

METHODE ZUR MESSUNG DES EINFLUSSES VON LICHTIMPULSEN AUF DIE VISUELLE LEISTUNGSFÄHIGKEIT

Zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften

von der KIT-Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik

des Karlsruher Instituts für Technologie

genehmigte

Dissertation

von

Dipl.-Ing. Melanie Helmer

geb. in

Bad Salzungen

Tag der mündlichen Prüfung: 22.03.2019

Hauptreferent:

Prof. Dr. Cornelius Neumann

Korreferent:

Prof. Dr. Christoph Schierz

I don't have the answer,

But I have a plan.

Beatsteaks, "40 Degrees"

I DANKSAGUNG

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die mich während der Anfertigung dieser Arbeit unterstützt und motiviert haben.

Ein besonderer Dank geht an meinen Doktorvater Prof. Dr. rer. nat. Cornelius Neumann für die Betreuung und Möglichkeit bedanken, dass ich diese Arbeit am Lichttechnischen Institut durchführen konnte. Vielen Dank auch für deinen vielseitigen Input auch über die fachlichen Fragestellungen hinaus.

Außerdem möchte ich mich bei Univ.-Prof. Dr. sc. nat. habil. Christoph Schierz für die Übernahme des Korreferendariats und die konstruktive Kritik im Rahmen der Begutachtung bedanken.

Ein weiterer Dank geht an Dr. Klaus Trampert für die konstruktiven Gespräche und Diskussionen sowie das leisten aktiver Sterbehilfe.

Ich danke außerdem meinem langjährigen Kollegen Patric Jahn, der ausnahmslos wirklich immer darauf bedacht war mich mit Verbesserungsvorschlägen bezüglich meiner Arbeit zu versorgen und dem es mit seinen magic Hands immer gelang die quasi Unvereinbarkeit aus Melli und Technik zu lösen.

Des Weiteren danke ich allen Kollegen mit denen ich während meiner Zeit am Lichttechnischen Institut in der Arbeitsgruppe Neumann zusammengearbeitet habe für die tolle Arbeitsatmosphäre, ihre Hilfs-

Danksagung

bereitschaft und die Unterstützung im Rahmen dieser Arbeit. Ein besonderes Dankeschön geht hierbei an meine ehemaligen Kollegen Dr. Christian Jebas und Dr. Steffen Michenfelder, die mich dazu ermutigt haben zu promovieren und die mir das Thema Licht bereits zu Studienzeiten mit so viel Begeisterung nähergebracht haben. Außerdem danke ich den beiden Sekretärinnen Claudia Holeisen und Astrid Henne, denn ohne sie lief am LTI einfach gar nichts.

Ebenso möchte ich mich bei Dr. Jürgen Locher und Aniella Thoma vom L-LAB dafür bedanken, die sich so viel Zeit für fachliche Diskussionen genommen haben und ohne deren hilfreiche wie kritischen Anregungen diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Danken möchte ich außerdem meinen Studenten und Hiwis, die wesentliche Inhalte zu dieser Arbeit beigetragen haben.

Des Weiteren danke ich meinen Korrekturlesern, insbesondere Konstanze Hößel und Matthias Horne, die die Arbeit auch trotz der knappen Zeit mit größter Sorgfalt und Geduld gelesen haben.

Abschließend danke ich meinem Mann Christian, meiner Schwester Diana und meinen Eltern für ihre Unterstützung und Motivation vor allem während meiner Promotion und meines Studiums.

II INHALTSVERZEICHNIS

I	Danksagung	I
II	Inhaltsverzeichnis.....	III
1	Einleitung.....	1
1.1	Motivation	1
1.2	Ziel der Arbeit	3
2	Grundlagen	5
2.1	Das EVA-Prinzip und der visuelle Wahrnehmungsprozess des Menschen	5
2.1.1	Eingabe visueller Informationen	6
2.1.2	Verarbeitung visueller Informationen	7
2.1.3	Ausgabe der visuell aufgenommenen Informationen.....	8
2.2	Visuelle Leistungsfähigkeit	8
2.2.1	Sehschärfe	9
2.2.2	Kontrast.....	10
2.2.3	Adaptation.....	11
2.3	Blendung.....	13
2.3.1	Physiologische Blendung.....	14
2.3.2	Psychologische Blendung	15
3	Blendsituationen im Straßenverkehr	17
3.1	Scheinwerferlichtverteilungen.....	19

Inhaltsverzeichnis

3.1.1	Abblendlicht.....	19
3.1.2	Fernlicht.....	25
3.1.3	Fahrzeugdynamik und deren Einfluss auf die Verschiebung der Hell-Dunkel-Grenze.....	27
3.2	Charakteristische Blendbeleuchtungsstärken.....	30
3.3	Charakteristische Blendimpulsdauern.....	36
3.3.1	Umschaltvorgänge von Fernlicht zu Abblendlicht.....	36
3.3.2	Einfluss der Fahrdynamik auf die zu erwartenden Blendimpulsdauern.....	40
4	Methoden zur Blendungsbewertung.....	51
4.1	Maßzahlen zur Blendungsbewertung.....	52
4.1.1	Individueller Schwellenkontrast.....	54
4.1.2	Maßzahl: Visuelle Leistungsfähigkeit.....	59
4.1.3	Maßzahl: Readaptationszeit.....	59
4.2	Kategorisierung der Blendsituationen.....	60
4.2.1	Charakteristika persistenter Blendsituationen..	62
4.2.2	Charakteristika transienter Blendsituationen....	62
4.3	Messmethoden für persistente Blendsituationen.....	64
4.3.1	Messmethoden für persistent statische Blendsituationen.....	64
4.3.2	Messmethoden für persistent dynamische Blendsituationen.....	66

Inhaltsverzeichnis

4.4	Messmethoden für transiente Blendsituationen	67
4.4.1	Messmethoden für transient statische Blendsituationen	67
4.4.2	Messmethoden für transient dynamische Blendsituationen	79
4.5	Zwischenfazit	82
5	Methodenoptimierung	83
5.1	Optimierung der Reaktionszeit	83
5.1.1	Kognitive Verarbeitungszeit	84
5.1.2	Motorische Reizleitungszeit	85
5.2	Optimierung der Messauflösung	87
5.3	Optimierung der Reizdarbietung	90
5.3.1	Erweiterte visuelle Leistungsfähigkeit	91
5.3.2	Itemmatrix	91
5.3.3	Itemauswahl und Itempool	99
5.3.4	Schriftart der Items	103
5.3.5	Ratewahrscheinlichkeit und Testqualität	103
5.4	MeLLI-Methode	106
6	Validierung der MeLLI-Methode	109
6.1	Methodisches Vorgehen	111
6.1.1	Versuchsaufbau	111
6.1.1	Versuchsdesign	115
6.1.2	Probandenkollektiv	118
6.1.3	Versuchsablauf	119

Inhaltsverzeichnis

6.2	Zeitdiskrete Abtastung	120
6.2.1	Probandenkollektiv	121
6.2.2	Versuchsablauf	121
6.2.3	Ergebnisse	122
6.2.4	Ergebnisdiskussion	127
6.3	Variable Blendimpulsdauer	129
6.3.1	Probandenkollektiv	130
6.3.2	Versuchsablauf	130
6.3.3	Ergebnisse	132
6.3.4	Ergebnisdiskussion	133
6.4	Kontrastsensitivität innerhalb der MeLLI- Methode.....	135
6.4.1	Probandenkollektiv	137
6.4.2	Versuchsablauf	138
6.4.3	Ergebnisse	138
6.4.4	Ergebnisdiskussion	140
7	Diskussion	143
7.1	Methodische Aspekte	143
7.1.1	Zeitliche Faktoren.....	144
7.1.2	Itempool.....	147
7.1.3	Kontrastsensitivität	150
7.1.4	Ergebnisqualität und Messauflösung.....	154
7.1.5	Maßzahlen relative visuelle Leistungsfähigkeit und Readaptationszeit.....	155

Inhaltsverzeichnis

7.2	Übertragung auf transient dynamische Blendsituationen	157
8	Zusammenfassung und Ausblick	161
8.1	Zusammenfassung	161
8.2	Ausblick	164
III	Literaturangaben	166
IV	Abbildungsverzeichnis	178
V	Tabellenverzeichnis	187
VI	Anhang	191
	Anhang A: Abkürzungen und Formelzeichen	191
	A.1 Abkürzungen	191
	A.2 Formelzeichen	193
	Anhang B: Allgemeine Ergänzungen	197
	B.1 Fahrwerkseinstellungen	197
	B.2 Ergebnisse Vorstudie	198
	B.3 Leuchtdichtebilder	200
	B.4 Buchstabenhäufigkeit	203
	Anhang C: Probandeninstruktionen	204
	C.1 Studie zur zeitdiskreten Abtastung	204
	C.2 Studie zur variablen Blendimpulsdauer	206
	C.3 Studie zur Kontrastsensitivität	209
	Anhang D: Veröffentlichungen	211
	Anhang E: Betreute Arbeiten	215
	E.1 Bachelorarbeiten	215

Inhaltsverzeichnis

E.2	Masterarbeiten	218
E.3	Externe Abschlussarbeiten	219

Kapitel 1

EINLEITUNG

1.1 MOTIVATION

Besonders im nächtlichen Straßenverkehr sind Fahrzeugführer sich schnell verändernden Lichtsituationen ausgesetzt. Aufgrund des großen Dynamikumfangs des Auges ist es in den meisten Fällen jedoch möglich, sich innerhalb kürzester Zeit an die geänderte Lichtsituation anzupassen. Gelingt dieser Anpassungsprozess nicht, wird dies als Blendung beschrieben. Eine zeitliche und örtliche Reduzierung der Sehleistung sind die Folge, sodass Objekte oder andere Verkehrsteilnehmer infolgedessen später oder gar nicht erkannt werden können. [1]

Ein Beispiel für eine solche Situation wäre ein entgegenkommendes Fahrzeug, welches zu spät von Fern- auf Abblendlicht umschaltet. Es gibt jedoch zahlreiche weitere Situationen wie Kuppen, Nickbewegungen durch Straßenunebenheiten, falsch eingestellte oder verschmutzte Scheinwerfer in Folge derer es bei nächtlichen Fahrten zu Blendung kommt. All diese Situationen sind nur von kurzer Dauer und weisen eine große Differenz zwischen dem Leuchtdichteniveau des Umfeldes und dem des blendenden Scheinwerfers auf.

Zur Vermeidung solcher Situationen wurden in der Vergangenheit Assistenzsysteme entwickelt, die den Umschaltvorgang zwischen Fern- und Abblendlicht für den Fahrer übernehmen oder andere Fahrzeuge aus der eigenen Lichtverteilung ausblenden [2, 3]. Sowohl der Fernlichtassistent als auch das blendfreie Fernlicht haben aufgrund ihrer kamerabasierten Objekterkennung nicht vermeidbare Latenzzeiten oder Fehlerkennungen sodass es trotzdem zur Blendung entgegenkommender oder vorausfahrender Verkehrsteilnehmer kommen kann.

Vergleichbare Blendsituationen können auch aufgrund von unberücksichtigten Beladungszuständen, Beschleunigungsvorgängen, Bodenschwellen und horizontalen Straßenkrümmungen hervorgerufen werden. Die sich hieraus ergebende Nickbewegung des Fahrzeugs führt dazu, dass sich die Abblendlichtverteilung nach oben verschiebt. Dies hat zur Folge, dass Bereiche der Abblendlichtverteilung, die eigentlich zur Ausleuchtung der Straße im Vorfeld des Fahrzeugs ausgelegt wurden, ins Auge des entgegenkommenden Fahrers treffen. Diese potentiellen Blendsituationen lassen sich technisch vermeiden, indem die Ausrichtung der Lichtverteilung an die Fahrzeuglage angepasst und aktiv nachgeregelt wird.

Damit solche Regelsysteme nicht überdimensioniert ausgelegt werden, gilt es die Frage zu klären wie schnell diese reagieren müssten, um die Zahl der Blendimpulsdauern sowie deren Dauer soweit zu reduzieren, dass eine kritische Sehleistungsreduzierung vermieden werden kann.

Nach aktuellem Stand gibt es keine Methode, die diese blendungsinduzierte Sehleistungsreduktion objektiv messbar macht und innerhalb einer volldynamischen Studie im realen Verkehrsraum angewandt werden kann.

Eine solche Methode wäre in der Lage, das Blendpotential von Scheinwerfersystemen objektiv für kurze Blendimpulsdauern zu bewerten und wäre damit auch für Blendungsuntersuchungen unter Berücksichtigung der Fahrdynamik anwendbar. Die Ergebnisse könnten im nächsten Schritt dazu genutzt werden, zulässige Grenzwerte für relevante Parameter festzulegen und diese in die Gesetzgebung einfließen zu lassen. Besonders in Hinblick auf immer performanter und dynamischer werdende Scheinwerfersysteme ist dies ein wichtiger Schritt, um die Verkehrssicherheit aus lichttechnischer Sicht weiter zu erhöhen.

1.2 ZIEL DER ARBEIT

Die zentrale Zielstellung dieser Arbeit besteht in der Entwicklung und Validierung einer Messmethode zur objektiven Bewertung kurzer Blendsituationen, welche auch im realen und hochdynamischen Straßenverkehr anwendbar ist. Der Fokus der Methodenentwicklung liegt auf einem einfach umzusetzenden Studiendesign, welches allgemeingültige Schlussfolgerungen des Blendeinflusses auf die visuelle Leistungsfähigkeit erlaubt.

Kapitel 2

GRUNDLAGEN

Dieses Kapitel beinhaltet alle grundlegenden Informationen, die zum Verständnis dieser Arbeit notwendig sind. Dies umfasst zum einen den Wahrnehmungsprozess des Menschen und die dafür notwendige visuelle Leistungsfähigkeit und zum anderen die Themen Blendung und Adaptation.

2.1 DAS EVA-PRINZIP UND DER VISUELLE WAHRNEHMUNGSPROZESS DES MENSCHEN

In der Informatik hat sich der Begriff des *EVA¹-Prinzips* als grundlegendes Prinzip für die Datenverarbeitung etabliert [4]. Um Zusammenhänge für die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Methode verständlicher darstellen zu können, wird der visuelle Wahrnehmungsprozess des Menschen in diesem Abschnitt in Anlehnung an das *EVA-Prinzip*, wie in Abbildung 2.1 zu sehen, abstrahiert und in den folgenden Abschnitten näher erläutert. Der Vollständigkeit halber sei an dieser Stelle auf ähnliche dreistufige Modelle von

¹ Eingabe, Verarbeitung, Ausgabe

Schmidt-Clausen [5] oder Gramberg-Danilsen [6] sowie deutlich komplexere Modelle nach Rumar [7] zitiert in Schlag [8] verwiesen.

Allgemein beschreibt der Begriff Wahrnehmung den Vorgang, durch welchen Informationen aus der umgebenden Realität über sensorische Systeme gewonnen und dem Menschen inhaltlich zugänglich gemacht werden. Da über 80 % aller Informationen visuell aufgenommen werden, ist Sehen die wichtigste Sinneswahrnehmung [8, 9].

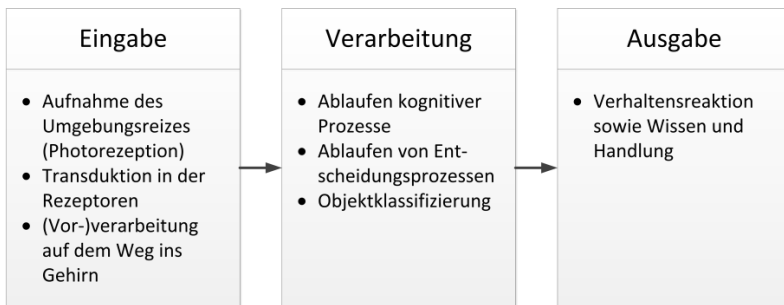


Abbildung 2.1: Das *EVA-Prinzip* übertragen auf den visuellen Wahrnehmungsprozess des Menschen

2.1.1 EINGABE VISUELLER INFORMATIONEN

Die Eingabe visueller Informationen für den Menschen beruht auf dem Abbild uns umgebender Objekte auf der Netzhaut durch das an ihnen reflektierte Licht. Die Umwandlung des Lichts in neuronale

Signale, auch Transduktion genannt, ist ein Vorgang, der in den Photorezeptoren der Netzhaut stattfindet. Abhängig vom angesprochenen Netzhautareal und der vorliegenden Umgebungshelligkeit, erfolgt diese Umwandlung unterschiedlich schnell. Bereits in der Netzhaut sowie während der Weiterleitung ins Gehirn werden die Lichtreize in komplexen neuronalen Verschaltungen (vor-)verarbeitet.

Für tiefere Informationen bezüglich der beschriebenen Prozesse sei auf [1, 8, 10 bis 13] verwiesen.

2.1.2 VERARBEITUNG VISUELLER INFORMATIONEN

Die vorverarbeiteten Informationen werden an die Kortexareale im Gehirn weitergeleitet, wo die kognitive Verarbeitung der Informationen stattfindet.

Auf Basis von ablaufenden Entscheidungsprozessen wird ein Abgleich mit bekannten Erfahrungsinhalten durchgeführt, sodass die Objektklassifizierung mittels selektierter und kombinierter Merkmalsdetektion wie bspw. Mustererkennung stattfindet und mit der Objektidentifizierung endet. Kann auf kognitive präexperimentelle Erfahrung zurückgegriffen werden, wird dies als *Top-down-Verarbeitung* bzw. wissensbasierte Verarbeitung bezeichnet. Ist die Verarbeitung im Gegensatz dazu auf Daten und Reize zurückzuführen, wird darunter die *Bottom-up-Verarbeitung* verstanden.

Für diesen Teilprozess lässt sich gemäß Schmid [14] zusammenfassen, dass „eingehende Reize [hier] zu Informationen transformiert werden, indem sie im Kontext des Handlungsfeldes eingeordnet werden“. Durch Erkennen mit anschließender Kategorisierung werden Objekten also Bedeutungen zugesprochen. [8 bis 10, 14, 15]

2.1.3 AUSGABE DER VISUELL AUFGENOMMENEN INFORMATIONEN

Die Zuordnung einer Objektbedeutung entspricht im weitesten Sinne dem *Wissen* bzw. dem Abbild der vorliegenden Situation, wobei die Unterschiede der beiden Teilprozesse *Verarbeitung* und *Ausgabe* hier nicht eindeutig voneinander abgrenzbar sind. Für diese Arbeit ist es jedoch wichtiger festzuhalten, dass die daraus resultierende *Handlung* z.B. motorische Aktivität oder die Verhaltensreaktion als visuell geleitete Handlung der *Ausgabe* definiert ist. [10, 14]

2.2 VISUELLE LEISTUNGSFÄHIGKEIT

Das menschliche Auge fungiert als optisches Instrument zur Informationsaufnahme, wobei die Informationsqualität von einer Vielzahl physiologischer und psychologischer Parameter abhängig ist. Wichtige Parameter sind die Umfeldhelligkeit, die Farbwahrnehmung, die Sehschärfe, die Kontrastempfindlichkeit und die Adaptationsgeschwindigkeit. In den folgenden Unterkapiteln werden die Zusam-

menhänge dieser Parameter in Bezug auf Messmethoden und Prozessbeschreibung erläutert. Für weiterführende Informationen sei auf folgende Werke [9, 11, 16 bis 18] verwiesen.

2.2.1 SEHSCHÄRFE

Zur Sehschärfe- bzw. Visusbestimmung wird der nach DIN EN ISO 8596 als Normsehzeichen definierte Landolt-Ring, wie in Abbildung 2.2 gezeigt, verwendet. Hierbei handelt es sich um einen Kreisring mit Öffnung. Die Öffnung und Strichbreite betragen $1/5$ des Gesamtdurchmessers d . Die Sehaufgabe des Probanden besteht darin, die Orientierung der Öffnung anzugeben. Insgesamt gibt es acht Öffnungsmöglichkeiten und somit eine Ratewahrscheinlichkeit von 12,5 % pro Ring.

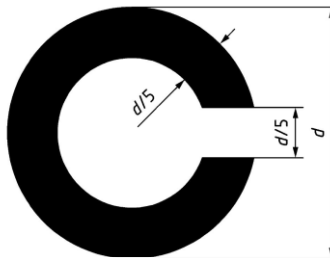


Abbildung 2.2: Landolt-Ring [19]

Der Landolt-Ring hat im Vergleich zu anderen Sehzeichen den Vorteil, dass das kognitive Erkennen nur eine untergeordnete Rolle spielt

und alle Orientierungen u.a. aufgrund einer ähnlichen kognitiven Verarbeitung in etwa gleich gut zu erkennen sind [20]. Nachteilig ist jedoch, dass einige Personen die Begriffe rechts und links verwechseln und insbesondere die Nennung von schrägen Öffnungsrichtungen Probleme bereitet [18].

2.2.2 KONTRAST

Der Begriff Kontrast beschreibt den Unterschied der lokalen Leuchtdichte im Gesichtsfeld des Beobachters. Je nach Anwendung werden unterschiedliche Kontrastdefinitionen genutzt.

Für die vorliegende Arbeit ist der *Weber-Kontrast* K_W gemäß Formel (2.1) grundlegend. Bezogen auf den Landolt-Ring beschreibt L_O hierbei die Objektleuchtdichte des Landolt-Rings und L_U die Umgebungsleuchtdichte.

$$K_W = \frac{L_O - L_U}{L_U} \quad (2.1)$$

Der Einfluss von Lichtreizen auf die visuelle Leistungsfähigkeit kann über den Schwellenkontrast K_S des Landolt-Rings gemessen werden. Der Schwellenkontrast ist der individuelle Mindestkontrast bzw. die absolute Wahrnehmungsschwelle des *Weber-Kontrastes* K_W , der erreicht werden muss, um ein Objekt mit einer Wahrscheinlichkeit von 50 % identifizieren zu können [21 bis 23].

2.2.3 ADAPTATION

Zur Erhaltung der visuellen Leistungsfähigkeit bei wechselnden Lichtverhältnissen im Gesichtsfeld verfügt das Auge über die Möglichkeit sich diesen anzupassen. Dieser Vorgang wird als Adaptation bezeichnet. Der Dynamikbereich, den das menschliche Auge abdecken kann, umfasst nach Hentschel [22] Leuchtdichten zwischen $10^{-6} \frac{cd}{m^2}$ und $10^4 \frac{cd}{m^2}$.

Der Adaptationsvorgang von hell nach dunkel, auch Dunkeladaptation genannt, dauert verhältnismäßig lange und kann bis zur vollständigen Adaptation an die Dunkelheit bis zu einer Stunde und länger dauern. Im Gegensatz zur Dunkeladaptation liegt die Adaptationszeit bei der Helladaptation, dem Vorgang von dunkel nach hell, im Bereich von Bruchteilen einer Sekunde bis hin zu wenigen Minuten. Lichtempfindliche Rezeptorzellen in der Netzhaut, die sogenannten Stäbchen und Zapfen, sind maßgeblich an diesen Vorgängen beteiligt. Der Pupillenreflex ist in diesem Zusammenhang zwar auch zu nennen, spielt jedoch nur eine untergeordnete Rolle. [1, 22, 24]

Ist die auftretende Helligkeitsänderung im Gesichtsfeld nur von kurzer Dauer, ist die Readaptationszeit von besonderer Bedeutung. Sie beschreibt die Zeitspanne, die benötigt wird, um die visuelle Leistungsfähigkeit, die vor der Adaptationsstörung vorlag, wiederherzustellen. Diese zeitliche Anpassung wird auch als *transiente Adaptation* bezeichnet. Dieser Vorgang unterteilt sich, wie in Abbildung 2.3 zu

sehen und auch in Greule [25] beschrieben, in die folgenden vier Teilprozesse und entspricht im Wesentlichen der Dunkeladaptation nach einer plötzlichen Leuchtdichteänderung:

- **Vorzeiteffekt:** nach Baker [26], Battersby [27] und Crawford [28] alle zitiert in Greule [25] begründet durch unterschiedliche Latenzzeiten während der Reizweiterleitung; nach Hartmann zitiert in Greule [25] maßgeblich zurückzuführen auf die Überlagerung der Wirkungsbreite der dargebotenen Reize woraus die Erhöhung vor der eigentlichen Reizdarbietung resultiert
- **α - bzw. Sofortadaptation:** Zeitspanne von 50 *ms* bis 100 *ms*, in welcher das Auge eine sehr schnelle Empfindlichkeitsänderung vornimmt
- **β - bzw. Zapfenadaptation:** Zeitspanne von bis zu 8 *min*, in welcher das Auge eine langsamere Empfindlichkeitsänderung vornimmt
- **γ - bzw. Stäbchenadaptation:** Übergang zwischen Photorezeptoren (Kohlrausch-Knick); Erreichen der maximalen Empfindlichkeit des Auges nach etwa 45 *min*

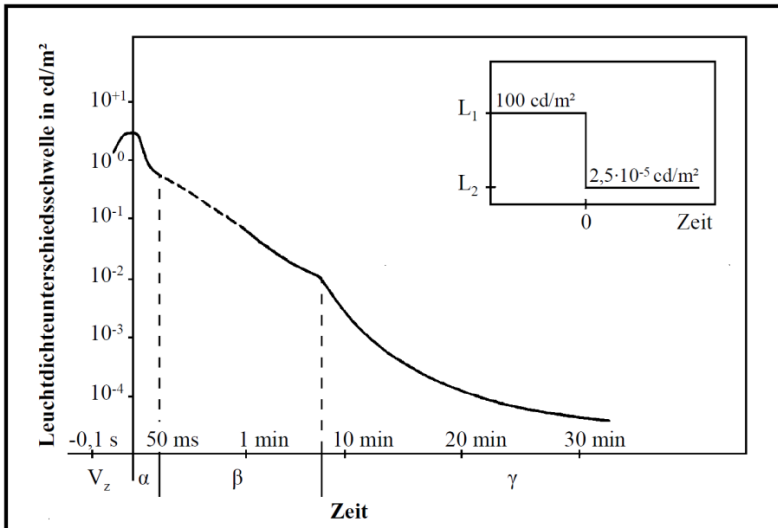


Abbildung 2.3: Zeitlicher Verlauf der Dunkeladaptation nach einer plötzlichen Leuchtdichteänderung gemäß Hartmann zitiert in Kuhl [29] und Greule [25] mit V_z -Vorzeiteffekt, α - bzw. Sofortadaptation, β - bzw. Zapfenadaptation und γ - bzw. Stäbchenadaptation

2.3 BLENDUNG

Ist die Adaptationsfähigkeit des Auges aufgrund zu schneller oder zu inhomogener Leuchtdichteniveaus im Gesichtsfeld nicht ausreichend, kommt es zur Blendung. Infolgedessen können Wahrnehmungsdefizite auftreten, die hinsichtlich ihrer Wirkung zu differenzieren sind, jedoch nicht zwingend getrennt voneinander auftreten. Die beiden Wirkungsweisen der Blendung, physiologisch und psy-

chologisch, sind im Folgenden näher erläutert. Auf andere Klassifizierungen wird hier nicht weiter eingegangen. Diese können beispielsweise in [1, 22, 30] nachgelesen werden.

2.3.1 PHYSIOLOGISCHE BLENDUNG

Von einer physiologischen Blendung wird dann gesprochen, wenn die umgebenden Lichtverhältnisse aufgrund der nicht ausreichenden Anpassungsfähigkeit ein messbares Defizit des Sehvermögens verursachen.

Gemäß Hentschel [22] konnte schon in früheren Untersuchungen gezeigt werden, dass die Reduzierung der visuellen Leistungsfähigkeit auf die Streulichtbildung im Auge zurückzuführen ist. Dieses Streulicht erzeugt die sogenannte *äquivalente Schleierleuchtdichte* $L_{S,\ddot{a}q}$ gemäß Formel (2.2, eine Art Schleier auf der Netzhaut, welcher sich mit dem wahrgenommenen Bild überlagert. Der Faktor c spiegelt den Alterseinfluss wider, E_B ist die Beleuchtungsstärke am Auge und θ der Winkel zwischen Fixationspunkt und Blendquelle.

$$L_{S,\ddot{a}q} = c \cdot \frac{E_B}{\theta^2} \quad (2.2)$$

Wie in Abbildung 2.4 gezeigt, führt diese Überlagerung dazu, dass die Kontrastwahrnehmung des Beobachters beeinflusst wird. Ist eine Veränderung des Schwellenkontrasts mit und ohne Blendung messbar, kann dies als Kriterium der physiologischen Blendung herangezogen werden.

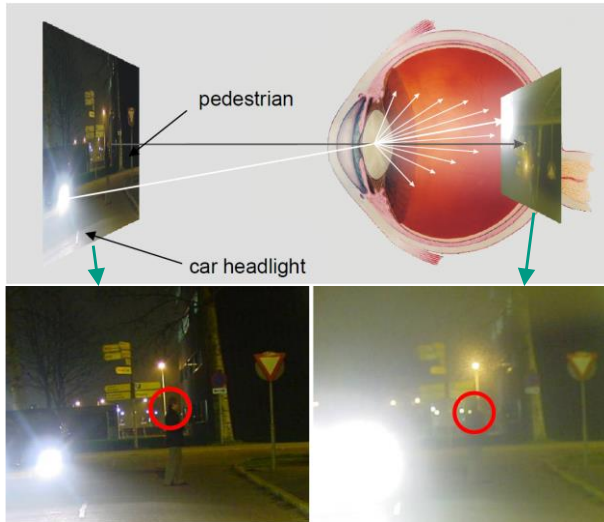


Abbildung 2.4: Visualisierung der Streulichtbildung im Auge und deren Folgen auf die Sichtbarkeit des Fußgängers und anderer Objekte in der Verkehrsszene [31]

2.3.2 PSYCHOLOGISCHE BLENDUNG

Liegt ausschließlich ein unangenehmer Sehzustand vor, der nicht zwingend eine Reduzierung der visuellen Leistungsfähigkeit zur Folge hat, wird dies als psychologische Blendung bezeichnet. Um den damit verbundenen Blendeindruck des Beobachters zu ermitteln, wird meist die *DeBoer-Skala* als Maß herangezogen. Der Beobachter wird gebeten, die vorliegende Blendsituation anhand dieser 9-stufigen Ordinalskala, die in Tabelle 2.1 aufgelistet ist, subjektiv zu bewerten.

Tabelle 2.1: Einteilung und Bewertung der psychologischen Blendung nach *DeBoer-Skala* gemäß [32]

Grad	Psychologische Empfindung/ Bewertung	Originalbezeichnung bzw. in anderen Publikationen verwendete Bezeichnung	Bedeutung
1	Unerträglich	Unbearable	Bad
2			
3	Störend	Distracting/disturbing	Inadequate
4			
5	Gerade akzeptabel	Just acceptable/just admissible	Fair
6			
7	Zufriedenstellend	Satisfactory/acceptable	Good
8			
9	Gerade bemerkbar	Unnoticeable/just noticeable/noticeable	Excellent

Aufgrund interpersoneller Wahrnehmungsunterschiede sowie der Nichteindeutigkeit und der nicht vorhandenen Äquidistanz der Stufen liefert diese Methode eine unzureichende Ergebnisqualität, die sich darüber hinaus auch nur eingeschränkt verallgemeinern lässt [32, 33]. Dennoch hat sich die *DeBoer-Skala* zur qualitativen Bewertung der psychologischen Blendung etabliert.

Kapitel 3

BLENDSITUATIONEN IM STRAßENVERKEHR

Der Prozess der visuellen Informationsaufnahme im Straßenverkehr ist aufgrund der großen zeitlichen und lichttechnischen Dynamiken und der großen Vielfalt von unterschiedlichen Elementen und Beziehungen sehr komplex [34]. Daraus resultieren hohe Anforderungen an das visuelle System des Verkehrsteilnehmers. Ist die Variation der Lichtsituationen in Bezug auf Niveau und Geschwindigkeit zu groß, sodass eine Adaptation nicht schnell genug möglich ist, kann dies eine Reduzierung der visuellen Leistungsfähigkeit zur Folge haben, wie bereits in Kapitel 2.3 gezeigt wurde.

Kritische Blendsituationen aufgrund von Gegenverkehr entstehen, wenn die Abschaltung der Fernlichtverteilung oder Teilen davon nicht rechtzeitig erfolgt oder sich die Lage der Abblendlichtverteilung aufgrund der Fahrdynamik, Beladung oder Fehljustage verschiebt.

In dieser Arbeit soll eine Methodik entwickelt werden, die die im Straßenverkehr charakteristisch auftretenden Blendsituationen hinsichtlich ihrer Reduzierung der visuellen Leistungsfähigkeit evaluiert, um so das Sicherheitsrisiko abschätzen zu können.

Die Evaluierung kritischer Blendsituationen setzt das Wissen über die charakteristischen Merkmale dieser voraus, wie beispielsweise real auftretende Blendimpulsdauern oder Blendbeleuchtungsstärken. Sie sind unabhängig von der verwendeten Lichtquelle aber abhängig von den technischen Möglichkeiten des Scheinwerfersystems. Die Abschätzung möglicher Blendimpulsdauern und Blendbeleuchtungsstärken erfolgt in den folgenden Abschnitten auf Basis gesetzlicher Regelungen, der systembedingten Funktionsweise verschiedener Scheinwerfersysteme sowie statischer und dynamischer Messungen im Labor und auf Messfahrten.

Einschränkend sei erwähnt, dass sowohl der zeitliche Verlauf der Beleuchtungsstärke als auch die Regelkurve bzw. die Schaltvorgänge der Lichtquelle im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter untersucht werden. Es wird vereinfachend ein Worst-Case-Szenario angenommen, sodass der zeitliche Verlauf der Blendung durch eine Rechteckfunktion angenähert werden kann. Diese verfügt definitionsgemäß über eine endliche Amplitude und Dauer, welche der maximal zu erwartenden Beleuchtungsstärke am Fahrerauge in Blickrichtung und der zu ermittelnden Blendimpulsdauer entspricht. In den folgenden Unterkapiteln werden deshalb ausschließlich die Parameter Amplitude und Dauer bewertet.

3.1 SCHEINWERFERLICHTVERTEILUNGEN

Die gesetzlichen Anforderungen an die Scheinwerferlichtverteilung sind in der Europäischen Union in den Regelungen 48 [35], 98 [36], 112 [37] sowie 123 [38] der *United Nations Economic Commission for Europe*, kurz UNECE, festgelegt. Im Folgenden werden die für die Blendbewertung bedeutenden Anforderungen herausgegriffen und evaluiert. Ziel dieser Anforderungen ist eine Minimierung der Blendung des Gegenverkehrs bei gleichzeitig guter Ausleuchtung der eigenen Fahrbahn. Zu diesem Zweck sind in den Regelungen an definierten Messpunkten, wie in Abbildung 3.1 zu sehen, Mindest- und Maximalwerte für die Lichtstärke eines Scheinwerfer festgelegt. Die für diese Arbeit wichtigen Werte sind in Tabelle 3.1 zusammengefasst.

3.1.1 ABBLENDLICHT

Die Hell-Dunkel-Grenze, kurz HDG, ist charakteristisch für die Abblendlichtverteilung eines Scheinwerfers und als violette Linie in Abbildung 3.1 eingezeichnet. Sie ist so einzustellen, dass sich deren waagerechter Anteil $0,57^\circ$ unter dem Horizont befindet. Bedingt durch deren vorgeschriebene Neigung und der Anbauhöhe des Scheinwerfers soll so die Blendung für den Gegenverkehr vermieden werden.

Scheinwerferlichtverteilungen

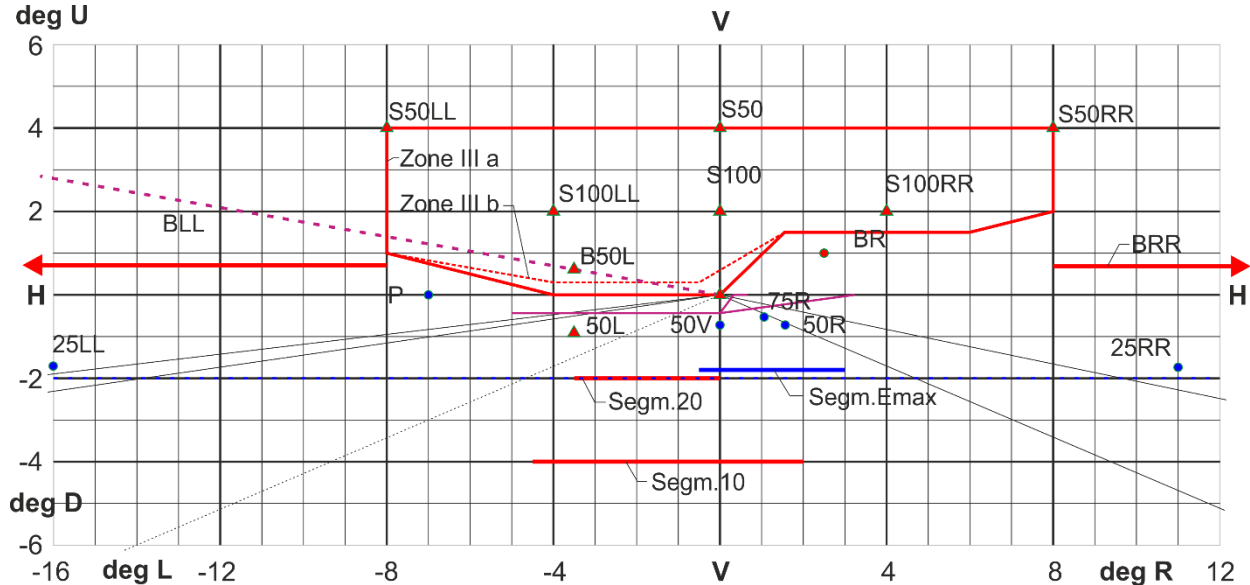


Abbildung 3.1: Winkelpositionen für die vorgeschriebenen photometrischen Werte des Abblendlichts für Rechtsverkehr [38], magenta Linie: Hell-Dunkel-Grenze, gestrichelte magenta Linie: statische Augenlinie

Der Messpunkt B50L repräsentiert die zu erwartende Position des Fahrerrauges eines entgegenkommenden Fahrzeugs in 50 m Entfernung. Dieser liegt auf der statischen Augenlinie, der rot-gestrichelte Linie in Abbildung 3.1. In diesem Punkt, so konnte schon mehrfach gezeigt werden, ist mit der maximalen Beeinträchtigung der visuellen Leistungsfähigkeit zu rechnen [39 bis 41]. Gemäß den gesetzlichen Anforderungen sind an Punkt B50L Lichtstärkewerte zwischen 50 *cd* und 350 *cd* vorgeschrieben.

Tabelle 3.1: Positionen sowie Grenzwerte für Lichtstärke und daraus resultierender Beleuchtungsstärke in 25 m Entfernung für einen Scheinwerfer in ausgewählten Punkten bzw. Bereichen nach UNECE Regelung 123 [38]. L=Left/Links, U=Up/oben, D=Down/unten

	Position	I_{min} [cd]	I_{max} [cd]	E_{min} [lx]	E_{max} [lx]
B50L	L 3,43°/ U 0,57°	50	350	0,08	0,56
Zone III			625		1,00
50L	L 3,43°/ D -0,86°	3.550	13.200	5,68	21,12
Segm. E_{max}		16.900	44.100	27,04	70,56

Im Bereich der Zone III, der u.a. den Punkt B50L einschließt, sind maximale Lichtstärke von 625 *cd* je Scheinwerfer zulässig. Für den Fall, dass eine Überschreitung der Grenzwerte eintritt, wird dies im Folgenden als Blendung interpretiert. Inwiefern in diesen Fällen jedoch

tatsächlich auf Blendung mit einhergehender Reduzierung der visuellen Leistungsfähigkeit auszugehen ist, wurde bisher noch nicht explizit untersucht.

Eine Überschreitung der gesetzlich zulässigen Werte in vertikaler Richtung kann u.a. dadurch erfolgen, dass eine Zuladung den Neigungswinkel des Fahrzeugs verändert und sich die Lichtverteilung der Scheinwerfer somit nach oben verschiebt. Diese vertikale Verschiebung hat zur Folge, dass an der Position des Fahrerauges mit deutlich erhöhten Licht- und Beleuchtungsstärken zu rechnen ist. Eine erste Abschätzung der zu erwartenden Werte ist mithilfe von Tabelle 3.1 möglich. Verschiebt sich die Lichtverteilung in vertikaler Richtung so, dass der Punkt 50L an die Position des Fahrerauges wandert, steigen die zu erwartenden Lichtstärken von 350 *cd* auf 13.200 *cd*. Diese Werte sind um ein Vielfaches höher als die maximal zulässigen in Zone III bzw. Punkt B50L.

Wird der vertikale Versatz zusätzlich mit einer horizontalen Verschiebung überlagert, wie dies bspw. bei horizontal falsch eingestellten Scheinwerfern oder bei Begegnungssituationen in Kurven der Fall sein kann, können die Grenzwerte nochmal um ein Vielfaches überschritten werden. Lichtstärken in der Größenordnung der zulässigen Werte des Segmentes E_{max} sind zu erwarten. Dass sich diese Grenzüberschreitung negativ auf den subjektiven Blendeindruck entgegenkommender Verkehrsteilnehmer auswirkt, konnte Zydek [42] mithilfe einer Feldstudie belegen.

GESETZLICHE REGELUNG ZUR BLENDUNGSREDUZIERUNG

Zur Reduzierung des Blendpotentials ist im einfachsten Fall eine Vorrichtung zur manuellen Leuchtweitenregulierung gesetzlich vorgeschrieben, sodass der Fahrer den Regler vom Fahrersitz aus betätigen kann [35]. Es liegt folglich in der Verantwortung des Fahrers die Scheinwerferneigung an den Beladungszustand anzupassen. Umfragen von Jebas [40] zeigen jedoch, dass bei manueller Leuchtweitenregulierung der Beladungszustand des Fahrzeugs in der Praxis nur unzureichend bis gar nicht beachtet wird. Dies führt dazu, dass die Scheinwerfer tendenziell falsch eingestellt sind und daraus ein erhöhtes Blendpotential für andere Verkehrsteilnehmer resultiert.

