entstehen

<sup>8</sup>Der Messabstand  $M$  wird aus dem kleinsten Detail  $b$  und der Messfeldgröße berechnet:  $M = \frac{b}{\tan \frac{2}{60}^\circ}$



**Bild 5.2:** Messung von Phantomlichteffekten mit einem Leuchtdichtemessgerät

jedoch Messfehler, da das Licht nicht zwingend an den Stellen eindringt, an denen es zur Wirkung kommt. Daher kann in der Praxis der Messabstand nicht auf Kosten einer Abschattung der Leuchte verringert werden.

Nur eine Minimierung der Abmessungen des Messgerätes verringert den Messabstand bei gleichen Anforderungen an die zu messende Spotgröße. Im Extremfall beträgt  $r_{Ab} = 0,0$  m. Damit ergibt sich nach Formel 5.7 ein Mindestabstand von  $M_G = 1,7$  m. Dies ist immer noch deutlich größer als der geforderte Abstand von  $M = 0,26$  m.

### 5.3.5 Reduzierung der Spot-Leuchtdichten durch Mittelwertbildung

Für die Praxis bedeutet das Ergebnis von  $M_G$  in Abschnitt 5.3.4, dass bei einer abrasternden Messung der Leuchtdichte einer Leuchte ohne Abschattung nicht so kleine Details gemessen werden können, wie aus physiologischer Sicht gefordert wird. Wird anstelle der geforderten Detailgröße von  $b = 0,15$  mm die vom Messaufbau kleinste mögliche Detailgröße gemessen, so ist der gemessene Maximalwert meist geringer als der tatsächliche, da er über die Mittelwertbildung mit seiner dunkleren Umgebung abgeschwächt wird. Dies ist in Bild 5.3 schematisch gezeigt<sup>9</sup>.

Bei einem gewählten Messfeld von 2 Minuten und einem Messabstand ohne Abschattung von  $M_G = 2,3$  m besitzt das Messfeld auf der Leuchte einen Durchmesser von ca.  $b^p = 1,34$  mm. Es ist fast zehnfach so groß, wie gefordert.

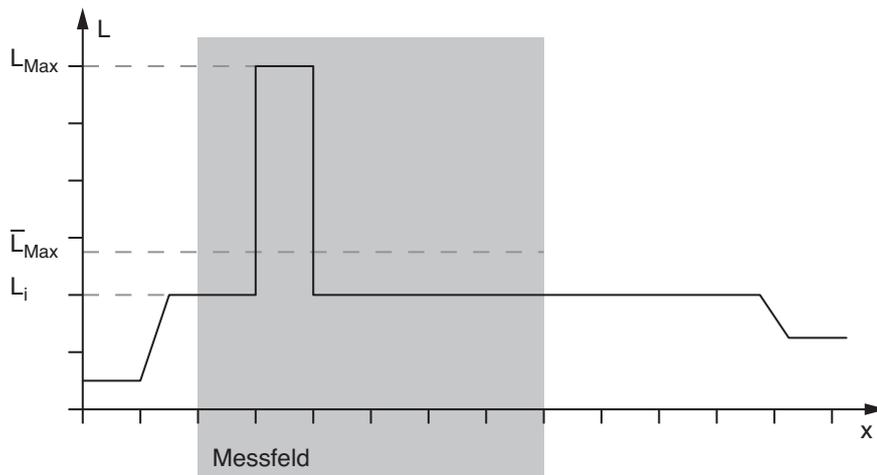
Die Leuchtdichte von Spots wird deutlich reduziert durch die Mittelwertbildung. Der Mittelwert wird entsprechend Formel 5.8 aus der Spot-Leuchtdichte  $L_{Max}$  und den Umfeldleuchtdichten  $L_i$  gebildet.

$$\bar{L}_{Max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L_i = \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^{n-1} L_i + L_{Max} \right) \quad (5.8)$$

Die Umgebungsleuchtdichte wird als dunkel ( $L_i = 0$  cd/m<sup>2</sup>) angenommen. Dadurch reduziert sich  $L_{Max}$  von Formel 5.8 zu  $\bar{L}_{Max}$  in Formel 5.9

$$\bar{L}_{Max} = \frac{1}{n} L_{Max} \quad (5.9)$$

<sup>9</sup>Es wird der arithmetische Mittelwert berechnet entsprechend  $\bar{L}_{Max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L_i$  mit den gemessenen Einzelleuchtdichten  $L_i$



**Bild 5.3:** Ein Spot mit hoher Leuchtdichte wird bei Messung mit einem deutlich größeren Messfeld durch Mittelwertbildung mit seiner dunkleren Umgebung abgeschwächt.

Die Anzahl  $n$  der geforderten Messpunkte in dem tatsächlichen Messfeld berechnet sich als Verhältnis der beiden Messfeldgrößen mit der Messfeldgröße  $A_b$  und deren Durchmesser  $b$  und der Messfeldgröße  $A_{b^p}$  und deren Durchmesser  $b^p$  laut Formel 5.10.

$$n = \frac{A_{b^p}}{A_b} \quad \text{mit } A = \pi\left(\frac{b}{2}\right)^2 \quad (5.10)$$

Dies führt nach Umformung zu Formel 5.11. Nach Einsetzen der Werte 0,15 mm für  $b$  und 1,34 mm für  $b^p$  lautet das Ergebnis  $n = 80$ .

$$n = \frac{\frac{1}{4}\pi(b^p)^2}{\frac{1}{4}\pi(b)^2} = \frac{(b^p)^2}{(b)^2} \quad (5.11)$$

Bei sehr hellen Spots in dunkler Umgebung kann der Messwert daher auf den achtzigsten Teil des tatsächlichen Wertes abgeschwächt werden. Dadurch werden die sehr hohen Phantomlicht-Leuchtdichten von einigen Millionen Candela pro Quadratmeter messtechnisch scheinbar auf das Niveau von Leuchtdichten heutiger Bremsleuchten reduziert.

Falls die Leuchte über ein *brillantes* Aussehen verfügt, wobei sehr viele kleine Leuchtdichte-Spots für ein *Funkeln* der Leuchte sorgen, hängt der ermittelte Leuchtdichtewert  $\bar{L}_{Max}$  von der Anzahl der zufällig getroffenen Leuchtdichte-Spots ab. Bei kleinen geometrischen Abweichungen im Millimeterbereich zwischen zwei sonst identischen Messungen können Messunterschiede von bis zu 400 Prozent auftreten<sup>10</sup>.

### 5.3.6 Messung mit einer Leuchtdichtekamera

Bei der berechneten Anzahl der zu messenden Punkte von vier Millionen<sup>11</sup> ist nicht nur aus geometrischen Überlegungen, sondern auch aus Gründen der Messdauer die Messung mit einem

<sup>10</sup>Die Abrasterung erfolgt in zwei Raumrichtungen. In jede Richtung können entweder ein oder zwei Spots gleichzeitig erfasst werden, wenn das Messfeld etwas größer als der durchschnittliche Spotabstand ist. Dies entspricht einem Messunterschied des Faktors zwei pro Richtung, entsprechend einem Faktor vier für die Messung.

<sup>11</sup>Dies entspricht den in Abschnitt 5.3.4 erwähnten 2.000 auf 2.000 Messwerten mit  $b = 0,15$  mm.

## 5. Phantomlicht und Color Washout

---

Leuchtdichtemessgerät nicht angebracht. Bei einer Messdauer pro Punkt von einer Sekunde beträgt die komplette Dauer einer Messung über 46 Tage. Auch bei einer Messung mit fast zehnfach größerem Messfelddurchmesser  $b^p = 1,3$  mm sind noch 224 auf 224 Messwerte zu erfassen, welches einer Dauer von 14 Stunden entspricht. Daher bietet sich aufgrund der Messpunktanzahl die Erfassung durch eine Leuchtdichtekamera an.

Beispielhaft für eine Leuchtdichtekamera werden die geometrischen und optischen Größen für das Gerät LMK 98 der Firma TechoTeam Bildverarbeitung GmbH untersucht. Der Bildaufnehmer verarbeitet 1.300 mal 1.030 Pixel laut den Angaben in [Teca]. Für ein Vollbild der Leuchte sind daher vier Bilder nebeneinander aufzunehmen.

Der Messabstand ist von dem gewählten Objektiv und dem kleinsten zu messenden Detail abhängig. Laut [Teca] kann die Messung mit der geforderten Objektfeldgröße  $D_{Fr} = 0,3$  m und der Auflösung  $b = 0,15$  mm mit einem Objektiv der Brennweite  $f' = 100$  mm in einem Abstand von ca.  $2,2$  m<sup>12</sup> erfolgen. Da der Abstand der optischen Achse zu der Oberkante des Gehäuses dieses Messgerätes kleiner  $r_{Ab} = 0,07$  m ist, kann nach Formel 5.7 die Messung ohne abschattungsbedingte Fehler durchgeführt werden.

### 5.3.6.1 Empfohlene Überabtastung bei Benutzung von Leuchtdichtekameras

Zur Messung kleinster Spots muss der Messwert jedes einzelnen Pixel möglichst exakt sein. Daher sollte die Messung nicht im Farbmodus der Kamera stattfinden, da dann Messungenauigkeiten durch das nicht pixelgenaue Übereinstimmen der verschiedenen Farbkanäle auftreten. Opteema [Fis] gibt einen Versatz von 2–3 Pixel an. Somit sollte im Farbmodus die Messauflösung mindestens dreifach so hoch gewählt werden, wie das kleinste zu messende Detail, um die bei Helligkeitskanten auftretenden Messfehler ignorieren zu können. Durch diese Beschränkung verringert sich die tatsächliche Auflösung zur Messung kleinster Spots um den Faktor drei. Opteema empfiehlt für messtechnisch hochwertige Ergebnisse sogar, mindestens zehn Pixel für kleine Details zu benutzen.

### 5.3.6.2 Betrachtungen der erreichbaren Dynamik von Leuchtdichtekameras

Eine weitere Einschränkung der Messgenauigkeit wird durch die Dynamik des Systems aufgestellt. Die in den Datenblättern (zum Beispiel [Tecb]) angegebene Dynamik von bis zu 1 : 1.000.000 bei der Durchführung von HighDyn-Messungen, bei der die selbe Szene mit verschiedenen Belichtungszeiten aufgenommen und diese Bilder zu einem Bild hoher Dynamik zusammengesetzt werden, ist nur bei sehr speziellen Messszenarien erreichbar.

In der Praxis treten bei Phantomlichteffekten höhere Kontraste auf. So gibt Hahn [Hah07b] Messwerte von  $4.000.000$  cd/m<sup>2</sup> bei Spiegel-Phantomlicht an. Der Hintergrund der Leuchte sollte hingegen kleiner  $1$  cd/m<sup>2</sup> sein, so dass in einem einzigen Messbild eine Dynamik von über 1 : 4.000.000 abzubilden wäre.

Bei Messungen, bei denen ein großer Lichtstrom in das optische System der Kamera eindringt, wie dies bei Phantomlichtmessungen vorkommen kann, entsteht ein nicht vernachlässigbarer Anteil

---

<sup>12</sup>Die Berechnung des Abstandes erfolgt durch Quotientenbildung. Das Verhältnis der Auflösung zu der Messentfernung beträgt laut der in [Teca] veröffentlichten Tabelle, je nach Rundung,  $\frac{2}{50}$  oder  $0,07$ . Bei einer geforderten Auflösung von  $0,15$  mm ergibt sich somit ein Messabstand von  $2,25$  m oder  $2,14$  m. Der Mittelwert dieser beiden Abstände beträgt  $2,2$  m. Leider sind die Werte für  $f$  und  $z'$  der optischen Abbildung für die Objektive nicht verfügbar, so dass diese Annäherung gewählt werden muss, statt das Ergebnis auf eine analytische Berechnung zurückführen zu können.

an Streulicht in der Kamera. [Teca] und [Fis] geben diesen mit zwei Prozent an. Dieser Streulichtanteil senkt die Dynamik der Messung auf Werte von ca. 1 : 50. Dies bedeutet für Phantomlichtuntersuchungen, dass der eigentlich schwarze Hintergrund der Leuchte in den Messwerten mit bis zu 80.000 cd/m<sup>2</sup> angegeben wird. Dadurch kann bei aktuellen, mit LEDs hoher Leuchtdichte bestückten Leuchten trotz HighDyn-Messungen nicht zwischen den Leuchtdichten der Bremsleuchte und des schwarzen Hintergrundes unterschieden werden, wenn gleichzeitig Fremdlicht auf die Leuchte fällt.

Eigene Untersuchungen mit durch Fremdlicht bestrahlte Leuchten ergeben eine Dynamik von 1 : 500 bei Optimierung des Messaufbaus. Dies bedeutet jedoch immer noch, dass absolut dunkle Bereiche mit Messwerten von einigen tausend Candela pro Quadratmeter angegeben werden.

Da die absoluten Leuchtdichtewerte bei der Messung der Phantomlichteffekte deutlich oberhalb der Grenzwerte des Bildaufnehmers liegen, müssen für diese Messungen der Leuchtdichtekamera Graufilter vorgesetzt werden. Dadurch wird der Streulichtanteil gegenüber den oben erwähnten zwei Prozent noch um jeweils ca. zwei Promille pro benutztem Graufilter erhöht, da an beiden optischen Grenzflächen des Filters vier Prozent Reflexion auftreten.

Für die Erfassung von  $L$ ,  $L_{Ph}$ ,  $L_{Ph,Max}$  und  $L_j$  nach Formel 5.2 und Formel 5.5, zusammengefasst in Tabelle 5.2, sind jeweils andere Kombinationen von Graufiltern notwendig. Es können daher nicht bei allen Messungen die gleichen Graufilter eingesetzt werden, so dass bei den unterschiedlichen Messungen unterschiedliche Streulichtanteile auftreten.

Formel	Messwert	Leuchte	Fremdlicht	Messort
5.2	$L$	ein	aus	Hauptausstrahlrichtung
5.2	$L_{Ph}$	aus	ein	Hauptausstrahlrichtung
5.5	$L_{Ph,Max}$	aus	ein	Globales Leuchtdichtemaximum der Leuchte
5.5	$L_j$	ein	aus	An Messort von $L_{Ph,Max}$

**Tabelle 5.2:** Messungen und Zustände der Lichtquellen für Leuchtdichtemessungen nach Formel 5.2 und Formel 5.5

Die Wahl der Graufilter scheint jedoch in der Praxis nicht kritisch zu sein. So sind bei Verwendung eines Graufilters, bei dem gerade keine Übersteuerung mehr vorliegt, im Vergleich zu einem stärker absorbierenden Graufilter kaum Unterschiede in den Messwerten festzustellen. Auch zeigen Messwerte mit unterschiedlichen Graufiltern keine Änderung der aufgenommenen Bildgeometrie. Die durch die optischen Grenzflächen des Filters erzeugten Streulichtbilder sind nicht exakt zu lokalisieren.

### 5.3.6.3 Festlegung der leuchtenden Fläche zur Berechnung der Störanfälligkeit

Zur Berechnung der Störanfälligkeit nach Formel 5.2 unter Benutzung einer Leuchtdichtekamera ist die leuchtende Fläche des Signals zu bestimmen. Dies erfolgt durch Festlegung eines Schwellwertes im Leuchtdichtebild, in dem alle Pixel mit Leuchtdichtewerten oberhalb des Schwellwertes zu der leuchtenden Fläche gezählt werden. Der Schwellwert sollte sich an den Leuchtdichten von [Arm01] und [Rip01a] orientieren, die diese für den Tagfall empfehlen. Daher wird als praktikabler Wert als Zusammenfassung der Vorschläge aus [Arm01] und [Rip01a] eine Mindestleuchtdichte von 11.000 cd/m<sup>2</sup> für Fahrtrichtungsanzeiger und Bremsleuchten vorgeschlagen. Dass diese Leuchtdichten in der Praxis erreicht werden können, ist unter anderem [Rip01a] zu entnehmen. Dort wird eine mittlere Leuchtdichte für 71 Leuchten von in den letzten zehn Jahren erstmals in Europa in Verkehr genommenen Pkws angegeben. Die Werte der Bremsleuchten betragen 16.000 cd/m<sup>2</sup> und die der Fahrtrichtungsanzeiger 30.000 cd/m<sup>2</sup>.

## 5. Phantomlicht und Color Washout

---

Ein Schwellwert von  $11.000 \text{ cd/m}^2$  zur Ermittlung der leuchtenden Fläche erscheint wahrnehmungspsychologisch korrekt und praxisgerecht zu sein.

Als Grundlage für die Ermittlung ist ein Leuchtdichtebild mit der in Abschnitt 5.3.4 geforderten Auflösung aufzunehmen. Bei der Aufnahme muss die Signalfunktion eingeschaltet sein. Alle anderen Lichtquellen im Messraum sind auszuschalten, so dass keine Lichtreflexe auf der Leuchte und so wenig wie möglich Streulichte effekte in der Optik der Kamera entstehen.

Die leuchtende Fläche einer Signalfunktion wird bestimmt, in dem alle Pixel des Bildes mit einer Leuchtdichte größer  $11.000 \text{ cd/m}^2$  als Bestandteil der leuchtenden Fläche gezählt werden. Die Summe der Pixel kann in eine Größe der leuchtenden Fläche, angegeben in Quadratmeter, umgerechnet werden. Die Signal-Leuchtdichte  $\bar{L}$  der Leuchte ist der Mittelwert aller Pixel mit einer Leuchtdichte größer oder gleich des Schwellwertes.