Übersteigt der Lampenlichtstrom der verwendeten Lichtquelle im Scheinwerfersystem oder der Lichtstrom eines Leuchtenmoduls im Falls von LED² den Wert von 2000 lm oder werden LED-Module für das Abblendlicht verwendet, ist zur Blendungsreduzierung eine automatische Leuchtweitenregulierung verpflichtend [35]. Die Leuchtweitenregulierung nutzt Sensoren an der Vorder- und Hinterachse, um die Lage des Fahrzeugs in Längsrichtung zu bestimmen und die Scheinwerfer anzupassen. Wird die Fahrzeuglage nur bei Fahrtritt bestimmt, handelt es sich um eine automatisch-statische Leuchtweitenregulierung. Etwaige Änderungen während der Fahrt, die den Beladungszustand betreffen, werden nicht oder nur sehr träge berücksichtigt. Sofern diese Änderungen oder auch Brems- oder

² Von englisch Light-Emitting Diode

Beschleunigungsvorgänge systemseitig ausgeglichen werden, wird von einer automatisch-dynamischen Leuchtweitenregulierung gesprochen [43]. Die automatisch-statische Leuchtweitenregulierung wird aus gesetzlicher Sicht nach aktuellem Stand als ausreichend erachtet.

Dass es trotz gesetzlich vorgeschriebener Leuchtweitenregulierung zu einer Überschreitung der zulässigen Maximalwerte im realen Straßenverkehr kommt, konnte Matschke [44] 2010 durch Messfahrten nachweisen. Aus deren Daten lässt sich schlussfolgern, dass 29 % der Halogenscheinwerfer und 17 % der Xenonscheinwerfer die maximalen Grenzwerte überschritten. Insgesamt entsprach dies mit 27,4 % mehr als einem Viertel aller Scheinwerfer. In Zusammenarbeit mit Dannenmaier [45] wurden diese Messfahrten 2017 wiederholt. Die Ergebnisse belegen die Weiterentwicklung der Scheinwerfersysteme innerhalb der letzten Jahre, da der Anteil der Grenzüberschreitungen auf 14 % gesunken ist

Matschke führt diese Grenzüberschreitung auf generell falsch eingestellte Scheinwerfer zurück. Kosmas [46] kann diese Annahme bestätigen. In einem von ihm durchgeführten Werkstatttest konnte er zeigen, dass sowohl qualifizierte Werkstätten als auch Prüfstellen die Scheinwerfer innerhalb des Toleranzbereichs nicht korrekt einstellten. Auch Schäfer [47] kam im Rahmen seiner Recherchen zum selben Schluss. Bezüglich neuer Lichtfunktionen wie dem blendfreien Fernlicht, sieht dieser in Zukunft einen erhöhten Handlungsbedarf bei der genauen Justage. Reisinger [48] verweist in diesem Zusammenhang auf drei Faktoren, die die Abweichungen von bis zu $0,1^\circ$ in vertikaler

Richtung beeinflussen können. Dies sind die mechanische Stabilität, die Genauigkeit bei der Scheinwerfereinstellung über den gesamten Temperaturbereich und die Abstimmungsgenauigkeit zwischen Fahrzeug und Kamera bei Assistenzsystemen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Schwierigkeiten, die gesetzlichen Regelungen einzuhalten, vielfältig sind. Es bedarf weiterer Optimierungen, um die Anzahl an Blendsituationen anderer Verkehrsteilnehmer weiter zu reduzieren.

3.1.2 FERNLICHT

Im Gegensatz zum Abblendlicht sind für das Fernlicht deutlich höhere Mindest- und Maximalwerte im Bereich von 43.000 *cd* bis 215.000 *cd* festgeschrieben. Dies gewährleistet einerseits zwar eine gute Ausleuchtung der Straße, kann jedoch zu Blendung anderer Verkehrsteilnehmer führen. Damit das vermieden werden kann, ist das rechtzeitige Abblenden obligatorisch.

GESETZLICHE REGELUNG UND ASSISTENZSYSTEME ZUR BLENDUNGS- REDUZIERUNG

Das Umschalten von Fern- auf Abblendlicht erfolgt im einfachsten Fall manuell durch den Fahrer. Um den Komfort sowie die Sicherheit bei Nachfahrten für die Verkehrsteilnehmer zu erhöhen, wurden As-

sistenzsysteme wie der Fernlichtassistent oder das blendfreie Fernlicht entwickelt. Der Fernlichtassistent wechselt automatisch zwischen Abblend- und Fernlicht. Ein System mit blendfreiem Fernlicht maskiert das Fernlicht so, dass Bereiche, in denen sich andere Fahrzeuge befinden, in der Lichtverteilung ausgeschnitten werden. Der Fahrer kann so dauerhaft mit Fernlicht fahren, wodurch sich verbesserte Sichtbedingungen aufgrund der guten Ausleuchtung des Verkehrsraums ergeben, theoretisch ohne Blendung anderer Verkehrsteilnehmer. Voraussetzung für diese Assistenzsysteme ist die sensorische Erfassung anderer Verkehrsteilnehmer sowie die Reaktion des Scheinwerfersystems. Auf eine detaillierte Beschreibung der Funktionsweise und die technische Umsetzung dieser Systeme wird an dieser Stelle verzichtet. Einen guten Überblick liefern Sprute [2] und Totzauer [3].

Der Wechsel von Fern- zu Abblendlicht – egal ob manuell oder automatisch – sollte möglichst schnell erfolgen, damit eine mögliche Blendung vermieden werden kann. Von Seiten des Gesetzgebers sind keine expliziten Zeiten vorgegeben. In der ECE Regelung 48 [35] ist lediglich vorgeschrieben, dass die Fahrzeugsensorik auf einer geraden ebenen Fahrbahn in der Lage sein muss, entgegenkommende Verkehrsteilnehmer in einem Abstand von 400 m und vorausfahrende Verkehrsteilnehmer in einem Abstand von 100 m zu erkennen. Trotz dieser vermeintlich als ausreichend erscheinenden Entfernungen, erfolgt die Erkennung nicht ohne eine zeitliche Verzögerung. Inwiefern sich dies auf die abzuleitenden Blendimpulsdauern auswirkt, wird in Kapitel 3.3.1 diskutiert.

3.1.3 FAHRZEUGDYNAMIK UND DEREN EINFLUSS AUF DIE VERSCHIEBUNG DER HELL-DUNKEL-GRENZE

Während der Fahrt wirken eine Vielzahl von Kräften und Momenten auf Kraftfahrzeuge, die deren Bewegung im Raum und folglich die Lage der Abblendlichtverteilung beeinflussen. Zur übergeordneten Beschreibung dieser Bewegungen hat sich der Begriff der Fahrdynamik etabliert [49]. Für die hier vorliegende Arbeit sind insbesondere die wirkenden Trägheitskräfte, die u.a. beim Beschleunigen auftreten, wie auch die daraus resultierenden Nickbewegungen und Schwingungen interessant. Wie bereits von Lehnert [50], Ersoy [49], Damasky [51] und Huhn [52] festgehalten wurde, haben vor allem die fahrzeugspezifischen Eigenschaften wie Masse, Schwerpunktlage, Radstand sowie der Fahrbahnbelag und -zustand einen direkten Einfluss auf die Dynamik des Gesamtsystems und folglich auf die Lage der HDG im Verkehrsraum.

Die weiteren Ausführungen beschränken sich auf positive Nickwinkel, sodass sich die HDG im Vergleich zu ihrer horizontalen Soll-Lage nach oben verschiebt und sich folglich ein mögliches Blendpotential für den Gegenverkehr ergibt.

Wie bereits zu Beginn des Kapitels erwähnt wurde, konnte Zydek [42] in einer Feldstudie den negativen Einfluss einer Zuladung bei nicht korrigierter Scheinwerferstellung auf das subjektive Blendempfinden eruieren. In dieser Feldstudie ergaben sich, abhängig von der Zuladung Nickwinkel von maximal $1,3^\circ$, sodass die HDG im Worst-Case auf $0,73^\circ$ oberhalb der Horizontallinie verschoben wird.

Damasky [51] konnte anhand seiner Untersuchungen maximale Nickwinkel von bis zu $1,1^\circ$ abschätzen. Er betrachtete dabei den Einfluss von Zuladung und Beschleunigungsvorgängen und stellte dabei fest, dass die ermittelten Werte von der Geschwindigkeit und dem Fahrzeugtyp respektive der Fahrzeugdynamik abhängig sind. Huhn [52] konnte in Messfahrten sogar maximale Nickwinkel von bis zu $1,49^\circ$ ermitteln.

Anhand mathematischer Beziehungen und gemessener Parameterwerte der Fahrdynamik konnte Lehnert [50] einen Nickwinkel von $1,4^\circ$ ableiten. Um die Begegnungssituation zweier Fahrzeuge inklusive der Fahrzeugdynamik für ein Beschleunigungsmanöver vollumfänglich abzubilden, entwickelte Lehnert die sogenannte dynamische Augenlinie. Wie in Abbildung 3.2 dargestellt ist, bewegt sich die dynamische Augenlinie im Vergleich zur statischen Augenlinie in Bereichen mit deutlich höheren maximalen Beleuchtungsstärken. Lehnert betont die Abhängigkeit der Lage der Lichtverteilung von der Fahrzeugdynamik, wobei seiner Meinung nach besonders die Anbauhöhe des Scheinwerfers und Nickwinkel eine wichtige Rolle spielen. Darüber hinaus betrachtet Lehnert in seiner Arbeit noch die Situation beim Überfahren einer Bodenwelle mit einer Höhe von 5 cm , in welchen er Nickwinkel von bis zu $1,7^\circ$ messen konnte.

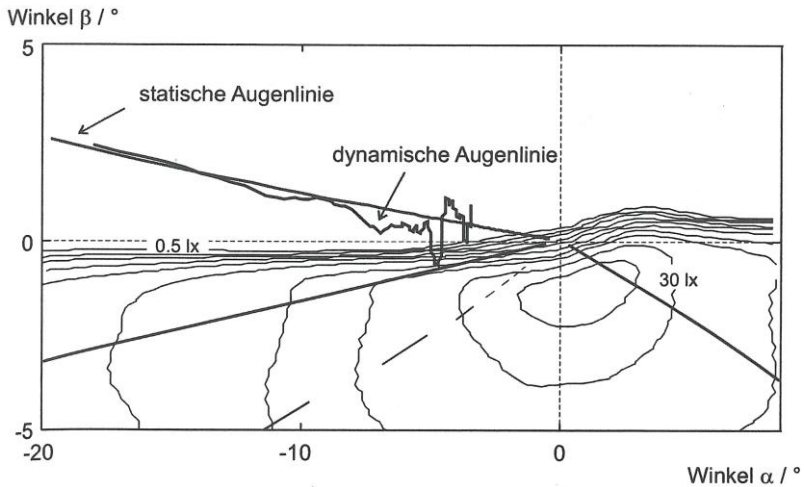


Abbildung 3.2: Statische und dynamische Augenlinie des entgegenkommenden Fahrers mit einer Augenhöhe h_{Auge} von 1,13 m in der Lichtverteilung eines Gasentladungsscheinwerfers [50]

Insgesamt ergeben sich aus den in diesem Kapitel dargestellten und bereits durchgeführten Untersuchungen erste Anhaltspunkte zur Charakterisierung der Blendsituationen im Straßenverkehr. Um daraus jedoch konkrete Werte für Blendimpulsdauern und Blendbeleuchtungsstärken ableiten zu können, sind weitere Studien durchgeführt worden, die in den Kapiteln 3.2 und 3.3 näher beschrieben sind.

3.2 CHARAKTERISTISCHE BLENDBELEUCHTUNGSSTÄRKEN

In diesem Kapitel werden Blendsituationen im Straßenverkehr hinsichtlich typischer Blendbeleuchtungsstärken sowohl aus theoretischer als auch empirischer Sicht untersucht. Dabei wird davon ausgegangen, dass eine Blendsituation im Straßenverkehr immer dann auftritt, wenn die gesetzlichen Grenzwerte überschritten werden. Anhand der Ergebnisse lassen sich charakteristische Merkmale für Blendsituationen ableiten, die für die vorliegende Arbeit als Rahmenbedingungen genutzt werden sollen.

Um einen ersten Eindruck über den Einfluss der Fahrdynamik auf die zu erwartenden maximalen Lichtstärken bzw. Beleuchtungsstärken an der Position des Fahrerauges zu erhalten, werden die gesetzlich vorgeschriebenen Werte aus der UNECE Regelung 123 in Tabelle 3.2 erneut aufgegriffen. Tabelle 3.2 wurde um die Spalte Nickwinkel ergänzt, die die vertikale Winkeldifferenz zu Punkt B50L angibt. Bereits für die von Huhn [52] ermittelten maximalen Nickwinkel von $1,49^\circ$ zeigen sich mithilfe der in Tabelle 3.2 aufgelisteten Grenzwerte die Auswirkungen der Fahrdynamik auf die theoretisch auftretenden Lichtstärken und Beleuchtungsstärken. Während in Punkt B50L maximale Lichtstärken von 350 cd zulässig sind, ist bei einem Nickwinkel von $1,43^\circ$ bereits mit mindestens 10-mal höheren Lichtstärken je Scheinwerfer zu rechnen.

Dies deckt sich mit den zu erwartenden maximalen Beleuchtungsstärken am Fahrerauge, die Lehnert [50] aus seinen Untersuchungen in Bezug auf die dynamische Augenlinie geschlussfolgert hat. Er ermittelte eine Blendbeleuchtungsstärke $E_{max,50m}$ von $6,3 \text{ lx}$ ($I_{max} = 15.750 \text{ cd}$; $E_{max,25m} = 25,2 \text{ lx}$) für ein Scheinwerferpaar.

Ausgehend von einem maximal möglichen Nickwinkel von $1,7^\circ$ [50] wird der Punkt B_{max} ergänzt. Angaben zu maximalen Lichtstärken oder Beleuchtungsstärken sind nicht bekannt und wurden deshalb in einer Messreihe bestimmt.

Tabelle 3.2: Vertikale Position sowie Grenzwerte für Lichtstärke und Beleuchtungsstärke in 25 m Entfernung für einen Scheinwerfer für ausgewählten Punkte nach ECE Regelung 123 [40] und Punkt B_{max} (Nickwinkel $1,7^\circ$)

	verti- kale Posi- tion	Nickwin- kel zur Soll-Lage	I_{min} [cd]	I_{max} [cd]	E_{min} [lx]	E_{max} [lx]
B50L	$0,57^\circ$	$0,00^\circ$	50	350	0,08	0,56
HDG	$-0,57^\circ$	$1,14^\circ$	N/A	N/A	N/A	N/A
50L	$-0,86^\circ$	$1,43^\circ$	3.550	13.200	5,68	21,12
B_{max}	$-1,13^\circ$	$1,70^\circ$	N/A	N/A	N/A	N/A

Im Rahmen der Arbeit von Brahim [53] wurden maximale Lichtstärken für unterschiedliche Scheinwerfersysteme unterhalb der HDG evaluiert, um den Einfluss der Nickbewegung auf die zu erwartenden Lichtstärken am Fahrerauge abschätzen zu können. Hierzu wurden zehn typgeprüfte Scheinwerfer ausgewählt und im Bereich der

Gegenfahrbahn unterhalb der HDG nach ECE Regelung 123 vermessen. Bei vier der Scheinwerfer handelte es sich um LED-Scheinwerfer, bei den übrigen um Halogenscheinwerfer. Vermessen wurde jeweils nur ein Scheinwerfer. Zur Approximation der im Straßenverkehr auftretenden realen Lichtstärken bzw. Beleuchtungsstärken an Position des Fahrerauges, muss die Lichtverteilung beider Scheinwerfer überlagert werden. Hierbei wird angenommen, dass der Abstand zwischen linkem und rechtem Scheinwerfer $1,6\text{ m}$ beträgt. In einer Messentfernung von 25 m ergibt sich aufgrund dieses angenommenen Abstandes ein Versatz von $3,67^\circ$ zwischen beiden Scheinwerferlichtverteilungen. Die Überlagerung ist in Abbildung 3.3 dargestellt.

Damit die Lichtstärken bzw. Beleuchtungsstärke für das Gesamtsystem berechnet werden kann, werden zu den ermittelten Werten die um $3,67^\circ$ versetzten Werte addiert. Es wird angenommen, dass bei Überschreiten von 1250 cd eine Blendsituation vorliegt. Dieser Wert resultiert aus der Summation zweier Scheinwerfer der maximal zulässigen Werte von Zone III und wird als Grenzwert für alle im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Studien festgelegt.

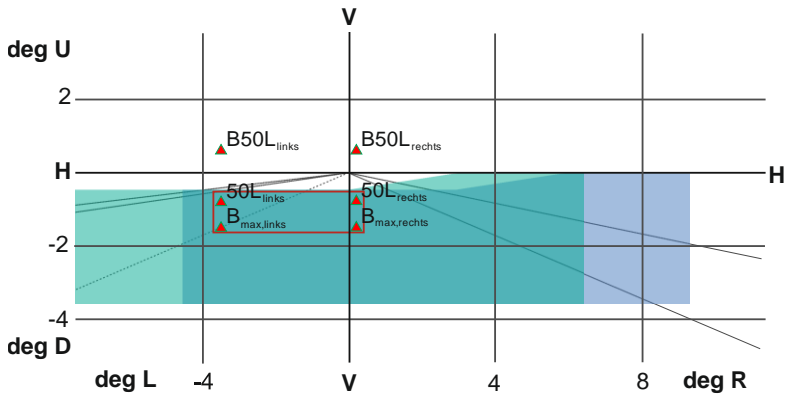


Abbildung 3.3: Prinzipskizze der überlagerten Lichtverteilung zweier Scheinwerfer in 25 m Entfernung bei einem Einbauabstand von 1,60 m (grün: linker Scheinwerfer, blau: rechter Scheinwerfer) inkl. der relevanten Punkte $B50L_{links}$, $B50L_{rechts}$, $50L_{links}$, $50L_{rechts}$, $B_{max,links}$, $B_{max,rechts}$ und des Auswertebereichs mit einer vertikalen Ausdehnung von 1° und einer horizontalen Ausdehnung von 4° . L=Left/Links, R=Right/Rechts, U=Up/oben, D=Down/unten

Die horizontale Ausdehnung des Auswertebereiches wird aufgrund des Versatzes beider Scheinwerfer auf 4° festgelegt. Die vertikale Ausdehnung des Auswertebereiches orientiert sich an Punkt B_{max} und wird zu 1° gewählt. Der Auswertebereich inklusive dessen Position im Verkehrsraum ist in Abbildung 3.3 als rote Box dargestellt.

Im Folgenden werden ausschließlich die Messergebnisse auf Höhe der Punkte $50L$ und Punkte B_{max} ausgewertet, wobei für jeden dieser Punkte alle Werte auf gleicher horizontaler Position im Auswertebereich berücksichtigt werden. Die Ergebnisse sind in Abbildung 3.4 und Abbildung 3.5 zu sehen. Um den Einfluss der Fahrdynamik auf die zu erwartenden Lichtstärken aufzuzeigen, werden diese als Vielfaches des festgelegten Grenzwertes von 1250 cd dargestellt.

Charakteristische Blendbeleuchtungsstärken

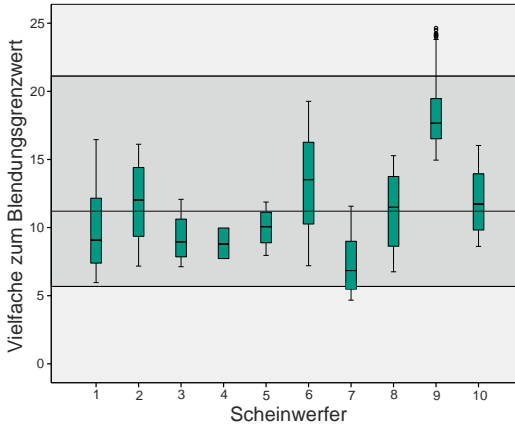


Abbildung 3.4: Gemessene Lichtstärken an horizontaler Position der Punkte 50L für jeden vermessenen Scheinwerfer inklusive dem gesetzlich zulässigen Bereich (grau hinterlegt) im Verhältnis zum festgesetzten Blendungsgrenzwert von 1250 *cd* und errechnetem Mittelwert der Grenzüberschreitung um Faktor 11

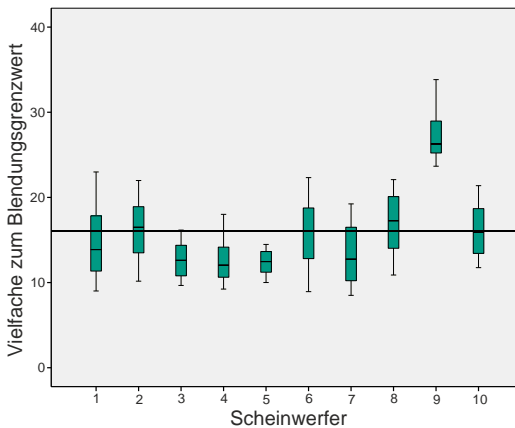


Abbildung 3.5: Gemessen Lichtstärken an horizontaler Position von Punkt B_{max} für jeden vermessenen Scheinwerfer im Verhältnis zum festgesetzten Blendungsgrenzwert von 1250 *cd* und errechnetem Mittelwert der Grenzüberschreitung um Faktor 16

Abbildung 3.4 zeigt, dass alle gemessenen Werte bis auf einige Ausnahmen von Scheinwerfer 7 und 9 im gesetzlich zulässigen Bereich liegen. Die Ausreißer und äußeren Grenzen der Whisker lassen sich auf Messwerte am rechten Rand des Auswertebereichs zurückführen. Üblicherweise befindet sich nahe dieser Region der Bereich mit den größten Lichtstärkewerten innerhalb der Lichtverteilung.

Dass die theoretisch zulässigen Lichtstärkewerte für Nickwinkel von $1,43^\circ$ im Mittel um das 11-fache überschritten werden, spielt an dieser Stelle eine wesentlich wichtigere Rolle. In einer Entfernung von 25 m entspricht dies einer Beleuchtungsstärke von etwa 22 lx an Position des Fahrerauges.

Für Nickwinkel von $1,7^\circ$ ergeben sich die in Abbildung 3.5 dargestellten normierten Lichtstärken, deren Werte im Mittel beim 16-fachen im Vergleich zu den Werten an Punkt B50L liegen. Folglich ist im Falle solcher Nickwinkel in einer Entfernung von 25 m mit Beleuchtungsstärken von etwa 32 lx zu rechnen.

Da die gemessenen Werte unter Laborbedingungen aufgenommen wurden, wurden zum Vergleich noch Messfahrten in Zusammenarbeit mit Steinborm [54] durchgeführt. Somit können weitere Einflüsse wie z.B. Alterung, Verschleiß und Verschmutzung sowie der Einfluss der Windschutzscheibe berücksichtigt und die Plausibilität der im Labor ermittelten Werte überprüft werden. Für den Fall, dass das Fahrzeug eine Bodenwelle überfährt, aus welcher eine Erhöhung der HDG um $1,5^\circ$ resultiert, ermittelte Steinborm in diesen Messfahrten maximale Beleuchtungsstärke von etwa 24 lx in einer Entfernung

von 25 m. Da Steinborm in seinen Versuchsfahrten nicht nur die Beleuchtungsstärken, sondern auch die Blendimpulsdauern evaluierte, sei für weiterführende Informationen zu den ermittelten Daten auf Kapitel 3.3.2 verwiesen.

Anhand der Ergebnisse lässt sich feststellen, dass charakteristische Blendbeleuchtungsstärken von bis zu 25 lx möglich sind.

3.3 CHARAKTERISTISCHE BLENDIMPULSDAUERN

In diesem Kapitel werden Blendsituationen im Straßenverkehr in Bezug auf typischen Blendimpulsdauern untersucht. Die Dauer von Umschaltvorgängen von Fern- auf Abblend- oder blendfreies Fernlicht und der Einfluss der Fahrdynamik spielen dabei eine wichtige Rolle und werden daher in den nächsten Teilkapiteln thematisiert.

3.3.1 UMSCHALTVORGÄNGE VON FERNLICHT ZU ABBLENDLICHT

MANUELLES SCHALTEN

Manuelle Schaltzeiten sind maßgeblich auf die Reaktionszeit des Fahrers zurückzuführen. Dabei handelt es sich um die Zeit, die er nach Erkennen anderer Verkehrsteilnehmer benötigt, um von Fern- auf Abblendlicht umzuschalten. Eine Probandenstudie von Sprute [2] konnte zeigen, dass etwa ein Drittel der Abblendvorgänge länger als

eine Sekunde in Anspruch nehmen. Weiter lässt sich aus den Ergebnissen von Sprute ableiten, dass eine Reduzierung der Abblendzeiten möglich ist, sofern die Probanden auf die Fernlichtnutzung sensibilisiert sind. Situationen, in denen der Fahrer entgegenkommende Fahrzeuge bereits anhand ihrer Lichtkegel oder Lichtkegelreflexionen erkennt, bevor das Fahrzeug überhaupt sichtbar ist, können auch hier eingeordnet werden. In diesem Fall ist davon auszugehen, dass manuelle Schaltvorgänge einen Vorteil gegenüber Fahrerassistenzsystemen bieten. Technologien wie *Car2X*³ o. ä. könnten hier Abhilfe schaffen.

SCHALTZEITEN AUTOMATISCHER SYSTEME

Übernimmt ein Assistenzsystem das Abblenden oder steht ein blendfreies Fernlicht zur Verfügung, ist es notwendig dessen Latenzzeit zu betrachten. Die auch als Systemtotzeit bezeichnete Zeit entspricht der Zeitspanne vom Eintreten eines Ereignisses bis zur Reaktion auf dieses. Aus technischer Sicht liegt eine Wirkkette zugrunde, die sich gemäß Hummel [55] für das von ihm verwendete System in die folgenden fünf Verarbeitungsschritte unterteilen lässt:

- Bildaufnahme und Bildverarbeitung inkl. Plausibilisierung

³ Kommunikation und Datenaustausch zwischen einem Fahrzeug und der Verkehrsinfrastruktur (Car to Infrastructure (C2I) und/oder einem anderen Fahrzeug (Car2C))

- Übertragung der Objektliste per CAN⁴-Bus zum Fahrzeugrechner
- Auswertung der Objektliste und Generierung der Ansteuerbefehle im ADTF⁵
- Übertragung der Ansteuerbefehle an die Leistungsmodule des Scheinwerfers
- Verarbeitungsdauer der Leistungsmodule bis zur Ansteuerung im Scheinwerfer.

Dieses System betrachtend, ermittelte Hummel [55] eine mittlere Latenzzeit von $196\text{ ms} \pm 21\text{ ms}$. Latenzzeitmessungen von Totzauer [3] ergaben 288 ms mit einer Standardabweichung von $17,4\text{ ms}$. In einem Artikel über ein Scheinwerfersystem von Hella [56] wird von Latenzzeiten von maximal 200 ms gesprochen. Auf Basis dieser Beispiele wird eine Systemreaktionszeit von 100 ms bis 300 ms angenommen. Aus Sicht von Hummel hat die Dauer des Plausibilisierungsvorgangs den größten Einfluss auf die Latenzzeit. Sofern der Plausibilisierungsvorgang bereits abgeschlossen ist, das Objekt folglich identifiziert ist, rechnet er mit Latenzzeiten von 100 ms . Ob diese Zeiten ausreichend kurz sind, damit eine mögliche Blendung toleriert

⁴ Controller Area Network: serielles Bussystem zur Übertragung von Daten im Fahrzeug

⁵ Automotive Data and Time-Triggered Framework: Werkzeug zur Entwicklung, Validierung, Visualisierung und zum Testen von Fahrerassistenzsystemen

also kein signifikanter Einfluss auf die Sehleistung zu erwarten ist, ist unklar.

Im Gegensatz zu künstlich herbeigeführten Situationen treten Ereignisse im realen Fahrbetrieb in den meisten Fällen nicht unvorhersehbar auf, sondern werden sensorseitig bereits in großer Entfernung erfasst. Objekte, die sich situationsbedingt verdeckt nähern, sind hiervon ausgeschlossen. Da sich hieraus für Geraden und Kurven unterschiedliche Anforderungen an das Gesamtsystem ableiten lassen, werden diese Situationen in den nächsten Teilkapiteln unterschieden und näher beschrieben.

BEGEGNUNGSSITUATIONEN AUF GERADEN

Die zuvor genannten Latenzzeiten beziehen sich auf optimale Bedingungen, in welchen die sensorseitige Reichweite optimal ausgenutzt werden kann. Die daraus resultierende Frage nach der notwendigen Detektionsentfernung wurde von Böhm [57] aufgegriffen. Er führt aus, dass die Detektionsentfernung unter Beachtung der Relativbewegung entgegenkommender Verkehrsteilnehmer bei mindestens 800 m liegen sollten. Außerdem weist er darauf hin, dass die gesetzlich vorgeschriebene maximale Beleuchtungsstärke auch bei adaptiven Scheinwerfersystemen bei Entfernungen zwischen 800 m und 50 m nicht überschritten werden sollten.

BEGEGNUNGSSITUATIONEN IN KURVEN

Begegnungssituationen in Kurven stellen deutlich höhere Anforderungen an das Gesamtsystem. Objekte nähern sich zum einen mit höherer Wahrscheinlichkeit verdeckt [57] oder befinden sich außerhalb des Sensorbereichs. Zum anderen ändert sich die Position des anderen Fahrzeugs innerhalb der Lichtverteilung deutlich schneller als auf Geraden. Gut [58] stellt dar, dass je nach Kurvenradius und Abstand der beiden sich begegnenden Fahrzeuge die Positionsänderungen bereits bei Latenzzeiten von 30 *ms* im Bereich von einigen zehntel Grad liegen. Nach Reisinger [48] und Gut [58] lässt sich diese Problematik mit einer gröberen Auflösung des Scheinwerfersystems in Kurven vermindern. Die Reduzierung der Latenzzeiten, dies stellt Gut [58] klar hervor, ist die größte Herausforderung. Sowohl das Problem der sich verdeckt nähernden Objekte als auch das Problem der Latenzzeiten könnte mithilfe von prädiktiven Systemen, *Car2X* oder anderen Systemen, die Informationen über die Position oder Bahnplanung der anderen Fahrzeuge bereitstellen, behoben werden [59, 60].

3.3.2 EINFLUSS DER FAHRDYNAMIK AUF DIE ZU ERWARTENDEN BLENDIMPULSDAUERN

Die bisherigen Ausführungen zeigen, dass die gesetzlich zulässigen Werte für maximale Blendbeleuchtungsstärken aufgrund der Fahr-

zeugdynamik deutlich überschritten werden können. Konkrete Zahlenwerte für real gemessene Dauern einer solchen Grenzüberschreitung gibt es jedoch nicht. Einzig Lehnert [50] kann auf Basis seiner Untersuchungen eine erste zeitliche Abschätzung vornehmen und schlussfolgert zu erwartende Blendimpulsdauern im Bereich von einer Sekunde.

Daher thematisieren die im Rahmen der Arbeit von Steinborm [54] durchgeführten eigenen Untersuchungen diese Fragestellung. Zu diesem Zweck wurden Messfahrten im Straßenverkehr durchgeführt und Situationen nachgestellt, welche das Überfahren einer Bodenwelle simulieren. Dabei wird davon ausgegangen, dass eine Blendsituation im Straßenverkehr immer dann auftritt, wenn die gesetzlichen Grenzwerte überschritten werden.

BLENDIMPULSDAUERN FÜR BEGEGNUNGSSITUATIONEN IM STRAßEN- VERKEHR

Im Folgenden werden die Randbedingungen und Ergebnisse der Messfahrten von Steinborm [54] vorgestellt. Um ein möglichst vollständiges Bild realer Begegnungssituationen zu erhalten, wurde mehrfach eine Route südlich von Karlsruhe mit unterschiedlichen Straßenkategorien und einer Länge von ca. 30 km abgefahren. Das Versuchsfahrzeug, ein Rechtslenker, war an Position des Fahrerrauges in 1,20 m Höhe mit einem Beleuchtungsstärkesensor ausgestattet.

Über einen Datenlogger konnte der zeitliche Verlauf der Beleuchtungsstärke aufgezeichnet werden. Die gemessenen Beleuchtungsstärken konnten unter Berücksichtigung der Entfernung in die Lichtstärken umgerechnet werden. Zur Ermittlung der Blendimpulsdauern wurde für jede Begegnungssituation anhand der Messungen die Zeit bestimmt, während der die maximal zulässigen 1250 cd überschritten wurden.

Ein beispielhafter zeitlicher Verlauf der ermittelten Lichtstärken ist in Abbildung 3.6 gezeigt, wobei zwischen den bestimmten Lichtstärkewerten interpoliert wurde. Der Ursprung der Abszisse ist der Zeitpunkt, bei welchem das entgegenkommende Fahrzeug das Versuchsfahrzeug passiert. Wird eine Differenzgeschwindigkeit von 160 km/h angenommen, war das entgegenkommende Fahrzeug bspw. zum Zeitpunkt $t=0,8 \text{ s}$ etwa 36 m entfernt.

Im Falle des in Abbildung 3.6 veranschaulichten zeitlichen Verlaufs der gemessenen Lichtstärke lässt sich mithilfe der Annahme, dass beim Überschreiten der 1250 cd Blendung auftritt, auf eine Blendimpulsdauer t_B von 185 ms schlussfolgern. Anhand der Messdaten, lassen sich 25 Blendsituationen identifizieren. Die mittlere Blendimpulsdauer beträgt $t_B = 530 \text{ ms}$. Des Weiteren zeigt sich, dass über die Hälfte der Blendimpulsdauern kleiner als 500 ms sind. Etwa ein Drittel der ermittelten Blendimpulsdauern liegen im Bereich von 500 ms bis 1000 ms . Lediglich in drei Blendsituationen lagen die Blendimpulsdauern deutlich über 1000 ms . Die Häufigkeitsverteilung der ermittelten Blendimpulsdauern nach Steinborm [52] ist in Abbildung 3.7 dargestellt.

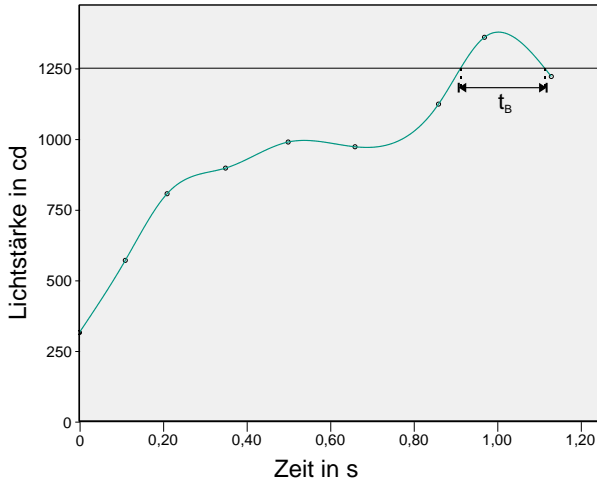


Abbildung 3.6: Beispielhafter Verlauf der Lichtstärke in cd in Abhängigkeit der Zeit in s nach Steinborm [54] inklusive Grenzwert bei 1250 cd und Blendimpulsdauer t_B

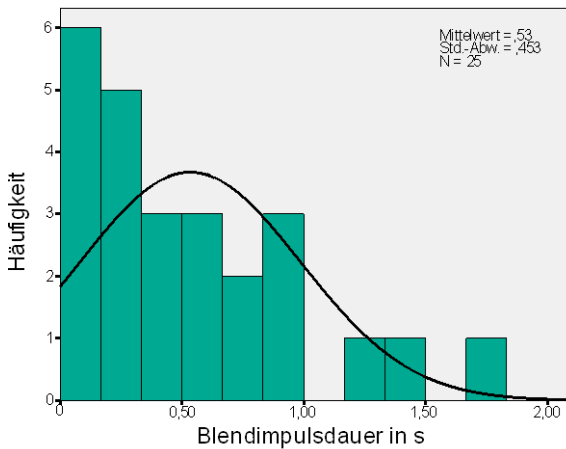


Abbildung 3.7: Häufigkeitsverteilung der ermittelten Blendimpulsdauern nach Steinborm [52]

BEGEGNUNGSSITUATIONEN BEIM DURCHFAHREN VON WANNEN UND SENKEN

Abbildung 3.8 zeigt den Einfluss der horizontalen Straßenkrümmung auf die Reichweite und das Blendpotential einer Abblendlichtverteilung. Kuhl [29] gibt an, dass bei Kuppenradien von 1000 m an der Position des Fahrerauges des Gegenverkehrs mit Beleuchtungsstärken von bis zu 10 lx in einer Entfernung von 50 m zu rechnen ist. In 25 m Entfernung entspricht dies einer Beleuchtungsstärke von 40 lx . Weiterhin führt er aus, dass beim Überfahren einer Kuppe mit korrekt eingestelltem Abblendlicht Blendimpulsdauern von 300 ms auftreten. Im Rahmen seiner Arbeit kommt er zu dem Schluss, dass die Einführung einer adaptiven dynamischen Leuchtweitenregulierung durchaus als sinnvoll zu erachten ist. Konkrete Anforderungen an diese nennt er jedoch nicht.

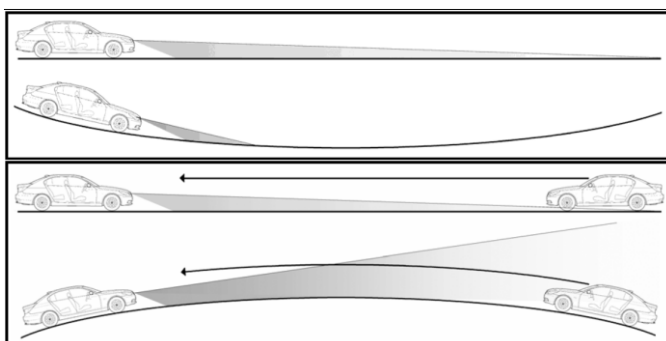
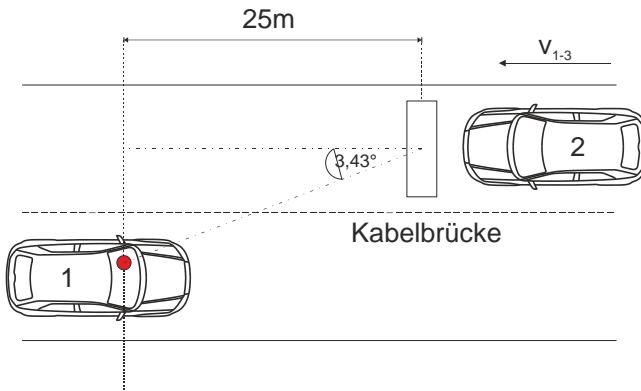


Abbildung 3.8: Geometrische Leuchtweite in einer Ebene und in einer Wanne sowie geometrische Leuchtweite in einer Ebene und auf einer Kuppe [29]

BLENDIMPULSDAUERN UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER FAHRDYNAMIK

Um den Einfluss der Fahrdynamik auf die zu erwartenden Blendimpulsdauern aufzuzeigen, wurde im Rahmen von Steinborms Arbeit [54] eine quasi-statische Begegnungssituationen nachgestellt, in welcher ein Fahrzeug über eine Bodenwelle fährt. Die Situation ist in Abbildung 3.9 dargestellt.



Beleuchtungsstärkemesskopf

Abbildung 3.9: Prinzipieller Versuchsaufbau der nachgestellten Begegnungssituation mit Versuchsfahrzeug 1 (Ausgestattet mit Beleuchtungsstärkemesskopf und an definierter Position platziert), Versuchsfahrzeug 2 (Überfahren der Kabelbrücke mit v_1 = Schrittgeschwindigkeit, $v_2 = 20\text{km/h}$ und $v_3 = 30\text{km/h}$ und verfügt über unterschiedliche Fahrwerkeinstellmöglichkeiten) sowie der Kabelbrücke in 25 m Entfernung zum Beleuchtungsstärkemesskopf

Versuchsfahrzeug 1 wurde mit einem Beleuchtungsstärkemesskopf in 1,20 m Höhe an Position des Fahrerauges ausgestattet und gemäß Punkt B50L in $3,43^\circ$ mittig zur Kabelbrücke im Abstand von 25 m

positioniert. Die Höhe der Kabelbrücke betrug $7,3\text{ cm}$, sodass sich bei einem Randstand von $2,843\text{ m}$ von Versuchsfahrzeug 2 ein Neigungswinkel von $1,5^\circ$ ergibt. Wie bereits in Kapitel 3.1.3 beschrieben, kann ein solcher Winkel im Straßenverkehr durch Beschleunigungsvorgänge oder beim Überfahren von Straßenunebenheiten auftreten.

Bei Versuchsfahrzeug 2 handelt es sich um einen Audi A6 Avant der Baureihe C6 mit Xenon-Scheinwerfern und vier unterschiedlichen Fahrwerkseinstellungen (Lift, Comfort, Dynamic und Automatic), die sich vornehmlich in der Bodenfreiheit und der Dämpfungscharakteristik unterscheiden. Die Unterschiede sind in einer Tabelle im Anhang B.1 zusammengefasst. Die Fahrwerkseinstellung Automatic ist geschwindigkeitsabhängig und für Geschwindigkeiten kleiner 70 km/h identisch mit Comfort, sodass die Fahrwerkseinstellung Automatic im Folgenden nicht weiter betrachtet wird. Im Rahmen der Messreihe wird die Kabelbrücke mit Schrittgeschwindigkeit, 20 km/h und 30 km/h überfahren. Dabei wird die Beleuchtungsstärke zeitdiskret aufgenommen. Die Ergebnisse für das Überfahren der Kabelbrücke in 25 m Entfernung sind in Abbildung 3.10 bis Abbildung 3.12 zu sehen und in Tabelle 3.3 zusammengefasst. Zur besseren Veranschaulichung ist die Zeitachse der Abbildungen so gewählt, dass bei $t = 0\text{ s}$ der maximal zulässige Grenzwert von 1250 cd , der in 25 m Entfernung 2 lx entspricht, überschritten wird.

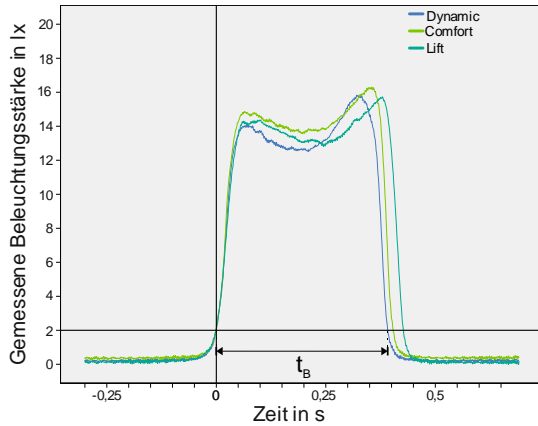


Abbildung 3.10: Gemessene Beleuchtungsstärke beim Überfahren der Kabelbrücke in 25 m Entfernung mit Schrittgeschwindigkeit zur Bestimmung der Blendimpulsdauer t_B bei den Fahrwerkseinstellungen Dynamic, Comfort und Lift

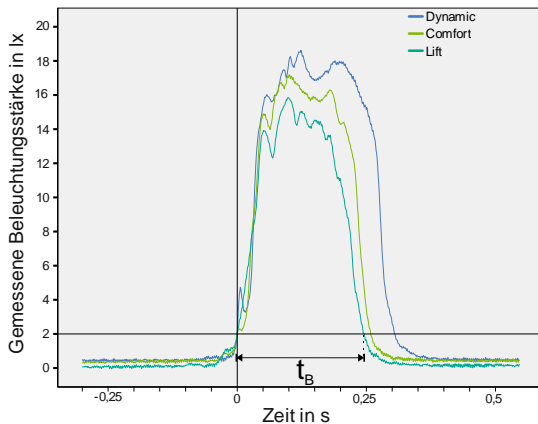


Abbildung 3.11: Gemessene Beleuchtungsstärke beim Überfahren der Kabelbrücke in 25 m Entfernung mit einer Geschwindigkeit von 20 km/h zur Bestimmung der Blendimpulsdauer t_B bei den Fahrwerkseinstellungen Dynamic, Comfort und Lift

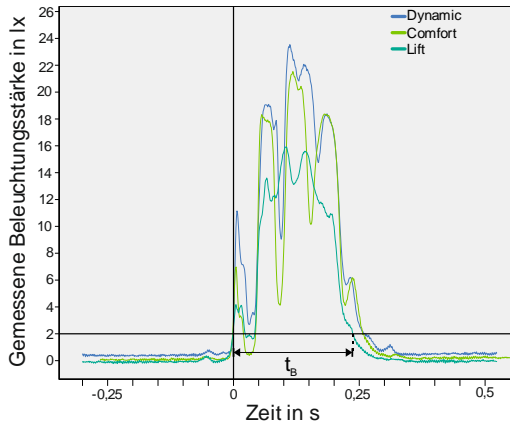


Abbildung 3.12: Gemessene Beleuchtungsstärke beim Überfahren der Kabelbrücke in 25 m Entfernung mit einer Geschwindigkeit von 30 km/h zur Bestimmung der Blendimpulsdauer t_B bei den Fahrwerkseinstellungen Dynamic, Comfort und Lift

Zusammenfassend wird deutlich, dass die Geschwindigkeit und die daraus resultierende Fahrdynamik einen Einfluss auf die ermittelten Blendimpulsdauern und Beleuchtungsstärken haben. Die Ergebnisse aus Tabelle 3.3 lassen den Schluss zu, dass die zu erwartenden Blendimpulsdauern im Bereich von 200 ms bis 450 ms liegen und maximale Beleuchtungsstärken von bis zu 24 lx auftreten können.

Tabelle 3.3: Ermittelte maximalen Blendimpulsdauern sowie maximale Beleuchtungsstärken für unterschiedliche Fahrwerkeinstellungen beim Überfahren einer Kabelbrücke in 25 m Entfernung mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten

Fahrwerkseinstellung		Schrittgeschwindigkeit	20 km/h	30 km/h
		keit		
Dynamic	t_B in s	0,391	0,305	0,261
	E_{max} in lx	15,83	18,62	23,54
Comfort	t_B in s	0,403	0,258	0,223
	E_{max} in lx	16,30	17,18	21,53
Lift	t_B in s	0,427	0,245	0,239
	E_{max} in lx	15,73	15,85	15,92

Insgesamt kann abgeleitet werden, dass im Straßenverkehr aufgrund von Umschaltvorgängen zwischen Lichtverteilungen und der Fahrdynamik mit Blendimpulsdauern von 100 ms bis 500 ms mit maximalen Blendbeleuchtungsstärken von 24 lx zu rechnen ist.

Kapitel 4

METHODEN ZUR BLENDUNGSBEWERTUNG

Besonders im Bereich der automobilen Lichttechnik ist das Thema Blendung ein wesentlicher Forschungsschwerpunkt, sodass bereits etablierte Methoden zu deren Bewertung existieren. Wesentliche Maßzahlen, Einflussfaktoren und Modelle zur Bewertung physiologischer Blendung fasst Völker [61] zusammen. Auch er unterstreicht die Kritikalität der aus der Fahrdynamik und Fahrbahnbeschaffenheit resultierenden Blendsituationen aufgrund nicht ausreichender Adaptationszeit, die eine Reduzierung der visuellen Leistungsfähigkeit nach sich ziehen können.

In diesem Kapitel findet sich eine Kategorisierung der Blendungssituationen und deren Einordnung in den Kontext des Straßenverkehrs. Im Anschluss erfolgt ein Überblick bekannter Bewertungsmethoden sowie eine auf der Blendsituation basierende Kategorisierung. Hieraus werden die wichtigsten Parameter hinsichtlich der Situationen im Straßenverkehr abgeleitet und definiert.

4.1 MAßZAHLEN ZUR BLENDUNGSBEWERTUNG

Wird im Gesichtsfeld des Beobachters eine Blendung hervorgerufen, kann es passieren, dass zuvor sichtbare Objekte nicht mehr sicher oder schlimmstenfalls überhaupt nicht mehr erkannt werden können. Ist dies der Fall, wird dies im Folgenden als reduzierte visuelle Leistungsfähigkeit bezeichnet. Abbildung 4.1 zeigt einen vereinfachten prinzipiellen zeitlichen Verlauf einer solchen Situation und die verschiedenen ablaufenden Adaptationsvorgänge unter Berücksichtigung der Ergebnisse von Crawford [62] und Baker [63]. Ist das Auge vollständig adaptiert, verfügt der Beobachter über seine maximale visuelle Leistungsfähigkeit. Ändert sich die Lichtsituation zum Beispiel durch eine Blendquelle, beginnt das Auge unmittelbar mit dem Adaptationsvorgang. Da dieser Vorgang jedoch eine bestimmte Zeit beansprucht, ist das Auge in dieser Zeit nicht korrekt adaptiert, was eine Reduzierung der visuellen Leistungsfähigkeit mit sich zieht.

Die Zeit, die das Auge nach einer Blendung zur Wiederherstellung der dann maximalen Leistungsfähigkeit benötigt, wird Readaptationszeit t_R genannt. Sowohl die Readaptationszeit als auch die Differenz zwischen ursprünglichen und der unter Blendeinfluss reduzierten visuellen Leistungsfähigkeit ΔVP (englisch für Visual Performance) können als Maßzahlen zur Bewertung der physiologischen Blendung in Blendsituationen herangezogen werden.

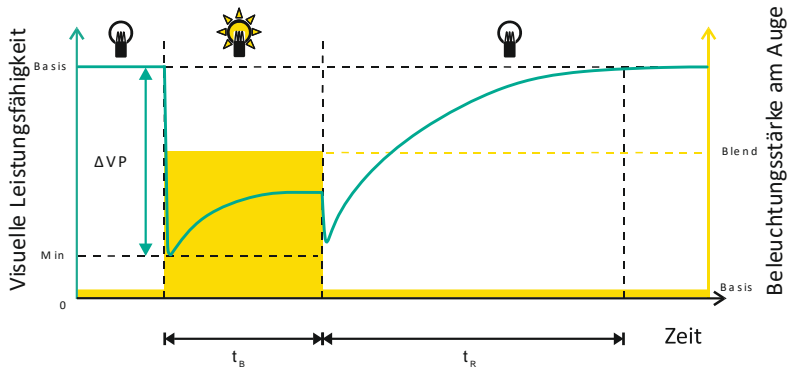


Abbildung 4.1: Prinzipieller zeitlicher Verlauf der visuellen Leistungsfähigkeit für eine Situation mit sich verändernden Lichtverhältnissen; t_B - Blendimpulsdauer, t_R - Readaptationszeit, ΔVP - relative visuelle Leistungsfähigkeit

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass beide Maßzahlen notwendig sind, um den Einfluss einer Blendsituation abbilden zu können. Nur so können die beiden zentralen Fragestellungen beantwortet werden:

- Wie stark wird die visuelle Leistungsfähigkeit ΔVP durch die Blendquelle beeinflusst?
- Wie lange dauert die Readaptation nach Blendeinfluss zur Wiederherstellung der ursprünglichen visuellen Leistungsfähigkeit?

Sowohl zur Bestimmung der visuellen Leistungsfähigkeit als auch der Readaptationszeit ist die Ermittlung des individuellen Schwellenkontrastes K_S notwendig.

4.1.1 INDIVIDUELLER SCHWELLENKONTRAST

Inwiefern die vorliegende Blendsituationen zu einer reduzierten Kontrastwahrnehmung führt, kann mithilfe des individuellen Schwellenkontrastes ermittelt werden. Hierzu werden zunächst die Grundlagen zur Reizschwellenmessung und anschließend die drei bekannten Methoden zur Schwellenkontrastermittlung erläutert.

PSYCHOMETRISCHE FUNKTION UND SCHWELLENMESSUNG

Die Psychometrische Funktion beschreibt den Zusammenhang der Wahrscheinlichkeit der Signalerkennung in Abhängigkeit der dargebotenen Reizstärke. Gemäß der gängigen wissenschaftlichen Praxis wird als absoluter Schwellenwert jener angenommen, bei dem der Proband 50 % der dargebotenen Reize korrekt benannt hat [64, 65]. Dies beinhaltet, dass auch Reize unterhalb der 50 %-Grenze manchmal erkannt und oberhalb manchmal nicht erkannt werden können. Die Wahl anderer prozentuale Grenzen ist möglich und im Rahmen lichttechnischer Anwendungen nicht unüblich; müssen jedoch explizit ausgewiesen werden [21].

Unabhängig davon besteht definitionsbedingt immer eine gewisse Wahrscheinlichkeit f_p , dass der Reiz vorhanden war, aber vom Beobachter nicht erkannt wurde. Die hierbei auftretenden Wahrscheinlichkeiten für alle vier Fälle möglicher Reiz- und Antwortmöglichkeiten sind Tabelle 4.1 zusammengefasst. Die Summe aller Wahrscheinlichkeiten ist 1.

	Reiz vorhanden (Erkannt)	Reiz nicht vorhanden (Nicht erkannt)
Antwort „ja“ (Richtig benannt)	Treffer r_p	Falsche Alarmer f_p
Antwort „nein“ (Falsch benannt)	Verpasser f_n	Korrekte Zurückweisung r_n

Tabelle 4.1: Reiz-Reaktionsmatrix in Anlehnung an die Signaldetektionstheorie; Allgemeine Beschreibung fett gedruckt; Übertragung auf Erkennung und Benennung der Öffnungsrichtung des Landolt-Ringes in Klammern

Zur Qualitätsbewertung der zugrundeliegenden Messmethodik können verschiedene relative Häufigkeiten berechnet werden [66].

Der Begriff Sensitivität beschreibt die Wahrscheinlichkeit der korrekten Klassifizierung richtig benannter Ereignisse. Formell ausgedrückt bedeutet das:

$$\text{Sensitivität} = \frac{r_p}{r_p + f_n} \quad (4.1)$$

Entsprechend dazu gibt die Falsch-negativ-Rate an, welcher Anteil falsch benannter Ereignisse falsch klassifiziert wurden:

$$\text{Falsch - negativ - Rate} = \frac{f_n}{r_p + f_n} \quad (4.2)$$

Die Spezifität entspricht dem Anteil der korrekt klassifizierten falschen Situationen und berechnet sich wie folgt:

$$\text{Spezifität} = \frac{r_n}{r_n + f_p} \quad (4.3)$$

Um den Anteil der Fehlalarme auszudrücken, kann die Falsch-positiv-Rate ermittelt werden:

$$\text{Falsch} - \text{positiv} - \text{Rate} = \frac{f_p}{r_n + f_p} \quad (4.4)$$

In Abhängigkeit der gewünschten Anforderungen an die Testqualität sind die jeweiligen Verhältnisse der relativen Häufigkeiten entsprechend zu optimieren. Die Tatsache, dass sich die Verhältnisse gegenseitig bedingen und miteinander korrelieren, erschwert die Optimierung.

Zur Überführung der physischen Reizstärke in die psychische Wahrnehmungsstärke können die Methoden von Fechner [67] zur Schwellenbestimmung angewandt werden, die im Folgenden, wie bereits in [68 bis 70] veröffentlicht, kurz vorgestellt werden.

GRENZMETHODE

Bei der Grenzmethode werden, wie in Abbildung 4.2 gezeigt, den Probanden diskrete Reize in aufsteigender oder absteigender Intensität dargeboten. Das Reizintervall muss so gewählt sein, dass beide Extrema ausreichend weit von dem zu erwartenden Schwellenwert entfernt liegen. Dieser Schwellenwert entspricht dem Übergang zwischen ‚gerade noch erkannt‘ und ‚gerade nicht mehr erkannt‘. Beide Richtungen der Reizänderung, d.h. aufsteigende und absteigende Stärke, werden mehrfach wiederholt und anschließend der Schwellenwert als Mittelwert der Übergangswerte ermittelt. Der Vorteil der

Grenzmethode ist ihr geringer Aufwand sowie die einfache Durchführung. Nachteilig ist die Tatsache, dass Gewöhnungs- bzw. Erwartungseffekte nicht vollständig ausgeschlossen werden können.

HERSTELLUNGSMETHODE

Die Herstellungsmethode, auch Methode der mittleren Fehler genannt, ist der Grenzmethode ähnlich und in Abbildung 4.2 dargestellt. Dem Probanden werden hier allerdings kontinuierliche Reize präsentiert bzw. der Proband wird gebeten, den Schwellenwert beim Übergang zwischen ‚gerade noch erkannt‘ und ‚gerade nicht mehr erkannt‘ einzustellen. Dieser Wert spiegelt jedoch nur den Punkt des subjektiven Eindrucks beim Übergang wider, was diese Methode ungenau macht. Darüber hinaus ist der technische Aufwand verhältnismäßig hoch, wobei aufgrund der Zuweisung einer aktiven Rolle des Probanden dessen Aufmerksamkeit leichter aufrechterhalten werden kann und demzufolge auch schnell Ergebnisse erzielt werden können. Der Schwellenwert wird über den Mittelwert der Messreihen berechnet.

KONSTANZMETHODE

Das Prinzip der Konstanzmethode oder auch Methode der richtigen und falschen Fälle genannt, ist ebenfalls Abbildung 4.2 visualisiert.

Der wesentliche Unterschied besteht darin, dass der Reiz nicht mehrfach in der gleichen Reihenfolge, sondern mehrfach in einer zufälligen Reihenfolge dargeboten wird. Das Reizintervall ist auch bei dieser Methode ausreichend groß aufzuspannen. Die Aufgabe des Probanden ist es, zu benennen, ob er den Reiz erkannt hat oder nicht. Insgesamt betrachtet ist diese Methode zwar sehr zeitaufwendig und setzt gegebenenfalls eine Vorstudie voraus, aber im Vergleich zu den beiden anderen vorher beschriebenen Methoden ist die Konstanzmethode zuverlässig und präzise bei verhältnismäßig geringem technischem Aufwand und liefert nicht nur die 50%-Schwelle. [66,67,68]

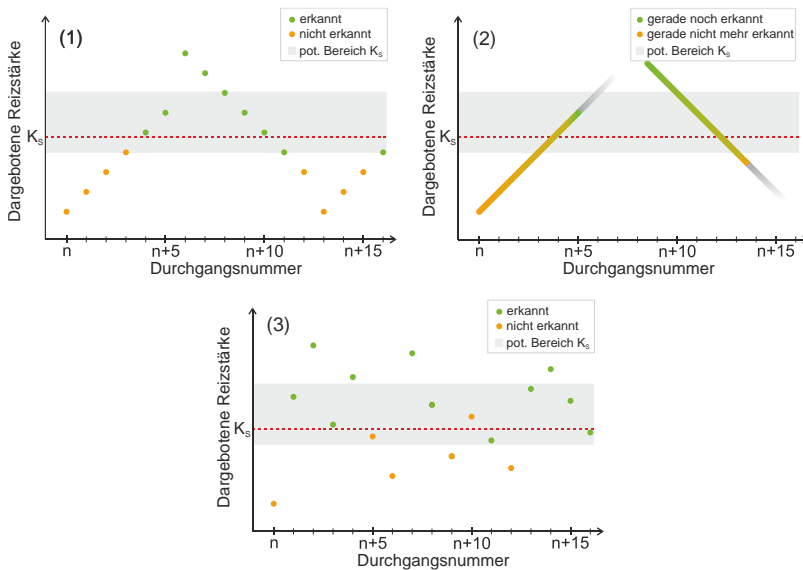


Abbildung 4.2: (1) Grenzmethode, (2) Herstellungsmethode und (3) Konstanzmethode zur Ermittlung des Schwellenkontrastes K_s

4.1.2 MAßZAHL: VISUELLE LEISTUNGSFÄHIGKEIT

Die visuelle Leistungsfähigkeit kann als Kombination der Kenngrößen Visus und Kontrast verstanden werden, wobei deren Gewichtung vom Anwendungsfall abhängt. Im Folgenden wird die visuelle Leistungsfähigkeit mit *VP*, engl.: Visual Performance, abgekürzt.

Wie Holladay [71] bereits 1926 aus seinen Untersuchungen geschlossen hat, ist zur Blendungsbewertung vorrangig der Kontrast respektive die relative Schwellenkontrasterhöhung heranzuziehen. Hierbei gilt: Je höher der notwendige Schwellenkontrast mit Blendung, desto geringer die visuelle Leistungsfähigkeit und desto größer der Einfluss der Blendquelle.

4.1.3 MAßZAHL: READAPTATIONSZEIT

Die Readaptationszeit t_R ist die Zeit, die das Auge nach einem kurzen Blendimpuls bis zum Erreichen ihrer ursprünglichen visuellen Leistungsfähigkeit benötigt. Die Länge der Readaptationszeit korreliert mit der Größe des Blendimpulses. Diese Größe ist proportional zu den Faktoren Dauer und Kontrast, d.h. der Höhe des transienten Leuchtdichteunterschiedes, und kann als Definition für die Größe des Blendimpulses angesehen werden.

Besonders in der Kraftfahrzeug- und Straßenbeleuchtung sowie in der allgemeinen Lichttechnik, so Völker [61], wird diese oft als Maßzahl zu Blendungsbewertung herangezogen.

4.2 KATEGORISIERUNG DER BLENDSITUATIONEN

Zur Beschreibung des Adaptationsvorgangs, wie er in Abbildung 4.1 dargestellt ist, wurden in den 1940er Jahren grundlegende Untersuchungen durchgeführt. Hier sind u.a. Baker [26, 63], Crawford [28, 62] und Hartmann [30, 72] zu nennen. Aus diesen Untersuchungen lässt sich ableiten, dass Blendsituationen von folgenden Parametern abhängig sind:

- Blendimpulsdauer t_B
- Position und Bewegung der Blendquelle im Gesichtsfeld des Beobachters
- Verhältnis von Basis-Adaptationsleuchtdichte bzw. der Basis-Beleuchtungsstärke und Blend-Adaptationsleuchtdichte bzw. der Blendbeleuchtungsstärke am Auge

Je nachdem, wie die Parameter innerhalb der Blendsituationen variieren, sind bereits verschiedene Modelle bekannt, anhand derer Blendsituationen bewertet werden können. In Tabelle 4.2 sind wesentliche Modelle in Abhängigkeit der Länge des Blendimpulses und der Position der Blendquelle innerhalb des Gesichtsfeldes zusammengefasst und einer Kategorie zugeordnet. Die in Tabelle 4.2 genannten Modelle erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit, sondern dienen lediglich dazu, einen Überblick über, die für die Arbeit relevanten, Bewertungsmethoden zu geben. Es wird angenommen, dass die Fläche der Blendquelle klein gegenüber der Fläche des Umfeldes ist und dass sich nur eine Blendquelle im Gesichtsfeld befindet.

Tabelle 4.2: Kategorisierung der Blendsituationen

Blendimpuls	Position der Blendquelle innerhalb des Gesichtsfeldes	Modell zu Bewertung	Kategorie
Persistent	Statisch	CIE ⁶ UGR ⁷ -verfahren, TI ⁸ -Wert	Persistent statisch
Persistent	Dynamisch	-	Persistent dynamisch
Transient	Statisch	Schwellenkontrastmethode, Readaptationsmethode, Greule [25]	Transient statisch
Transient	Dynamisch	IHS ⁹ [73]	Transient dynamisch

⁶ Commission Internationale de l'Éclairage – Internationale Beleuchtungskommission

⁷ Unified Glare Rating: Vereinheitlichte Blendungsbewertung für Beleuchtungsanlagen im Innenraum

⁸ Threshold Increment: Blendungsbewertung in der Straßenbeleuchtung

⁹ Insurance Institute for Highway Safety: Headlight Test and Rating Protocol (Version III)

4.2.1 CHARAKTERISTIKA PERSISTENTER BLENDSSITUATIONEN

Unter einer persistenten Blendsituation wird eine Situation verstanden, bei welcher sich das Beleuchtungsniveau am Auge im Extremfall einmalig dauerhaft ändert. Es findet ein einmaliger Beleuchtungsstärkesprung statt; die Blendimpulsdauer t_B ist unendlich lang.

Allgemein sind hier Situationen zuzuordnen, die der zeitlichen Charakteristik aus Abbildung 4.1 folgen und die Helladaptation beschreiben. Mit eingeschlossen sind auch solche Situationen, bei welchen die Änderung als dauerhafter Beleuchtungsstärkeimpuls erfolgt und dem Auge genügend Zeit zur Verfügung steht, sich an die neue Situation anzupassen. Da die Blendimpulsdauer t_B größer als die Adaptationszeit ist, ist es theoretisch möglich die maximale visuelle Leistungsfähigkeit während einer Blendsituation herzustellen. Eine Reduzierung der visuellen Leistungsfähigkeit aufgrund der vorliegenden Beleuchtungssituation ist dennoch nicht auszuschließen.

Übertragen auf alltäglich bekannte Situationen können hier Tunnelausfahrten, Licht einschalten oder das Verlassen von Gebäuden an sonnigen Tagen genannt werden.

4.2.2 CHARAKTERISTIKA TRANSIENTER BLENDSSITUATIONEN

Als transiente Blendsituationen werden Situationen bezeichnet, in denen das hohe Beleuchtungsstärkeniveau am Auge nur für kurze

Zeit vorliegt. Hierbei handelt es sich um Situationen, in denen die Blendimpulsdauer so kurz ist, dass der Adaptationsprozess während der Blendung nicht vollständig abgeschlossen werden kann. Die Blendimpulsdauer t_B ist in diesem Fall kleiner als die notwendige Adaptationszeit t_R , sodass die potentiell maximal mögliche visuelle Leistungsfähigkeit während der Blendung nicht erreicht werden kann. Nach dem Blendimpuls und der damit verbundenen Absenkung des Beleuchtungsstärkeniveaus am Auge beginnt ein neuer Adaptationsprozess. Erst wenn dieser Adaptationsprozess vollständig abgeschlossen ist, steht dem Auge wieder die volle visuelle Leistungsfähigkeit zur Verfügung.

Welchen Einfluss eine transiente Blendsituation auf den zeitlichen Verlauf der visuellen Leistungsfähigkeit hat, wird in Abbildung 4.3 gezeigt. Zur besseren Verständlichkeit wurde die Darstellung bewusst auf die wesentlichen systemtheoretischen Prinzipien der Anpassungsvorgänge reduziert, sodass der Einfluss verschiedener Parameter deutlicher herausgearbeitet werden kann.

Situationen, die hier zugeordnet werden können, sind Begegnungssituationen im Straßenverkehr, wie sie bereits in Kapitel 3 beschrieben wurden. Weitere Beispiele sind Reflexionen an gläsernen Fassaden oder auch das Durchfahren von Alleen, in denen aufgrund eines ungünstigen Sonnenstandes eine Blendung hervorgerufen wird. Um das Sicherheitsrisiko solcher Situationen einschätzen zu können, ist die Frage zu beantworten, inwiefern von einer Beeinträchtigung für den Beobachter bzw. Fahrer auszugehen ist. Wie dies messbar gemacht werden kann, wird im Folgenden beschrieben.

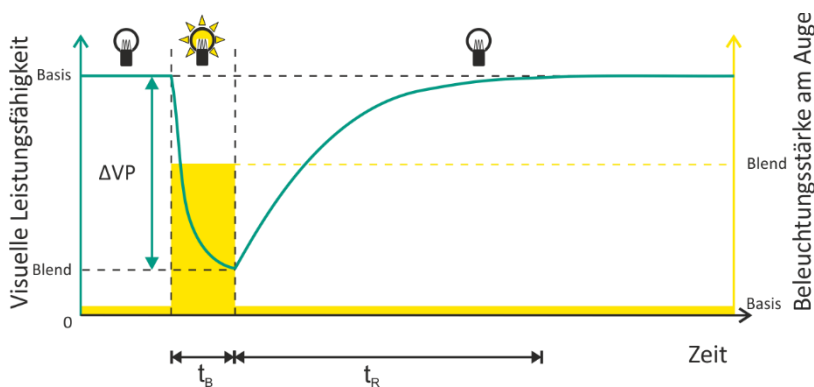


Abbildung 4.3: Prinzipieller zeitlicher Verlauf der visuellen Leistungsfähigkeit für eine transiente Blendsituation; t_B - Blendimpulsdauer, t_R - Readaptationszeit, ΔVP - relative visuelle Leistungsfähigkeit

4.3 MESSMETHODEN FÜR PERSISTENTE BLENDSITUATIONEN

4.3.1 MESSMETHODEN FÜR PERSISTENT STATISCHE BLENDSITUATIONEN

Sofern die Position der Blendquelle im Gesichtsfeld des Beobachters während der Blendsituation unverändert bleibt, bei der Bewertung jedoch berücksichtigt werden soll, kann auf bestehende Methoden zurückgegriffen werden. In Bezug auf die Blendbewertung in Innenräumen ist das CIE UGR-Verfahren und in Bezug auf den Straßenverkehr das TI-Wert-Verfahren zu nennen.

Wesentlicher Bestandteil beider Verfahren ist der sogenannte Positionsindex p , der mithilfe von Probandenstudien von Luckiesh und Guth [74] ermittelt wurde. Über den Positionsindex ist es möglich, das Blendempfinden in Abhängigkeit der Position zu gewichten. Trotz seiner Relevanz für Blendbewertungsmodelle handelt es sich beim Positionsindex um einen empirisch ermittelten Parameter, der auf rein subjektiven Einschätzungen der Probanden beruht. Inwiefern ein Einfluss auf die visuelle Leistungsfähigkeit besteht, bleibt dabei unberücksichtigt.

TI-WERT-BESTIMMUNG

Zur Bewertung der physiologischen Blendung wurde von Eichhoff (zitiert in [61, 75]) die folgende Formel entwickelt:

$$TI = \left(\frac{\Delta L_{BL}}{\Delta L_{OBL}} - 1 \right) * 100\% \quad (4.5)$$

Der TI-Wert beschreibt die prozentuale Schwellenwerterhöhung basierend auf der Schwellenleuchtdichtedifferenz mit Blendung ΔL_{BL} und der Schwellenleuchtdichtedifferenz ohne Blendung ΔL_{OBL} . Ausgehend davon wurde zur Bewertung der physiologischen Blendung im Straßenverkehr die folgende Formel [76, 77] abgeleitet:

$$TI = 65 \cdot \frac{L_{S,\ddot{a}q}}{L_m^{0,8}} \% \quad (4.6)$$

$L_{S,\ddot{a}q}$ entspricht der äquivalenten Schleierleuchtdichte in $\frac{cd}{m^2}$, die aufgrund des Objektes auf der Netzhaut des Betrachters entsteht und L_m

der mittleren Fahrbahnleuchtdichte in $\frac{cd}{m^2}$. Bezugnehmend auf die CIE-Schrift [76] sei darauf hingewiesen, dass erst ab einem TI-Wert größer als 2 % von einer Reduzierung der visuellen Leistungsfähigkeit auszugehen ist.

Für Situationen im Straßenverkehr wird empfohlen, dass das Verhältnis aus äquivalenter Schleierleuchtdichte und mittlerer Fahrbahnleuchtdichte maximal 0,15 betragen sollte [78], da in diesem Fall bereits mit einer Schwellenkontrasterhöhung von etwa 10 % zu rechnen ist. Mace [78] betont, dass für diese Annahme keine wissenschaftlichen Untersuchungen vorliegen. Dennoch ist diese in Fachkreisen akzeptiert.

Insgesamt lässt sich schlussfolgern, dass mithilfe des TI-Werts der Einfluss auf die visuelle Leistungsfähigkeit über die Schwellenwert-erhöhung im Straßenverkehr beziffert werden kann. Allerdings fehlt an dieser Stelle der Transfer in den realen Verkehrsraum, da keine Untersuchungen zur Kritikalität der festgelegten Grenzwerte vorhanden sind.

4.3.2 MESSMETHODEN FÜR PERSISTENT DYNAMISCHE BLEND-SITUATIONEN

Für dauerhaft dynamische Blendsituationen sind keine Modelle oder Methoden zur Blendungsbewertung bekannt, die im Rahmen dieser Arbeit von Bedeutung sind.

4.4 MESSMETHODEN FÜR TRANSIENTE BLEND-SITUATIONEN

4.4.1 MESSMETHODEN FÜR TRANSIENTE STATISCHE BLEND-SITUATIONEN

Situationen, in welchen sich die Position der Blendquelle nicht ändert und der Blendimpuls nur von kurzer Dauer ist, können mit bereits etablierten Methoden bewertet werden. Im Folgenden soll gezeigt werden, inwiefern die beiden Maßzahlen visuelle Leistungsfähigkeit ΔVP und Readaptationszeit t_R erhoben und zur Bewertung genutzt werden können.

Als Beispiel für bereits durchgeführte Studien in Anlehnung an potentielle Blendsituationen aufgrund von Begegnungssituationen im Straßenverkehr sind Freyer [79] und Raphael [80] zu nennen.

SCHWELLENKONTRASTMETHODE

Mit der Schwellenkontrastmethode kann auf Basis des individuellen Schwellenkontrastes für die Situation mit und ohne Blendung die Kontraständerung ΔC gemessen werden, die Rückschluss auf den Einfluss der Blendquelle auf die visuelle Leistungsfähigkeit gibt. Zur Bestimmung des individuellen Schwellenkontrastes kann eine Me-

thode aus Kapitel 4.1.1 genutzt werden. Die Schwellenkontrastermittlung erfolgt unter Verwendung des Landolt-Rings oder anderer Sehzeichen wie zum Beispiel quadratische graue Tafeln, die auf der Straße positioniert werden. Das Verhältnis der beiden ermittelten Schwellenkontraste ohne Blendung und mit Blendung ergibt den gesuchten Wert für die Kontraständerung ΔC auf Basis derer auf die visuelle Leistungsfähigkeit ΔVP geschlossen werden kann.

Der zeitliche Verlauf eines solchen Durchgangs zur Schwellenkontrastermittlung unter Blendeinfluss ist in Abbildung 4.4 gezeigt.

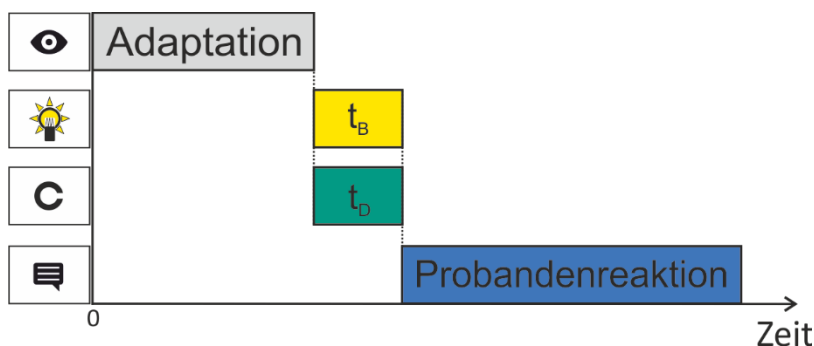


Abbildung 4.4: Zeitlicher Verlauf eines Durchgangs der Schwellenkontrastmethode mit t_B : Blendimpulsdauer und t_D : Darbietungsdauer Landolt-Ring; Probandenreaktion: Benennung der Öffnungsrichtung

Anhand des zeitlichen Verlaufs in Abbildung 4.4 lässt sich ableiten, wieso die Schwellenkontrastmethode nicht dazu genutzt werden kann, die Readaptationszeit t_R zu bestimmen. Der Prozess der Readaptation beginnt erst, wenn die Blendquelle ausgeschaltet ist.

Der Landolt-Ring wird jedoch während der Blendung präsentiert. Somit ist nur der direkte Einfluss der Blendquelle messbar. Der Zeitbereich der Readaptation wird in dieser Methode nicht berücksichtigt.

Somit lässt sich schlussfolgern, dass mithilfe der Schwellenkontrastmethode der Einfluss der Blendquelle nur über die relative Kontraständerung ΔVP nicht aber die Readaptationszeit t_R gemessen werden kann. Die Bezeichnung Item wird im Folgenden als Überbegriff aller dargebotenen Sehzeichen, Buchstaben, Ziffern genutzt.

READAPTATIONSMETHODE

Mithilfe der Readaptationsmethode kann in einer Probandenstudie die Zeit t_R bestimmt werden, die das visuelle System benötigt um die ursprüngliche visuelle Leistungsfähigkeit nach einem Blendimpuls wieder zu erreichen.

Im ersten Schritt ist der personenbezogene Schwellenkontrast ohne Blendeinfluss, üblicherweise unter Verwendung des Landolt-Rings und einer Methode aus Kapitel 4.1.1, zu bestimmen. Im nächsten Schritt wird der Landolt-Ring im jeweiligen Schwellenkontrast unmittelbar nach dem Lichtimpuls bzw. der Absenkung des Beleuchtungsstärkeniveaus dargeboten. Aufgrund der zu erwartenden Reduzierung der visuellen Leistungsfähigkeit ist es dem Probanden direkt nach dem Blendimpuls nicht möglich, die Öffnung des Landolt-Ringes zu erkennen. Daher hat der Proband die Aufgabe, unmit-

telbar dann einen Taster zu betätigen, sobald er die Öffnung wiedererkennen und benennen kann. Dieser Vorgang wird für die zu untersuchende Blendsituation mehrfach wiederholt und aus dem Mittelwert die Readaptationszeit ermittelt [81]. Dabei ist zu beachten, dass die Darbietungszeit des Landolt-Ringes länger ist als die Readaptationszeit. Der zeitliche Ablauf ist in Abbildung 4.5 dargestellt.

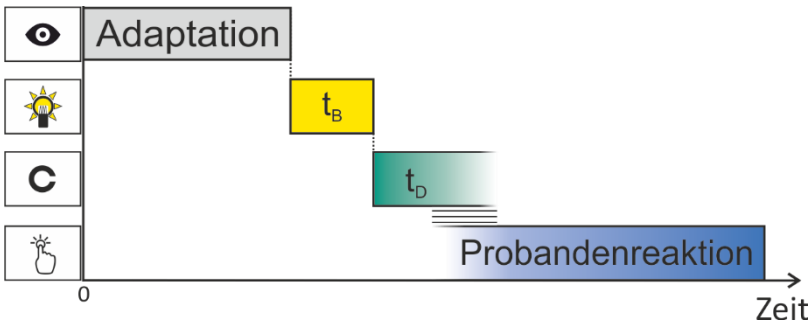


Abbildung 4.5: Zeitlicher Verlauf eines Durchgangs der Readaptationsmethode mit t_B : Blendimpulsdauer und t_D : Darbietungsdauer Landolt-Ring; Probandenreaktion: Betätigung des Tasters unmittelbar nach Identifizierung der Öffnungsrichtung

Die Methode kann nur die Readaptationszeit t_R ermitteln. Eine Aussage über die visuelle Leistungsfähigkeit kann nicht gemacht werden, da diese nicht erfasst wird.

Allerdings ist die Verwendung der Readaptationsmethode für transiente Blendsituationen kritisch zu diskutieren. Bei genauer Betrachtung handelt es sich bei der gemessenen Größe $t_{R,ermittelt}$ um die Summe aus Readaptationszeit t_R und der Reaktionszeit $t_{Reaktion}$, die der Proband benötigt, um den Taster zu betätigen. Formell gilt:

$$t_{R,ermittelt} = t_R + t_{Reaktion} \quad (4.7)$$

In Anbetracht dessen kann die Reaktionszeit als Störgröße aufgrund der inter- und intrapersonellen Varianz gesehen werden. Ist die Reaktionszeit kurz im Vergleich zur Readaptationszeit, ist deren Einfluss auf die gemessene Zeit $t_{R,ermittelt}$ vernachlässigbar und die Validität der Messergebnisse nicht gefährdet. Für Readaptationszeiten in der Größenordnung der Reaktionszeit oder kleiner werden die Messwerte für $t_{R,ermittelt}$ stark verfälscht, sodass die Reliabilität der Ergebnisse in Frage gestellt werden muss.

Allgemein betrachtet, ist die Reaktionszeit die Zeit, die zwischen dem Zeitpunkt der Reizwahrnehmung und der Reaktion des Probanden vergeht. Bei genauerer Betrachtung entspricht die Reaktionszeit der Summation aus verschiedenen Teilprozessen die, übertragen auf das *EVA-Prinzip* aus Kapitel 2.1, in Tabelle 4.3 zusammengefasst sind.

Messmethoden für transiente Blendsituationen

Tabelle 4.3: Übersicht über die Teilprozesse der Reaktionszeit sowie deren Beschreibung und Dauer

	Bezeichnung Teilprozess	Allgemeine Beschreibung der Prozesszeit	Messtechnische Beschreibung der Prozesszeit	Dauer
<u>E</u> ingabe	Sensorische Erfassung	Sensorische Reizleitungszeit	Integrationszeit	20 ms bis 40 ms [82], 1 ms bis 40 ms [83]
<u>V</u> erarbeitung	Kognitiver Prozess	Kognitive Verarbeitungszeit	Latenzzeit	71 ms bis 400 ms [83]
<u>A</u> usgabe	Motorische Reaktion	Motorische Reizleitungszeit	Latenzzeit	40 ms bis 90 ms [83]
			Σ	112 ms bis 530 ms [83], Min. 350 ms [84], 80 ms bis 350 ms [85],

Der Teilprozess der Eingabe respektive der sensorischen Erfassung nimmt nach Yan [82] etwa eine Zeitspanne von 20 ms bis 40 ms in Anspruch. Diese Zeitspanne ist proportional zur Komplexität des visuell dargebotenen Reizes. Aus messtechnischer Sicht entspricht diese Zeit der notwendigen Messdauer, auch Integrationszeit genannt.

Innerhalb dieser Zeit wird der dargebotene Reiz aufgenommen und insofern vorverarbeitet, dass im nächsten Schritt eine eindeutige Zuordnung und Objektklassifizierung erfolgen kann. Diese Objektklassifizierung ist Anknüpfungspunkt für die Informationsverarbeitung auf Basis kognitiver Prozesse.

Übertragen auf die Readaptationsmethode bedeutet dies, dass der Landolt-Ring während der Darbietung visuell erfasst respektive erkannt wird. Zwar ist bekannt, dass ein Landolt-Ring dargeboten wird und dessen Öffnungsrichtung zu bestimmen ist, dennoch muss die Diskriminierung vorgenommen werden. Auf den Landolt-Ring übertragen bedeutet dies, dass der Entscheidungsprozess zur Benennung der Öffnungsrichtung abgeschlossen werden kann.

Wie bereits in Kapitel 2.2.1 angemerkt wurde, können alle acht Öffnungsrichtungen in etwa gleich gut erkannt werden [20]. Dieser Vorgang nimmt jedoch eine gewisse Zeit in Anspruch. Während dieser Zeit laufen unbewusste Entscheidungsprozesse ab, denen eine hohe Wichtigkeit in Bezug auf die Reaktionszeit beigemessen werden muss. Diese unbewusst ablaufenden Prozesse können auf die Theorie

von Orne [86] zurückgeführt werden, die das Verhalten von Probanden als hypothesengeleitet und basierend auf unterschiedlichen Motivationen beschreibt. So kann angenommen werden, dass einige Versuchspersonen aufgrund ihrer Unsicherheit bei der Identifizierungsaufgabe den Taster unter Umständen später betätigen, da sie bestrebt sind, die ihnen gestellte Aufgabe besonders gut zu erledigen. Demgegenüber stehen Probanden, die das eben beschriebene Interesse nicht teilen und die Aufgabe tendenziell mit einer deutlich höheren Risikobereitschaft und Toleranz gegenüber Falschbenennungen absolvieren. Weiterhin ist nicht auszuschließen, dass der Proband seine Strategie innerhalb der Studie ändert. Insgesamt wird dadurch die Varianz der Messergebnisse erhöht, was sich negativ auf die Reliabilität der Studie auswirkt. Innerhalb der Studie ist es nicht möglich einen konkreten Zahlenwert für die Dauer der kognitiven Prozesse zu bestimmen. Gleiches gilt für die motorische Reizleitungszeit, die der Proband zur Tasterbetätigung benötigt.

Neben interpersoneller Unterschiede innerhalb des Probandenkollektives kann die Reaktionszeit auch intraindividuell stark variieren. Aufgrund dessen ist Reaktionszeit, wie auch Tabelle 4.3 zeigt, schwierig eindeutig zu beziffern. Als grobe Abschätzung kann aus der Literatur [83, 84, 84, 87] eine Reaktionszeit von 350 *ms* angenommen werden, die maßgeblich von der Komplexität der zu untersuchenden Situation abhängt [83, 88].