Wenn durch dieses Verfahren Pixel als Signalfäche ausgezeichnet sind, so wird in eben diesen Pixeln bei gleicher Anordnung von Leuchtdichtekamera und Leuchte die  $\bar{L}_{ph}$ -Leuchtdichte bestimmt. Auch hierzu ist ein Leuchtdichtebild mit entsprechender Auflösung aufzunehmen. Die  $\bar{L}_{ph}$ -Leuchtdichte berechnet sich als Mittelwert aus den Leuchtdichten aller bei Fremdlicht gemessenen Pixel, die bei der Messung von  $\bar{L}$  als Teil der leuchtenden Fläche definiert worden sind.

Unter Verwendung der so ermittelten Werte für die Signal-Leuchtdichte  $\bar{L}$  und die Phantomlicht-Leuchtdichte  $\bar{L}_{ph}$  kann sowohl die Störanfälligkeit für den Nahbereich nach Formel 5.2 als auch der tatsächliche Faktor zwischen Signal- und Fremdlicht nach Formel 2.27 bestimmt werden.

### 5.3.6.4 Abdeckung von Leuchtenteilen zur Erhöhung der Dynamik bei Leuchtdichteaufnahmen

Da für die Bewertung der Störanfälligkeit nur die Bereiche der Leuchte betrachtet werden, die bei Messung von  $L$  als Bestandteil der leuchtenden Fläche erkannt werden, ist es legitim und bei manchen Leuchten zur Verringerung des Streulichtes in der Optik der Leuchtdichtekamera sogar notwendig, Leuchtenteile für die Messung der Leuchtdichte  $L_{ph}$  abzudecken, die nicht Bestandteil dieser leuchtenden Fläche sind.

### 5.3.6.5 Alternative Festlegungen der leuchtenden Fläche

Anstelle die leuchtende Fläche über einen Schwellwert zu bestimmen, könnte die Festlegung entsprechend den Bestimmungen der ECE Regelungen erfolgen. Die Eingrenzung der Bewertung der Störanfälligkeit auf die aktive Signalfäche wird jedoch gewählt, da sonst keine sinnvolle ausgezeichnete Fläche definiert werden kann. Denn die in den ECE Regelungen anhand der konstruktiven Eigenschaften der Leuchte ermittelte leuchtende Fläche hat keinen direkten Einfluss auf die Wahrnehmbarkeit der Leuchte. Auch die nach ECE Regelungen anhand der 98-Prozent Regel ermittelte Fläche einer leuchtenden Fläche beschreibt nicht direkt die Wahrnehmbarkeit der Fläche, sondern beschränkt die Form der Fläche auf ein, wahrnehmungstechnisch oft falsches, Viereck. Die Eingrenzung auf eine feste Form und Größe ist deutlich zu unflexibel und wird vielen modernen Leuchten nicht gerecht.

Die Alternative, als Auswahl das gesamte Bauteil *Leuchte* zu wählen, ist zu grob, da dann in manchen Fällen undurchsichtige Karosserieteile mit zu bewerten wären. Es darf zwar nicht ignoriert werden, dass auch auf nicht lichttechnischen Bauteilen, zum Beispiel den Karosserieteilen an Leuchten, aber auch an vielen anderen Stellen der Karosserie Glanzeffekte, hervorgerufen durch Fremdlicht, entstehen können, die in ihrer Art ähnlich dem Reflex-Phantomlicht sind. Jedoch sollte

die Bewertung der Funktion von Leuchten sich auf deren optische Bauteile beschränken, da sonst nur das Fahrzeug in seiner Gesamtheit bewertet werden könnte, was derzeit als zu komplex gilt.

### 5.3.7 Vorschlag für eine messtechnische Erfassung

#### 5.3.7.1 Psychophysikalische Anforderungen bezüglich der Störanfälligkeit

Aus physiologischer Sicht ist zur Bewertung der Phantomlichteffekte das Störlicht mit dem Nutzlicht ins Verhältnis zu setzen. Es ist ohne Zweifel, dass das Nutzlicht besser erkennbar sein muss als das Störlicht. Um wie viel das Nutzlicht dabei stärker sein muss als das Störlicht wird letztendlich bestimmt durch die noch tolerable Fehlerrate beziehungsweise Reaktionszeitverlängerung. Dies wird in Abschnitt 2.9.4.2 genauer diskutiert.

Als Bestimmung der Wahrnehmungsleistung wird die Reaktionszeit verwendet. Die Verlängerung dieser sollte durch Fremdlicht nicht größer werden als die Verlängerung durch Nutzung verschiedener Lichtquellen<sup>13</sup> in den Leuchten. Unter dieser Voraussetzung ist eine Verlängerung von 100 Millisekunden noch akzeptabel. Entsprechend den Ergebnissen bezüglich Überlappung reicht dafür ein Faktor  $F_{Ph} = 3$  aus.

Jedoch muss eine Erhöhung des Nutzlichtes um den Faktor drei gegenüber dem Störlicht nicht nur in Hauptausstrahlrichtung der Leuchte erreicht werden, sondern in dem gesamten, für das Erkennen von Signallichtern relevanten, Bereich. In [MKKS07] ist unter Berücksichtigung aktueller Straßengeometrien als relevanter Raum ein horizontaler Winkelbereich von  $\pm 15^\circ$  und ein vertikaler Winkelbereich von  $\pm 5^\circ$  erkannt worden.

#### 5.3.7.2 Messtechnische Einschränkungen bei der Bestimmung der Störanfälligkeit

Seitens der Messtechnik stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung, um die Phantomlichteffekte zu erfassen. Die in Tabelle 5.3 angegebenen Vorgehensweisen sind in den vorangehenden Abschnitten näher beleuchtet worden.

Auf Grund der in Abschnitt 5.3.1 diskutierten Problematik bezüglich der Reflexionen auf Teilen der Leuchte, die definitiv nicht der leuchtenden Fläche zuzuordnen sind, sollten keine Verfahren, die Lichtstärken benutzen, zur Bewertung von Phantomlichteffekten verwendet werden. Die Reflexionen können die Messwerte der zu messenden Lichtstärken verfälschen, ohne dass die Größe des Fehlers genau angegeben werden kann.

Für die Bewertung der Phantomlichteffekte sind sowohl die Veränderungen der Farbe als auch der Leuchtdichte zu beachten<sup>14</sup>. Jedoch hängt die Veränderung der Farbe des Signallichtes durch Fremdlicht von dem Leuchtdichteverhältnis zwischen Signal- und Fremdlicht ab. Daher sollte die Bewertung über die Farbkoordinaten nicht weiter verfolgt werden, da die Leuchtdichteunterschiede dabei nur indirekt eingehen. Weiterhin entspricht die Messung mit einem Dreibereichsfarbmesskopf in weiten Teilen der Messung von Lichtstärken und ist daher mit der gleichen, oben angesprochenen Messfehler-Problematik behaftet.

---

<sup>13</sup>Aktuell sind sowohl Glühlampen mit Anstiegszeiten größer 200 Millisekunden als auch LEDs mit Anstiegszeiten kleiner einer Millisekunde zugelassen.

<sup>14</sup>Bei den Messungen an Lichtsignalanlagen werden diese beiden Aspekte betrachtet. Siehe dazu DIN EN 12368 [DIfN06b] Abschnitt 8.4 bis 8.6.

## 5. Phantomlicht und Color Washout

Abschnitt	Formel	Messwerte
2.9.2.1	$F = \frac{I_{Ph}}{E_{Fr}}$	Phantom-Lichtstärke $I_{Ph}$ Fremdlicht-Beleuchtungsstärke $E_{Fr}$
2.9.4.2	$F_{Ph} = \frac{L}{L_{Ph}}$	Mittlere Signal-Leuchtdichte $L$ Phantomlicht-Leuchtdichte $L_{Ph}$
2.9.2.2	<i>Grenzen nach ECE</i>	Farbkoordinaten $x, y$
2.9.2.3	$C_{Ph} = \frac{L - L_{Ph}}{L_{Ph}}$	Signal-Leuchtdichte $L$ Phantomlicht-Leuchtdichte $L_{Ph}$
5.2.1	$S_F = \frac{I_{Ph}}{I}$	Signal-Lichtstärke $I$ Phantom-Lichtstärke $I_{Ph}$
5.2.2	$S_N = \frac{L_{Ph}}{L}$	Signal-Leuchtdichte $L$ Phantomlicht-Leuchtdichte $L_{Ph}$
5.3.1	$S_F = \frac{I_{Ph}^* - I_0}{I} = \frac{I_{Ph}}{I}$	Signal-Lichtstärke $I$ Hintergrundlicht $I_0$ Phantom-Lichtstärke $I_{Ph}^*$ Korrigierte Phantom-Lichtstärke $I_{Ph}$
5.3.2	$S_N = \frac{L_{Ph,Max}}{L_j}$	Maximale Störlicht-Leuchtdichte $L_{Ph,Max}$ Signal-Leuchtdichte $L_j$ am Ort von $L_{Ph,Max}$
5.3.6.3	$S_N = \frac{\bar{L}_{Ph}}{\bar{L}}$	Mittlere Signal-Leuchtdichte der leuchtenden Fläche $\bar{L}$ Mittlere Phantomlicht-Leuchtdichte der leuchtenden Fläche $\bar{L}_{Ph}$

**Tabelle 5.3:** Verfahren zur messtechnischen Erfassung von Phantomlichteffekten

Die Bewertung durch Messung der Leuchtdichte mit einem Leuchtdichtemessgerät<sup>15</sup> durchzuführen ist bei den heutigen Leuchtenformen, wie in Abschnitt 5.3.2 erläutert, nicht zielführend.

Die mangelhafte Dynamik aktueller Leuchtdichtekameras bei Messungen von Phantomlicht birgt etliche Probleme und verhindert genaue Messungen. Jedoch können durch Benutzung von Schwellenwerten praxistaugliche Leuchtdichten für die Stör- und Nutzlichtverhältnisse angegeben werden.

Bei Betrachtung der in Tabelle 5.3 angegebenen Formeln fällt auf, dass fast alle ein Verhältnis zwischen einer Signal-Leuchtdichte und einer Phantomlicht-Leuchtdichte angeben.  $F_{Ph}$  stellt dabei den Kehrwert von  $S_N$  dar.

### 5.3.7.3 Bewertung der Phantomlichteffekte

Als Bewertung von Phantomlichteffekten wird, entsprechend der Auswahl in Abschnitt 5.3.7.2, die in Abschnitt 5.2.2 aufgestellte Formel 5.2 gewählt. Die Leuchtdichten sind gemäß Abschnitt 5.3.6.3 mit einer Leuchtdichtekamera zu ermitteln, wobei nur die leuchtende Fläche des zu bewertenden Signallichtes zu berücksichtigen ist. Zusammen mit dem in Abschnitt 5.3.7.1 geforderten Faktor  $F_{Ph} = 3$ , dessen Kehrwert die Störanfälligkeit  $S_N = 0,33$  ist, ergibt sich als Vorgehen für die Bewertung:

1. Messung der Signal-Leuchtdichte  $\bar{L}$  mit eingeschalteter Signalfunktion der Leuchte und ausgeschaltetem Fremdlicht

<sup>15</sup>Schon in [Kli02b] wird erwähnt, dass zur Bestimmung der Leuchtdichte und der leuchtenden Fläche von Leuchten Leuchtdichtekameras besser geeignet sind als Leuchtdichtemessgeräte.

2. Messung der Phantomlicht-Leuchtdichte  $\bar{L}_{Ph}$  mit ausgeschalteter Signalfunktion der Leuchte und eingeschaltetem Fremdlicht
3. Berechnung der Störanfälligkeit  $S_N$  mit

$$S_N = \frac{\bar{L}_{Ph}}{\bar{L}}$$

4. Unterscheidung tolerabler Störanfälligkeit
  - $S_N > 0,33$  : Signalfunktion ist zu störanfällig
  - $S_N < 0,33$  : Signalfunktion ist ausreichend resistent

## 5.4 Untersuchung der Phantomlichteffekte anhand psychophysikalischer Untersuchungen

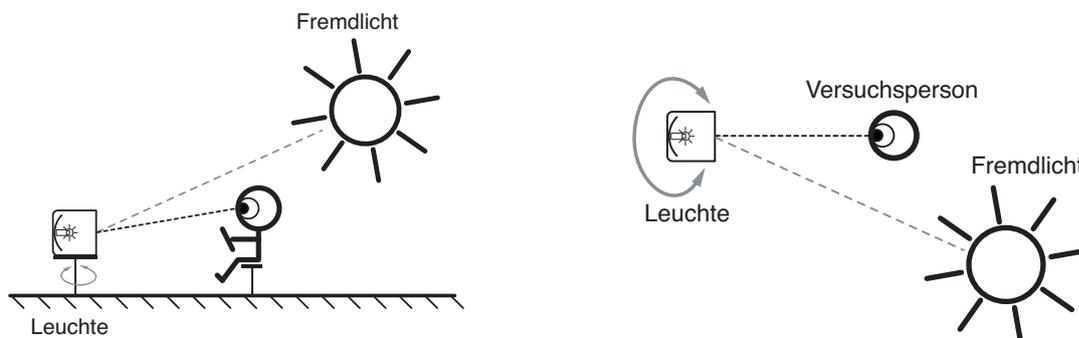
### 5.4.1 Untersuchungen unter realem Sonnenlicht

Anhand grundlegender Untersuchungen gilt es, den Beweis zu erbringen, dass Phantomlichteffekte an Rückleuchten in realem Straßenverkehr auftreten und nicht Überlegungen rein theoretischen Interesses sind. Falls diese Effekte nachgewiesen werden können, sind sie zu erforschen und in zukünftigen Leuchtenkonstruktionen nach Möglichkeit zu minimieren, da sie die Verkehrssicherheit beeinträchtigen können.

Für den Nachweis sind Standardleuchten unter normalem Tageslicht aus verschiedenen Winkeln bei verschiedenen Sonnenständen zu betrachten.

Anhand psychophysikalischer Experimente mit verschiedenen Versuchspersonen ist dabei die Wahrnehmbarkeit eines eingeschalteten Signallichtes zu bewerten.

Es werden Experimente zum Nachweis von Phantomlichteffekten bei zwei Rückleuchten mit zehn Versuchspersonen durchgeführt. Der benutzte Messaufbau ist in Bild 5.4 gezeigt. Beide Leuchten sind mit LEDs bestückt und Leuchten für die linke Anbauseite an Fahrzeugen. Die eine Leuchte (RL-01) besitzt eine gefärbte Abschlusscheibe mit Toruslinsen an ihrer Innenseite und eine als Fresnellinsenmatrix aufgebaute lichtlenkende Optik innerhalb der Leuchte. Die andere Leuchte (RL-05) weist eine klare Abschlusscheibe und frei liegende LEDs innerhalb von Reflektoren auf.



**Bild 5.4:** Versuchsanordnung der Untersuchungen von Phantomlichteffekten unter realen Bedingungen mit Seitenansicht (links) und Draufsicht (rechts)

Die Versuchsperson, deren Augenhöhe 1,2 m beträgt, befindet sich in 17 m Abstand zu der Leuchte. Diese ist mit ihrem Bezugspunkt 0,75 m oberhalb der Straßenoberfläche montiert.

## 5. Phantomlicht und Color Washout

Zu Versuchsbeginn ist die Leuchte so ausgerichtet, dass ihre Hauptausstrahlrichtung zu der Versuchsperson zeigt. Die Leuchte wird nun so weit nach rechts oder links gedreht, bis der Beobachter kein Signallicht mehr sieht. Dies wird für jede Drehrichtung fünfmal pro Betrachter durchgeführt.

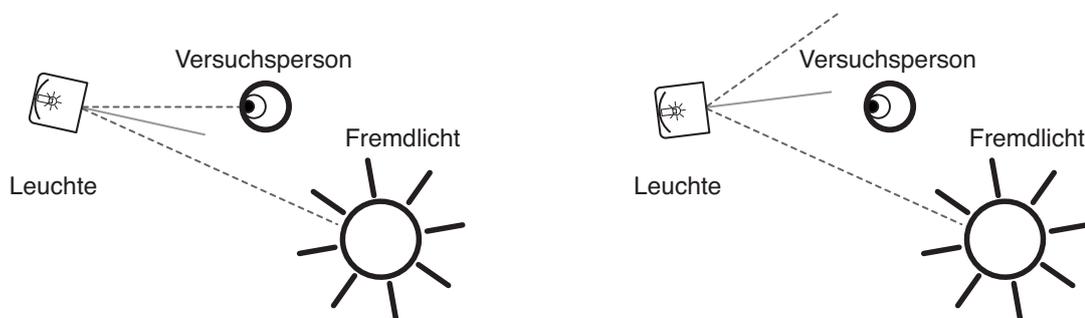
Aus den fünf gewonnenen Grenzwinkeln der Wahrnehmbarkeit wird pro Drehrichtung und für alle zehn Versuchspersonen der Mittelwert gebildet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5.4 angegeben. Dabei beschreibt der Grenzwinkel *innen* den Winkel, ab dem das Signallicht nicht mehr wahrnehmbar ist, wenn sich der Beobachter von der Hauptausstrahlrichtung Richtung Fahrzeuglängsachse, das heißt nach *innen*, bewegt.