Bei der Messung der Readaptationszeit $t_{R,ermittelt}$ muss folglich mit einem Offset von etwa 350 *ms* gerechnet werden. Die Verwendung

der Readaptationsmethode als Messmethode zur Bewertung transient statischer Blendsituationen ist nur bedingt geeignet, da die Messqualität der Readaptationszeit aufgrund der Varianz der Reaktionszeit zur Tasterbetätigung limitiert wird.

GREULE-METHODE

Eine weitere Methode zur Blendungsbewertung für transient statische Blendsituationen kann aus den Untersuchungen von Greule [25] abgeleitet werden. Im Rahmen seiner Dissertation analysierte er den zeitlichen Verlauf der visuellen Leistungsfähigkeit auf Basis der Kontrastschwellenerhöhung für abrupte Beleuchtungsniveauechsel.

Zum besseren Verständnis sei zunächst auf einen exemplarischen zeitlichen Verlauf der Leuchtdichte- und Testzeichendarbietung in Abbildung 4.6 verwiesen. Ausgehend von einem Adaptationsniveau wurden die Probanden für die Zeit ΔT einem erhöhten Beleuchtungsniveau ausgesetzt und nach der Zeit τ die Testzeichen für Δt mit definiertem Beleuchtungsniveau präsentiert. Dieser Vorgang wurde mehrfach wiederholt.

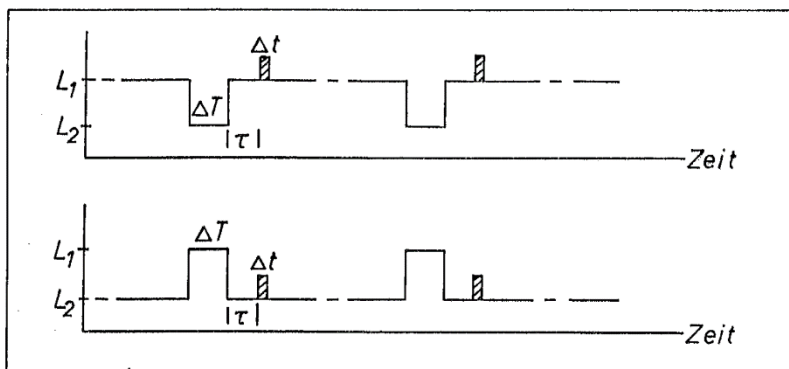


Abbildung 4.6: Zeitlicher Verlauf der Leuchtdichte- und Testzeichendarbietung nach Greule [25] mit ΔT -Pulsdauer der geringeren bzw. erhöhten Leuchtdichte, Δt -Darbietungsdauer des Testzeichens und τ -Zeit zwischen Niveauwechsel und Testzeichendarbietung

Im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen Methoden sind drei wesentliche Unterschiede anzuführen:

- Präsentierte Sehzeichen bzw. Testzeichen
- Darbietungsdauer der Testzeichen Δt
- Darbietungszeitpunkt der Testzeichen τ

Neben dem Ladoltring wurden von Greule [25] auch Buchstaben als Sehzeichen dargeboten. Hierbei beruft er sich auf Untersuchungen von Boynton (1968). Bei der Buchstabenauswahl orientierte er sich an den Studien von Krochmann und Lieske (1976), die die Erkennungswahrscheinlichkeit der Buchstaben nach Boynton untersuchten. Vor dem Hintergrund der ähnlichsten Erkennungswahrscheinlichkeit er-

folgte die Auswahl von vier Buchstaben (N, V, K und S). Anhand seiner Probandenstudien kam er zu dem Schluss, dass sowohl der Landolt-Ring als auch die Buchstaben keinen nennenswerten Unterschied hinsichtlich der ermittelten Kontrastschwellenerhöhung zeigen. Beide Sehzeichen sind bei identischen Messbedingungen als gleichwertig anzusehen.

Greule präsentierte die Testzeichen nach Änderung des Beleuchtungsniveaus für $\Delta t = 10 \text{ ms}$, 50 ms und 200 ms . Seine Ergebnisse aus den Studien zur Darbietungszeit zeigen einen Einfluss der Darbietungszeit auf die Kontrastschwellenerhöhung. Während die ermittelten Kontrastschwellenwerte für die Darbietungsdauer $\Delta t = 10 \text{ ms}$ und $\Delta t = 50 \text{ ms}$ relativ ähnlich sind, zeigt sich für $\Delta t = 200 \text{ ms}$ eine deutlich geringere Kontrastschwellenerhöhung.

Zudem variierte Greule den Darbietungszeitpunkt τ nach der Beleuchtungsniveauänderung. Inwiefern sich die Kontrastschwelle bei späterer Darbietung und abhängig von der Blendimpulsdauer ΔT verändert, ist in Abbildung 4.7 dargestellt. In Bezug auf die Darbietungsdauer und den Darbietungszeitpunkt lassen sich zwischen den präsentierten Testzeichen keine Unterschiede feststellen.

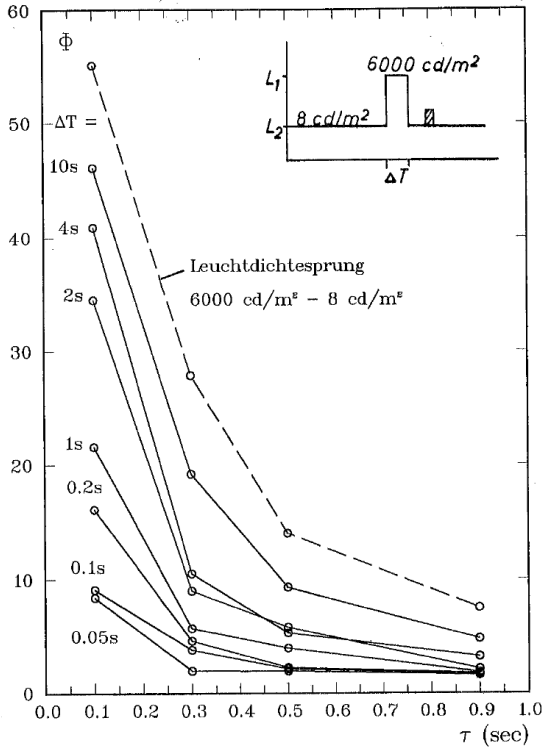


Abbildung 4.7: Verlauf der Φ -Werte (Schwellenerhöhungsfaktor/Kontrasterhöhung) nach einem Helladaptationspuls ($8 \frac{\text{cd}}{\text{m}^2} - 6000 \frac{\text{cd}}{\text{m}^2} - 8 \frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$) mit variabler Pulsdauer ΔT (Buchstaben als Testzeichen) nach Greule [25]

Obwohl diese Methode es ermöglicht, sowohl den Einfluss der visuellen Leistungsfähigkeit mithilfe der Kontrastschwellerhöhung als auch den zeitlichen Verlauf der visuellen Leistungsfähigkeit nach Darbietung des Blendimpulses zu bestimmen, sind dennoch methodische Defizite vorhanden. Diese betreffen die Übertragbarkeit auf die zu untersuchenden Situationen im Straßenverkehr. Generell

könnte die Methode in diesen Situationen Anwendung finden. Wird jedoch ein Testzeichen dargeboten, wird nur im Falle von „Richtig benannt und erkannt“ sowie „Richtig benannt und nicht erkannt“ ein Messwert erzeugt. Praktisch gesehen bedeutet das: Wenn der Proband in dem Durchlauf das Testzeichen richtig erkennt, kann die Kontrastschwelle ermittelt werden. Es liegt ein Messwert vor. Wird das Testzeichen nicht erkannt, liegt kein Messwert vor. Eine Kontrastschwelle kann nicht bestimmt werden. Ob das Testzeichen nicht erkannt werden konnte, da die visuelle Leistungsfähigkeit nicht ausreichend oder ob es andere Hintergründe hatte – ein Rückschluss auf die Ursache ist in keinem Fall möglich. Mehrfache Messwiederholungen könnten Abhilfe schaffen, stehen aber der Praktikabilität für die zu untersuchenden Situationen im Straßenverkehr entgegen.

4.4.2 MESSMETHODEN FÜR TRANSIENT DYNAMISCHE BLEND-SITUATIONEN

Transient dynamische Blendsituationen zeichnen sich dadurch aus, dass der Blendimpuls von kurzer Dauer ist und sich währenddessen die Position der Blendquelle im Gesichtsfeld des Beobachters ändert. Unter Umständen können geringfügige Positionsänderungen im Gesichtsfeld aufgrund des zu vernachlässigbaren Einflusses auch der Situation *Transient dynamisch* zugeordnet werden. Inwiefern und in welchem Rahmen diese Annahme korrekt ist, ist nicht Teil dieser Ar-

beit. Daher wird für transient dynamische Blendsituationen innerhalb dieser Arbeit von einer generellen Positionsänderung der Blendquelle innerhalb des Gesichtsfeldes ausgegangen.

Übertragen auf die zu untersuchenden Situationen im Straßenverkehr ist es mithilfe der im Folgenden vorgestellten Methode möglich, den Einfluss der Fahrdynamik abzubilden. An dieser Stelle sei vorweggenommen, dass die Blendungsbewertung zwar im Feld, allerdings auf rein subjektiver Basis erfolgt. Daher können weder Auswirkungen auf die visuelle Leistungsfähigkeit abgeleitet noch die Readaptationszeit bestimmt werden.

Das amerikanische *Insurance Institute of Highway Safety* hat bereits im August 2015 die erste Version des Headlight Test and Rating Protocols veröffentlicht. Dieses wurde in den letzten Jahren weiterentwickelt sodass Stand 2019 seit Juli 2018 die dritte Version vorliegt [73]. Innerhalb dieses Dokumentes wird ein umfangreicher Messablauf beschrieben, auf Basis dessen das Blendpotential eines Scheinwerfers bewertet werden kann.

Um die Messungen durchführen zu können, sind genaue Anforderungen an das Fahrzeug und die Versuchsbedingungen gestellt, die eingehalten werden müssen [73]. Mithilfe der Anforderungen soll gewährleistet werden, dass die Durchführung trotz der hohen Variabilität an Einflüssen möglichst standardisiert abläuft und die Ergebnisse vergleichbar sind. Im Folgenden werden sowohl die Messmethodik als auch die daraus resultierenden Schlussfolgerungen in Bezug auf die Blendbewertung in den Vordergrund gestellt.

Gemäß der Messvorschrift sind unterschiedliche Straßengeometrien mit dem Versuchsfahrzeug in einer festgelegten Geschwindigkeit je dreimal mit Abblend- und Fernlicht zu durchfahren. Dabei sind an festgelegten Positionen und in unterschiedlichen Höhen Beleuchtungsstärkemessungen durchzuführen und zu dokumentieren. Um auch den Einfluss der Fahrdynamik abzubilden, wird in dem Dokument ein Vorgehen beschrieben, mithilfe dessen eine Nickwinkelkorrektur der Messwerte durchgeführt werden kann. Für jede Testsituation ist entsprechend der Vorgaben die $5lx$ -Entfernung zu bestimmen. Ausgehend von dieser Entfernung erfolgt die Sichtbarkeits- und Blendbewertung für unterschiedliche Situationen. Werden die hier festgelegten kritischen Werte überschritten, werden den Scheinwerfern für jede zu bewertende Situation Mängelpunkte zugeordnet. Alle ermittelten Mängelpunkte werden addiert, sodass auf Basis dessen die Gesamtbewertung der Scheinwerfer erfolgen kann.

Die zuvor erwähnten kritischen Werte wurden u.a. aus vorangegangenen Probandenstudien abgeleitet, bei welchen die Probanden verschiedene Scheinwerfersysteme in unterschiedlichen Situationen mithilfe der De-Boer-Skala bewertet haben [89]. Daher beruht auch diese Methode auf der rein subjektiven Bewertung verschiedener Scheinwerfer.

Weiterhin sei einschränkend erwähnt, dass sich die Grenzwerte an den für Scheinwerfer zulässigen Werten gemäß der FMVSS¹⁰ 108 orientieren. Eine direkte Übertragung auf europäische Regelungen ist nicht möglich.

4.5 ZWISCHENFAZIT

Wie sich aus den bisherigen Ausführungen schlussfolgern lässt, lassen sich Blendsituationen im Straßenverkehr der Kategorie transient dynamisch zuordnen. Um den Einfluss der Blendung in diesen Situationen bestimmen zu können, ist der Einfluss auf die visuelle Leistungsfähigkeit des Beobachters zu ermitteln. Mithilfe der im vorangegangenen Kapitel vorgestellten Methoden ist es möglich, Blendsituationen im Straßenverkehr zu bewerten. Eine Aussage über die tatsächliche zeitliche Einschränkung der visuellen Leistungsfähigkeit kann aus diesen Angaben jedoch nicht abgeleitet werden.

¹⁰ Federal Motor Vehicle Safety Standard

Kapitel 5

METHODENOPTIMIERUNG

Etablierte Methoden zur Erfassung des Einflusses einer Blendquelle auf die visuelle Leistungsfähigkeit für transient statische Methoden wurden bereits vorgestellt. Eine direkte Übertragung dieser Methoden auf transient dynamische Situationen ist, wie im vorhergehenden Kapitel beschrieben, nicht möglich. Inwiefern Teilaspekte dieser Methoden genutzt werden können, um eine objektive Bewertungsmethode für transient dynamische Blendsituationen zu entwickeln, wird in diesem Kapitel beschrieben.

5.1 OPTIMIERUNG DER REAKTIONSZEIT

Wie bereits aufgezeigt, haben sowohl die Schwellenkontrastmethode, die Readaptationsmethode und die Methode nach Greule die Verwendung des personenbezogenen Schwellenkontrastes gemein. Als vielversprechendste Methode lässt sich die Readaptationsmethode identifizieren. Zwar ist sie aufgrund der notwendigen Reaktionszeit nicht für Blendimpulsdauern in der Größenordnung der Reaktionszeit geeignet, ermöglicht jedoch generell eine valide Blendbewertung.

Da die Reaktionszeit des Probanden häufig eine Varianz aufweist, die größer als die Blendimpulsdauer ist, soll im Folgenden untersucht werden, wie diese Varianz reduziert werden kann, um belastbare Ergebnisse auch bei kurzen Blendimpulsdauern zu erhalten. Hierbei liegt der Fokus auf der kognitiven Verarbeitungszeit sowie der motorischen Reaktionszeit, da diese den größten Anteil der Gesamtreaktionszeit darstellen. Die Geschwindigkeit der sensorischen Reizleitung ist biologisch gegeben und kann daher nicht weiter optimiert werden.

5.1.1 KOGNITIVE VERARBEITUNGSZEIT

Die Länge der kognitiven Verarbeitungszeit resultiert, wie bereits in Kapitel 4.4.1 angemerkt, aus dem Diskriminations- und Entscheidungsprozess. So muss einerseits die Öffnung des Landolt-Rings detektiert und andererseits die Entscheidung zur motorischen Reaktionsauslösung getroffen werden. Darüber hinaus darf das damit verbundene hypothesengeleitete Vorgehen des Probanden bei der Entscheidungsfindung nicht vernachlässigt werden.

Dass einige Probanden besonders bei der Zuordnung schräger Öffnungsrichtungen ein rechts-/links-Problem haben, haben Experten bereits festgestellt [18]. Selbstredend liegt an diesem Punkt das Argument nahe, dass der Landolt-Ring das einzige Normsehzeichen nach DIN EN ISO 8596 ist. Dies bezieht sich streng genommen jedoch nur

auf die gutachterliche Visus-Bestimmung des Probanden. Da der Visus in Bezug auf die visuelle Leistungsfähigkeit im Gegensatz zum Kontrast jedoch nur zweitrangig zu bewerten ist, stellt sich die Frage, ob der Landolt-Ring durch ein äquivalentes Sehzeichen ersetzt werden kann. Dabei ist es unerlässlich das Kriterium der gleichermaßen gut erkennbaren Diskriminisationsmerkmale bei der Sehzeichenauswahl aufrechtzuerhalten.

Bei der Auswahl geeigneter Sehzeichen empfiehlt sich ein Blick auf die historische Entwicklung der Norm zur Sehschärfebestimmung [20]. In dieser wurde beispielsweise darauf hingewiesen, dass in Norm DIN EN ISO 8597 der Anschluss von Buchstaben, Ziffern und anderen Sehzeichen zur Visusbestimmung erfolgen kann. Auch Greule [25] hat in seinen Untersuchungen eine Auswahl von Buchstaben (N, V, K und S) verwendet und festgestellt, dass diese im Vergleich zum Landolt-Ring bei vergleichbaren Versuchsbedingungen relativ gesehen nur geringfügig unterschiedliche Ergebnisse liefern.

Daher sind auch angeschlossene Sehzeichen anstatt Landolt-Ringen bei vergleichbarer Erkennbarkeit als Option anzusehen.

5.1.2 MOTORISCHE REIZLEITUNGSZEIT

Sind alle kognitiven Prozesse abgeschlossen, muss der resultierende Reiz zur Muskulatur gelangen, damit die Reaktion gemäß der Instruktion ausgeführt werden kann. Die Aktion *Tastendruck* lässt sich

der Kategorie *einfache Reaktion* zuordnen [83], sodass zur Reduzierung der Reaktionszeit nur die Eliminierung der motorischen Reizleitungszeit diskutiert werden kann. Die Probandenaufgabe der Messmethode ist in diesem Fall so anzupassen, dass die Aufgabe intuitiv und bestenfalls ausschließlich visuell ist.

Wie eine Probandenaufgabe ohne motorische Aktion aussehen könnte, hat Greule [25] in seinen Untersuchungen gezeigt. Die Probanden hatten die Aufgabe die Sehzeichen bzw. deren Merkmal zu detektieren und zu benennen, wobei die Sehzeichen nur für eine kurze Zeit präsentiert wurden. Da die Sehzeichen sowohl in unterschiedlichen Kontrasten als auch zu unterschiedlichen Zeiten nach der Beleuchtungsniveauänderung dargeboten wurden, war es möglich den Readaptationsprozess, wie in Abbildung 4.7 gezeigt, zeitdiskret abzutasten. Allerdings besteht dennoch das Problem in Bezug auf die Testqualität. Entweder war es für den Probanden aufgrund des ausreichenden Kontrastes möglich das Merkmal korrekt zu identifizieren, sodass ein Messwert vorliegt, oder nicht. Die Messauflösung dieser Vorgehensweise ist auf 0 –es liegt kein Messwert vor und 1 – es liegt ein Messwert vor limitiert. Aufgrund des zugrundeliegenden binären Klassifikators ist zur Erhaltung der Ergebnisqualität eine hohe Anzahl an Messungen und Messwiederholungen notwendig, was die Praktikabilität zur Anwendung im Straßenverkehr deutlich reduziert.

Die Erhöhung der Messauflösung innerhalb der Messung kann an dieser Stelle Abhilfe schaffen.

5.2 OPTIMIERUNG DER MESSAUFLÖSUNG

Zur Steigerung der Messauflösung bedarf es der Betrachtung der Informations-, Wissens- und Erfahrungsspeicherung im Gehirn aus dem Fachbereich der kognitiven Psychologie. Demnach sind drei Kategorien von Gedächtnissen vorhanden [90], die sich hinsichtlich ihrer Persistenz unterscheiden lassen. Mit einer Speicherdauer von maximal zwei Sekunden und einer dennoch großen Kapazität lässt sich das Sensorische Register, auch *Ultrakurzzeitgedächtnis*, kurz UKG, genannt, charakterisieren. In Bezug auf visuelle Reize wird in Fachkreisen auch oft vom ikonischen Gedächtnis gesprochen. Inwiefern dieses genutzt werden kann, um die Messauflösung für Methoden zur Blendungsbewertung zu erhöhen, wird im Folgenden dargestellt.

Das visuelle *Ultrakurzzeitgedächtnis* konnte erstmals 1960 von George Sperling [91] in einer Reihe von Experimenten nachgewiesen werden. In seinen ersten Versuchen präsentierte er den Probanden verschiedene Matrizen unterschiedlicher Größen aus Großbuchstaben und Ziffern, wie in Abbildung 5.1 zu sehen, für jeweils 50 ms. Auf Vokale wurde verzichtet, da aufgrund der Wortbildung eine höhere Erkennbarkeit ermöglicht worden wäre. Die Aufgabe der Probanden bestand darin, so viele Items wie möglich an der richtigen Position wiederzugeben. Diese Vorgehensweise wird als Ganzberichtsmethode bezeichnet. Die Bezeichnung Item wird im Folgenden als Überbegriff aller dargebotenen Sehzeichen, Buchstaben, Ziffern genutzt.

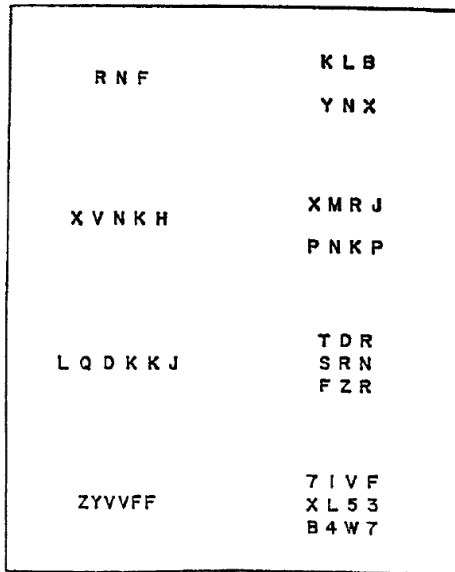


Abbildung 5.1: Itemdarbietung nach Sperling [91]

Anhand der Ergebnisse zeigte sich, dass die Kombination aus Buchstaben und Ziffern innerhalb einer Matrix von den Probanden als deutlich schwieriger als die reine Buchstabenmatrix angesehen wurde, obwohl die Anzahl der richtig erkannten Zeichen relativ ähnlich war. Im Mittel konnten die Probanden nicht mehr als 4,3 Zeichen wiedergeben. Eine weiterführende Untersuchung zur Darbietungsdauer der Matrix zeigte keine systematischen Unterschiede zwischen 15 ms, 50 ms, 150 ms, 200 ms und 500 ms.

Des Weiteren kombinierte Sperling den visuellen Reiz der Matrixdarbietung mit einem auditiven Stimulus mit einer Dauer von 500 ms

nach der Matrixdarbietung. Im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen Untersuchungen hatten die Probanden in dieser nicht die Aufgabe, so viele Items wie möglich wiederzugeben. Es ging vielmehr darum, die Zeile wiederzugeben, der zuvor der entsprechende Ton (tief- unterste Zeile, mittel- mittlere Zeile, hoch- oberste Zeile) zugeordnet wurde. Diese Vorgehensweise wird als Teilberichtsmethode bezeichnet. Erstaunlicherweise zeigte sich, dass die Probanden in der Lage waren mehr Buchstaben wahrzunehmen, als sie schlussendlich wiedergeben konnten, da die Summe aus denen im Mittel richtig benannten Buchstaben je Zeile 9,1 für eine 3x4 Matrix ergab.

Sperling kommt im Rahmen seiner Studien außerdem zu dem Ergebnis, dass der Zeitpunkt, an dem die Informationen abgerufen werden, aufgrund der Persistenz des UKGs eine entscheidende Rolle spielt. In diesem Zusammenhang soll der Begriff des Interstimulusintervalls, kurz ISI, eingeführt werden. In der Psychologie wird darunter der Zeitabstand zwischen zwei dargebotenen Reizen verstanden. In der von Sperling durchgeführte Studie ist damit der Zeitabstand zwischen Matrixdarbietung und Darbietung des auditiven Reizes zur Zeilenzuweisung gemeint. Es zeigte sich, dass Probanden ab einem ISI von 250 ms signifikant weniger Items wiedergeben konnten.

Auf Basis der Ergebnisse von Sperling lässt sich folgender wesentlicher Schluss für die Optimierung der Messauflösung im Rahmen dieser Arbeit ziehen: Im Gegensatz zu den Untersuchungen von Greule [25], der Probanden in 50 ms jeweils nur ein Sehzeichen darbot, ist die Präsentation einer Buchstabenmatrix möglich. Wie diese

im Detail ausgelegt und dargeboten werden muss und welche Auswirkungen dies auf die Ergebnisse und deren Interpretation hat, wird im anschließenden Unterkapitel erläutert.

Anstatt eines Items wird eine Itemmatrix präsentiert und der Einfluss der Blendung anhand der sowohl erkannten als auch richtig benannten Items ermittelt. Ist das visuelle System aufgrund von Blendung gestört, ist auch die Wahrnehmung eingeschränkt. Folglich können im Vergleich zu einer Situation ohne störende Blendung auch weniger Items wahrgenommen, erkannt und richtig benannt werden.

Im Vergleich zu bisherigen Methoden zur Blendungsbewertung, die nur ein Sehzeichen nutzen, ist die Messauflösung folglich höher, da mehrere Stufen über die Anzahl richtig benannter Buchstaben zur Verfügung stehen.

5.3 OPTIMIERUNG DER REIZDARBIETUNG

Das Ziel der Reizdarbietungsoptimierung ist es, die Itemmatrix so zu designen, dass valide und vergleichbare Ergebnisse garantiert werden können. Zusätzlich sind die beiden Maßzahlen zur Blendbewertung innerhalb der Methode abzubilden. Zu diesem Zweck wird zunächst der im Rahmen dieser Arbeit verwendete Begriff der visuellen Leistungsfähigkeit erweitert. Anschließend werden verschiedene Aspekte der Itemmatrixdarbietung diskutiert.

5.3.1 ERWEITERTE VISUELLE LEISTUNGSFÄHIGKEIT

Wie bereits in Kapitel 4.1.2 dargelegt wurde, sind die beiden Aspekte Kontrast und Visus zur Beschreibung der visuellen Leistungsfähigkeit heranzuziehen. Diese Beschreibung bezieht sich nur auf die Darbietung eines Items. Zur Bewertung transient dynamischer Blendsituationen wird die Itemanzahl vergrößert. Aus diesem Grund ist auch der Begriff der visuellen Leistungsfähigkeit zu erweitern.

Im weiteren Verlauf der Arbeit wird unter der visuellen Leistungsfähigkeit eine Kombination aus Visus, Kontrast und Informationsmenge, also der Anzahl richtig benannten Items, verstanden. Inwiefern diese zueinander gewichtet werden müssen, ist nach aktuellem Stand unklar und wird in dieser Arbeit weiter untersucht.

5.3.2 ITEMMATRIX

In diesem Unterkapitel werden Merkmale wie Matrixgröße, Anzahl und Anordnung der dargebotenen Items diskutiert.

GRÖÖE DER DARGEBOTENEN MATRIX

Für die foveale Betrachtung wird gemäß des von der CIE definierten Normalbeobachters von einem Sichtfeld von 2° ausgegangen. In diesem Bereich ist die Sehschärfe maximal, sodass auch Details von Objekten wahrgenommen werden können [87]. Um sicherzustellen,

dass die Matrix *auf einen Blick* wahrgenommen werden kann, darf deren Ausdehnung das foveale Sichtfeld von 2° nicht überschreiten. Der Einfluss notwendiger Blickbewegungen kann somit ausgeschlossen werden.

ANZAHL DARGEBOTENER ITEMS

Die Ergebnisse von Sperling [91] zeigen, dass bei Anwendung der Ganzberichtsmethode im Mittel 4,3 Zeichen korrekt benannt werden konnten. Bei der Teilberichtsmethode konnten im Mittel 9,1 der 12 dargebotenen Items erkannt werden. Dies erscheint auf den ersten Blick widersprüchlich und widerlegte die zur damaligen Zeit anerkannte Tatsache, dass bei Anwendung einer verbalen Berichtsmethode der maximale Informationsabruf der Wahrnehmungsspanne entspricht. Die Wahrnehmungskapazität ist folglich größer als die Kapazität der zum Abruf möglichen Informationen. Die Untersuchungen auf Basis der Teilberichtsmethode von Sperling [91] lassen zudem den Schluss zu, dass die Kapazität des sensorischen Speichers in etwa bei neun liegt [87].

Nach Miller [92] ist die Kapazität des Arbeitsgedächtnisses, wie bereits in Kapitel 5.2 erwähnt, auf sieben plus oder minus zwei begrenzt. Anhand seiner Untersuchungen kommt er zu dem Schluss, dass bei verbaler Berichterstattung maximal fünf Buchstaben wiedergegeben werden können.

Anhand der Beobachtungen von Hamilton, zitiert in [87], und der Ausführungen von Walter [93] kann geschlussfolgert werden, dass die Wahrnehmungsspanne von Erwachsenen zur Simultanerfassung von Items bei maximal sechs liegt.

Mithilfe der Teilberichtsmethode ist es zwar möglich, die Wahrnehmungsspanne bestmöglich abzubilden, dennoch würde dies aufgrund der Kombination aus visuellem und auditivem Reiz eine erhöhte Komplexität für den Probanden innerhalb der Studie bedeuten. Aufgrund der notwendigen Einzel- und Mehrfachabfragen jeder Matrixzeile resultiert für den Probanden eine zusätzliche zeitliche Belastung bei Anwendung der Teilberichtsmethode nach Sperling [91]. Dadurch wird die Praktikabilität des Versuchskonzepts im Vergleich zur Ganzberichtsmethode deutlich herabgesetzt. Die Verwendung der Ganzberichtsmethode hat zugegebenermaßen den Nachteil einer geringeren Auflösung, verspricht gleichzeitig jedoch eine merklich höhere Praktikabilität bei der Anwendung im Straßenverkehr.

Daher wird zur Festlegung der Anzahl dargebotener Items primär die Kapazität zum Abruf der möglichen Informationen berücksichtigt. Unter Einbeziehung aller aufgeführten Erkenntnisse bezüglich der Wahrnehmungsspanne und Informationswiedergabe wird die Anzahl der dargebotenen Items auf acht festgesetzt. Somit sind die Grenzen von Miller, Hamilton und Walter großzügig berücksichtigt.

ANORDNUNG DER DARGEBOTENEN ITEMS

Nachdem die Randbedingungen Matrixgröße und Anzahl der dargebotenen Items erläutert und festgelegt wurden, sind diese auch bei der Itemanordnung zu berücksichtigen. Bei der Anordnung ist demzufolge zu beachten, dass die maximal acht darzubietenden Items das 2°-Sichtfeld nicht überschreiten.

An dieser Stelle sei vorweggenommen, dass in der entwickelten Methode ausschließlich Buchstaben als Items verwendet werden. Die Hintergründe sind in Kapitel 5.3.3 diskutiert.

Da vorrangig die abgerufene Informationsmenge, also die Anzahl korrekt erkannter und korrekt benannter Buchstaben, als Maß für die visuelle Leistungsfähigkeit zu ermitteln ist, spielt der Visus nur eine untergeordnete Rolle. Das bedeutet, dass die Visusanforderungen möglichst niedrig anzusetzen sind. Eine gute Lesbarkeit der Buchstaben, die eine ausreichende Schriftgröße voraussetzt, ist konsequentermaßen unabdingbar. Inwiefern der dargebotene Kontrast eine Rolle spielt, wird in Kapitel 6.4 erläutert, sodass dieser gegenwärtig nicht weiter berücksichtigt wird.

Des Weiteren ist es notwendig, die räumliche Anordnung der Buchstaben so zu wählen, dass diese möglichst robust gegenüber der Darbietungszeit ist. Eine Anordnung, bei welcher bei langen Darbietungszeiten im Vergleich zu kurzen eine signifikant höhere Anzahl benannter Buchstaben festgestellt wird, ist aufgrund der nicht vorhandenen Vergleichbarkeit als ungeeignet anzusehen. In Anlehnung

an die von Sperling durchgeführten Studien wird die kurze Darbietungszeit mit 50 ms und die lange Darbietungszeit mit 500 ms beziffert. Aufgrund der Messauflösung ist dennoch eine möglichst große Spanne bezüglich der Anzahl korrekt benannter Buchstaben anzustreben. An die Buchstabenanordnung werden zusammengefasst folgende Anforderungen gestellt:

- Einhaltung des 2° -Sichtfeldes
- Dargebotene Anzahl: acht
- Hinreichend große Buchstaben für gute Lesbarkeit
- Vergleichbare im Mittel korrekt benannte Buchstabenanzahl bei kurzer, $t_D = 50\text{ ms}$, und langer $t_D = 500\text{ ms}$ Darbietungszeit
- Möglichst hohe Anzahl korrekt benannter Buchstaben

Unter Berücksichtigung der räumlichen Anforderungen und den Anforderungen hinsichtlich Anzahl und Lesbarkeit wurden sechs Matrizen konzipiert, wie sie in Abbildung 5.2 dargestellt sind. Die Matrizen wurden so konzipiert, dass zum einen die Buchstabengröße vergleichbar war und zum anderen die Schreibrichtung, sowohl primär als auch sekundär, bei der Darbietung der acht Buchstaben berücksichtigt wurde.

In Anbetracht der Tatsache, dass die Buchstabengröße bei der Darstellung der 1×8 -Matrix relativ klein ist und ein Einfluss dieser auf die Erkennbarkeit nicht vollständig ausgeschlossen werden kann, wurde

die Anzahl der Buchstaben zugunsten der Buchstabengröße reduziert. Infolgedessen wurde auch eine 1x7-Matrix dargeboten.

In Zusammenarbeit mit Rapp [94] wurde zur Bestimmung der optimalen Matrixdarstellung eine Vorstudie mit fünf Probanden durchgeführt. Die Studie bedient sich dem in Kapitel 6.1.1 beschriebenen Versuchsaufbau unter Berücksichtigung der im Folgenden beschriebenen weiteren Randbedingungen.

Das Alter der Probanden (drei männlich, zwei weiblich) lag zwischen 23 Jahren und 28 Jahren. Vor der Teilnahme am Versuch haben alle Probanden ein optometrisches Screening durchlaufen damit sichergestellt werden kann, dass alle Probanden über eine vergleichbare Sehleistung verfügen.

Den Probanden wurde alle sechs Matrizen jeweils 30 Mal für je 50 *ms* und 500 *ms* dargeboten. Die Auswahl und Position der dargebotenen Buchstaben¹¹ innerhalb der Matrix erfolgte durch die Ansteuer-
software. Die im Mittel korrekt benannten Buchstaben je Matrix und Darbietungszeit sind in Tabelle 5.1 zusammengefasst. Detailliertere Ergebnisse sind in Anhang B.2 zu finden.

¹¹ Der zur Auswahl genutzte Buchstabenpool umfasst ausschließlich die in Kapitel 5.3.3 selektierten 14 Buchstaben.

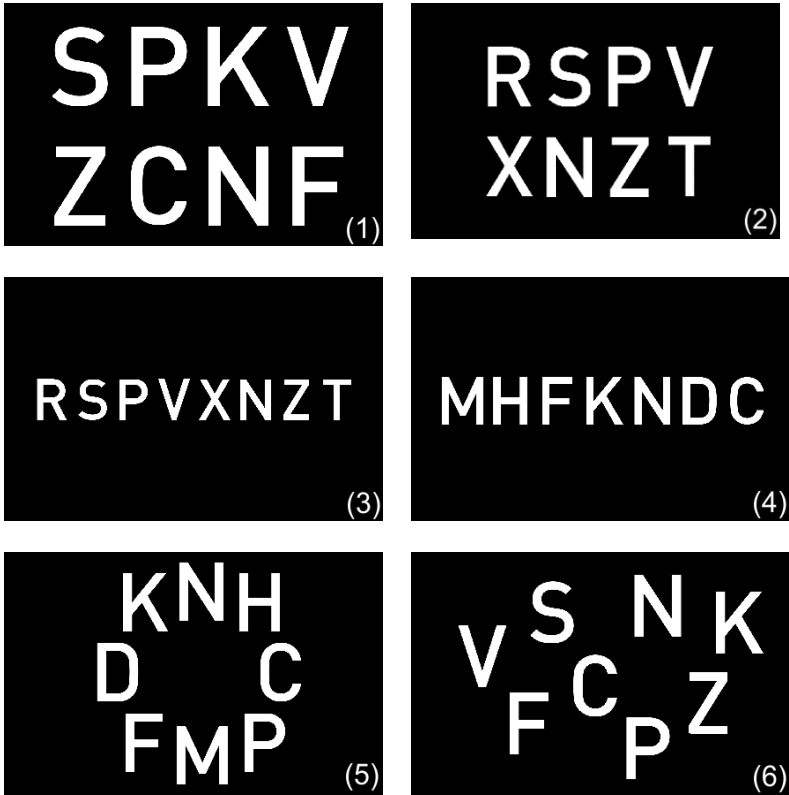


Abbildung 5.2: Konzeptionierte Matrizen: (1) 2x4-Matrix, (2) kleine 2x4-Matrix, (3) 1x8-Matrix, (4) 1x7-Matrix, (5) Kreisanordnung, (6) Wolke (willkürliche Position innerhalb des Sichtfeldes)

Optimierung der Reizdarbietung

Tabelle 5.1: Ergebnisse der im Mittel korrekt benannten Buchstaben je Matrix für beide Darbietungszeiten von 500 ms und 50 ms

	2x4	2x4 klein	1x8	1x7	Kreis	Wolke
500 ms	4,27	4,80	4,04	4,41	4,47	4,52
50 ms	4,24	4,05	3,25	3,47	3,80	4,04

Anhand der Ergebnisse ist ersichtlich, dass die 2x4-Matrix im direkten Vergleich der Darbietungszeiten zueinander fast identische Mittelwerte der korrekt benannten Buchstaben aufweist. Alle anderen Matrizen zeigen in der Beziehung deutliche Abweichungen. Besonders auffällig ist, dass der Wert für die im Mittel korrekt erkannten Buchstaben für kurze Darbietungszeiten um etwa 0,5 bis 1,0 geringer ist gegenüber den langen Darbietungszeiten.

Der vergleichsweise hohe Mittelwert der 1x7- und 1x8-Matrizen für lange Darbietungszeiten deutet, wie zu erwarten, auf einen Einfluss der primären Schreibrichtung und des daraus resultierenden Leseflusses hin. Allerdings ist der Mittelwert für kurze Darbietungsdauern stark abweichend. Daher sind beide einzeiligen Matrizen gemäß der geforderten Robustheit gegenüber der Darbietungszeit auszuschließen.

Gleiches gilt für die Kreisanordnung und die Wolke. Bei der anschließenden Probandenbefragung wurde die kreisförmige Anordnung der Buchstaben insgesamt zwar präferiert und als angenehmste und am leichtesten zu erkennende Matrix bewertet, allerdings zeigt sich, dass die Kreisanordnung für kurze Darbietungszeiten im Vergleich

zur Matrixanordnung bei Verwendung der Ganzberichtsmethode deutlich schlechter abschneidet. Dass die Wiedergabeleistung bei kreisförmigen Anordnungen gegenüber matrixförmigen Anordnungen schlechter ausfällt, entspricht den Ergebnissen von Schulz [95].

Die Wolke hingegen wurde als am schwierigsten zu erkennende Darstellungsart empfunden. Dies liegt vermutlich an der Tatsache, dass der Wahrnehmungsprozess des Menschen auf Mustererkennung beruht [10]. Im Falle der dargebotenen Wolke musste von Probanden zunächst ein Startpunkt ausgemacht, bevor die Merkmale analysiert werden konnten. Dieser Prozess nimmt einige Zeit in Anspruch und reduziert die Anzahl der im Mittel korrekt benannten Buchstaben.

Zusammenfassend lässt sich auf Basis der durchgeführten Vorstudie feststellen, dass die 2×4 -Matrix als optimale Anordnung angesehen werden kann. Für weitere Informationen zur Studie sei auf die Bachelorarbeit von Rapp [94] verwiesen.

5.3.3 ITEMAUSWAHL UND ITEMPOOL

Wie bereits in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben, werden in der präsentierten großen 2×4 -Matrix nur Buchstaben dargeboten. Wieso Ziffern gänzlich ausgeschlossen wurden und welcher Buchstabenpool Anwendung findet, ist im Folgenden erläutert.

Jedes der acht Item darf nur ein Mal innerhalb der präsentierten Matrix vertreten sein, damit eine Mustererkennung vermieden werden

kann. Die mehrfache Verwendung identischer Items könnte bewirken, dass sich für den Probanden quasi ein Muster ergibt und die mehrfach dargebotenen Items innerhalb der Matrix leichter erkannt werden können [87]. Das hätte wiederum zur Folge, dass sich die Erkennbarkeitswahrscheinlichkeit dieser Items erhöht, sodass das Kriterium der vergleichbaren Erkennbarkeitswahrscheinlichkeit innerhalb der Matrix nicht eingehalten werden kann. Das bedeutet auch, dass die Gesamtanzahl der Items innerhalb des Pools mindestens acht betragen muss.

Besteht der Itempool genau aus acht Items, ist auch unter Berücksichtigung der Reihenfolge der genannten Items von einem Lerneffekt auszugehen. Im schlechtesten Fall ist der Itempool vollständig bekannt, sodass immer acht Items genannt werden können. Obwohl die Reihenfolge der genannten Items respektive die Itemposition mit abgefragt wird, erhöht sich die Ratewahrscheinlichkeit bei bekanntem Itempool. Infolgedessen kann anhand der Ergebnisse der Effekt unter Umständen nicht mehr nachgewiesen werden. Daher ist die Größe des Itempools möglichst groß zu wählen, wobei bei der Itemauswahl die vergleichbare Erkennbarkeitswahrscheinlichkeit zu berücksichtigen ist.

Anhand der Ergebnisse von Sperling [91] kann geschlussfolgert werden, dass entweder nur Ziffern oder nur Buchstaben innerhalb einer Matrix verwendet werden sollten.