Leuchte	Grenzwinkel innen	Grenzwinkel außen
Fahrtrichtungsanzeiger von RL-01	32°	82°
Fahrtrichtungsanzeiger von RL-05	20°	44°
Bremslicht von RL-01	27°	88°
Bremslicht von RL-05	20°	34°

**Tabelle 5.4:** Grenzwinkel der Wahrnehmbarkeit bei direkter Sonneneinstrahlung

Der Grenzwinkel *innen* wird durch Reflex-Phantomlicht begrenzt. Die Geometrie inklusive des Sonnenstrahls ist in Bild 5.5 abgebildet. Durch die Drehung wirkt die Leuchte wie ein Spiegel. Das Signallicht wird durch das gespiegelte Sonnenlicht am Ort des Beobachters überblendet. Dieser Effekt tritt bei einer Drehung der Leuchte nach außen nicht auf.

Bei der Leuchte RL-05 tritt als weiterer Effekt Spiegel-Phantomlicht auf, wenn die Leuchte nach außen gedreht wird. Daher sind deren Grenzwinkel in Tabelle 5.4 deutlich geringer als die der Leuchte RL-01, die weniger fremdlichtempfindlich ist.



**Bild 5.5:** Situation bei Reflex-Phantomlicht mit eingezeichnetem Sonnenstrahl und der Flächennormalen der Leuchte bei einer Drehung nach *innen* (links) und *außen* (rechts)

Bei Dunkelheit werden die für die Wahrnehmung geforderten Werte von innen und außen 45° für Bremsleuchten sowie innen 45° und außen 80° für Fahrtrichtungsanzeiger erreicht<sup>16</sup>.

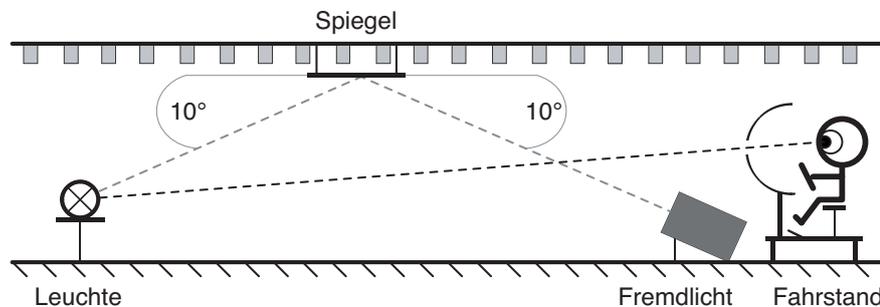
Diese Untersuchungen im Freien zeigen, dass verschiedene Phantomlichteffekte im realen Straßenverkehr entstehen und die Wahrnehmung der Signale beeinträchtigen.

Die verschiedenen Arten von Phantomlicht sind näher zu untersuchen. Dazu sind weitere Experimente im Labor unter definierten Fremdlichtbedingungen durchzuführen.

<sup>16</sup>Dies ist Teil der Prüfungen gemäß den ECE Regelungen Nummer 6 und Nummer 7, die beide Leuchten bestanden haben.

### 5.4.2 Versuchsaufbau im Labor bei festem Bestrahlungswinkel

Für die Beurteilung der Wahrnehmbarkeit von Leuchten bei Fremdlicht durch psychophysikalische Experimente wird der in Bild 5.6 gezeigte Versuchsaufbau benutzt.



**Bild 5.6:** Versuchsanordnung für psychophysikalische Untersuchungen von Phantomlichteffekten

Dabei wird die zu bewertende Leuchte mit Fremdlichteinfall von  $10^\circ$  oberhalb der Horizontalen bestrahlt. Die durch Fremdlicht bestrahlte Fläche muss die gesamte zu untersuchende Leuchte abdecken. In der Praxis bedeutet dies ein Leuchtfeld mit einem Durchmesser von ca.  $D_{Fr} = 0,3$  m. Die Realisierbarkeit dieser Forderung konnte bei einer Beleuchtungsstärke von 56.000 lx bewiesen werden, wobei der Lichtabfall vom Zentrum des Leuchtfeldes zu den Rändern bei einem Abstand zwischen Fremdlichtquelle und Leuchte von ca. 24 m weniger als zehn Prozent betragen hat. Als Fremdlichtquelle wird eine Lampe ähnlich Normlichtart D65 verwendet. Die so zur Verfügung stehende Fremdlichtquelle entspricht den Vorgaben aus Abschnitt 2.9.5.1.

### 5.4.3 Versuchsablauf der Untersuchungen im Labor

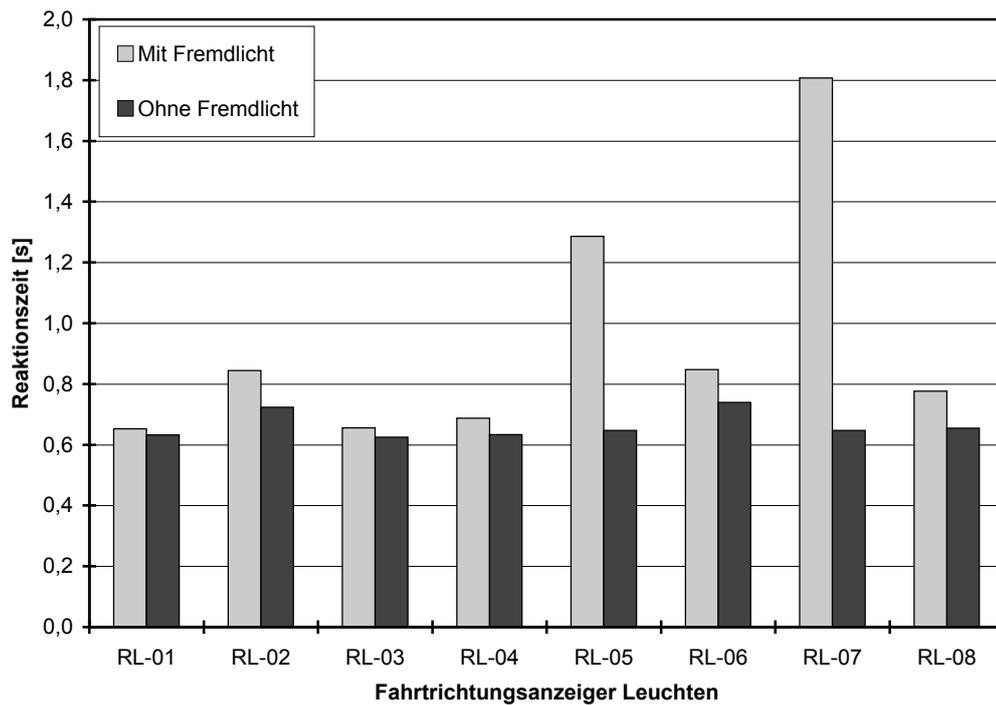
Während des Experimentes wird das zu untersuchende Signallicht der Leuchte in unregelmäßigen Zeitabständen eingeschaltet. Dabei wird die Leuchte bei einigen Darbietungen mit Fremdlicht bestrahlt. Bei einigen Darbietungen bleibt sie unbestrahlt. Wenn das Signallicht von der Versuchsperson erkannt wird, hat sie dies zu bestätigen. Dabei muss die Versuchsperson unterscheiden, ob sie einen Fahrtrichtungsanzeiger oder eine Bremsleuchte wahrgenommen hat. Ermittelt wird bei jeder Darbietung die Reaktionszeit der Versuchsperson auf das Wahrnehmen des Signals. Anhand des Reaktionszeitunterschiedes zwischen dem bestrahlten und unbestrahlten Falle wird der Einfluss des Fremdlichtes auf die Wahrnehmbarkeit des Signals ermittelt.

### 5.4.4 Ergebnisse der Laborversuche

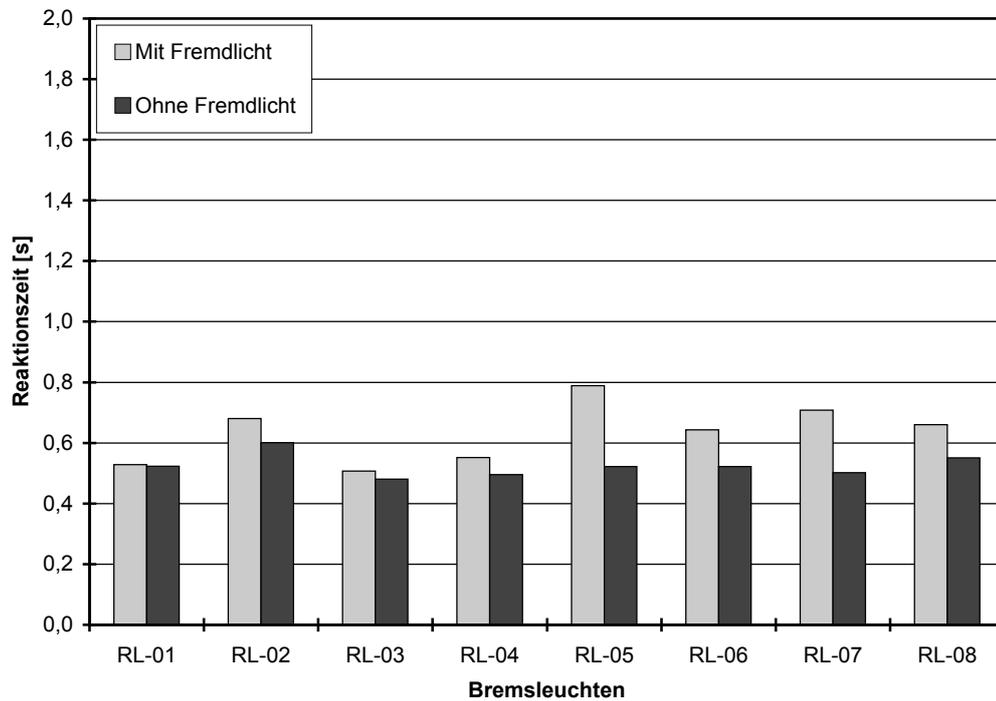
Untersucht werden acht verschiedene Rückleuchten. Die Leuchten RL-01 und RL-05 sind die bei dem Versuch unter realem Sonnenlicht eingesetzten Leuchten. Die Ergebnisse für das Signal *Fahrtrichtungsanzeiger* sind in Bild 5.7 wiedergegeben. Es ist zu sehen, dass die Leuchten RL-05 und RL-07 deutliche Fremdlichtempfindlichkeiten aufweisen. Bei RL-07 verlängert sich die Reaktionszeit durch den Einfluss von Fremdlicht um den Faktor drei.

In Bild 5.8 sind die Ergebnisse für die Bremsleuchten zu sehen. Der Einfluss des Fremdlichtes fällt hier längst nicht so stark aus. Auch hier wird deutlich, dass die Leuchten RL-05 und RL-07 am empfindlichsten gegenüber Fremdlicht sind.

## 5. Phantomlicht und Color Washout



**Bild 5.7:** Reaktionszeiten auf das Aufleuchten des Fahrtrichtungsanzeigers mit und ohne Fremdlichtbestrahlung



**Bild 5.8:** Reaktionszeiten auf das Aufleuchten der Bremsleuchten mit und ohne Fremdlichtbestrahlung

### 5.5 Diskussion von Phantomlichteffekten

Marcori [Mar05] von dem Rückleuchtenhersteller *Automotive Lighting* weist darauf hin, dass heutige Signalleuchten, aufgebaut mit klaren Abschlusscheiben und metallisch glänzenden Flächen,

einen negativen Einfluss auf die Verkehrssicherheit nehmen können.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit ist durch verschiedene psychophysikalische Experimente gezeigt worden, dass Fremdlicht die Wahrnehmbarkeit von Lichtsignalen signifikant reduzieren kann. Nicht alle Leuchten sind gleichermaßen gegenüber Fremdlicht empfindlich. Bei verschiedenen Leuchtenkonstruktionen tritt der Effekt unterschiedlich stark auf und lässt die Reaktionszeiten auf die Signale der getesteten Rückleuchten unter Phantomlichtbedingungen ansteigen. So ist die Reaktionszeit auf das Aufleuchten einer Bremsleuchte je nach Leuchtenkonstruktion unter Phantomlichtbedingungen bis zu 1,5 mal länger.

Damit ist gezeigt, dass die Verkehrssicherheit durch Leuchten mit einer hohen Störanfälligkeit reduziert wird. Falls diese Reduzierung als nicht akzeptabel und die Häufigkeit als hoch genug angesehen wird, mit der Beleuchtungssituationen im Straßenverkehr auftreten, in denen Phantomlicht entsteht, so ist eine Phantomlichtprüfung für Bremsleuchten und Fahrtrichtungsanzeiger in die ECE Regelungen zu integrieren. Dies kann realisiert werden, in dem zusätzliche Bedingungen in die ECE Regelungen eingeführt oder die derzeitigen fakultativen Bedingungen in obligatorische umgewandelt werden.

So können in den ECE Regelungen Nummer 6 und Nummer 7 die Werte bei Tagschaltung dergleichen hoch gewählt werden, dass das Auftreten von Phantomlichteffekten fast auszuschließen ist. Dies bedingt dann das zwingende Vorschreiben einer Tag-Nacht Schaltung, um bei Dunkelheit eine unverhältnismäßig hohe Blendung durch die Leuchten zu vermeiden.

Auf diesem Wege kann zwar nicht sichergestellt werden, dass nur noch geringe Phantomlichteffekte auftreten, doch die Wahrscheinlichkeit des Auftretens wird deutlich verringert. Als vorteilhaft bei dieser Vorgehensweise ist, dass so ein nicht unbedingt schlankes Regelwerk nicht weiter im Umfang vergrößert, sondern sogar verkleinert wird, da eine Wahlmöglichkeit, Tag-Nacht Schaltung einsetzen oder nicht, entfällt.

Anstelle zu versuchen, Phantomlichteffekte durch das verbindliche Vorschreiben einer Tag-Nacht Schaltung zu verhindern, kann alternativ in die entsprechenden ECE Regelungen eine weitere Prüfung gemäß Abschnitt 5.3.7.3 eingefügt werden. Dadurch wird das Auftreten von Phantomlichteffekten sicher verhindert.

### 5.6 Ausblick

Mit den vorgestellten Untersuchungen zu dem Thema Phantomlicht ist das Gebiet des Einflusses von Fremdlicht auf die Wahrnehmbarkeit von Rückleuchten grundlegend behandelt worden. Eine weitergehende Beschäftigung mit diesem Thema erscheint jedoch sinnvoll.

Kiel bei VW beschäftigt sich mit der Umsetzung der Bewertung der Störanfälligkeit in Simulationswerkzeuge, um Phantomlichteffekte schon in einem frühen Stadium der Entwicklung von Leuchten zu erkennen.

Kaltenbach [Kal07b] bei BMW plant, weitere Untersuchungen insbesondere auch unter diffusen Bedingungen und unter Einbeziehung des vorderen Signalbildes durchzuführen.

Hahn [HKML07a] am LTI wird weiterführende Untersuchungen durchführen und weitere Messmöglichkeiten der Phantomlichteffekte, hervorgerufen durch Fremdlicht direkter Strahlung, entwickeln. Dies ist eng verbunden mit der Entwicklung eines Prüfstellen gerechten Messvorgehens für Leuchtdichtebilder zur wahrnehmungsgerechten Ermittlung der leuchtenden Fläche von Fahrzeugleuchten

# Kapitel 6

## Zusammenfassende Diskussion

In dieser Arbeit sind verschiedene Untersuchungsergebnisse bezüglich Sicht und Signalisation vorgestellt worden.

Die Sicht des Fahrers kann nicht nur durch bessere Scheinwerfer, sondern auch durch eine ambiente Innenraumbelichtung verbessert werden, wie in Kapitel 3 gezeigt worden ist.

Die Wirksamkeit der Lichtsignale bei Tag kann durch Phantomlichteffekte und überlappende Signale beeinträchtigt werden. Auch bei Nacht kann die Effektivität der Lichtsignale durch überlappend leuchtende Flächen eingeschränkt werden. In den Kapiteln 4 und 5 ist aufgezeigt worden, wie die Beeinträchtigung der Lichtsignale quantitativ bewertet und vermieden werden kann.

### 6.1 Intension der Gesetze

Der Bereich der Fahrzeugbeleuchtung ist ein durch gesetzliche Regelungen stark beschränkter Bereich. Bei der Entwicklung und Einführung neuartiger lichttechnischer Einrichtungen sind daher die Einflussbereiche aktueller Gesetze kritisch zu prüfen und gegebenenfalls zeitgleich die Änderungsprozesse der Regelungen anzustossen, um die Einrichtungen bei Marktreife für den öffentlichen Straßenverkehr anbieten zu können.

Nur die regulative Beschränkung der Lichttechnik gestattet eine funktionierende Technik für alle Verkehrsteilnehmer. Denn eine Signalisation funktioniert nur durch die Umsetzung einer einheitlichen Norm durch alle Kommunikationspartner. Die Reglementierung der Fahrzeugbeleuchtung ist für das Funktionieren derselben notwendig.