Der Itempool aus Ziffern umfasst genau zehn Items: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 und 9. Die Zahl 7 muss aufgrund des Wortlängeneffektes [96, 97]

jedoch ausgeschlossen werden. Sie ist zweisilbig, sodass mehr Speicherkapazität vorgehalten werden muss und die Artikulationsdauer ist im Vergleich zu allen übrigen einsilbigen Wörtern deutlich erhöht. Ein Einfluss auf die Anzahl der im Mittel korrekt benannten Items ist nicht auszuschließen, sodass sich der Itempool damit auf neun Items reduziert. Ferner haben Studien [18] gezeigt, dass die relative Erkennbarkeit von den Ziffern 4 und 8 große Unterschiede aufweisen. Die Vergleichbarkeit der Erkennbarkeitswahrscheinlichkeit kann infolgedessen nicht gewährleistet werden, sodass nur eine der beiden Ziffern in den Itempool aufgenommen werden kann. Folglich umfasst der Itempool nur noch acht Items und entspricht der Anzahl präsentierter Items innerhalb der Matrix. Dementsprechend sind Ziffern als Items ungeeignet.

Das lateinische Alphabet umfasst 26 Buchstaben. Vokale sind aufgrund der Begünstigung von Wortbildung auszuschließen. Die einzelnen Buchstaben sollen darüber hinaus auch als einzelne Items interpretiert werden. Aus diesem Grund sind nur Großbuchstaben zu verwenden. Unter Berücksichtigung der oben beschriebenen Argumentation, die zum Ausschluss der Ziffer 7 führten, ist auch der dreisilbige Buchstabe Y auszuschließen. So verbleiben noch 20 Buchstaben im Buchstabenpool. Untersuchungen von Hedin, zitiert in [18, 20, 98] zeigen, dass nicht alle Buchstaben die gleiche Erkennbarkeitswahrscheinlichkeit aufweisen. Dies ist in Abbildung 5.3 gezeigt. Zur Erhaltung der Vergleichbarkeit der Buchstaben untereinander ist dieses Kriterium zwingend erforderlich. Basierend auf der Publikation von Rossow und Wesemann [98], den hier beispielhaft dargestellten

Ergebnissen [18] und den Ergebnissen anderer Forschergruppen, wurden die 14 Buchstaben aus Abbildung 5.4 in den finalen Itempool aufgenommen.

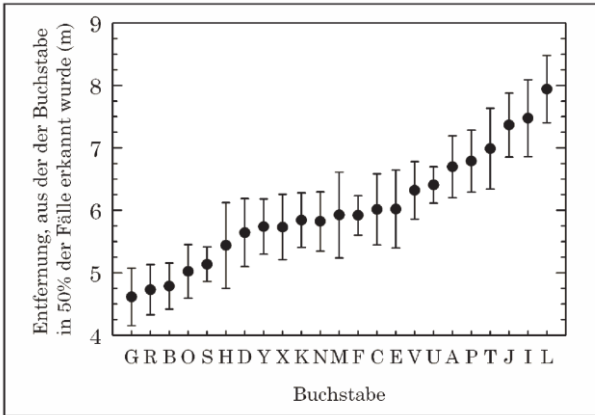


Abbildung 5.3: Unterschiedliche Erkennbarkeit von Buchstaben [18]



Abbildung 5.4: Ausgewählter Itempool

5.3.4 SCHRIFTART DER ITEMS

Wie u.a. in den Untersuchungen von Rossow und Wesemann [98] festgestellt wurde, ist mit einem Einfluss der verwendeten Schrift auf die Erkennbarkeit der Buchstaben zu rechnen. Die DOG¹² empfiehlt die Normschrift DIN 1451-2, eine serifenlose Verkehrsschrift [99]. Hierbei handelt es sich um eine serifenlose Linear-Antiqua Mittelschrift, die in Deutschland u.a. auch auf Verkehrsschildern zum Einsatz kommt. Dieser Empfehlung wurde nachgegangen.

5.3.5 RATEWAHRSCHEINLICHKEIT UND TESTQUALITÄT

Im Zuge der Methodenoptimierung sind die Aspekte Ratewahrscheinlichkeit und Testqualität noch zu betrachten. Wie bereits in Kapitel 4.1.1 angeführt, kann die Testqualität durch Anpassung der Verhältnisse der relativen Häufigkeiten in Abhängigkeit von den Anforderungen verbessert werden. Ziel sollte es sein mindestens so gut zu sein, wie etablierte Methoden, die ausschließlich den Landolt-Ring als Sehzeichen nutzen.

Die Anforderungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Ratewahrscheinlichkeit $P_{Item} \leq 1/8$

¹² Deutsche Ophthalmologische Gesellschaft

- Möglichst hohe Sensitivität gemäß Formel (4.1) und Spezifität gemäß Formel (4.3)
- Möglichst niedrige Falsch-negativ-Rate gemäß Formel (4.2) und Falsch-Positiv-Rate gemäß Formel (4.4)

Zur Bestimmung der Ratewahrscheinlichkeit bei Verwendung der 2x4-Buchstabenmatrix ist auf das Themengebiet der Kombinatorik zurückzugreifen. Für jede Matrix werden acht Buchstaben aus 14 möglichen ausgewählt, die an der richtigen Position wiedergegeben werden müssen. Jeder Buchstabe darf innerhalb der Matrix nur einmal verwendet werden. Es handelt sich folglich um eine Variation ohne Wiederholung, bei welcher die Reihenfolge wichtig ist, deren Ratewahrscheinlichkeit P_{Item} sich wie folgt berechnet:

$$P_{Item} = \frac{(n - k)!}{n!} \quad (5.1)$$

Dabei ist n die Zahl der vorhandenen Elemente und k die Anzahl der ausgewählten Elemente. Bei der Berechnung der Ratewahrscheinlichkeit gemäß Formel (5.1) wird vorausgesetzt, dass den Probanden der Buchstabenpool bekannt ist. Dies entspricht zwar nicht der Tatsache bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Studien, kann allerdings als die am schlechtesten anzunehmende Abschätzung der Ratewahrscheinlichkeit herangezogen werden. Wird im Fall der 2x4-Buchstabenmatrix ein Buchstabe erkannt, beträgt die Ratewahrscheinlichkeit $P_{Item,1} = \frac{1}{14} = 7,14 \%$. Werden 3 Buchstaben erkannt, reduziert sich diese auf $P_{Item,3} = \frac{1}{2184} = 4,6 \%$ und bei 5 erkannten Buchstaben auf $P_{Item,5} = \frac{1}{240240} = 0,00042 \%$. Walschuss [100]

hat in seiner Bachelorarbeit das Thema der Ratewahrscheinlichkeiten ausführlicher betrachtet. Dies geschah in erster Linie unter Berücksichtigung der Fälle, dass Buchstaben auch nicht geraten, sondern richtig erkannt und richtig benannt worden. Daher sei an dieser Stelle auf ihn verwiesen. Insgesamt zeigt sich jedoch, dass die Ratewahrscheinlichkeit P_{Item} unter Verwendung der 2x4-Buchstabenmatrix im Vergleich zum Landoltring deutlich reduziert werden kann.

Auch die Wahrscheinlichkeit für Verpasser f_n der 2x4-Matrix kann aufgrund der Methodenoptimierung als geringer angesehen werden. Es ist davon auszugehen, dass die beschriebene Theorie von Orne [86] und andere unbewusst ablaufende Entscheidungsprozesse aufgrund der intuitiven und ausschließlich visuellen Probandenaufgabe eine deutlich geringere Rolle spielen. Eine quantitative Beurteilung der zu erwartenden Wahrscheinlichkeit für Verpasser f_n kann an dieser Stelle nicht erfolgen. Allerdings ist aufgrund der reduzierten Ratewahrscheinlichkeit P_{Item} in Bezug auf die Spezifität mit einem höheren Wert und bei der Falsch-Positiv-Rate von einem kleineren Wert als beim Landoltring auszugehen. Folglich erhöht sich auch der Wert für die Sensitivität, wodurch die Falsch-Negativ-Rate sinkt.

Zusammengefasst lässt sich feststellen, dass durch Verwendung der 2x4-Buchstabenmatrix mit einer Verbesserung der Testqualität zu rechnen ist.

5.4 MEELLI-METHODE

Mithilfe der in diesem Kapitel vorgestellten Optimierungen wurde eine Messmethode zur Blendungsbewertung von blendenden Lichtimpulsen über Buchstabenidentifikation, engl.: Measurement of Lighting Light stimuli with Letter Identification, kurz MeLLI-Methode, entwickelt. Diese Methode ermöglicht, wie in Abbildung 5.5 gezeigt, die gleichzeitige Erfassung der beiden Maßzahlen ΔVP und Readaptationszeit t_R bzw. die diskrete Abtastung des zeitlichen Verlaufs des Readaptationsprozesses nach kurzzeitiger Änderung des Beleuchtungslevels.

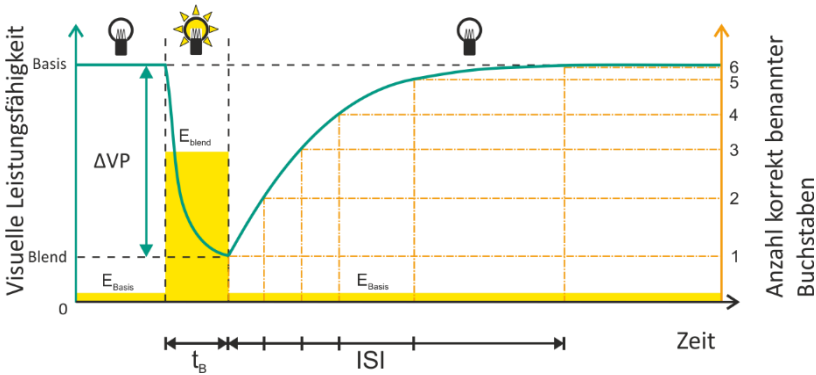


Abbildung 5.5: Prinzipskizze der MeLLI-Methode inkl. zeitlicher Verlauf der visuellen Leistungsfähigkeit anhand der Anzahl korrekt benannter Buchstaben in Abhängigkeit der gewählten Interstimulusintervalle (ISI)

Den Probanden wird nach dem Blendimpuls der Länge t_B zu bestimmten, jedoch variablen Interstimulusintervallen für eine festge-

legte Darbietungszeit t_D von 50 ms eine 2x4-Buchstabenmatrix präsentiert. Die Aufgabe der Probanden besteht darin, möglichst viele Buchstaben an der richtigen Position innerhalb der Matrix verbal wiederzugeben. Der zeitlich Ablauf eines Durchgangs ist in Abbildung 5.6 dargestellt.

Anhand der Anzahl korrekt benannter Buchstaben jeweils mit und ohne Blendung kann unter Berücksichtigung des Schwellenkontrastes auch die relative Änderung der visuellen Leistungsfähigkeit ΔVP bestimmt werden. Buchstaben werden nur als korrekt benannt angesehen, wenn diese auch der korrekten Position zugeordnet werden.

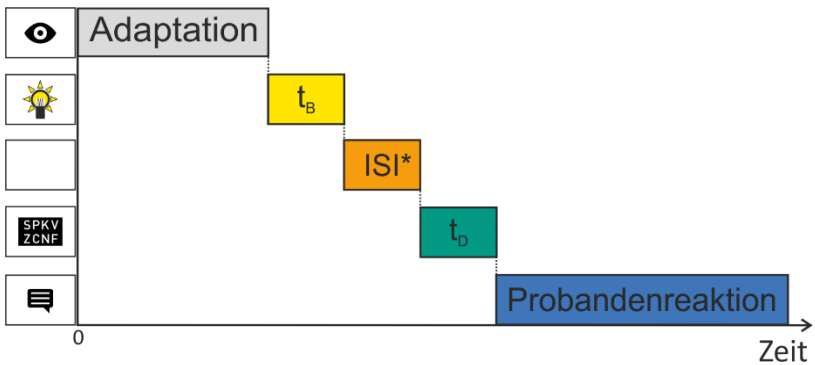


Abbildung 5.6: Zeitlicher Verlauf eines Durchgangs der MeLLI-Methode mit t_B : Blendepulsdauer, Interstimulusintervall (ISI) *)variabel, t_D : Darbietung der 2x4-Buchstabenmatrix für 50 ms; Probandenreaktion: verbale Berichterstattung aller erkannten Buchstaben

Die zeitdiskrete Abtastung erfolgt hier, wie in Abbildung 5.5 zu sehen, über die Variation der ISIs und der jeweiligen Bestimmung der

korrekt benannten Buchstaben aus der dargebotenen 2x4-Buchstabenmatrix. Insgesamt verspricht die Anwendung der MeLLI-Methode eine Bewertung für transient dynamische Blendsituationen. Zur Validierung der Methoden wurden Probandenstudien durchgeführt, die im folgenden Kapitel beschrieben sind.

Kapitel 6

VALIDIERUNG DER MEELLI-METHODE

Die Validierung der MeLLI-Methode erfolgt auf Basis verschiedener Probandenstudien, die alle in der gleichen Versuchsumgebung durchgeführt wurden.

Mithilfe der Probandenstudien ist nachzuweisen, dass die Methode situationsspezifisch angewandt werden kann. Es ist zu zeigen, dass die zeitdiskrete Abtastung der visuellen Leistungsfähigkeit nach einem Blendimpuls anhand der Anzahl korrekt benannter Buchstaben generell möglich ist. Des Weiteren sind Unterschiede im zeitlichen Verlauf der Readaptationszeit bei unterschiedlichen Blendimpulsdauern unter Verwendung der MeLLI-Methode aufzuzeigen. Außerdem soll der Fragestellung nach der Gewichtung von Visus, Kontrast und Informationsmenge, also der Anzahl der korrekt benannten Buchstaben, nachgegangen werden. Einen Überblick über die durchzuführenden Studien und deren Rahmenbedingungen ist in Tabelle 6.1 gegeben.

Tabelle 6.1: Überblick über die durchgeführten Studien mit den Einflussparametern Blendimpulsdauer t_B , Blendbeleuchtungsstärke E_B , Darbietungsdauer der Buchstabenmatrix t_D , dargebotener Kontrast der Buchstabenmatrix K_{BM} im individuell bestimmten Bezugsschwellenkontrast K_S oder technisch maximal möglichen Weber-Kontrast $K_{W,max}$ und der Interstimulusintervalle (ISI)

Beschreibung	t_B [ms]	E_B [lx]	t_D [ms]	K_{BM}	ISI [ms]
Zeitdiskrete Abtastung	500	24	50	K_S	0–50–100–200–300–500–800–1000
Variable Blendimpulsdauer	100–500–2000	24	50	K_S	0–50–200–500–1000
Kontrastsensitivität	500	24	50	$K_{W,max} = 18$	0–100–300–800–1300–1800

6.1 METHODISCHES VORGEHEN

Die MeLLI-Methode wurde so konzipiert, dass sie zur objektiven Bewertung in transient dynamischen Blendsituationen eingesetzt werden kann. Zur konzeptionellen Validierung soll im ersten Schritt das Worst-Case-Szenario überprüft werden. Diese Einschränkung ist notwendig, damit mögliche Effekte aufgrund der hohen Komplexität innerhalb der Situation ausgeschlossen werden können. Das bedeutet jedoch, dass die zu untersuchende Situation zunächst auf eine transient statische Blendsituation reduziert werden muss. Nur so kann die Vergleichbarkeit gegenüber bisher angewandter Methoden gewährleistet werden. Wie bereits in Kapitel 3.1.1 erwähnt, ist an Punkt B50L mit der maximal reduzierten visuellen Leistungsfähigkeit zu rechnen. Daher wird dieser als Worst-Case angenommen.

6.1.1 VERSUCHSAUFBAU

Damit die Studien unter reproduzierbaren Bedingungen ablaufen können, wurde für die Durchführung ein Versuchsaufbau konzipiert. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 6.1 dargestellt und orientiert sich an dem Aufbau und den gewählten Rahmenparametern von Freyer [79].

Der Proband befindet sich im Abstand von $2,5\text{ m}$ vor einer weißen Wand, an welcher der Monitor zur Matrixdarstellung als auch die

Blendlichtquelle auf einer Höhe von 1,25 m montiert sind. Die Wand wurde weiß mit der Farbe *Brillux ELF 954* gestrichen und mit weißem LED-Licht mit einer Farbtemperatur von 8000 K so beleuchtet, dass sich eine im Mittel $0,1 \text{ cd/m}^2$ helle Fläche ohne merkliche Inhomogenitäten ergibt. Mit einer Breite von 2,0 m nimmt die Wand den Großteil des Sichtfeldes des Probanden ein und kann aufgrund ihrer Beschaffenheit als Adaptationsfläche genutzt werden. Die gewählte Adaptationsleuchtdichte liegt im mesopischen Bereich, der typisch für den nächtlichen Straßenverkehr ist [79]. Der Boden und die Decke sind jeweils mit weißem Stoff bedeckt, der diffus abstrahlt. Zur Vermeidung von Streulicht und Reflexionen wurden an den Seiten schwarze Vorhänge angebracht. Insgesamt entsteht so eine abgeschlossene Versuchsumgebung, innerhalb welcher die Studien unter kontrollierten und reproduzierbaren Bedingungen stattfinden können. Leuchtdichtebilder sind im Anhang B.3 zu finden.

Um möglichen Kopfbewegungen des Probanden entgegenzuwirken, die u. U. die Ergebnisse beeinflussen könnten, wurde eine Kinnstütze verwendet. Diese wurde so positioniert, dass der Proband, wenn er seinen Kopf darauf ablegt, direkt mittig auf den Monitor blickt. Entsprechend des Anwendungsfalls im Straßenverkehr und unter Berücksichtigung der Winkelbeziehungen, ist die Blendquelle ausgehend von der Monitormitte $3,43^\circ$ links an der Wand platziert. Wie der Aufbau aus Probandensicht aussieht, ist in Abbildung 6.2 gezeigt.

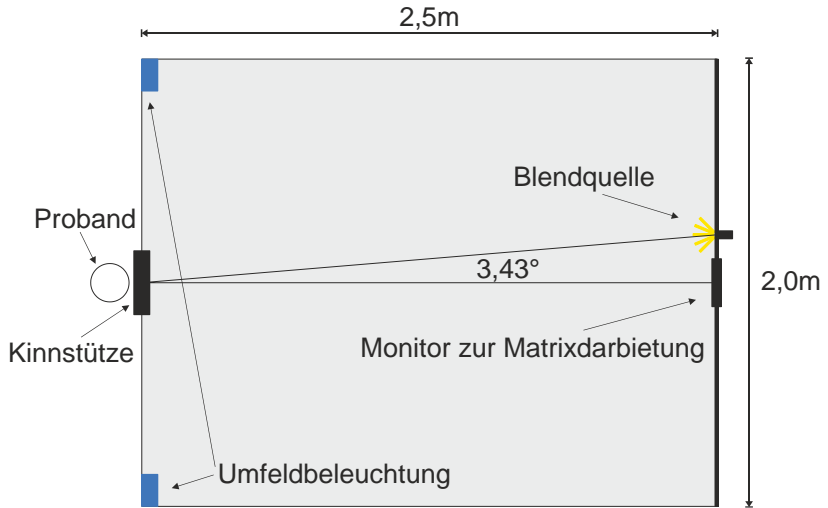


Abbildung 6.1: Draufsicht des Versuchsstands

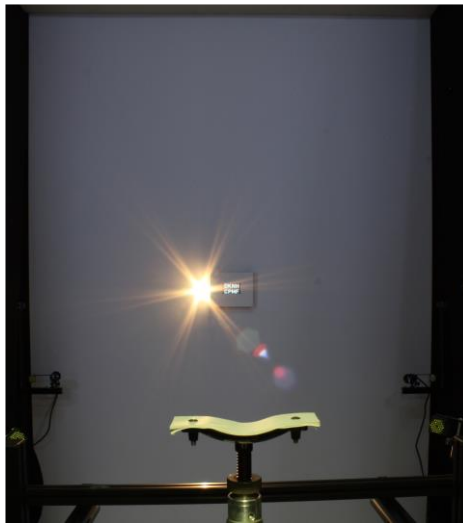


Abbildung 6.2: Versuchsaufbau aus Sicht des Probanden

MONITOR ZUR MATRIXDARBIETUNG

Zur Matrixdarstellung wurde ein 8" Monitor mit einer Auflösung von 800x600 Pixel und einer Bildwiederholfrequenz von 60 Hz verwendet. Vor dem Monitor wurde noch ein Neutraldichtefilter der Firma Lee mit der Typenbezeichnung *Little Stopper* montiert, damit die Leuchtdichte des Monitors die Helligkeit der weißen Wand von $0,1 \text{ cd/m}^2$ abgesenkt werden kann. Mithilfe einer Blende vor Monitor und Filter wurde die Einhaltung des 2° -Beobachters sichergestellt. Die genaue Bemaßung und eine exemplarische Buchstabenmatrix sind in Abbildung 6.3 dargestellt. Der technisch maximal mögliche Kontrast liegt bei 18, was einer Objektleuchtdichte von $1,9 \text{ cd/m}^2$ entspricht.



Abbildung 6.3: Bemaßung der Buchstabenmatrix [100]

BLENDQUELLE

Die Blendquelle hat einen Durchmesser von $3,0\text{ cm}$. Bei einem Abstand von $2,5\text{ m}$ entspricht dies einem Winkel von $0,6^\circ$. Die Blendquelle besteht aus der Kombination eines Osram Chip-on-Board LED Moduls der Produktfamilie *SOLERIQ S13* und einer Acrylglasoptik. Die Acrylglasoptik wurde so angepasst, dass an beiden Augenpositionen die gleiche Beleuchtungsstärke vorliegt. Die Farbtemperatur der Blendquelle betrug 3000 K . Die LED wurde im Arbeitspunkt gemäß den Angaben im Datenblatt betrieben.

Die Blendquelle wird über einen *Arduino* UNO Mikrokontroller mit LED-Treiber über ein *Matlab*-Programm angesteuert. Der Monitor wird über das *Matlab*-Programm angesteuert, sodass die Darbietung der Blendsituation als auch der Matrix kontrolliert erfolgen kann.

6.1.1 VERSUCHSDESIGN

Alle Studien sind in einem within-subject-Design mit Messwiederholung geplant und durchgeführt worden. Folglich durchlief jeder Proband alle Situationen mehrfach. Dieses Vorgehen hat sowohl ökonomisch als auch methodische Vorteile. Intraindividuelle Unterschiede können ausgeschlossen werden, da sich interpersonelle Unterschiede gleichermaßen auf alle Situationen gleich auswirken. Dem sich ergebenden methodischen Nachteil aufgrund der Positionseffekte wird

durch Randomisierung der Reihenfolge der Blendsituationen entgegengewirkt. Jeder Proband durchläuft während des Versuchs die Situationen in einer anderen, zufällig ausgewählten Reihenfolge. [101]

Sowohl die Studien von Sperling [91] als auch die Studien von Walchuss [100] zeigen, dass innerhalb der ersten Durchläufe mit einem Lerneffekt der Probanden zu rechnen ist. Dies wird im Studiendesign so berücksichtigt, dass mindestens die ersten zehn Durchläufe nicht bewertet und folglich ausschließlich zum Einlernen der Probanden genutzt werden.

Bis zur Darstellung der Buchstabenmatrix wird in jedem Durchgang ein Fixationskreuz in der Mitte des Monitors angezeigt. In der schriftlichen Probandeninstruktion wurden die Probanden gebeten dieses zu betrachten. Dies hat den Zweck, den Blick bewusst zu lenken und mögliche Blickbewegungen kurz vor der Präsentation der Buchstabenmatrix zu vermeiden. Alle Probanden haben so den gleichen Ausgangspunkt. Daraus ergibt sich für jede zu testende Situation mit Blendung, die in Abbildung 6.4 dargestellte, zeitliche Abfolge.

Des Weiteren wurde auf eine ausreichende und angemessene Adaptationszeit vor Beginn jeder Studie geachtet. Diese betrug jeweils 20 *min*. Die Probanden wurden zu Beginn gebeten, ihre Sitzposition für die Studie einzunehmen. Die weiße Wand wurde mit der LED-basierte Umfeldbeleuchtung mit $0,1 \text{ cd/m}^2$ beleuchtet, sodass die Probanden sich an diese Umgebungsdingung adaptieren konnten.

Die Bestimmung des individuellen Schwellenkontrastes K_S bzw. der individuellen Schwellenkontraststufe erfolgt unter Blendeinfluss für

ein ISI von 0 ms. Die Darbietung der Buchstabenmatrix unmittelbar nach der Blendung zur Schwellenkontrastbestimmung wurde bewusst so gewählt und stellt aus methodischer Sicht einen Kompromiss dar. Einerseits verringert sich dadurch die Wahrscheinlichkeit für Verpasser bzw. Auslassungen f_n , wodurch sich dafür die Sensitivität gemäß (4.1) und folglich auch die Testqualität erhöht. Andererseits entspricht der hier ermittelte Schwellenkontrast streng genommen nicht dem üblich ermittelten Schwellenkontrast, da dieser gemäß der gängigen Definition ohne Blendeinfluss ermittelt wird. Zugunsten einer höheren Erkennbarkeitsrate bei kleinen ISIs wird darauf zurückgegriffen die Buchstabenmatrix tendenziell überschwellig darzubieten, sodass der Bezugsschwellenkontrast im Rahmen der MeLLI-Methode unter Blendeinfluss bestimmt wird.

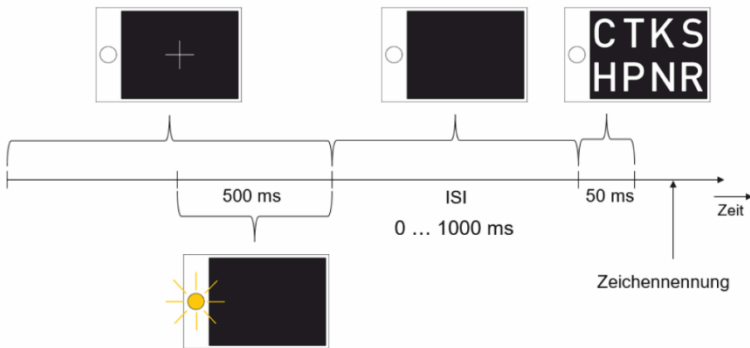


Abbildung 6.4: Chronologische Abfolge einer Testsituation mit Blendung [94]

6.1.2 PROBANDENKOLLEKTIV

Die Wahl des Probandenkollektives erfolgte mit dem Ziel, eine möglichst geringe Streuung der Messergebnisse zu erreichen. Dies setzt eine hohe Vergleichbarkeit voraus und erfordert ein homogenes Probandenkollektiv.

Da ein altersbedingter Einfluss auf das Kontrastsehvermögen aufgrund der mit dem Alter zunehmenden Streulichtbildung im Auge nicht auszuschließen ist, wird für die Probandenstudien ein maximales Alter von 30 Jahren festgelegt [23, 102].

Zur Reduzierung der Streubreite ist außerdem der Visus zu berücksichtigen. Aus diesem Grund sind im Vorfeld optometrische Kriterien festzulegen, die von den Probanden erfüllt werden müssen, um zur jeweiligen Studie zugelassen zu werden. Die festgelegten Kriterien werden vor Versuchsbeginn mithilfe des Sehtestgerätes *Optovist I* der Firma *Vistec AG* überprüft. Zugelassen wurden nur jene Probanden, die folgende Mindestvoraussetzungen erfüllen:

- Visus von mindestens 1
- Kontrastverhältnis im mesopischen Bereich gemäß DIN 58220 Teil 7 mit Blendung von mindestens 1:2
- Kontrastsehvermögen mit Blendung im photopischen Bereich von mindestens 10 %

6.1.3 VERSUCHSABLAUF

Zu Beginn erhielten die Probanden eine schriftliche Instruktion zum Ablauf der Studie und wurden gebeten, den Eingangsfragebogen zur Aufnahme der demographischen Daten auszufüllen. Anschließend wurden die Probanden optometrisch vermessen und bei Erfüllung der Mindestvoraussetzungen zum Versuch zugelassen. Die Probandeninstruktionen sowie das Probendenaufnahmeblatt sind in Anhang C: zu beigefügt. Während der Adaptationszeit von 20 Minuten wurde den Probanden der Ablauf und die Aufgabenstellung noch einmal vom Versuchsleiter vorgelesen. Innerhalb dieser Zeit hatte der Proband Zeit sich an die studienspezifischen Umgebungsbedingungen respektive die Umgebungsleuchtdichte zu adaptieren.

Im Anschluss absolvierte jeder Proband die studienspezifischen Durchgänge. In allen Durchgängen wurden die korrekt benannten Buchstaben vom Versuchsleiter aufgenommen.

Der erste Durchgang dient allgemein dazu, sich mit dem zeitlichen Ablauf vertraut zu machen. Angesichts des zu erwartenden Lerneffekts, werden die im ersten Durchgang aufgenommenen Werte im Folgenden nicht weiter berücksichtigt.

Inklusive Adaptationszeit und optometrischem Screening dauerte der gesamte Versuch für jeden Probanden jeweils in etwa 1,5 h.

6.2 ZEITDISKRETE ABTASTUNG

Zum Nachweis der prinzipiellen Anwendbarkeit der MeLLI-Methode zur zeitdiskreten Abtastung der visuellen Leistungsfähigkeit ist aufzuzeigen, dass es mit dieser möglich ist den Kurvenverlauf aus Abbildung 4.3 nachzubilden. Hierzu wurde die folgende Probandenstudie durchgeführt.

Als Rahmenbedingungen sind zu nennen:

- Blendimpulsdauer $t_B = 500 \text{ ms}$
- Blendbeleuchtungsstärke $E_B = 24 \text{ lx}$
- Darbietungszeit der Buchstabenmatrix $t_D = 50 \text{ ms}$
- Buchstabenkontrast: individuell bestimmter Bezugsschwellenkontrast mit Blendung K_S

In dieser Studie werden die Interstimulusintervalle (ISI) von 0 ms , 50 ms , 100 ms , 200 ms , 300 ms , 500 ms , 800 ms und 1000 ms untersucht. Für jedes Interstimulusintervall werden fünf Messwerte erhoben. Die Reihenfolge wird randomisiert. Für jedes ISI wird die korrekt benannte Anzahl der Buchstaben bestimmt, deren Eingabe über die eigens entwickelte und auf *Matlab*-basierende GUI¹³ erfolgt.

¹³ Graphical User Interface; englisch für grafische Benutzeroberfläche

6.2.1 PROBANDENKOLLEKTIV

Insgesamt haben an der Studie 22 auswertbare Probanden (sieben weibliche und 14 männliche) zwischen 18 und 28 Jahren teilgenommen. Die Probanden waren im Mittel 22,2 Jahren alt. Drei Probanden trugen während des Versuchs eine Brille und weitere drei Kontaktlinsen. Alle Probanden erfüllten die Mindestanforderungen, sodass von einer vergleichbaren visuellen Leistungsfähigkeit ausgegangen werden kann.

6.2.2 VERSUCHSABLAUF

Jeder Proband absolvierte vier Durchläufe, die in Tabelle 6.2 zusammengefasst sind.

Die Buchstabenmatrix wird im ersten Durchgang zehn Mal im Kontrast $K_{W,max}$ von 18 präsentiert.

Im zweiten Durchgang wird die individuelle Bezugsschwellenkontraststufe K_S mittels Grenzmethode bestimmt. Die ermittelte Bezugsschwellenkontraststufe wurde zur Darbietung der Buchstabenmatrix in den Durchgängen 3 und 4 genutzt. Als Kriterium für den individuellen Bezugsschwellenkontrast wurde die 50%-Grenze der maximal korrekt benannten Buchstaben abhängig vom dargebotenen Kontrast herangezogen.

Die Variation der acht unterschiedlichen ISIs mit fünfmaliger Wiederholung erfolgt in Durchgang 3. Die Probanden absolvieren folglich 40 Blendsituationen in randomisierter Reihenfolge. Die korrekt benannten Buchstaben werden vom Versuchsleiter aufgenommen.

Abschließend wird die Buchstabenmatrix noch in fünf Situationen ohne Blendung abgefragt, um die visuelle Leistungsfähigkeit ohne Blendeinfluss beziffern zu können. Der hier ermittelte Wert entspricht der maximalen visuellen Leistungsfähigkeit unter den vorliegenden Umgebungsbedingungen.

Tabelle 6.2: Durchgänge, Parameter und Anzahl der Wiederholungen bzw. Durchläufe je Durchgang der Studie zur zeitdiskreten Abtastung; *)wird randomisiert

Durchgang	t_B [ms]	E_B [lx]	t_D [ms]	K_{BM}	ISI [ms]	Wdh.
1	500	24	50	$K_{W,max}$	500	10
2	500	24	50	Var.*	0	15
3	500	24	50	K_S	Var.*	40
4	–	–	50	K_S	–	5

6.2.3 ERGEBNISSE

Nach Versuchsabschluss sind, basierend auf den Ergebnissen aus Durchgang 3, jedem ISI je Proband bis zu fünf Messwerte zuzuordnen. Zur weiteren Auswertung wird der Mittelwert dieser Messwerte je ISI und je Proband gebildet. Im nächsten Schritt wird zu jedem ISI der Mittelwert über alle Probanden errechnet. Die sich ergebende An-

zahl der im mittel korrekt benannten Buchstaben, die Standardabweichung und der Varianzkoeffizient zwischen den Probanden sind in Tabelle 6.3 aufgelistet.

Tabelle 6.3: Berechnete Mittelwerte, einfache Standardabweichung und Varianzkoeffizient zwischen allen Probenaden für die jeweiligen ISIs sowie die getestete Situation ohne Blendung (Durchgang 4) aus der Studie zur zeitdiskreten Abtastung

ISI [ms]	Mittelwert	Einfache Standardabweichung	Varianzkoeffizient [%]
0	0,83	0,66	79,8
50	0,97	0,68	69,6
100	1,22	0,90	73,9
200	1,35	0,77	58,9
300	1,53	0,75	49,4
500	1,70	0,67	39,5
800	1,81	0,70	38,8
1000	2,01	0,87	43,3
ohne Blendung	2,87	0,98	33,9

Zur Visualisierung der Ergebnisse sind diese in Abbildung 6.5 übertragen und zusätzlich der Mittelwert der visuellen Leistungsfähigkeit ohne Blendeinfluss sowie die Standardabweichung eingezeichnet. Die Anzahl der in Durchgang 4 ohne Blendung im Mittel korrekt benannten Buchstaben beträgt $2,87 \pm 0,98$. Dieser Wert entspricht der ursprünglichen visuellen Leistungsfähigkeit, sodass auf der rechten Skala die Anzahl der im Mittel korrekt benannten Buchstaben auf

diesen Wert normiert werden kann. Zur Verdeutlichung des zeitlichen Verlaufs der relativen visuellen Leistungsfähigkeit nach einer transient statischen Blendsituation wurde in Abbildung 6.5 die grün-blau gestrichelte Trendlinie ergänzt. Aufgrund der Tatsache, dass die Messwerte eine relativ hohe Streuung aufweisen, wird an dieser Stelle und im Folgenden auf die Ermittlung eines funktionalen Zusammenhangs verzichtet.

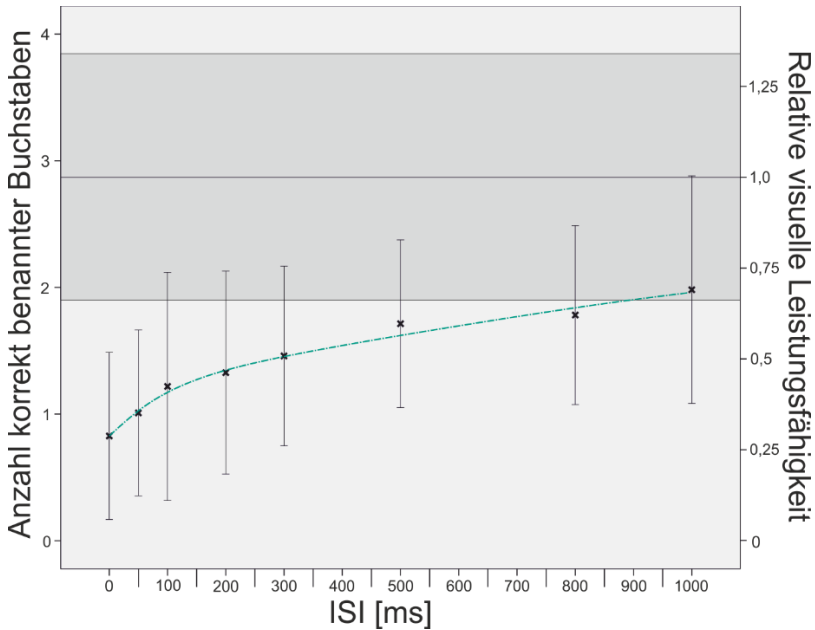


Abbildung 6.5: Linke Skala: Berechnete Mittelwerte und einfache Standardabweichung aus Durchgang 3 (x) mit Blendung in Abhängigkeit des gewählten ISIs; dunkel hinterlegt: Berechneter Mittelwert und einfach Standardabweichung aus Durchgang 4; rechte Skala: relative visuelle Leistungsfähigkeit (normiert auf die ursprüngliche visuelle Leistungsfähigkeit aus Durchgang 4); Die grün- blau-gestrichelte Trendlinie des zeitlichen Verlaufs der relativen visuellen Leistungsfähigkeit nach einem Blendimpuls mit 24 lx und 500 ms Dauer

Um Aussagen über die Ergebnisqualität schlussfolgern zu können, ist die intraindividuelle Standardabweichung zu betrachten. Diese sind in Tabelle 6.4 zusammengefasst.

Tabelle 6.4: Berechnete Mittelwerte, Mittelwert der intraindividuellen Standardabweichung und die Standardabweichung der gemittelten intraindividuellen Standardabweichung für die jeweiligen ISIs sowie die getestete Situation ohne Blendung (Durchgang 4) aus der Studie zur zeitdiskreten Abtastung

ISI [ms]	Mittelwert	Mittelwert Intraindividuelle Standardabweichung	Standardabweichung der gemittelten intraindividuellen Standardabweichung
0	0,83	0,88	0,55
50	1,01	0,94	0,52
100	1,22	0,90	0,33
200	1,33	1,00	0,47
300	1,46	1,09	0,44
500	1,71	0,96	0,42
800	1,78	1,09	0,44
1000	1,98	1,06	0,38
ohne Blendung	2,87	1,02	0,36

Anhand der Ergebnisse ist ersichtlich, dass die intraindividuelle Streuung im Mittel immer im Bereich von etwa einem korrekt benannten Buchstaben liegt. Die Standardabweichung der gemittelten intraindividuellen Streuung nimmt mit steigendem ISI ab. Die könnte

ein Indiz dafür sein, dass das Kriterium zur Wahl Bezugsschwellenkontrastes noch einmal überdacht oder der Bezugsschwellenkontrast an sich genauer bestimmt werden sollte.

Um die Fragestellung zu klären, ob die visuelle Leistungsfähigkeit nach einem Blendimpuls signifikant kleiner ist als ohne Blendung, werden Paarvergleiche aller ISIs zur Situation ohne Blendung einschließlich Bonferroni-Korrektur durchgeführt. Die Bonferroni-Korrektur ist eine einfache jedoch konservative Methode, um der Alphafehlerkumulierung entgegenzuwirken. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6.5 zusammengefasst.

Tabelle 6.5: Ermittelte p-Werte der durchgeführten Paarvergleiche der Situation ohne Blendung im Vergleich zu den Situationen mit Blendung in Abhängigkeit der getesteten Interstimulusintervallen sowie die ermittelte Effektstärke nach Cohen

Paarvergleich der Situation ohne Blendung zu ...	p-Wert
ISI 0 ms	0,000*
ISI 50 ms	0,000*
ISI 100 ms	0,000*
ISI 200 ms	0,000*
ISI 300 ms	0,000*
ISI 500 ms	0,001*
ISI 800 ms	0,001*
ISI 1000 ms	0,007*
Effektstärke nach Cohen [103]	0,59 (großer Effekt)

Anhand dieser Ergebnisse zeigt sich ein signifikanter Einfluss des getesteten Blendimpulses auf die visuelle Leistungsfähigkeit für alle getesteten ISIs. Das bedeutet, dass auch nach 1000 *ms* noch nicht wieder von der ursprünglichen visuellen Leistungsfähigkeit ausgegangen werden kann. Welche weiteren Schlüsse anhand dieser Ergebnisse gezogen werden könne, wird im nächsten Kapitel diskutiert.

6.2.4 ERGEBNISDISKUSSION

Anhand der in Tabelle 6.3 und Abbildung 6.5 gezeigten Ergebnisse lässt sich zeigen, dass die grün-blau gestrichelte Trendlinie dem Verlauf der zu erwartenden Kurve aus Abbildung 5.5 entspricht. Es zeigt sich zudem, dass mit steigendem ISI auch die Anzahl der im Mittel korrekt benannten Buchstaben steigt. Unmittelbar nach der Blendung ist ein deutlich stärkerer Kurvenanstieg zu verzeichnen als im Vergleich zu späteren Zeitabschnitten.

Diese Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass die MeLLI-Methode generell zur zeitlichen Abtastung der visuellen Leistungsfähigkeit in transient statischen Situationen auf Basis der Anzahl korrekt benannter Buchstaben geeignet ist. Der Nachweis gilt folglich als erbracht.

In Bezug auf die, die Blendung beschreibenden Maßzahlen, relative visuelle Leistungsfähigkeit ΔVP und Readaptationzeit ist an dieser Stelle noch eine Beurteilung ausstehend. Ein Mittelwertvergleich der Messwerte für das ISI von 0 *ms* zu denen ohne Blendung ergibt, dass

die visuelle Leistungsfähigkeit aufgrund des Blendimpulses auf 29 % reduziert wurde. Es zeigt sich jedoch auch, dass der zu erwartende Grenzwert der Trendlinie im zeitlich erfassten Bereich bis 1000 ms nach der Blendung nicht mit der Anzahl der im Mittel korrekt benannten Buchstaben ohne Blendung übereinstimmt bzw. große Abweichungen aufweist. Im Vergleich zu der Situation ohne Blendung ist die visuelle Leistungsfähigkeit 1000 ms nach der Blendung im noch um 30 % reduziert. Dies weist darauf hin, dass der Adaptationsprozess nach dieser Zeit noch nicht vollständig abgeschlossen ist. Dies bedeutet wiederum, dass eine Zeitspanne von 1000 ms möglicherweise nicht ausreichend ist, um diesen Prozess bis zur Herstellung der vollständigen visuellen Leistungsfähigkeit mit Blendung im Vergleich zu ohne Blendung abbilden zu können. Folglich fehlt, zur Bestimmung der Readaptationszeit für die im Rahmen dieser Studie untersuchten Situationen der korrekte Bezugswert. Ursache hierfür könnte die Charakteristik der untersuchten Situation an sich sein. Des Weiteren zeigen sich besonders für kleine ISIs deutlich höhere inter- und intraindividuelle Standardabweichungen bzw. Varianzkoeffizienten. Dies ist jedoch ein Indiz dafür, dass die Methodik an sich besonders bei geringen ISIs eine schlechte Ergebnisqualität und folglich ein hohes Verbesserungspotential aufweist. Inwiefern die Qualität der Messergebnisse erhöht und die Streubreite gegebenenfalls reduziert werden können, wird in Kapitel 7 weiter diskutiert.

Außerdem lässt sich anhand des gegenwertigen Kenntnisstandes nicht beurteilen, wie die berechneten prozentualen Werte der reduzierten visuellen Leistungsfähigkeit generell zu interpretieren und hinsichtlich ihrer Kritikalität zu bewerten sind.

6.3 VARIABLE BLENDIMPULSDAUER

Um den Einfluss der Blendimpulsdauer zu eruieren, wird diese in einer zweiten Probandenstudie unter Verwendung der MeLLI-Methode variiert. Es ist davon auszugehen, dass sich der Einfluss auf die visuelle Leistungsfähigkeit mit steigender Blendimpulsdauer erhöht und sich auf die im mittel korrekt benannten Buchstaben als auch auf die Readaptationszeit auswirkt.

Dieser Einfluss soll unter den folgenden Rahmenbedingungen nachgewiesen werden:

- Blendbeleuchtungsstärke $E_B = 24 \text{ lx}$
- Darbietungszeit der Buchstabenmatrix $t_D = 50 \text{ ms}$
- Buchstabenkontrast: individuell bestimmter Bezugsschwellenkontrast K_G

In dieser Studie werden Interstimulusintervalle von 0 ms , 50 ms , 200 ms , 500 ms und 1000 ms untersucht, wobei je Interstimulusintervall fünf Messwerte in randomisierter Reihenfolge erhoben werden. Außerdem wurde die Blendimpulsdauer zwischen 100 ms , 500 ms und 2000 ms variiert.

Es wurde die Anzahl der im Mittel korrekt benannten Buchstaben je ISI bestimmt und über die *Matlab*-basierende GUI festgehalten.

6.3.1 PROBANDENKOLLEKTIV

An dieser Studie haben insgesamt 30 Probanden teilgenommen. 25 davon waren männlich und fünf weiblich im Alter von 19 bis 27 Jahren. Im Mittel waren die Probanden 23,0 Jahre alt. Neun der Probanden nahmen mit Brille und vier mit Kontaktlinsen an der Studie teil.

6.3.2 VERSUCHSABLAUF

In Tabelle 6.2 sind die verschiedenen Durchgänge aufgelistet, die alle Probanden durchlaufen haben.

Tabelle 6.6: Durchgänge, Parameter und Anzahl der Wiederholungen bzw. Durchläufe je Durchgang der Studie zur variablen Blendimpulsdauer; *)wird randomisiert

Durchgang	t_B [ms]	E_B [lx]	t_D [ms]	K_{BM}	ISI [ms]	Wdh.
1	500	24	50	$K_{W,max}$	500	10
2	500	24	50	$K_W = 12$	500	5
3	500	24	50	Var.*	500	16
4 _{100ms} *	100	24	50	K_S	Var.*	15
4 _{500ms} *	500	24	50	K_S	Var.*	15
4 _{2000ms} *	2000	24	50	K_S	Var.*	15
5	–	–	50	K_S	–	5

Im Gegensatz zu den beiden anderen Studien erfolgte die Erhebung der Messdaten in dieser Studie terminiert. Das bedeutet, dass die zu testenden Situationen in Intervallen von 15 Sekunden direkt aufeinander folgend durchgeführt wurden. Dies diente dazu, die Vergleichbarkeit der Ergebnisse innerhalb der Studie zu erhöhen, da mögliche Einflüsse aufgrund unterschiedlicher Zeitabstände zwischen den Situationen reduziert werden können.

Zum Einlernen der Probanden wurde die Buchstabenmatrix zunächst zehn Mal im Kontrast von $K_{W,max} = 18$ und anschließend noch fünf Mal in einem geringeren, aber dennoch gut sichtbaren Kontrast von $K_W = 12$ präsentiert.

Im dritten Durchgang wurde der individuelle Bezugsschwellenkontrast K_S mittels Konstanzmethode bestimmt und für alle weiteren

Durchgänge verwendet. Auch in dieser Studie wurde der individuelle Bezugsschwellenkontrast anhand der 50%-Grenze der maximal korrekt benannten Buchstaben abhängig vom dargebotenen Kontrast bestimmt.

In Durchgang 4 wurden sowohl die Blendimpulsdauer als auch die fünf ISIs variiert. Auf eine vollständige Randomisierung aller zu testenden Situationen wurde aufgrund der damit steigenden Komplexität für den Probanden während der Durchführung bewusst verzichtet. Infolgedessen wurde primär die Reihenfolge der Blendimpulsdauern randomisiert. Je Blendimpulsdauer wurden die fünf gewählten ISIs mit je drei Wiederholungen randomisiert abgefragt. Der Versuchsleiter notierte in allen 45 Situationen die verbal wiedergegebenen Buchstaben in der *Matlab*-GUI notiert.

Im letzten Durchgang wurde die maximale visuelle Leistungsfähigkeit basierend auf fünf Messungen bei gegebener Schwellenkontraststufe ohne Blendung bestimmt.

6.3.3 ERGEBNISSE

Insgesamt ergeben sich pro Proband je Blendimpulsdauer bis zu 15 Messwerte, die probandenspezifisch je ISI gemittelt werden. Die Ergebnisse der sich über alle Probanden ergebenden Mittelwerte und die einfach Standardabweichung sind in Abbildung 6.6 visualisiert. Die Trendlinien dienen lediglich dazu, den Einfluss der Blendimpulsdauer zu verdeutlichen. In Durchgang 5 wurden im Mittel $3,22 \pm$

0,69 Buchstaben korrekt benannt. Dieser Wert wird als maximale visuelle Leistungsfähigkeit angenommen.

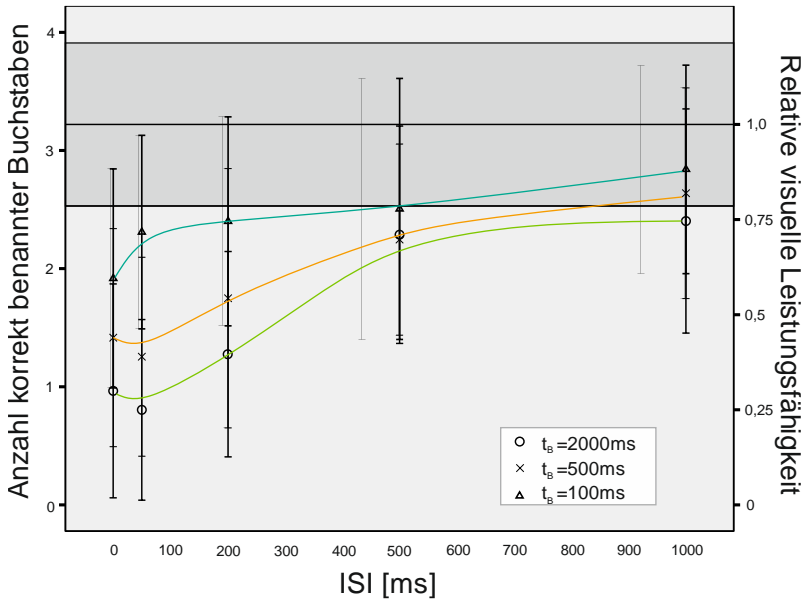


Abbildung 6.6: Linke Skala: im Mittel korrekt benannte Buchstaben aus Durchgang 4 (\circ, \times, Δ) mit Blendung in Abhängigkeit des gewählten ISI; dunkel hinterlegt: Berechneter Mittelwert und einfach Standardabweichung aus Durchgang 5; rechte Skala: relative visuelle Leistungsfähigkeit (normiert auf die maximale visuelle Leistungsfähigkeit aus Durchgang 5)

6.3.4 ERGEBNISDISKUSSION

In dieser Probandenstudie sollte der Einfluss der Blendimpulsdauer auf die visuelle Leistungsfähigkeit und deren Verlauf gezeigt werden. Die Analyse der in Abbildung 6.6 dargestellten Ergebnisse zeigt,

dass bei längeren Blendimpulsdauern von einer stärkeren Reduzierung der relativen visuellen Leistungsfähigkeit auszugehen ist. Zudem ergeben sich tendenziell unterschiedliche Kurvenverläufe vor allem für ISI von bis zu 500 *ms*. Zusammenfassend lässt sich aus den Ergebnissen schlussfolgern, dass Unterschiede hinsichtlich der Blendintensität mithilfe der MeLLI-Methode aufgezeigt werden können.

Wie bereits bei der Studie zuvor, zeigt sich auch hier eine relative hohe Standardabweichung. Dies wird unter anderem auch dadurch begünstigt, dass der Bezugsschwellenkontraststufe auf Basis der Blendimpulsdauer von 500 *ms* bestimmt wurde. In Näherung kann sicherlich davon ausgegangen werden, dass die ermittelte Stufe übertragbar ist. Inwiefern diese Annahme zulässig ist, sollte in einer Folgestudie untersucht werden. Aufgrund der vermuteten Unsicherheit hinsichtlich der Bezugsschwellenkontraststufenbestimmung innerhalb dieser Studie wird an dieser Stelle darauf verzichtet der Frage nachzugehen, inwiefern von einer statistisch signifikanten Reduzierung der visuellen Leistungsfähigkeit ausgegangen werden kann.

Ähnlich wie bereits in Kapitel 6.2.4 beschrieben, ist es auch hier schwierig, die relative visuelle Leistungsfähigkeit ΔVP und die Readaptationszeit zu bestimmen. Anhand der eingezeichneten Trendlinien erscheint nur für die Blendsituation mit $t_B = 100$ *ms* der Mittelwert für die Situation ohne Blendung als Basiswert annehmbar. Dennoch ist der Einfluss auf die visuelle Leistungsfähigkeit sowie der Verlauf der Readaptation deutlich sichtbar. Eventuell ist bei Verwen-

derung der MeLLI-Methode die Definition des Basiswertes bzw. die Beziehung zwischen Situationen mit und ohne Blendung anders zu bewerten. Andererseits könnte es auch sein, dass die Readaptation noch nicht vollständig abgeschlossen ist. Daher sind, wie dies bereits in Kapitel 6.2.4 angedeutet wurde, noch längere ISIs zu testen.

Weitere Erkenntnisse auf Basis dieser Studie werden in Kapitel 7 diskutiert.

6.4 KONTRASTSENSITIVITÄT INNERHALB DER MELLI-METHODE

Die dritte Studie wurde mit dem Ziel durchgeführt, die Kontrastsensitivität innerhalb der MeLLI-Methode aufzuzeigen. Die relativ hohen Standardabweichungen der zuvor beschriebenen Studien zeigen, dass trotz Verwendung des individuellen Bezugsschwellenkontrastes mit merklichen intra- und interpersonellen Unterschieden zu rechnen ist.

Dies erscheint zunächst widersprüchlich, da die Probanden nachweislich alle über eine vergleichbare visuelle Leistungsfähigkeit verfügten. Allerdings wurden nur Mindestvoraussetzungen abgeprüft. So war es den Probanden möglich, in den Situationen ohne Blendung im Mittel nur 3 Buchstaben wiederzugeben, wenn diese im Bezugsschwellenkontrast präsentiert wurden. Gemäß den Studien von Sperling lag das Maximum bei 4,3 [91].

Die Einhaltung des 50 %-Kriteriums bei der Bezugsschwellenbestimmung berücksichtigt einerseits die untere Grenze der visuellen Leistungsfähigkeit eines jeden Probanden. Andererseits führt dies auch dazu, dass die Probanden nur in etwa 50 % der Fälle die Buchstabenmatrix überhaupt erkennen können und sich Anzahl der im Mittel erkannten und korrekt benannten Buchstaben reduziert. Um dieser Problematik entgegenzuwirken, wurde der Bezugsschwellenkontrast im Rahmen der MeLLI-Methode unter Blendeinfluss bestimmt, sodass mit Erkennungsraten von mehr als 50 % zu rechnen ist. Anhand der bisherigen Ergebnisse lässt sich jedoch vermuten, dass dieser Schritt noch nicht ausreichend war, um die Streubreite innerhalb der Studie auf ein akzeptables Maß zu reduzieren. Des Weiteren kann nicht ausgeschlossen werden, dass sich aufgrund des gewählten Kontrastes zur Darbietung der Buchstabenmatrix noch andere bisher unberücksichtigte Effekte überlagern.

Daher wurde die Buchstabenmatrix in der folgenden Studie bewusst im maximal möglichen Kontrast von $K_{W,max} = 18$ dargeboten. Es ist davon auszugehen, dass die Probanden die deutlich überschwellig dargebotene Buchstabenmatrix besser erkennen und intra- sowie interpersonelle Unterschiede eine untergeordnete Rolle spielen. Insgesamt ist eine geringere Streubreite, eine im Mittel höhere Anzahl an korrekt benannten Buchstaben sowie kein Einfluss auf den zeitlichen Verlauf der visuellen Leistungsfähigkeit nach dem Blendimpuls zu erwarten, sodass im Rückschluss eine Aussage über die Kontrastsensitivität und die Qualität der Ergebnisse gemacht werden kann.

In dieser Studie lagen folgende Rahmenbedingungen vor:

- Blendimpulsdauer $t_B = 500 \text{ ms}$
- Blendbeleuchtungsstärke $E_B = 24 \text{ lx}$
- Darbietungszeit der Buchstabenmatrix $t_D = 50 \text{ ms}$
- Buchstabenkontrast $K_{W,max} = 18$

In dieser Studie werden Interstimulusintervalle von 0 ms , 100 ms , 300 ms , 800 ms , 1300 ms und 1800 ms untersucht. Für jedes Interstimulusintervall werden fünf Messwerte erhoben. Wie bereits in den zuvor vorgestellten Studien, wird die Reihenfolge über das *Matlab*-Programm randomisiert. In dieser Studie wurden bewusst noch größere ISIs gewählt, um die Vermutung der ggfs. nicht ausreichenden Readaptationszeit gemäß Kapitel 6.3.4 näher zu untersuchen.

Hierzu wurde die korrekt benannte Anzahl der Buchstaben je ISI bestimmt. Die Eingabe erfolgt über die eigens entwickelte und auf *Matlab*-basierende GUI.

6.4.1 PROBANDENKOLLEKTIV

An dieser Studie haben insgesamt 25 auswertbare Probanden teilgenommen, die sich auf sieben weibliche und 18 männliche Probanden aufteilten. Das Alter der Probanden lag zwischen 18 und 28 Jahren, mit einem Durchschnittsalter von 22,6 Jahren. Bis auf fünf Probanden, die Kontaktlinsen trugen, konnte alle übrigen Probanden die Mindestanforderungen ohne Sehhilfe erreichen.

6.4.2 VERSUCHSABLAUF

Innerhalb dieser Studie absolvierte der Proband die drei unterschiedliche Durchgänge aus Tabelle 6.7. Der erste Durchgang umfasste 30 Durchläufe und diente ausschließlich dazu, den Lerneffekt zu berücksichtigen. Im zweiten Durchgang wurde der Einfluss des Blendimpulses auf die visuelle Leistungsfähigkeit gemessen. Hierzu wurden dem Probanden die sechs zu testenden ISIs jeweils fünfmal randomisiert dargeboten. Anhand der Ergebnisse aus Durchgang 3 sollte auf die maximale visuelle Leistungsfähigkeit ohne Blendeinfluss geschlossen werden. Die Probanden absolvierten zu diesem Zweck weitere 12 Durchgänge.

Tabelle 6.7: Durchgänge, Parameter und Anzahl der Wiederholungen bzw. Durchläufe je Durchgang in der Studie zur Kontrastsensitivität; *)wird randomisiert

Durchgang	t_B [ms]	E_B [lx]	t_D [ms]	K_{BM}	ISI [ms]	Wdh.
1	–	–	50	$K_{W,max}$	–	30
2	500	24	50	$K_{W,max}$	Var.*	30
3	–	–	50	$K_{W,max}$	–	12

6.4.3 ERGEBNISSE

Insgesamt konnten pro Proband in Durchgang 2 je ISI bis zu 30 und in Durchgang 4 bis zu 12 Messwerte erhoben werden. Die Anzahl der korrekt benannten Buchstaben wird der entsprechenden Situation zugeordnet und situationspezifisch und probandenbezogen der

Mittelwert bestimmt. Die gemittelten Werte über alle Probanden, die einfache Standardabweichung und der Varianzkoeffizient für alle Situationen sind in Tabelle 6.8 aufgelistet und in Abbildung 6.7 dargestellt.

Tabelle 6.8: Berechnete Mittelwerte, einfache Standardabweichung und Varianzkoeffizient für die jeweiligen ISIs sowie der Mittelwert und die einfache Standardabweichung für die getestete Situation ohne Blendung (Durchgang 3) aus der Studie zur Kontrastsensitivität

ISI [ms]	Mittelwert	Einfache Standardabweichung	Varianzkoeffizient [%]
0	3,88	0,97	25,0
100	3,84	0,86	22,5
300	3,82	0,82	21,5
800	3,93	0,80	19,8
1300	3,97	0,81	20,5
1800	3,84	0,77	20,1
ohne Blendung	4,08	0,70	17,0

Gemäß den Ergebnissen aus Durchgang 4 wurden im Mittel $4,08 \pm 0,70$ Buchstaben korrekt benannt. Dieser Wert entspricht der maximalen visuellen Leistungsfähigkeit, sodass alle anderen Ergebnisse auf diesen Wert normiert werden.

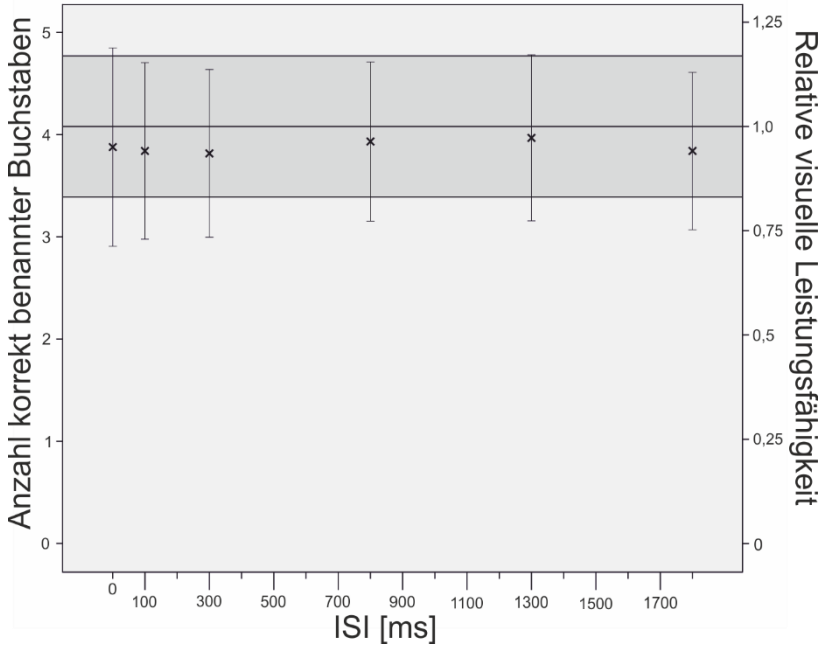


Abbildung 6.7: Linke Skala: Berechnete Mittelwerte und einfache Standardabweichung aus Durchgang 2 (x) mit Blendung in Abhängigkeit des gewählten ISIs; grau hinterlegt: Berechneter Mittelwert und einfache Standardabweichung aus Durchgang 3; rechte Skala: relative visuelle Leistungsfähigkeit (normiert auf die maximale visuelle Leistungsfähigkeit aus Durchgang 3)

6.4.4 ERGEBNISDISKUSSION

Die Studienergebnisse verdeutlichen den Einfluss des gewählten Kontrastes bei der Darstellung der Buchstabenmatrix. Im Gegensatz zu den zuvor vorgestellten Studien zeigt sich bei Verwendung eines deutlich höheren Kontrastes keinerlei Einfluss der Blendquelle auf die visuelle Leistungsfähigkeit.

Darüber hinaus ist die im Mittel erkannte Anzahl der Buchstaben deutlich höher und liegt bei etwa vier Buchstaben. In Bezug auf den Varianzkoefizienten zeigt sich im Vergleich zu den Ergebnissen der Studie zur zeitdiskreten Abtastung eine deutliche Verbesserung.

In dieser Studie scheint, dass als Basiswert der maximalen visuellen Leistungsfähigkeit die Anzahl der im Mittel korrekt benannten Buchstaben angenommen werden können. Die erhobenen Mittelwerte für alle getesteten ISIs sind vergleichbar. Auffällig ist jedoch, dass sowohl der Mittelwert als auch die Standardabweichung für das ISI von 1800 *ms* etwas geringer ausfällt. Statistisch signifikant sind diese Unterschiede jedoch nicht. Um dies bewerten zu können, wurde eine einfaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholungen inklusive Bonferroni-Korrektur durchgeführt. Die Ergebnisse der durchgeführten Paarvergleiche zwischen den verschiedenen ISIs im Vergleich zum angenommenen Basiswert aus Durchgang 3 sind in Tabelle 6.9 zu sehen. Die berechnete Effektstärke nach Cohen [103] weist einen kleinen Effekt auf ($f = 0,21$).

Tabelle 6.9: Paarvergleich zwischen Durchgang 3 und den getesteten ISIs

Paarvergleich zwischen Durchgang 3 und ISI [ms]	Signifikanz*
0	1,00
100	1,00
300	0,85
800	1,00
1300	1,00
1800	1,00
Effektstärke nach Cohen	0,21 (kleiner Effekt)

Insgesamt lässt sich schlussfolgern, dass der gewählte Kontrast einen wesentlichen Einfluss auf die zu erwartenden Messergebnisse hat. Inwiefern die Erkenntnisse dieser und der vorherigen Studien genutzt werden können, um die Testqualität sowie MeLLI-Methode hinsichtlich dieser zu optimieren, wird im nächsten Kapitel erläutert.

Kapitel 7

DISKUSSION

Die im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Ergebnisse zeigen, dass mithilfe der MeLLI-Methode der Einfluss transient statischer Blendsituationen auf die visuelle Leistungsfähigkeit über die Anzahl der korrekt benannten Buchstaben messbar gemacht werden kann. Dennoch sind sowohl die Messergebnisse als auch die methodischen Aspekte aufgrund der teilweise unzureichenden Ergebnisqualität kritisch zu diskutieren. Des Weiteren ist nach aktuellem Stand auch noch nicht aufgezeigt, inwiefern die MeLLI-Methode auf transient dynamische Situationen im Straßenverkehr übertragen werden kann. Diese beiden Punkte werden im folgenden Kapitel thematisiert.

7.1 METHODISCHE ASPEKTE

In diesem Unterkapitel werden verschiedene konzeptionelle Faktoren aufgegriffen und aus wissenschaftlicher Sicht erörtert. Außerdem werden Erkenntnisse und Empfehlungen zusammengefasst, die bisher noch nicht ausreichend beschrieben wurden.

In der jetzigen Form setzt die MeLLI-Methode das sicherere Beherrschen des lateinischen Alphabetes voraus. Für eine Übertragung in

andere Kulturkreise müsste demnach eine Anpassung der Itemmatrix gemäß den Überlegungen aus Kapitel 5.3.2 erfolgen.

7.1.1 ZEITLICHE FAKTOREN

ANZAHL MAXIMALER DURCHLÄUFE

Die Anwendung der MeLLI-Methode setzt eine hohe Konzentrationsfähigkeit sowie eine dauerhafte Aufmerksamkeit der Probanden voraus. Dies führt im Umkehrschluss zu einer erhöhten Belastung der Probanden, aus der eine erhöhte Fehlerquote bzw. eine verminderte Ergebnisqualität resultieren kann. Um dies zu vermeiden, ist die Anzahl der zu testenden Situationen innerhalb einer Studie möglichst gering zu halten. Im Rahmen dieser Arbeit absolvierten die Probanden bis zu 80 Durchläufe innerhalb einer Studie. Während aller durchgeführten Probandenstudien konnte, ggfs. aufgrund der jungen Probandengruppen, bei keinem Probanden ein Leistungsabfall innerhalb der Studie beobachtet werden. In Vorversuchen zu den hier beschriebenen Studien kam es in etwa ab 80 Durchgängen vermehrt zu Anmerkungen von Probanden, dass eine Pause notwendig sei. Bezüglich der maximalen Studiendauer und der zu erwartenden Ergebnisqualität lässt sich schlussfolgern, dass nicht mehr als 80 Durchgänge am Stück absolviert werden sollten. Dies könnte zu einem Leistungsabfall führen, sodass eine Verschlechterung der Ergebnisqualität die Folge wäre.

Um dem Problem der maximalen Anzahl an Durchläufen entgegenzuwirken, wäre es denkbar, die zeitdiskrete Abtastung der visuellen Leistungsfähigkeit sektionsweise über mehrere Probandengruppen zu verteilen. Dies setzt insgesamt ein größeres Probandenkollektiv, bei dafür gleichbleibender Belastung der Probanden, voraus. Zwei aneinandergrenzende Gruppen sollten sich bei ein oder zwei ISI-Werten überschneiden, sodass ein gruppenspezifischer Offset erkannt und so angepasst werden kann, dass daraus ein stetiger Kurvenverlauf resultiert.

Des Weiteren wäre es möglich eine oder gezielte Pausen in den Versuchsablauf einzuplanen. Aufgrund der Randomisierung sollte sich deren Einfluss im Vergleich zur Ermüdung weniger bemerkbar machen.

AUFMERKSAMKEIT

Bei der Validierungsstudie zur Kontrastsensitivität und einem ISI von 1800 *ms* war in einigen Fällen ein geringer, jedoch nicht signifikanter Leistungsabfall zu verzeichnen. Es lässt sich vermuten, dass bei zu langen ISIs die Aufmerksamkeit der Probanden nachlässt. Einige Probanden bestätigten dies und gaben an, dass sie in diesen Situationen keine Matrixpräsentation mehr erwartet und den Blick abgewandt haben. Für den Fall, dass lange ISIs getestet werden sollen, ist darauf entweder explizit in der Instruktion hinzuweisen oder die Anzahl hoher ISIs innerhalb der Studie zu erhöhen.

TERMINIERUNG

Ein weiterer Faktor, der an dieser Stelle noch einmal aufgegriffen werden sollte, ist die Vorgehensweise aus der Studie zur variablen Blendimpulsdauer. In dieser Studie haben die Probanden die zu testenden Situationen terminiert durchlaufen. Der zeitliche Abstand zwischen den jeweiligen Situationen betrug 15 Sekunden. Je nach Blendniveau ist die Zeit zwischen den Situationen anzupassen. Generell ist die terminierte Vorgehensweise, wenn möglich, beizubehalten, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu verbessern.

ADAPTATIONSZEIT

Darüber hinaus ist auch der Einfluss der Adaptationszeit nicht zu vernachlässigen. Obwohl alle Probanden das optometrische Screening durchlaufen, die Mindestanforderungen erreicht und folglich über eine vergleichbare visuelle Leistungsfähigkeit verfügen, spielen zeitliche Aspekte bzw. das individuelle Adaptationsverhalten während des Screening nur eine untergeordnete Rolle. Ferner ist nicht auszuschließen, dass das Auge während der Durchführung der Studie nachadaptiert. Eine terminierte und wiederholende Bestimmung des individuellen Bezugsschwellenkontrastes könnte an der Stelle Abhilfe schaffen, führt jedoch gleichzeitig zu einer deutlichen Anhebung des benötigten zeitlichen Rahmens zur Durchführung einer Studie.

7.1.2 ITEMPOOL

In allen beschriebenen Studien wurde in der schriftlichen Instruktion nicht explizit auf den verwendeten Itempool hingewiesen. Es könnte allerdings in Erwägung gezogen werden, den Itempool innerhalb der Versuchsinstruktion konkret zu benennen. Somit hätten Probanden, die das erste Mal an einer Studie teilnehmen und denen der Itempool nicht bekannt ist die gleiche Ausgangslage wie Probanden, die schon zum wiederholten Mal teilnehmen. Fraglich bleibt, inwiefern die Probanden sich diesen Itempool tatsächlich merken werden und merken können. Unter Umständen resultieren aus dieser Vorgehensweise höhere Ratewahrscheinlichkeiten oder andere Effekte, die bisher noch nicht berücksichtigt werden mussten. Bisher lässt sich jedoch festhalten, dass die Probanden generell nur in Einzelfällen Buchstaben außerhalb des Itempools nannten. Demzufolge wird es nicht als notwendig erachtet, den Itempool vorab explizit zu benennen.

Des Weiteren ist zu diskutieren, inwieweit der ausgewählte Itempool überhaupt geeignet ist. Er ist dann geeignet, wenn gezeigt werden kann, dass alle Buchstaben innerhalb des Itempools in etwa gleich gut erkannt werden konnten. Daher wurde in der Studie zu den variablen Blendimpulsdauern auch die Anzahl der korrekt benannten Buchstaben im Verhältnis zur deren Darbietungshäufigkeit aufgenommen. In den beiden anderen Studien wurde die Darbietungshäufigkeit nicht dokumentiert, da diese zum Versuchszeitpunkt noch als nicht relevant betrachtet wurde. In Abbildung 7.1 sind Boxplots zu

den Wahrscheinlichkeiten der korrekt benannten Buchstaben im Verhältnis zu deren Darbietungshäufigkeit in aufsteigender Reihenfolge aufgelistet. Die zugehörigen Mittelwerte und Mediane sind im Anhang B.4 zu finden. Anhand dieser ist ersichtlich, dass sich die Mediane der Erkennungswahrscheinlichkeiten der Buchstaben *K* und *T* die größten Unterschiede aufweisen. Wie ein Vergleich von Abbildung 5.3. und Abbildung 7.1 zeigt, wurde der Buchstabe *K* anhand der Ergebnisse der hier zugrundeliegenden Studie im Vergleich zu den Ergebnissen von Hedin und Olsson [18] deutlich seltener korrekt erkannt. Im Vergleich zu den Studien von Hedin und Rassow, zitiert in [18, 20, 98], kann aber festgestellt werden, dass die Erkennbarkeitswahrscheinlichkeit der einzelnen Buchstaben und deren Ranking in großen Teilen Übereinstimmungen aufweisen. Insgesamt scheinen die Ergebnisse vergleichbar zu sein. Ob der Buchstabe *K* gänzlich aus dem Itempool ausgeschlossen werden sollte, kann aufgrund der tendenziell widersprüchlichen Ergebnisse noch nicht abschließend geklärt werden. Ein Austausch gegen einen anderen Buchstaben wäre denkbar, ersatzloses Streichen sollte hinsichtlich der Größe des Itempools vermieden werden.

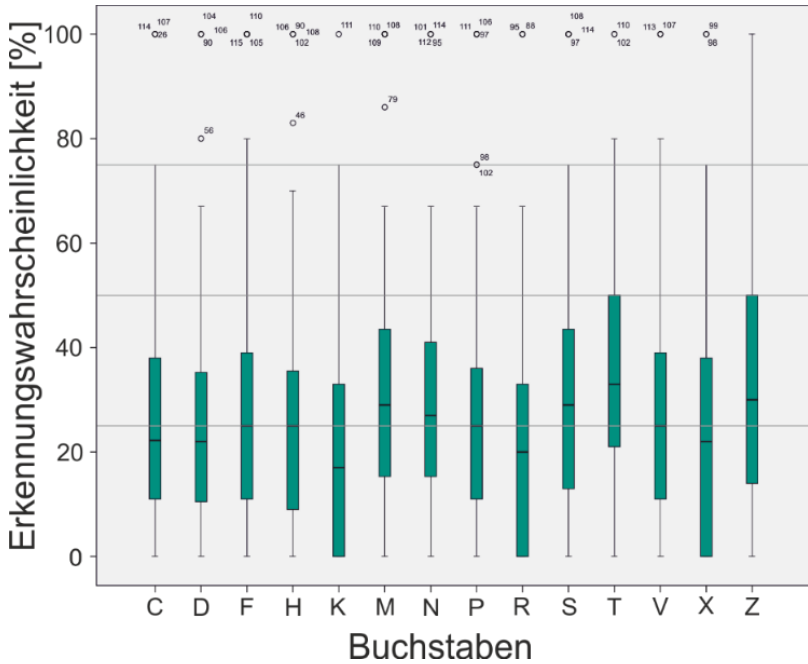


Abbildung 7.1: Erkennbarkeitswahrscheinlichkeiten der Buchstaben aus dem Itempool aus den Durchgängen 4 und 5 der Studie zur variablen Blendimpulsdauer

In Bezug auf die MeLLI-Methode kann zusammenfassend geschlussfolgert werden, dass der hier verwendete Itempool methodisch geeignet ist. Anhand der Erkennungswahrscheinlichkeiten zeigen sich zwar einerseits Unterschiede, sodass der Ausschluss einzelner Buchstaben sicherlich berechtigt ist. Andererseits sollte aber die Anzahl der im Itempool verfügbaren Buchstaben zugunsten der Ratewahrscheinlichkeit nicht weiter reduziert werden, da sich dies negativ auf die Testqualität auswirken würde.

7.1.3 KONTRASTSENSITIVITÄT

Wie bereits in Kapitel 6.4 aufgezeigt, hat die Wahl des Kontrastes ,in welcher die Buchstaben dargestellt werden, einen deutlichen Einfluss auf die Anzahl der korrekt benannten Buchstaben. Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Begriff der visuellen Leistungsfähigkeit um den Faktor der Informationsmenge erweitert. Von welcher Gewichtung der Faktoren Visus, Kontrast und Informationsmenge ausgegangen werden kann, wurde bisher jedoch nicht weiter erläutert. Anhand der, in den Probandenstudien aufgenommenen, Daten sollen diese Faktoren im Kontext der Gewichtung und der Kontrastsensitivität in diesem Kapitel diskutiert werden.

In allen Studien wurden Daten zu Blendimpulsdauern von 500 *ms* und einer Beleuchtungsstärke von 24 *lx* erhoben. Diese Ergebnisse sind in Abbildung 7.2 in Hinblick auf die Kontrastsensitivität dargestellt. In den Studien zur zeitdiskreten Abtastung aus Kapitel 6.2 und variablen Blendimpulsdauer aus Kapitel 6.3 wurde die Buchstabenmatrix während des Versuchs im individuell bestimmten Bezugsschwellenkontrast dargeboten. Innerhalb der Studie zur zeitdiskreten Abtastung erfolgte dies mithilfe der Grenzmethode und ergab einen mittleren Bezugsschwellenkontrast von $K_{W,zeitdiskret} = 1,2$. Im Gegensatz dazu wurde in der Studie zur variablen Blendimpulsdauer ein mittlerer Bezugsschwellenkontrast von $K_{W,blendimpuls} = 2,1$ auf Basis der Konstanzmethode ermittelt. In der dritten Studie, welche in Kapitel 6.4 beschrieben wurde, wurden die Buchstaben im technisch maximal möglichen einem Kontrast von $K_{W,max} = 18$ dargeboten.

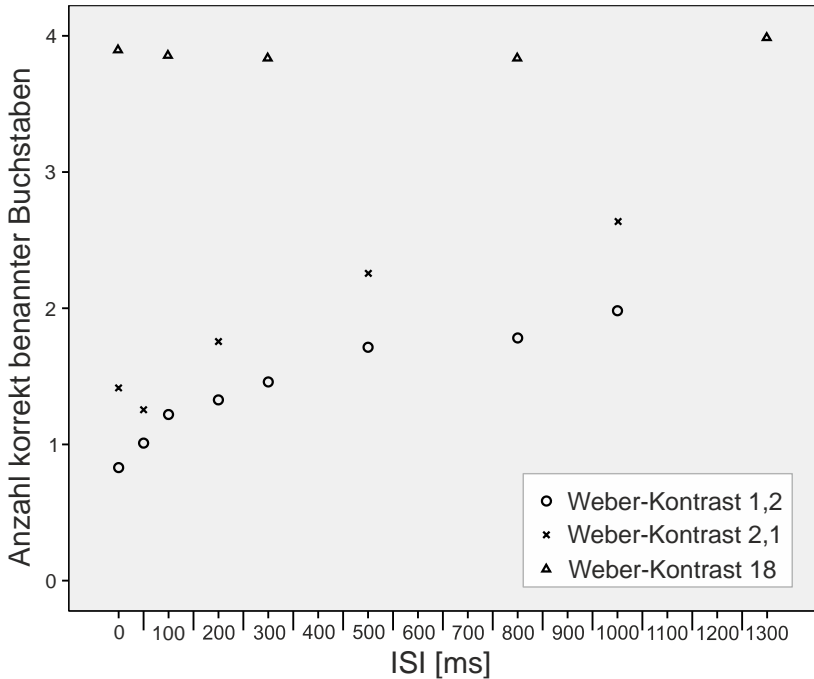


Abbildung 7.2: Anzahl der im Mittel korrekt benannten Buchstaben in Abhängigkeit der Interstimulusintervalle (ISIs) und dargebotenen Kontraste der Buchstaben $K_{W,zeitdiskret} = 1,2$; $K_{W,Blendimpuls} = 2,1$ und $K_{W,max} = 18$ bei einer Blendimpulsdauer t_B von 500 ms und einer Beleuchtungsstärke E_B von 24 lx;

Zunächst ist an dieser Stelle anzumerken, dass der Unterschied zwischen den Kontraststufen bei der Bestimmung des Bezugsschwellenkontrastes auf zwei Faktoren zurückzuführen ist. Einerseits kann der Unterschied mit den verschiedenen Methoden zur Bezugsschwellenkontrastermittlung begründet werden und andererseits mit der Tatsache, dass die Anzahl der Durchläufe innerhalb der Studie relativ gering war. Wären mehr Durchläufe von den Probanden absolviert

worden, hätte der Bezugsschwellenkontrast präziser bestimmt werden können. Dies hätte jedoch auch zu einer Erhöhung des notwendigen zeitlichen Rahmens geführt, woraus wiederum eine erhöhte Belastung der Probanden und eine schlechtere Ergebnisqualität resultieren kann.

Des Weiteren ist fraglich, inwiefern die etablierte Definition des 50 %- Kriteriums der maximal korrekt benannten Buchstaben zur Bestimmung des Bezugsschwellenkontrastes im Rahmen der MeLLI-Methode genutzt werden sollte. Unter Umständen wäre es denkbar, die Bezugsschwellenkontraststufe so zu wählen, dass die Probanden in Blendsituationen bei einem ISI von 0 ms gerade so keine Buchstaben mehr erkennen, was einem 0 %-Kriterium entsprechen würde. Dies birgt allerdings die Gefahr, dass der Reiz deutlich zu unterschwellig dargeboten wird. Möglicherweise liegt das optimale Kriterium auch zwischen 0 % und 50 %. Auf Basis der bisherigen Ergebnisse kann hier keine finale Aussage gemacht werden.

Anhand der in Abbildung 7.2 dargestellten Ergebnisse lässt sich zeigen, dass der Kontrast, in welchem die Buchstaben dargestellt werden, einen deutlichen Einfluss auf die im Mittel korrekt benannten sowie die wohl maximale Anzahl der korrekt benannten Buchstaben hat. Es scheint, als ob die beiden Kurven für die Graustufen 42 und 51 gegen ein Maximum von 2 bzw. 2,6 korrekt benannte Buchstaben laufen. Bei der Graustufe von 255 hingegen liegt das Maximum bei etwa 4. Des Weiteren zeigt sich bei den beiden niedrigen Graustufen bei steigendem ISI auch ein Anstieg der korrekt benannten Buchsta-

ben. Außerdem lassen sich Unterschiede hinsichtlich des Kurvenverlaufs der beiden unteren Kurven vermuten. Dies kann jedoch aufgrund der geringen Anzahl an Stützstellen nicht ohne weitere Studien bestätigt werden.

Für den Fall, dass sich die Messauflösung bedingt durch die Wahl des Kontrastes nachweislich reduziert, könnte in Erwägung gezogen werden, verschiedene Buchstaben oder Buchstabengruppen innerhalb der Matrix in unterschiedlichen Kontrasten darzustellen. Die Matrixgröße müsste in diesem Zusammenhang angepasst und die Position der kontrastvariierten Buchstaben randomisiert werden. Der Vorteil dieser Vorgehensweise läge darin, dass innerhalb eines Durchlaufs verschiedene Kontraste abgefragt und so die Problematik der Kontrastsensitivität eingeschränkt werden könnte.

Aus rein methodischen Aspekten lässt sich festhalten, dass bei Anwendung der MeLLI-Methode der Kontrast zur Darstellung der Buchstaben eine große Rolle spielt und indirekt die wahrnehmbare Informationsmenge beeinflusst. Es wäre folglich auch denkbar den Kontrast als Bestandteil der MeLLI-Methode fest vorzugeben. Die Festlegung eines geeigneten Kontrastes ist ohne weitere Studien jedoch nicht möglich.

Abschließend sei angemerkt, dass der Visus innerhalb der MeLLI-Methode nicht direkt untersucht wurde. Aufgrund der ausreichend groß gewählten Buchstaben ist diesem insgesamt nur eine untergeordnete Rolle beizumessen.