Die gesetzlichen Regelungen über lichttechnische Einrichtungen an Fahrzeugen werden größtenteils von Experten erstellt, die Mitarbeiter einer lichttechnischen Firma sind. Diese stellen keine wirtschaftlich unabhängigen Experten dar. Bei der Erstellung von Regelungen werden diese nicht nur auf Grundlage wissenschaftlicher Erkenntnisse, sondern oft auf Grundlage strategischer Firmenplanung entwickelt. Daher werden unter anderem die gesetzlichen Regelungen als Beschränkung der Konkurrenz missbraucht.

Falls das erklärte Ziel der Fahrzeugbeleuchtung, die Sicherheit aller Verkehrsteilnehmer zu erhöhen, weiterhin verfolgt werden soll, so ist die Gesetzgebungspraxis zu ändern. Denn die grundlegende Notwendigkeit der Reglementierung der Fahrzeugbeleuchtung wird auf Dauer nur dann von dem Großteil der Verkehrsteilnehmer akzeptiert und in der Praxis beachtet, wenn sie der Mehrheit der Partizipanten dient und nicht nur einer kleinen Gruppe einen wirtschaftlichen Vorteil verschafft.

Die ECE Regelungen werden von der *UNECE - United Nations Economic Commission for Europe* erarbeitet. Diese Vereinigung stellt einen Zusammenschluss *wirtschaftlich* interessierter Partner dar. Die den Straßenverkehr betreffenden Regelungen werden folglich weder auf nationaler noch auf internationaler Ebene von einer *sicherheitsgetriebenen* Organisation erstellt.

Eine Möglichkeit, die Einflussnahme der Regelungen auf den Markt deutlich zu reduzieren und die Behinderung der Konkurrenz durch diese zu verringern, besteht darin, über privatwirtschaftliche Bewertungssysteme für eine steigende Verkehrssicherheit zu sorgen. So wird schon seit Jahren etwa das Crash-Verhalten von Fahrzeugen kontinuierlich stark verbessert. Vorangetrieben wird diese Entwicklung nicht etwa durch ständig anspruchsvollere Gesetze, sondern durch die in etlichen Zeitschriften veröffentlichten Testergebnisse des EuroNCAP Konsortiums. Somit können innovative Firmen mit hochsicheren Systemen wirtschaftlichen Erfolg erreichen, ohne dabei durch hemmende Gesetze von Konkurrenten behindert zu werden, deren Marktsegment eher die Grundmobilität bedient.

Die ECE Regelungen müssen eine dem Stand der Technik adäquate Grundsicherheit garantieren. Daher sind die Regelungen ständig dem aktuellen Stand der Technik anzupassen. Die ECE Regelungen müssen dabei keine Vorreiterrolle spielen. Die Geschichte hat klar gezeigt, dass sie dies auf Grund der formalen Prozedur ihrer Entwicklung nicht leisten können. Stattdessen haben sie für eine funktionierende Lichttechnik für alle Verkehrsteilnehmer bei gleichzeitiger minimaler Einschränkung zu sorgen.

### 6.2 Ambiente Innenraumbeleuchtung

Die ambiente Beleuchtung ist eine Lichtfunktion im Fahrzeuginnenraum, die während der Fahrt betrieben wird. Sie ist Teil des Nacht-Designs, erzeugt ein hochwertiges Ambiente und kann markenspezifische Elemente gezielt hervorheben.

Die Untersuchungen der ambienten Innenraumbeleuchtung im Bereich mittlerer Leuchtdichten von 0,5 bis 250 cd/m<sup>2</sup> haben ihr Potential bei der Verbesserung des Kontrastsehvermögens gezeigt. Jedoch ist nicht generell jede ambiente Beleuchtung der Verkehrssicherheit nützlich.

So verbessert sich bei jüngeren Personen das Kontrastsehvermögen bei ausgewählten ambienten Beleuchtungen besonders bei roter Beleuchtung. Bei älteren Personen hingegen wird das Kontrastsehvermögen, insbesondere bei blauem Licht, bei einigen untersuchten Szenen verschlechtert. Wird jedoch der durch ambiente Beleuchtung erreichbare quantitative Gewinn des Kontrastsehvermögens in Relation gesetzt zu dem Verlust des Sehvermögens durch das fortschreitende Alter des Fahrers, so ist der erreichbare Vorteil nur marginal. Denn der Gewinn bei jungen Fahrern beträgt ca.  $\Delta K_W = 0,05$ , der altersbedingte Rückgang, betrachtet anhand der untersuchten Versuchsperson, jedoch  $\Delta K_W = 0,10$ .

Die Untersuchungen und Befragungen der Versuchspersonen haben gezeigt, dass keine Verschlechterungen des Kontrastsehvermögens zu erwarten sind, falls der Fahrer die Helligkeit der ambienten Beleuchtung selbst einstellen kann.

Ambiente Innenraumbeleuchtungen von Kraftfahrzeugen stellen keine Gefährdung des Straßenverkehrs dar. Sie können dessen Sicherheit sogar bei richtiger Auslegung erhöhen. Zusätzlich wird durch ambiente Beleuchtung der Innenraum mit Licht gestaltet und die Orientierung im Innenraum erhöht.

### 6.3 Überlappung

Überlappende Signale werden schon seit Jahren bei Schlussleuchten und Bremsleuchten benutzt. Diese gemeinsame Nutzung der selben Fläche spart nicht nur Einbauplatz, sondern reduziert auch die notwendigen Bauelemente wie Reflektor, Abschlusscheibe und Leuchtgehäuse deutlich. Bei weiterer überlappender Gestaltung der Signale der Heckbeleuchtung kann Platz geschaffen werden, um moderne Sicherheitssysteme wie *Brake Force Displays* auf breiter Basis einführen zu können. Jedoch beeinflussen überlappende Signale die Wahrnehmung von Lichtsignalen bezüglich Reaktionszeit und Fehlerrate.

Qualitativ kann der Einfluss entsprechend den Abschnitten 4.4.1 und 4.4.2 bezüglich der Reaktionszeit durch die Formeln 6.1 für Dauerlicht und 6.2 für Blinklicht mit einer Frequenz von 1 Hz sowie bezüglich der Fehlerrate durch die Formel 6.3 beschrieben werden. Dabei gibt  $t$  die Reaktionszeitverlängerung,  $f$  die Fehlerrate und  $V$  das Leuchtdichteverhältnis zwischen dem helleren und dunkleren Signallicht an.

$$t = 200 + 50V + 15V^2 \quad \text{gültig für } V \geq 1 \quad (6.1)$$

Abhängigkeit der Reaktionszeitverlängerung  $t$  von dem Leuchtdichteverhältnis  $V$  bei Erkennung des gelben Blinklichtes und bei vollständiger Überlappung

$$t = 300 + 150 \ln(V) \quad (6.2)$$

Abhängigkeit der Reaktionszeitverlängerung  $t$  von dem Leuchtdichteverhältnis  $V$  bei Erkennung der roten Bremsleuchte und bei vollständiger Überlappung

$$f = 5,3 - 0,7V + 0,6V^2 \quad (6.3)$$

Abhängigkeit der Fehlerrate  $f$  von dem Leuchtdichteverhältnis  $V$  bei vollständiger Überlappung

Überlappende Signale können zu einer nicht akzeptablen Verschlechterung der Wahrnehmung von Signallichtern bis hin zu deren Übersehen führen, falls das Leuchtdichteverhältnis zwischen den einzelnen Signalen ungünstig gewählt ist. Wenn jedoch das Verhältnis in Abhängigkeit der Wichtigkeit der einzelnen Signale korrekt gestaltet wird, stellen überlappende Flächen eine gute Möglichkeit dar, Signalleuchten kompakter zu gestalten.

### 6.4 Phantomlicht

Phantomlichteffekte sind von Fremdlicht verursachte Signale in Leuchten. Wenn diese Effekte an Signalleuchten auftreten, kann die Wahrnehmung des eigentlichen Signals beeinträchtigt werden. Sie treten bei Tag an Leuchten auf und entsprechen der Problematik überlappender Signalfächen. Durch Phantomlicht wird die Detektion des Fahrzeuges nicht vermindert, sondern erhöht. Die Identifikation der Lichtsignale des Fahrzeuges kann jedoch stark eingeschränkt werden.

Diese Einschränkung kann entsprechend der Problematik überlappender Signale anhand Reaktionszeitverlängerungen und Fehlerraten bei Wahrnehmung der Lichtsignale genauer bestimmt werden. Vergleichbar den Untersuchungen bezüglich Überlappung sind daher im Rahmen dieser

Arbeit solche bezüglich Phantomlicht durchgeführt worden, die in Kapitel 5 vorgestellt werden. Es konnte gezeigt werden, dass bei Phantomlicht einerseits bei einigen Leuchten eine Verlängerung der Reaktionszeit für den Fahrtrichtungsanzeiger um einen Faktor von bis zu 2,5 und um einen Faktor von bis zu 1,5 bei Bremsleuchten entsteht, andererseits bei anderen Leuchten keine Reaktionszeitverlängerung auftritt. Daran ist zu sehen, dass ein deutlicher Einfluss von Fremdlicht auf manche Leuchten besteht. Entsprechend Abschnitt 5.3.7.3 kann die durch Phantomlicht hervorgerufene Fremdlichtempfindlichkeit einer Leuchte folgendermaßen gemessen werden:

1. Messung der Signal-Leuchtdichte  $\bar{L}$  mit eingeschalteter Signalfunktion der Leuchte und ausgeschaltetem Fremdlicht
2. Messung der Phantomlicht-Leuchtdichte  $\bar{L}_{Ph}$  mit ausgeschalteter Signalfunktion der Leuchte und eingeschaltetem Fremdlicht
3. Berechnung der Störanfälligkeit  $S_N$  mit

$$S_N = \frac{\bar{L}_{Ph}}{\bar{L}}$$

4. Unterscheidung tolerabler Störanfälligkeit
  - $S_N > 0,33$  : Signalfunktion ist zu störanfällig
  - $S_N < 0,33$  : Signalfunktion ist ausreichend resistent

Phantomlichteffekte können negative Einflüsse auf die Wahrnehmbarkeit von Lichtsignalen verursachen. Diese Effekte können durch konstruktive Maßnahmen an den Leuchten größtenteils verhindert werden. Die Wirksamkeit dieser konstruktiven Maßnahmen ist anhand des oben vorgestellten Bewertungsverfahrens der Fremdlichtempfindlichkeit überprüfbar.

### 6.5 Leuchtdichte

Die heute vorherrschende Verkehrsdichte legt nahe, die Leuchtdichte als lichttechnische Größe zur Auslegung und Beurteilung von Fahrzeugleuchten zu benutzen. Verschiedene Untersuchungen belegen, dass im Nahbereich die Leuchtdichte die maßgebende Größe darstellt (Abschnitt 2.3.2).

Die Beschreibung überlappender Signale kann nur mit Benutzung der Leuchtdichte geschehen. Die Beschreibung der Fremdlichtempfindlichkeit von Leuchten ohne Benutzung der Leuchtdichte kann sogar zu komplett falschen Aussagen führen.

Jedoch bereitet die wahrnehmungsgerechte Messung von Leuchtdichtestrukturen noch diverse Probleme. Die Erfassung mittlerer Leuchtdichten von homogen leuchtenden Signalfächern, wie bei speziell für Laborexperimenten genutzten Leuchten häufig anzutreffen, gestaltet sich unproblematisch. Die Ermittlung der für die Wahrnehmung relevanten mittleren Leuchtdichte und deren Zusammensetzung aus den jeweiligen Einzelleuchtdichten bei realen, im tatsächlichen Verkehrsgeschehen genutzten Leuchten, ist jedoch noch nicht abschließend geklärt.

Diese Unsicherheit bei der Bestimmung der Leuchtdichte verhindert auch die exakte Angabe der tatsächlich leuchtenden Flächen von Lichtsignalen. Mit immer weiter fortschreitenden Möglichkeiten detailreicher Konstruktionen von Leuchten steigt jedoch das Interesse und die Notwendigkeit einer exakten Bestimmung dieser Flächen deutlich an. Daher sind weitere Untersuchungen bezüglich der wahrnehmungsgerechten Bestimmung der Leuchtdichte von Signalleuchten notwendig.

# Kapitel 7

## Ausblick

Die Reduktion der Unfallzahlen ist eine Motivation, die Fahrzeugbeleuchtung bezüglich Sicht und Signalisation zu verbessern. In der vorliegenden Arbeit sind den schon vielfältig existierenden Grundlagen weitere hinzugefügt worden, um die Verkehrssicherheit zu erhöhen und damit Unfälle und Verkehrstote zu reduzieren.

Jedoch muss das bekannte Wissen umgesetzt werden. Neue Leuchten müssen entsprechend wissenschaftlicher Erkenntnisse konstruiert werden, um hervorragende Erkennbarkeiten auch unter widrigsten Bedingungen zu liefern. Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit aus den Kapiteln 4 und 5 zeigen, dass zur Beschreibung der Wahrnehmung von Lichtsignalen die Leuchtdichte unabdingbar ist und Fahrzeugleuchten so zu konstruieren sind, dass bestimmte Leuchtdichteverhältnisse vorliegen. Diese Erkenntnisse ergänzen sich mit denen von Armbruster [Arm01] und Ripperger [Rip01a]. Sie zeigten schon im Jahr 2001, dass für die Erkennbarkeit von Lichtsignalen die Leuchtdichte die entscheidende Größe ist. Es wurden auch bereits sinnvolle und größtenteils praxisnahe Vorschläge erarbeitet, wie die ECE-Regelungen anzupassen sind, um die Leuchtdichte zu berücksichtigen.

Trotz aller vorliegenden wissenschaftlichen Erkenntnisse existieren im heutigen Straßenverkehr etliche Leuchten, deren Lichtsignale schlecht wahrnehmbar sind, da bei der Konstruktion nicht die Leuchtdichte berücksichtigt wurde. Auch in den ECE Regelungen wird die Leuchtdichte weder berücksichtigt noch mit der ihr zustehenden notwendigen Vehemenz eine Integration von ihr in die Regelungen vorangetrieben. Im Gegensatz dazu werden jedoch einige Teile der ECE Regelung, für die keine wissenschaftlichen oder anderweitigen Begründungen bekannt sind, weiter gepflegt, obwohl sie bei der heutigen Konstruktion von Leuchten deutliche Beschränkungen bedeuten.

Nicht nur im Bereich der Leuchten sind die ECE Regelungen zu erneuern. Auch neue Scheinwerfersysteme müssen an die Anforderungen der menschlichen Wahrnehmung und an den Verkehrsraum angepasst werden. Hier ist für die Bewertung der Ausleuchtung entsprechend Völker [Völ06] wiederum auf Leuchtdichtemessungen zurückzugreifen. Konstruktionen, einzig orientiert an der Simplizität der technischen Realisierung, sind nicht zielführend für eine Reduktion der Unfallzahlen.

Die Vergangenheit zeigt, dass die Umsetzung des erarbeiteten Wissenstandes nicht gewährleistet ist. Das meiste Wissen bezüglich einer Erhöhung der Sicherheit bleibt ungenutzt – sowohl von den Herstellern als auch den Gesetzgebern. Daher müssen die Forschungsinstitute nicht nur neues Wissen bezüglich der Wahrnehmung erarbeiten, sondern gleichzeitig aufzeigen, wie dieses Wissen wirtschaftlich lukrativ umgesetzt werden kann.



# Anhang

## A.1 Literaturangaben

- [All64] M. J. Allen. Misuse of red lights on automobiles. *American Journal of Optometry and Archives of American Academy of Optometry*, 41:695–699, 1964.
- [Arm01] Daniel Armbruster. *Optimierung der visuellen Informationsübermittlung durch adaptive Kraftfahrzeugsignalleuchten*. Herbert Utz Verlag GmbH, München, 2001, ISBN 3-8316-0016-3.
- [Bar97] Gary M. Bartilucci. Signalling light visible through a rear view window of a vehicle. Patent US005663707A, 2.9.1997 - 1997.
- [BB07] Ulrich Bergmeier und Heiner Bubb. Wirkung monokularer Tiefenkriterien im Head-Up Display. Technische Universität München, Lehrstuhl für Ergonomie, 2007.
- [BBSB07] William P. Berg, Eric D. Berglund, Adam J. Strang und Matthew J. Baum. Attention-capturing properties of high frequency luminance flicker: Implications for brake light conspicuity. *Transportation Research: Part F*, 10(1):22, 2007.
- [BD71] Johannes Bol und Hans-Joachim Decker. *Verbesserung der Heckbeleuchtung von Kraftfahrzeugen*. VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1971, ISBN 3-18-12-0216-9.
- [BD06] Hans-Hermann Braess und Edmund Donges. Technologien zur aktiven Sicherheit von Personenkraftwagen - konsumierbare oder echte Verbesserung? In *Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenzsysteme*, 2006.
- [Bee05] Leopold Beer. *Aufbau eines Meßplatzes für Hochleistungs-LEDs*. Diplomarbeit, Universität Karlsruhe (TH), Lichttechnisches Institut, 2005.
- [BK02] Heribert Braun und Heribert Konitzer. StVZO - Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung. Kirschbaum Verlag, 1. Oktober 2002 - 2002.
- [Blu03] Reinhard Blutner. *Colour Words and Colour Categorization*, 2003.
- [Boc87] Werner D. Bockelmann. *Auge - Brille - Auto*. Springer-Verlag, Berlin, 2. Auflage, 1987, ISBN 3-540-16429-4.
- [Büc06] Jan Philipp Büchner. *Investitionsrechnung zum Lichttunnel auf dem Mackensen-Areal*. Studienarbeit, Universität Karlsruhe (TH), Lichttechnisches Institut, 2006.
- [CIE80] Light Signals for Road Traffic Control. 48 (TC-1.6), CIE - Commission Internationale de l'Éclairage, 1980.

- [CIE01] CIE. Colours of Light Signals. CIE S 004/E-2001, CIE - Commission Internationale de l'Éclairage, 2001.
- [CIE05] CIE. Cognitive Colour. CIE 166-2005, CIE - Commission Internationale de l'Éclairage, 2005.
- [CKR06] Richard Cook, Paul Kay und Terry Regier. WCS Data Archives, 2006.
- [CLL01] Tso-Wei Chang, Chin-Chiuan Lin und Sung-Nan Lin. Driving Performance Analysis on Interactions among Factors of Center High Mounted Stop Lamp and Road Environment. In H. J. Schmidt-Clausen, Editor, *PAL - Progress in Automobile Lighting*, Seite 99, Darmstadt, 2001. Herbert Utz Verlag GmbH.
- [CT] GTB WGFL CIE TC4-45. *Performance Assessment Method for Vehicle Headlamps*. CIE - Commission Internationale de l'Éclairage, Wien.
- [DFF<sup>+</sup>94] Joachim Damasky, K. Foese, G. Fougere, D. Lescaïl, L. Lesage und M. Pede. *Efficiency of Advanced Brake Light Devices*. Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, 1994.
- [Die04] Carsten Diem. *Blickverhalten von Kraftfahrern im dynamischen Straßenverkehr*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Fachbereich Lichttechnik, 2004.
- [DifN88] DIN Deutsches Institut für Normung. DIN 67527-2 - Lichttechnische Eigenschaften von Signallichtern im Verkehr - Teil 2 Ortsfeste Signallichter zur Absicherung von Arbeits-, Bau- und Gefahrenstellen auf Straßen. DIN 67527 Teil 2, Beuth Verlag, 1988.
- [DifN98] DIN Deutsches Institut für Normung. DIN EN 13201-1 - Straßenbeleuchtung - Teil 1 Auswahl der Beleuchtungsklassen. Beuth Verlag, 1998.
- [DifN01] DIN Deutsches Institut für Normung. DIN 67527-1 - Lichttechnische Eigenschaften von Signallichtern im Verkehr - Teil 1 Ortsfeste Signallichter im Straßenverkehr. DIN 67527 Teil1, Beuth Verlag, 2001.
- [DifN04] DIN Deutsches Institut für Normung. DIN EN 13201-2 - Straßenbeleuchtung - Teil 2 Gütemerkmale. Beuth Verlag, 2004.
- [DifN06a] DIN Deutsches Institut für Normung. DIN 5035-8 - Beleuchtung mit künstlichem Licht - Teil 8 Arbeitsplatzleuchten - Anforderungen, Empfehlungen und Prüfung. DIN 5035-8 Entwurf Februar 2006, Beuth Verlag, 2006.
- [DifN06b] DIN Deutsches Institut für Normung. DIN EN 12368 - Anlagen zur Verkehrssteuerung Signalleuchten. DIN EN 12368, Beuth Verlag, 2006.
- [DRK<sup>+</sup>07a] André Domhardt, Udo Rohlfing, Karsten Klinger, Dieter Kooß, Karl Manz und Uli Lemmer. Design and Simulation LED-basierter automobiler Beleuchtungssysteme. In *Lux Junior 2007*, Ilmenau, 2007.
- [DRK<sup>+</sup>07b] André Domhardt, Udo Rohlfing, Karsten Klinger, Dieter Kooß, Karl Manz und Uli Lemmer. Optical Design of LED-Lamps for Automotive Applications. In Tran Quoc Khanh, Editor, *ISAL - International Symposium on Automotive Lighting*, Darmstadt, 2007. Herbert Utz Verlag GmbH.

## A. Anhang

---

- [DRK<sup>+</sup>07c] André Domhardt, Udo Rohlfing, Karsten Klinger, Karl Manz, Dieter Kooß und Uli Lemmer. Optical design of LED-based automotive tail lamps. In *SPIE 2007*, San Diego, 2007.
- [DRW<sup>+</sup>08] André Domhardt, Udo Rohlfing, Simon Weingärtner, Karsten Klinger, Dieter Kooß, Karl Manz und Uli Lemmer. New Design Tools for LED Headlamps. In Patrick P. Meyrueis, Editor, *Photonics in the Automobile*, Band 7003B, Straßburg, 2008. SPIE - The International Society for Optical Engineering.
- [DSK<sup>+</sup>06] André Domhardt, Sven Schellinger, Karsten Klinger, Dieter Kooß, Karl Manz und Uli Lemmer. LED-Scheinwerfersimulator zur Generierung komplexer Lichtverteilungen im Kraftfahrzeugbereich. In *Licht 2006*, Bern, 2006. SLG Bern - Schweizer Licht Gesellschaft Bern.
- [Dud01] Duden. *Das Fremdwörterbuch*. Duden, Mannheim, 7. Auflage, 2001.
- [Eck93] Martin Eckert. *Lichttechnik und optische Wahrnehmungssicherheit im Straßenverkehr*. Verlag Technik GmbH, München, 1. Auflage, 1993, ISBN 3-341-01072-6.
- [End95] Martin Enders. *Vergleich ausgewählter Methoden zur Ermittlung der spektralen Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges*. Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt, Fachbereich 17 Elektrische Energietechnik - Fachgebiet Lichttechnik, 1995.
- [ER04] ECE-Regulations. 1958 Agreement and addenda. PDF, 2004.
- [ERR] ECE-Regelung-R7. Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Begrenzungsleuchten, Schlussleuchten, Bremsleuchten und Umrissleuchten für Kraftfahrzeuge (ausgenommen Krafträder) und ihre Anhänger. United Nations Economic Commission for Europe, Transport Division, World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations (WP.29).
- [ERR01] ECE-Regelung-R6. Uniform Provisions concerning the Approval of Direction Indicators for Motor Vehicles and their Trailers. United Nations Economic Commission for Europe, 2001.
- [ERR07a] ECE-Regelung-R48. Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Fahrzeuge hinsichtlich des Anbaus der Beleuchtungs- und Lichtsignaleinrichtungen. Kirschbaum Verlag, Juni 2007 - 2007.
- [ERR07b] ECE-Regelung-R6. Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung von Fahrtrichtungsanzeigern für Kraftfahrzeuge und ihre Anhänger. Kirschbaum Verlag, März 2007 - 2007.
- [Eyh06] Daniel Eyhorn. *Automatische Farberkennung von elektrischen Adern*. Diplomarbeit, Universität Karlsruhe (TH), Lichttechnisches Institut, 2006.
- [Fin68] W. Fink. Verzugsdauer beim Bremsen. *ATZ - Automobiltechnische Zeitung*, 70 Nr. 9:307–310, 1968.
- [Fin70] D. M. Finch. *Automotive Signaling and Lighting*. International Automobile Safety Conference Compendium 1970. Society of Automotive Engineers, Inc, 1970.
- [Fis] Ingo Fischbach. Anwenderschulung - LMK Video-Fotometer-Colorimeter.

- [Fle06] Peter Flesch. *Light and Light Sources - High-Intensity Discharge Lamps*. Springer, Heidelberg, 2006, ISBN 3-540-32684-7.
- [FMV06] federal motor vehicle safety standards - Lamps, reflective devices and associated equipment. 108, National Highway Traffic Safety Administration, 2006.
- [FN04] Peter Flesch und Manfred Neiger. Ac modelling of D2 automotive HID lamps including plasma and electrodes. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 37:2848–2862, 2004.
- [Fra06] Dorit Franzke. *Einfluss ambierter Beleuchtung auf das Kontrastsehvermögen*. Diplomarbeit, Fachhochschule Jena und Universität Karlsruhe (TH), Augenoptik und Lichttechnisches Institut, 2006.
- [Fri07] Michael Fritz. *Reduktion der für einen Fahrzeugführer wichtigen Fahrinformationen und deren Darstellungsmöglichkeiten*. Studienarbeit, Universität Karlsruhe (TH), Lichttechnisches Institut, 2007.
- [gfl04a] GTB Working group front lighting. GTB Working group front lighting, Report of 1st meeting. 2004.
- [gfl04b] GTB Working group front lighting. GTB Working group front lighting, Report of 2nd meeting, Juli 2004 - 2004.
- [GG06] Berndt Gombert und Philipp Gutenberg. Die elektronische Keilbremse - Meilenstein auf dem Weg zum elektrischen Radantrieb. *ATZ - Automobiltechnische Zeitung*, 108:904–913, 2006.
- [GLG<sup>+</sup>02] Jost Gail, Mechthild Lorig, Christhard Gelau, Dirk Heuzeroth und Wolfgang Sievert. Optimierung des rückwärtigen Signalbildes zur Reduzierung von Auffahrunfällen bei Gefahrbremung. BAST F39, BASt - Bundesanstalt für Straßenwesen, 2002.
- [Gor02] Rudolf Paulus Gorbach. *Typografie professionell*. Galileo Press, Bonn, 2. Auflage, 2002, ISBN 3-89842-73-X.
- [GP01] Rainer Groenewold und Christoph Plagge. *Aufbau einer adaptiven LED-Matrix-Rückleuchte für Kraftfahrzeuge zur Anzeige situativ angepasster Signalbilder*. Fachhochschule Wilhelmshaven, 2001.
- [GV93] Christian Gerthsen und Helmut Vogel. *Physik*. Springer-Verlag, 17. Auflage, 1993, ISBN 3-540-56638-4.
- [Haa80] Gerd Haar. Fremdlichtempfindlichkeit bei Kraftfahrzeugheckleuchten - Möglichkeiten zur Verminderung. *ATZ - Automobiltechnische Zeitung*, 82 (1980) 5:285–290, 1980.
- [Hah07a] Norbert Hahn. Untersuchung des Einflusses des Phantomlichteffektes auf die Erkennbarkeit von Fahrzeug-Rückleuchten. In *Lux junior 2007 - Abstracts - 8. Forum für den lichttechnischen Nachwuchs*. Technische Universität Ilmenau und LiTG - Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e.V., Ilmenau, 2007.
- [Hah07b] Norbert Hahn. *Untersuchung des Einflusses von Phantomlicht auf die Erkennbarkeit von Fahrzeug-Rückleuchten*. Diplomarbeit, Universität Karlsruhe (TH), Lichttechnisches Institut, 2007.
- [Har71] E. Hartmann. Seh- und Schätzvermögen des Menschen. *Automobil Industrie*, 3:91–99, 1971.

## A. Anhang

---

- [Hau94] Gert Hauske. *Systemtheorie der visuellen Wahrnehmung*. Teubner, Stuttgart, 1994, ISBN 3-519-06156-2.
- [HEA84] Headlamp Turn Signal Spacing. *SAE J1221 DEC84 - SAE Information Report*, 1984.
- [Hei94] Gerd Karl Heinz. Relativität elektrischer Impulsausbreitung - Schlüssel zur Informatik biologischer Systeme. In *39. Int. Wiss. Kolloquium an der TU Ilmenau*, Band 2, Seiten 238–245, Ilmenau, 1994.
- [Hei06] Matthias Paul Heinrich. *Pimp my Interior*. Teamarbeit, Universität Karlsruhe (TH), Lichttechnisches Institut, 2006.
- [Hen94] Hans-Jürgen Hentschel. *Licht und Beleuchtung*. Hüthig Buch Verlag GmbH, 4. Auflage, 1994.
- [HGND74] F. Haines, M. Gross, D. Nylen und L. M. Dawson. Peripheral Visual Response Time to Colored Stimuli Imaged on the Horizontal Meridian. 1974.
- [HK03] Christina Hacker und Tran Quoc Khanh. Wahrnehmung von Farbdifferenzen in der Film- und Fernseh-Postproduktion. *FKT - Fachzeitschrift für Fernsehen, Film und elektronische Medien*, Heft 07/2003, 2003.
- [HK07] Norbert Hahn und Karsten Klinger. Phantomlichteffekte im Straßenverkehr. In Horst Lange, Editor, *Handbuch für Beleuchtung*, Seiten III–2.2. ecomed, Landsberg am Lech, 2007.
- [HKML07a] Norbert Hahn, Karsten Klinger, Karl Manz und Uli Lemmer. The phantom light effects in modern car rear light combinations. In *ISAL - International Symposium on Automotive Lighting*, Darmstadt, 2007. Herbert Utz Verlag GmbH.
- [HKML07b] Norbert Hahn, Karsten Klinger, Karl Manz und Uli Lemmer. The phantom light effects in modern car rear light combinations - Untersuchung des Einflusses des Phantomlichteffektes auf die Erkennbarkeit von Fahrzeug-Rückleuchten. In *Lux Junior 2007*, Ilmenau, Dörnfeld, 2007.
- [HKML08] Norbert Hahn, Karsten Klinger, Karl Manz und Uli Lemmer. The phantom light effects in modern car taillight combinations. In Patrick P. Meyrueis, Editor, *Photonics in the Automobile*, Band 7003B, Straßburg, 2008. SPIE - The International Society for Optical Engineering.
- [Hof75] Harald Hofmann. *Über das Bemessen der Leuchtdichte, Farbart und Darbietungszeit von Signallichtern unter verschiedenen Beobachtungsbedingungen*. Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt, 1975.
- [Hum05] Benjamin Hummel. *Toleranzwinkeluntersuchung, Erweiterungen einer Simulationsumgebung und lichttechnische Untersuchungen einer Intelligenten Heckleuchte*. Studienarbeit, Universität Karlsruhe (TH), Lichttechnisches Institut, 2005.
- [Hum06] Benjamin Hummel. *Sensorik einer Intelligenten Heckleuchte*. Diplomarbeit, Universität Karlsruhe (TH), Lichttechnisches Institut, 2006.
- [Ivi08] Peter Ivicic. *Anforderungen an ein LED-Tagfahrlicht*. Diplomarbeit, Universität Karlsruhe (TH), Lichttechnisches Institut, 2008.

- [Jeb06] Christian Jebas. *Untersuchung des Einflusses der Vorfeld- und Seitenausleuchtung automobiler Scheinwerfer auf die Erkennbarkeitsentfernung von Sehobjekten*. Diplomarbeit, Universität Karlsruhe (TH), Lichttechnisches Institut, 2006.
- [JKL08a] Christian Jebas, Karsten Klinger und Uli Lemmer. Die dynamische Leuchtweitenregelung und ihre Relevanz für die Verkehrssicherheit. *VKU - Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik*, Seite 119, 2008.
- [JKL08b] Christian Jebas, Karsten Klinger und Uli Lemmer. New headlamp technologies. In Patrick P. Meyrueis, Editor, *Photonics in the Automobile*, Band 7003B, Straßburg, 2008. SPIE - The International Society for Optical Engineering.
- [JSK<sup>+</sup>08] Christian Jebas, Sven Schellinger, Karsten Klinger, Dieter Kooß und Karl Manz. Optimierung der Beleuchtung von Personenwagen und Nutzfahrzeugen. F66, BAST - Bundesanstalt für Straßenwesen, März 2008 - 2008.
- [JSKL07] Christian Jebas, Sven Schellinger, Karsten Klinger und Uli Lemmer. Untersuchung des Einflusses der Vorfeld- und Seitenausleuchtung automobiler Scheinwerfer auf die Erkennbarkeitsentfernung von Sehobjekten. In *Lux Junior 2007*, Ilmenau, 2007.
- [KA04] Karsten Klinger und Arne Abromeit. Design einer LED-Leuchte - Ein Überblick über das Wettbewerbsprojekt. In *Jahrestreffen der Hochschulgemeinschaft für Lichttechnik an der Universität Karlsruhe*, Karlsruhe, 2004. Universität Karlsruhe (TH).
- [Kal07a] Andreas Kaltenbach. Daylight simulation for the evaluation of rear lamps. In *ISAL - International Symposium on Automotive Lighting*, Darmstadt, 2007. Herbert Utz Verlag GmbH.
- [Kal07b] Andreas Kaltenbach. Daylight simulation for the evaluation of rear lamps. In *Lux Junior 2007*, Ilmenau, Dörfeld, 2007. Technische Universität Ilmenau.
- [Kal07c] Andreas Kaltenbach. Tageslichtsimulation zur Bewertung von Kraftfahrzeugleuchten. In *Lux junior 2007 - Abstracts - 8. Forum für den lichttechnischen Nachwuchs*. Technische Universität Ilmenau und LiTG - Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e.V., Ilmenau, 2007.
- [Kas07] Daniel Kasper. *Entwurf und Design einer ambienten Innenraumbeleuchtung*. Studienarbeit, Universität Karlsruhe (TH), Lichttechnisches Institut, 2007.
- [Kas08] Daniel Kasper. *Solar Powered LED Lighting Fitting*. Diplomarbeit, Universität Karlsruhe (TH), Lichttechnisches Institut, 2008.
- [KB69] Paul Kay und Brent Berlin. *Basic Color Terms - Their Universality and Evolution*. University of California Press, Berkeley, 1969, ISBN 0520014421 9780520014428.
- [KBA08] Zentrale Register - Zentrales Fahrzeugregister, 2008.
- [KDL06] Karsten Klinger, Antje Dau und Uli Lemmer. Ermittlung des Leuchtenbetriebswirkungsgrades mit einem neuartigen Digital-EVG als Referenz-Vorschaltgerät. In *Licht 2006*, Bern, 2006. SLG Bern - Schweizer Licht Gesellschaft Bern.
- [KG01] Siegfried Kokoschka und Dietrich Gall. *FASIVAL - Entwicklung und Validierung eines Sichtweitenmodells zur Bestimmung der Fahrersichtweite*, Band Ergänzungsbericht. 2001.