7.1.4 ERGEBNISQUALITÄT UND MESSAUFLÖSUNG

Wie bereits angedeutet, beeinflusst die gewählte Kontraststufe zur Darbietung der Buchstabenmatrix die Anzahl der im Mittel maximal korrekt benannten Buchstaben. Dieser Wert entspricht im Grunde genommen der Messauflösung der MeLLI-Methode. Eine Reduzierung der Kontraststufe würde also dazu führen, dass sich auch die Messauflösung reduziert. Dies ist selbstverständlich nicht gewünscht. Hinzu kommt, dass entsprechend der oben angeführten Diskussion über die Höhe des prozentualen Kriteriums zur Kontraststufenschwelle, die Kontraststufe mit 0%-Kriterium noch weiter verringern würde. Dies würde den vermuteten Effekt einer Reduzierung der Messauflösung jedoch noch weiter verstärken. Andererseits könnte das 0%-Kriterium zu einer Verbesserung der Messwertqualität beitragen und die Standardabweichung im Vergleich zum 50%-Kriterium verringern. Definitionsbedingt führt die Verwendung des 50%-Kriteriums gewissermaßen zu einer erhöhten Standardabweichung. Zum jetzigen Zeitpunkt ist es auf Basis der vorliegenden Daten nicht möglich, an dieser Stelle fundierte Aussagen zu treffen. Es wird empfohlen, diese Aspekte weiter zu untersuchen.

Bis dato unberücksichtigt blieb die Dauer der Matrixdarbietung, die aus messtechnischer Sicht die Integrationszeit darstellt. Gemäß den Untersuchungen von Sperling [91] und Yan [82] zeigt sich, dass auch Darbietungszeiten im Bereich weniger *ms* sensorisch erfasst werden können. Folglich wäre es denkbar, die Dauer der Matrixdarbietung

zugunsten der zeitlichen Messauflösung zu verkürzen. Ob das gewünschte Ziel mithilfe dieser Vorgehensweise ohne weitere Anpassungen erreicht werden kann, ist fraglich, sollte aber untersucht werden.

7.1.5 MAßZAHLEN RELATIVE VISUELLE LEISTUNGSFÄHIGKEIT UND READAPTATIONSZEIT

Wie bereits in der Ergebnisdiskussion der durchgeführten Studien angedeutet wurde, ist es aufgrund der sehr langen Dunkeladaptation von bis zu einer Stunde fraglich den Bezugswert ohne Blendung als Referenzwert für den Adaptationszeitraum einiger Sekunden heranzuziehen. Die direkte Verknüpfung der maximalen visuellen Leistungsfähigkeit mit der Situation ohne Blendung erscheint bei genauer Betrachtung der Messergebnisse, wie in Abbildung 7.3 zu sehen, nicht korrekt. Abbildung 7.3 zeigt die Ergebnisse der Blendsituation mit der Blendimpulsdauer t_B von 2000 ms aus der Studie zur variablen Blendimpulsdauer. Die Trendlinie zeigt für große ISIs eine deutliche Abweichung zum erwarteten Grenzwert, dem Wert der maximalen visuellen Leistungsfähigkeit. Inwiefern diese Interpretation gerechtfertigt ist, kann aktuell nicht beurteilt werden. Unter Umständen ist die hohe Streuung der Messwerte für die Abweichung zum erwartenden Grenzwert verantwortlich.

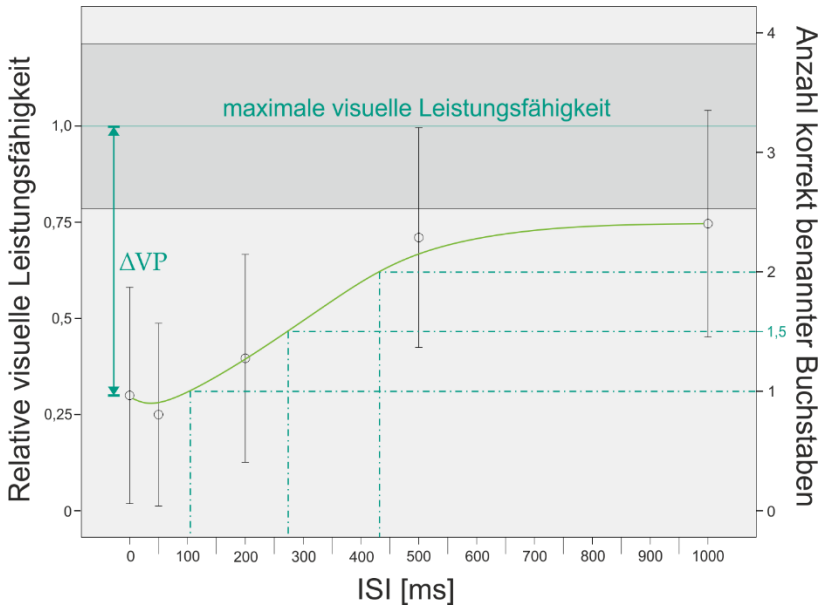


Abbildung 7.3: Visualisierung der zeitdiskreten Abtastung und der Bestimmung der relativen visuellen Leistungsfähigkeit ΔVP am Beispiel der Messergebnisse der Studie zur variablen Blendimpulsdauer für eine Blendimpulsdauer $t_b = 2000 \text{ ms}$

Allerdings ist es mit der MeLLI-Methode möglich, sowohl den Einfluss auf die visuelle Leistungsfähigkeit ΔVP als auch deren zeitlichen Verlauf anhand der Anzahl korrekt benannter Buchstaben messbar zu machen. Dies ist in Abbildung 7.3 noch einmal verdeutlicht. Inwieweit aus dem zeitlichen Verlauf der visuellen Leistungsfähigkeit auf die Readaptationszeit geschlussfolgert werden kann, ist noch nicht abschließend geklärt. Gegebenenfalls könnte die Definition eines geeigneten prozentualen Kriteriums hier Abhilfe schaffen.

Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass der zeitliche Verlauf und die Readaptationszeit in einer engen Beziehung stehen.

Die augenscheinlich vorliegenden Unterschiede zwischen ermittelten und erwarteten Werten können auf die Kontrastsensitivität und die Ermittlung des Bezugsschwellenkontrastes zurückgeführt werden. Zudem hat mutmaßlich auch die Tatsache, dass das Probandenkollektiv klein und die Anzahl der Wiederholungen je ISI verhältnismäßig gering war, zu einer relativ hohen einfachen Standardabweichung geführt. Daher sollte das Ziel sein, die Validität der Messergebnisse vor allem aus methodischer Sicht zu verbessern.

7.2 ÜBERTRAGUNG AUF TRANSIENT DYNAMISCHE BLENDSITUATIONEN

Entsprechend der definierten Anforderungen war eine Messmethode zu entwickeln, die in transient dynamischen Blendsituationen angewandt werden kann. Die in Kapitel 6 beschriebenen Probandenstudien zur Validierung der entwickelten Methode beziehen sich jedoch ausschließlich auf das Worst-Case-Szenario innerhalb transient dynamischer Blendsituationen. In diesen Situationen konnte ein Einfluss der Blendquelle auf die visuelle Leistungsfähigkeit mithilfe der MeLLI-Methode messbar gemacht werden.

Bisher unberücksichtigt blieben einerseits die Bewegung der Blendquelle innerhalb des Gesichtsfeldes und andererseits die zeitliche Abhängigkeit der Beleuchtungsstärke sowie die Beleuchtungsstärke

selbst. All diese Faktoren können zu einer Herabsetzung der Sensitivität der Messmethode führen. Bewegt sich die Blendquelle innerhalb des Gesichtsfeldes in Richtung Peripherie, während die Blickrichtung des Beobachters unverändert bleibt, ist aufgrund der Winkelabhängigkeit gemäß Formel (2.2 mit einem geringeren Einfluss auf die visuelle Leistungsfähigkeit zu rechnen. Gleiches gilt bei zeitlicher Variation der Beleuchtungsstärke. Die Ergebnisse aus Kapitel 3.3 haben gezeigt, dass sich die Blendbeleuchtungsstärke in Begegnungssituationen im Straßenverkehr über die Zeit verändert. In den durchgeführten Studien wurde der in den Messfahrten ermittelte Maximalwert jedoch als zeitlich konstant angenommen.

Um weitere Effekte oder Wechselwirkungen verschiedener Effekte auszuschließen, wird ein stufenweises Vorgehen empfohlen. In welcher Reihenfolge die Schritte durchgeführt werden, ist aus methodischer Sicht unerheblich. Das im Folgenden beschriebene Vorgehen ist aus ökonomischer Sicht vorteilhafter und wird daher favorisiert.

Wird zunächst der Einfluss der Bewegung innerhalb des Gesichtsfeldes im Labor evaluiert, kann die zweite Studie zur Berücksichtigung der zeitlichen Abhängigkeit der Beleuchtungsstärke direkt im Feld durchgeführt werden. Für die Laborstudie kann der bestehende Versuchsaufbau entsprechend angepasst weiterverwendet werden. Die Position des Monitors zur Darbietung der Buchstaben sollte beibehalten werden. Ergänzend wäre es sinnvoll ein Eye-Tracking-System zu integrieren, damit die Blickrichtung der Probanden aufgenommen und nachvollzogen werden kann. Dadurch wäre es möglich sowohl

die Veränderung von Blickstrategien oder mögliche Verpasser aufzuzeigen. Diese Argumentation kann auch auf die im Anschluss durchzuführende Feldstudie übertragen werden. Diese ist so zu konzeptualisieren, dass die Begegnungssituationen reproduzierbar wiederholt werden können. Des Weiteren sollte zusätzlich die Beleuchtungsstärke bspw. über ein an der Kopfstütze befestigtes Beleuchtungsstärkemessgerät gemessen und der zeitliche Verlauf aufgezeichnet werden. Die Buchstabenmatrix sollte im direkten Blickfeld, bestenfalls im Sichtfeld des Fahrers präsentiert werden. Hierzu könnte ein Head-Up-Display genutzt werden.

Wird hingegen erst der Einfluss des zeitlichen Verlaufs der Beleuchtungsstärke im Labor untersucht, ist noch eine weitere Laborstudie notwendig, um den Einfluss der Ortsveränderung valide zu bestimmen. Im Straßenverkehr ist es nicht möglich, diesen Parameter mit der notwendigen Genauigkeit reproduzierbar abzubilden. Die Verwendung dieser Variante führt bei Übertragung der transient statischen in die transient dynamische Blendsituation sicherlich zu qualitativ vergleichbaren Ergebnissen, die allerdings mit deutlich mehr Aufwand verbunden ist.

Bevor die soeben beschriebenen Teilstudien durchgeführt werden, ist die Problematik der Kontrastsensitivität bei Verwendung der MeLLI-Methode noch zu lösen. Die Frage nach dem richtigen Kriterium zur Bezugsschwellenkontrastbestimmung kann im Rahmen dieser Arbeit noch nicht beantwortet werden.

Andererseits kann der Kontrast auch beliebig festgelegt werden, so dass die Buchstabenmatrix ausschließlich in diesem Kontrast dargeboten wird. Auch so kann der Einfluss der Blendquelle auf die Visuelle Leistungsfähigkeit messbar gemacht werden, wie bereits in der Studie zur Kontrastsensitivität in Kapitel 6.4 gezeigt werden konnte. In dieser Studie wurden die Buchstaben im technisch maximal möglichen Kontrast angezeigt. Übertragen auf den Anwendungsfall im nächtlichen Straßenverkehr entspricht dies gewissermaßen einem gut sichtbaren Objekt, wie beispielsweise einem Radfahrer mit Warnweste oder einem Fußgänger in heller oder gar retroreflektierender Kleidung. Gemäß den Studienergebnissen war kein Einfluss auf die Erkennbarkeit bei dem technisch maximal möglichen Kontrast sichtbar. Folglich hätten auch die eben beschriebenen Verkehrsteilnehmer auf jeden Fall ohne Probleme erkannt werden können. Nehmen der Radfahrer und der Fußgänger hingegen mit dunkler und weniger auffälliger Kleidung am nächtlichen Verkehr teil, ist der Kontrast zwischen ihnen und der Umgebung deutlich geringer. Dies kann in einer Blendsituation, wie bereits in Abbildung 7.2 gezeigt, dazu führen, dass sie später und schlimmstenfalls gar nicht erkannt werden können. Eine solche Situation könnte mithilfe der MeLLI-Methode analysiert und evaluiert werden.

Des Weiteren wurde auch gezeigt, dass die Methode besonders für kleine ISIs eine hohe Sensitivität aufweisen muss, da der Anstieg der visuellen Leistungsfähigkeit direkt nach der Blendung am größten ist. Dieser Bereich sollte auch den transient dynamischen Situationen höher abgetastet werden.

Kapitel 8

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In diesem Kapitel werden die wesentlichen Aspekte der Methodenentwicklung und deren Validierung, zusammengefasst. Auf Basis der Validierung werden im Ausblick weitere Verbesserungsmöglichkeiten aufgezeigt und die sich ergebenden Anwendungspotentiale der neuen Methode diskutiert.

8.1 ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen dieser Arbeit ist es gelungen, eine Messmethode zu entwickeln, mit welcher der negative Einfluss auf das Sehvermögen aufgrund von Blendung durch Gegenverkehr im nächtlichen Straßenverkehr des Fahrers objektiv und qualitativ ermittelt werden kann.

Als Grundlage wurde die zeitliche und örtliche Charakteristik möglicher Blendsituationen analysiert. Die Datenerfassung basiert neben einer reinen Literaturrecherche auch auf Labormessungen und Messfahrten im Straßenverkehr. Es zeigte sich, dass die Fahrzeugdynamik ein wesentlicher Einflussparameter ist. Zur charakteristischen Beschreibung werden die Parameter Blendimpulsdauer und Blendbeleuchtungsstärke definiert. Die Blendimpulsdauer beschreibt die

Dauer, bei der die gesetzlich zulässigen Lichtstärken im Bereich der Position des Fahrerauges überschritten werden. Daher wird als Bezugspunkt in den gesetzlichen Regelungen [35 bis 38] der Punkt B50L herangezogen, welcher der Position des Fahrerauges entsprechen soll. Als Blendbeleuchtungsstärke wird die Beleuchtungsstärke am Auge des Fahrers festgelegt, die bei einer nächtlichen Begegnungssituation durch den Gegenverkehr maximal erreicht werden kann.

So können aufgrund von Schwankungen der Hell-Dunkel-Grenze in 25 m Entfernung Blendbeleuchtungsstärken von bis zu 25 lx entstehen. Verfügt das Fahrzeug über ein Assistenzsystem, welches automatisch von Fern- auf Abblendlicht schaltet oder erkannte Verkehrsteilnehmer ausblendet, ist mit Latenzzeiten im Bereich zwischen 100 ms und 300 ms zu rechnen. Aus Messfahrten konnten Blendimpulsdauern zwischen 200 ms und 400 ms nachgewiesen werden. Aus diesen Daten lässt sich die Blendung durch Gegenverkehr im nächtlichen Straßenverkehr mit Blendimpulsdauern kleiner als 500 ms und Blendbeleuchtungsstärken von maximal 25 lx abschätzen.

Zur objektiven Bewertung dieser Blendsituationen wurden die Maßzahlen relative visuelle Leistungsfähigkeit ΔVL und Readaptationszeit t_R abgeleitet. Auf Basis der Einflussfaktoren *Position im Gesichtsfeld* und *Blendimpulsdauer* wurde eine Kategorisierung der Blendsituationen vorgenommen, bereits etablierte Bewertungsmethoden zugeordnet und deren Anwendungsbereiche aufgezeigt.

Aufgrund der hohen Dynamik und Komplexität im nächtlichen Straßenverkehr sind die zu untersuchenden Situationen in die Kategorie *transient dynamisch* einzuordnen. Diese zeichnen sich durch sehr kurze Blendimpulsdauern bei gleichzeitiger schneller Positionsänderung der Blendquelle innerhalb des Gesichtsfeldes aus. Es zeigt sich, dass keine der etablierten Methoden zur objektiven Bewertung von Blendung durch Gegenverkehr genutzt werden kann

Auf Basis einer Schwächen- und Grenzen-Analyse der vorhandenen Bewertungsmethoden wurde eine Messmethode zur objektiven Bewertung der transient dynamischen Blendsituationen mittels Buchstabenerkennung entwickelt, engl. Masurement of glaring Light stimuli with Letter Identification, kurz MeLLI-Methode.

In dieser Methode wird eine 2x4-Buchstabenmatrix für 50 ms präsentiert. Der Beobachter hat die Aufgabe, möglichst viele der präsentierten Buchstaben wiederzugeben. Vorteil dieser Methode ist, dass durch die Variation der Interstimulusintervalle, der Zeit zwischen Ausschalten der Blendquelle und Darbietung der Buchstabenmatrix, der zeitliche Verlauf der relativen visuellen Leistungsfähigkeit nach dem Blendimpuls diskret abgetastet werden kann.

Die Methode konnte mittels Probandenstudien erfolgreich validiert werden. Aufgrund der unbekanntenen Einflüsse von zeitlicher und örtlicher Dynamik der Blendquelle wurde auf die Variation des Ortes innerhalb des Gesichtsfeldes verzichtet. Es wurde ein statisches Worst-Case-Szenario umgesetzt, in dem die Blendquelle in der Versuchsumgebung in Anlehnung an den Punkt B50L positioniert ist.

Es konnte gezeigt werden, dass eine zeitliche Abtastung der relativen visuellen Leistungsfähigkeit mithilfe der MeLLI-Methode möglich ist. Des Weiteren konnte auch der Einfluss der Blendimpulsdauer und des Kontrastes der dargebotenen Buchstaben quantitativ gezeigt werden. Die Ergebnisse weisen deutlich darauf hin, dass aufgrund der großen Streuung der Daten einige Parameter und Annahmen aus methodischer Sicht anzupassen sind. Hierbei hat die Wahl des Kontrastes zur Darstellung der Buchstabenmatrix vermutlich den größten Einfluss.

8.2 AUSBLICK

Auf Grundlage der dargestellten Ergebnisse besteht weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich der Bestimmung der Kontrastsensitivität. Es zeigte sich, dass die Sensitivität der relativen visuellen Leistungsfähigkeit bei sehr großen Kontrasten nicht mehr ausreichend gegeben ist. Ob diese geringe Sensitivität in der Methode begründet oder tatsächlich vorhanden ist, kann anhand der vorliegenden Studien nicht entschieden werden.

Für eine Anwendung der Methode auf reale transient dynamische Blendsituationen im Straßenverkehr bedarf es zudem weiterer Forschung zur Klärung des Einflusses der zeitlichen und örtlichen Variation innerhalb der Blendsituation. In den hier dargestellten Studien konnte nur eine Konzeptüberprüfung unter eingeschränkter Komplexität erfolgen. Wie beschrieben, wurde weder die Position der

Blendquelle noch der zeitliche Verlauf der Blendbeleuchtungsstärke variiert.

Zudem ist in diesem Zusammenhang zu klären, ab welcher gemessenen visuellen Leistungsfähigkeitsminderung mit einer Beeinträchtigung der Verkehrssicherheit zu rechnen ist. Wenn es gelingt, diese Korrelation herzustellen und die Aussagekraft der MeLLI-Methode weiter validiert ist, können Untersuchungen im realen Straßenverkehr durchgeführt werden. Mithilfe der MeLLI-Methode wäre es so erstmals möglich, die transient-dynamische Blendung, wie sie im Straßenverkehr vorkommt, objektiv zu bewerten.

Bedingt durch auftretende Spiegelungen der Sonne an Glasflächen oder Gebäudefassaden etc. besteht auch Bedarf, den Einfluss von Blendung auf die visuelle Leistungsfähigkeit und das damit verbundene Sicherheitsrisiko am Tag zu untersuchen. Ferner ist zu prüfen, inwieweit sich die MeLLI-Methode dazu eignet, den Verlauf der visuellen Leistungsfähigkeit in langandauernden Blendsituationen, d.h. größer als 500 *ms*, abzubilden.

Insgesamt zeigt sich, dass die MeLLI-Methode die Grundlage für weitere vielfältige Forschungsfragen in den verschiedensten Bereichen bildet, wobei eine applikationsspezifische Anpassung obligatorisch ist.

III LITERATURANGABEN

- [1] Trotter, J.: Das Auge. Ein Handbuch für Augenoptiker. Heidelberg: DOZ-Verl; DOZ-Verl. 2004
 - [2] Sprute, J. H.: Entwicklung lichttechnischer Kriterien zur Blendungsminimierung von adaptiven Fernlichtsystemen, Technische Universität Darmstadt Dissertation. Darmstadt 2012
 - [3] Totzauer, A.: Kalibrierung und Wahrnehmung von blendfreiem LED-Fernlicht. Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2013. Darmstädter Lichttechnik. München: Utz 2013
 - [4] Ernst, H.: Grundlagen und Konzepte der Informatik. Eine Einführung in die Informatik ausgehend von den fundamentalen Grundlagen. Wiesbaden, s.l.: Vieweg+Teubner Verlag 2000
 - [5] Schmidt-Clausen, H.-J. u. Freiding, A.: Sehvermögen von Kraftfahrern und Lichtbedingungen im nächtlichen Straßenverkehr. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen M, Mensch und Sicherheit, Bd. 158. Bremerhaven: Wirtschaftsverl. NW Verl. für neue Wiss 2004
 - [6] Gramberg-Danielsen, B., Hartmann, E. u. Giehring, H.: Der Dunkelheitsunfall. 12 Tabellen. Stuttgart: Enke 1984
 - [7] Rumar, K.: The Role of Perceptual and Cognitive Filters in Observed Behavior. Human Behavior and Traffic Safety. Boston: Springer US 1986, S. 151–170
 - [8] Schlag, B., Petermann, I., Schulze, C. u. Weller, G.: Mehr Licht - mehr Sicht - mehr Sicherheit? Zur Wirkung verbesserter Licht-
-

- und Sichtbedingungen auf das Fahrerverhalten. Verkehrspsychologie. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden 2009
- [9] Maderthaner, R.: Psychologie. UTB UTB basics, Bd. 2772. Wien: Facultas 2010
- [10] Goldstein, E. B.: Wahrnehmungspsychologie. Der Grundkurs. Lehrbuch. Berlin, Heidelberg: Springer 2015
- [11] Campenhausen, C. von: Die Sinne des Menschen. Flexible Taschenbücher Bio. Stuttgart: Thieme 1981
- [12] Schmidt, R. F.: Physiologie des Menschen. [Place of publication not identified]: Springer 1996
- [13] Domnick, I.: Probleme sehen - Ansichtssache. Wahrnehmung von kartographischen Darstellungen als visuelle Kommunikationsmittel in der Entwicklungszusammenarbeit. Zugl.: Berlin, Freie Univ., Diss., 2005. Geo3-Forum, Bd. 1. Berlin: Geo3 Institut für Geoforschung der Technischen Fachhochschule (TFH) Berlin 2005
- [14] Schmid, S.: Steuern, Wahrnehmung und Entscheidungsprozesse. Eine interdisziplinäre Analyse der Wirkungen menschlicher Informationsverarbeitung auf Steuersysteme. SpringerLink Bücher. Wiesbaden: Gabler Verlag 2012
- [15] Engelkamp, J. u. Zimmer, H. D.: Lehrbuch der kognitiven Psychologie. Göttingen: Hogrefe 2006
- [16] Kokoschka, S.: Grundlagen der Lichttechnik, Vorlesungsskript 2003

- [17] Bach, M., Wesemann, W., Kolling, G., Bühren, J., Krastel, H. u. Schiefer, U.: Photopisches Kontrastsehen. Ortliche Kontrastempfindlichkeit Nr. 1, 2008
- [18] Wesemann, W.: Die Grenzen der Sehschärfe, Teil 4. Wie misst man die Sehschärfe richtig? Regeln und Probleme. DOZ (2002) 2, S. 32–38
- [19] DIN EN ISO 8596:2016-11. *Augenoptik - Sehschärfeprüfung - Normsehzeichen und klinische Sehzeichen und ihre Darbietung*, abgerufen am: 08.08.2017
- [20] Wesemann, W., Schiefer, U. u. Bach, M.: Neue DIN-Normen zur Sehschärfebestimmung. *Der Ophthalmologe : Zeitschrift der Deutschen Ophthalmologischen Gesellschaft* 107 (2010) 9, S. 821–826
- [21] Schierz, C.: Die Psychophysik der Wahrnehmungsschwelle: Von Weber und Fechner zur Signaldetektionstheorie. Tagungsband Lux Junior 2013. 2013
- [22] Hentschel, H.-J.: *Licht und Beleuchtung. Theorie und Praxis der Lichttechnik*. Heidelberg: Hüthig 1994
- [23] Eckert, M.: *Lichttechnik und optische Wahrnehmungssicherheit im Straßenverkehr*. Berlin: Verl. Technik 1993
- [24] Brettel, H.: *Die Sofortadaptation, eine Konsequenz der retinalen Empfindlichkeitsregelung*, Ludwig-Maximilians-Universität Dissertation. München 1981
- [25] Greule, R.: *Kontrastschwellen bei transienter Adaptation*, Universität Karlsruhe Dissertation. Karlsruhe 1993
- [26] Baker, H. D., Doran, M. D. u. Miller, K. E.: *Early Dark Adaptation to Dim Luminances**, Bd. 49. 1959

- [27] Battersby, W. S. u. Wagman, I. H.: Neural Limitations of Visual Excitability I The Time Course of Monocular Light Adaptation*, Bd. 49. 1959
- [28] Crawford, B. H.: Photochemical Laws and Visual Phenomena, Bd. 133. 1946
- [29] Kuhl, P.: Anpassung der Lichtverteilung des Abblendlichtes an den vertikalen Straßenverlauf. Zugl.: Paderborn, Univ., Diss., 2006. HNI-Verlagsschriftenreihe, Bd. 195. Paderborn: HNI Heinz-Nixdorf-Inst. Univ. Paderborn 2006
- [30] Hartmann, E.: Untersuchungen zur physiologischen Blendung, Ludwig-Maximilians-Universität Dissertation. München 1962
- [31] Franssen, L. u. Coppens, J. E.: Straylight at the retina. Scattered papers. [S.l., Amsterdam: s.n.]; Universiteit van Amsterdam [Host] 2007
- [32] Blendung - Theoretischer Hintergrund. Informationen des Instituts für Arbeitsschutz der DGUV, Wittlich, M.
- [33] Niedling, M.: Zum Einfluss des Spektrums auf die Blendung. Untersuchungen zur Wirkung des kurzwelligen Strahlungsanteils auf die physiologische und psychologische Blendung. Schriftenreihe Fachgenbiet Lichttechnik, Band 13. Berlin: Universitätsverlag der TU Berlin 2019
- [34] Lammers, T.: Komplexitätsmanagement für Distributionssysteme. Konzeption eines strategischen Ansatzes zur Komplexitätsbewertung und Ableitung von Gestaltungsempfehlungen. Zugl.: Hamburg-Harburg, Techn. Univ., Inst. für Logistik und Unternehmensführung, Diss., 2012. Reihe, Bd. 11. Lohmar: Eul 2012

- [35] UNECE: Regulation No. 48 Revision 12. ECE R48. 2014
- [36] UNECE: Regulation No. 98. ECE R 98. 2012
- [37] UNECE: Regulation No. 112 Rev. 3. ECE R 112. 2013
- [38] UNECE: Regulation No. 123 Revision 2. ECE R123. 2013
- [39] Michenfelder, S.: Einfluss einer ambienten Innenraumbeleuchtung auf das Kontrastsehen des Fahrzeugführers, Karlsruher Institut für Technologie Diplomarbeit. Karlsruhe 2010
- [40] Jebas, C.: Optimierung der Beleuchtung von Personenwagen und Nutzfahrzeugen. [Bericht zum Forschungsprojekt FE 82.273/2004]. Berichte der Bundesanstalt für Strassenwesen F, Fahrzeugtechnik, Bd. 66. Bremerhaven: Wirtschaftsverl. NW Verl. für Neue Wissenschaft 2008
- [41] Bockelmann, W. D.: Auge — Brille — Auto. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 1987
- [42] Zydek, B.: Blendungsbewertung von Kraftfahrzeugscheinwerfern unter dynamischen Bedingungen, Technische Universität Darmstadt Dissertation. Darmstadt 2014
- [43] Hella KG Hueck & Co. (Hrsg.): Hella Licht. Research & Development Review 2000. Paderborn 2000
- [44] Matschke, J.: Nächtliche Blendsituationen auf der Landstraße, Fachhochschule Köln Bachelorarbeit. Jena 2010
- [45] Dannenmaier, M.: Evaluierung realer Blendsituationen im Straßenverkehr, Karlsruher Institut für Technologie Bachelorarbeit. Karlsruhe 2017
- [46] Kosmas, K.: Entwicklung eines Gerätes zur Einstellung der Lage der Lichtstärkeverteilung von Kfz Scheinwerfern, Technische Universität Darmstadt Bachelorarbeit. Darmstadt 2013

- [47] Schäfer, S.: ASSIST – Die erste Generation selbstjustierender Scheinwerfer. Tagungsband Lux Junior 2015. 2015
- [48] Reisinger, B., Winterer, N. u. Reinprecht, M.: Auf der Suche nach der Auflösung. Überlegungen zu hochauflösenden Scheinwerfersystemen. Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik. 7. VDI-Tagung, Karlsruhe, 11. und 12. Mai 2016. VDI-Berichte, 7 // 2278. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH; VDI-Verl. 2016
- [49] Ersoy, M. u. Gies, S.: Fahrwerkhandbuch. Grundlagen - Fahrdynamik - Fahrverhalten- Komponenten - Elektronische Systeme - Fahrerassistenz - Autonomes Fahren- Perspektiven. ATZ / MTZ-Fachbuch. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden 2017
- [50] Lehnert, P.: Auswirkungen der Fahrzeugdynamik auf die Lichtverteilung von Scheinwerfern. Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2001. Darmstädter Lichttechnik. München: Utz 2001
- [51] Damasky, J.: Lichttechnische Entwicklung von Anforderungen an Kraftfahrzeugscheinwerfer, Technische Universität Darmstadt Dissertation. Darmstadt 1995
- [52] Huhn, W.: Anforderungen an eine adaptive Lichtverteilung für Kraftfahrzeugscheinwerfer im Rahmen der ECE-Regelungen. Techn. Univ., Diss.--Darmstadt, 1999. Darmstädter Lichttechnik. München: Utz 1999
- [53] Brahim, M.: Evaluierung maximaler Lichtstärken für unterschiedliche Scheinwerfersysteme unterhalb der HDG, Karlsruher Institut für Technologie Bachelorarbeit. Karlsruhe 2018

- [54] Steinborm, W.: Evaluation realer Blendzeiten im Straßenverkehr, Karlsruher Institut für Technologie Bachelorarbeit. Karlsruhe 2017
- [55] Hummel, B.: Blendfreies LED-Fernlicht. Audi Dissertationssreihe, v.30. Göttingen: Cuvillier Verlag 2010
- [56] Andreas Pfeffer: Digitalisierung der Beleuchtungstechnik. Hella setzt LCDs im LED-Scheinwerfer ein. Funktionsprinzip, 2017. <http://www.elektroniknet.de/elektronik-automotive/assistentensysteme/hella-setzt-lcds-im-led-scheinwerfer-ein-143038-Seite-3.html>, abgerufen am: 08.01.2018
- [57] Böhm, G.: Reduzierung der mechanischen Komplexität bei gleichzeitiger Erhöhung der Funktionalität von Scheinwerfersystemen. 2012
- [58] Gut, C., Petersen, A., Jahn, P., Seitz, M., Neumann, C. u. Berlitz, S.: Das ideale Licht: Mikromechanischer Matrix Laser Scheinwerfer. Elektronik im Fahrzeug (ELIV). Baden-Baden 2015
- [59] Armbruster, T., Lehmann, U. u. Ament, C.: Car2X-basierte Lichtsysteme. Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik. 6. VDI Tagung // 6. VDI-Tagung, Karlsruhe, 06. und 07. Mai 2014. VDI-Berichte, 6 // 2221. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH; VDI-Verl. 2014
- [60] Omerbegovic, S.: Prädiktive Lichtfunktionen für volladaptive Scheinwerfersysteme. Zugl.: Karlsruhe, KIT, Diss., 2019. Spektrum der Lichttechnik, Bd. 20. Karlsruhe, Baden: KIT Scientific Publishing 2019

- [61] Völker, S.: Blendung durch Kfz-Scheinwerfer im nächtlichen Straßenverkehr. Ein Review bis 2006 - Beschreibung, Maßzahlen, Bewertungsmethoden. Schriftenreihe des Fachgebietes Lichttechnik, Bd. 10. Berlin: Universitätsverlag der TU Berlin 2017
- [62] Crawford, B. H.: Visual Adaptation in Relation to Brief Conditioning Stimuli. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences 134 (1947) 875, S. 283–302
- [63] Baker, H. D.: Initial stages of dark and light adaptation. Journal of the optical society of america 53 (1963), S. 98–103
- [64] Herkner, W.: Psychologie. Vienna, s.l.: Springer Vienna 1986
- [65] Bortz, J. u. Döring, N.: Forschungsmethoden und Evaluation. Springer-Lehrbuch. Berlin, Heidelberg: Springer 1995
- [66] Hartung, J., Elpelt, B. u. Klösener, K.-H.: Statistik. Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik ; [mit zahlreichen durchgerechneten Beispielen]. München: Oldenbourg 2009
- [67] Fechner, G. T.: Elemente der Psychophysik. Leipzig: Breitkopf und Härtel 1860
- [68] Technische Universität Ilmenau (Hrsg.): Tagungsband Lux Junior 2017. 2017
- [69] VDI Verlag GmbH (Hrsg.): Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik. 8. VDI-Tagung, Karlsruhe, 05. und 06. Juni 2018. 2018
- [70] Helmer, M.: Messmethoden zur Bewertung dynamischer Blendsituationen. In: Schweizer Licht Gesellschaft (Hrsg.): Tagungsband LICHT2018. 23. Europäischer Lichtkongress vom 9.-12. September in Davos. 2018

- [71] Holladay, L. L.: The Fundamentals of Glare and Visibility. Journal of the optical society of america 12 (1926) 4, S. 271
- [72] Hartmann, E.: Die Sofortadaptation und ihre Bedeutung für den Sehvorgang, Ludwig-Maximilians-Universität Habilitationsschrift. München 1968
- [73] Insurance Institute for Highway Safety: Headlight Test and Rating Protocol. <https://www.iihs.org/iihs/ratings/ratings-info/headlight-evaluation>, abgerufen am: 27.11.2018
- [74] Luckiesh, M. u. GUTH, S. K.: Brightnesses in visual field at borderline between comfort and discomfort. Illuminating engineering 44 (1949) 11, S. 650–670
- [75] Walkling, A. u. Schierz, C.: Schwellenuntersuchung zur physiologischen Blendung für ortsfeste Straßenbeleuchtung, Technische Universität Ilmenau Dissertation 2016
- [76] Glare and uniformity in road lighting installations. Technical report / CIE, Bd. 31. Vienna: CIE Central Bureau 1990
- [77] DIN 13021-3:2015. *Straßenbeleuchtung – Teil 3: Berechnung der Güteermkmale*, abgerufen am: 06.12.2018
- [78] Mace, D., Gravey, P., Porter, R., Schwab, R. u. Adrian, W.: Countermeasures for Reducing the Effects of Headlight Glare. Washington, DC 2001
- [79] Freyer, M.: Einfluss der Blendbeleuchtungsstärke und der Leuchtdichte auf die Blendung und den Schwellenkontrast bei homogenen und inhomogenen Umfeld, Hochschule Anhalt Diplomarbeit 2004
- [80] Raphael, S.: Blendungsbewertung von Scheinwerfern. Untersuchungen und Bewertung des Einflusses der

Beleuchtungsstärke am Auge, der Leuchtdichte und der Größe der leuchtenden Fläche auf das Blendempfinden und Kontrastempfinden, Technische Universität Ilmenau Diplomarbeit. Ilmenau 2004

- [81] Hamburger, F. A.: Das Sehen in der Dämmerung. Physiologie und Klinik. Vienna: Springer Vienna 1949
- [82] Yan, S.: Über die Wirkung modalitätsspezifischer Hinweisreize im ikonischen Gedächtnis, Georg-August-Universität Dissertation. Göttingen 2002
- [83] Klebelsberg, D.: Verkehrspsychologie. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 1982
- [84] The Interpretation of Reaction Time in Information Processing Research Nr. 45, Pachella, R. G., 1973
- [85] Thienes, G.: Motorische Schnelligkeit bei zyklischen Bewegungsabläufen. Zugl.: Dortmund, Univ., Diss., 1998. SportSpektrum, Bd. 6. Münster: Lit 1998
- [86] Bredenkamp, J.: Theorie und Planung Psychologischer Experimente. Heidelberg, s.l.: Steinkopff 1980
- [87] Solso, R. L. u. Reiss, M.: Kognitive Psychologie. Mit 14 Tabellen. Springer-Lehrbuch. Heidelberg: Springer 2005
- [88] Albert, D., Pawlik, K., Stapf, K.-H., Stroebe, W. u. Nährer, W.: Schnelligkeit und Güte als Dimensionen kognitiver Leistung, Bd. 19. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 1986
- [89] Insurance Institute for Highway Safety: Rationale and Supporting Work for Headlight Test and Rating Protocol, 2015. <https://www.iihs.org/iihs/ratings/technical-information/technical-protocols>, abgerufen am: 07.01.2019

- [90] Atkinson, R. C. u. Shiffrin, R. M.: Human Memory. A Proposed System and its Control Processes. In: Spence, K. W. u. Spence, J. T. (Hrsg.): The psychology of learning and motivation. Advances in research and theory. Psychology of Learning and Motivation. New York: Academic P 1968, S. 89–195
- [91] Sperling, G.: The information available in brief visual presentations. Psychological Monographs: General and Applied 74 (1960) 11, S. 1–29
- [92] Miller, G. A.: The magical number seven, plus or minus two. Some limits on our capacity for processing information. Psychological Review 63 (1956) 2, S. 81–97
- [93] Walter, D.: Nutzungsweisen bei der Verwendung von Tablet-Apps. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden 2018
- [94] Rapp, I.: Messung der visuellen Leistungsfähigkeit zur Bewertung dynamischer Blendsituationen, Karlsruher Institut für Technologie Bachelorarbeit. Karlsruhe 2018
- [95] Schulz, T.: Ikonisches Gedächtnis. untersucht am Paradigma der Einzelitemauslese, Psychologisches Institut der Ruhr-Universität Bochum Bericht. Bochum
- [96] Baddeley, A., Thomson, N. u. Buchanan, M.: Word Length and the Structure of Short-Term-Memory. Journal of verbal learning and verbal behavior (1975) 14, S. 575–589
- [97] Christof Zölch: Zur Messung sich entwickelnder zentral-exekutiver Basisprozesse bei Vor- und Grundschulkindern mit der Random Generation Aufgabe, Katholischen Universität Eichstätt-Ingolstadt Dissertation. Eichstätt-Ingolstadt 2015

- [98] Rossow, B., Cavazos, H. u. Wesemann, W.: Untersuchungsmethoden und Sinnesphysiologie. Normgerechte Sehschärfestimmung mit Buchstaben. *Augenärztliche Fortbildung* (1990) 13, S. 105–114
- [99] Schriften 1451 Teil2:1986-02. *Serifenlose Linear-Antiqua*
- [100] Walschus, C.: Zeitdiskrete visuelle Leistungsmessung zur Bewertung dynamischer Blendsituationen, Karlsruher Institut für Technologie Bachelorarbeit. Karlsruhe 2018
- [101] Döring, N. u. Bortz, J. (Hrsg.): *Forschungsmethoden und Evaluation in den Sozial- und Humanwissenschaften*. Springer-Lehrbuch. Berlin, Heidelberg: Springer 2016
- [102] Holz, F. G., Pauleikhoff, D., Spaide, R. F. u. Bird, A. C.: *Altersabhängige Makuladegeneration*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2011
- [103] Cohen, J.: *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*. Hoboken: Taylor and Francis 2013

IV ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 2.1:	Das <i>EVA-Prinzip</i> übertragen auf den visuellen Wahrnehmungsprozess des Menschen.....	6
Abbildung 2.2:	Landolt-Ring [19].....	9
Abbildung 2.3:	Zeitlicher Verlauf der Dunkeladaptation nach einer plötzlichen Leuchtdichteänderung gemäß Hartmann zitiert in Kuhl [29] und Greule [25] mit VZ-Vorzeiteffekt, α - bzw. Sofortadaptation, β - bzw. Zapfenadaptation und γ - bzw. Stäbchenadaptation.....	13
Abbildung 2.4:	Visualisierung der Streulichtbildung im Auge und deren Folgen auf die Sichtbarkeit des Fußgängers und anderer Objekte in der Verkehrsszene [31]	15
Abbildung 3.1:	Winkelpositionen für die vorgeschriebenen photometrischen Werte des Abblendlichts für Rechtsverkehr [38], magenta Linie: Hell-Dunkel-Grenze, gestrichelte magenta Linie: statische Augenlinie	20
Abbildung 3.2:	Statische und dynamische Augenlinie des entgegenkommenden Fahrers mit einer Augenhöhe h_{Auge} von 1,13 m in der Lichtverteilung eines Gasentladungsscheinwerfers [50]	29

- Abbildung 3.3:** Prinzipskizze der überlagerten Lichtverteilung zweier Scheinwerfer in 25 m Entfernung bei einem Einbauabstand von 1,60 m (grün: linker Scheinwerfer, blau: rechter Scheinwerfer) inkl. der relevanten Punkte *B50Links*, *B50Rechts*, *50Links*, *50Rechts*, *Bmax,links*, *Bmax,rechts* und des Auswertebereichs mit einer vertikalen Ausdehnung von 1° und einer horizontalen Ausdehnung von 4° . L=Left/Links, R=Right/Rechts, U=Up/oben, D=Down/unten.....33
- Abbildung 3.4:** Gemessene Lichtstärken an horizontaler Position der Punkte 50L für jeden vermessenen Scheinwerfer inklusive dem gesetzlich zulässigen Bereich (grau hinterlegt) im Verhältnis zum festgesetzten Blendungsgrenzwert von 1250 cd und errechnetem Mittelwert der Grenzüberschreitung um Faktor 11.....34
- Abbildung 3.5:** Gemessen Lichtstärken an horizontaler Position von Punkt *Bmax* für jeden vermessenen Scheinwerfer im Verhältnis zum festgesetzten Blendungsgrenzwert von 1250 cd und errechnetem Mittelwert der Grenzüberschreitung um Faktor 16.....34
- Abbildung 3.6:** Beispielhafter Verlauf der Lichtstärke in cd in Abhängigkeit der Zeit in s nach