## A. Anhang

---

- [Kir07] Raphael Kirsch. *Konzeptionierung, Realisierung und Validierung ambierter Beleuchtung im Fahrzeug*. Studienarbeit, Universität Karlsruhe (TH), Lichttechnisches Institut, 2007.
- [Kir08] Raphael Kirsch. *Die Energieeinsparverordnung 2007 und ihre Auswirkungen auf die Beleuchtung von Nichtwohngebäuden*. Diplomarbeit, Universität Karlsruhe (TH), Lichttechnisches Institut, 2008.
- [KKK<sup>+</sup>07] Carmen Kettwich, Karsten Klinger, Dieter Kooß, Karl Manz und Uli Lemmer. Beeinflusst Werbung unser Fahrverhalten? In *Lux Junior 2007*, Ilmenau, 2007.
- [KKKL07] Carmen Kettwich, Dieter Kooß, Karsten Klinger und Uli Lemmer. Influence of advertisements on the drivers behavior in the road traffic scene. In Tran Quoc Khanh, Editor, *ISAL - International Symposium on Automotive Lighting*, Darmstadt, 2007. Herbert Utz Verlag GmbH.
- [KKL08] Carmen Kettwich, Karsten Klinger und Uli Lemmer. Do advertisements at the roadside distract the driver? In Patrick P. Meyrueis, Editor, *Photonics in the Automobile*, Band 7003B, Straßburg, 2008. SPIE - The International Society for Optical Engineering.
- [KKML06] Karsten Klinger, Dieter Kooß, Karl Manz und Uli Lemmer. Entwicklung angepasster Messgeräte und Messabläufe für lichttechnische Messungen für eine NCAP Fahrzeugbewertung. In *Licht 2006*, Bern, 2006. SLG Bern - Schweizer Licht Gesellschaft Bern.
- [KKN02] Vladimir Kubena, Daniel Kletensky und Rainer Neumann. *Rear Lamp Reaction Time Study - Comparison of Incandescent Bulbs and LEDs*. Advanced Lighting Technology for Vehicles. Society of Automotive Engineers, Inc, 2002, ISBN 0-7680-0936-7.
- [KL08] Karsten Klinger und Uli Lemmer. The influence of ambient light on the driver. In Patrick P. Meyrueis, Editor, *Photonics in the Automobile*, Band 7003B, Straßburg, 2008. SPIE - The International Society for Optical Engineering.
- [Kli02a] Karsten Klinger. Grundlagen der Lichttechnik aus fahrzeugtechnischer Sicht, 2002.
- [Kli02b] Karsten Klinger. *Untersuchung der Abhängigkeit der Reaktionszeit vom Überlappungsgrad der Flächenanteile zweier Lichtsignale unterschiedlicher Farbe*. Diplomarbeit, Universität Karlsruhe (TH), Lichttechnisches Institut, 2002.
- [Kli04a] Karsten Klinger. Dependency of the reaction time from the overlap of signal lights with different colors. In Thomas P. Pearsall, Editor, *Photonics in the Automobile*, Genf, 2004. SPIE - The International Society for Optical Engineering.
- [Kli04b] Karsten Klinger. *Untersuchungen zur Überlappung von Lichtsignalen bei Kraftfahrzeugen*. Licht 2004 - Die Tagung. LiTG, Dortmund, 2004.
- [Kli05] Karsten Klinger. Reaction time increase due to the overlap of brake light and turn signals. In Prof. Dr.-Ing. H. F. Schlaak, Editor, *ISAL - International Symposium on Automotive Lighting*, Band 11, Darmstadt, 2005. Herbert Utz Verlag GmbH.
- [Kli06] Karsten Klinger. Auswirkungen des Transmissionsgrades von Verdunkelungsstoff in der Praxis, 2006.
- [Kli07a] Karsten Klinger. Ambiente LED-Innenraumbeleuchtung in Fahrzeugen. In *LED Lighting Congress 2007*, Karlsruhe, 2007. Rutronik.

- [Kli07b] Karsten Klinger. Development of criteria for the rating of vehicle lighting with respect to an NCAP for active safety. In Tran Quoc Khanh, Editor, *ISAL - International Symposium on Automotive Lighting*, Darmstadt, 2007. Herbert Utz Verlag GmbH.
- [Kli07c] Karsten Klinger. Entwicklung von Kriterien zur Bewertung der Fahrzeugbeleuchtung im Hinblick auf ein NCAP für aktive Sicherheit. In *Lux Junior 2007*, Ilmenau, 2007.
- [Kli07d] Karsten Klinger. Grundlagen der Lichttechnik aus fahrzeugtechnischer Sicht. In Horst Lange, Editor, *Handbuch für Beleuchtung*, Band 36, Seiten III–2.1. ecomed, Landsberg am Lech, 2007.
- [Kli08] Karsten Klinger. Ambiente Innenraumbeleuchtung. In Horst Lange, Editor, *Handbuch für Beleuchtung*, Seiten III–2.3. ecomed, Landsberg am Lech, 2008.
- [KM99] Paul Kay und Luisa Maffi. Color Appearance and the Emergence and Evolution of Basic Color Lexicons. *American Anthropologist*, 101:743–760, 1999.
- [Kob04] Simon Kober. *Aufbau einer Apparatur zur Messung der Lichtstärkeverteilung von Fahrradscheinwerfern, Fahrzeugrückleuchten und Arbeitsplatzleuchten*. Studienarbeit, Universität Karlsruhe (TH), Lichttechnisches Institut, 2004.
- [Kok99] Siegfried Kokoschka. *Grundlagen der Lichttechnik*. Universität Karlsruhe (TH), Lichttechnisches Institut, Karlsruhe, 1999.
- [KSK<sup>+</sup>06] Karsten Klinger, Sven Schellinger, Dieter Kooß, Karl Manz und Uli Lemmer. New technologies for night vision. In Patrick P. Meyrueis und Thomas P. Pearsall, Editoren, *Photonics in the Automobile II*, Band Proc. SPIE Vol. 6198, 61980G, Straßburg, 2006. SPIE - The International Society for Optical Engineering.
- [Kun05] Thorsten Kunz. *Entwurf und Systemdesign einer LED Leuchte*. Studienarbeit, Universität Karlsruhe (TH), Lichttechnisches Institut, 2005.
- [Kun07] Thorsten Kunz. *Entwicklung einer lokal dimmbaren Flachbildschirm-Hinterleuchtung mit farbigen Leuchtdioden*. Diplomarbeit, Universität Karlsruhe (TH), Lichttechnisches Institut, 2007.
- [Köt08] Eleonore Köth. Private Mitteilung über die Praxis der Untersuchung von Sehschärfen für die Führerscheiprüfung, 2008.
- [Lan07] Thomas Langhof. *Entwicklung eines Lichtkonzeptes im Rahmen der Sanierung und Umfunktionierung des Museums Minas de Ciência in Lousal, Portugal*. Studienarbeit, Universität Karlsruhe (TH), Lichttechnisches Institut, 2007.
- [LG07] Micha Linde und Florin Geuppert. *Pimp my interior light my car*. Teamprojekt, Universität Karlsruhe (TH), Lichttechnisches Institut, 2007.
- [LGB08] LMT Lichtmesstechnik GmbH Berlin. Luminance Meter LMT L 1009. Internet, 2008.
- [LHW78] U. Lupp, Gert Hauske und W. Wolf. Different systems for the visual detection of high and low spatial frequencies. *Photographic Science and Engineering*, 22:80–84, 1978.
- [Löb76] Bernd Löbach. *Industrial Design - Grundlagen der Industrieproduktgestaltung*. Karl Thiernig, München, 1976, ISBN 3-521-04050-X.
- [Löb00] Peter Löbig. Ambiente Innenraumbeleuchtung von Kraftfahrzeugen. In *Licht 2000*, Seite 810, Goslar, 2000.

## A. Anhang

---

- [Löf06] Sebastian Löffler. *Evaluierung eines Verstellkonzepts für Scheinwerfer mit Leuchtweitenregelung und adaptivem Frontbeleuchtungssystem*. Studienarbeit, Universität Karlsruhe (TH), Lichttechnisches Institut, 2006.
- [Löf07] Sebastian Löffler. *Programmierung einer Software zur Überprüfung der ECE Zulassungsfähigkeit von Lichtsimulationsmodellen*. Diplomarbeit, Universität Karlsruhe (TH), Lichttechnisches Institut, 2007.
- [Man04] Karl Manz. Private Mitteilung über die Ansprechzeiten von Glühlampen, 2004.
- [Man05] Karl Manz. Colour Washout Test Procedure for Signalling Lamps. In Prof. Dr.-Ing. H. F. Schlaak, Editor, *ISAL - International Symposium on Automotive Lighting*, Band 11, Seiten 275–283, Darmstadt, 2005. Herbert Utz Verlag GmbH.
- [Mar05] Franco Marcori. LED in Rear Lamps, Performance and Styling. In Prof. Dr.-Ing. H. F. Schlaak, Editor, *ISAL - International Symposium on Automotive Lighting*, Band 11, Seiten 426–429, Darmstadt, 2005. Herbert Utz Verlag GmbH.
- [MKK07] Karl Manz, Karsten Klinger und Dieter Kooß. Possible Modern Concepts to Determine Lighting Areas or Distances between Lighting Functions. In Tran Quoc Khanh, Editor, *ISAL - International Symposium on Automotive Lighting*, Band 12, Seiten 370–371, Darmstadt, 2007. Herbert Utz Verlag GmbH.
- [MKKS07] Karl Manz, Dieter Kooß, Karsten Klinger und Sven Schellinger. Entwicklung von Kriterien zur Bewertung der Fahrzeugbeleuchtung im Hinblick auf ein NCAP für aktive Fahrzeugsicherheit. F65, BASt - Bundesanstalt für Straßenwesen, 2007.
- [Mor67] Rudolf G. Mortimer. Psychological Considerations in the Design of Automotive Signaling Systems. *American Association for Auto Medicine*, 11th Annual Meeting:29–42, 1967.
- [Mor69] Rudolf G. Mortimer. Dynamic Evaluation of Automobile Rear Lighting Configurations. In *Highway Research Board*, Band 275 - 48th Annual Meeting, Seiten 12–22, Washington, 1969. Highway Research Board.
- [Mor70] Rudolf G. Mortimer. *Psychological Research in Automobile Rear Lighting*. International Automobile Safety Conference Compendium 1970. Society of Automotive Engineers, Inc, 1970.
- [Mos69] L. Moser. Das Reaktionsverhalten bei Stör- und Schreckreizen. *ZVS - Zeitschrift für Verkehrssicherheit*, 15 Nr. 1:3–11, 1969.
- [MR69] D. G. W. Mace und K. S. Rutley. An evaluation of a brakelight display which indicates the severity of braking. RRL Report LR 287, Road Research Laboratory - Ministry of Transport, 1969.
- [Nag78] Y. Nagayama. Role of visual perception in driving. *IATSS Research*, 2:64–73, 1978.
- [Ner08] Nervenleitgeschwindigkeit. HTTP, 2008.
- [Ols96] Paul L. Olson. *Evaluation of a New LED High-Mounted Stop Lamp*. Motor Vehicle Lighting, SAE PT-60. Society of Automotive Engineers, Inc, 1996, ISBN 1-56091-753-9.

- [Owe70] Lewis C. Owen. *The Controversy Over Rear Lighting and Signaling on Motor Vehicles*. International Automobile Safety Conference Compendium 1970. Society of Automotive Engineers, Inc, 1970.
- [PC72] H. Projector und G. Cook. Should Rear Lights of Motor Vehicles Be Color Coded. *Journal of IES - Illuminating Engineering Society of North America*, 1972.
- [Ple03] Michael Plewka. *Lehrbuch Klassen B, BE & A, A1, M & L, T Grund- und Zusatzwissen für die theoretische Prüfung*. Wendel-Verlag, 2003.
- [PMCC02] S. Plainis, I. J. Murray, K. Chauhan und W. N. Charman. Reaction times as an index of visual conspicuity at night. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 22 (5):409415, 2002.
- [Pos78] David V. Post. Signal Lighting System Requirements for Emergency, School bus and Service Vehicles. Final Report UM-HSRI-78-55, University of Michigan - Highway Safety Research Institute, 15.11.1978 - 1978.
- [PR07] Martin Perner und Philipp Rabel. *Pimp my Interior*. Teamarbeit, Universität Karlsruhe (TH), Lichttechnisches Institut, 2007.
- [Rad08] Angel Radev. *Streulichtminimierung bei Lichtstärkemessungen*. Studienarbeit, Universität Karlsruhe (TH), Lichttechnisches Institut, 2008.
- [Rei07] Lars Reichard. *Pimp my Interior*. Teamarbeit, Universität Karlsruhe (TH), Lichttechnisches Institut, 2007.
- [Rie07] Daniel Riedl. *Einfluss eines ambient beleuchteten Fahrzeuginnenraums auf das Kontrastsehvermögen*. Studienarbeit, Universität Karlsruhe (TH), Lichttechnisches Institut, 2007.
- [Rip01a] Joachim Ripperger. *Lichttechnische Anforderungen an Schluß- und Bremsleuchten für Kraftfahrzeuge*. Herbert Utz Verlag GmbH, 2001, ISBN 3-89675-818-7.
- [Rip01b] Joachim Ripperger. *Luminance: the Future Photometric for Rear- and Brake-lights*. PAL - Progress in Automobile Lighting. Herbert Utz Verlag GmbH, Darmstadt, 2001, ISBN 3-89675-971-X.
- [Ros75a] Axel Rosemann. *Beeinflussung der Reaktionszeit von Kraftfahrzeugfahrern durch Anordnung und Farbe der Brems- und Schlußleuchten*. Dissertation, Technische Universität Berlin, Fachbereich 21 - Umwelttechnik, 1975.
- [Ros75b] Axel Rosemann. Einfluss von Rückleuchtensystemen auf die Bremsreaktionszeit von Kraftfahrzeugfahrern. In P. Devaux, Editor, *Minutes of Technical Meeting TC-4 7*, Band P-75-63, Seiten 710–718, 1975.
- [RS05] Lucia Ronchi und Janos Schanda. Quantification of some visual effects of natural daylight in a rough world. In Helmut D. Range, Editor, *Lux Europe 2005*, Seite 175, Berlin, 2005. Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e.V. - LiTG.
- [Rui04] Andreas Ruiss. *Entwurf und Design einer LED-Leuchte*. Studienarbeit, Universität Karlsruhe (TH), Lichttechnisches Institut, 2004.
- [Sch00] Lisa M. Schreiner. *An Investigation of the Effectiveness of a Strobe Light as an Imminent Rear Warning Signal*. Master, State University, Virginia Polytechnic Institute, 2000.

## A. Anhang

---

- [Sch04] Philipp H. Schmälzle. *ctenophos - Entwicklung und Systemdesign einer LED-Leuchte*. Studienarbeit, Universität Karlsruhe (TH), Lichttechnisches Institut, 2004.
- [Sch07] Martin Schulte. *Pimp my Interior*. Studienarbeit, Universität Karlsruhe (TH), Lichttechnisches Institut, 2007.
- [SEG<sup>+</sup>05] S. Schönebeck, U. Ellmers, J. Gail, R. Krautscheid und R. Tews. *Abschätzung möglicher Auswirkungen von Fahren mit Licht am Tag (Tagfahrleuchten / Abblendlicht) in Deutschland*. BASt - Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, 2005.
- [SF93a] Michael Sivak und Michael J. Flannagan. Fast-rise brake lamp as a collision-prevention device. *Ergonomics*, 36:391–395, 1993.
- [SF93b] Michael Sivak und Michael J. Flannagan. Fast-Rise Brake Lamp as a Collision Prevention Device. UMTRI - University of Michigan Transportation Research Institute, 1993.
- [SFKL06a] Sven Schellinger, Dorit Franzke, Karsten Klinger und Uli Lemmer. Advantages of ambient interior lighting for drivers contrast vision. In Patrick P. Meyrueis und Thomas P. Pearsall, Editoren, *Photonics in the Automobile II*, Band Proc. SPIE Vol. 6198, 61980J, Straßburg, 2006. SPIE - The International Society for Optical Engineering.
- [SFKL06b] Sven Schellinger, Dorit Franzke, Karsten Klinger und Uli Lemmer. Einfluss von ambienter Innenraumbeleuchtung auf das Kontrastsehvermögen des Autofahrers. In *Licht 2006*, Bern, 2006. SLG Bern - Schweizer Licht Gesellschaft Bern.
- [SFKT98] M. Sivak, M. J. Flannagan, S. Kojima und E. C. Traube. *The Influence of Sun Loading on the Visibility of clear-lens Turn Signals*, Band UMTRI-98-2. UMTRI - University of Michigan Transportation Research Institute, 1998.
- [SHJ96] Frank Steven Schwartz, Wolfgang Hendrischk und Jianzhong Jiao. *Intelligent Automotive Lighting*. Motor Vehicle Lighting, SAE PT-60. Society of Automotive Engineers, Inc, 1996.
- [SKK<sup>+</sup>05] Sven Schellinger, Karsten Klinger, Dieter Kooß, Karl Manz und Uli Lemmer. NCAP-Lighting A new approach to rate illumination of cars. In *ISAL - International Symposium on Automotive Lighting*, Darmstadt, 2005. Herbert Utz Verlag GmbH.
- [SSF03] M. Sivak, B. Schoettle und M. J. Flannagan. Resistance of LED and incandescent front turn signals to masking from adjacent headlamps. *Lighting Research and Technology*, 35-1:77–85, 2003.
- [SSFM05] M. Sivak, B. Schoettle, M. J. Flannagan und T. Minoda. Effectiveness of clear-lens turn signals in direct sunlight. UMTRI-2005-19. UMTRI-98926, UMTRI - University of Michigan - Transportation Research Institute, Human Factors Division, 2005.
- [Stö94] Horst Stöcker. *Taschenbuch der Physik*. Verlag Harri Deutsch, 2. Auflage, 1994, ISBN 3-8171-1358-7.
- [Tab04] Sandra Tabisova. *Bewertung des Einflusses des Farbortes von Signalleuchten auf die intuitive Zuordnungsfähigkeit zu verschiedenen Signalfunktionen anhand der Reaktionszeit*. Masterarbeit, Universität Karlsruhe (TH), Lichttechnisches Institut, 2004.
- [Teca] Bildauflösende Leuchtdichtemessung mit Leuchtdichtemeßkameras LMK96/98 (Videoanalysatoren).