	Steinborm [54] inklusive Grenzwert bei 1250 <i>cd</i> und Blendimpuls-dauer <i>t_B</i>	43
Abbildung 3.7:	Häufigkeitsverteilung der ermittelten Blendimpulsdauern nach Steinborm [52]	43
Abbildung 3.8:	Geometrische Leuchtweite in einer Ebene und in einer Wanne sowie geometrische Leuchtweite in einer Ebene und auf einer Kuppe [29].....	44
Abbildung 3.9:	Prinzipieller Versuchsaufbau der nachgestellten Begegnungssituation mit Versuchsfahrzeug 1 (Ausgestattet mit Beleuchtungsstärkemesskopf und an definierter Position platziert), Versuchsfahrzeug 2 (Überfahren der Kabelbrücke mit $v_1 =$ Schrittgeschwindigkeit, $v_2 = 20\text{km}/$ h und $v_3 = 30\text{km}/h$ und verfügt über unterschiedliche Fahrwerkseinstellmöglichkeiten) sowie der Kabelbrücke in 25 <i>m</i> Entfernung zum Beleuchtungsstärkemesskopf	45
Abbildung 3.10:	Gemessene Beleuchtungsstärke beim Überfahren der Kabelbrücke in 25 <i>m</i> Entfernung mit Schrittgeschwindigkeit zur Bestimmung der Blendimpulsdauer <i>t_B</i> bei den Fahrwerkseinstellungen Dynamic, Comfort und Lift	47
Abbildung 3.11:	Gemessene Beleuchtungsstärke beim Überfahren der Kabelbrücke in 25 <i>m</i>	

	Entfernung mit einer Geschwindigkeit von 20 kmh zur Bestimmung der Blendimpulsdauer tB bei den Fahrwerkseinstellungen Dynamic, Comfort und Lift.....	47
Abbildung 3.12:	Gemessene Beleuchtungsstärke beim Überfahren der Kabelbrücke in 25 m Entfernung mit einer Geschwindigkeit von 30 kmh zur Bestimmung der Blendimpulsdauer tB bei den Fahrwerkseinstellungen Dynamic, Comfort und Lift.....	48
Abbildung 4.1:	Prinzipieller zeitlicher Verlauf der visuellen Leistungsfähigkeit für eine Situation mit sich verändernden Lichtverhältnissen; tB - Blendimpulsdauer, tR - Readaptationszeit, ΔVP - relative visuelle Leistungsfähigkeit.....	53
Abbildung 4.2:	(1) Grenzmethode, (2) Herstellungsmethode und (3) Konstanzmethode zur Ermittlung des Schwellenkontrastes KS	58
Abbildung 4.3:	Prinzipieller zeitlicher Verlauf der visuellen Leistungsfähigkeit für eine transiente Blendsituation; tB - Blendimpulsdauer, tR - Readaptationszeit, ΔVP - relative visuelle Leistungsfähigkeit	64
Abbildung 4.4:	Zeitlicher Verlauf eines Durchgangs der Schwellenkontrastmethode mit tB : Blendimpulsdauer und tD :	

	Darbietungsdauer	Landolt-Ring;	
	Probandenreaktion:	Benennung der	
	Öffnungsrichtung.....		68
Abbildung 4.5:	Zeitlicher Verlauf eines Durchgangs der		
	Readaptationsmethode mit tB :		
	Blendimpulsdauer und tD :		
	Darbietungsdauer	Landolt-Ring;	
	Probandenreaktion: Betätigung des Tasters		
	unmittelbar nach Identifizierung der		
	Öffnungsrichtung.....		70
Abbildung 4.6:	Zeitlicher Verlauf der Leuchtdichte- und		
	Testzeichendarbietung nach Greule [25] mit		
	ΔT - Pulsdauer der geringeren bzw.		
	erhöhten Leuchtdichte, Δt -		
	Darbietungsdauer des Testzeichens und τ -		
	Zeit zwischen Niveauwechsel und		
	Testzeichendarbietung		76
Abbildung 4.7:	Verlauf der Φ -Werte		
	(Schwellenerhöhungsfaktor/Kontrast-		
	erhöhung) nach einem Helladaptationspuls		
	($8\text{ cdm}^2 - 6000\text{ cdm}^2 - 8\text{ cdm}^2$) mit		
	variabler Pulsdauer ΔT (Buchstaben als		
	Testzeichen) nach Greule [25].....		78
Abbildung 5.1:	Itemdarbietung nach Sperling [91]		88
Abbildung 5.2:	Konzeptionierte Matrizen: (1) 2x4-Matrix,		
	(2) kleine 2x4-Matrix, (3) 1x8-Matrix, (4)		
	1x7-Matrix, (5) Kreisanordnung, (6) Wolke		
	(willkürliche Position innerhalb des		
	Sichtfeldes)		97

Abbildung 5.3:	Unterschiedliche Erkennbarkeit von Buchstaben [18]	102
Abbildung 5.4:	Ausgewählter Itempool	102
Abbildung 5.5:	Prinzipiskizze der MeLLI-Methode inkl. zeitlicher Verlauf der visuellen Leistungsfähigkeit anhand der Anzahl korrekt benannter Buchstaben in Abhängigkeit der gewählten Interstimulusintervalle (ISI)	106
Abbildung 5.6:	Zeitlicher Verlauf eines Durchgangs der MeLLI-Methode mit tB : Blendimpulsdauer, Interstimulusintervall (ISI *)variabel, tD : Darbietung der 2x4-Buchstabenmatrix für 50 ms ; Probandenreaktion: verbale Berichterstattung aller erkannten Buchstaben.....	107
Abbildung 6.1:	Draufsicht des Versuchsstands.....	113
Abbildung 6.2:	Versuchsaufbau aus Sicht des Probanden.....	113
Abbildung 6.3:	Bemaßung der Buchstabenmatrix [100].....	114
Abbildung 6.4:	Chronologische Abfolge einer Testsituation mit Blendung [94]	117
Abbildung 6.5:	Linke Skala: Berechnete Mittelwerte und einfache Standardabweichung aus Durchgang 3 (x) mit Blendung in Abhängigkeit des gewählten ISIs; dunkel hinterlegt: Berechneter Mittelwert und einfache Standardabweichung aus Durchgang 4; rechte Skala: relative visuelle	

	Leistungsfähigkeit (normiert auf die ursprüngliche visuelle Leistungsfähigkeit aus Durchgang 4); Die grün- blaugestrichelte Trendline des zeitlichen Verlaufs der relativen visuellen Leistungsfähigkeit nach einem Blendimpuls mit 24 lx und 500 ms Dauer 124	124
Abbildung 6.6:	Linke Skala: im Mittel korrekt benannte Buchstaben aus Durchgang 4 (o,x, Δ) mit Blendung in Abhängigkeit des gewählten ISIs; dunkel hinterlegt: Berechneter Mittelwert und einfache Standardabweichung aus Durchgang 5; rechte Skala: relative visuelle Leistungsfähigkeit (normiert auf die maximale visuelle Leistungsfähigkeit aus Durchgang 5) 133	133
Abbildung 6.7:	Linke Skala: Berechnete Mittelwerte und einfache Standardabweichung aus Durchgang 2 (x) mit Blendung in Abhängigkeit des gewählten ISIs; grau hinterlegt: Berechneter Mittelwert und einfache Standardabweichung aus Durchgang 3; rechte Skala: relative visuelle Leistungsfähigkeit (normiert auf die maximale visuelle Leistungsfähigkeit aus Durchgang 3) 140	140
Abbildung 7.1:	Erkennbarkeitswahrscheinlichkeiten der Buchstaben aus dem Itempool aus den	

	Durchgängen 4 und 5 der Studie zur variablen Blendimpulsdauer.....	149
Abbildung 7.2:	Anzahl der im Mittel korrekt benannten Buchstaben in Abhängigkeit der Interstimulusintervalle (ISIs) und dargebotenen Kontraste der Buchstaben $KW, zeitdiskret = 1,2$; $KW, Blendimpuls = 2,1$ und $KW, max = 18$ bei einer Blendimpulsdauer tB von 500 ms und einer Beleuchtungsstärke EB von 24 lx;.....	151
Abbildung 7.3:	Visualisierung der zeitdiskreten Abtastung und der Bestimmung der relativen visuellen Leistungsfähigkeit ΔVP am Beispiel der Messergebnisse der Studie zur variablen Blendimpulsdauer für eine Blendimpulsdauer $tB = 2000 ms$	156
Abbildung B.1:	Leuchtdichtebild in logarithmischer Darstellung in 7 Dekaden eines Ausschnittes mit Blendquelle mit $EB = 7,5 lx$ und Buchstabenmatrix bei aktiver Umfeldbeleuchtung. Die grünen kreisförmigen Bereiche um der Blendquelle und rechts über der Matrix resultieren aus Reflexionen und Streulicht an den Linsen der Leuchtdichtekamera. Mit bloßem Auge waren diese nicht sichtbar.	200
Abbildung B.2:	Leuchtdichtebild in logarithmischer Darstellung in 7 Dekaden eines Ausschnittes mit Blendquelle mit $EB =$	

7,5 lx und Fixationskreuz bei aktiver Umfeldbeleuchtung. Die grünen kreisförmigen Bereiche um der Blendquelle und rechts über der Matrix resultieren aus Reflexionen und Streulicht an den Linsen der Leuchtdichtekamera. Mit bloßem Auge waren diese nicht sichtbar. [100]..... 201

Abbildung B.3: Leuchtdichtebild in logarithmischer Darstellung in 7 Dekaden eines Ausschnittes mit nicht ausgeschalteter Blendquelle und Buchstabenmatrix bei aktiver Umfeldbeleuchtung. Die Schatten um die Ausschnittblenden für die Matrix resultiert aus dem Aufbau. Der Monitor wurde auf die Wand moniert, darauf dann der ND-Filter und darauf die Ausschnittblende für den 2°-Beobachter. [100]..... 202

V TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 2.1:	Einteilung und Bewertung der psychologischen Blendung nach <i>DeBoer-Skala</i> gemäß [32].....	16
Tabelle 3.1:	Positionen sowie Grenzwerte für Lichtstärke und daraus resultierender Beleuchtungsstärke in 25 m Entfernung für einen Scheinwerfer in ausgewählten Punkten bzw. Bereichen nach UNECE Regelung 123 [37]. L=Left/Links, U=Up/oben, D=Down/unten	21
Tabelle 3.2:	Vertikale Position sowie Grenzwerte für Lichtstärke und Beleuchtungsstärke in 25 m Entfernung für einen Scheinwerfer für ausgewählten Punkte nach ECE Regelung 123 [40] und Punkt <i>Bmax</i> (Nickwinkel 1,7°).....	31
Tabelle 3.3:	Ermittelte maximalen Blendimpulsdauern sowie maximale Beleuchtungsstärken für unterschiedliche Fahrwerkeinstellungen beim Überfahren einer Kabelbrücke in 25 m Entfernung mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten.....	49
Tabelle 4.1:	Reiz-Reaktionsmatrix in Anlehnung an die Signaldetektionstheorie; Allgemeine Beschreibung fett gedruckt; Übertragung	

	auf Erkennung und Benennung der Öffnungsrichtung des Landolt-Ringes in Klammern.....	55
Tabelle 4.2:	Kategorisierung der Blendsituationen	61
Tabelle 4.3:	Übersicht über die Teilprozesse der Reaktionszeit sowie deren Beschreibung und Dauer	72
Tabelle 5.1:	Ergebnisse der im Mittel korrekt benannten Buchstaben je Matrix für beide Darbietungszeiten von 500 ms und 50 ms	98
Tabelle 6.1:	Überblick über die durchgeführten Studien mit den Einflussparametern Blendimpulsdauer t_B , Blendbeleuchtungsstärke E_B , Darbietungsdauer der Buchstabenmatrix t_D , dargebotener Kontrast der Buchstabenmatrix K_{BM} entweder im individuell bestimmten Schwellenkontrast K_S oder technisch maximal möglichen Weber-Kontrast $K_{W,max}$ und der Interstimulusintervall (ISI).....	110
Tabelle 6.2:	Durchgänge, Parameter und Anzahl der Wiederholungen bzw. Durchläufe je Durchgang der Studie zur zeitdiskreten Abtastung; *)wird randomisiert	122
Tabelle 6.3:	Berechnete Mittelwerte, einfache Standardabweichung und Varianzkoeffizient für die jeweiligen ISIs sowie die getestete Situation ohne Blendung	

	(Durchgang 4) aus der Studie zur zeitdiskreten Abtastung.....	123
Tabelle 6.4:	Durchgänge, Parameter und Anzahl der Wiederholungen bzw. Durchläufe je Durchgang der Studie zur variablen Blendimpulsdauer; *)wird randomisiert.....	131
Tabelle 6.5:	Durchgänge, Parameter und Anzahl der Wiederholungen bzw. bzw. Durchläufe je Durchgang in der Studie zur Kontrastsensitivität; *)wird randomisiert.....	138
Tabelle 6.6:	Berechnete Mittelwerte, einfache Standardabweichung und Varianzkoeffizient für die jeweiligen ISIs sowie der Mittelwert und die einfache Standardabweichung für die getestete Situation ohne Blendung (Durchgang 3) aus der Studie zur Kontrastsensitivität.....	139
Tabelle B.1:	Fahrwerkseinstellungen und Eigenschaften....	197
Tabelle B.2:	Ergebnisse der im Mittel korrekt benannten Buchstaben für jeden Probanden (P1-P5) sowie der zugehörige Mittelwert der jeweiligen Matrix für eine Darbietungszeit von 500 ms [94]	198
Tabelle B.3:	Beschriftung Ergebnisse der im Mittel korrekt benannten Buchstaben für jeden Probanden (P1-P5) sowie der zugehörige Mittelwert der jeweiligen Matrix für eine Darbietungszeit von 50 ms [94]	199

Tabelle B.4: Erkennbarkeitswahrscheinlichkeiten der
Buchstaben aus dem gewählten Itempool 203

VI ANHANG

Anhang A: ABKÜRZUNGEN UND FORMELZEICHEN

A.1 ABKÜRZUNGEN

Abkürzung	Beschreibung
ADTF©	Automotive Data and Time-Triggered Framework
CAN	Controller Area Network
Car2X	Kommunikation zwischen Fahrzeug und Umwelt
CIE	Commission Internationale de l'Éclairage
EVA-Prinzip	Prinzip der Eingabe-Ausgabe-Verarbeitung
GUI	Graphical User Interface
HDG	Hell-Dunkel-Grenze
IIHS	Insurance Institute for Highway Safety
ISI	Interstimulusintervall

ANHANG

LED	Light-Emitting-Diode
MeLLI	Measurement of glaring Light stimuli with Letter Identification
TI	Threshold Increment
UGR	Unified Glare Rating
UKG	Ultrakurzzeitgedächtnis
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe

A.2 FORMELZEICHEN

Formelzeichen	Beschreibung
d	Durchmesser
K_W	Weber-Kontrast
L_O	Objektleuchtdichte
L_U	Umgebungsleuchtdichte
K_S	Schwellenkontrast
$L_{S,\ddot{a}q}$	Äquivalente Schleierleuchtdichte
c	Altersfaktor
E_B	Beleuchtungsstärke am Auge, Blendbeleuchtungsstärke
θ	Winkel zwischen Fixationspunkt und Blendquelle
E_{max}	Maximale Beleuchtungsstärke
E_{min}	Minimale Beleuchtungsstärke
I_{max}	Maximale Lichtstärke
I_{min}	Minimale Lichtstärke
h_{Auge}	Augenhöhe

$E_{max,50m}$	Maximale Beleuchtungsstärke in 50 m Entfernung
$E_{max,25m}$	Maximale Beleuchtungsstärke in 25 m Entfernung
B_{max}	Maximal zu erwartende Beleuchtungsstärke bei einem Nickwinkel von 1,7°
$B_{max,links}$	Maximal zu erwartende Beleuchtungsstärke bei einem Nickwinkel von 1,7° des linken Scheinwerfers
$B_{max,rechts}$	Maximal zu erwartende Beleuchtungsstärke bei einem Nickwinkel von 1,7° des rechten Scheinwerfers
$B50L_{rechts}$	Punkt B50L rechter Scheinwerfer
$B50L_{links}$	Punkt B50L linker Scheinwerfer
$50L_{links}$	Punkt 50L rechter Scheinwerfer
$50L_{rechts}$	Punkt 50L linker Scheinwerfer
t_B	Blendimpulsdauer
v	Geschwindigkeit
t	Zeitpunkt

ΔVP	Relative visuelle Leistungsfähigkeit, engl. Visual Performance
t_R	Readaptationszeit
f_p	Wahrscheinlichkeit für falsche Alarme
r_p	Wahrscheinlichkeit für Treffer
f_n	Wahrscheinlichkeit für Verpasser
r_n	Wahrscheinlichkeit für korrekte Zurückweisung
L_m	Mittlere Fahrbahnleuchtdichte
ΔC	Kontraständerung
t_D	Darbietungszeit der Items bzw. der Itemmatrix
$t_{R,ermittelt}$	Ermittelte Readaptationszeit
$t_{Reaktion}$	Reaktionszeit
ΔT	Blendimpulsdauer nach Greule
τ	Interstimulusintervall nach Greule
Δt	Darbietungszeit des Items nach Greule
Φ	Schwellenerhöhungsfaktor
P_{Item}	Ratewahrscheinlichkeit

ANHANG

n	Anzahl der vorhandenen Elemente
k	Anzahl der ausgewählten Elemente
K_{BM}	Dargebotener Kontrast der Buchstabenmatrix
$K_{W,max}$	Technisch maximal möglicher Weber-Kontrast

Anhang B: ALLGEMEINE ERGÄNZUNGEN

B.1 FAHRWERKSEINSTELLUNGEN

Tabelle B.1: Fahrwerkseinstellungen und Eigenschaften

Fahrwerks- einstellung	Niveauein- stellung	Bodenfrei- heit	Dämpfungscharak- teristik
Lift	Hoch	135 mm	weich
Comfort	Normal	120 mm	weich
Dynamic	Tief	105 mm	hart
	Tief (>130km/h)	105 mm	hart
Automatic	Normal	120 mm	weich
	(<70km/h)		

B.2 ERGEBNISSE VORSTUDIE

Tabelle B.2: Ergebnisse der im Mittel korrekt benannten Buchstaben für jeden Probanden (P1-P5) sowie der zugehörige Mittelwert der jeweiligen Matrix für eine Darbietungszeit von 500 ms [94]

	2x4	2x4 klein	1x8	1x7	Kreis	Wolke
P1	3,8	3,9	3,63	3,83	3,9	3,7
P2	3,77	3,83	3,77	3,97	4,57	4,3
P3	3,73	4,13	3,57	4,23	4,63	4,4
P4	5,6	5,63	4,23	4,83	4,63	5,2
P5	4,46	4,93	5,0	5,2	4,6	5,0
Mittelwert	4,27	4,8	4,04	4,41	4,47	4,52

Tabelle B.3: Beschriftung Ergebnisse der im Mittel korrekt benannten Buchstaben für jeden Probanden (P1-P5) sowie der zugehörige Mittelwert der jeweiligen Matrix für eine Darbietungszeit von 50 ms [94]

	2x4	2x4 klein	1x8	1x7	Kreis	Wolke
P1	3,63	3,6	2,37	2,53	2,93	3,07
P2	3,83	3,3	3,3	3,63	3,9	4
P3	4,13	3,9	3,1	3,4	4	3,77
P4	5,53	5,17	3,33	3,77	4,4	5,27
P5	4,07	4,3	4,17	4	3,77	4,07
Mittelwert	4,24	4,05	3,25	3,47	3,8	4,04

B.3 LEUCHTDICHTEBILDER

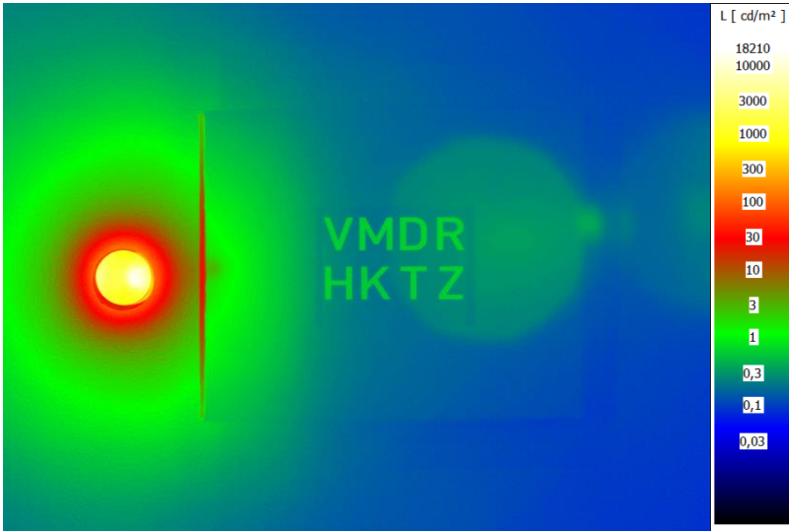


Abbildung B.1: Leuchtdichtebild in logarithmischer Darstellung in 7 Dekaden eines Ausschnittes mit Blendquelle mit $E_B = 7,5 \text{ lx}$ und Buchstabenmatrix bei aktiver Umfeldbeleuchtung. Die grünen kreisförmigen Bereiche um der Blendquelle und rechts für die Matrix resultieren aus Reflexionen und Streulicht an den Linsen der Leuchtdichtekamera. Mit bloßem Auge waren diese nicht sichtbar.

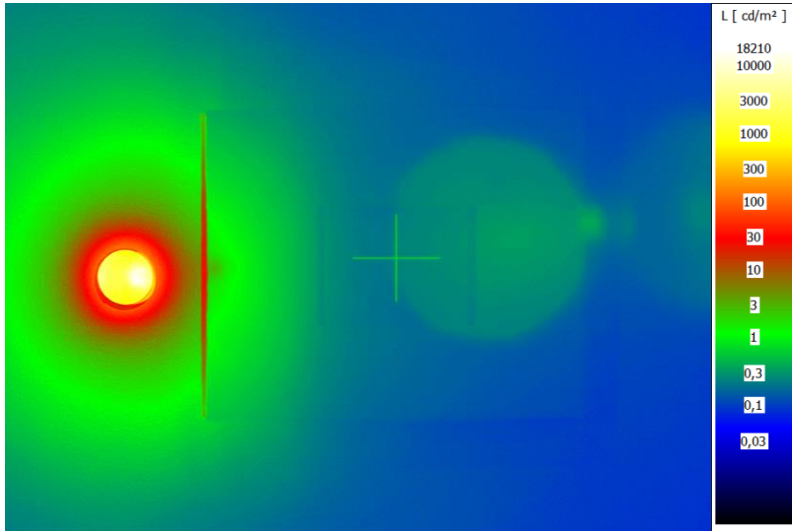


Abbildung B.2: Leuchtdichtebild in logarithmischer Darstellung in 7 Dekaden eines Ausschnittes mit Blendquelle mit $E_b = 7,5 \text{ lx}$ und Fixationskreuz bei aktiver Umfeldbeleuchtung. Die grünen kreisförmigen Bereiche um der Blendquelle und rechts über der Matrix resultieren aus Reflexionen und Streulicht an den Linsen der Leuchtdichtekamera. Mit bloßem Auge waren diese nicht sichtbar. [100]



Abbildung B.3: Leuchtdichtebild in logarithmischer Darstellung in 7 Dekaden eines Ausschnittes mit nicht ausgeschalteter Blendquelle und Buchstabenmatrix bei aktiver Umfeldbeleuchtung. Die Schatten um die Ausschnittblenden für die Matrix resultiert aus dem Aufbau. Der Monitor wurde auf die Wand moniert, darauf dann der ND-Filter und darauf die Ausschnittblende für den 2°-Beobachter. [100]

B.4 BUCHSTABENHÄUFIGKEIT

Tabelle B.4: Erkennbarkeitswahrscheinlichkeiten der Buchstaben aus dem gewählten Itempool

	Mittelwert [%]	Median [%]
C	26,25	22,22
D	25,87	22,00
F	29,94	25,00
H	26,47	25,00
K	20,24	17,00
M	31,86	29,00
N	29,32	27,00
P	28,70	25,00
R	24,10	20,00
S	30,72	29,00
T	35,44	33,00
V	28,14	25,00
X	24,78	22,00
Z	35,24	30,00

Anhang C: PROBANDENINSTRUKTIONEN

C.1 STUDIE ZUR ZEITDISKRETEN ABTASTUNG



Informationsblatt für Probanden

Sehr geehrte/r Teilnehmer/in,

vielen Dank für die Teilnahme an dem Versuch des Lichttechnischen Institutes. Bitte lesen Sie die nachfolgend aufgeführten Informationen aufmerksam durch.

Organisation

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Lichttechnisches Institut (LTI)
Abteilung: Optische Technologien im Automobil (OTIA)
Engesserstraße 13
76131 Karlsruhe

Projektleitung und Durchführung:

Melanie Helmer
M.Helmer@kit.edu

Isabell Rapp
Isabell.Rapp@student.kit.edu

Allgemeine Informationen:

Zur Vergleichbarkeit der einzelnen Messergebnisse ist es erforderlich, dass alle Teilnehmer unter den gleichen Voraussetzungen an der Studie teilnehmen. Sprechen Sie daher nach Ihrer Teilnahme an dem Versuch auf keinen Fall mit anderen Teilnehmern über Einzelheiten der Studie.

Sehtest:

Zu Beginn werden Sie einen Sehtest durchführen, um Ihre Sehleistung zu ermitteln. Bitte tragen Sie zum Versuch evtl. vorhandene Sehhilfen (z.B. Kontaktlinsen), sofern Sie letztere auch zum Sehtest verwendet haben.

Zunächst werden Ihnen Sehhilfen (siehe Abbildung 1) im Messgerät gezeigt. Ihre Aufgabe besteht darin, die Öffnung des Ringes zu erkennen.



Bitte benennen Sie die Öffnungen wie folgt:

- Oben
- Oben rechts/ rechts oben
- Rechts
- Unten rechts/ rechts unten
- Unten
- Unten links/ links unten
- Links
- Oben links/ links oben

Hauptversuch

Versuchsaufbau:

Während des Versuches sitzen Sie auf einem höhenverstellbaren Hocker. Stellen Sie vor Beginn des Versuches den Sitz auf eine geeignete Höhe ein. Bitte verändern Sie diese während der Versuchsdurchführung nicht. Für den Versuch ist ein permanent freies Blickfeld zum Monitor notwendig. Bitte legen Sie während der Testsequenzen das Kinn auf die dafür vorgesehene Stütze. Die Höhe der Kinnstütze darf nicht verstellt werden.

Links neben dem Monitor wird eine Blendeuchte zu sehen sein. Bitte konzentrieren Sie sich dennoch auf das Fixationskreuz auf dem Monitor. Der zeitliche Abstand zwischen Blendung und Matrixdarstellung kann variieren.

Bitte vermeiden Sie während der Versuchsdurchführung unnötige Gespräche und unterlassen Sie den Umgang mit einem Handy o. ä.. Sollten Sie Fragen zum Versuch haben, dürfen Sie diese selbstverständlich stellen.

Aufgabenstellung:

Der Versuchsleiter kündigt die erste Testsequenz von 10 Durchläufen mit Blendung an. Nun erkennt die Probandin oder der Proband bis zu acht Buchstaben und nennt diese mit Position. Die Buchstaben sind in einer 2x4 Matrix angeordnet.

Nach einer Pause erfolgt eine weitere Testsequenz mit 15 Durchläufen mit Blendung. Diese dient zur Feststellung des individuellen Schwellenkontrastes der Probandin oder des Probanden.

Nach jeweils einer Pause folgen zwei weitere Testsequenzen. Zunächst 40 Durchläufe mit Blendung und eine abschließende Sequenz mit 5 Durchgängen ohne Blendung.

Rechtliche Informationen:

Alle Angaben der Probanden werden selbstverständlich vertraulich behandelt. Die Datenanalyse erfolgt anonym und ohne Möglichkeit des Rückschlusses auf einzelne Versuchspersonen.

Ich habe das Informationsblatt für Probanden gelesen und verstanden.

Name des Probanden:

Unterschrift:

Telefon/E-Mail:

C.2 STUDIE ZUR VARIABLEN BLENDIMPULSDAUER



Informationsblatt für Testpersonen

Sehr geehrte Teilnehmerin, sehr geehrter Teilnehmer,

vielen Dank für die Teilnahme an dem Versuch des Lichttechnischen Institutes. Bitte lesen Sie die nachfolgend aufgeführten Informationen aufmerksam durch.

Organisation

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Lichttechnisches Institut (LTI)
Abteilung: Optische Technologien im Automobil (OTIA)
Engesserstraße 13
76131 Karlsruhe

Projektleitung und Durchführung:

Melanie Helmer
M.Helmer@kit.edu

Stephan Rupp
Stephan.Rupp@student.kit.edu

Allgemeine Informationen:

Zur Vergleichbarkeit der einzelnen Messergebnisse ist es erforderlich, dass alle Teilnehmer unter den gleichen Voraussetzungen an der Studie teilnehmen. Sprechen Sie daher nach Ihrer Teilnahme an dem Versuch auf keinen Fall mit anderen Teilnehmern über Einzelheiten der Studie.

Sehtest:

Zu Beginn werden Sie einen Sehtest durchführen, um Ihre Sehleistung zu ermitteln. Bitte tragen Sie zum Versuch evtl. vorhandene Sehhilfen (z.B. Kontaktlinsen), sofern Sie letztere auch zum Sehtest verwendet haben.

Zunächst werden Ihnen Sehobjekte (s. Abb. 1) im Messgerät gezeigt. Ihre Aufgabe besteht darin, die Öffnung des Ringes zu erkennen.



Abbildung 1: Landolt-Ring

Bitte benennen Sie die Öffnungen wie folgt

Oben
Oben rechts/ rechts oben
Rechts
Unten rechts/ rechts unten
Unten
Unten links/ links unten
Links
Oben links/ links oben

Hauptversuch

Versuchsaufbau:

Während des Versuches sitzen Sie auf einem höhenverstellbaren Hocker. Stellen Sie vor Beginn des Versuches den Sitz auf eine geeignete Höhe ein. Bitte verändern Sie diese während der Versuchsdurchführung nicht. Für den Versuch ist ein permanent freies Blickfeld auf das Display notwendig. Bitte legen Sie während der Testsequenzen das Kinn auf die dafür vorgesehene Stütze. Die Höhe der Kinnstütze darf nicht verstellt werden.

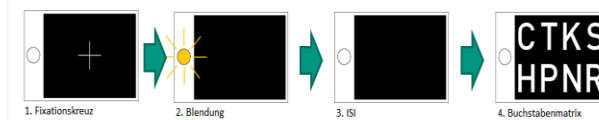


Abbildung 2: Ablauf einer Testsequenz

Ablauf einer Testsequenz (s. Abb. 2):

1. Zu Beginn einer Testsequenz wird ein Fixationskruz auf dem Display eingeblendet. Bitte konzentrieren Sie sich auf das Fixationskruz und halten Sie die Blickrichtung bei.
2. Nach dem Fixationskruz wird links neben dem Display eine Blendlichtquelle zu sehen sein. Bitte konzentrieren Sie sich dennoch auf das Fixationskruz auf dem Monitor.
3. Zeitlicher Abstand zwischen Blendung und Matrixdarstellung (ISI). Dieser Abstand kann variieren.
4. Einblendung der Buchstabenmatrix
5. Nennung der erkannten Buchstaben durch die Testperson direkt nach dem Erscheinen der Buchstabenmatrix.

Bitte vermeiden Sie während der Versuchsdurchführung unnötige Gespräche und unterlassen Sie den Umgang mit einem Handy o.Ä.. Sollten Sie Fragen zum Versuch haben, dürfen Sie diese selbstverständlich stellen.

Versuchsablauf:

Teil 1:

5 Sequenzen mit Blendung und Buchstabenmatrizen mit hohem Kontrast (s. Abb. 3 links) zur Eingewöhnung, danach 16 Sequenzen mit Blendung und Buchstabenmatrizen mit geringem Kontrast (s. Abb. 3 rechts). Der Kontrast der Buchstabenmatrizen ist bei diesen 16 Sequenzen variabel.



Abbildung 3: Buchstabenmatrix, links: hoher Kontrast, rechts: niedriger Kontrast

Die Testperson nennt die erkannten Buchstaben direkt nach jeder eingeblendeten Buchstabenmatrix. Falsche Nennungen sind möglich, keine Nennungen ebenfalls.

Teil 2:

15 Sequenzen: Blendung | variable Zeitabstände zwischen Blendung und Matrixdarstellung

Kurze Pause

15 Sequenzen: Blendung | variable Zeitabstände zwischen Blendung und Matrixdarstellung

Kurze Pause.

15 Sequenzen: Blendung | variable Zeitabstände zwischen Blendung und Matrixdarstellung

Auch bei diesen 45 Sequenzen nennt die Testperson die erkannten Buchstaben direkt nach jeder eingeblendeten Buchstabenmatrix. Falsche Nennungen sind möglich, keine Nennungen ebenfalls.

Teil 3:

5 Sequenzen ohne Blendung

Nennung der erkannten Buchstaben direkt nach jeder eingeblendeten Buchstabenmatrix. Falsche Nennungen sind möglich, keine Nennungen ebenfalls.

Rechtliche Informationen:

Alle Angaben der Testpersonen werden selbstverständlich vertraulich behandelt. Die Datenanalyse erfolgt anonym und ohne Möglichkeit des Rückschlusses auf einzelne Versuchspersonen.

Ich habe das Informationsblatt für Testpersonen gelesen und verstanden.

Ich möchte auch in Zukunft über Studien mit Testpersonen am LTI informiert werden:

Ja Nein (Zutreffendes ankreuzen)

Name der Testperson:

Datum:.....

Unterschrift:

C.3 STUDIE ZUR KONTRASTSENSITIVITÄT



Informationsblatt für Probanden

Sehr geehrte/r Teilnehmer/in,

vielen Dank für die Teilnahme an dem Versuch des Lichttechnischen Institutes. Bitte lesen Sie die nachfolgend aufgeführten Informationen aufmerksam durch.

Organisation

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Lichttechnisches Institut (LTI)
Abteilung: Optische Technologien im Automobil (OTIA)
Engesserstraße 13
76131 Karlsruhe

Projektleitung und Durchführung:

Melanie Helmer
M.Helmer@kit.edu

Clemens Walschus
Clemens.Walschus@student.kit.edu

Allgemeine Informationen:

Zur Vergleichbarkeit der einzelnen Messergebnisse ist es erforderlich, dass alle Teilnehmer unter den gleichen Voraussetzungen an der Studie teilnehmen. Sprechen Sie daher nach Ihrer Teilnahme an dem Versuch auf keinen Fall mit anderen Teilnehmern über Einzelheiten der Studie.

Sehtest:

Zu Beginn werden Sie einen Sehtest durchführen, um Ihre Sehleistung zu ermitteln. Bitte tragen Sie zum Versuch evtl. vorhandene Sehhilfen (z.B. Kontaktlinsen), sofern Sie letztere auch zum Sehtest verwendet haben.

Zunächst werden Ihnen Sehhilfsobjekte (siehe Abbildung 1) im Messgerät gezeigt. Ihre Aufgabe besteht darin, die Öffnung des Ringes zu erkennen.



Abbildung 1 Landoltring

Bitte benennen Sie die Öffnungen wie folgt:

- Oben
- Oben rechts/ rechts oben
- Rechts
- Unten rechts/ rechts unten
- Unten
- Unten links/ links unten
- Links
- Oben links/ links oben

Hauptversuch

Versuchsaufbau:

Während des Versuches sitzen Sie auf einem höhenverstellbaren Hocker. Stellen Sie vor Beginn des Versuches den Sitz auf eine geeignete Höhe ein. Bitte verändern Sie diese während der Versuchsdurchführung nicht. Für den Versuch ist ein permanent freies Blickfeld zum Monitor notwendig. Bitte legen Sie während der Testsequenzen das Kinn auf die dafür vorgesehene Stütze. Die Höhe der Kinnstütze darf nicht verstellt werden.

Links neben dem Monitor wird in der zweiten Testsequenz eine Blendleuchte zu sehen sein. Bitte konzentrieren Sie sich dennoch auf das Fixationskreuz auf dem Monitor. Der zeitliche Abstand zwischen Blendung und Matrixdarstellung kann variieren.

Bitte vermeiden Sie während der Versuchsdurchführung unnötige Gespräche und unterlassen Sie den Umgang mit einem Handy o.ä.. Sollten Sie Fragen zum Versuch haben, dürfen Sie diese selbstverständlich stellen.

Aufgabenstellung:

Der Versuchsleiter kündigt die erste Testsequenz von 30 Durchläufen ohne Blendung an. Nun erkennt die Probandin oder der Proband bis zu acht Buchstaben und nennt diese mit Position. Die Buchstaben sind in einer 2x4 Matrix angeordnet.

Nach jeweils einer Pause folgen zwei weitere Testsequenzen. Zunächst 30 Durchläufe mit Blendung und eine abschließende Sequenz mit 12 Durchgang ohne Blendung.

Rechtliche Informationen:

Alle Angaben der Probanden werden selbstverständlich vertraulich behandelt. Die Datenanalyse erfolgt anonym und ohne Möglichkeit des Rückschlusses auf einzelne Versuchspersonen.

Ich habe das Informationsblatt für Probanden gelesen und verstanden.

Name des Probanden:

Unterschrift:

Telefon/E-Mail:.....

Anhang D: VERÖFFENTLICHUNGEN

M. Helmer, C. Neumann

Altersbedingter Einfluss einer ambienten Innenraumbeleuchtung auf das Kontrastsehvermögen bei Nacht

Lux Junior 2013, Dörnfeld/Ilm (2013)

M. Helmer, S. Michenfelder, C. Neumann

Entwicklung und Verifizierung eines Simulationstools zur Bestimmung der Blendung über Fahrzeugspiegel

VDI-Tagung OTIF, Karlsruhe (2014)

M. Helmer, C. Neumann

Entwicklung und Verifizierung eines Simulationstools zur Bestimmung der Blendung über Fahrzeugspiegel

Licht 2014, Den Haag (2014)

M. Helmer, C. Neumann

Quantifying the distraction potential of blue accent light used in headlamps

International Symposium on Automotive Lighting, Darmstadt (2015)

A. Petersen, J. Hager, C. Gut, P. Jahn, M. Seitz, S. Schwaiger, U. Schlöder, M. Helmer, S. Berlitz, C. Neumann, O. Hering

Challenges for MEMS based Scanning Laser System

International Symposium on Automotive Lighting, Darmstadt (2015)

M. Helmer, C. Neumann

Quantifizierung des Blendpotentials laserbasierter Scheinwerfersysteme

VDI-Tagung OTIF, Karlsruhe (2016)

M. Helmer, C. Neumann

Quantifying the glare and distraction potential of laser based headlamp systems

SAE World Congress and Exhibition, Detroit (2016)

M. Helmer, C. Neumann

Quantifizierung des Blend- und Ablenkpentials laserbasierter Scheinwerfersysteme

LICHT 2016, Karlsruhe (2016)

M. Helmer, C. Jebas, C. Amman, C. Neumann

Glare Potential of a Laser Based Glare-Free High Beam System

ATZ 10/2016 (2016)

M. Helmer, C. Jebas, C. Amman, C. Neumann

Distraction Potential of a Blue Accent Light Used in Headlamps

ATZ 11/2016 (2016)

M. Helmer, C. Walschus, C. Neumann

Potentielle Messmethoden zur Bewertung dynamischer Blendsituationen

13. Lux Junior 2017 (2017)

M. Helmer, C. Walschus, C. Neumann

Messmethoden zur Bewertung dynamischer Blendsituationen

VDI-Tagung OTIF, Karlsruhe (2018)

M. Helmer, C. Walschus, C. Neumann

Messmethoden zur Bewertung dynamischer Blendsituationen

Licht 2018, Davos (2018)

Anhang E: BETREUTE ARBEITEN

E.1 BACHELORARBEITEN

Scholl, S.

Verifizierung eines Simulationstools zur Bestimmung der Blendung über Fahrzeugspiegel

Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe 2014

Cristea, Iulia

Blendbewertung von LED-Lichtquellen

Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe 2014

Wießner, M.

Blendungsbewertung von LED-Lichtquellen

Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe 2015

Baumann, M.

Einfluss von Blendlichtquellen auf die Erkennbarkeit von Landolt-Ringen in Bezug auf B50L

Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe 2016

Schwuchow, B.

Evaluation von verschiedenen Lichtquellen bei der psychologischen Blendbewertung von KFZ-Scheinwerfern

Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe 2016

Dannenmeier, M.

Evaluierung realer Blendsituationen im Straßenverkehr

Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe 2017

Steinborm, W.

Evaluation realer Blendzeiten im Straßenverkehr

Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe 2017

Brahim, M.

Evaluierung maximaler Lichtstärken für unterschiedliche Scheinwerfersysteme unterhalb der HDG

Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe 2018

Walschus, C.

Zeitdiskrete visuelle Leistungsmessung zur Bewertung dynamischer Blendsituationen

Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe 2018

Rapp, I.

Messung der visuellen Leistungsfähigkeit zur Bewertung dynamischer Blendsituationen

Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe 2018

Rupp, S.

Messung der visuellen Leistungsfähigkeit zur Bewertung dynamischer Blendsituationen

Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe 2019

E.2 MASTERARBEITEN

Nguyen Duy, T.

Quantifizierung des Ablenkpentials eines neuartigen Scheinwerfersystems

Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe 2014

Liu, J.

Homogeneity assessment based on the Spatial Standard Observer (SSO)

Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe 2019

Baumann, M.

Schattenfreie Projektionstechnologien zur Anwendung im automobilen Interieurbereich

Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe 2019

E.3 EXTERNE ABSCHLUSSARBEITEN

De Wille, M.

Mikroscannerkonzepte für hochaufgelöste dynamische Umfeldprojektionen im Kfz

Masterarbeit, BMW Group, Karlsruher Institut für Technologie, 2017

Krieff, F.

Erweiterung des Funktionsumfangs eines hochaufgelösten

Scheinwerfersystems

Masterarbeit, HELLA GmbH & Co. KGaA, Karlsruher Institut für Technologie, 2019