- [Tecb] *Leuchtdichtemesssystem Video Photometer LMK 2000*. Opteema Engineering GmbH.
- [Tei54] W. H. Teichner. Recent studies of simple reaction time. *Psychological Bulletin*, 51:128–149, 1954.
- [TFM96] Simon Thorpe, Denis Fize und Catherine Marlot. Speed of processing in the human visual system. *Nature*, 381:520–522, 1996.
- [Thi04] Thiemer. CAN-Bus, 15. Juni 2004 - 2004.
- [Tob08] Bartosz Tober. *Daylight adapting RGB LED Lamp*. Masterarbeit, Universität Karlsruhe (TH), Lichttechnisches Institut, 2008.
- [Tom06] Johann H. Tomforde. Automotive Styling and Design. In *Pimp my Interior*, Karlsruhe, 2006. Universität Karlsruhe (TH), Lichttechnisches Institut.
- [Tro95] Jörg Trotter. *Das Auge*. Trimbach Optik-Verlag, 1995.
- [VDK<sup>+</sup>02] Boris M. Velichkovsky, Sascha M. Dornhoefer, Mathias Kopf, Jens Helmert und Markus Joos. Change detection and occlusion modes in road-traffic scenarios. *Transportation Research, Part F* 5:99–109, 2002.
- [Völ04] Stephan Völker. Bewertungssysteme für Scheinwerfer. *CTI Fachkonferenz Lichttechnik 2004*, 2004.
- [Völ06] Stephan Völker. *Hell- und Kontrastempfindung - ein Beitrag zur Entwicklung von Ziel-funktionen für die Auslegung von Kraftfahrzeug-Scheinwerfern*. Habilitation, Universität Paderborn, Fakultät für Maschinenbau, 2006.
- [Wan07] Bernhard Wangler. *Entwurf und Aufbau eines LED-Leuchtdichtestands*. Studienarbeit, Universität Karlsruhe (TH), Lichttechnisches Institut, 2007.
- [Wan08] Bernhard Wangler. *Psychophysikalische Untersuchungen zur Beleuchtung moderner Flugzeugkabinen*. Diplomarbeit, Universität Karlsruhe (TH), Lichttechnisches Institut, 2008.
- [Wei06] Peter Weibel. *Light art from artificial light: light as a medium in 20th and 21st century art*. A ZKM book. Ostfildern: Hatje Cantz, 2006, ISBN 978-3-7757-1774-8.
- [Wic05] Felix Wichmann. Allgemeine Psychologie I - Wahrnehmung Objektwahrnehmung (VL 6), 2005.
- [WLS01] Michael Wucherer, Reinhard Loose und Roland Simmler. Anforderungen an die Bildwiedergabesysteme in der Radiologie. In *Achter interdisziplinärer KIS / RIS / PACS-Workshop*, 2001.
- [WLS02] Lora Warshawsky-Livine und David Shinar. Effects of uncertainty, transmission type, driver age and gender on brake reaction and movement time. *Journal of Safety Research*, 33(1):117, 2002.
- [ZVS07] Sicherheit durch Kinderfoto und viel Elektronik. *ZVS - Zeitschrift für Verkehrssicherheit*, 2/2007:102, 2007.

## A.2 Abbildungsverzeichnis

2.1	Farbpalette zur Bestimmung der Farbnamen durch Berlin, Kay und weitere Forscher. Die WCS Koordinaten sind an den Munsell Farbtafeln angegeben. (Quelle: [CKR06]) . . . . .	15
2.2	Vordere Signalbilder verschiedener Fahrzeuge Einzelne Leuchten formen mit ihrer Anordnung einfache geometrische Formen. . . . .	18
2.3	Hintere Signalbilder verschiedener Fahrzeuge und Fahrzeugzustände Einzelne Leuchten formen mit ihrer Anordnung einfache geometrische Formen. . . . .	19
2.4	Verschiedene Überlappungsarten der leuchtenden Flächen A und B 1) Signal A wird vollständig überlappt. Signal B wird vollständig überlappt. 2) Signal A wird teilweise überlappt. Signal B wird vollständig überlappt. 3) Signal A wird teilweise überlappt. Signal B wird teilweise überlappt. 4) Signal A wird nicht überlappt. Signal B wird nicht überlappt. . . . .	22
2.5	Verschiedene Abstandsdefinitionen zwischen zwei Lichtfunktionen . . . . .	24
2.6	Beschleunigungswerte bei Vollgas und Vollbremsung . . . . .	25
2.7	Wahrnehmung, aufgeteilt in Perzeption und Apperzeption . . . . .	27
2.8	Sehwinkel $\sigma$ . . . . .	28
2.9	Abhängigkeit der Sehschärfe vom Alter (Quelle: [Tro95]) . . . . .	29
2.10	Zusammenhang zwischen Umfeldleuchtdichte und Sehschärfe (Quelle: [WLS01] nach Hentschel, 1982 und Hartmann, 1970) Kontrast $K = 0,95$ Alter der Versuchspersonen: $A = 25$ bis $A = 50$ Jahre Sehschärfe $s = 0,6$ bei $L_U = 3 \text{ cd/m}^2$ . . . . .	31
2.11	Zusammenhang zwischen Adaptationsleuchtdichte und Sehschärfe. Die Sehschärfe bei reinem Stäbchensehen, ermittelt mit farbenblinden Probanden, ist gestrichelt gekennzeichnet. Grundlage sind Daten von König, 1897 und Riggs, 1965, dargestellt von Hauske [Hau94] . . . . .	32
2.12	Zusammenhang zwischen Adaptationsleuchtdichte und Sehschärfe Grundlage sind Daten von Shlaer, 1937, Schober, 1938, Fortuin, 1951, Pirenne, 1957 und Jainski, 1960, ursprünglich doppelt logarithmisch dargestellt von Hentschel [Hen94] . . . . .	32
2.13	Zusammenhang zwischen Adaptationsleuchtdichte und Sehschärfe im Mesopischen	33
2.14	Negativkontrast (links) und Positivkontrast (rechts) (nach [Kok99]) . . . . .	34
2.15	Kontrast $K = 0,45$ mit einem Schwellwert von 50 Prozent (Daten aus [Fra06]) Alter der Versuchspersonen: $A = 22$ bis $A = 71$ Jahre Sehschärfe $s = 0,25$ bei $L_U = 4,6 \text{ cd/m}^2$ . . . . .	35
2.16	Abhängigkeit der Sehschärfe $s$ vom Winkel $\alpha$ des Bildortes auf der Netzhaut (Quelle: [Tro95]) . . . . .	35
2.17	Einschaltvorgang einer H1-Halogenglühlampe . . . . .	40
2.18	Ansprechzeit einer Glühlampe mit (with device) und ohne (standard) Vorheizen der Wendel (Quelle: [SF93b]) . . . . .	41

2.19	Einschaltvorgang einer D2S-Lampe . . . . .	42
2.20	Verarbeitungszeit bei Betrachtung von Bildern Darstellung der Mittelwerte von 15 Probanden (Quelle: [Wic05]) . . . . .	44
2.21	Typische Wechselzeiten für das Umsetzen des Fußes vom Gaspedal auf das Bremspedal (rechts alle Messwerte, links die bereinigten Werte) . . . . .	45
2.22	Mindestlichtstärken des vorderen Fahrtrichtungsanzeigers in Abhängigkeit des Abstandes zu Abblendlichtscheinwerfern . . . . .	49
2.23	Mindestlichtstärken des vorderen Fahrtrichtungsanzeigers in Abhängigkeit des Abstandes zu Abblendlichtscheinwerfern entsprechend ECE . . . . .	49
2.24	Drei Arten Phantomlicht: Spiegel-Phantomlicht (links), Reflex-Phantomlicht (mittig) und echtes Phantomlicht (rechts) (Quelle: [HK07]) . . . . .	50
2.25	Zwei Arten von echtem Phantomlicht: links nach Haar [Haa80], rechts nach CIE [CIE80] . . . . .	51
2.26	Messanordnung zur Bestimmung des Einflusses von Color Washout . . . . .	52
2.27	Messaufbau zur Quantifizierung der Phantomlichteffekte – Auf der linken Seite ist die Signalleuchte, auf der rechten Seite der Empfänger und verschiedene Positionen des Fremdlichtes dargestellt. Innerhalb der eingezeichneten Winkelbereiche tritt vornehmlich Reflex-Phantomlicht (unterer Bereich von 0 bis 10°) beziehungsweise Spiegel- und echtes Phantomlicht (oberer Bereich von 10 bis 20°) auf. . . . .	54
2.28	Schematischer Aufbau einer Leuchte mit Elementen zur Unterdrückung von Phantomlichteffekten, Seitenansicht (links) und Frontalansicht (rechts) . . . . .	58
2.29	Fremdlichtempfindlichkeit einer Versuchsleuchte mit verschiedenen Optimierungen hinsichtlich Phantomlichteffekten (links) und einer Serienleuchte mit Optimierung durch ein Gitter (rechts) (Quelle: [Haa80]) . . . . .	58
3.1	Bedienelemente der Mittelkonsole ohne (links) und mit (rechts) ambienter Beleuchtung . . . . .	60
3.2	Ambiente Beleuchtung unterstreicht bei Dunkelheit das Interior-Design . . . . .	60
3.3	Bedienelemente der Mittelkonsole im Normalzustand (links) und bei nahender Hand (rechts) zur Anzeige aller Elemente . . . . .	61
3.4	Versuchsaufbau zur Untersuchung des Kontrastsehvermögens bei ambienter Beleuchtung (Zeichnung nicht maßstabsgetreu) . . . . .	62
3.5	Positionen und Flächen ambienter Beleuchtung . . . . .	63
4.1	Kombinationen von Rückleuchten (Quelle: [Mor70]) . . . . .	70
4.2	Änderungen der Reaktionszeit in Abhängigkeit der Signalkodierung . . . . .	71
4.3	Versuchsanordnung für psychophysikalische Untersuchungen der Überlappung . . . . .	72
4.4	Psychophysikalisches Experiment . . . . .	73
4.5	In der oberen Zeile ist eine nicht überlappende, in der unteren Zeile eine überlappende Anordnung von Fahrtrichtungsanzeiger und Bremsleuchte gezeigt. . . . .	74
4.6	Messaufbau zur Ermittlung der Ansprechzeiten der verwendeten Leuchten . . . . .	75

4.7	Ansprechzeit der konventionellen Leuchte . . . . .	75
4.8	Ansprechzeiten der LED–Matrix Leuchte . . . . .	76
4.9	Schema der Ansteuerelektronik mit Zeiterfassung . . . . .	76
4.10	Reaktionszeiten einer Versuchsperson auf das Aufleuchten einer dunklen Leuchte während eine helle Leuchte blinkt . . . . .	78
4.11	Reaktionszeiten einer Versuchsperson auf das Aufleuchten einer hellen Leuchte während eine dunkle Leuchte blinkt . . . . .	78
4.12	Überlappung von Fahrtrichtungsanzeiger und Schlussleuchte . . . . .	79
4.13	Reaktionszeitunterschiede bei 100 Prozent Überlappung . . . . .	81
4.14	Die Abhängigkeit der Fehlerrate $f$ von dem Leuchtdichteverhältnis $V$ bei Erkennung des gelben Blinklichtes . . . . .	87
5.1	Kleinstes noch erkennbares Detail $b$ eines Beobachters mit einer Sehschärfe von $s = 2$ in Abhängigkeit von der Beobachterentfernung $a$ innerhalb des Nahbereichs . . . . .	98
5.2	Messung von Phantomlichteffekten mit einem Leuchtdichtemessgerät . . . . .	99
5.3	Ein Spot mit hoher Leuchtdichte wird bei Messung mit einem deutlich größeren Messfeld durch Mittelwertbildung mit seiner dunkleren Umgebung abgeschwächt. . . . .	100
5.4	Versuchsanordnung der Untersuchungen von Phantomlichteffekten unter realen Bedingungen mit Seitenansicht (links) und Draufsicht (rechts) . . . . .	106
5.5	Situation bei Reflex-Phantomlicht mit eingezeichnetem Sonnenstrahl und der Flächennormalen der Leuchte bei einer Drehung nach <i>innen</i> (links) und <i>außen</i> (rechts) . . . . .	107
5.6	Versuchsanordnung für psychophysikalische Untersuchungen von Phantomlichteffekten . . . . .	108
5.7	Reaktionszeiten auf das Aufleuchten des Fahrtrichtungsanzeigers mit und ohne Fremdlichtbestrahlung . . . . .	109
5.8	Reaktionszeiten auf das Aufleuchten der Bremsleuchten mit und ohne Fremdlichtbestrahlung . . . . .	109

### A.3 Veröffentlichungen

Karsten Klinger. *Grundlagen der Lichttechnik aus fahrzeugtechnischer Sicht*, Vorlesungsmanuskript, 2002 [Kli02a]

Karsten Klinger. *Untersuchungen zur Überlappung von Lichtsignalen bei Kraftfahrzeugen*. Licht 2004 - Die Tagung. LiTG, Dortmund, 2004 [Kli04b]

Karsten Klinger und Arne Abromeit. *Design einer LED-Leuchte - Ein Überblick über das Wettbewerbsprojekt*. In *Jahrestreffen der Hochschulgemeinschaft für Lichttechnik an der Universität Karlsruhe*, Karlsruhe, 2004. Universität Karlsruhe (TH) [KA04]

Karsten Klinger. *Dependency of the reaction time from the overlap of signal lights with different colors*. In *Thomas P. Pearsall, Editor, Photonics in the Automobile*, Genf, 2004. SPIE - The International Society for Optical Engineering [Kli04a]

Karsten Klinger. *Reaction time increase due to the overlap of brake light and turn signals*. In *Prof. Dr.-Ing. H. F. Schlaak, Editor, ISAL - International Symposium on Automotive Lighting*, Band 11, Darmstadt, 2005. Herbert Utz Verlag GmbH [Kli05]

Sven Schellinger, Karsten Klinger, Dieter Kooß, Karl Manz und Uli Lemmer. *NCAP-Lighting A new approach to rate illumination of cars*. In *ISAL - International Symposium on Automotive Lighting*, Darmstadt, 2005. Herbert Utz Verlag GmbH [SKK<sup>+</sup>05]

Karsten Klinger, Sven Schellinger, Dieter Kooß, Karl Manz und Uli Lemmer. *New technologies for night vision*. In *Patrick P. Meyrueis und Thomas P. Pearsall, Editoren, Photonics in the Automobile II*, Band 6198, 61980G, Straßburg, 2006. SPIE - The International Society for Optical Engineering [KSK<sup>+</sup>06]

Sven Schellinger, Dorit Franzke, Karsten Klinger und Uli Lemmer. *Advantages of ambient interior lighting for drivers contrast vision*. In *Patrick P. Meyrueis und Thomas P. Pearsall, Editoren, Photonics in the Automobile II*, Band 6198, 61980J, Straßburg, 2006. SPIE - The International Society for Optical Engineering [SFKL06a]

Karsten Klinger, Antje Dau und Uli Lemmer. *Ermittlung des Leuchtenbetriebswirkungsgrades mit einem neuartigen Digital-EVG als Referenz-Vorschaltgerät*. In *Licht 2006*, Bern, 2006. SLG Bern - Schweizer Licht Gesellschaft Bern [KDL06]

Karsten Klinger, Dieter Kooß, Karl Manz und Uli Lemmer. *Entwicklung angepasster Messgeräte und Messabläufe für lichttechnische Messungen für eine NCAP Fahrzeugbewertung*. In *Licht 2006*, Bern, 2006. SLG Bern - Schweizer Licht Gesellschaft Bern [KKML06]

Sven Schellinger, Dorit Franzke, Karsten Klinger und Uli Lemmer. *Einfluss von ambienter Innenraumbeleuchtung auf das Kontrastsehvermögen des Autofahrers*. In *Licht 2006*, Bern, 2006. SLG Bern - Schweizer Licht Gesellschaft Bern [SFKL06b]

André Domhardt, Sven Schellinger, Karsten Klinger, Dieter Kooß, Karl Manz und Uli Lemmer. *LED-Scheinwerfersimulator zur Generierung komplexer Lichtverteilungen im Kraftfahrzeugbereich*. In *Licht 2006*, Bern, 2006. SLG Bern - Schweizer Licht Gesellschaft Bern [DSK<sup>+</sup>06]

Peter Weibel. *Light art from artificial light: light as a medium in 20th and 21st century art*. A ZKM book. Ostfildern: Hatje Cantz, 2006 [Wei06]

Karsten Klinger. *Auswirkungen des Transmissionsgrades von Verdunkelungsstoff in der Praxis*, Bericht, 2006 [Kli06]

Karsten Klinger. *Grundlagen der Lichttechnik aus fahrzeugtechnischer Sicht*. In *Horst Lange, Editor, Handbuch für Beleuchtung*, Band 36, Seiten III–2.1. ecomed, Landsberg am Lech, 2007 [Kli07d]

Karl Manz, Dieter Kooß, Karsten Klinger und Sven Schellinger. *Entwicklung von Kriterien zur Bewertung der Fahrzeugbeleuchtung im Hinblick auf ein NCAP für aktive Fahrzeugsicherheit*. F65, BASt - Bundesanstalt für Straßenwesen, 2007 [MKKS07]

Karsten Klinger. *Development of criteria for the rating of vehicle lighting with respect to an NCAP for active safety*. In *Tran Quoc Khanh, Editor, ISAL - International Symposium on Automotive Lighting*, Darmstadt, 2007. Herbert Utz Verlag GmbH [Kli07b]

André Domhardt, Udo Rohlfing, Karsten Klinger, Dieter Kooß, Karl Manz und Uli Lemmer. *Optical Design of LED-Lamps for Automotive Applications*. In *Tran Quoc Khanh, Editor, ISAL - International Symposium on Automotive Lighting*, Darmstadt, 2007. Herbert Utz Verlag GmbH [DRK<sup>+</sup>07b]

Norbert Hahn, Karsten Klinger, Karl Manz und Uli Lemmer. *The phantom light effects in modern car rear light combinations*. In *ISAL - International Symposium on Automotive Lighting*, Darmstadt, 2007. Herbert Utz Verlag GmbH [HKML07a]

Carmen Kettwich, Dieter Kooß, Karsten Klinger und Uli Lemmer. *Influence of advertisements on the drivers behavior in the road traffic scene*. In *Tran Quoc Khanh, Editor, ISAL - International Symposium on Automotive Lighting*, Darmstadt, 2007. Herbert Utz Verlag GmbH [KKKL07]

Karsten Klinger. *Entwicklung von Kriterien zur Bewertung der Fahrzeugbeleuchtung im Hinblick auf ein NCAP für aktive Sicherheit*. In *Lux Junior 2007*, Ilmenau, 2007 [Kli07c]

André Domhardt, Udo Rohlfing, Karsten Klinger, Dieter Kooß, Karl Manz und Uli Lemmer. *Design und Simulation LED-basierter automobiler Beleuchtungssysteme*. In *Lux Junior 2007*, Ilmenau, 2007 [DRK<sup>+</sup>07a]

Norbert Hahn, Karsten Klinger, Karl Manz und Uli Lemmer. *The phantom light effects in modern car rear light combinations - Untersuchung des Einflusses des Phantomlichteffektes auf die Erkennbarkeit von Fahrzeug-Rückleuchten*. In *Lux Junior 2007*, Ilmenau, Dörnfeld, 2007 [HKML07b]

Christian Jebas, Sven Schellinger, Karsten Klinger und Uli Lemmer. *Untersuchung des Einflusses der Vorfeld- und Seitenausleuchtung automobiler Scheinwerfer auf die Erkennbarkeitsentfernung von Sehobjekten*. In *Lux Junior 2007*, Ilmenau, 2007 [JSKL07]

Carmen Kettwich, Karsten Klinger, Dieter Kooß, Karl Manz und Uli Lemmer. *Beeinflusst Werbung unser Fahrverhalten?* In *Lux Junior 2007*, Ilmenau, 2007 [KKK<sup>+</sup>07]

André Domhardt, Udo Rohlfing, Karsten Klinger, Karl Manz, Dieter Kooß und Uli Lemmer. *Optical design of LED-based automotive tail lamps*. In *SPIE 2007*, San Diego, 2007 [DRK<sup>+</sup>07c]

Norbert Hahn und Karsten Klinger. *Phantomlichteffekte im Straßenverkehr*. In *Horst Lange, Editor, Handbuch für Beleuchtung*, Seiten III–2.2. ecomed, Landsberg am Lech, 2007 [HK07]

Karsten Klinger. *Ambiente LED-Innenraumbeleuchtung in Fahrzeugen*. In *LED Lighting Congress 2007*, Karlsruhe, 2007. Rutronik [Kli07a]

Karsten Klinger und Uli Lemmer. *The influence of ambient light on the driver*. In *Patrick P. Meyrueis, Editor, Photonics in the Automobile*, Band 7003B, Straßburg, 2008. SPIE - The International Society for Optical Engineering [KL08]

Carmen Kettwich, Karsten Klinger und Uli Lemmer. *Do advertisements at the roadside distract the driver?* In *Patrick P. Meyrueis, Editor, Photonics in the Automobile*, Band 7003B, Straßburg, 2008. SPIE - The International Society for Optical Engineering [KKL08]

Norbert Hahn, Karsten Klinger, Karl Manz und Uli Lemmer. *The phantom light effects in modern car taillight combinations*. In *Patrick P. Meyrueis, Editor, Photonics in the Automobile*, Band 7003B, Straßburg, 2008. SPIE - The International Society for Optical Engineering [HKML08]

André Domhardt, Udo Rohlfing, Simon Weingärtner, Karsten Klinger, Dieter Kooß, Karl Manz und Uli Lemmer. *New Design Tools for LED Headlamps*. In *Patrick P. Meyrueis, Editor*, Photonics in the Automobile, Band 7003B, Straßburg, 2008. SPIE - The International Society for Optical Engineering [DRW<sup>+</sup>08]

Christian Jebas, Karsten Klinger und Uli Lemmer. *New headlamp technologies*. In *Patrick P. Meyrueis, Editor*, Photonics in the Automobile, Band 7003B, Straßburg, 2008. SPIE - The International Society for Optical Engineering [JKL08b]

Christian Jebas, Sven Schellinger, Karsten Klinger, Dieter Kooß und Karl Manz. *Optimierung der Beleuchtung von Personenwagen und Nutzfahrzeugen*. F66, BASt - Bundesanstalt für Straßenwesen, März 2008 [JSK<sup>+</sup>08]

Christian Jebas, Karsten Klinger und Uli Lemmer. *Die dynamische Leuchtweitenregelung und ihre Relevanz für die Verkehrssicherheit*. VKU - Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, Seite 119, 2008 [JKL08a]

## A.4 Betreute Arbeiten

Sandra Tabisova. *Bewertung des Einflusses des Farbortes von Signalleuchten auf die intuitive Zuordnungsfähigkeit zu verschiedenen Signalfunktionen anhand der Reaktionszeit*. Diplomarbeit, Karlsruhe, 27. Februar 2004 [Tab04]

Philipp H. Schmäzle. *ctenophos - Entwicklung und Systemdesign einer LED-Leuchte*. Studienarbeit, Karlsruhe, Sommersemester 2004 [Sch04]

Simon Kober. *Aufbau einer Apparatur zur Messung der Lichtstärkeverteilung von Fahrradscheinwerfern, Fahrzeugrückleuchten und Arbeitsplatzleuchten*. Studienarbeit, Karlsruhe, 20. August 2004 [Kob04]

Andreas Ruiss. *Entwurf und Design einer LED-Leuchte*. Studienarbeit, Karlsruhe, September 2004 [Rui04]

Leopold Beer. *Aufbau eines Meßplatzes für Hochleistungs-LEDs*. Diplomarbeit, Karlsruhe, 6. Juni 2005 [Bee05]

Thorsten Kunz. *Entwurf und Systemdesign einer LED Leuchte*. Studienarbeit, Karlsruhe, 21. Oktober 2005 [Kun05]

Benjamin Hummel. *Toleranzwinkeluntersuchung, Erweiterungen einer Simulationsumgebung und lichttechnische Untersuchungen einer Intelligenten Heckleuchte*. Studienarbeit, Karlsruhe, 21. Dezember 2005 [Hum05]

Dorit Franzke. *Einfluss ambierender Beleuchtung auf das Kontrastsehvermögen*. Diplomarbeit, Karlsruhe, 30. Januar 2006 [Fra06]

Sebastian Löffler. *Evaluierung eines Verstellkonzepts für Scheinwerfer mit Leuchtweitenregelung und adaptivem Frontbeleuchtungssystem*. Studienarbeit, Karlsruhe, April 2006 [Löf06]

Daniel Eyhorn. *Automatische Farberkennung von elektrischen Adern*. Diplomarbeit, Karlsruhe, 1. Juni 2006 [Eyh06]

Benjamin Hummel. *Sensorik einer Intelligenten Heckleuchte*. Diplomarbeit, Karlsruhe, 30. Juni 2006 [Hum06]

Jan Philipp Büchner. *Investitionsrechnung zum Lichttunnel auf dem Mackensen-Areal*. Studienarbeit, Karlsruhe, August 2006 [Büc06]

## A. Anhang

---

- Christian Jebas. *Untersuchung des Einflusses der Vorfeld- und Seitenausleuchtung automobiler Scheinwerfer auf die Erkennbarkeitsentfernung von Sehobjekten*. Diplomarbeit, Karlsruhe, 17. Oktober 2006 [Jeb06]
- Mattias Paul Heinrich. *Pimp my Interior*. Teamprojekt, Karlsruhe, Dezember 2006 [Hei06]
- Florin Geuppert und Micha Linde. *Pimp my interior - light my car*. Teamprojekt, Karlsruhe, März 2007 [LG07]
- Martin Perner und Philipp Rabel. *Pimp my Interior*. Teamprojekt, Karlsruhe, 21. September 2007 [PR07]
- Martin Schulte. *Pimp my Interior*. Studienarbeit, Karlsruhe, 22. Januar 2007 [Sch07]
- Michael Fritz. *Reduktion der für einen Fahrzeugführer wichtigen Fahrinformationen und deren Darstellungsmöglichkeiten*. Studienarbeit, Karlsruhe, 29. Januar 2007 [Fri07]
- Thomas Langhof. *Entwicklung eines Lichtkonzeptes im Rahmen der Sanierung und Umfunktionalisierung des Museums Minas de Ciência in Lousal, Portugal*. Studienarbeit, Karlsruhe, Februar 2007 [Lan07]
- Lars Reichardt. *Pimp my Interior*. Teamarbeit, Karlsruhe, April 2007 [Rei07]
- Norbert Hahn. *Untersuchung des Einflusses des Phantomlichteffektes auf die Erkennbarkeit von Fahrzeug-Rückleuchten*. Diplomarbeit, Karlsruhe, 23. April 2007 [Hah07b]
- Raphael Kirsch. *Konzeptionierung, Realisierung und Validierung ambienter Beleuchtung im Fahrzeug*. Studienarbeit, Karlsruhe, 2. Mai 2007 [Kir07]
- Daniel Riedl. *Einfluss eines ambient beleuchteten Fahrzeuginnenraums auf das Kontrastsehvermögen*. Studienarbeit, Karlsruhe, 11. Juni 2007 [Rie07]
- Bernhard Wangler. *Entwurf und Aufbau eines LED-Leuchtdichtestandards*. Studienarbeit, Karlsruhe, 22. Juni 2007 [Wan07]
- Sebastian Löffler. *Programmierung einer Software zur Überprüfung der ECE Zulassungsfähigkeit von Lichtsimulationsmodellen*. Diplomarbeit, Karlsruhe, Juli 2007 [Löf07]
- Daniel Kasper. *Entwurf und Design einer ambienten Innenraumbeleuchtung*. Studienarbeit, Karlsruhe, 1. September 2007 [Kas07]
- Thorsten Kunz. *Entwicklung einer lokal dimmbaren Flachbildschirm-Hinterleuchtung mit farbigen Leuchtdioden*. Diplomarbeit, Karlsruhe, 14. August 2007 [Kun07]
- Tober Bartosz. *Daylight adapting RGB LED Lamp*. Masterarbeit, Karlsruhe, 2008 [Tob08]
- Bernhard Wangler. *Psychophysikalische Untersuchungen zur Beleuchtung moderner Flugzeugkabinen*. Diplomarbeit, Karlsruhe, 30. April 2008 [Wan08]
- Peter Ivicic. *Anforderungen an ein LED-Tagfahrlicht*. Diplomarbeit, Karlsruhe, Mai 2008 [Ivi08]
- Daniel Kasper. *Solar Powered LED Lighting Fitting*. Diplomarbeit, Karlsruhe, 15. Mai 2008 [Kas08]
- Raphael Kirsch. *Die Energieeinsparverordnung 2007 und ihre Auswirkungen auf die Beleuchtung von Nichtwohngebäuden*. Diplomarbeit, Karlsruhe, 27. Mai 2008 [Kir08]
- Angel Radev. *Streulichtminimierung bei Lichtstärkemessungen*. Studienarbeit, Karlsruhe, Juni 2008 [Rad08]

## A.5 Weitere Aktivitäten

- Messeausstellung HOGA 2005
- Messeausstellung Hannover Messe 2007
- KEIM - Karlsruher Existenzgründungs-Impuls
  - Einstieg in die Existenzgründung 2004
  - Unternehmerisch Rechnen 2004
  - Unternehmerisch Denken 2004
- Schulungsseminar Grundlagen der Lichttechnik
  - 2004
  - 2005 (nur LTI-intern)
  - 2006 Frühling
  - 2007 Frühling
  - 2007 Herbst
  - 2008 Frühling
  - 2008 Herbst (firmenintern)
- Schulungsseminar Grundlagen automobiler Lichttechnik
  - 2008 Frühling, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
- Schulungsseminar Displaytechnik
  - 2006 Herbst (Grundlagenteil)

### A.6 Lebenslauf

#### Angaben zur Person

Name	Karsten Daniel Köth	
Berufsabschluss	Diplom-Ingenieur Elektrotechnik	
Zeitweise geführter Name	Klinger	
Geburtsdatum	28. September 1973	
Geburtsort	Weinheim	
Staatsangehörigkeit	deutsch	
Familienstand	geschieden	
Eltern	Hermann Köth,	Diplom-Ingenieur Elektrotechnik
	Brigitte Köth,	Oberlehrerin

Anschrift	Gürrichstraße 4 76149 Karlsruhe
Telefon	+49 (0) 721 – 70 95 12
Telefax	+49 (0) 721 – 62 69 79 07
Email	karsten@klacplus.de

#### Schulbildung

1980 - 1984	Grundschule Weinheim-Hohensachsen
1984 - 1993	Werner-Heisenberg-Gymnasium Weinheim
1993	Abitur mit den Leistungsfächern: Mathematik Physik

#### Universitäre Ausbildung und Beschäftigung

1994 - 1996	Studium an der Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg Studiengang: Physik Diplom
1996 - 2002	Studium an der Universität Fridericiana in Karlsruhe Studiengang: Elektrotechnik Diplom
2002	Diplomarbeit Lichttechnischen Institut der Universität Karlsruhe Thema: Untersuchung der Abhängigkeit der Reaktionszeit vom Überlappungsgrad der Flächenanteile zweier Lichtsignale unterschiedlicher Farbe Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Siegfried Kokoschka Betreuer: Dr. Karl Manz Dr. Dieter Kooß
2002 ab 2002	Diplom Elektrotechnik und Informationstechnik Wissenschaftlicher Angestellter

ab 2003	Lichttechnisches Institut der Universität Karlsruhe Prüfstelle für lichttechnische Einrichtungen an Fahrzeugen Bereich Forschung Arbeitsgruppenleiter
ab 2007	Lichttechnisches Institut der Universität Karlsruhe Angewandte Lichttechnik Abteilungsleiter
ab 2008	Lichttechnisches Institut der Universität Karlsruhe Angewandte Lichttechnik und Optische Technologien im Automobil Leiter Licht- und Strahlungslabor Technische Universität Berlin Fachgebiet Lichttechnik

### **Außeruniversitäre Beschäftigung**

1993 - 1994	Richtfunker am digitalen Richtfunksystem CMCS der NATO, Wehrdienst
1994	Gründung einer Firma für Computerhandel und -service in Weinheim
1996	System-Administration eines heterogenen Computernetzes bei ABB
1996	Grundpraktikum Elektrotechnik bei ABB
1997	Kraftwerksinbetriebnahme in Karlsruhe und Ludwigshafen bei ABB
1998	Softwareentwickler für objektorientierte Datenbanken
1998	Software- und Systementwickler für vollintegrierte Notrufleitstellen
ab 2004	Mitglied des Beirats der lichttechnischen Gesellschaft in Deutschland LiTG – Bezirksgruppe Baden
2005	Gründung eines Ingenieurbüros in Karlsruhe für lichttechnische Beratung und lichttechnische Messungen